

**T.C.**  
**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**  
**SOSYAL BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**MALATYA İLİ ULAŞIM AĞININ**  
**OPTİMİZASYONU**  
**DOKTORA TEZİ**

**Danışman** **Hazırlayan**  
**Dr. Öğr. Üyesi Hasan SÖYLER** **Muhammed Şamil ŞIK**

MALATYA-2021

**T.C.**  
**İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ**  
**SOSYAL BİLİMLER ENSTİTÜSÜ**

**MALATYA İLİ ULAŞIM AĞININ OPTİMİZASYONU**

**EKONOMETRİ ANABİLİM DALI**

**DOKTORA TEZİ**

**Muhammed Şamil ŞİK**

**MALATYA-2021**

## ONUR SÖZÜ

Dr. Öğr. Üyesi Hasan SÖYLER'in danışmanlığında doktora tezi olarak hazırladığım **“Malatya İli Ulaşım Ağının Optimizasyonu”** başlıklı bu çalışmanın, bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurmaksızın tarafımdan yazıldığını ve yararlandığım bütün yapıtların hem metin içinde hem de kaynakçada yöntemine uygun biçimde gösterildiğini belirtir, bunu onurumla doğrularım.

.../.../...

Muhammed Şamil ŞİK

## BİLDİRİM

Hazırladığım tezin tamamen kendi çalışmam olduğunu ve her alıntıya kaynak gösterdiğimi taahhüt eder, tezimin kâğıt ve elektronik kopyalarının İnönü Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü arşivlerinde aşağıda belirttiğim koşullarda saklanmasına izin verdiğimi onaylarım.

- Tezimin tamamı her yerden erişime açılabilir.
- Tezim sadece İnönü Üniversitesi yerleşkelerinden erişime açılabilir.
- Tezimin 3 yıl süreyle erişime açılmasını istemiyorum. Bu sürenin sonunda uzatma için başvuruda bulunmadığım takdirde, tezimin tamamı her yerden erişime açılabilir.

.../.../...

Muhammed Şamil ŞIK

## TEŞEKKÜR

Doktora çalışmamın her aşamasında yardım, öneri ve desteğini esirgmeden beni yönlendiren danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan SÖYLER'e,

Bu süreçte göstermiş oldukları anlayış ve yardımlardan ötürü sayın hocalarım Prof. Dr. Ali KARCI'ya ve Prof. Dr. Mehmet GÜNGÖR'e,

Otobüs Rota Ağı Tasarımı konusunu anlamam ve uygulamasını yapabilmem hususunda bana zaman ayıran ve benden desteğini esirgemeyen sayın Dr. Obiora A. Nnene'ye

Malatya İli örneklem verilerini elde etmem konusunda bana yardımcı olan Agora Şehir Planlama firması adına Şehir Plancısı sayın Seyfullah TOPALOĞLU'na, ALTAŞ Mühendislik adına Şehir Plancıları sayın Hakan KOÇ'a ve sayın İbrahim KILIÇ'a, Malatya Büyük Şehir Belediyesi Ulaşım Daire Başkanlığı adına sayın Furkan ÖZTEMİZ'e,

Çalışmanın bilgisayar programlama aşamasının hata ayıklama ve kod iyileştirme adımlarında bana büyük yardımı dokunan sayın Dr. Hasan KURBAN'a ve Bilgisayar Mühendisi sayın Halil ŞAHİN'e,

Tez sürecini başarılı bir şekilde tamamlamam için bana destek veren Erzurum Teknik Üniversitesi ailesine ve değerli mesai arkadaşlarıma,

Özel olarak, çalışmam süresince kendilerini ihmal ettiğim halde hayatımın her alanında yanımda olan, sabır ve anlayışla başarılı olmam için dualarını hiçbir zaman eksik etmeyen aileme ve ailem bildiğim yakın dostlarıma, sevdiklerime sonsuz minnet ve teşekkürlerimi sunarım.

## ÖZET

### MALATYA İLİ ULAŞIM AĞININ OPTİMİZASYONU

Bu tez çalışmasında, Malatya Büyük Şehir Belediyesi'ne ait otobüs rota ağlarının optimizasyonu için Genetik Algoritma (GA) kullanan üç aşamalı bir model geliştirilmiş ve Malatya İli merkezinde belirlenen bir örneklem için optimal rota ağı tasarlanmıştır.

Bu çalışmada yapılan uygulamanın ilk aşamasında örneklem bölgesi üzerindeki otobüs durakları arasından rastsal olarak başlangıç-varış çiftleri seçilmiş ve bu çiftler arasındaki en kısa yollar hesaplanmıştır. Bu hesaplama sonrasında kullanıcı tanımlı; hız, araç varışları arası süre, maksimum ve minimum rota uzunluğu, maksimum rota sayısı ve araç sayısı kısıtlarına uyan en kısa yollar yeni bir rota ağı oluşturacak şekilde bir Python listesinde saklanmışlardır. Uygulamanın ikinci aşamasında ilk aşamadan gelen rota ağları için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanmış ve bu değerler kullanılarak her bir aday rota ağı için uygunluk değerleri hesaplanmıştır. Üçüncü aşamanın gerçekleşmesi ise ilk iki aşamanın üzerinde çalışan bir GA ile sağlanmıştır. Bu aşamada GA'nın seçim, mutasyon ve çaprazlama operatörleri kullanılarak çözüm uzayında optimal çözüm aranmıştır.

Bu çalışmada kullanılan trafik akış verileri Malatya Büyük Şehir Belediyesi adına Malatya Ulaşım Ana Planı'nı hazırlayan ALTAŞ mühendislikten alınmıştır. Otobüs duraklarının ve belediye otobüs rotalarının koordinatları MOTAS'tan alınmıştır. Örneklem bölgesi grafını oluşturmak için kullanılan koordinat verileri ise QGIS programında tarafınca üretilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Toplu Taşıma Ağ Tasarımı, Belediye Otobüs Rota Ağı Optimizasyonu, Sezgisel Algoritmalar, Genetik Algoritma, Çok Amaçlı Optimizasyon

## ABSTRACT

### OPTIMIZATION OF MALATYA PROVINCE TRANSPORTATION NETWORK

In this thesis study, a three-stage model using Genetic Algorithm (GA) was developed for the optimization of bus route networks belonging to the Malatya Metropolitan Municipality and the optimal route network was designed for a sample determined in the center of Malatya Province.

In the first stage of the three-stage application in this study, origin-destination pairs were randomly selected among the bus stops on the sample area and the shortest paths between these pairs were calculated. After this calculation, the shortest paths that meet the user defined speed, time between vehicle arrivals, maximum and minimum route length, maximum number of routes and vehicle number constraints are stored in a Python list to create a new route network. In the second stage of the application, the objective function values for the route networks from the first stage were calculated and using these values, the fitness values for each candidate route network were calculated. The realization of the third stage was achieved with a GA working over the first two stages. At this stage, the optimal solution was searched in the solution space by using the selection, mutation and crossover operators of GA.

The traffic flow data used in this study were obtained from the ALTAŞ Engineering, which prepared Malatya Transportation Master Plan on behalf of the Malatya Metropolitan Municipality. The coordinates of the bus stops and municipal bus routes were taken from the MOTAŞ. The coordinate data used to create the graph of the sample area was produced by the QGIS program.

**Key Words:** Public Transport Network Design, Municipal Bus Route Network Optimization, Heuristic Algorithms, Genetic Algorithm, Multi-Objective Optimization

## İÇİNDEKİLER

ONUR SÖZÜ.....	iv
BİLDİRİM.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
ÖZET.....	vii
ABSTRACT.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
TABLOLAR LİSTESİ.....	xii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Teorik Çerçeve.....	4
1.2. Problem Tanımı.....	6
1.3. Amaçlar.....	8
1.4. Kazanımlar.....	8
1.5. Tezin İçeriği.....	9
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	10
2.1. Toplu Taşıma Ağ Tasarım Problemi.....	10
2.1.1. Problemin Temsili.....	13
2.1.2. Trafik Atama.....	17
2.1.2.1. Kullanıcı Dengesi Ataması.....	18
2.1.2.2. Sistem Optimal Ataması.....	19
2.1.2.3. Hep ya da Hiç Trafik Ataması.....	21
2.1.2.4. Artışsal Trafik Ataması.....	22
2.1.2.5. Kapasite Kısıtlı Trafik Ataması.....	23
2.1.3. Frank-Wolfe Algoritması.....	23
2.2. TTATP İle İlgili Önceki Çalışmalar.....	24



2.3.	TTATP Çözüm Yöntemleri .....	27
2.3.1.	Geleneksel Çözüm Yöntemleri.....	28
2.3.2.	Sezgisel Çözüm Yaklaşımları.....	30
2.3.3.	Meta-sezgisel Çözüm Yaklaşımları .....	31
2.3.4.	ORATP için Genetik Algoritma .....	36
2.4.	ORATP Model ve Formülasyonu .....	39
2.4.1.	ORATP Varsayımları.....	39
2.4.2.	ORATP Notasyonları.....	40
2.4.3.	ORATP Formülasyonu.....	41
3.	VERİLERİN TOPLANMASI VE ANALİZİ .....	43
3.1.	Malatya İli ve Ulaşım Ağı Özellikleri .....	43
3.2.	Yolculuk Üretim-Çekim .....	46
3.3.	Yolculuk Dağıtımı .....	48
3.3.1.	Yer Çekimi (Gravity) modeli .....	48
3.3.2.	Fratat Modeli .....	49
3.4.	Türel Ayrım .....	50
3.4.1.	Multinomial Logit Model .....	51
3.4.2.	Büyüme Faktörü (Growth Factor) Modeli.....	52
3.5.	Verilerin Hazırlanması .....	54
4.	ÇÖZÜM YAKLAŞIMI.....	57
4.1.	Başlangıç Çözüm Kümesini Üretme .....	57
4.2.	Otobüs Rota Ağı Analiz Süreci .....	60
4.3.	Optimal Otobüs Rota Ağını Arama.....	62
4.3.1.	Genetik Algoritma ile Rota Ağı Arama .....	62
5.	UYGULAMA.....	67
5.1.	Duyarlılık Analizi .....	67

<b>5.2. Test Ağı.....</b>	<b>71</b>
<b>5.2.1. Test Ağı Sayısal Sonuçları.....</b>	<b>73</b>
<b>5.3. Malatya İli Otobüs Rota Ağı Tasarımı.....</b>	<b>74</b>
<b>5.4. Uygulama Sonuçları.....</b>	<b>76</b>
<b>6. SONUÇLAR.....</b>	<b>78</b>
<b>KAYNAKÇA.....</b>	<b>80</b>
<b>Ek-1: Dijkstra En Kısa Yol Algoritması.....</b>	<b>92</b>
<b>Ek-2 Sioux Falls Test Verisi Python Formatı.....</b>	<b>93</b>
<b>Ek-3 Sioux Falls Test Ağı Uygulama Sonuçları.....</b>	<b>96</b>
<b>Ek-4: MUAP Tabloları.....</b>	<b>105</b>

## TABLÖLÄR LİSTESİ

<b>Tablo 2.1: Genetik Algoritmanın Temel Yapısı .....</b>	<b>36</b>
<b>Tablo 2.2: Rota Ağı Tasarımı Problemi İle İlgili Çalışmalar .....</b>	<b>37</b>
<b>Tablo 3.1: Yol Türüne Göre Karayolu Uzunlukları (km) .....</b>	<b>44</b>
<b>Tablo 3.2: Hane Halkı Anketleri Gerçekleşme Değerleri .....</b>	<b>47</b>
<b>Tablo 3.3: Araç Türleri Ve Yolculuk Amacı Oranları.....</b>	<b>53</b>
<b>Tablo 3.4: Malatya Otobüs Seyahat Talebi (B-V) Matrisi Örneği.....</b>	<b>53</b>
<b>Tablo 4.1: Çözüm Yaklaşımı Bileşenleri, Girdiler Ve Çıktıları .....</b>	<b>64</b>
<b>Tablo 5.1: Test Ağında Kullanılan Parametre Değerleri .....</b>	<b>73</b>
<b>Tablo 5.2: Test Ağı Nesil Sonuçları.....</b>	<b>74</b>
<b>Tablo 5.3: Malatya Örneği Ağında Kullanılan Parametre Değerleri .....</b>	<b>75</b>
<b>Tablo 5.4: Optimal Rota Ağı Sayısal Sonuçlar .....</b>	<b>76</b>

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1: Toplu Taşıma Planlama Süreci .....	2
Şekil 1.2: Şahsi Araç Sahibi Olma ve Toplu Ulaşım Kullanma Kısır Döngüsü .....	5
Şekil 2.1: Bağ ve Rota .....	15
Şekil 2.2: TAZ'ların, Dğümlerin ve Bağların Grafikselsel Gösterimi .....	15
Şekil 2.3: Dört Aşamalı Ulaşım Modeli .....	16
Şekil 2.4: BPR Fonksiyonu .....	21
Şekil 2.5: Frank-Wolfe Algoritması.....	23
Şekil 2.6: ORATP Modellerinin Temel Özellikleri .....	28
Şekil 3.1: Malatya İli Karayolu Sınıflaması.....	44
Şekil 3.2: Malatya İli TAZ'ları .....	45
Şekil 3.3: Malatya Belediye Otobüs Rotaları.....	45
Şekil 3.4: Yer Çekimi ve Fratar Modeli Uygulanan TAZ'lar .....	50
Şekil 3.5: Multinomial Logit ve Büyüme Faktörü Modeli Uygulanan TAZ'lar .....	52
Şekil 3.6: Malatya İli Ulaşım Ağı Örnekleme.....	54
Şekil 3.7: Malatya İli Ulaşım Ağı Örneklemeden Geçen Otobüs Rotaları .....	55
Şekil 3.8: Malatya İli Ulaşım Ağı Örnekleme İçin Belirlenen Dğümler .....	56
Şekil 4.1: Otobüs Rota Ağı Tasarım Algoritması Akış Şeması .....	57
Şekil 4.2: Başlangıç Otobüs Rota Ağı Üretme Süreci Akış Şeması.....	59
Şekil 4.3: Otobüs Rota Ağı Analiz Süreci Akış Şeması.....	61
Şekil 4.4: Otobüs Rota Ağı Tasarım Algoritması Akış Şeması .....	63
Şekil 5.1: Popülasyona Göre Uygunluk Değeri ve Standart Sapma Grafiğı.....	68
Şekil 5.2: Nesil Sayısına Göre Uygunluk Değeri ve Standart Sapma Grafiğı.....	68
Şekil 5.3: Nesil Sayısına Göre En Kötü, En İyi ve Medyan Uygunluk Değeri Grafiğı... ..	69
Şekil 5.4: Çaprazlama Olasılığına Göre Uygunluk Değeri Ve Standart Sapma Grafiğı....	69
Şekil 5.5: Mutasyona Olasılığına Göre Uygunluk Değeri ve Standart Sapma Grafiğı.....	70
Şekil 5.6: Ağ Büyüklüğüne Göre Uygunluk Değeri ve Standart Sapma Grafiğı.....	70
Şekil 5.7: Rota Sayısına Göre Hesaplama Süresi .....	71
Şekil 5.8: Sioux Falls Test Ağı.....	72
Şekil 5.9: Çalışma Alanı İçin Üretilen Optimal Rota Ağı.....	76

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<b>A-PSO:</b>	Ayrık-Parçacık Sürü Optimizasyonu
<b>BPR:</b>	Amerikan Karayolları Bürosu
<b>B-V:</b>	Başlangıç-Varış
<b>DEA:</b>	Diferansiyel Evrimsel Algoritma
<b>FW:</b>	Frank-Wolfe
<b>GA:</b>	Genetik Algoritma
<b>HBW:</b>	Ev Bazlı İş Yolculukları
<b>HBS:</b>	Ev Bazlı Okul Yolculukları
<b>HBO:</b>	Ev Bazlı Diğer Yolculuklar
<b>NHB:</b>	Ev Bazlı Olmayan Yolculuklar
<b>HG-YAK:</b>	Hibrit Geliştirilmiş-Yapay Arı Kolonisi
<b>H-YAK:</b>	Hibrit-Yapay Arı Kolonisi
<b>İKKA:</b>	İyileştirilmiş Karınca Koloni Algoritması
<b>KD:</b>	Kullanıcı Dengesi
<b>KKA:</b>	Karınca Koloni Algoritması
<b>KKO:</b>	Karınca Koloni Optimizasyonu
<b>KKT:</b>	Karush-Kuhn-Tucker
<b>KS:</b>	Karınca Sistemi
<b>KTPKKA:</b>	Kaba Taneli Paralel Karınca Koloni Algoritması
<b>KUP:</b>	Kentsel Ulaşım Planı
<b>MMKS:</b>	Max-Min Karınca Sistemi
<b>MP:</b>	Matematiksel Programlama
<b>MTB:</b>	Merkezi Ticaret Bölgesi
<b>MUAP:</b>	Malatya Ulaşım Ana Planı

<b>TTATP:</b>	Toplu taşıma Ağ Tasarımı
<b>TTRP:</b>	Toplu Taşıma Rotalama Problemi
<b>TTÇP:</b>	Toplu Taşıma Çizelgeleme Problemi
<b>TAZ:</b>	Trafik Analiz Zonu
<b>ORATP:</b>	Otobüs Rota Ağı Tasarım Problemi
<b>PSO:</b>	Parçacık Sürü Optimizasyonu
<b>SO:</b>	Sistem Optimal
<b>TA:</b>	Tabu Arama Algoritması
<b>TB:</b>	Tavlama Benzetimi Algoritması
<b>TT:</b>	Tepe Tırmanma Algoritması
<b>YAK:</b>	Yapay Arı Kolonisi

# 1. GİRİŞ

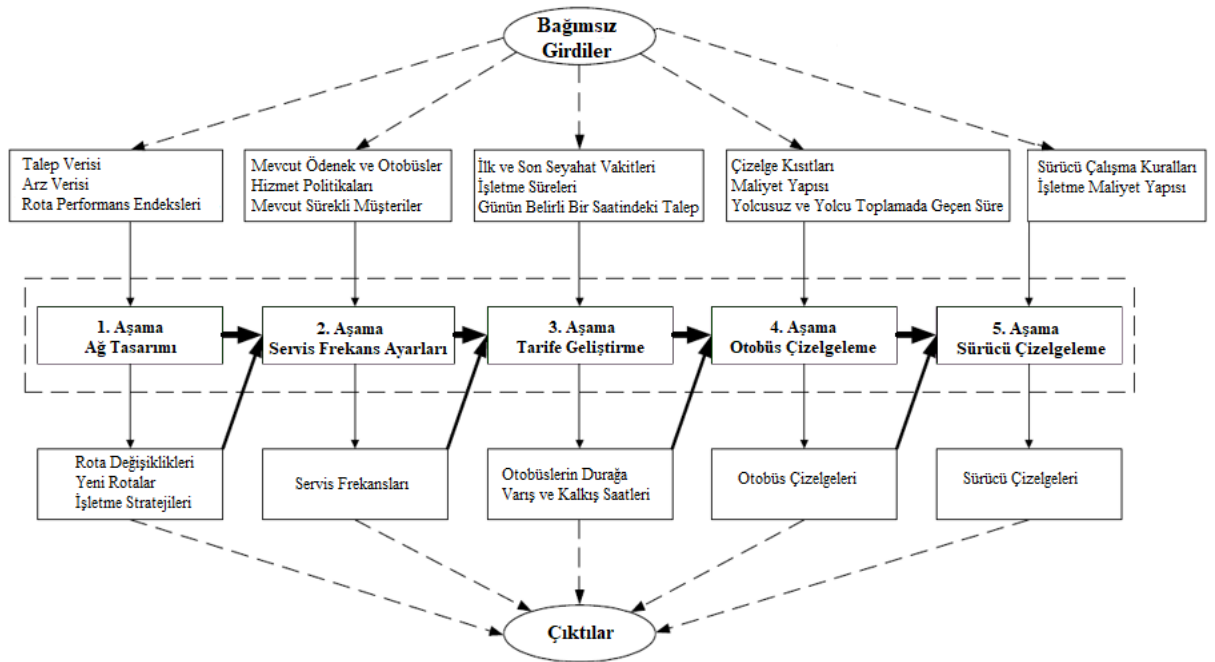
Yirminci yüzyılın başından itibaren kent içi karayolu ulaşımında talepler, otomobil sanayindeki gelişmelere ve kentsel nüfus oranındaki artışa bağlı olarak, sürekli artma eğiliminde olmuştur. Bunun yanı sıra kentsel nüfusun yoğunlaştığı merkezi bölgelerde ekonomik, sosyal ve kültürel faaliyetlerin artması; yolculuk sayılarının artmasına, zamanında ulaşımın önemli hale gelmesine ve buna bağlı olarak yolculuklarda özel araç kullanımına bağımlılığa, trafik tıkanıklığına ve ulaşım maliyetlerinin artmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla bu artışların neden olduğu trafik, hava ve gürültü kirliliği problemleri ile başa çıkabilen kentler geliştirmek gelişmiş ve gelişmekte olan tüm dünya ülkelerinde öncelikli olarak baş edilmesi gereken bir konu haline gelmiştir.

Günümüz Türkiye'sinde gelişmekte olan kentler ulaşım problemlerini çözmek için bütçelerinin büyük bir bölümünü ulaşım yatırımlarına ayırmaktadır. Bu amaçla sadece karayolu kapasitesini artırmak kısa vadede ulaşım problemlerini çöze de uzun vadede trafik problemlerine çözüm olmamaktadır. Yapılan karayolu yatırımları kendi trafiğini doğurmakta, taşınan yolcu sayısının artmasından daha çok ulaşım rahatladıkça trafiğe çıkan araç sayısının artmasına neden olmaktadır. Bu durum, trafik problemlerinin bir süre sonra yeniden ortaya çıkmasıyla sonuçlanmaktadır. Dolayısıyla bu tür ulaşım problemlerine çözüm olarak; nüfus artışını ve ekonomik gelişimi dikkate alan, çevreye duyarlı, sürdürülebilir bir ulaşım politikası uygulamak günümüz büyük şehirlerinin vazgeçilmez bir ögesi haline gelmiştir.

Gelişmekte olan şehirlerin giderek büyüyen ve karmaşıklaşan ulaşım ağlarının her biri, bulunduğu şehrin sahip olduğu; coğrafik yapı, iklimsel özellikler, kentsel nüfus sayısı ve yoğunluğu, yol (karayolu, denizyolu) kapasitesi, trafikteki özel araç ve toplu taşıma aracı sayısı, toplu taşıma araçlarının çeşitleri (tren, metro, tramvay, trambüs, metrobüs, otobüs, minibüs vs.), toplu taşıma araçlarının çeşidine bağlı olarak özel sistemlerin kullanımının (durak, istasyon, ray sistemleri, yeraltı yolları, özel şerit, enerji hatları ve elektrik direkleri vb.) gerekliliği, nüfusun büyük çoğunluğunun gün içinde sık uğradığı merkezi noktaların (üniversite, hastane, belediye, alış-veriş merkezi, otopark, hava alanı, vb.) sayısı ve bunların birbirine uzaklıkları, ulaşım maliyetleri, ulaşım süreleri, yolcu rahatlığı, vb. imkan ve durumlara bağlı olarak eşsiz özellikler gösterir. Dolayısıyla her şehrin kendisine has ve sürdürülebilir yapıda bir şehir planı yapabilmesi için; iyi organize edilmiş, güvenilir, erişilebilir, ekonomik ve ulaşım sistemi önceliklerine göre uygun bir finansal plan tanımlayan bir Kentsel Ulaşım Planı'na (KUP'a) ihtiyacı vardır.

KUP; güvenli, verimli ve erişilebilir kentsel ulaşım sistemine yönelik hedef ve önlemleri içeren bir planlama aracıdır. Bu plan, şehrin karşı karşıya kaldığı gerçek ulaşım zorluklarının belirlenmesine yardımcı olabilir ve şehir mevcut hızda gelişmeye devam ederse ulaşım şartlarının nasıl değişeceğini açıklar.

KUP'un en önemli basamaklarından biri de Toplu Taşıma Ağı Tasarım Problemi'nin (TTATP'nin) çözülmesidir. Bu problemin çözümü için; ağ tasarımı, servis frekansını ayarlama, tarife geliştirme, otobüs ve şoför çizelgeleme aşamalarından oluşan kavramsal bir model ilk kez Ceder ve Wilson (1986) tarafından tanımlanmıştır.



Şekil 1.1: Toplu Taşıma Planlama Süreci (akt. Wei, 2004; Ceder ve Wilson, 1986)

Şekil 1.1'den de görüleceği üzere TTATP'nin her bir aşamasının çıktısı hemen sağındaki, yani bir sonraki aşamanın girdisidir. Alt aşamada verilen kararların daha üst seviyedeki aşamalar üzerinde bazı etkileri olmasından dolayı bu aşamalar birbirinden bağımsız değildir. Buna rağmen literatürdeki birçok çalışma otobüs ve şoför çizelgeleme aşamalarına yoğunlaşmıştır. Çünkü bu iki aşama şoför ücretlerini, yakıt ve bakım maliyetlerini içerdiğinden işletmeci maliyetlerini büyük ölçüde etkilemektedir. Ne var ki hem işletmeci hem de kullanıcı (yolcu) açısından sistem performansının en önemli belirleyicileri otobüs rota tasarımı ve buna karşılık gelen servis frekanslarının belirlenmesidir. Fakat bu iki aşama, karmaşıklıklarından dolayı, literatürde daha az ilgi görmüştür (Wei, 2004). Literatürdeki bu eksiği kapatmak için bu



çalışmada TTATP modelinin ilk aşaması olan Otobüs Rota Ağı Tasarımı Problemi'nin (ORATP'nin) üzerinde durulmuştur.

TTATP; ulaşım zamanının, kat edilen mesafenin, ulaşım maliyet değerlerinin minimize edilmesi ve seyahat konforu, ulaşım kolaylığı gibi yolcu rahatlığını gözeten hedeflerin de maksimize edilmesi gibi birbiriyle çelişen birden çok amacın optimum düzeye getirilmesini gerektiren çok sayıda optimizasyon problemi içerir (Kılıç, 2010). Bu problemlerin tümü, bir tek çok alternatifli karar verme problemi olarak ifade edilebilir ve bu tür karar verme problemlerinin çözümünde kullanılan en etkin yöntem Yöneylem Araştırması'dır.

Yöneylem Araştırması iş, devlet ve askeri alanlarda; insan, makine, materyal ve para yönetiminde oluşan problemleri çözmek için; matematik, istatistik, iktisat, mühendislik, psikoloji ve diğer disiplinlerden gelen araçları kullanan bilimsel bir metottur. Şans ve risk gibi çeşitli faktörleri de göz önüne alarak, alternatif kararlar ve stratejiler üreterek sistemin bilimsel bir modelini ortaya çıkarmaya çalışır. Amaç, yönetimin vermesi gereken kararlara bilimsel bir şekilde yardımcı olmaktır.

Türkiye'nin son yıllarda yaptığı yatırımlara bakıldığında en büyük paya Ulaştırma Sistemleri'nin sahip olduğu görülecektir (<https://www.sbb.gov.tr/yatirim-programi/>, Erişim Tarihi: 03.12.2019). Bu durum göz önüne alındığında TTATP'nin yaygın bir türü olan Otobüs Rota Ağı Problemi'ne (ORATP'ye) Yöneylem Araştırması uygulanarak yapılacak bir optimizasyonla sağlanacak en ufak bir iyileşmenin çok büyük maddi tasarruf etkisi olacaktır. Ayrıca elde edilen optimal çözümün şehir içi/şehirlerarası yolcu ulaşımı veya ticari meta taşımacılığı için ulaşım süresinin ve maliyetlerinin azalmasına; milli gelirin daha verimli kullanılmasına, doğaya daha az egzoz gazı salınmasına ve insanların hem yaşam kalitelerinin hem de refah seviyelerinin artmasına neden olması beklenmektedir.

Bu tez çalışmasında, yukarıda bahsedilen gerçeklerden yola çıkarak, karayolu üstyapısını kullanan toplu ulaşım sistemlerinden otobüslerin optimal bir rota ağını oluşturmak amacı ile Genetik Algoritma kullanılmıştır. Bu çalışmayı, mevcut bir toplu ulaşım sistemi ve yolculuk verilerini kullanarak, gerçekleştirmek için Malatya İli toplu taşıma sistemi örnek olarak seçilmiştir.

## 1.1. Teorik Çerçeve

Graf teorisinde bir akış ağı; ağ topolojisi, seyahat talepleri<sup>1</sup>, kapasite kısıtları, rota seçimi ve bağ maliyet fonksiyonları gibi akış özellikleri ile karakterize edilir. Bir ulaşım ağı ise insanların, araçların ve emtiaların hareketi aracılığıyla ekonomilerin ve toplumların işleyişinin temelini oluşturan bir akış<sup>2</sup> ağıdır (Bell ve Iida, 1997: 3). Bu nedenle ulaşım ağları; ulaşım bilimcileri, ekonomistler, yöneylem araştırmacıları, mühendisler ve fizikçiler tarafından araştırılan bir çalışma alanı haline gelmiştir (Nagurney ve Zhang, 2007).

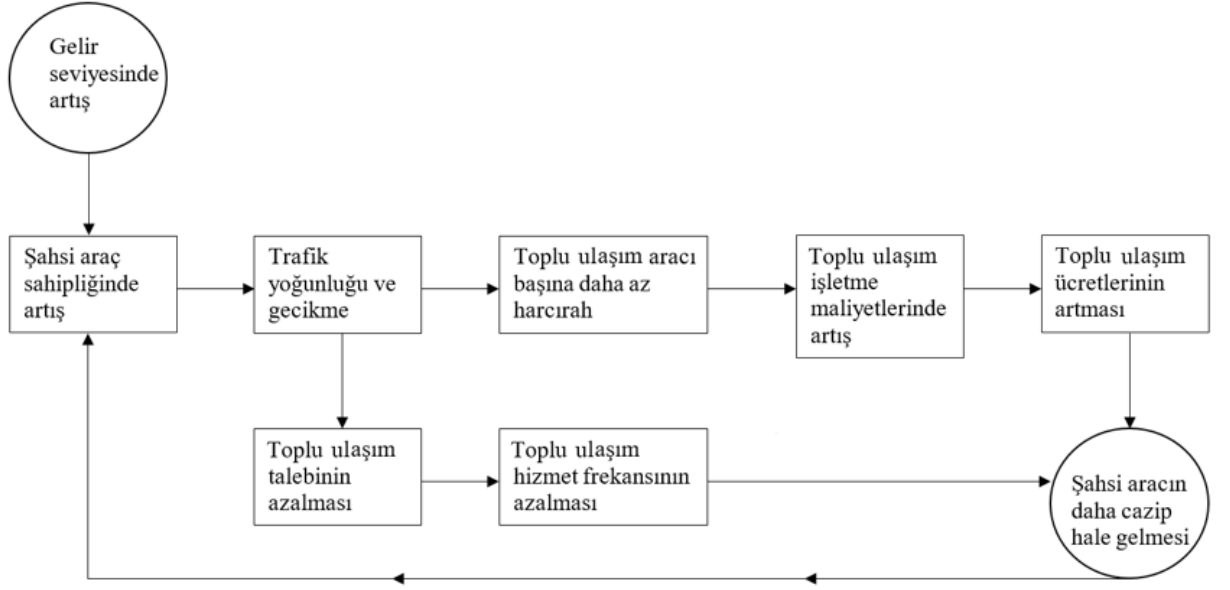
Ekonomik açıdan bakıldığında ulaşım sistemlerindeki arz, ağ topolojisi ve maliyet ile temsil edilirken; talep, ulaşım sisteminin kullanıcıları tarafından temsil edilir. Günümüz büyük şehirlerinde bu talep, ekonomik büyümeye bağlı olarak artan araç sahipliği nedeniyle, ulaşım sistemi arzının karşılayabileceğinden çok daha fazla bir hale gelmektedir. Daha fazla şahsi araç sahibi demek, toplu ulaşım araçlarını kullanmayan daha fazla insan demektir. Bu duruma karşı tepki olarak ulaşım sistemi işletmecilerinin ya toplu ulaşım ücretlerini arttırması ve/veya ulaşım servis frekansını azaltması ya da her ikisini de azaltması sonucu toplu ulaşım kullanan yolcu sayısı da azalacaktır. Dolayısıyla, şahsi araç kullanımı giderek daha cazip hale gelecek ve daha fazla insan araba almaya yönelecektir. Sistem işletmecilerinin bu önlemleri almalarından bir süre sonra şahsi araç kullanıcıları artan bir trafik yoğunluğu ile karşı karşıya kalacaklardır. Sonuç olarak, birbirinden bağımsız olarak alınan bireysel mantıklı kararların birikimi, ulaşım sistemini ilk durumundan daha kötü bir hale getiren kısır bir döngü başlatacaktır (Ortúzar ve Willumsen, 2011: 8).

Ekonomik büyüme ile birlikte gelen şahsi araç kullanımını artışı ve buna bağlı olarak ortaya çıkan trafik problemleri bir kısır döngü oluşturmaktadır. Bu döngüyü kırmanın ve yolcuları toplu taşıma kullanımına teşvik etmenin en başarılı yollarından biri toplu taşıma hizmet seviyesinin iyileştirilmesidir (Wei, 2004). Bu iyileştirme, optimal bir Toplu Taşıma Ağ Tasarımı (TTAT) yardımı ile ağ işletmecilerinin arzı ve ağ kullanıcılarının talebi arasında bir denge kurmak yoluyla sağlanabilir.

---

<sup>1</sup> Bkz sayfa 23.

<sup>2</sup> Bkz sayfa 26.



Şekil 1.2: Şahsi Araç Sahibi Olma ve Toplu Ulaşım Kullanma Kısır Döngüsü (Ortúzar ve Willumsen, 2011: 8)

Toplu taşıma sistemleri; trafik sıkışıklığını, hava kirliliğini ve enerji tüketimini azaltmanın ve hareketliliği arttırmanın potansiyel bir yolu olarak kabul edilir (Fan ve Machemehl, 2006a). Toplu taşıma kullanımının artması ile şahsi araç kullanımının azalması; trafik sıkışıklığını, trafik kazalarını ve çevre kirliliğini azaltacağı gibi enerji kaynaklarının ve yeni yollar açmak için verimli arazilerin israfını da azaltacaktır (Nnene, 2014). Dolayısıyla işlevsel ve ekonomik olarak verimli bir toplu ulaşım rota ağı tasarlamak, kentsel bölgenin; sosyal, ekonomik ve fiziksel yapısı için çok önemlidir (Fan ve Machemehl, 2006a).

Toplu taşıma rota ağlarının birçoğu şehir merkezi odaklı olarak arazi kullanımı hedeflerine uygun tasarlandıklarından sabit rotalar ve sabit çizelgeler içeren hizmetler sunarlar. Ne var ki son yıllarda kentsel alanın dağılımında ve demografisinde olan değişiklikler arazi kullanımını şehir merkezi odaklı olmaktan çıkarmıştır (Wei, 2004). Nüfus artışı ve şehirleşmedeki bu değişikliklere bağlı olarak, seyahat talepleri de gün geçtikçe değişmektedir. Bu değişimlere ayak uyduramayan verimsiz toplu taşıma ağlarının maliyetleri hem ağ kullanıcıları hem de ağ işletmecileri için yüksektir (Kepaptsoglou ve Karlaftis, 2009). Bu yüzden mevcut rota ağlarının gözden geçirilmesi ve mümkün olan değişikliklerin yapılması gerekmektedir (Wei, 2004).

Giderek artan bir nüfusa ve buna bağlı olarak giderek yoğunlaşan bir trafiğe sahip birçok büyükşehirde görülen ulaşım ile ilgili bu problemlerin 2012 yılından beri büyükşehir olan Malatya'da da var olduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu, Malatya İli toplu ulaşım sistemlerinin

günün koşullarına göre tekrar tasarlanmasını zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmanın amacı otobüs toplu taşıma sistemlerine odaklanarak, Malatya İli otobüs rota ağını iyileştirecek bir optimizasyon modeli geliştirmektir.

## 1.2. Problem Tanımı

TTATP, Araç Rota Probleminin (ARP'nin) bir alt problemidir (Gunby ve Gustavsen, 2015). Bu problemin amacı uygulanabilir kısıtlar altında mevcut ulaşım ağı üzerinde verimli toplu taşıma ağları ve çizelgeler tasarlamaktır. Bu nedenle literatürde TTATP Toplu Taşıma Rotalama Problemi (TTRP) ve Toplu Taşıma Çizelgeleme Problemi (TTÇP) olmak üzere iki alt probleme ayrılmıştır.

TTRP, belirli kısıtlar altında mevcut ulaşım ağı üzerinde bir rotalar kümesinin oluşturulması problemidir. Bir ulaşım ağında rotalar, bir yol oluşturacak şekilde, bir düğümün (durağın) bir diğerine bir bağ tarafından bağlanması ile oluşturulurlar. Bir rota kümesi ise birden fazla rotanın birleştirilmesi ile oluşur. İyi bir rota kümesinde, ulaşımın önemli bir yüzdesi aktarmasız yolculuklarla karşılanmak üzere, tüm seyahat talebi<sup>3</sup> karşılanmalıdır ve yolcu başına ortalama seyahat süresi olabildiğince düşük olmalıdır. Bir rota kümesinde üretilebilecek tüm rotalar üretildiğinde bir rota ağı ortaya çıkar. Bu ağ, mevcut tüm düğümleri içermelidir bununla birlikte mevcut ağdaki tüm bağları içermeyebilir.

TTRP, TTATP'nin fiziksel tasarım aşaması olarak da tanımlanır ve non-konveks (hatta konkav) bir problem olarak kabul edilmektedir (Newell, 1979). Matematiksel Programlama (MP) problemi olarak modellenmesi zor bir problemidir. Chakroborty (2003), TTRP'nin MP formülasyonlarının hiçbirinin karayolu ağı bağlarını ve bunların bir rotadaki varlığını veya yokluğunu karar değişkenleri olarak kullanmamalarından dolayı bu formülasyonların gerçekten TTRP'nin MP formülasyonları olarak adlandırılmayacağını belirtmiştir.

TTÇP, önceden belirlenmiş rotalar için toplu taşıma araçlarının çizelgelerinin, varış ve ayrılış saatlerinin belirlenmesi ile ilgilenir. Ayrıca TTRP'nin işlevsel tasarımı olarak da adlandırılır (Fan, 2009). Genellikle konveks bir optimizasyon problemidir (Newell, 1979). Çizelgeleme, sınırlı filo büyüklüğü ve otobüs kapasitesi gibi kısıtlar altında bir yolcunun her

---

<sup>3</sup> Mevcut ulaşım seçeneklerinin kalitesi ve fiyatları gibi faktörleri dikkate alarak, belirli koşullar altında seyahat seçimini yapan yolcuların sayısını ve yolculuk türünü ifade eder (<https://www.vtpi.org/tadm/tadm132.htm>, Erişim Tarihi: 20.11.2019).

bir düğümde bekleme süresinin minimize edilmesini içerir. Toplam bekleme süresi, seyahatin başlangıç noktası olan düğümde bekleme süresi ile seyahatin varış noktası olan düğüme gidene kadar geçen sürenin toplamıdır. Genellikle, rotaların geliştirilmesi çizelgelerin geliştirilmesinden önce yapılması gerektiğinden önce TTRP ve sonra TTÇP uygulanır.

TTATP, deterministik olmayan polinom zamanlı zor (NP-Zor)<sup>4</sup> bir kombinatoriyel optimizasyon<sup>5</sup> problemi olarak sınıflandırılmaktadır (Zhao, 2006). Bunun yanı sıra, toplu taşıma gibi bir kamu hizmetinin, yerine getirilmesi gereken birden fazla amacı vardır. Güvenilir olmak, kentsel gelişime destek vermek ve çevre kirliliğinin azaltılması bu amaçlardan bazılarıdır.

TTATP'nin yukarıda sayılan özelliklerinden dolayı, özellikle Malatya İli gibi büyük bir alanda, geleneksel matematiksel optimizasyon yöntemleri kullanılarak gerçekçi bir toplu taşıma ağ tasarımı yapabilmek için çözüm uzayı çok büyük ve karmaşıktır. Bu yüzden problemin çözüm uzayını tararken lokal optimuma takılma ihtimali düşük bir araştırma yönteminin kullanması gerekir (Flatterman, 2008). Bu amaçla bu çalışmada kullanılması uygun görülen yöntem Genetik Algoritmadır.

TTATP'nin otobüs rota ağlarına ilişkin bir alt problemi “Otobüs Rota Ağı Tasarım Problemi (ORATP)” olarak adlandırılmaktadır (Abdulrahman, 2019). Bu problem, toplu taşımada kullanılan yollarının sayısı ve uzunluğu, mevcut otobüslerin sayısı gibi kaynak kısıtları ve izin verilen servis frekansları gibi operasyonel kısıtlar altında birtakım hedeflerin optimizasyonuna odaklanmaktadır (Chakroborty, 2003; Fan ve Machemehl, 2006a-2006b). Otobüs rota ağlarının verimliliğini temsil eden bu hedefler; seyahat talebinin tamamının karşılanması, seyahat talebinin büyük bir kısmının aktarmasız olarak karşılanması ve yolcu başına ortalama seyahat süresinin minimum olmasıdır (Chakroborty, 2003).

Doğası gereği çok karmaşık bir süreç olan TTATP genel olarak rota düzeni tasarımı ve servis frekansı ayarı olmak üzere iki ana alt problemden oluşur (Chakroborty, 2003). Bu çalışma, esas olarak, en iyi ağ yapılandırmasını elde etmek için ağ tasarımcısının belirlediği amaç fonksiyonunu minimize veya maksimize eden rota düzeni tasarımına odaklanmıştır. Rota

---

<sup>4</sup> Bu tür bir problemi polinom zamanlı olarak çözmek, NP sınıfından herhangi bir problemi polinom zamanlı çözmeyi mümkün kılıyorsa, problem “NP-Zor” olarak sınıflandırılır.

<sup>5</sup> Kombinatoriyel terimi, karar değişkenlerinin ayrık olmasını yani problem çözümünün tamsayıların ya da diğer ayrık nesnelerin bir kümesi veya bir sırası olmasını ifade etmektedir. Bu sınıftaki problemler için optimum çözümlerin bulunması kombinatoriyel optimizasyon olarak bilinmektedir.

düzeni belirlendikten sonra servis frekansı ayarı mesafe ve hız değerlerine göre yapılmıştır. Bu amaçla bu çalışmada bir ORATP modeli kullanılmıştır.

ORATP, genel olarak, sistem performans gerekliliklerine veya kaynak sınırlamalarına karşılık gelen birtakım kısıtlara bağlı olarak rota ağının kapsadığı alanı maksimize ederken işletme maliyetlerinin minimize edilmesi amaçlarını içerir.

ORATP'nin hesaplama yükü; karar değişkenlerini tanımlamanın ve dolayısıyla amaç fonksiyonun tanımlamanın zor olması, non-konveks<sup>6</sup> olması, doğrusal olmaması, aday çözümler kümesinin büyük boyutlu olması ve ayrık değişkenlere sahip olmasından doğan kombinatoriyel karmaşıklık nedeniyle oldukça fazladır (Fan ve Machamehl, 2006a). Bu hesaplama yükü, ağın büyüklüğü arttıkça üstel olarak artmaktadır (Baa, 1991).

### 1.3. Amaçlar

Bu tezde gerçekleştirilen çalışma şu hedeflere ulaşmayı amaçlamaktadır: (1) ORATP ile ilgili mevcut uygulamaları, çözüm yöntemlerini derlemek ve problemin matematiksel bir modelini kurmak; (2) Eldeki problemin yolcu ve işletmeci açısından dengelenmiş bir optimal çözümünü bulmak için literatürde kullanılan meta-sezgisel yöntemleri araştırmak; (3) Başarılı bulunan bir meta-sezgisel yöntemi kullanarak bilgisayar destekli bir çözüm bulmak ve bu çözümün bir test ağı üzerindeki performansını test etmek; (4) Belirlenen bir Malatya İli örnekleme için ORATP çözümleri elde etmek ve bu çözümleri karşılaştırmak.

### 1.4. Kazanımlar

Bu çalışma, yöneylem araştırması ilkelerine dayanan bir ORATP modeli kullanan sistematik bir yol izleyerek, yolcu ve işletmeci maliyetlerini minimize eden optimal otobüs rota ağları oluşturan bir GA yöntemi tasarlamayı önermektedir. Burada bahsedilen maliyetler yolcuların bakış açısıyla; seyahat süresinin ve araç varışları arası sürelerin uzunluğu, yetersiz hizmet nedeniyle karşılanamayan seyahat talebi ve aktarmalı seyahat yapmak iken ağ işletmecilerinin bakış açısıyla; işletilen araç sayısı, personel ücretleri, yakıt ve bakım

---

<sup>6</sup> Birden fazla yerel optimum çözüme sahip olan, problemin bir çözümünün olup olmadığını veya çözümü varsa bulunan çözümün global olup olmadığını belirlemenin çok zaman aldığı optimizasyon problemleridir.

maliyetleridir. Başka bir deyişle bu çalışmanın temel amacı, optimize edilmiş bir otobüs rota ağı tasarlamak için meta sezgisel yöntemlere dayalı bir ORATP model çözümü geliştirmektir. Elde edilmek istenen optimal ağ hem yolcular için hem de ağ işletmecileri için seyahat maliyetlerini minimize etmeli ve ağ kullanımını maksimize ederken seyahat talebinin tamamını karşılamalıdır.

## 1.5. Tezin İçeriği

Bu tezde, matematiksel metotlarla çözümü oldukça zaman alıcı ve zor olan ORATP'nin çözümü için bir matematiksel model önerilmiş ve bu modelin çözümü GA ile gerçekleştirilmiştir. GA'nın performansı bir test ağı üzerinde sınanmıştır.

Tezin ilk bölümünde çalışmanın; teorik çerçevesi, TTATP'nin tanımı, çalışmanın amaç ve kazanımları kısaca açıklanmıştır. İkinci bölümde; TTATP'nin özellikleri ve problemle ilgili önceki çalışmalardan, ulaşım modeli ve bileşenleri, problemin çözümünde kullanılan yöntemler ile ORATP model ve formülasyonundan bahsedilmiştir. Üçüncü bölümde; Malatya İli ulaşım ağı özellikleri, ağ verilerinin toplanması ve bu verilerin ulaşım modeli aşamalarındaki hesaplamalarda kullanılma şekilleri anlatılmıştır. Dördüncü bölümde çözüm yaklaşımı verilmiştir. Beşinci bölümde bir test ağı ve Malatya İli otobüs ağı uygulamaları yapılmıştır. Altıncı bölümde ise çalışmanın sonuçları açıklanmıştır.

## 2. LİTERATÜR TARAMASI

ORATP, TTATP'nin yaygın bir hali olması nedeniyle, literatürdeki pek çok çalışmada TTATP'nin uygulaması olarak kullanılmıştır. Bundan dolayı bu çalışmanın literatür taramasında bu iki problem aynı problem olarak ele alınmış ve genel problem olan TTATP başlığı altında verilmiştir.

### 2.1. Toplu Taşıma Ağ Tasarım Problemi

TTATP, kaynak kısıtları altında, hedeflenen faydaların maksimizasyonu ile maliyetlerin minimizasyonu arasındaki dengeyi kurmaya çalışan çok amaçlı bir optimizasyon problemidir (Zhang vd, 2010). Non-konveks bir problem olarak kabul edilmesinin yanı sıra, genellikle, çoktan-çoka yolculuk dağılımına ve doğrusal olmayan kısıtlara sahip olması nedeniyle doğrusal olmayan bir programlama problemi olarak modellenir. Ayrıca hesaplama karmaşıklığından dolayı NP-Zor bir problemidir (Magnanti ve Wong, 1984; Newell, 1979; Fan, 2009). Bütün bu zorlukların yanı sıra TTATP modelinin gerçekçi bir temsilini ortaya koyabilmek için göz önünde bulundurulması gereken birçok tasarım özelliği vardır. Bu özelliklerin bir kısmı rota düzenini ve işletme özelliklerini tanımlayan servis frekansı ve araç sayısı vb. karar değişkenleridir. Diğer bir kısmı ise ağ yapısı ve talep kalıpları gibi sistemin işletileceği ortama ait özellikler ve toplu taşıma ağının mevcut kaynaklarından oluşur. TTATP'nin; seyahat talebi, fizibil olma kısıtları, amaç fonksiyonları, karar değişkenleri, talep kalıpları ve yolcu davranışı gibi altı temel özelliğinden bahsetmek mümkündür.

**1. Seyahat Talebi:** Yolcuların, mevcut ulaşım seçeneklerinin kalitesi ve fiyatları gibi faktörleri göz önünde bulundurarak, belirli koşullar altında yapmayı seçecekleri seyahat sayısını ve türünü ifade eder. Seyahat talebi, başlangıç-varış (B-V) matrisi<sup>7</sup> ile gösterilebilir. B-V matrisi her bir hücrenin, başlangıç noktasından varış noktasına kadar olan yolculuk sayısını temsil ettiği bir matristir.

Seyahat talebi değişkendir ve bu talepteki değişimler ya yeni bir rota (veya ağ) planlamasını ya da mevcut rotalarda değişiklik yapma ihtiyacını doğurmaktadır. Buna rağmen

---

<sup>7</sup> Bkz sayfa 66



literatürdeki birçok çalışmada, TTATP'nin çözümünü kolaylaştırdığı için, seyahat talebinin sabit kabul edildiği görülmektedir (Pattnaik vd., 1998; Chien vd., 2001a; Bielli vd., 2002; Chakroborty ve Dwivedi, 2002; Chakroborty, 2003). Her ne kadar zamanla değişen bir seyahat talebi kullanmak gerçek hayat problemini daha iyi temsil etse de bu yaklaşım modellemeyi ve problemin çözümünü zorlaştırmaktadır. Ayrıca değişen seyahat talebi yaklaşımıyla elde edilen sonuçların doğruluğu da şüphelidir (Shih ve Mahmassani, 1994). Bu nedenle bu çalışmada da sabit seyahat talebi değerleri kullanılmıştır.

2. **Fizibil Olma:** TTATP'nin fizibil çözümlerine ulaşmak için yaygın olarak kullanılan kısıtlardan bazıları; maksimum/ minimum servis frekansları, izin verilen filo maksimum büyüklüğü ve yük faktörü<sup>8</sup> (Pattnaik vd., 1998), rota uzunluğu (Cipriani vd., 2012) ve işletme maliyetidir.
3. **Amaç Fonksiyonu:** Toplu taşıma, şehirlerin yaşam kalitesi ve sosyo-ekonomik gelişimleri açısından çok önemli bir rol oynar. Bu nedenle, mümkün olan en düşük işletme maliyetiyle hizmet vermeye çalışırken hem hizmet verimi hem de ekonomik verim hedeflerine odaklanır. Yani seçilen amaç fonksiyonları bir toplu taşıma ağının cazipliğini ve performansını etkilemektedir (van Nes ve Bovy, 2000). Dolayısıyla bir toplu taşıma sistemi için tasarım amaçlarını belirlerken hem kullanıcıların hem de işletmecilerin bakış açısını dikkate almak gerekir. Bununla ilgili olarak literatürdeki birçok çalışmada böyle bir sistem tasarlanırken, aşağıdaki amaç fonksiyonlarından biri veya birkaçının kombinasyonu kullanılmıştır (van Oudheuden vd., 1987; Kepaptsoglou ve Kadaftis, 2009): (1) Kullanıcı faydasının maksimizasyonu; (2) işletme maliyetinin minimizasyonu; (3) toplam refahın maksimizasyonu; (4) kapasite maksimizasyonu; (5) enerji tasarrufu ve çevrenin korunması; (6) bireysel parametrelerin (bekleme süresi, aktarma sayısı, yakıt) minimizasyonu.

TTATP'nin doğal karmaşıklığı nedeniyle problemin sadece bir tek amaç fonksiyonunun olduğu durumlarda dahi çözümünün bulunması oldukça zordur. Buna rağmen toplu taşıma sistemlerinin karşılanması gereken ve genellikle birbiriyle çelişen birden fazla amaç vardır (Mandl,1980). Ceder ve Wilson yaptıkları çalışmada (1986) TTAT modelleri kurulurken kullanılan en yaygın amaç fonksiyonlarının genelleştirilmiş maliyetlerin minimize edilmesi veya toplu taşıma ağını kullanan yolcu sayısının maksimizasyonu olduğunu vurgulamışlardır. Berechman (2013), toplam refahın maksimizasyonunun toplu taşıma

---

<sup>8</sup> Yük faktörü veya yolcu yük faktörü, otobüs gibi toplu taşıma hizmetlerinin kapasite kullanımının bir ölçüsüdür. Genellikle bir ulaşım hizmeti sağlayıcısının koltukları ne kadar verimli bir şekilde doldurduğunu ve bundan ne kadar gelir sağladığını değerlendirmek için kullanılır. Yük faktör değeri 1'e eşitse bu, tüm yolcuların koltukları kullandığını, eğer 1'den büyükse otobüste ayakta duran yolcuların olduğunu gösterir. (<https://ppiaf.org/sites/ppiaf.org/files/documents/toolkits/UrbanBusToolkit/>, Erişim Tarihi: 20.11.2019).

sistemi tasarlamak için en uygun hedef olduğunu kabul ederlerken van Nes ve Bovy (2000) kullanıcı ve sistem maliyetleri toplamının minimize edilmesinin daha az karmaşık ve en uygun hedef olduğunu savunmuşlardır.

Birçok çalışmada TTAT modelinin amaç fonksiyonu olarak hem sistemin hem de kullanıcının faydasına olmasından dolayı, toplam refahın optimizasyonu seçilmiştir. Burada bahsedilen kullanıcı faydası; seyahat maliyetinin, aktarma yapma sayılarının, yolculukta ve araç beklerken geçen sürelerin minimizasyonunu ve erişilen alanın maksimizasyonunu içerirken sistem faydası; sistem kullanımının, hizmet kalitesinin ve kârın maksimizasyonunu, işletme maliyetlerinin ve araç sayısının minimizasyonunu içerir (Kepaptsoglou ve Karaftis, 2009). Bazı çalışmalarda yolcu konforu, kâr ve kapasite maksimizasyonu, seyahat süresi ve yakıt tüketimi minimizasyonu gibi kullanıcı veya işletmeci tarafından veya çevresel etkilerle belirlenen özel amaç fonksiyonları da kullanılmıştır.

Kepaptsoglou ve Karaftis (2009) TTATP'nin genel hedeflerini şöyle özetlemişlerdir (akt. Buba ve Lee, 2016b):

- a. Kullanıcı faydasının; ulaşım, durağa erişim, durakta bekleme ve aktarma yapma gibi maliyetlerin en aza indirilmesi ile maksimize edilerek toplu taşımanın kullanımının da maksimize edilmesi.
  - b. Ulaşım sistemi işletme maliyetlerinin minimize edilmesi için; filo boyutunun, rota kümesi uzunluğunun, araç çalışma saatlerinin ve yakıt tüketiminin minimizasyonu.
  - c. Kullanıcı ve işletme maliyetlerinin minimizasyonu olarak ifade edilen toplam refahın maksimizasyonu.
  - d. Enerji tasarrufu, çevrenin emisyon ve gürültüden korunması.
  - e. İzin verilen maksimum rota sayısı, rota uzunlukları ve yük faktörü gibi parametrelerin optimizasyonu.
- 4. Karar Değişkenleri:** ORATP modelinde en sık kullanılan karar değişkenleri rotalar ve servis frekanslarıdır (Kepaptsoglou ve Karaftis, 2009). Literatürdeki ilk çalışmalar, önceden belirlenmiş yollar arasında ve rota başına optimal servis frekanslarını kullanarak optimum rota düzenini oluştururken (Holroyd, 1967; Byrne ve Vuchic, 1972; Byrne, 1975-1976; Kocur ve Hendrickson 1982; Vaughan, 1986), ilerleyen yıllardaki çalışmalarda kurulan modeller optimal rota düzenlerinin geliştirilmesi ve servis frekanslarının belirlenmesi ile ilgilidir (Fan, 2009).

- 5. Talep Kalıpları:** Talep kalıpları, toplu taşıma ağının içermesi beklenen yolcu akışlarının, bir semtteki duraklar gibi birden fazla başlangıç noktasından bir merkezi ticaret bölgesi (MTB) gibi bir varış noktasına (çoktan-bire) veya bu durumun tam tersi (birden-çoka) yolculukları tanımlarlar. Bu kalıplara, MTB'lerini şehrin uzak semtleri ile bağlayan toplu taşıma sistemlerinde rastlanır. Öte yandan literatürde yaygın olarak kullanılan çoktan-çoka talep kalıpları şehir merkezindeki birçok başlangıç ve varış noktası arasındaki yolculukları tanımlar (Kepaptsoglou ve Karlaftis, 2009; Kılıç, 2010).
- 6. Yolcu Davranışı:** TTAT literatüründe, yolcu davranışını, trafik atamasının<sup>9</sup> temsil ettiği kabul edilir. Literatürdeki önemli iki trafik ataması modeli, tek yol ve çok yol atamalarıdır. Hep ya da Hiç Ataması olarak da bilinen tek yol ataması, tüm yolculukları belirlenen başlangıç ve varış noktaları arasındaki bir tek en kısa yola ataması nedeniyle gerçek yolcu davranışını temsil edemez (Dial, 1971). Çok yol atama modelleri ise bir yola ilk ulaşan aracın o yola hizmet etme olasılığına dayanarak bir eşdeğer rotalar kümesi seçer (Shih ve Mahmassani, 1994). Çok yol ataması, tercih edilebilir birden fazla rota içerdiğinden otobüs duraklarında bekleme sürelerini de hesaba katar. Bu özelliği nedeniyle çok yol ataması daha gerçekçi bir yolcu davranışı olarak kabul edilse de hesaplama kolaylığı açısından birçok çalışmada Hep ya da Hiç Atamasına dayanan atama yöntemleri kullanılmaktadır.

### 2.1.1. Problemin Temsili

TTATP'de, bir ulaşım sistemi genellikle bir ağ ve zon (bölge) sistemi biçiminde basitleştirilir. Buradaki ağ terimi, sonlu sayıda  $V$  düğümden ve her bir düğüm çiftini birbirine bağlayan  $E$  bağıdan oluşan yönlendirilmemiş bir  $G\{V, E\}$  grafi ile temsil edilebilir. Graftaki düğümler ( $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ ) otobüs duraklarını ya da kavşakları, düğümleri birleştiren kenarlar ( $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\} \subseteq V \times V$ ) yolları temsil eder.

Graflar, bir ulaşım ağında bir yerden diğerine seyahat olasılığını belirleyen düğümler arasındaki bağların varlığı veya yokluğunu gösterecek şekilde düzenlendiklerinde ağın topolojisi olarak adlandırılırlar. Bir otobüs rota ağı ise düğümler, köşeler ve bağlar içeren ağırlıklı bir graf olarak temsil edilir (Nnene, 2014). Bu nedenle bu çalışmada kullanılan otobüs

---

<sup>9</sup> Bkz sayfa 32

rota ağı, bir bağı a ait ağırlığın o bağı uzunluğunu gösterdiği ağırlıklı bir graf olarak temsil edilmiştir.

**Akış:** Genellikle en az 15 dakika olarak ifade edilen belirli bir zaman diliminde yolun belirli bir noktasından geçen araç sayısı olarak tanımlanır ve herhangi bir yoldaki mümkün olan maksimum akış miktarına o yolun kapasitesi denir.

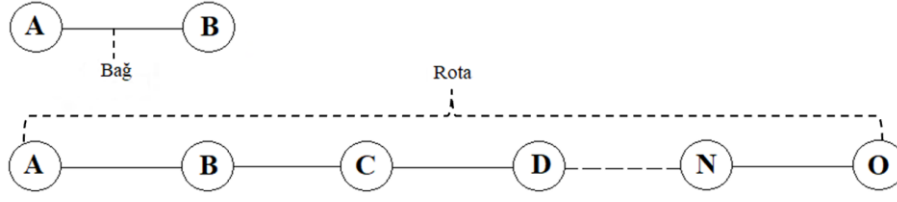
Bir yolda sürücüler tarafından algılanan akışın niteliği o yoldaki hizmet seviyesi ile temsil edilir. Hizmet seviyesi; sürücülerin deneyimledikleri yolculuk süreleri (veya hızları), gelecekteki trafik koşullarının öngörülebilirliği (hız, trafikte bekleme süreleri) ve yolculukta tecrübe edilen konfor (duruş sayısı, gerekli hızlanma ve yavaşlamalar, aracı istenilen hızda sürebilme) gibi akış niteliklerini yansıtır.

**Düğüm:** Bir düğüm, bir ulaşım ağına yüklem, indirme ve/veya aktarma yapmak için kullanılan belirli bir noktayı temsil eder. Fan ve Machemehl (2004), üç tip düğüm tanımlamışlardır: Merkezi düğümler, yolculukların üretildiği trafik analiz zonlarındaki düğümlerdir. Bir merkezi düğüm trafiğin ulaşım ağına girdiği bir başlangıç düğümü veya trafiğin ağıdan ayrıldığı bir hedef düğüm olabilir. Kesişim düğümleri, iki yolun kesiştiği noktaları gösteren düğümlerdir ve dağıtım düğümleri ise merkezi düğümleri ağına diğer bölümlerine bağlayan düğümlerdir. Bu, merkezi bağlayıcılarla sağlanır.

**Bağ:** Ulaşım ağlarında bağ, herhangi iki düğümü birbirine bağlayan bir yoldur. Bir bağı özelliklerini tanımlamak için ağ modelindeki her bağla ilişkili birkaç öznelik vardır. Bunların en sık kullanılanları arasında bağ uzunluğu, serbest akış seyahat süresi<sup>10</sup> ve bağ kapasitesi bulunur. Bu öznelikler kullanılarak herhangi bir bağ üzerindeki gecikme, olması gereken durak sayısı ve seyahat süresi, tahmin edilebilir. Bağ teriminin yanı sıra, rota veya yol terimi, bir düğümden diğerine giden yönlendirilmiş bağlar dizisini temsil edecek şekilde tanımlanır. Bir rota üzerindeki seyahat süresi, söz konusu rotayı oluşturan bağlar boyunca seyahat sürelerinin toplamı olarak belirlenir (Chow, 2007).

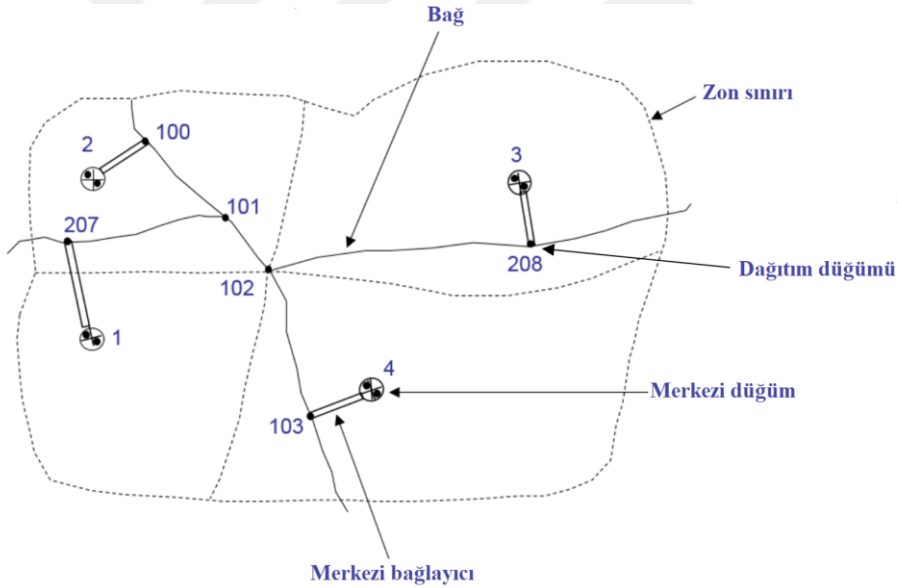
---

<sup>10</sup> Bir bağ üzerindeki serbest akış seyahat süresi o bağ üzerinde hiç akış olmadığı zamanki seyahat süresidir.



Şekil 2.1: Bağ ve Rota

**Trafik Analiz Zonu (TAZ):** Bir ulaşım sisteminde bir TAZ, bir kentsel alanın bir bölümünü ifade eder. TAZ'ların her birinde, ulaşım modelini belirlemek ve doğrulamak için çeşitli veriler toplanabilir. Bu veriler, bölgedeki insanların demografik özelliklerini ve ticarethanelerin, eğitim ve sosyal hizmet tesislerinin ekonomik faaliyet ve istihdam seviyelerini içerir (Ortúzar ve Willumsen, 2011: 477). Her TAZ, coğrafi merkezine yakın bir yerdeki bir merkezi düğüm ile temsil edilir.



Şekil 2.2: TAZ'ların, Düğümlerin ve Bağların Grafikselsel Gösterimi

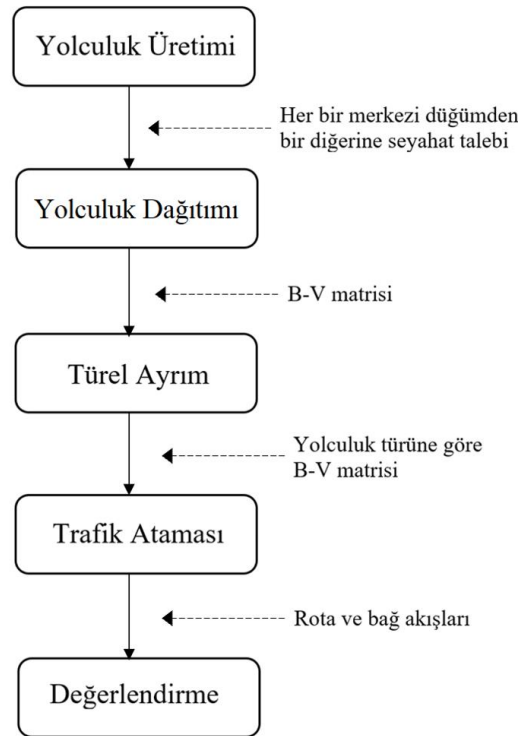
(<https://mycourses.aalto.fi/course/view.php?id=25995&section=2>, Erişim Tarihi: 08.02.2020)

Şekil 2.2 düğümlerin, bağların ve TAZ'ların grafikselsel bir temsilini göstermektedir. Bu grafiğe kesikli çizgilerle ayrılan alanlar birer TAZ'dır. Bağlar, merkezi düğümleri (1,2,3 ve 4) içerenler dışındaki herhangi bir düğüm çiftini bağlayanlar dışındaki bağları temsil eder (örneğin, 102'den 208'e kadar olan bölüm bir bağlantıdır). Merkezî bağlayıcılar ise merkezi düğümleri ulaşım ağına bağlayan bağlantılardır, sadece ağı modellemesini kolaylaştırmak amacıyla

kullanılırlar. Çoğunlukla hayalidirler ve toplu taşıma kullanıcılarının amaçlanan hedeflerine ulaşmaları için hizmet veren rotalara ulaşmak için yürümek zorunda oldukları mesafeleri temsil ederler. Bir merkezi düğüm belirli bir TAZ'ın "talep" (başlangıç ve/veya varış) merkezini temsil eder. Dağıtım düğümleri ise merkezi bağlayıcılar ile bağların kesişim noktalarıdır (örneğin 100, 103, 207 ve 208) ve en kısa yol algoritmasının uygulanmasında başlangıç ve/veya varış noktası olarak kullanılırlar.

Ulaşım sisteminin bir temsili oluşturulduktan sonra, dört aşamalı ulaşım modeli olarak bilinen Şekil 2.3'deki analiz ve planlama işlemleri gerçekleştirilebilir. Bu dört aşama yolculuk üretimi, yolculuk dağıtımını, türel ayırım ve trafik atamasıdır.

Dört aşamalı ulaşım modelinin ilk aşamasında, üzerinde çalışılan TAZ'ın ekonomik faaliyet düzeylerinin verilerine dayanarak o TAZ'ın ürettiği ve çektiği toplam yolculuk sayısı tahmin edilir. Bir sonraki aşama, bu yolculukları başlangıç düğümlerinden belirli varış düğümlerine dağıtarak devam eder. Üçüncü aşama olan türel ayırım aşamasında yolculukların; yaya olarak veya bisiklet, araba, otobüs, metro vb. ulaşım araç türlerinden hangisi ile yapıldığı tahmin edilir. Son aşama olan trafik atamasının amacı ise yolculukların ağ boyunca nasıl ilerlediğini, üretilen trafik akışlarını, ortaya çıkan trafik koşullarını ve her bir Başlangıç-Variş (B-V) çifti için yolculuk maliyetlerini tahmin etmektir (Ortúzar ve Willumsen, 2011).



Şekil 2.3: Dört Aşamalı Ulaşım Modeli (Peterson, 2007)

Bu çalışmada kullanılan dört aşamalı modelin yolculuk üretimi, yolculuk dağıtımını ve türel ayırım aşamaları Alt Yapı Mühendislik Proje Ltd. Şti. tarafından Malatya Belediyesi Ulaşım Ana Planı için toplanan veriler yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Son aşama olan trafik ataması aşaması ise Python 3.18 programı üzerinde AequilibraE<sup>11</sup> paketi yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Bu nedenle TTATP'nin çözümünde bu dört aşamadan sadece Trafik Atama aşamasının teorisi detaylı şekilde açıklanmıştır.

### 2.1.2. Trafik Atama

Dört aşamalı modelin son aşaması olan Trafik Atama, B-V çiftleri arasındaki rotaların seçimi ile ilgilidir. Kısaca bir karayolu ağındaki B-V seyahat talebi matrisinin, ulaşım ağını oluşturan bağlara yüklenmesidir (Ceylan, 2009).

Trafik atamanın amaçları şöyle sıralanabilir (Mathew, 2009):

*“(1) Bağlar üzerindeki trafik hacmini ve muhtemelen kavşaklardaki dönüş hareketlerini tahmin etmek, (2) Yolculuk dağıtımında kullanılmak üzere B-V çiftleri arasındaki yolculuk maliyetlerinin tahminlerini vermek, (3) Toplam trafik akışı ve toplam sistem seyahat süresi gibi ağ ölçümleri elde etmek için, (4) Belirli bir talep seviyesi için bölgeden bölgeye seyahat maliyetlerini (sürelerini) tahmin etmek, (5) Makûl bağ akış değerleri elde etmek ve çok sıkışık bağları belirlemek, (6) Her bir B-V çifti arasında kullanılan rotaları tahmin etmek, (7) Belirli bir bağ veya yolu kullanan B-V çiftlerini analiz etmek, (8) Gelecekte yapılması planlanan kavşakların tasarımı için dönüş hareketleri elde etmek.”*

Bir trafik atama modelini formüle etmek ve çözmek için; (1) seyahat talebine, (2) ulaşım sisteminin ağ modeline ve (3) seyahat talebinin ulaşım sistemi üzerindeki dağılımının bir tahminine ihtiyaç vardır. Dört aşamalı modelin ilk üç aşamasıyla tahmin edilen seyahat talebi, yolcuların ulaşım sisteminin performansına bakarak verecekleri muhtemel seyahat kararlarını temsil eder. Bu seyahat kararları; varış noktası, araç türü, seyahat sıklığı ve hatta seyahat edip etmeme seçimlerini içerir. Trafik atama formülasyonunun ikinci bileşeni, ulaşım sisteminin özelliklerinin bir ağ modelidir. Bu ağ modelinin işlevi, seyahat talebi ile ulaşım sisteminin performansı arasındaki ilişkiyi tanımlamaktır. Trafik Atama modelinin üçüncü bileşeni seyahat talebinin ulaşım sistemi üzerindeki dağıtımının bir tahminini elde etmektir.

Bir trafik atama modeli, trafik akışının bir ulaşım ağı sisteminden nasıl geçtiğini ve bu akışın ulaşım sistemi üzerindeki; kat edilen mesafe, seyahat süresi, durakta bekleme süresi, yakıt tüketimi ve çevre kirliliği gibi etkilerini tahmin etmeyi amaçlar. Ne var ki tüm trafik atama

---

<sup>11</sup> AequilibraE, ulaşım modellemesi için tasarlanmış ilk kapsamlı Python paketidir. Python ekosisteminde diğer açık kaynaklı paketlerde bulunmayan ve ulaşım ağı problemlerinin çözümü için gerekli tüm kaynakları sağlayacak şekilde geliştirilmiştir.

modelleri bu tahminleri yaparken, yolculuk yapanların bir rota seçerken dikkate aldıkları tek faktörün bağlardaki seyahat süresi olduğunu varsayarlar. Bu modellerden bazıları; Kullanıcı Dengesi, Sistem Optimal, Hep ya da Hiç, Artışsal ve Kapasite Kısıtlı atamadır.

### 2.1.2.1.Kullanıcı Dengesi Ataması

Kullanıcı Dengesi (KD) Wardrop'un birinci ilkesine göre kurulan trafik atama modelidir. İktisattaki arz-talep dengesi kavramına benzer şekilde; seyahat talebinin, bu seyahat talebine hizmet veren ulaşım sistemi performansına karşı dengelenmesi gerektiğini önermektedir. Bu ilkeye göre: *"Fiilen kullanılan tüm rotalardaki seyahat süreleri eşittir ve bu süre kullanılmayan rotalardaki seyahat sürelerinden daha azdır."* Yani bu denge durumunda, hiçbir kullanıcı kendi rotasını değiştirerek seyahat maliyetini değiştiremeyecektir (Wardrop, 1952).

Wardrop'un birinci ilkesinin uygulanabilir olması için tüm yolcuların; kullanılıp kullanılmadığına bakılmaksızın ağ üzerindeki tüm olası rotalar hakkında mükemmel bilgiye sahip olduğu, rotalarını bireysel seyahat sürelerini minimize edecek şekilde seçtikleri ve aynı trafik koşullarındaki tüm yolcuların aynı seyahat sürelerini tecrübe ettikleri varsayımlarının sağlandığı kabul edilir.

Yukarıdaki varsayımlar altında bir rota üzerindeki trafik akışı için KD trafik ataması, aşağıdaki doğrusal olmayan matematiksel optimizasyon programına eşdeğer kabul edilir (Beckmann, 1955):

$$\sum_k f_k^{rs} = q_{rs} \quad \forall r, s \quad (2.1)$$

$$f_k^{rs} \geq 0 \quad \forall k, r, s \quad (2.2)$$

$$x_a \geq 0 \quad a \in A \quad (2.3)$$

$$x_a = \sum_r \sum_s \sum_k f_k^{rs} \delta_{a,k}^{rs} \quad \forall a \quad (2.4)$$

Kısıtları altında

$$\min_x \sum_a \int_{x=0}^{x_a} t_a(x_a) dx \quad (2.5)$$



Burada  $k$ ,  $r$ - $s$  B-V çiftini birleştiren bir yoldur (rotadır);  $f_k^{rs}$ ,  $k$ -yolu üzerindeki trafik akışıdır;  $q_{rs}$ ,  $r$  ve  $s$  arasındaki seyhata talebidir;  $x_a$ ,  $a$ -bağlantısı üzerindeki trafik akışıdır (yüküdür);  $t_a$ ,  $a$ -bağlı üzerindeki seyahat süresidir;  $t_a(x_a)$ ,  $a$ -bağlı üzerindeki akış  $x_a$  olduğunda  $a$ -bağlı üzerindeki seyahat süresidir. (2.1) Kısıtı, akış koruma kısıtıdır. Bu kısıt, her bir B-V çiftini bağlayan tüm yollardaki akışın o B-V çifti arasındaki yolculuk talebine eşit olması gerektiğini belirtir. Başka bir deyişle, tüm B-V yolculuk taleplerinin ağa atanmasını sağlar. (2.2) ve (2.3) negatif olmama kısıtlarıdır.  $\delta_{a,k}^{rs}$ , çakışıklık matrisi elemanıdır. Bu elemanın değeri  $a$ -bağlı  $(r, s)$ 'yi bağlayan  $k$ -yolu üzerinde ise 1'e, aksi takdirde 0'a eşittir. Yukarıdaki modelde amaç fonksiyonu (2.5) bağ akışları cinsinden formüle edilmiş iken kısıtlar rota akışları cinsinden formüle edilmişlerdir. Dolayısıyla bağ akışlarını yol akışları cinsinden temsil etmek için çakışıklık matrisi kullanılarak türetilen (2.4) kısıtına ihtiyaç vardır. Amaç fonksiyonu (2.5), bağ akışa bağlı seyahat süresi fonksiyonlarının integrallerinin toplamıdır. Görüldüğü üzere bu amaç fonksiyonu herhangi bir ekonomik veya davranışsal yorum içermez, sadece denge problemlerini çözmek için kullanılır (Sheffi, 1985: 60).

Beckmann (1955) yukarıdaki matematiksel programlama probleminin çözümünün KD trafik ataması probleminin çözümüne eş değer olduğunu göstermiştir. Bu eşdeğerlik, problemin bir minimum noktası için Karush-Kuhn-Tucker (KKT) gereklilik koşullarının tam olarak KD koşulları olduğu gösterilerek ispatlanabilir (Sheffi, 1985:63 – 66; Patriksson, 2015:35-36).

Bu çalışmada KD Trafik Atama modeli kullanılmıştır. KD'de bağ üzerindeki seyahat süresi fonksiyonu monoton artan bir fonksiyondur, ayrıca belirli bir bağ üzerindeki seyahat süresi trafik akışından ve ulaşım ağındaki diğer bağlardan bağımsızdır. Bu özelliklerinden dolayı KD konveks bir problemdir. Bu tür konveks problemleri çözmeye kullanışlı olduğu için bu çalışmada Biconjugate Frank Wolfe algoritması kullanılmıştır.

### 2.1.2.2.Sistem Optimal Ataması

KD ilkesine göre trafik atama, mevcut ağ trafiğinin dağıtımının iyi bir temsili olabilse de trafiğin bu şekilde dağıtılması genellikle ulaşım ağı sisteminin mümkün olan en iyi kullanımını sağlamaz. Bunun nedeni, KD yaklaşımının, her bir yolcunun yalnızca kendi çıkarları doğrultusunda hareket ettiğini, ancak bir bütün olarak sistemin faydasına hareket etmesi gerekmediğini düşünmesidir. Dolayısıyla trafikte, kendi çıkarları doğrultusunda hareket eden bireysel yolcuların davranışları ile tüm toplumun çıkarları arasında bir tutarsızlık olacaktır. Bu

tutarsızlık iktisatta “özel maliyet ve sosyal maliyet arasındaki fark” olarak bilinir (Pigou, 1920; Knight, 1924). Bu fikir doğrultusunda Wardrop (1952), toplam seyahat maliyetini en aza indirmek için ikinci bir ilke, Sistem Optimal (SO) trafik atama ilkesini önermiştir. Bu ilke, bazı özel durumlar haricinde, tüm sürücülerin kendi başlarına değil de toplam sistem seyahat süresini minimize edecek şekilde hareket ettiklerini kabul eder. Yani, SO trafik atama modelinde sürücüler, rotalarını tek taraflı olarak değiştirerek seyahat sürelerini azaltabilirler. Buna göre “*Denge noktasında ortalama seyahat süresi minimumdur.*” Burada özel durumlardan kast edilen ise bazı yolcuların, seyahat edebilecekleri minimum maliyetten daha yüksek maliyetli rotalara atanabilmesi durumudur. Çünkü bazı yolcuların bu tür ek maliyetlere katlanması sayesinde yolcuların çoğu büyük oranda tasarruf edebileceklerdir. Ne var ki böyle bir durumun kendini sürdürmesi olası değildir ve sonuç olarak SO trafik atama modeli sabit değildir. Bu nedenle SO modeli gerçek sürücü davranışı ve denge modeli olarak kullanılmaktan ziyade, daha çok, çeşitli trafik kontrol politikalarını değerlendirmek için yararlı bir kriter olarak kullanılır (Chow, 2007).

SO ataması, ağda harcanan toplam seyahat süresinin bir minimizasyon problemi olarak formüle edilebilir:

(2.1)-(2.4) kısıtları altında

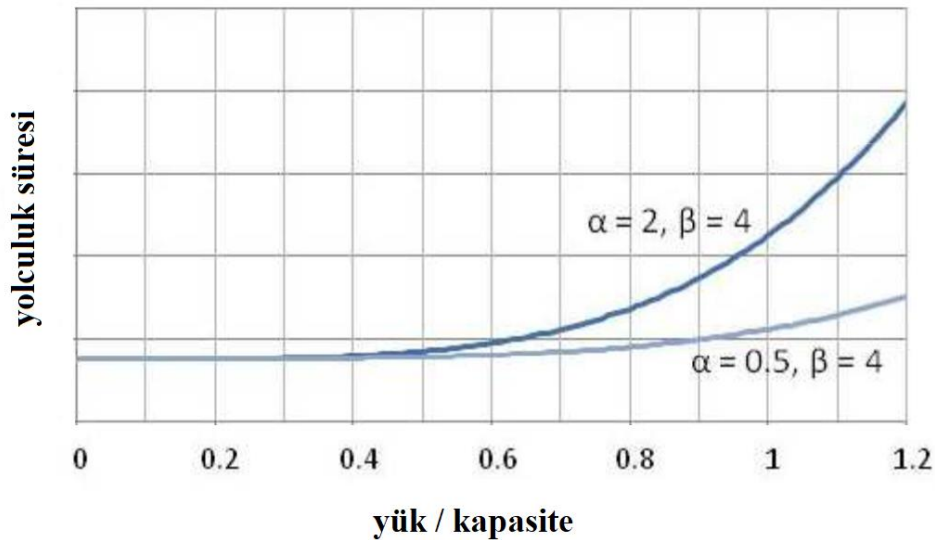
$$\min_x \sum_a x_a t_a(x_a) \quad (2.6)$$

Yukarıdaki programı çözen akış modeli, (2.1)-(2.4) kısıtlarını karşılarken (2.6) amaç fonksiyonunu minimize eder ve daha önce bahsedildiği gibi genellikle bir denge durumunu temsil etmez (Sheffi, 1985: 69). SO trafik atama modeli, sadece, trafik sıklığının olmadığı ağlarda dengeyi temsil etmek için kullanılır. Bu tür ağlarda SO ve KD atamaları aynı denge durumlarını vereceklerdir. Bunun nedeni her iki modelin de bağ seyahat sürelerinin ( $t_a$ ) bağ akışlarına ( $x_a$ ) bağlı olarak değiştiğini varsaymasına rağmen trafik sıklığı olmayan ağlarda  $t_a$ 'nın  $x_a$ 'nın bir fonksiyonu olmamasıdır (Sheffi, 1985: 73).

Trafik atama modellerinde göz önüne alınan ulaşım ağları, gerçekte, trafik sıklığının olduğu varsayılan ağlardır. Doğal olarak bu ağlardaki bir  $a$ -bağı üzerindeki seyahat süresi monoton artan bir maliyet fonksiyonu olarak temsil edilir. Bu maliyet fonksiyonunu tanımlamak için pek çok yöntem vardır fakat en genel yaklaşım Amerikan Karayolları Bürosu (BPR) fonksiyonudur (Muijlwijk, 2012):

$$t_a(x_a) = \frac{L_a}{v_a^{max}} \left( 1 + \alpha \left( \frac{x_a}{q_a} \right)^\beta \right)$$

Burada  $t_a(x_a)$ , trafik akışına bağlı seyahat süresi fonksiyonudur;  $L_a$ ,  $a$ -bağının uzunluğudur;  $v_a^{max}$ ,  $a$ -bağı üzerindeki maksimum hızdır;  $q_a$ ,  $a$ -bağının kapasitesidir.  $\frac{L_a}{v_a^{max}}$  Değeri ise bir bağ üzerindeki serbest akış seyahat süresidir.  $\alpha$  Ve  $\beta$  her bir bağ için sabit tanımlı kalibrasyon parameterleridir.  $\alpha$ , mevcut yol kapasitesinde birim mesafe başına seyahat süresinin serbest akıştakine oranıdır ve  $\beta$ , tıkanıklık etkisinin derecesini temsil eder (Lee, 1995; Mtoi ve Moses, 2014).  $\beta$ 'nın değeri, genellikle, 4 alınırken  $\alpha$ , üzerinde çalışılan yolun türüne göre değer alır. Örneğin otobanlar için  $\alpha = 0.5$  gibi düşük bir değer alırken şehir içi yollar için  $\alpha = 2$  gibi bir değer alabilir. Bu çalışmada literatürde yaygın olarak kullanılan  $\alpha = 0.15$  değeri alınmıştır.



Şekil 2.4: BPR Fonksiyonu (Muijlwijk, 2012)

### 2.1.2.3. Hep ya da Hiç Trafik Ataması

Hep ya da Hiç ataması, en basit trafik atama türüdür ve diğer atama modelleri için yapı taşı işlevi görür. Frank-Wolfe algoritması da dâhil olmak üzere, birçok algoritmanın yön bulma adımındaki her iterasyonda bir modül olarak veya başlatma için temel atama yöntemi olarak kullanılır (Muijlwijk, 2012).

Hep ya da Hiç ataması herhangi bir başlangıç düğümünden herhangi bir varış düğümüne yapılan yolculukların bu düğümler arasındaki minimum seyahat süreli bir tek yola atanması

ilkesine dayanır. Yani trafik akışını sağlamak için birden fazla yolun kullanıldığı gerçeğini göz ardı eder ve atama yaparken bağların kapasitesine veya bağlar üzerinde trafik sıklığı olup olmadığına da bakmaz. Ayrıca bir bağ üzerindeki seyahat süresinin o bağ üzerindeki trafik akışının bir fonksiyonu olduğunu varsaymak yerine bağlar üzerindeki hareket süresinin trafik sıklığına bağlı olarak değişmediğini ve sabit olduğunu kabul eder (Hui, 2014). Bunların yanı sıra herhangi bir B-V çifti arasında eşit maliyete sahip birden fazla yol olsa bile her B-V çifti arasında sadece bir yolun kullanıldığını varsayması nedeniyle gerçekçi bir atama modeli değildir. Buna rağmen, bu atama modelini, sürücülerin trafik tıkanıklığına takılmadan seyahat etmek istedikleri yolu belirlemede kullanılabilir.

Hep ya da Hiç trafik ataması adımları aşağıdaki gibidir (Mathew, 2009):

**Adım 1:** Seyahat talebi sıfırdan büyük olan her bir  $i-j$  çifti için, Dijkstra algoritmasını kullanarak minimum seyahat süreli en kısa rotayı belirle ve  $a$ -bağı üzerindeki akış değerini sıfıra eşit al

**Adım 2:** İterasyon sayacını bir arttır ve belirli bir  $i-j$  çifti seç.

**Adım 3:** Tüm seyahat talebini  $i-j$  çifti arasındaki en kısa yola ata. Eğer  $a$ -bağı en kısa rotanın bir parçası ise  $k$ 'inci iterasyonda  $a$ -bağı üzerinde tahmin edilen akış  $(k - 1)$ 'inci iterasyonda  $a$ -bağı üzerinde tahmin edilen akış ile seyahat talebinin toplamına eşittir, aksi takdirde  $k$ 'inci  $(k - 1)$ 'inci iterasyonda  $a$ -bağı üzerinde tahmin edilen akışı eşit al.

**Adım 4:** İterasyon sayısı seyahat talebi sıfırdan büyük olan düğüm sayısına eşit olduğunda ise  $k$ 'inci iterasyonda  $a$ -bağı üzerinde tahmin edilen akışı  $a$ -bağı üzerindeki akış olarak al. Aksi takdirde başka bir  $i-j$  çifti seç, iterasyon sayacını bir arttır ve Adım 3'e git.

#### 2.1.2.4. Artışsal Trafik Ataması

Artışsal atama, toplam trafik akışının sabit oranlarının ulaşım ağına adım adım atandığı bir süreçtir. Her bir iterasyonda, hep ya da hiç atamasına dayalı olarak, bir B-V çifti arasındaki toplam seyahat talebinin sabit bir oranı bu düğüm çifti arasındaki en kısa bağlara atanır.

Artışsal atama modeli, her yolcunun seyahat süresini en aza indirecek şekilde bir yol seçtiğini ve bağlardaki seyahat süresinin o bağlardaki akışa bağlı olarak değiştiğini varsayar. Bu nedenle, atama sırasında bağlardaki seyahat süresinin sabit olduğu varsayımıyla ulaşım ağına tek bir yolculuk ataması yapılır. Daha sonra, her bir bağ üzerindeki hareket süresi o bağ üzerindeki trafik akışı hacmine göre yeniden hesaplanır ve bu işlem tüm yolculuklar atanana

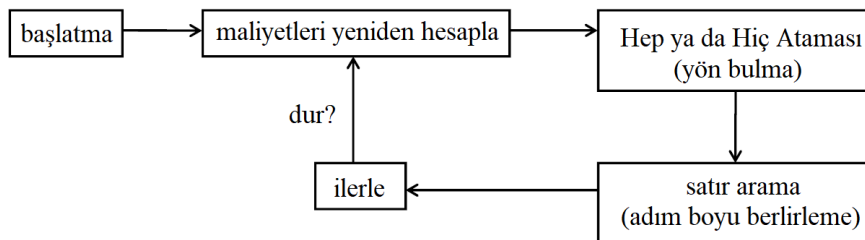
kadar tekrarlanır. Birçok iterasyondan sonra trafik akışları bir denge durumuna yaklaşır, fakat trafik akışları ve yolculuk süreleri arasında tutarsızlıklar olacağından tam bir denge çözümü vermez (Saw vd., 2015).

### 2.1.2.5. Kapasite Kısıtlı Trafik Ataması

Kapasite kısıtlı atama, hep ya da hiç trafik atamasının bağ kapasitesini yansıtan bir tıkanıklık fonksiyonuna bağlı olarak yapılan halidir. Bu yaklaşım, belirli bir noktadan itibaren trafik akışı arttıkça trafik hızının azaldığını kabul eder. Her iterasyondan sonra hacim/kapasite kısıtlamalarını yansıtmak için bağ hareket sürelerini yeniden hesaplayarak bir denge çözümüne yaklaştırmaya çalışır (Saw vd., 2015).

### 2.1.3. Frank-Wolfe Algoritması

Literatürde trafik atama problemini çözenin genel yolu FW algoritması kullanmaktır. Bir kullanıcı dengesi çözümü elde etmenin olası bir yöntemi, konveks kombinasyon algoritması olarak da bilinen Frank-Wolfe (FW) algoritmasıdır. Biconjugate Frank Wolfe, Frank Wolfe algoritmasından sadece yön bulma adımında son iki iterasyonundaki arama yönünü de hesaba katması noktasında farklılık gösterir. Bu çalışmada Python Programının Aequilibrae paketi kullanılarak FW algoritması uygulanmıştır. FW akış şeması aşağıdaki gibidir:



Şekil 2.5: Frank-Wolfe Algoritması

Frank-Wolfe Algoritması trafik atama problemini çözerken: Başlatma adımında ağ üzerinde trafik akışı sıfır kabul ederek bir Hep ya da Hiç ataması yapılır. Bu atamada akış değeri

sıfır kabul edilerek maliyetler hesaplanır. Sonra ilk iterasyon başlar ve her bir iterasyonda (Muijlwijk, 2012):

- İlk olarak, maliyetler önceki iterasyondan gelen akışlara göre yeniden hesaplanır.
- Sonrasında yeni maliyetlere göre Hep ya da Hiç ataması yapılır, bu yeni akışları oluşturur. Bu işlem "yön bulma" olarak da adlandırılır. Bulunan yeni yönde bir miktar akış kayması olacaktır.
- Bir satır aramasıyla, hangi miktarda akışın bu yeni yönde kaydırılacağı belirlenir. Bu işlem adım boyutu belirleme olarak da adlandırılır. Satır aramasında, amaç fonksiyonu hem eski akışın hem de yeni elde edilen akışın tüm doğrusal kombinasyonları üzerinde en aza indirilir.
- Minimum amaç fonksiyonunu veren doğrusal kombinasyon, iterasyonun sonundaki son akıştır.
- Bu işleme, bir durdurma kriteri karşılanana kadar tekrar edilir.

## 2.2. TTATP İle İlgili Önceki Çalışmalar

Literatürde, son yıllarda, TTATP ile ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Problemin çözümü için Dubois vd. (1979) rota ağı tasarımı ve servis frekansının belirlenmesinden oluşan iki aşamalı bir model önermişlerdir. Karar değişkeni olarak rota ve frekansı, amaç fonksiyonu olarak seyahat süresinin minimizasyonunu ve kısıt olarak da yatırım maliyetlerini kullanmışlardır. Kurdukları modelin ilk aşamasında, sezgisel bir algoritma kullanarak, optimal ağı oluşturacak sokak kümelerinin seçimi ve bu sokaklarla ilişkili otobüs rotalarının seçimi problemlerini çözmüşlerdir. İkinci aşamadaki ise yolcu bekleme sürelerini dikkate alan analitik bir model kullanarak optimal rota servis frekanslarının hesaplanması problemini çözmüşlerdir. İkinci aşama problemini çözmek için önce toplam genel seyahat talep matrisini belirlemişler, sonra tahmin edilen toplam seyahat matrisinden toplu taşıma payını bulmak için beklenen seyahat sürelerini kullanmışlardır. Constantin ve Florian (1995) filo büyüklüğü kısıtını sağlarken bekleme süresini ve toplam seyahat süresini minimize eden analitik bir model önermişlerdir. ORAT probleminin non-konveks bir modelini kurmuş ve çözüm için sub-

gradyan<sup>12</sup> bir algoritma kullanmışlardır. Pattnaik vd. (1998), kullanıcı bakış açısından toplam seyahat süresinin ve işletmeci bakış açısından da otobüsün kat ettiği mesafenin minimizasyonunu sağlayacak şekilde optimize edilmiş bir ağ düzeni belirlemek için bir ORATP modeli kurmuşlardır. Karar değişkeni olarak rota düzenini ve kısıt olarak; maksimum yük faktörünü, müsaade edilen filo büyüklüğünü ve minimum ve maksimum servis frekansını kullanmışlardır. Yang vd. (2007) ORATP'yi çözmek için karınca kolonisini, birbiriyle paralel çalışan ve sadece birbirleriyle iletişim kuran alt kolonilere bölerek karıncalar arasında daha az iletişim kurulmasını sağlayan Kaba Taneli Paralel Karınca Koloni Algoritmasını (KTPKKA) önermişlerdir. Buldukları sonuçları klasik Max-Min Karınca Sistemi (MMKS) (Stutzle ve Hoos, 2000) ve Karınca-ağırlığı stratejisini kullanan Karınca Koloni Algoritması (KKA) (Gunby ve Gustavsen, 2015) ile karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak KTPKKA'nın, hem doğrudan seyahat eden ortalama yolcu yoğunluğu hem de işlem süresi açısından en iyi performansa sahip olduğunu göstermişlerdir. Mohaymany ve Gholami (2010), tüm maliyetlerin optimize edildiği çok modlu bir besleyici yol ağı tasarım problemi için en az iki farklı türde araçla yapılan ulaşımı ele alan bir KKA önermişlerdir. Jiang vd. (2010) TTRP'yi, KKA'nın duranlığa düşüp düşmediğini anlamak için, bir durağanlık sayacı kullanan İyileştirilmiş Karınca Koloni Algoritması (İKKA) çözmüşlerdir. KKA'dan farklı olarak, bir iterasyondan sonra daha iyi bir çözüm bulunmadığında durağanlığı bir attırmayı ve bu durağanlık belirli bir eşik değere ulaştığında da her bir kenarla ilişkili feromon seviyelerinin yeniden başlatılmasını önermişlerdir. Bu sayede algoritmanın durağanlığa düşmesini ve bir lokal optimum çözüm elde etmesini engellemişlerdir. Türettikleri İKKA'yı klasik MMKS ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar yeni algoritmanın MMKS'ye göre çözüme daha hızlı yaklaştığını, ortalama iterasyon sayısı ve ortalama yol uzunluğu açısından daha iyi performans sergilediğini göstermiştir. Liu vd. (2010) sabit talep altında ORATP'yi çözmek için aday çözümleri GA'nın ürettiği ve optimal çözümün bulmak için TB'nin kullanan bir yöntem önermişlerdir. Poorzahedy ve Safari (2011) ORATP'yi çözmek için bir Karınca Sistemi (KS) algoritması önermişlerdir ve bu sistemi GA ile karşılaştırmışlardır. Buldukları sonuçlara göre KS; rota sayısı, filo büyüklüğü, araç içinde geçen süre ve bekleme süresi açısından GA'dan daha iyi sonuçlar vermiştir. Hem GA hem de KS, tüm ölçüler açısından mevcut çözümden önemli ölçüde daha iyi performans göstermiştir. Babazadeh vd. (2011), karayolu ağı tasarım problemi için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) kullanan iki seviyeli bir optimizasyon modeli oluşturmuşlardır. Yaptıkları çalışmada. PSO ve hibrit KKO algoritmalarının performanslarını Sioux Falls test ağı üzerinde karşılaştırmışlardır.

---

<sup>12</sup> Sub-gradyan algoritmalar, özellikle, diferansiyellenemeyen amaç fonksiyonları olan problemleri çözmek için kullanılan iteratif algoritmalar (Boyd vd., 2003).

Bagloe ve Ceder (2011) ORATP'yi çözmek için üç bileşenden oluşan bir algoritma önermişlerdir. İlk bileşen ile durakların konumu, yüksek yoğunluklu ulaşım talep yerlerine yakınlık ve kümelenme faktörüne göre belirlemiş ve ikinci bileşen ile bir dizi aday yol oluşturmak için Newton yerçekimi teorisini kullanmışlardır. Son bileşende ise iyi bir çözüm bulmak için oluşturulan aday yollar üzerinden GA ve KS'nin birleşimi olan arama algoritması çalıştırmışlardır. Cipriani vd. (2012) sub-optimal rotaların ve frekanslarının eşzamanlı olarak belirlenmesi ile ilgilenen iki aşamalı bir model önermişlerdir. Karar değişkenleri olarak rotaları ve servis frekansını, amaç fonksiyonu olarak toplam maliyeti en aza indirmeyi seçmişlerdir. Modelde kullandıkları kısıtlar ise rota uzunluğu, yük kapasitesi ve maksimum yol sıklığıdır. Modelin ilk aşamasında mevcut rotalar dışında, kullanıcı ve işletmeci bakış açılarına göre rota tipleri üretmişlerdir. Modelin ikinci aşamasında ise üretilen rotalar arasından optimal ağı bulmak için Paralel-GA'yı (P-GA<sup>13</sup>) kullanmışlardır. Szeto ve Jiang (2012), aktarma sayısının ve kullanıcıların toplam seyahat süresinin Hibrit Geliştirilmiş-Yapay Arı Kolonisi (HG-YAK) algoritmasıyla optimize edildiği bir model önermişlerdir. HG-YAK algoritması ile rota aday kümelerini belirlerken ve bir komşuluk arama sezgiseli yardımı ile servis frekans ataması yapmışlardır. Bagherian vd. (2013), TTRP'yi, karışık tamsayı formülasyon yoluyla çözmek için bir Ayırık-PSO (A-PSO) önermişlerdir. Uyguladıkları yöntemin ilk aşamasında fizibil rota kümeleri oluşturmak için bir sezgisel yöntem kullanmış ve ikinci aşamada optimal rota kümelerini belirlemek için bir A-PSO kullanmışlardır. Nikolić ve Teodorović (2013), ORATP'yi; seyahat talebi, talebi karşılanan kullanıcı sayısı, toplam aktarma sayısı ve kullanıcı maliyeti açısından optimize etmek amacıyla çözmek için bir Yapay Arı Kolonisi (YAK) algoritması önermişlerdir. Nikolić ve Teodorović (2014) TTATP'yi çözmek için Lučić ve Teodorović'in önerdiği (2003) YAK algoritmasının iyileştirilmiş bir versiyonunu kullanmış ve bunu diğer yaklaşımlarla karşılaştırmışlardır (Mandl,1980; Shih ve Mahmassani, 1994; Baaj ve Mahmassani, 1995; Bagloee ve Ceder, 2011). Yeni algoritmanın performansını değerlendirmek için; aktarmasız, bir aktarmayla, iki aktarmayla veya ikiden fazla aktarmayla karşılanmış veya hiç karşılanmamış aktarma taleplerinin toplamını kullanmışlardır. Szeto ve Jiang (2014), toplu taşıma ağı ve frekans ayarı problemlerini birlikte çözmek için iki aşamalı bir model önermişlerdir. Modelin ilk aşamasında bir Hibrit-Yapay Arı Kolonisi (H-YAK) algoritması ile aktarma sayısını optimize eden karma tam sayılı doğrusal olmayan bir programlama

---

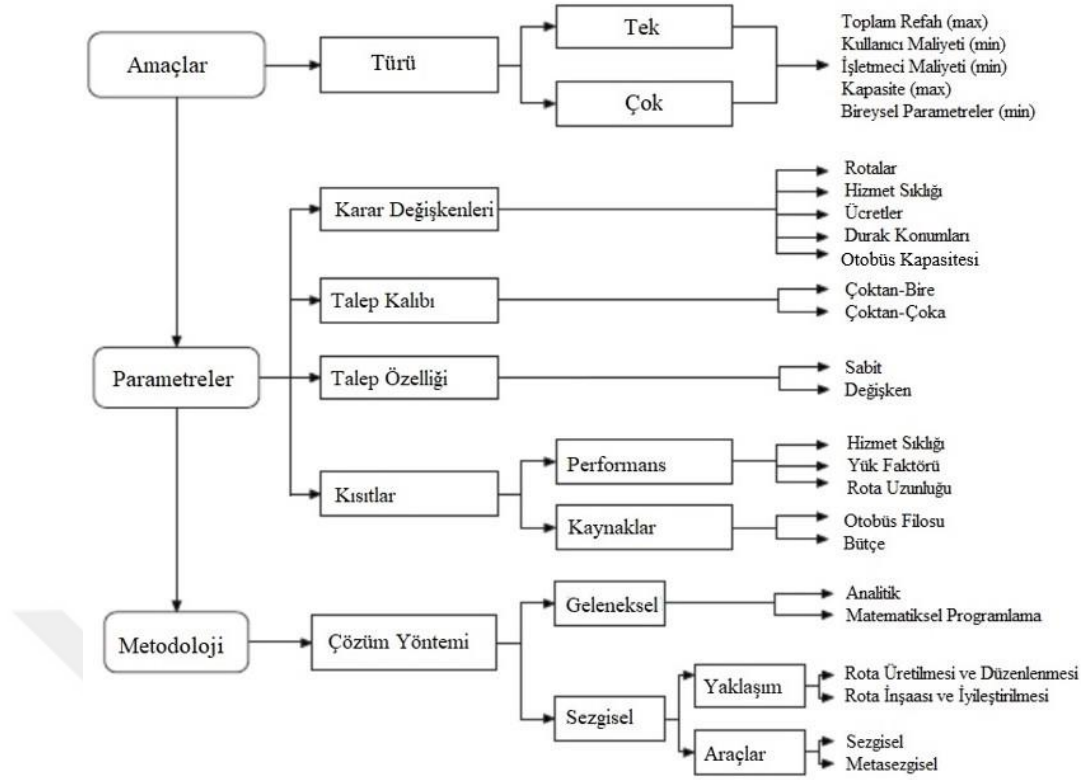
<sup>13</sup>GA'da belirli bir nesil için bir popülasyondaki bireylerin uygunluklarının değerlendirilmesi, her birey için diğer bireylerden bağımsız olarak gerçekleştirilir. Bu tür bir seri hesaplamada, her bir birey tek bir bilgisayar tarafından art arda değerlendirilir. PGA'da ise, daha hızlı hesaplama yapabilmek için, bir popülasyondaki bireylerin uygunluklarının değerlendirilmesi işlemi birden fazla bilgisayara dağıtılarak yapılır (Agrawal ve Mathew, 2004).



formülasyonu kullanmış ve alt aşamada kapasite kısıtlarına sahip bir seyahat atama modelini Simpleks yöntemi ile ele almışlardır. Kechagiopoulos ve Beligiannis (2014) TTATP'yi, her yolcunun harcadığı ortalama seyahat süresini ve karşılanmayan yolcu talebini en aza indirip ve herhangi bir aktarma yapmadan veya mümkün olduğunca az aktarma ile ulaşımı sağlayacak şekilde çözmek için bir PSO algoritması tasarlamışlardır. Uygulamada Mandl'ın İsviçre ağı problemini çözmeyi hedeflemişlerdir ve PSO'yu, GA da dâhil olmak üzere, birçok metasezgisel ile karşılaştırmışlardır. Bu algoritmaları karşılaştırırken, Nikolić ve Teodorović'ten (2014) farklı olarak, araçta geçen toplam süre yerine araçta geçen ortalama seyahat süresini kullanmışlardır.

### **2.3. TTATP Çözüm Yöntemleri**

Baaj ve Mahmassani (1991), TTATP'nin geleneksel matematiksel programlama formülasyonları ve çözüm yöntemleri ile verimli bir şekilde çözülemeyecek kadar karmaşık ve çözülmesi zor optimizasyon problemi olduğunu vurgulamıştır. Fakat bu zorluklara rağmen TTATP'nin pratik faydası bu problemin çözülmesi için kurulan model ve geliştirilen yöntem sayısının artmasını sağlamıştır (Kepaptsoglou ve Kadaftis, 2009). Literatüre bakıldığında TTATP ve ORATP'nin çözümlerinin geleneksel (analitik), sezgisel ve meta-sezgisel yöntemler olarak sınıflandırıldığı görülmektedir.



Şekil 2.6: ORATP Modellerinin Temel Özellikleri (Kepaptsoglou ve Kadaftis, 2009)

### 2.3.1. Geleneksel Çözüm Yöntemleri

Zhao ve Zeng (2008), geleneksel çözüm yöntemlerini, ORATP'yi çözmek için analitik çözüm tekniklerini kullanan modeller olarak tanımlamışlardır. Ayrıca Fan ve Machemehl (2004), bu tür modellerin, bir toplu taşıma ağının; duraklar arası mesafe, rota uzunluğu veya servis frekansı gibi bir veya birkaç tasarım parametresini elde etmek için yararlı olduğunu ancak aynı zamanda ağ yapılandırmasını tanımlamaktan ve servis frekansı parametrelerini düzeltmekten aciz olduklarını ileri sürmüşlerdir. Schéele (1980) bir TTATP'yi çözmek için, seyahat ve aktarma sırasında geçen yolculuk süreleri de dâhil olmak üzere, toplam yolcu seyahat süresini minimize etmek amacına sahip doğrusal olmayan bir model önermiştir. Ayrıca yolcu seyahat ataması ile servis frekansının belirlenmesi problemlerini eş zamanlı olarak çözmüştür. Furth ve Wilson (1981) TTATP, yolcu faydasını ve bekleme süresini içerecek şekilde ağın sosyal faydasını maksimize etmeyi amaçlayan matematiksel bir yöntem önermişlerdir. Model kısıtlarını; filo büyüklüğü, maksimum taşıt aralığı<sup>14</sup> ve toplam bütçe

<sup>14</sup> Birbirlerini takip eden iki aracın bir noktadan geçişi sırasında, talebe duyarlı toplu taşıma araçların aynı noktaları düşünülerek aralarında oluşan zaman farkı (bir aracın önünden diğer aracın önüne olan fark). (AUS Terimleri Sözlüğü, s81)

üzerine kurmuşlardır. Doğrusal olmayan filo büyüklüğü ve maksimum taşıt aralığı kısıtlarının gevşetilmiş halini Kuhn-Tucker koşullarını kullanan bir algoritma ile çözmüşlerdir. Sonuç olarak otobüs rotalarının optimal bir atamasını bulmuşlardır. Sonraki yıllarda Koutsopoulos vd. (1985) indirgenmiş bir TTATP için yolcuların bekleme süresi maliyetlerini, işletme ve araç kalabalığı maliyetlerini amaç fonksiyonuna dâhil ettikleri matematiksel bir model ve çözüm yöntemi önermişlerdir. Constantin ve Florian (1995) beklenen seyahat süresi ve durakta bekleme süresinin toplamını filo büyüklüğü kısıtları altında minimize etmeyi amaçlayan bir TTATP modeli ve çözüm yöntemi sunmuşlardır. Problemi, doğrusal olmayan non-konveks karma tam sayılı bir programlama modeli ile formüle etmişlerdir. Yolcuların otobüs rotası seçimlerini göz önüne alarak optimal otobüs rota servis frekanslarını bulmak için bir yansıtılan sub-gradyan<sup>15</sup> algoritma kullanılmışlardır. Bussieck (1998), genel olarak toplu taşıma sistemlerine uygulanabilecek şekilde, rotaları ve servis frekanslarını oluşturmak için bir matematiksel model önermiştir. Modelin ilk aşamasında amaç fonksiyonu ilgili kaynak kısıtları altında aktarmasız seyahat eden yolcu sayısını maksimize etmek iken ikinci aşamada, verilen bir hizmet seviyesi ve kalitesine göre işletmeci maliyetlerini minimize etmeyi uygun görmüştür. Çözüm için gevşetme ve dal-sınır gibi matematiksel programlama yöntemlerinin kombinasyonlarını kullanmıştır. Wan ve Lo (2003) ise TTATP'nin mevcut bir ulaşım ağı yapısının iyileştirilmesi durumunu çalışmışlardır. Bunun için bir karma tam sayılı formülasyon önermiş ve küçük ölçekli örnekleri çözebilmek için bu formülasyonu doğrusallaştırmışlardır.

TTATP, doğrusal olmayan ve kısıtlı bir optimizasyon problemi olduğundan geleneksel matematiksel yöntemlerle çözülmesi zordur. Çünkü çözüm, hesaplama yükünü önemli ölçüde arttıran, başarılı doğrusallaştırma işlemlerine dayanır. Bununla birlikte, geleneksel yaklaşımlarla ilgili sorunlar, problemin doğal karmaşıklığından değil, esas olarak bu tür problemler için kullanılan temsil mekanizmalarından kaynaklanmaktadır (Chakroborty, 2003). Chakroborty (2003), geleneksel matematiksel programlama tekniklerinin ORATP gibi problemleri çözmemesinin önde gelen nedeni olarak bir problemi sadece amaç fonksiyonu (veya fonksiyonları) ve kısıtlar aracılığıyla, ayrık değişkenlerden ziyade sürekli değişkenleri ele alarak, teorik olarak tanımlamak olduğunu ileri sürmüştür. Dahası TTATP bir NP-Zor problemdir (Zhao, 2006), yani kesin çözüm yöntemleri sadece küçük örnekler üzerinde kullanılabilir. Geleneksel yöntemlerin bu dezavantajı, büyük boyutlu TTATP problemlerini çözmeye daha uygun olan sezgisel yöntemlerin geliştirilmesini neden olmuştur (Nnene, 2014).

---

<sup>15</sup> Sub-gradyan algoritmaların, kısıtlı konveks optimizasyon problemlerini çözmeye kullanılan bir uzantısıdır ([https://web.stanford.edu/class/ee364b/lectures/subgrad\\_method\\_notes.pdf](https://web.stanford.edu/class/ee364b/lectures/subgrad_method_notes.pdf), Erişim tarihi: 06.01.2020).

### 2.3.2. Sezgisel Çözüm Yaklaşımları

Sezgisel yöntemler, genellikle, bilinen bir kesin çözüm yöntemi olmadığında veya hesaplama süresini iyileştirmek için optimal çözümü aramaktan vazgeçmenin makûl olduğu durumlarda kullanılan stratejileridir. Bu nedenle, bir NP-Zor kombinatoriyel optimizasyon problemi olan TTATP'nin çözümü için sezgisel yöntemleri kullanmak uygundur.

TTATP, uygulamada büyük bir öneme sahip olmasına rağmen, 1979'dan önce konu ile ilgili çok az çalışma yapılmıştır. Bu tarihten önceki çalışmaların birçoğunda küçük boyutlu örnekler üzerinde yöneylem araştırması yöntemleri kullanılmıştır. Örneğin, Lampkin ve Salmans (1967) seyahat talebini sabit kabul ederek maksimum sayıda yolcu taşımayı hedefleyen bir toplu taşıma ağı tasarlayacak iki aşamalı bir optimizasyon modeli önermişlerdir. İlk aşamada yolculukların aktarmasız olduklarını düşünerek ikinci aşamada türetilen rota kümelerine servis frekanslarını atamışlardır. Silman vd. (1974) de toplam seyahat süresini minimize etmek için iki aşamalı bir yöntem kullanmışlardır. Öncelikle iteratif bir rota ekleme ve silme süreci ile aday rota kümesini oluşturmuş ve sonrasında kullanılabilir otobüs sayısı kısıtı altında bu rota kümesi için servis frekanslarını belirlemişlerdir. Mandl (1980) ise TTATP'yi daha genel bir biçimde ele almış ve optimizasyon tekniklerini bir bilgisayarda uygulamıştır. Mandl, ORATP üzerinde yoğunlaşmış ve probleme iki aşamalı bir çözüm geliştirmiştir. Çözümün ilk aşamasında, optimal bir rota kümesi oluşturmuş ve ikinci aşamada başlangıç rota kümesinin kalitesini artırmak için sezgisel yöntemler uygulamıştır. Hasselstrom (1981), değişken talep altında kullanıcı faydasını maksimum yapmak amacıyla optimum otobüs rotalarını ve servis frekansını eşzamanlı olarak tasarlamaya çalışmıştır. Önce Ceder ve Wilson (1986), sonra Israeli ve Ceder (1989), toplu taşıma rota tasarımı ve çizelgeleme problemlerini eş zamanlı olarak çözmek için modeller sunmuşlardır. Gerçek dünya problemlerinin karmaşıklığını azaltmak için problemi yönetilebilir ve birbiriyle ilişkili bileşenlere ayırmışlardır. Baaj ve Mahmassani yapay zekâ temelli üç çözüm yaklaşımı tanımlamışlardır. İlk yaklaşımlarında (1990), rota ağı tasarımı için sezgisel bir rota üretme algoritması uygulamışlardır. Temel bir başlangıç kümesi elde edip bunları seyahat talep matrisine dayanan rotalar şekillendirmek için genişletmişlerdir. Bu yaklaşımda, ağ tasarımcısının bilgi ve tecrübesini de arama uzayını indirgemek için kullanmışlardır. İkincisinde (1991); ağ seviyesi, rota seviyesi ve düğüm seviyesi tanımlayıcısının yanı sıra yük faktörlerini önceden belirlenmiş bir maksimum değerde tutmak için gerekli tüm rotalardaki otobüslerin servis frekanslarını hesaplamak için bir analitik prosedür (TRUST) kullanmışlardır. Üçüncü yaklaşımda (1995),

fizibil rota ağlarını elde etmek için bir rota iyileştirme algoritması kullanmışlardır. Shih ve Mahmassani (1994, 1998) TTATP'yi çözmek için, Baaj'ın birinci yaklaşımına benzer bir şekilde, ağ tasarımcısının bilgisi tarafından yönlendirilen yapay zekâ tabanlı bir arama yaklaşımı önermişlerdir. Shih ve Mahmassanin'in bu çalışmasının, Baaj'ın çalışmasıyla kıyaslandığında; rotaların koordinasyonu, değişken araç boyutu ve TTATP'yi çözmek için talebe yanıt veren servis frekansı kavramlarını içerdiğinden daha kullanışlı olduğu görülmektedir (Fan, 2009). Zhao ve Ubaka (2004) aktarma sayısını en aza indirmek ve hizmet verilen alanı en üst düzeye çıkarmak için Aç Gözlü Arama ve Hızlı Tepe Tırmanma algoritmalarına dayanan iki farklı çözüm yöntemi önermiş ve bu yöntemleri büyük boyutlu bir ağ üzerinde karşılaştırmışlardır. Kılıç ve Gök (2014) kaliteli başlangıç çözümlerinin önemini üzerinde durmuş ve talep seviyesini göz önüne alarak otobüsler için yeni bir başlangıç rotaları üreten bir Tepe Tırmanma algoritması önermişlerdir. Nnene vd. (2019a), ORATP'de karşılanan seyahat talebi miktarını iyileştirmek amacıyla bir Rota Yayılma sezgisel algoritması kullanarak mevcut rotalara komşu düğümler ekleyerek yeni rotalar türetmiş ve bu yeni rotaları bir ajan (etmen) tabanlı seyahat talebi simülasyon modeli ile değerlendirmişlerdir.

### 2.3.3. Meta-sezgisel Çözüm Yaklaşımları

Bir meta-sezgisel yöntem, sezgisel optimizasyon algoritmalarını daha verimli veya daha sağlam bir hale getirmek için birtakım stratejiler sağlayan, problemten bağımsız üst düzey bir algoritmik çerçevedir (Sörensen ve Glover, 2013). Meta-sezgisellerin bazı özellikleri şunlardır (Blum ve Roli, 2003):

- Arama sürecine rehberlik eden stratejilerdir.
- Arama uzayını verimli bir şekilde keşfederek optimal (veya optimale yakın) çözümleri bulmayı amaçlarlar.
- Genellikle yaklaşık çözümler veren non-deterministik algoritmalarlardır.
- Probleme özgü değildir.
- Arama uzayındaki lokal optimumlara takılmamak için mekanizmalar içerebilirler.
- Üzerinde çalışılan alana özgü bilgiyi, üst düzey strateji tarafından kontrol edilen bir sezgisel şekilde kullanabilirler.

Meta-sezgiseller en çok kombinatoriyel optimizasyon problemleri ve kısıt tatmini<sup>16</sup> problemlerine uygulanmışlardır (Han vd., 2006). Bu nedenle; Genetik Algoritma (GA), Tavlama Benzetimi (TB), Tabu Arama (TA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Yapay Arı Kolonisi (YAK) ve Karınca Koloni Algoritması (KKA) gibi meta-sezgisel yaklaşımlar TTATP ile ilgili araştırmalarda sıklıkla kullanılmıştır. Birçok araştırmacı ORATP'yi çözmek için GA temelli modelleri kullanmıştır (Chakroborty, 2003; Kepaptsoglou ve Kadaftis, 2009). Pattnaik vd. (1998), hem toplu taşıma ağını hem de servis frekanslarını eş zamanlı olarak belirlemek için bir GA kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada TTATP'yi sabit talep altında, kullanıcı ve işletmeci maliyetlerinin toplamını minimize edecek şekilde bir optimizasyon problemi olarak formüle etmişlerdir. Önce, başlangıç popülasyonunu oluşturmak için bir aday rota kümesi üretmiş ve sonra bu kümedeki rotaları etiketleyip, sıralamışlardır. Sonra listedeki her bir rotaya karşılık, rastsal olarak, bir ikili sayı seçmiş ve kromozomları oluşturmuşlardır. Başlangıç popülasyonundan sonraki popülasyonda her bir bireyin amaç fonksiyonu değerini hesapladıktan sonra, en iyi rota kümesini bulmak için yeniden üretme, çaprazlama ve mutasyon operatörlerini uygulamışlardır. Gundaliya vd. (2000), rotaların tasarlanması ve çizelgeleme problemlerini eşzamanlı olarak çözmek için her bir rotayı ve onunla ilişkili frekansları tek bir kromozomla ifade etmişlerdir. Chien vd. (2001a), araçların kavşaklarda beklemelerinden kaynaklanan gecikmeleri ve gerçekçi yol ağı modellerini göz önüne alarak, merkez duraklara yolcu taşıyan bir otobüs rotasının konumunu ve bu rotadaki taşıt aralığını optimize etmek için bir GA ve bir tam (etraflı) arama algoritması<sup>17</sup> kullanmışlardır. Fusco vd. (2002), TTATP'yi çözmek için Baaj ve Mahmassani (1995) ile Pattnaik vd. (1998) çalışmalarındaki yöntemleri birleştirerek üç aşamalı yeni bir yöntem önermişlerdir. İlk aşamada fizibil bir rota kümesi oluşturmak için bir sezgisel algoritma ve ikinci aşamada da servis frekanslarına bağlı olarak bir rota alt kümesi seçmek için bir GA kullanmışlardır. Üçüncü aşamada ise rota ağını; hizmet verilen toplam talep, ağ etkinliği ve verimliliği açılarından son kez iyileştirmişlerdir. Chakroborty ve Dwivedi (2002, 2003), TTRP ve TTÇP'nin GA ile ilgili çözüm yaklaşımlarını incelemiş ve bunları kendi çözüm yöntemleri ile Mandl's Swiss ağı üzerinde karşılaştırmıştır. Benzer şekilde Bielli vd. (2002), hem müşteri taleplerini hem de işletme ihtiyaçlarını

---

<sup>16</sup> Kısıt tatmini, kombinatoriyel problemlerin modellenmesi ve çözümü için kullanılan bir yöntemdir (Edelkamp ve Schroedl, 2011: 572).

<sup>17</sup> Tam arama, algoritmalarının performansını arttırmak için kullanılan bir yöntemdir. Bir arama algoritmasının tam arama olabilmesi için bu algoritmanın, bir değer bulunmadığını söylemeden önce arama uzayındaki bütün değerleri taramış veya bütün ihtimalleri değerlendirmiş olması ve arama uzayında hareket ederken aranan değerlere tekrar tekrar bakmaması gerekir. Ayrıca her adımdan sonra hangi değere bakılacağı belirlenmelidir. Yani sistematik bir yöntem kullanılmalıdır (<http://bilgisayarkavramlari.sadievrenseker.com/2011/05/17/etrafli-arama-tam-arama-exhaustive-search/>, Erişim Tarihi: 10.01.2020).

karşılıyacak en iyi ORAT'ını ve servis frekanslarını elde etmek için bir GA önermişlerdir. Çalışmalarında, hem her bir otobüs rotasındaki otobüslerin servis frekanslarını hafızada saklayan açık bir gösterim hem de her bir rota için rotanın kullanımını etkinleştirmeye veya devre dışı bırakmaya yarayan bir açma/kapama anahtarı kullanmışlardır. Chakroborty (2003), ORATP'nin geleneksel yöntemler kullanılarak hesaplanamamasına neden olan karmaşıklığın nedenlerini tanımlamıştır. Ayrıca problemi çözmek için bir GA önermiş ve GA'nın ORATP'yi ele almadaki etkinliği üzerinde durmuştur. Ngamchi ve Lovell (2003), ulaşım ağındaki aktarma noktalarının konumlarının belirlenmesine, talep kalıbı bilgisine ve seçilen rotalar arasındaki taşıt aralığının koordinasyonuna odaklanmış bir model kullanmışlardır. Probleme özgü genetik operatörlerin, toplam sistem maliyetlerini minimize etmek amacıyla, otobüs rota ağı tasarımını ve servis frekansı ayarlarını ele almadaki etkinliğini incelemişlerdir. Mathew ve Mohan (2003) halk otobüsleri için, rotaları ve servis frekanslarını eş zamanlı olarak kodlayan diğer modellerden farklı şekilde, her bir rotanın frekansını bir değişken olarak modele dâhil etmişlerdir. Agrawal ve Mathew (2004), TTATP'nin çözümünün GA ile hesaplanmasını hızlandırmak için iki farklı PGA modeli önermişlerdir. Fan ve Machemehl (2004), ORATP'yi çözmek için çok amaçlı karma tam sayılı doğrusal olmayan bir formülasyon kullanarak durağa erişim mesafelerini ve rotalar arası aktarmaları içeren GA tabanlı bir model sunmuşlardır. Toplu taşıma seyahat talebinin değişken olduğunu varsayımı altında; toplu taşıma talebini, optimum rota kümesini ve rotalarla ilişkili servis frekanslarını eşzamanlı olarak hesaplamak için iteratif bir yaklaşım kullanmışlardır. Rota ağı boyutu, toplam talep ve mevcut rota ağlarının yeniden tasarımı gibi bazı parametrelerin ORATP üzerindeki etkilerini açıkça gözlemlemişlerdir. Petrelli (2004) optimal otobüs rotalarını, servis frekanslarını ve filo büyüklüğünü belirlemek için üç aşamalı bir model önermiştir. Bu modelin ilk aşamasında bir dizi fizibil rota oluşturmak için sezgisel bir algoritma kullanmış, sonraki aşamada genetik algoritma ile optimal rotalar alt kümesini bulmuş ve son aşamada da rota ağı topolojisini iyileştirmiştir. Cipriani vd. (2005) optimal ağ tasarımının GA ile yapıldığı bir model önermişlerdir. Bu modelde, Fusco vd. (2002) ile Petrelli'nin (2004) yöntemlerini iyileştirmek için, ulaşımı kolaylaştıran aktarma noktalarını amaç fonksiyonuna dahil ederek rotalar arası koordinasyonu artırmışlardır. Zhao vd. (2005) büyük ölçekli rota ağı tasarımı problemlerinin çözümünde Zhao ve Ubaka'nın (2004) geliştirdikleri Aç Gözlü algoritmanın lokal optimal çözüme takılması problemini çözmek için yöntem TB ve TA algoritmalarını entegre etmişlerdir. Zhao ve Zeng (2006) büyük boyutlu ulaşım ağlarında aktarmaları minimize etmek ve kapsanan seyahat talebi alanını maksimize etmek amacıyla TB-GA'yı önermişlerdir. Fan ve Machemehl (2006a) değişken seyahat talebine sahip ORATP'yi çok amaçlı doğrusal olmayan karma tam sayılı bir programlama problemi

olarak modellemiş ve üç bileşenden oluşan bir çözüm yöntemi önermişlerdir. Yöntemlerinin ilk bileşeni başlangıç çözüm kümesinin oluşturulmasını sağlarken ikinci bileşen; B-V seyahat talep matrisine karar veren, gezileri atayan, servis frekanslarını belirleyen ve performans ölçümlerini hesaplayan bir ağ analizi prosedürünü içermektedir. Üçüncü bileşen ise ilk bileşeni birleştiren, başlangıç çözüm kümesi üretme sürecine rehberlik eden ve çözüm uzayından optimum bir rota kümesi seçen bir GA uygulamasıdır. Fan ve Machemehl (2006b) sabit seyahat talebine sahip ORATP'yi çözmek için TB algoritmasını kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada, Pattnaik vd. (1998) çalışmasına benzer olarak, önce her bir düğüm çifti arasındaki tüm en kısa yolları bulmak için Dijkstra ve Yen en kısa yol algoritmalarını kullanmış ve aday rotaları üretmişlerdir. Sonra bu yolların müsaade edilen maksimum ve minimum yol uzunluğu kısıtlarına uygunluklarını kontrol etmişlerdir. Elde edilen tüm fizibil rotaları saklamış ve etiketlemişlerdir. Son olarak bu aday rotalar arasındaki en iyi rotayı bulmak için bir TB algoritması uygulamış ve algoritmanın başarısını bir GA ile karşılaştırmışlardır. Fan ve Machemehl (2008a) TTATP'nin optimal çözümünü TA kullanarak bulan ve üç bileşenden oluşan bir yöntem önermişlerdir. İlk olarak bir başlangıç aday rota kümesi üretme işlemi gerçekleştirmiş ile fizibil rotaları üretmiş, sonra; seyahat talep matrisini belirleyen, seyahatleri atayan, servis frekanslarını belirleyen ve performans ölçülerini hesaplayan bir ağ analizi prosedürü uygulamış ve son olarak bu iki parçayı birleştiren, aday çözüm üretme sürecine rehberlik eden ve çözüm uzayından optimal rotaları seçen bir TA uygulamışlardır. Lei ve Yan (2008) ilk aşamada başlangıç rota çözümlerinin üretildiği ikinci aşamada da TA'nın rota birleştirme, rota ayırma ve yol ekleme operatörlerini kullanarak sürekli yeni çözümler ürettiği iki aşamalı bir yöntem önermişlerdir. Beltran vd. (2009), TTATP'yi, değişken talep altında ve çok türlü araçla yapılan yolculuklar çerçevesinde çözmek için araçlardan kaynaklanan emisyonların etkilerine dikkat eden bir yöntem önermişlerdir. Kullanıcı, işletmeci maliyetlerini ve dışsal maliyetleri optimize etmek için ilk aşamasında başlangıç rota üretimini içeren bir sezgisel ikinci aşamasında eşzamanlı olarak sub-optimal rota kümelerini ve ilgili frekansları belirlemek için GA'yı kullanan iki aşamalı bir metodoloji önermişlerdir. Fan ve Machemehl (2008b), ORATP'yi bölgesel talep birikimi ve değişken seyahat talebi durumlarında çözmek için GA ve TB'ni karşılaştırmış ve ikisinin hibriti olan yeni bir algoritma önermişlerdir. Benzer şekilde Liu vd. (2010), otobüs ağı tasarımı ve servis frekanslarının belirlenmesi problemlerini eşzamanlı olarak çözmek için hibrit bir strateji önermişlerdir. Yaptıkları çalışmada aday rota kümelerini ürettikten sonra TB'ni kullanarak kullanıcı ve işletmeci maliyetlerini optimize etmiş ve yeni çözümler üretmek için GA'yı kullanılmışlardır. Fan ve Mumford (2010), aday rota kümelerini değerlendirmek için basit bir TTRP modeli tasarlamış ve bu modeli TT ve TB



algoritmaları kullanarak doğrulamışlardır. Szeto ve Wu (2011), ORATP'yi, kullanıcı maliyetini ve aktarma sayılarını minimize etmek amacıyla çözmek için bir GA modeli geliştirmişlerdir. GA'nın lokal arama sezgisel yöntemiyle işleyen hibrit bir halini kullanarak rota ağı tasarımı problemi ile frekans belirleme problemini birlikte ele almışlardır. Chew ve Lee. (2012), çelişen kullanıcı ve işletmeci maliyetlerinin minimize etmek için iki amaçlı bir model kullanarak ORATP'yi GA ile çözmüşlerdir. Diğer çalışmalardan farklı olarak fizibil olmayan bir çözümü fizibil bir çözüme dönüştürmek için düğüm ekleme işlemi adı verilen bir mekanizma kullanmışlardır. Nayeem vd. (2014), seyahat talebinin sabit olduğunu kabul ederek, seyahat talebi karşılanan yolcu sayısını maksimize ederken toplam aktarma sayısını ve toplam seyahat süresini minimize etmek için elitist ve artan nüfusa sahip GA temelli iki model önermişlerdir. Nnene vd. (2014) Arbex ve da Cunha (2015), TTATP'nin çok amaçlı yapısına uygun olarak, her bir nesilde optimize edilecek kullanıcı ve operatör maliyetlerini döngüsel olarak değiştirerek TTATP'yi çözmek için verimli bir GA önermişlerdir. Kullanıcı maliyeti olarak durakta bekleme süresi, araç içinde geçen süre ve aktarma süresini göz önüne alırken işletmeci maliyeti olarak araç filo büyüklüğünü göz önüne almışlardır. Mutasyona uğratarak üretilmiş çözümlerin fizibil olmalarını sağlamak için lokal arama işlemleri gerçekleştiren bir GA kullanmışlardır. Zhao vd. (2015), yolcu maliyetini ve karşılanmayan yolcu seyahat talebini minimize etmek için Memetik Algoritmayı (MA) önermişlerdir. Modelin hesaplama verimliliğini arttırmak için; yer değiştirme hareketi, takas hareketi ve 2-opt hareketi (A tipi ve B tipi) dâhil olmak üzere GA'ya dayanan lokal arama parametrelerini MA'ya gömmüşlerdir. Nnene vd. (2017) GA'yı ve Coğrafi Bilgi Sistemi programlarını birlikte kullanarak bir otobüs servis ağının fayda seviyesini iyileştirmek için yenilikçi bir yaklaşım önermişlerdir. Yaklaşımlarını gerçek Cape Town otobüs rota ağı üzerinde uygulamış ve mevcut ağdan daha iyi bir tasarım elde etmişlerdir. Buba ve Lee (2018a), hizmet seviyesinin ve işletmeci maliyetinin optimize edildiği bir ORATP modeli önermişlerdir. Rota tasarımı problemini çözmek için, mutasyon operatörünün ürettiği fizibil olmayan rotaları fizibil rotalara dönüştürebilen, yeni bir Diferansiyel Evrimsel Algoritma (DEA) kullanmışlardır. Sonrasında Buba ve Lee (2018b), kullanıcı ve karşılanmayan talep maliyetlerini minimize etmek için eş zamanlı olarak rota tasarımı ve servis frekansı problemlerini ele alan bir DEA yaklaşımı önermişlerdir. Nnene vd. (2019b), dört aşamalı ulaşım modeli yerine ajan (etmen) tabanlı bir simülasyon modeli kullanarak ORATP'yi GA ile çözmüşlerdir.

### 2.3.4. ORATP için Genetik Algoritma

GA, ilgilenilen problemin olası çözümlerini temsil eden bir başlangıç popülasyonu ile başlar. Bir popülasyondaki her bir çözüm bir kromozom dizilimi ile temsil edilir ve uygunluk fonksiyonu olarak adlandırılan bir değer ile ilişkilendirilir. GA'da yeni yavru çözümler; başlangıç popülasyonu ve sonraki popülasyonların bireylerinden, seçim ve yeniden üretme süreçleri ile çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörler ile oluşturulur. Bu da yavruların ebeveynlerinden biraz daha farklı olmasını sağlar. Yeniden üretme aşamasında yüksek olasılıkla en iyi uygunluk değerine sahip bireyler ebeveyn olarak seçilir. Çaprazlama işleminde ise çapraz gen oluşturma süreci ile önceki neslin iki bireyinden gelen genetik malzemeler birleştirilerek bir sonraki nesilde farklı bireyler oluşturulur. Mutasyon, genetik arama sürecine rastgele bir şekilde yeni bilgiler ekler ve çözümün bir lokal optimuma takılması ihtimalini azaltır (Goldberg, 1989). Bu işlemler, yukarıdaki sırayla, önceden belirlenmiş bir durma kriteri sağlanana kadar devam eder. Sonunda bulunan, en iyi özelliklere sahip kromozom global optimum çözümü temsil eder.

**Tablo 2.1: Genetik Algoritmanın Temel Yapısı (Fan, 2009)**

---

Rastsal olarak $N$ Adet kromozom üret
Her bir kromozomun uygunluğunu değerlendir ve sakla
Aşağıdaki adımları tekrar et:
$i = 1$ 'den $N/2$ 'ye kadar
Uygunluk değeri ile doğru orantılı bir şekilde rastsal olarak bir ebeveyn çifti seç
İki yeni yavru oluşturmak için belirli bir olasılıkla çaprazlama yap
Eğer çaprazlama yoksa
Ebeveynlerinin birebir kopyası olan iki yavru oluştur
Oluşturulan iki yavruyu her bir lokus <sup>18</sup> ta belli bir oranda mutasyona uğrat
Oluşturulan iki yavrunun uygunluğunu değerlendir ve sakla
Durdurma kriteri sağlanana kadar mevcut popülasyonu yeni popülasyon ile yer değiştir

---

Bu çalışmada çözüm arama algoritması olarak GA tercih edilmiştir. Bunun iki nedeni vardır. Bunların ilki, Tablo 2.2'de de görüleceği üzere, literatürdeki birçok çalışmada ORATP'yi çözmek için GA'ların kullanılmış olmasıdır. Diğer neden ise GA'nın hem

<sup>18</sup> Bir genin kromozom üzerindeki konumu

başlangıçta hem de optimizasyon sırasında probleme özgü bilgi ve uzmanlığı bir araya getirme, optimizasyon işlemi sırasında ayırık değişkenleri etkin bir şekilde ele alma ve karar değişkenleri için sınır koşullarının yönetimi gibi avantajlara sahip olmasıdır. Ayrıca GA, çok geniş bir çözüm alanında ve daha hızlı zamanda daha sağlam ve yaygın arama yapılmasını da sağlar (Fan ve Machemehl, 2004).

Problem parametreleri, bir GA'nın kromozomlarını temsil edecek şekilde, kolayca kodlanabilir. ORATP'yi GA ile çözmek için, çözümlerin, GA'nın operatörlerine uygun bir şekilde kodlanması gerekir. Bu çalışmada kullanılan GA, Python Programının Inspyred paketi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir kromozom bir otobüs rota ağını ve her bir gen ise bir rotayı temsil etmektedir. Genler bir Python listesi olarak kodlanmış ve kromozomlar listelerin bir dizisi olarak temsil edilmiştir. Bu temsil; seçim, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörlerin doğrudan aday ağlar üzerinde listeler kullanılarak gerçekleştirilmesini sağlar.

**Tablo 2.2: Rota Ağı Tasarımı Problemi İle İlgili Çalışmalar (Kepaptsoglou ve Karlaftis, 2009)**

Yıl	Yazar(lar)	Çözüm Yöntemi
1967	Holroyd	Analitik
	Lampkin ve Saalmans	Sezgisel
1971	Rea	Sezgisel
1972	Byrne ve Vuchic	Analitik
	Salzborn	Analitik
1973	Hurdle	Analitik
1974	Silman vd.	Sezgisel (Yerel Arama)
1975	Byrne	Analitik
1976	Byrne	Analitik
1978	Black	Analitik
1979	Dubois vd.	Sezgisel (Yerel Arama)
1980	Schéele	Doğrusal olmayan programlama
	Mandl	Sezgisel
1981	Furth ve Wilson	Doğrusal olmayan programlama
	Hasselstrom	Sezgisel ve Doğrusal programlama
1982	Kocur ve Hendrickson	Analitik
1983	Tsao ve Schofeld	Analitik
1984	Morlok ve Viton	Analitik
	Marwah vd.	Sezgisel ve Doğrusal programlama
1985	Koutsopoulos vd.	Analitik
1986	Vaughan	Analitik
	Ceder ve Wilson	Sezgisel
1987	Van Oudheusden vd.	Doğrusal olmayan programlama
1988	LeBlanc	Doğrusal olmayan programlama
	van Nes vd.	Doğrusal olmayan programlama
1989	Israeli ve Ceder	Sezgisel
1990	Baaj ve Mahmassani	Sezgisel
1991	Chang ve Schonfeld	Analitik
	Baaj ve Mahmassani	Sezgisel/ Yapay Zekâ

**Tablo 2.2 (Devamı): Rota Ağı Tasarımı Problemi İle İlgili Çalışmalar**

Yıl	Yazar(lar)	Çözüm Yöntemi
1993	Chang ve Schonfeld (a)	Analitik
	Chang ve Schonfeld (b)	Analitik
	Spacovic ve Schonfeld	Analitik
1994	Spacovic vd.	Analitik
	Shih ve Mahmasani	Sezgisel
1995	Constantin ve Florian	Doğrusal olmayan programlama
	Baaj ve Mahmasani	Sezgisel/ Yapay Zekâ
1997	Chien ve Schonfeld	Analitik
1998	Shih vd.	Sezgisel
	Imam	Analitik
	Ceder ve Israeli	Analitik
	Bussieck	Tam sayılı doğrusal programlama
	Pattnaik vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Russo	Doğrusal olmayan programlama
	Bielli ve Carotenuto	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
2000	Soehodo	Sezgisel ve Dinamik programlama
	Gundaliya vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
2001	Chien vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Site ve Filippi	Analitik
2002	Bielli vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Chakroborty ve Dwievidi	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Fusco vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Carresse ve Gorri	Sezgisel
	van Nes	Analitik
2003	Wan ve Lo	Karma tam sayılı programlama
	Chakroborty	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Chien vd.	Sezgisel
	Mathew ve Mohan	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Zhao ve Gan	Sezgisel/ meta-sezgisel (TB, TA)
	Ngamchi ve Lovell	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
2004	Zhao ve Ubaka	Sezgisel
	Agrawal ve Mathew	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Wei Fan ve Machemehl	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Petrelli	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
2005	Cipriani vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Lee ve Vuchic	Sezgisel
	Hu vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (KKA/GA)
2006	Zhao vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (TB, TA)
	Wei Fan ve Machemehl (a)	Sezgisel/ meta-sezgisel (TB)
	Wei Fan ve Machemehl (b)	Sezgisel/ meta-sezgisel (TB)
	Zhao ve Zeng	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA+TB)
	Yu ve Yang	Sezgisel/ meta-sezgisel (KKA)
2007	Yang vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (KKA)
	Zhao ve Zeng	Sezgisel/ meta-sezgisel (TB/TA/Aç gözlü Algoritma)
2008	Flatterman	Sezgisel/ meta-sezgisel (TB)
	Zhao ve Zeng	Sezgisel/ meta-sezgisel (TB)
	Fan ve Machemehl (a)	Sezgisel/ meta-sezgisel (TB)
	Fan ve Machemehl (b)	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA, TB)
	Fan ve Machemehl (c)	Sezgisel/ meta-sezgisel (TB)
	Lei ve Yan	Sezgisel/ meta-sezgisel (TA)
2009	Beltran vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
2010	Mohaymany ve Gholami	Sezgisel/ meta-sezgisel (KKA)
	Jiang vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (İKKA, MMKS)
	Fan ve Mumford	Sezgisel/ meta-sezgisel (TT/TB)
	Liu vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (TB/GA)
2011	Poorzahedy ve Safari	Sezgisel/ meta-sezgisel (KS, GA)
	Szeto ve Wu	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Bagloee ve Ceder	Sezgisel/ meta-sezgisel (KS/GA)
2012	Cipriani vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (P-GA)
	Chew ve Lee.	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Szeto ve Jiang	Sezgisel/ meta-sezgisel (HG-YAK)

**Tablo 2.2 (Devamı): Rota Ağı Tasarımı Problemi İle İlgili Çalışmalar**

Yıl	Yazar(lar)	Çözüm Yöntemi
2013	Bagherian vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (A-PSO)
	Nikolić ve Teodorović	Sezgisel/ meta-sezgisel (YAK)
2014	Nnene	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Nikolić ve Teodorović	Sezgisel/ meta-sezgisel (YAK)
	Szeto ve Jiang	Sezgisel/ meta-sezgisel (H-YAK)
	Kechagiopoulos ve Beligiannis	Sezgisel/ meta-sezgisel (PSO)
	Nayeem vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
2015	Arbex ve da Cunha	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
	Zhao vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (MA/GA)
2017	Nnene vd.	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)
2018	Buba ve Lee (a)	Sezgisel/ meta-sezgisel (DEA)
	Buba ve Lee (b)	Sezgisel/ meta-sezgisel (DEA)
2019	Nnene vd. (a)	Sezgisel
	Nnene vd. (b)	Sezgisel/ meta-sezgisel (GA)

## 2.4. ORATP Model ve Formülasyonu

ORATP'nin matematiksel formülasyonu, son derece karmaşık olmasından dolayı, NP-Zor olarak sınıflandırılmaktadır (Zhao, 2006). Literatürde NP-Zor problemler için polinom zamanında herhangi bir çözüm bulunmadığı varsayılmaktadır. Bu nedenle, ORATP, doğrusal olmayan bir optimizasyon problemi olarak tasarlanmıştır. Bu çalışmada önerilen çözüm yönteminde karar değişkeni olarak sadece rota düzeni kullanılmıştır. Amaç fonksiyonu ise, Cipriani vd. (2012) çalışmasına benzer şekilde, kullanıcı maliyeti ( $z_1$ ), işletmeci maliyeti ( $z_2$ ) ve karşılanmayan seyahat talebi maliyetinin ( $z_3$ ) toplamı olarak alınmıştır. Kullanıcı maliyeti; durağa erişim, durakta bekleme süresi, aktarma ve araç içinde geçen süre maliyetlerinin toplamı iken işletmeci maliyeti personel ücretleri, yakıt ve bakım maliyetlerinden oluşur. Karşılanmayan seyahat talebi maliyeti ise, önerilen toplu taşıma rota ağı tarafından hizmet verilemeyen yolculara karşılık belirlenen cezadır (Fan, 2004). Bu maliyetlerin toplamı minimize edilerek ağ hem kullanıcılar hem işletmeci için ortaya çıkan maliyet açısından optimize edilecektir.

### 2.4.1. ORATP Varsayımları

Bu çalışmada, kolaylık olması açısından, ORATP için aşağıdaki varsayımlarda bulunulmuştur:

1. Seyahat talebi sabit, B-V matrisi karesel ve simetrik.

2. Tüm rotalardaki otobüsler sabit hızda seyahat ederler. Yani araç içi seyahat süresi trafik koşullarına bağlı olarak değişmez
3. Yolcuların duraklara erişim süresi toplu taşıma ağı düzeninden bağımsızdır.
4. Tüm otobüsler aynı kapasiteye ve yük faktörüne sahiptir.

#### 2.4.2. ORATP Notasyonları

Problemin matematiksel formülasyonu, bu formülasyonda kullanılan notasyon ve varsayımlar aşağıda verilmiştir:

$N$ = Rota ağındaki düğümler kümesi

$i, j \in N$ = Düğümler

$r_k \in R$ = Rotalar

$R_{max}$ = Rota ağındaki müsaade edilen maksimum rota sayısı

$D_{max}$ = Toplu taşıma ağında müsaade edilen maksimum rota uzunluğu

$D_{min}$ = Toplu taşıma ağında müsaade edilen minimum rota uzunluğu

$\tau_{ij}$ =  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki seyahat talebi

$F$ = Rota ağında hizmet vermesine müsaade edilen maksimum otobüs sayısı

$V_b$ = Rota ağındaki otobüslerin seyahat hızı,

$C_v$ = Saat başına otobüs işletme maliyeti (₺/saat)

$C_t$ = Kullanıcı seyahat süresine karşılık gelen maliyet (₺/saat).

$C_u$ = Karşılanmayan birim talebe karşılık gelen maliyet (₺/saat).

$W_1, W_2$  ve  $W_3$ = Sırasıyla; kullanıcı, işletmeci ve karşılanmayan talep maliyetlerinin önemlerini temsil eden göreceli ağırlıklardır ( $W_1 + W_2 + W_3 = 1$ ).

$M$ = Önerilen mevcut otobüs rota ağı çözümündeki rota sayısı

$r_m$ = Önerilen çözümün  $m$ -inci rotası,  $m = 1, 2, \dots, M$

$D_{r_m}$ =  $r_m$ -Rotasının toplam uzunluğu

$\tau_{ij}^{r_m}$ =  $r_m$ -Rotası üzerindeki  $i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki seyahat talebi

$DR_{ij} = i$  ve  $j$  düğümleri arasındaki talebe cevap veren rotalar kümesi

$t_{ij}^{r_m} = r_m$  Rotası üzerindeki  $i$  ve  $j$  merkezi düğümleri arasındaki toplam seyahat süresi

$h_{r_m} = r_m$  Rotası üzerindeki araç varışları arası süre

$T_{r_m} = r_m$  Rotasının toplam tur süresi:  $T_{r_m} = \frac{2Dr_m}{V_b}$

$N_{r_m} = r_m$  Rotasında işletilmesi gereken otobüs sayısı:  $N_{r_m} = \frac{T_{r_m}}{h_{r_m}}$

### 2.4.3. ORATP Formülasyonu

Bu çalışmada ORATP için; filo büyüklüğü, seyahat uzunluğu ve maksimum rota uzunluğu olmak üzere tamamı işletmeci kısıtı olan üç kısıt göz önüne alınmış ve kullanılmıştır.

$$\sum_{m=1}^M N_{r_m} \leq F \quad r_m \in R \quad (2.1)$$

$$M \leq R_{max} \quad r_m \in R \quad (2.2)$$

$$D_{min} \leq D_{r_m} \leq D_{max} \quad (2.3)$$

Yukarıdaki kısıtlar altında:

$$\begin{aligned} \min. z = & W_1 C_t \left( \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r_m \in DR_{ij}} \tau_{ij}^{r_m} t_{ij}^{r_m} \right) + W_2 C_v \sum_{m=1}^M N_{r_m} D_{r_m} \\ & + W_3 C_u \left( \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \tau_{ij} - \sum_{i \in N} \sum_{j \in N} \sum_{r_m \in DR_{ij}} \tau_{ij} \right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Burada kısıt (2.1), işletmecinin kaynaklarının sınırlarını temsil eden filo büyüklüğü kısıtıdır. Bu kısıt, optimal ağ mevcut araç sayısından daha fazla araç kullanmamasını sağlar. Servis frekansı yüksek oranda işletmecinin kaynaklarına dayanır. Dolayısıyla, filo büyüklüğü kısıtının ORATP'nin çözümü ile sağlanabilecek hizmet seviyesi üzerinde büyük bir etkisi vardır. Kısıt (2.2), mevcut araç filosu boyutuna göre belirlenen maksimum rota sayısının

aşılmamasını garanti eder. Maksimum rota sayısının, filo büyüklüğü ve sürücü çizelgeleme üzerinde büyük bir etkisi vardır. Kısıt (2.3) rota uzunluğu kısıtıdır, rotaların kısa olmalarından dolayı yürüyüşün tercih edilmesi veya son derece uzun olmalarından dolayı seyahat süresinin uzun olması gibi otobüs hizmetinin verilmesinin uygun olmadığı durumları engellemek için bir üst ve bir alt sınır belirtir. Amaç fonksiyonu (2.4); kullanıcı, işletmeci ve karşılanmayan talep maliyetlerinin ağırlıklı toplamıdır.





### 3. VERİLERİN TOPLANMASI VE ANALİZİ

Bu bölümde ORATP'nin çözümünde kullanılacak verilerin toplanmasına dair bilgiler yer almaktadır. Bu amaçla kullanılacak temel veriler şunlardır:

- Yolculuk talep (B-V) matrisi,
- Malatya otobüs rota ağı topolojik verisi (düğümler ve bağlar),
- Ulaşım saha verileri (hız, araç varışları arası süre, sıklık, yolculuk süresi).

Malatya için ORATP probleminin çözümünde kullanılacak verileri sunmadan önce, Malatya'nın nüfusu, yüzölçümü, ulaşımda kullanılan yolların çeşitleri ve uzunlukları gibi bazı özellikleri açıklamak gerekir.

#### 3.1. Malatya İli ve Ulaşım Ağı Özellikleri

Malatya İli Doğu Anadolu Bölgesinde yer alan, 13 ilçe ve 718 mahalleden oluşan bir büyük şehirdir. Doğusunda Elâzığ ve Diyarbakır, güneyinde Adıyaman, batısında Kahramanmaraş, kuzeyinde Sivas, Erzincan ve Tunceli illeri yer almaktadır. 12.259 km<sup>2</sup>'lik yüzölçümü ve 800.615 nüfus ile Türkiye'nin en büyük 21. ve en kalabalık 28. şehridir. TÜİK 2019 verilerine göre Malatya'nın ortalama hane halkı sayısı 3,53, nüfus artış hızı %3,9 ve nüfus yoğunluğu 66/ km<sup>2</sup>'dir.

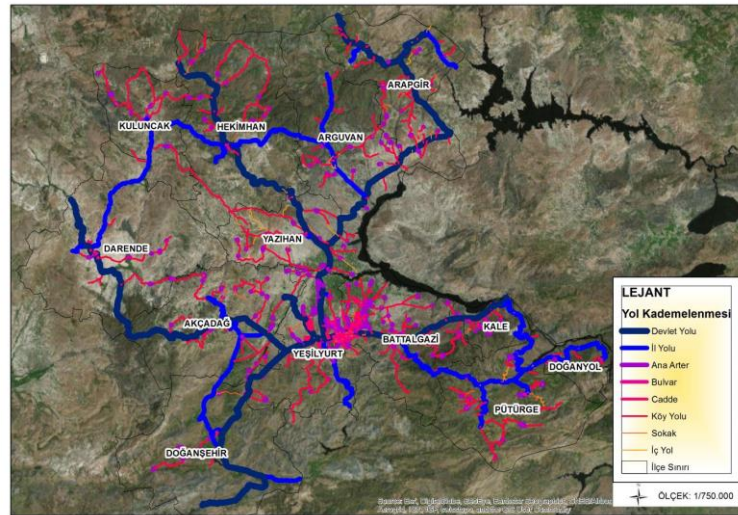
Malatya'da trafik yoğunlukla devlet yolları, il yolları, ana arterler, bulvar ve caddeler ile taşınmaktadır. Devlet yolları; limanlar, tersaneler, hava alanları, otogarlar, demiryolu istasyonları, sınır kapıları gibi önemli bölgeleri ve il merkezlerini birbirine bağlayan yüksek kapasiteli ana karayollarıdır. Malatya'da bulunan Devlet yolları; D 300, D 850, D 875, D 260, ve D 877 karayollarıdır. İl yolları ise ilçe, kasaba ve bucak merkezlerini birbirine, şehir merkezine ve kamu ihtiyacının gerektirdiği önemli yerlere bağlayan, devlet yollarına göre daha düşük hız ve kapasite değerlerine sahip yollardır. Malatya'da 27 il yolu vardır. Ana arterler şehir merkezi ve ilçelerdeki ana yollardır. Ana arterler, ticari nitelikli merkezlere ulaşımı sağlamaları nedeniyle; parklanmanın, yaya trafiğinin ve dolayısıyla trafik sıkışıklıklarının yoğun olduğu yollardır. Ayrıca devlet yollarının birçoğu şehir içi trafikten etkilenen ana arterlerdir. Hatta Malatya'daki önemli ana arter D300 karayoludur. Bunun dışında Malatya merkezdeki önemli arterlerden bazıları İnönü, Atatürk, Fuzuli ve Emeksiz Caddeleridir. Sokaklar; yerleşim bölgelerinde, iki yanında evler olan, caddeye oranla daha dar veya kısa

olabilen, konutlara ve işyerlerine ulaşımı sağlayan fakat ve önemli ulaşım faaliyetleri ve toplu taşıma hatlarının bulunmadığı bağlardır. Köy yolları ise Devlet ve il yolları ağı dışında kalan, kırsal mahallelerin ulaşımını sağlayan, düşük hız ve kapasiteye sahip yollardır (MUAP Raporları).

**Tablo 3.1: Yol Türüne Göre Karayolu Uzunlukları (km) (MUAP Raporları)**

Yol Türü	Km.	%
Sokaklar	5120,24	45,06
Ana arterler	420,05	3,70
Bulvarlar	18,08	0,16
Caddeler	284,25	2,50
Devlet Yolları	779,44	6,86
İl Yolları	547,26	4,82
İç Yollar	53,30	0,47
Köy Yolları	4139,30	36,43
Toplam	11361,92	100

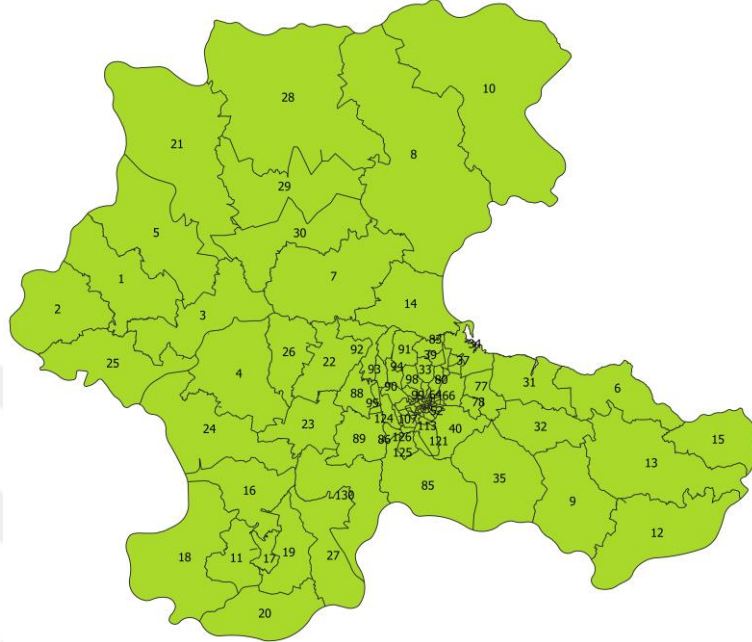
Malatya İli Ulaşım Ana Planı (MUAP) raporlarına göre halkın %23,3'ü ulaşım için toplu taşımayı kullanmaktadır. Bu oranın %49,3'ü otobüs, %39,6'sı minibüs ve geri kalan %11,1'i de D4 yetki belgeli<sup>19</sup> diğer araçlarla sağlanmaktadır (MUAP Raporları).



**Şekil 3.1: Malatya İli Karayolu Sınıflaması (MUAP Raporları)**

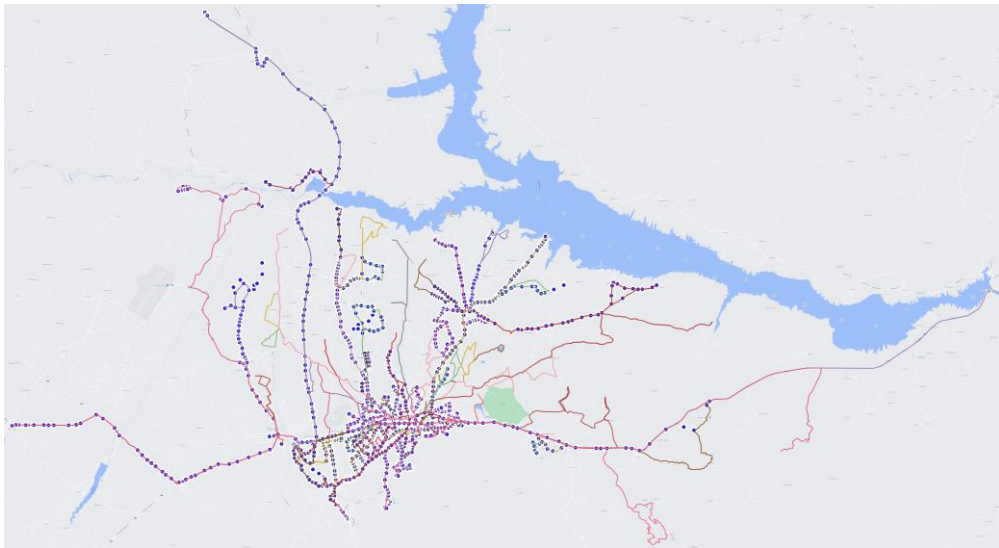
<sup>19</sup> Ticari olarak, taşıma mesafesine bakılmaksızın il içi ve 100 kilometreye kadar olan şehirlerarası tarifeli ve tarifesiz olarak yapacaklara, verilir (<https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/01/20180108-1.html>, madde 6 / ç-fıkrası, Erişim Tarihi:13.02.2020)

ALTAŞ tarafından hazırlanan MUAP raporlarına göre Malatya İli; şehir merkezinde 101, ilçelerde 30 ve şehrin sınırlarını belirleyen kordonlarda 6 tane olmak üzere toplam 137 TAZ'a ayrılmıştır (Şekil 3.2).



Şekil 3.2: Malatya İli TAZ'ları (MUAP Raporları)

Malatya İli belediye otobüs ağı 3800 otobüs durağından ve 74 rotadan oluşmaktadır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3: Malatya Belediye Otobüs Durakları ve Rotaları (MOTAS, 2020)

### 3.2. Yolculuk Üretim-Çekim

Yolculuk üretim/çekim, ulaşım modelinin ilk aşamasıdır. Bu aşamada, her bir TAZ için, merkezi düğümlerin ürettiği ve çektiği yolculuk sayıları üretim/çekim modelleri yardımıyla tahmin edilir. Yolculuk amaçlarına göre dört farklı üretim/çekim modeli vardır: Ev bazlı İş yolculukları (HBW), Ev bazlı Okul yolculukları (HBS), Ev bazlı Diğer yolculuklar (HBO) ve Ev bazlı Olmayan yolculuklar (NHB). Bu modeller oluşturulurken her bir TAZ'da hane halkı anketleri ile belirlenen; nüfus, istihdam, çalışan, yaşayan öğrenci, okuyan öğrenci, ortalama gelir durumu, araç sahipliliği, arazi kullanımı gibi parametreler göz önüne alınır.

TAZ'lar bazında kurulan üretim/çekim modelleri, yolculuk türüne bağlı olarak aşağıda verilen çoklu doğrusal regresyon yöntemi ile MUAP kapsamında Altyapı Mühendislik A.Ş. (ALTAŞ) tarafından hesaplanmıştır.

$$Y_j = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \dots + \beta_n x_n \quad (3.1)$$

$Y_j$ :  $j$ -Yolculuk türü için TAZ'da oluşan yolculuk sayısı

$\beta_0$ : Sabit değer

$\beta_n$ : Değişken katsayısı

$x_n$ : Değişken değeri

Model kurulması aşamasında modelde kullanılacak parametreler yolculuk amacına göre oluşturulan korelasyon matrisleri ile belirlenmiştir. Hem yolculuk amaçlarının farklı olmasından hem de TAZ'ların farklı konumlarda olup farklı sayılarda okul, hastane ve iş yeri gibi yolculuk merkezi içermelerinden dolayı üretim/çekim modellerinin içerdiği parametreler farklılık göstermektedir. Bu farklılıklar sonucunda merkezde ve çevre kordonda gerçekleşen Ev-İş yolculukları üretim/çekim modelinde etkili parametre çalışan sayısı olarak belirlenmiştir. Merkezde Ev-Okul modelindeki etkili parametre yaşayan öğrenci sayısı iken çevrede okuyan öğrenci sayısı ve nüfustur. Merkez ve çevre ayrımı yapılmaksızın Ev-Diğer yolculukları etkileyen tek parametre nüfustur. Ev bazlı olmayan yolculuklarda Yeşilyurt ve Battalgazi ilçeleri için istihdam, okuyan öğrenci ve merkezlik katsayısı etkili parametreler iken, diğer ilçeler için istihdam, çalışan sayısı ve merkezlik katsayısı etkili parametrelerdir.

MUAP kapsamında belirlenen yolculuk üretim/çekim parametreleri kullanılarak kurulan regresyon modelleri aşağıda verilmiştir.

- Merkezdeki Ev-İş yolculukları ( $HBW_M$ ) modeli:

$$Y_{HBW_M} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Çalışan Sayısı} = 129,012 + 0,995 \cdot 1,594$$

- Çevre kordondaki Ev-İş yolculukları ( $HBW_C$ ) modeli:

$$Y_{HBW_C} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Çalışan Sayısı} = -217,993 + 0,980 \cdot 1,831$$

- Merkezdeki Ev-Okul yolculukları ( $HBS_M$ ) modeli:

$$Y_{HBS_M} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Yaşayan Öğrenci} = 223,344 + 0,979 \cdot 1,989$$

- Çevre kordondaki Ev-Okul yolculukları ( $HBS_C$ ) modeli:

$$Y_{HBS_C} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Okuyan Öğrenci} + \beta_2 \cdot \text{Nüfus} = -188,520 + 0,745 \cdot 1,917 + 0,202 \cdot 0,148$$

- Ev-Diğer yolculuklar ( $HBO$ ) modeli:

$$Y_{HBO} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Nüfus} = -212,864 + 0,911 \cdot 0,693$$

- Yeşilyurt ve Battalgazi ilçeleri için Ev bazlı Olmayan yolculuklar ( $NHB_1$ ) modeli:

$$\begin{aligned} Y_{NHB_1} &= \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Merkezlilik Katsayısı} + \beta_2 \cdot \text{Okuyan Öğrenci} + \beta_3 \cdot \text{İstihdam} \\ &= -50,568 + 0,514 \cdot 1422,203 + 0,456 \cdot 0,201 + 0,268 \cdot 0,221 \end{aligned}$$

- Diğer ilçeler için Ev bazlı Olmayan yolculuklar ( $NHB_2$ ) modeli:

$$\begin{aligned} Y_{NHB_2} &= \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{Merkezlilik Katsayısı} + \beta_2 \cdot \text{Çalışan Sayısı} + \beta_3 \cdot \text{İstihdam} \\ &= -166,770 + 0,561 \cdot 518,835 + 0,237 \cdot 0,198 + 0,310 \cdot 0,313 \end{aligned}$$

Bu çalışmada kullanılan otobüs yolculuk günlük üretim/çekim matrisi MUAP kapsamında ALTAŞ tarafından yapılan ulaşım anket çalışması sonuçları ile belirlenmiştir. Yapılan hane halkı ulaşım anketleri sonucuna göre ziyaret edilen hanelerin %6'sı ankete katılmayı kabul etmemiş, %10'u üç ziyaret sonucunda evde bulunamamış ve %84'ü ankete katılmıştır. Hane halkı anket katılım sayıları Tablo3.2'de verilmiştir.

**Tablo 3.2: Hane Halkı Anketleri Gerçekleşme Değerleri (MUAP Raporları)**

İlçe	Gerçekleşen Anket Sayısı	Kabul Edilmeyen Görüşme Sayısı	Evde Bulunamayan Hane Sayısı	Toplam Hane Sayısı
Battalgazi	3.023	229	388	3.640
Yeşilyurt	2.757	234	396	3.387
Diğer İlçeler	953	25	39	1.017
<b>Toplam</b>	<b>6.733</b>	<b>488</b>	<b>823</b>	<b>8.044</b>

### 3.3. Yolculuk Dağıtımı

Yolculuk dağıtım modelleri, yolculuk üretim-çekim modelleriyle tahmin edilen yolculukların TAZ'lar arasındaki dağılımını matematiksel olarak ifade ederler. Her bir yolculuk amacına göre ayrı tahmin edilen yolculukların dağıtılması için farklı yolculuk dağıtım modelleri geliştirilmiştir (<https://nptel.ac.in/courses/105/101/105101087/>, Erişim Tarihi: 20.04.2020).

MUAP kapsamında, yolculukların dağıtımında Yer Çekimi ve Fratar modelleri kullanılmıştır. Şekil 3.4'den de görüleceği üzere yolculuk dağıtımları merkez ilçeler için, yolculuk davranışlarının farklı karakteristiğe sahip olması ve yolcuların belirli bir eğilime göre hareket etmeleri nedeniyle, Yer Çekimi yöntemi kullanılarak modellenmiştir. Merkez ilçeler dışındaki TAZ'lardaki yolculukların dağıtımında ise Fratar modeli kullanılmıştır (MUAP Raporları).

#### 3.3.1. Yer Çekimi (Gravity) modeli

Yer çekimi dağıtım modeli “iki cismin birbirlerini çekim kuvveti, kütleleriyle doğru orantılı, aralarındaki uzaklığın karesiyle ters orantılıdır” şeklinde ifade edilen Newton'un Çekim Yasası'nı esas almaktadır.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (3.2)$$

$F$ : Çekim kuvveti

$G$ : Evrensel çekim sabiti ( $6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$ )

$m_1$ : İlk cismin Kütlesi

$m_2$ : İkinci cismin Kütlesi

$r^2$ : İki kütle arasındaki mesafenin karesi

Söz konusu yasanın ulaşım modellerine uygulanmasında, bir başlangıç noktasında üretilip ve bir varış noktasına çekilen yolculukların, o başlangıç noktasındaki toplam yolculuk üretimleri ve o varış noktasındaki toplam yolculuk çekimleri ile doğru orantılı olduğu varsayılır. TAZ'lar arası üretim veya çekim değerlerinin TAZ'lar arası mesafe (seyahat süresi, maliyeti veya kombinasyonu) ve her iki TAZ'ın üretim ve çekim değerlerini esas alacak şekilde

formülize edilir. Buna göre seyahat talep modellerinde yolculuk dağılımlarının hesaplanmasında kullanılan genel denklem aşağıda verilmiştir.

$$T_{ij} = P_i \frac{A_j F_{ij} K_{ij}}{\sum_j (A_j F_{ij} K_{ij})} \quad (3.3)$$

$i$  ve  $j$ : TAZ'lar

$T_{ij}$  :  $i$ 'den  $j$ 'ye yapılan yolculukların toplamı,

$P_i$  :  $i$ 'de başlayan yolculukların tümü; yani  $i$ 'nin üretimi,

$A_j$  :  $j$ 'de biten yolculukların tümü; yani  $j$ 'nin çekimi,

$K_{ij}$  :  $i$  ve  $j$  sosyo-ekonomik faktör katsayısı.

$F_{ij}$  : Yolculuk (süre, uzunluk, genelleştirilmiş) direnim fonksiyonu. Bu fonksiyon aşağıdaki gibidir:

$$F_{ij} = \frac{C}{d_{ij}^n} \quad (3.4)$$

Burada  $d_{ij}$ ,  $i$  ve  $j$  TAZ'ları arası mesafedir;  $C$ , direnim fonksiyonunun kalibrasyon faktörüdür;  $n$ , zon sayısıdır. Kalibrasyon terimi, seyahat süreleri arttıkça yolcuların uzun yolculuklar yapma konusundaki isteksizliğini veya direncini temsil eder. Sosyo-ekonomik faktör ise zonlar arası yolculuk değişimleri için birey bazında bir düzeltme faktörüdür ([https://www.webpages.uidaho.edu/niatt\\_labmanual/](https://www.webpages.uidaho.edu/niatt_labmanual/), Erişim Tarihi: 23.04.2020).

### 3.3.2. Fratar Modeli

Fratar modeli, gelecekteki yolculuk rotalarının bugünkü ile büyük ölçüde aynı kalacağını, ancak yolculuk üretim ve çekim bölgelerinin zamanla gelişip büyümesine bağlı olarak akışın artacağını varsayar. Fratar modeli, yer çekimi modeline göre daha basittir, arazi kullanımında ve dış faktörlerde önemli değişikliklerin beklenmediği küçük kasabalar için genellikle yeterli kabul edilir. Genel denklemi aşağıdaki gibidir.

$$t'_{ij} = t_{ij} E_i E_j \frac{\sum^k t_{ik}}{\sum^k \left(\frac{A_k}{a_k}\right) t_{ik}} \quad (3.5)$$

Burada  $t'_{ij}$  ve  $t_{ij}$ , sırasıyla,  $i$ -üretim merkezinden  $j$ -çekim merkezine gelecekteki ve mevcut trafik akışlarıdır.  $E_i = \frac{P_i}{p_i}$  ve  $E_j = \frac{A_j}{a_j}$  'dir.  $P_i$  ve  $A_j$ , sırasıyla, gelecekte  $i$ -merkezinde üretilen ve  $j$ -merkezine çekilen yolculuklar toplamıdır.  $p_i$  ve  $a_j$ , sırasıyla, mevcut durumda  $i$ -merkezinde üretilen ve  $j$ -merkezine çekilen yolculuklar toplamıdır.  $k$ , Toplam zon sayısıdır (Salter, 1996: 40).

	1	Merkez TAZ'lar	101	Çevre TAZ'lar	131	Dış TAZ'lar	137
1							
Merkez TAZ'lar		GRAVİTY MODEL					
101							
Çevre TAZ'ı				FRATAR MODEL			
131							
Dış TAZ'ı							
137							

Şekil 3.4: Yer Çekimi ve Fratar Modeli Uygulanan TAZ'lar (MUAP Raporları)

### 3.4. Türel Ayrım

Türel ayrım modeli ulaşım planlamanın en önemli modellerinden biridir. Bu model; mesafe, maliyet, süre, arazi kullanımı, gelir durumu ve otomobil sahipliği gibi farklı mekânsal, mali ve sosyo-ekonomik verileri kullanarak insanların kentsel alanlarda seyahat etme verimliliğini, ulaşımaya ayrılan alan miktarını ve ulaşım sisteminde hangi ulaşım türlerinin mevcut olup olmayacağını belirler. Kısaca TAZ'lardaki yolculukların yolculuk amaçlarına göre hangi ulaşım türü ile yapıldığının matematiksel modellenmesi bu aşamada yapılır.

Türel ayrım modeli yaya, özel araç, servis ve toplu taşıma olarak dört farklı türde değerlendirilir. Fakat bu çalışma otobüs rota ağlarına odaklandığından bu bölümde sadece toplu taşımaya ait model sonuçların yer verilecektir. Toplu taşıma ulaşım politikası için çok önemli



bir ögedir çünkü; yolları şahsi araçlara göre daha verimli kullanır, toplu taşıma kullanan kişi sayısı arttıkça yollarda daha az tıkanıklık ve kaza olması gibi sosyal faydaları vardır ve yakıtı daha verimli kullanıp daha düşük maliyetli yolculuklar yapılmasını sağlar. (<https://nptel.ac.in/courses/105/101/105101087/>, Erişim Tarihi: 15.05.2020).

MUAP kapsamında, yolculukların dağıtımında Multinomial Logit ve Büyümü Faktörü modelleri kullanılmıştır. Merkez ilçelerdeki TAZ'lar için türel ayırım modeli olarak Multinomial Logit model ve diğer TAZ'lar için de Büyümü Faktörü modeli kullanılmıştır (Şekil 3.5).

### 3.4.1. Multinomial Logit Model

Multinomial logit modeller, türel ayırımı tahmin etmede en basit ve en pratik kesikli seçim modelleridir. Bu modeller uç değer dağılımını temel alırlar ve tüm hata terimlerinin bağımsız ve özdeş dağıldıklarını kabul ederler (Domencich ve McFadden, 1975). Multinomial logit model fonksiyonu aşağıdaki şekilde gösterilebilir (Ben-Akiva ve Lerman 1985):

$$P_n = \frac{e^{V_n}}{\sum_{m \in M} e^{V_m}} \quad (3.6)$$

Burada  $P_n$ , bir yolcunun ulaşım türü  $n$ 'yi seçme olasılığıdır;  $V_n$ , ulaşım türü  $n$ 'nin faydasıdır;  $V_m$ , herhangi bir ulaşım türünün faydasıdır ve  $M$  kullanılabilir tüm ulaşım türlerinin kümesidir (Khan, 2004).

ALTAŞ tarafından multinomial logit model ile belirlenen yolculuk amaçlarına göre toplu taşıma yolculuk dağılımları ( $P_{toplul taşıma_{ij}}$ ) şöyledir:

$$Ev-iş = e^{(1,3536555 - 0,0043228.Zaman - 0,5061781.Maliyet)}$$

$$Ev-okul = e^{(1,2862408 - 0,0332441.Zaman - 0,0046986.Maliyet)}$$

$$Ev-Diğer = e^{(1,2594866 - 0,0367135.Zaman - 0,0851528.Maliyet)}$$

$$Ev uçlu olmayan = e^{(-0,0434524.Zaman - 0,0425095.Maliyet)}$$

### 3.4.2. Büyüme Faktörü (Growth Factor) Modeli

Büyüme faktörü, bir TAZ tarafından üretilen veya çekilen yolculukların sayısını nüfus, ortalama hane geliri ve araç sahipliği gibi açıklayıcı değişkenlerin doğrusal bir fonksiyonu olarak tahmin etmeye çalışır. Modelin genel formülasyonu aşağıdaki gibidir:

$$T_i = t_i f_i \quad (3.7)$$

Burada  $i$ , TAZ indisidir.  $T_i$ , bir TAZ'da gelecekteki yolculukların ve  $t_i$ , o TAZ'daki mevcut yolculukların sayısıdır.  $f_i$ ; TAZ'daki nüfus ( $P$ ), ortalama hane geliri ( $I$ ), ortalama araç sahipliği ( $V$ ) gibi değişkenlere bağlı büyüme faktörüdür.  $d$ , Gelecekteki yılı ve  $c$ , mevcut yılı göstermek üzere büyüme faktörü formülü aşağıdaki gibidir:

$$f_i = \frac{P_i^d * I_i^d * V_i^d}{P_i^c * I_i^c * V_i^c} \quad (3.8)$$

	1	Merkez TAZ'lar	101	Çevre TAZ'lar	131	Dış TAZ'lar	137
1							
Merkez TAZ'lar		MULTINOMİAL LOGİT MODEL					
101							
Çevre TAZ'ı				GROWTH FACTOR			
131							
Dış TAZ'ı							
137							

Şekil 3.5: Multinomial Logit ve Büyüme Faktörü Modeli Uygulanan TAZ'lar (MUAP Raporları)

**Tablo 3.3: Araç Türleri Ve Yolculuk Amacı Oranları (MUAP Raporları)**

	HBW (Ev Bazlı İş Yolculukları)			HBS (Ev Bazlı Okul Yolculukları)			HBO (Ev Bazlı Diğer Yolculuklar)			NHB (Ev Bazlı olmayan Yolculuklar)			TOPLAM		
	N	Satır %	Sütun %	N	Satır %	Sütun %	N	Satır %	Sütun %	N	Satır %	Sütun %	N	Satır %	Sütun %
YAYA	83.977	12,1	28,7	279.633	40,3	61,3	277.987	40,1	54,7	51.681	7,5	47,5	693.278	100,0	50,8
ÖZEL ARAÇ	81.629	36,6	27,9	16.104	7,2	3,5	96.382	43,2	19,0	28.825	12,9	26,5	222.938	100,0	16,3
TAKSİ	740	12,9	0,3	159	2,8	0,0	4.112	71,6	0,8	736	12,8	0,7	5.747	100,0	0,4
SERVİS	51.214	35,1	17,5	87.500	59,9	19,2	3.267	2,2	0,6	3.991	2,7	3,7	145.972	100,0	10,7
DOLMUŞ	7.005	23,3	2,4	7.040	23,4	1,5	14.071	46,8	2,8	1.955	6,5	1,8	30.072	100,0	2,2
MİNİBÜS	25.665	30,7	8,8	16.199	19,4	3,6	36.059	43,2	7,1	5.641	6,8	5,2	83.564	100,0	6,1
BELEDİYE OTOBÜSÜ	39.159	24,9	13,4	40.244	25,6	8,8	66.666	42,4	13,1	11.212	7,1	10,3	157.281	100,0	11,5
ÖZEL HALK OTOBÜSÜ	622	26,5	0,2	855	36,4	0,2	786	33,5	0,2	86	3,6	0,1	2.348	100,0	0,2
MOTOSİKLET	1.740	51,5	0,6	66	2,0	0,0	870	25,7	0,2	703	20,8	0,6	3.379	100,0	0,2
BİSİKLET	742	32,7	0,3	495	21,8	0,1	717	31,6	0,1	315	13,9	0,3	2.268	100,0	0,2
TRAMBÜS	2.563	9,9	0,9	14.682	56,5	3,2	5.628	21,6	1,1	3.127	12,0	2,9	26.000	100,0	1,9
KAMYONET	255	38,9	0,1	0	0,0	0,0	122	18,6	0,0	279	42,5	0,3	657	100,0	0,0
DİĞER	2.431	22,6	0,8	0	0,0	0,0	7.485	69,7	1,5	824	7,7	0,8	10.740	100,0	0,8
TOPLAM	292.749	21,4	100,0	455.900	33,4	100,0	508.226	37,2	100,0	108.755	8,0	100,0	1.365.630	100,0	100,0

Tablo 3.3'e bakıldığında amacına göre yolculuklarının %50.8'nin yaya hareketleri olduğu görülmektedir. Geriye kalan araçlı yolculuklarda %16.3'lük oranla ilk sırada özel araçlar yer alırken belediye otobüsleri %11.5'lik oranla ikinci sıradadır.

Türel ayırım aşamasından sonra elde edilen Malatya İli otobüs ile seyahat talebi (B-V) matrisi Tablo 3.4'deki formattadır.

**Tablo 3.4: Malatya Otobüs Seyahat Talebi (B-V) Matrisi Örneği**

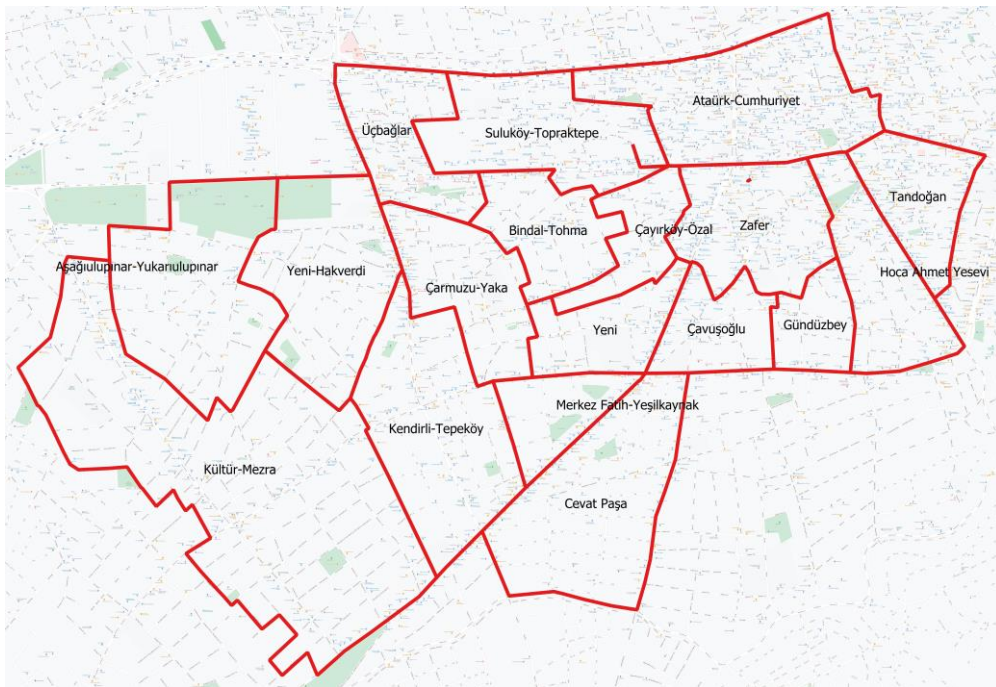
Başlangıç \Varış	Zon 1	Zon 2	Zon 3	Zon 4	Zon 5	Zon 6	Zon 7	Zon 8	Zon 9	Zon 10
Zon 1	804	5	5	86	6	41	35	22	45	28
Zon 2	12	105	16	7	1	8	1	6	5	3
Zon 3	3	17	47	9	1	8	5	7	12	7
Zon 4	238	5	5	825	22	82	123	100	182	103
Zon 5	5	1	2	19	156	12	13	17	29	18
Zon 6	92	8	16	152	8	587	112	106	85	43
Zon 7	67	3	6	129	5	82	351	56	94	50
Zon 8	20	14	9	93	18	92	47	243	120	69
Zon 9	69	16	8	264	24	107	67	99	438	68
Zon 10	22	0	8	118	15	37	41	39	59	289

ALTAŞ tarafından hazırlanan MUAP raporlarının içerdiği diğer veriler Ek-4’de tablolar halinde verilmiştir.

### 3.5. Verilerin Hazırlanması

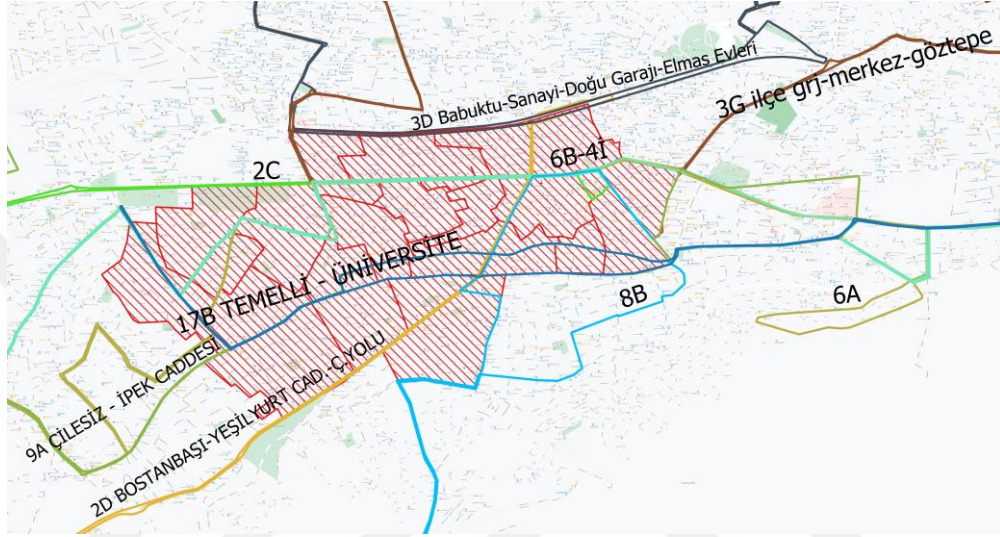
Bu çalışmada kullanılan Otobüs Rota Ağı Tasarımı Modelini tasarlamak için gerekli ulaşım ağı trafik akışı verileri ALTAŞ mühendislikten ve otobüs durak koordinatları Malatya Belediyesi Ulaşım Daire Başkanlığı'ndan alınmıştır.

Malatya İli ulaşım ağı topolojisini üretmek için QGIS (Quantum Geographic Intelligence System) coğrafi bilgi sistemi programı kullanılmıştır. Bu işlem gerçekleştirilirken hem ulaşım ağı topolojisini makûl bir sürede üretebilmek hem de sonrasında rota ağı tasarımı yaparken hesaplama yükünü azaltmak amacıyla çalışma bölgesi olarak Malatya İli şehir merkezinde 18 TAZ’dan oluşan 20 km<sup>2</sup>’lik bir bölge örneklem olarak belirlenmiştir. Bu örneklemi belirlerken şehrin tam merkezinde ve yolculuk miktarının yüksek olduğu bir bölge olması göz önüne alınmıştır. Bu örneklem; Tandoğan, Üçbağlar, Zafer, Atatürk-Cumhuriyet, Merkez Fatih-Yeşilkaynak, Çarmuzu-Yaka, Kendirli-Tepeköy, Suluköy-Topraktepe, Bindal-Tohma, Çayırköy-Özal, Yeni, Cevat Paşa, Çavuşoğlu, Gündüzbey, Hoca Ahmet Yesevi, Kültür-Mezra, Yeni-Hakverdi, Aşağılupınar-Yukarılupınar TAZ’larından oluşmaktadır (Şekil 3.6).



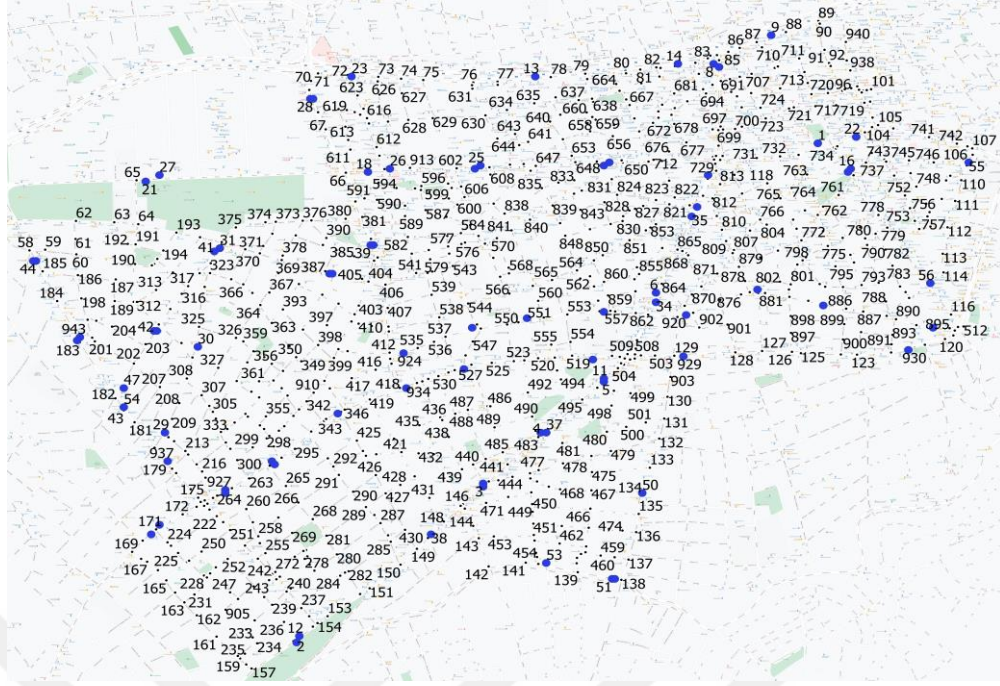
Şekil 3.6: Malatya İli Ulaşım Ağı Örnekleme

Malatya İli ulaşım ağı örnekleme içinde Malatya Büyük Şehir Belediyesi Otobüsleri'nin kullandığı; 17B Temelli- Üniversite, 9A Çilesiz-İpek Caddesi, 8B Toki- Mehmet Akif, 6B-4İ Özalper-İnderesi, 3G İlçe Garajı-Merkez-Göztepe, 3D Babuktu-Sanayi-Doğu Garajı-Elmas Evleri, 2C Şoför Okulu- Sevgi Evleri, 2B Bostanbaşı-Yeşilyurt Cad.-Çevre Yolu, 2D Bostanbaşı-Yeşilyurt Caddesi-Çevre Yolu rotaları bulunmaktadır (Şekil 3.7). Bu çalışmada bu rotaların sadece belirlenen örneklem bölgesi içinde kalan kısımları kullanılacaktır.



Şekil 3.7: Malatya İli Ulaşım Ağı Örnekleminde Geçen Otobüs Rotaları

Malatya İli ulaşım ağı örneklem bölgesi belirlendikten sonra bu örneklemin ağ topolojisini üretmek için bu bölge üzerinde kavşak, dönüş ve yol ayrımı noktaları 866 adet düğüm (Şekil 3.8, siyah düğümler) ile temsil edilmiş ve bu noktaların koordinatları bulunmuştur. Örneklem bölgesi içinde üretilen bu düğümler haricinde 75 adet durak (Şekil 3.8, mavi düğümler) bulunmaktadır. Toplam 941 düğüm ile temsil edilen bu örneklem bölgesindeki yolları belirlemek için Google haritalar kullanılmış ve düğümler arasında 2121 yol türetilmiş ve bunların uzunlukları hesaplanmıştır.



Şekil 3.8: Malatya İli Ulaşım Ağı Örnekleme İçin Belirlenen Dğümler

Malatya İli ulaşım ağının topolojik bir temsilini oluşturmak için NetworkX Python paketi kullanılmıştır. Bu amaçla düğüm ve bağ verilerinin Otobüs Rota Ağı tasarımı algoritmasında kullanıldığı formatlar aşağıda verilmiştir.

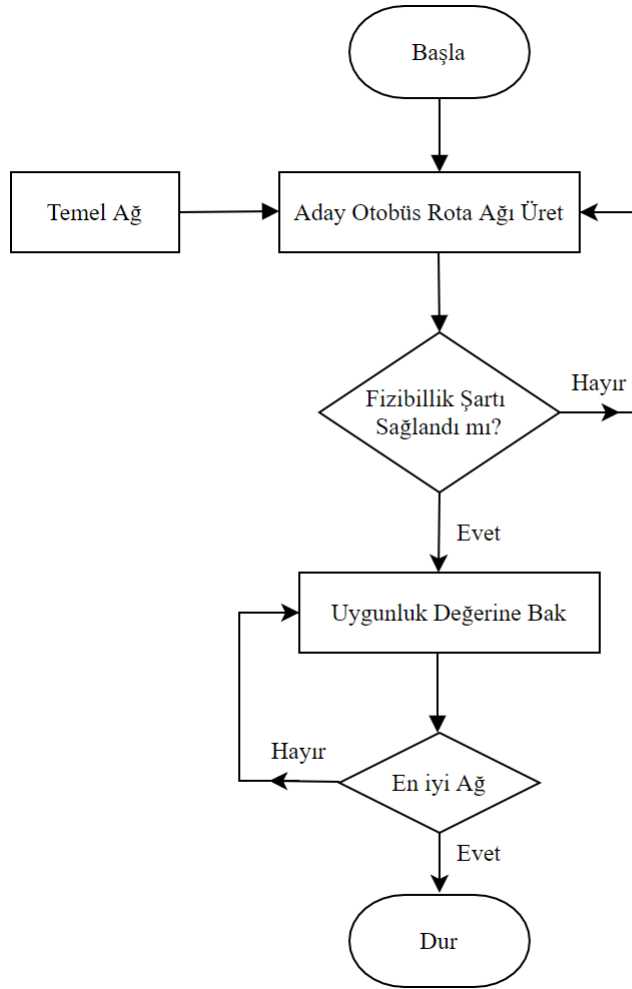
- Düğüm verisi; düğüm numarası, düğümün enlem ve boylam koordinatlarından oluşmaktadır: {Düğüm etiketi: (enlem, boylam)}
- Bağ verisi, bir bağı başlangıç- varış düğümlerinin etiketlerini ve o bağı ait; kapasite, uzunluk, serbest akış süresi, hız sınırı,  $\alpha$  ve  $\beta$  kalibrasyon parametreleri gibi bağ özelliklerinin değerlerinden oluşmaktadır: [(Başlangıç düğümü, Varış düğümü, {'kapasite':..., 'uzunluk':..., 'serbest akış süresi':..., 'alfa': 0.15, 'beta': 4, 'hız sınırı': 0})]

Bu çalışmada kullanılan Sioux Falls<sup>20</sup> test ağı için oluşturulan veri formatları Ek-2'de verilmiştir.

<sup>20</sup> Bkz. bölüm 5.2. Test Ağı

#### 4. ÇÖZÜM YAKLAŞIMI

Bu çalışmada ORATP üç aşamada çözülmeye çalışılmıştır. İlk aşamada çözüm uzayını temsil eden başlangıç çözüm ağı üretilmiştir. Sonra, üretilen otobüs ağlarını değerlendirmek için bir analiz süreci uygulanmıştır. Son aşamada ise GA kullanılarak en iyi ağ seçilmiştir. Bu çalışmada önerilen Otobüs Rota Ağı Tasarım Algoritmasının akış şeması Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Otobüs Rota Ağı Tasarım Algoritması Akış Şeması

##### 4.1. Başlangıç Çözüm Kümesini Üretme

Başlangıç çözüm kümesini üretmek için, girilen ağ verilerinden, aday otobüs rota ağları üreten sezgisel bir algoritma kullanılmıştır. Bu algoritma ilk olarak verilen B-V çiftleri

arasından rastsal olarak çiftler seçer ve Dijkstra algoritmasını (Ek-1) kullanarak bu seçilen her bir düğüm çifti arasındaki en kısa rotayı elde eder. Elde edilen bu rotalar verilen fizibil rota uzunluğu kısıtına uymaları durumuna göre bir listede saklanır. Bu süreç, kullanıcının tanımladığı sayıda aday ağ çözümü (popülasyon) üretilene kadar tekrarlanır. Otobüs rota ağı başlangıç çözüm kümesi üretme sürecinin akış şeması Şekil 4.2’de verilmiştir.

Başlangıç çözüm kümesi üretme süreci, kullanıcının tanımladığı, maksimum rota sayısı, maksimum ve minimum rota uzunlukları gibi fizibilite parametrelerinin kılavuzluğunda gerçekleştirilir. Bu parametreler haricindeki diğer girdiler ise Malatya yol ağı topolojisini temsil eden düğümler ve bağlardır. Rota ağı üretme sürecinin çıktısı ise optimize edilmiş ağın seçileceği ilk aday çözümleri temsil eden aday ağlardır. Bu aday ağlar bir sonraki aşama olan Otobüs Rota Ağı Analiz Sürecinin temel girdisini oluşturur.

### **Başlangıç Otobüs Rota Ağı Üretme Algoritması Kaba Kodu:**

Adım 1: Temel karayolu ağı verilerini oku

Adım 2: Rastsal olarak B-V merkezi düğümleri seç

Adım 3: Seçilen düğüm çiftlerinin önceden seçilip seçilmediklerini kontrol et. Eğer tekrar etmiyorlarsa Adım 4’e geç, aksi takdirde Adım 2’ye dön.

Adım 4: Seçilen düğüm çiftleri arasındaki en kısa yolu Dijkstra algoritmasını kullanarak bul.

Adım 5: Üretilen en kısa yolun uzunluğunu hesapla

Adım 6: Üretilen rotaların uzunluklarının fizibil olma kriterini sağlayıp sağlamadıklarını kontrol et. Eğer sağlıyorlarsa rotayı kabul et, aksi takdirde kriter sağlanana kadar döngüyü tekrarla

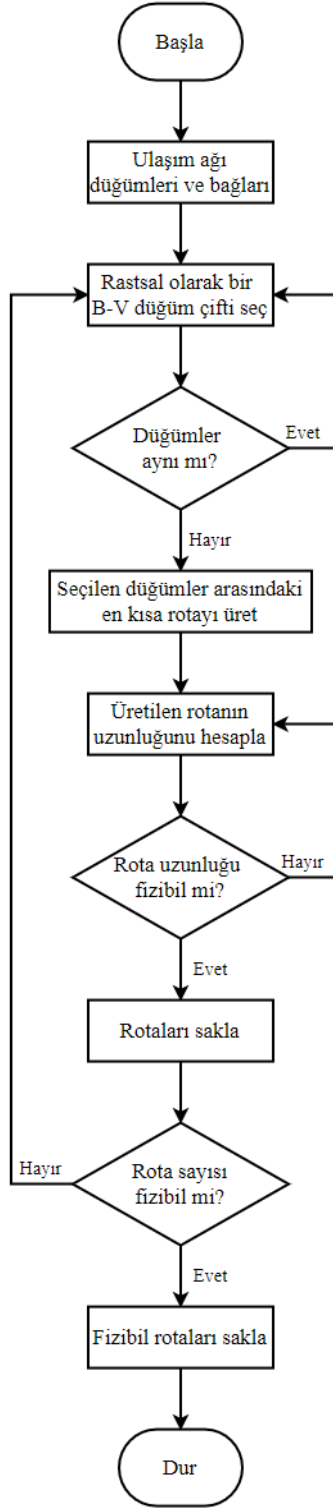
Adım 7: Aday ağın fizibil uzunluktaki rotalarını sakla

Adım 8: Kullanıcı tanımlı rota sayısına ulaşılan kadar döngüyü sürdür

Adım 9: Üretilen rota sayısı fizibil olan ağları sakla

Adım 10: İşlemi durdur





Şekil 4.2: Başlangıç Otobüs Rota Ağı Üretme Süreci Akış Şeması

## 4.2. Otobüs Rota Ağı Analiz Süreci

Otobüs rota ağı analiz süreci; trafik ataması, otobüs ağı performans göstergeleri ve amaç fonksiyonu değerlendirmesi süreçlerinden oluşan bir iteratif algoritmadır (Şekil 4.3). Bu algoritmanın en önemli kısmı, seyahat eden yolcuların oluşturduğu trafiğin ulaşım ağına yüklenmesi olan trafik atamasıdır (Başkan ve Haldenbilen, 2011). Bu çalışmada trafik ataması fonksiyonunu yerine getirmek için Python3.18 programında AequilibraE paketi kullanılmıştır.

Otobüs rota ağı analiz sürecinin ilk adımında aday ağ rotalarına bir hep ya da hiç modeli kullanılarak trafik ataması yapılır. Daha sonra bu rotalara atanan trafik akışları, oluşturdukları ağın karşılayabileceği seyahat talebi miktarını (ağ kapasitesini) elde etmek için toplanır. Her bir aday ağın payına düşen karşılanmayan seyahat talebi miktarı, ağın çektiği toplam talep miktarından o ağın kapasitesi çıkarılarak elde edilebilir. Rota ağı analiz sürecinin son adımında her bir aday ağın amaç fonksiyonu değerini hesaplamak için; ağ kapasitesi, rota hızı ve karşılanmayan talep gibi performans göstergeleri kullanılır. Ham amaç fonksiyonu değerlerinin, aşağıda görülen uygunluk fonksiyonu (4.1) kullanılarak dönüştürüldüğüne dikkat edilmelidir. Pattnaik vd. (1998), her bir bireyin uygunluğunu tüm popülasyona kıyasla belirlemek için ham amaç fonksiyonu değerlerinin dönüştürülmesinin gerekli olduğunu belirtmişlerdir. Bu amaçla, algoritmanın test aşamasında sonuçları raporlamak için ham amaç fonksiyonu değerleri yerine aşağıdaki uygunluk değerleri kullanılacaktır.

$$F(i) = N - \frac{O_i * P}{\left( \frac{\sum_{k=i}^p O_k}{l(O_i)} \right)} \quad (4.1)$$

Burada  $F(i)$  = uygunluk fonksiyonudur;  $N$  = büyük ve pozitif bir tamsayıdır,  $O_i$  =  $i$ -inci çözümün amaç fonksiyonu değeridir,  $P$  = popülasyon büyüklüğüdür ve  $l(O_i)$  =  $i$ -inci çözüme karşılık gelen ağın uzunluk değeridir.

Rota ağı analiz sürecinin temel girdileri modelin başlangıç çözüm kümesi üretme aşamasında elde edilen aday ağlar ve trafik analiz zonları arasındaki seyahat taleplerini temsil eden B-V matrisidir. Diğer girdiler; hız, seyahat süresi, kullanıcı seyahat süresine denk maliyet, işletme maliyeti gibi bağ özellikleri ve amaç fonksiyonunu ağırlıklandıran bileşenlerdir. Bu sürecin çıktıları ise ağı tanımlayan aşağıdaki verileri içerir:

- Amaç fonksiyonu kullanılarak türetilen aday ağ uygunluk fonksiyonu değerleri,
- Bağ akışı, araç varışları arası süre, servis frekansı ve seyahat süresi gibi bağ özelliği verileri.

- Rota tur süresi ve rota başına akış miktarı gibi rota bilgileri.

### Otobüs Rota Ağı Analiz Sürecinin Kaba Kodu:

Adım 1: Üretilen otobüs ağları girdi verilerini oku,

Adım 2: Otobüs rotalarını ve erişim bağlarını başlat,

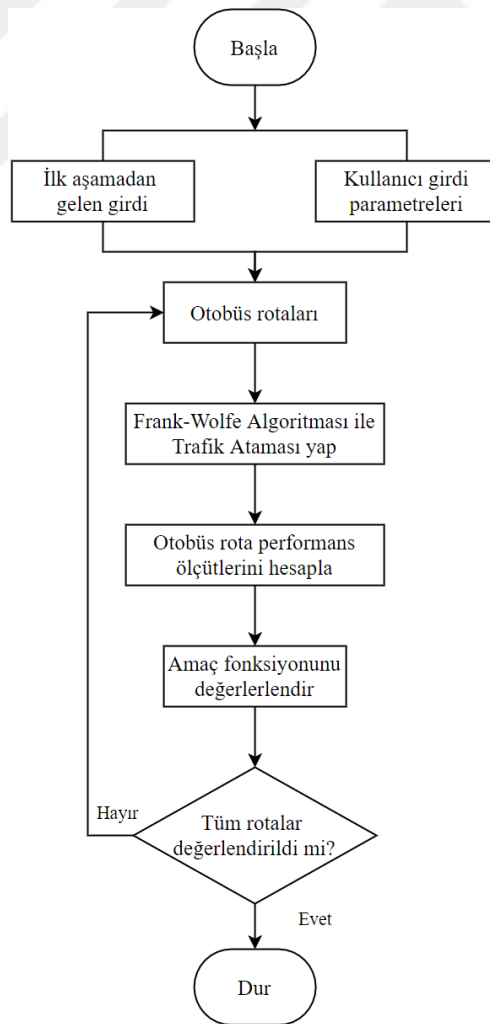
Adım 3: Trafik Ataması yap,

Adım 4: Otobüs ağı performans ölçülerini hesapla,

Adım 5: Uygunluk değerlerini elde etmek için amaç fonksiyonunu değerlendir,

Adım 6: Tüm ağları değerlendirmek için döngü yap,

Adım 7: Süreci durdur.



Şekil 4.3: Otobüs Rota Ağı Analiz Süreci Akış Şeması

### 4.3. Optimal Otobüs Rota Ağını Arama

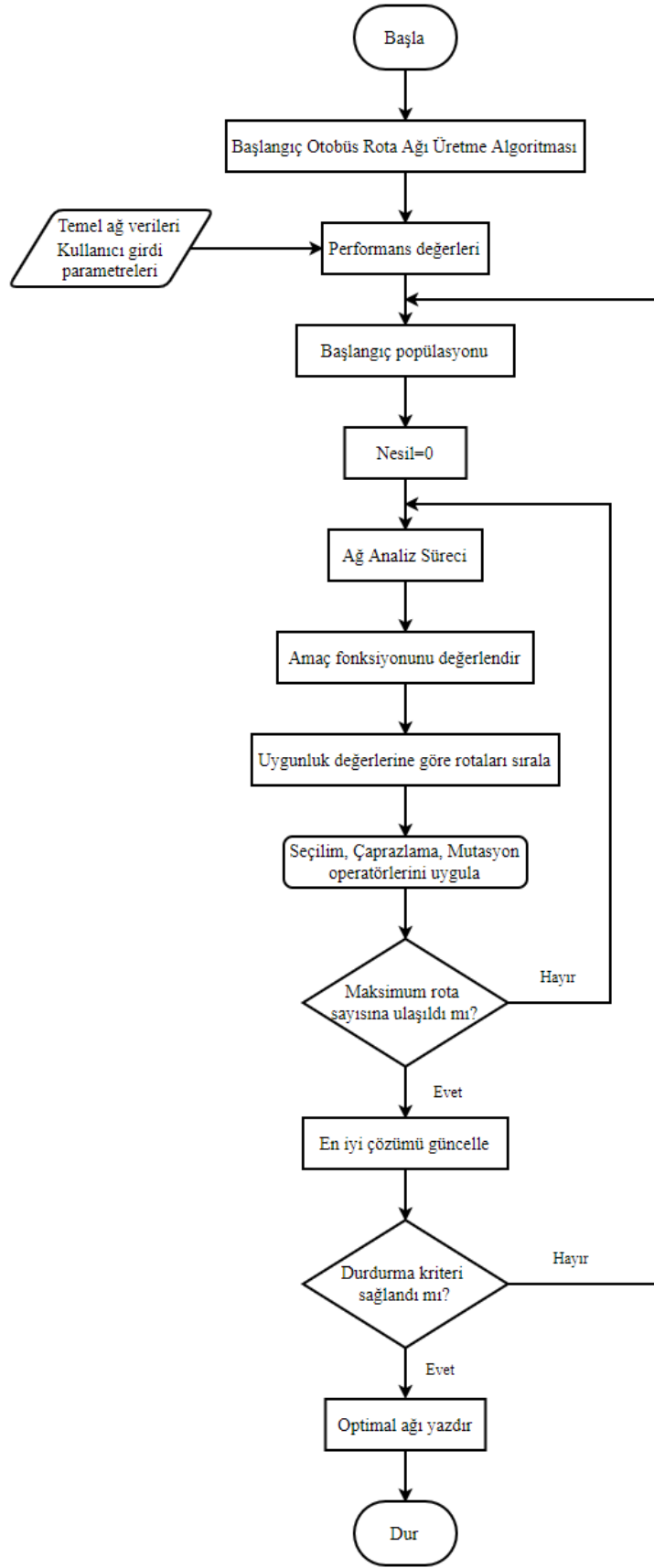
Rota ağı arama aşaması GA ya bağlı olarak optimal ağın aranması sürecini içerir. Bu çalışmada GA, Fan ve Machamehl'in (2006a) çalışmasındakine benzer şekilde, başlangıç çözüm kümesi üretme ve ağ analiz süreçlerini birleştirmek için kullanılmıştır.

Bu aşamanın girdileri ilk aşamada üretilen aday ağlar, bu ağların ikinci aşamada belirlenen uygunluk değerleri, optimize edilmiş ağı aramak için kullanılan mutasyon ve çaprazlama gibi GA operatörleridir.

#### 4.3.1. Genetik Algoritma ile Rota Ağı Arama

Otobüs rota ağı arama algoritması, başlangıç çözüm kümesinin üretilmesi ve ağ analiz süreçlerinin gerçekleştirilmesinden sonra başlar. İlk olarak aday ağlar üretilir ve bu ağlar başlangıç çözüm popülasyonu olarak kullanılır, sonra ağ analiz sürecinde popülasyondaki her bir ağa bir uygunluk değeri atanır ve ağlar bu değere göre sıralanırlar. Rota ağı arama algoritması her bir iterasyonda popülasyondaki her bir bireyin hayatta kalma yeteneğini belirlemek için uygunluk değerini kullanır ve her yeni nesilde bu uygunluk değerini iyileştirmeye çalışır. Önceki her nesil yeni neslin üretilmesine katkıda bulunur. Bu, sırasıyla, GA'nın seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin kullanılmasıyla sağlanır. Bu süreç, bu çalışmada durdurma kriteri olarak belirlenen nesil sayısına ulaşılan kadar devam eder. Şekil 4.4'den görüleceği üzere sonuç olarak optimize edilmiş ağlar elde edilir. Bu ağlar, aramanın gerçekleştirildiği parametre değerlerine bağlı olarak lokal veya global bir optimum çözüm olacaktır.

Bu çalışmada optimal ağları seçme kriteri en düşük uygunluk değere ve standart sapmaya sahip olma şeklinde belirlenmiştir.



Şekil 4.4: Otobüs Rota Ağı Tasarım Algoritması Akış Şeması

Yukarıda aşmaları açıklanan çözüm yaklaşımının her bir aşaması için girdilerin, çıktılarının ve o aşamada kullanılan algoritmaların bir özeti, Tablo 4.1'de sunulmuştur.

**Tablo 4.1: Çözüm Yaklaşımı Bileşenleri, Girdiler Ve Çıktıları**

Bileşen	Girdi	Parametre	Algoritma	Çıktı
Otobüs Rota Ağı Üretme Algoritması	Ulaşım ağı verisi (bağlar ve düğümler)	Rota sayısı, Maksimum rota uzunluğu, Minimum rota uzunluğu	Dijkstra En Kısa Yol Algoritması	Üretilen aday ağlar
Otobüs Rota Ağı Analiz Süreci	Seyahat talep (B-V) matrisi	Seyahat hızı, Servis Frekansı, Kullanıcı maliyeti ağırlığı, Karşılansınmayan talep maliyeti ağırlığı, İşletmeci maliyeti ağırlığı, Zamanın değeri	Frank-Wolfe Algoritması ile Trafik Ataması	Aday ağıın uygunluk değeri, Bağ akışları, Araç varışları arası süre, Seyahat süresi
Otobüs Rota Ağı Arama Algoritması	Analiz sürecinde değerlendirilmiş ağlar ve onların uygunluk değeri	Maksimum nesil, Popülasyon büyüklüğü, Mutasyon olasılığı, Çaprazlama olasılığı, Çaprazlama noktası sayısı	Genetik Algoritma	Optimize edilmiş ağ

Otobüs rota ağı arama algoritmasında kullanılan seçim, çaprazlama ve mutasyon operatörleri aşağıda açıklanmıştır.

**Seçim:** Bu, GA'ların yeniden üretim stratejilerinin ilk adımındır. Amacı mevcut popülasyondan, bir sonraki nesilde yavru popülasyonu üretecek bireyleri seçmektir. Seçim, popülasyondaki her bir bireyin uygunluk değerine göre yapılır. Seçilen bireyler literatürde çiftleşme havuzu olarak adlandırılır (Kumar, 2012). Çiftleşme havuzu yeni nesil çözümlerin evrimleri boyunca karakterlerine katkıda bulunurlar. Seçim ebeveyn popülasyonun çeşitliliğini yansıtacak uygunlukta yapılmadığında, en uygun veya en zayıf bireylerin seçilmesi gibi bir sapma ortaya çıkabilir. Bu durumda ya lokal optimal bir çözüme hızlı bir yakınsama ya da çok yavaş bir yakınsama olabilir. Yani, seçim operatörü global optimal çözümün aranmasının etkinliğini olumlu veya olumsuz olarak etkileyebilir. Rulet tekerleği, sıra tabanlı ve turnuva seçimi, literatürde sıkça kullanılan seçim tekniklerinden bazılarıdır. Bu çalışmada Python Inspyred

kütüphanesi varsayılan seçim fonksiyonu kullanılmıştır. Bu kütüphane, üretilen tüm popülasyonu (aday otobüs ağını) yavru popülasyonu üretecek ebeveyn olarak seçer ve döndürür.

**Çaprazlama:** Yeni bir yavru ağ oluşturmak için seçim sürecinde oluşturulan çiftleşme havuzundan rastgele belirlenmiş iki ebeveyn ağın birleşimidir. Çaprazlama olasılığı, çaprazlama işleminin gerçekleşme oranını belirlemek için tanımlanan kullanıcı tanımlı bir parametredir. Çaprazlama olasılığı popülasyon büyüklüğüyle çarpılarak bir popülasyonda çaprazlama yapılacak bireylerin sayısı belirlenir. Bu, çaprazlama oranı 0,7 ve nüfus büyüklüğü 100 olarak ayarlanırsa bu, nüfusun yüzde yetmişinin çaprazlama geçireceği anlamına gelir. Siriwardene ve Perera (2006), yüksek bir çaprazlama olasılığının, ebeveyn çözümlerin iyi bir kombinasyonunu oluşturduğunu gözlemlemiştir. Bu, ebeveyn ağın özelliklerinin yavrulara aktarılmasını garanti eder. Optimum çaprazlama olasılığı değeri probleme bağımlı olmasına rağmen, farklı yazarlar çaprazlama olasılığı için bazı özgün değerler önermişlerdir. Örneğin De Jong (1975) ve Grefenstette (1986) çaprazlama olasılığı için, sırasıyla, 0.6 ve 0.95 önermişlerdir. Son olarak Schaffer vd. (1989), 0.75-0.95 aralığında bir değer önermiştir. Ancak bu çalışmada kullanılan çaprazlama olasılığı duyarlılık analizi yapılarak belirlenecektir. Literatürde tek noktalı, çok noktalı ve düzgün çaprazlama gibi çaprazlama türleri vardır. Bu çalışmada iki noktalı bir çaprazlama operatörü kullanılacaktır. İki noktalı çaprazlama ebeveyn ağlardan rastgele iki nokta seçer ve bu noktalardan arasındaki kısımları çaprazlayarak yeni yavru ağ çözümleri üretir.

**Mutasyon:** GA'nın üretim aşamasının son operatörüdür. Ebeveyn ağdaki bazı ağların kromozom dizilimini değiştirerek popülasyona çeşitlilik katar. Önce, değişim geçirecek ağlar rastgele belirlenir sonra bu ağların içindeki bazı rotalar çözüm arama uzayının dışındaki rotalarla yer değiştirilir. Bu sayede benzer rotaların sayısı azaltılarak erken yakınsama olması engellenir. Her bir rotanın mutasyon olasılığı mutasyon olasılık parametresi ile kontrol edilir. Yani 20 bireye sahip bir popülasyondaki her bir ağda 10'ar rota varsa ve 0.1 mutasyon olasılığı ise bu, tüm popülasyonda toplam 20 rotanın mutasyona uğrayacağını gösterir (Siriwardene ve Perrera, 2006). Holand (1975), yüksek mutasyon olasılığının çözüm arama uzayında daha geniş bir alanı arama olasılığını artırdığını, ancak bunu yaparken global optimal çözüme yakınsama olasılığını da azalttığını bildirmiştir. Mutasyon olasılığı probleme özgü olduğu için bu modelde duyarlılık analizine dayanan olasılık değerleri kullanılacaktır.

### **Otobüs Rota Ağı Arama Algoritması Kaba Kodu:**

Adım 1: Otobüs rota ağı üretme fonksiyonunu çağır.

Adım 2: Tüm performans ölçümlerini başlat

Adım 3: Popülasyonu başlat.

Adım 4: Nesil=0 olarak al

Adım 5: Otobüs rota ağı analiz süreci fonksiyonunu çağır

Adım 6: Amaç fonksiyonunu değerlendir.

Adım 7: Mevcut en iyi popülasyonu sakla

Adım 8: Sonraki popülasyonu üret

- seçim,
- çaprazlama
- mutasyon

Adım 9: Eğer durdurma kriteri sağlanmıyorsa nesli 1 arttır ve Adım 4'e git, aksi takdirde mevcut en iyi çözümü güncelle

Adım 10: Eğer rota sayısı kriteri sağlanmıyorsa rota sayısını 1 arttır ve Adım 2'ye git, aksi takdirde çıktıyı ver

Adım 11: Bulunan en iyi çözümden en iyi rota kümesini seç.



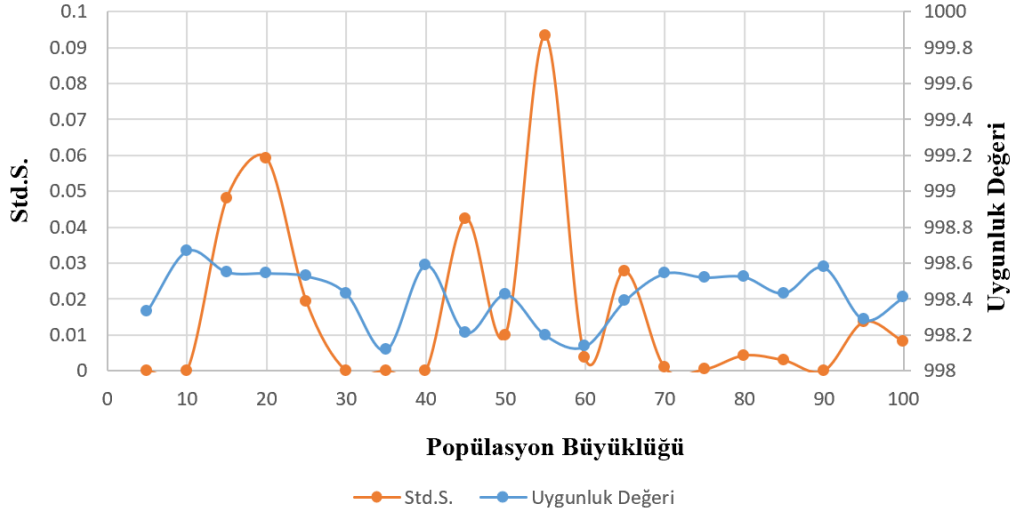
## 5. UYGULAMA

Otobüs rota ağı tasarımı problemi, önceki bölümlerde detaylı şekilde verilmiş olan TTRP literatüründeki birçok alan bilgisi kullanılarak geliştirilmiştir. Bu bölümde ise çözüm yaklaşımının test edilmesine ve Malatya'ya uygulanmasına odaklanılmıştır. İlk olarak kurulan modele uygun tasarım parametrelerinin optimum değerlerini bulmak için Sioux Falls ağı veri seti üzerinde bir duyarlılık analizi yapılmıştır ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Sonra model, Malatya İli toplu taşıma ağının bir kesiti üzerine uygulanmıştır.

### 5.1. Duyarlılık Analizi

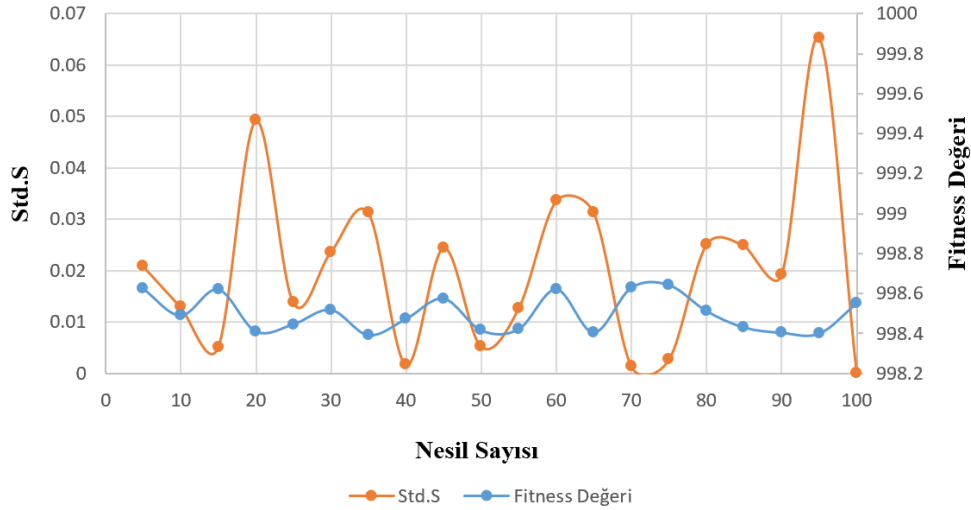
Bu bölümde, temel tasarım parametrelerinin değişen değerlerinin model üzerindeki etkilerini anlamak ve bu parametrelerin optimum değerlerini elde etmek için bir duyarlılık analizi yapılmıştır. Bu parametreler; mutasyon ve çaprazlama olasılıkları, nesil sayısı, popülasyon ve ağ büyüklüğüdür. Mutasyon ve çaprazlama olasılığı gibi bazı parametreler sürekli ve dolayısıyla çok geniş bir aralığı kapsar. Bu nedenle bu parametrelere ait tüm kombinasyonların test edilmesini imkânsızdır ve optimal parametreler test durumuna özgü olabilirler. Yani, bir senaryo için optimal parametreler başka bir senaryo için optimum sonuç vermeyebilirler. Bu çalışmada kullanılan herhangi bir parametre test edilirken bu parametrenin değeri bir aralık boyunca değiştirilmiş fakat diğer parametrelerin değerleri sabit tutulmuştur.

**Popülasyon Büyüklüğü:** Optimal popülasyon büyüklüğünü elde edebilmek amacıyla, popülasyon değeri [5 – 100] aralığında değiştirilmiştir. Optimal uygunluk değerinin, lokal optimal uygunluk değerinin ve standart sapmanın en düşük olduğu noktada olduğu gözlemlenmiştir. Buradan, en iyi nüfus sayısının 35 olduğu görülmüştür.

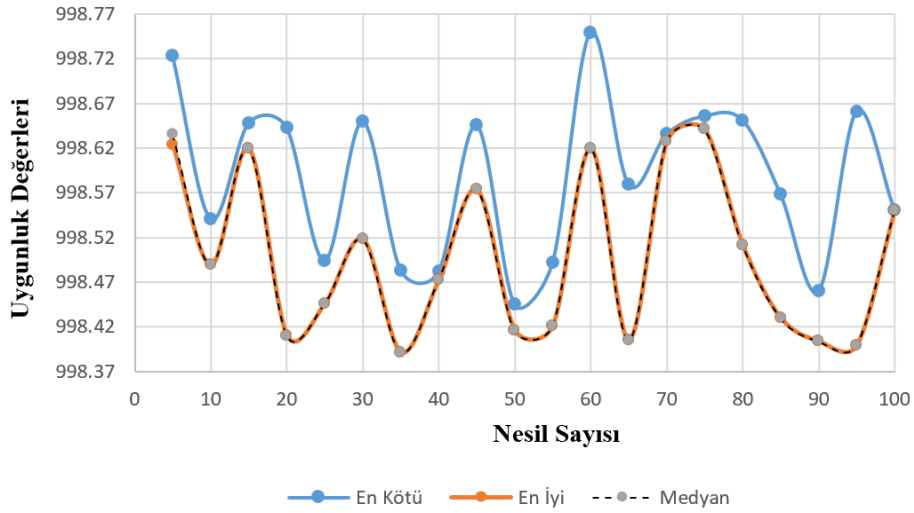


Şekil 5.1: Popülasyona Göre Uygunluk Değeri ve Standart Sapma Grafiği

**Nesil Sayısı:** Maksimum nesil sayısı bu çalışmada durdurma kriteri olarak kullanılmıştır. Nesil sayısının uygunluk değeri üzerindeki etkisini gözlemlemek için nesil sayısı [5 – 100] aralığında değiştirilmiştir ve en iyi uygunluk değeri 100 nesilde (Şekil 5.2) bulunmuştur. Nesil sayısına göre popülasyondaki en iyi, en kötü ve medyan uygunluk değerlerine sahip ağların grafiği Şekil 5.3'de görülebilir.

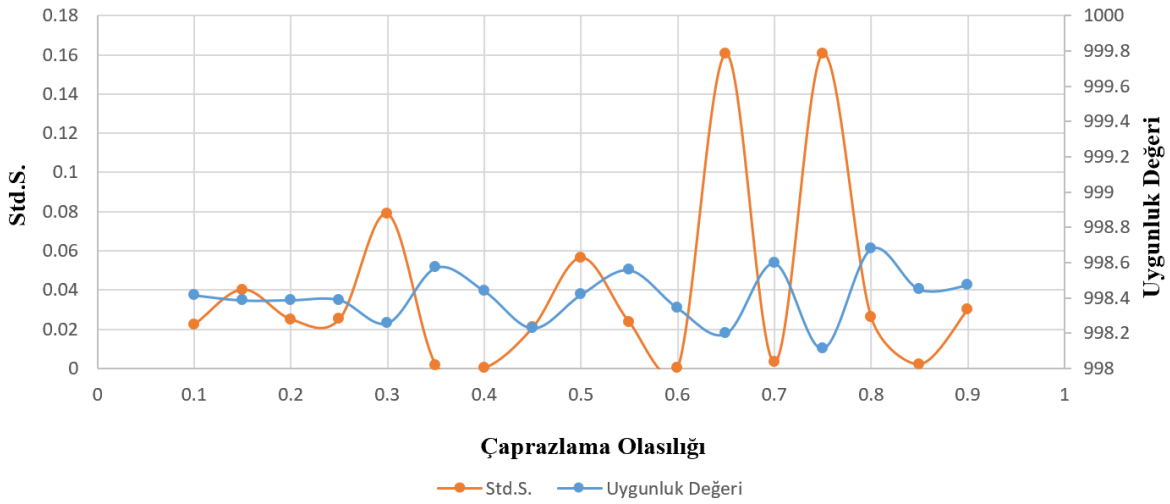


Şekil 5.2: Nesil Sayısına Göre Uygunluk Değeri ve Standart Sapma Grafiği



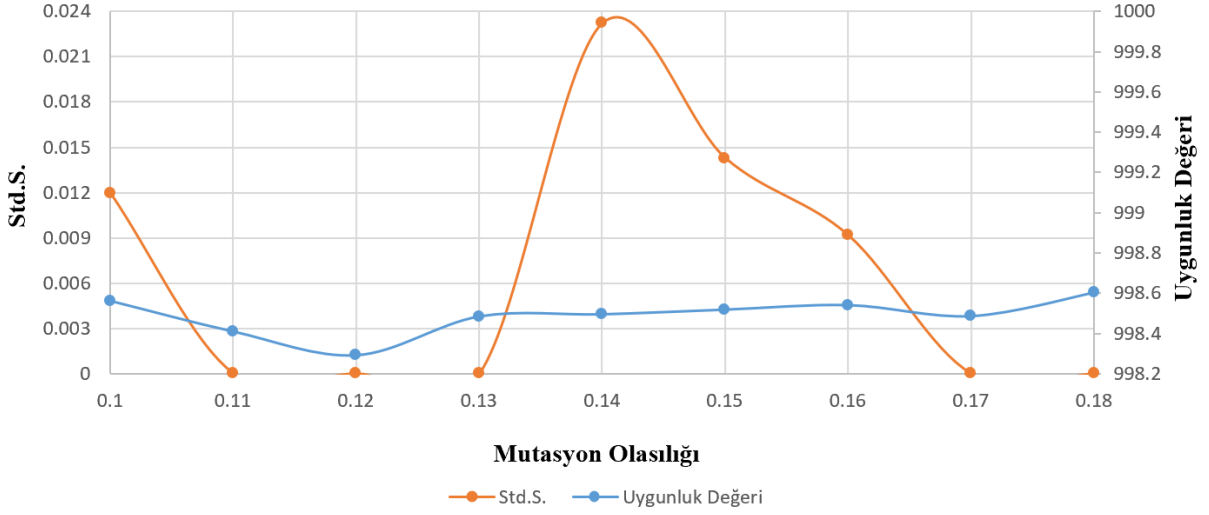
Şekil 5.3: Nesil Sayısına Göre En Kötü, En İyi ve Medyan Uygunluk Değerleri Grafiği

**Çaprazlama Olasılığı:** Çaprazlama olasılığının etkisi [0.1 – 0.90] aralığında incelenmiştir. Sonuç olarak, en iyi uygunluk değeri ve en düşük standart sapmanın 0.85 değerinde bulunduğu görülmüştür (Şekil 5.4).



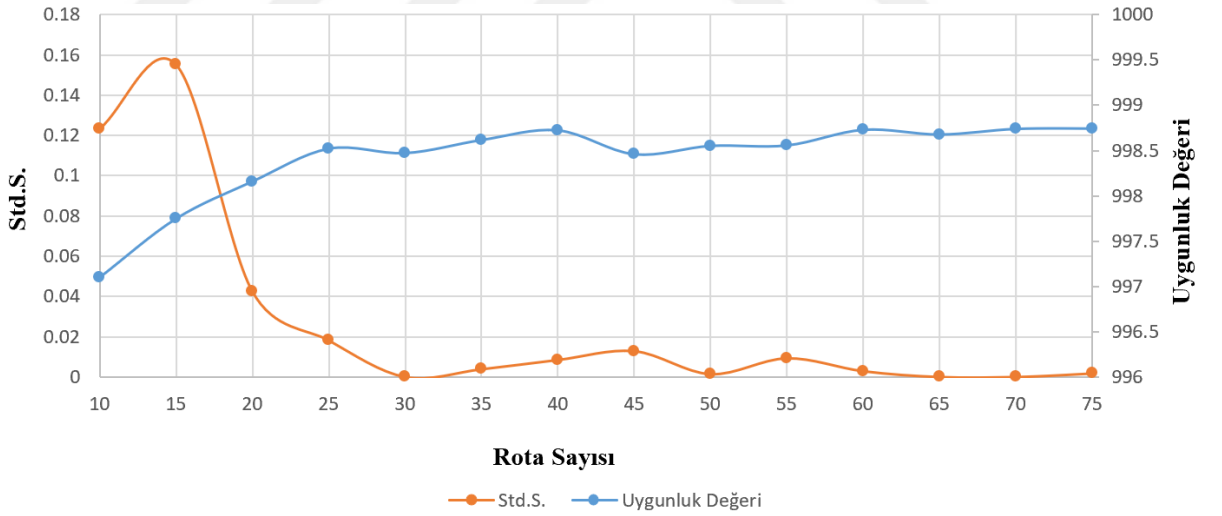
Şekil 5.4: Çaprazlama Olasılığına Göre Uygunluk Değeri Ve Standart Sapma Grafiği

**Mutasyon Olasılığı:** Mutasyon olasılık değerleri [0.1 – 0.18] aralığında incelenmiştir ve optimal değer olarak 0.12 belirlenmiştir (Şekil 5.5).



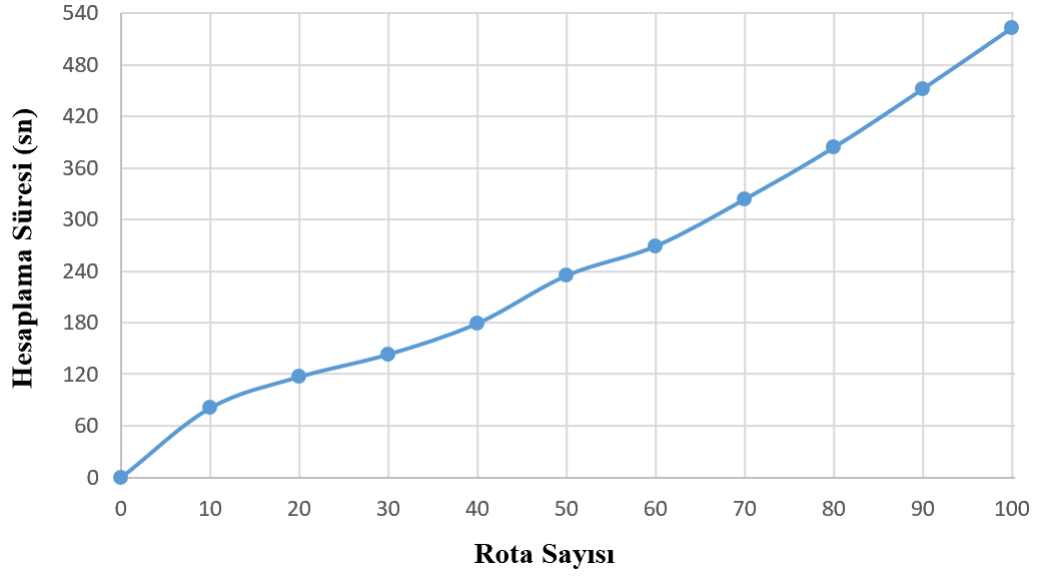
Şekil 5.5: Mutasyona Olasılığına Göre Uygunluk Değeri ve Standart Sapma Grafiği

**Ağ büyüklüğü:** Ağ büyüklüğünün (ağdaki otobüs rotalarının sayısı) etkisini gözlemlemek için, rota sayısı [10 – 74] aralığında değiştirilmiştir. Optimal rota sayısı 30 olarak bulunmuştur (Şekil 5.6).



Şekil 5.6: Ağ Büyüklüğüne Göre Uygunluk Değeri ve Standart Sapma Grafiği

Rota sayısının artmasına bağlı olarak değişimi hesaplama süresindeki değişimi gösteren grafik Şekil 5.7’de verilmiştir.

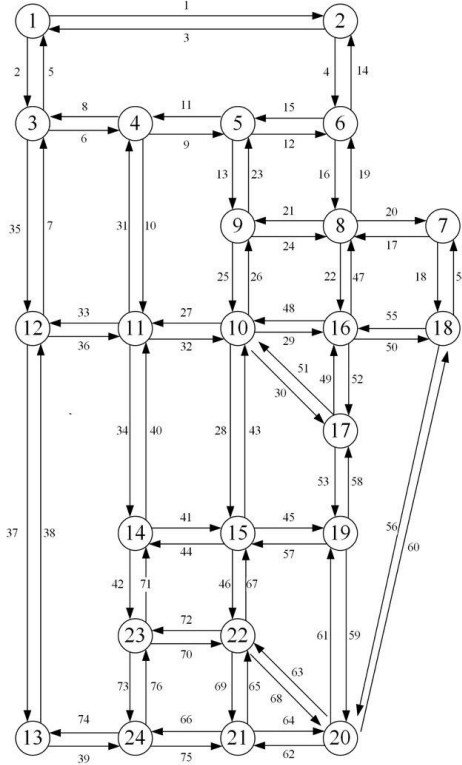


**Şekil 5.7: Rota Sayısına Göre Hesaplama Süresi**

## 5.2. Test Ağı

Bu bölümde ORATA'nın bir test ağı üzerinde çalıştırılması sonucunda elde edilen sayısal sonuçlar sunulmuştur. Test çalışması Şekil 5.8'deki Sioux Falls ağı<sup>21</sup> üzerinde, duyarlılık analizi ile elde edilen parametreler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Test ağı 24 düğüm ve 76 bağdan oluşmaktadır. Test ağı kullanmanın esas amacı, modelin sayısal sonuçlarının tamamını makul bir çalışma süresi içinde elde etmektir. Her nesilde seçilen en kötü, ortalama ve en iyi ağların sayısal performans değerleri verilmiştir. Optimize edilmiş ağ 100 nesil durma kriterlerine ulaşıldıktan sonra en iyi seçenektir.

<sup>21</sup> Bu ve diğer birçok ulaşım ağı literatür verisine <https://github.com/bstabler/TransportationNetworks> adresinden ulaşılabilir.



Şekil 5.8: Sioux Falls Test Ağı (Bahrami vd., 2017)

Tablo 5.1, test ağında kullanılan parametreleri ve model bileşenlerinin nerede kullanıldıklarını göstermektedir. Amaç fonksiyonundaki kullanıcı, işletmeci ve karşılanmayan talep maliyetlerine eşit bir maliyet ağırlığı uygulanmıştır. Bu eşit ağırlıklandırma, toplam maliyeti minimize etmek için çatışan çıkarlardan hiçbirini ön sıraya taşımamak için yapılmıştır. Kullanılan diğer parametreler duyarlılık analizi sonucunda elde edilmiştir. Model çıktısının tam bir örneğini göstermek ve hesaplama süresinin makul bir değer olması için bu test çalışmasında nesil sayısı standart sapma değeri sıfır olan en düşük sayı olan 100 olarak seçilmiştir.

**Tablo 5.1: Test Ağında Kullanılan Parametre Değerleri**

Bileşen	Parametre	Değer
Otobüs Rota Ağı Üretme Algoritması	Ağ Büyüklüğü	76 Yol
	Minimum Rota Uzunluğu	5 km
	Maksimum Rota Uzunluğu	25 km
Otobüs Rota Ağı Analiz Süreci	Km başına otobüs işletme maliyeti	15 ₺
	Zamanın para cinsinden değeri	15 ₺
	Kullanıcı maliyeti ağırlığı	0.333
	İşletmeci maliyeti ağırlığı	0.333
	Karşılanmayan talep maliyeti ağırlığı	0.333
	Otobüs seyahat hızı	Önceden tanımlanmış bir listeden rastgele seçilmiştir
	Otobüs seyahat süresi	Hız değeri kullanılarak hesaplanmıştır
Otobüs rotası taşıt aralığı	Önceden tanımlanmış bir listeden rastgele seçilmiştir	
Otobüs Rota Ağı Arama Algoritması	Çaprazlama olasılığı	0.90
	Mutasyon olasılığı	0.12
	Çaprazlama noktası sayısı	2
	Popülasyon büyüklüğü	35
	Nesil sayısı	100

- Her testteki popülasyon sayısı standart sapmayı sıfır yapan ve en iyi uygunluk değerini veren bir değer olarak seçilmiştir.
- Araç hızları 30,50 ve 70 km/s arasından rastsal olarak seçilmiştir.
- Kullanıcı, işletmeci maliyetleri ve karşılanmayan talep maliyeti için ağırlıklar eşit ve 0.333 alınmıştır.
- Test ağı üzerindeki en kısa mesafe 2 birim ve en uzak mesafe 10 birim olduğu için minimum rota uzunluğu 5, maksimum rota uzunluğu 25 birim alınmıştır.
- Hesaplama süresini kısa tutmak için durdurma kriteri 100 nesil, mutasyon olasılığı 0.12, çaprazlama olasılığı 0.90 ve tek nokta çaprazlama seçilmiştir.

### 5.2.1. Test Ağı Sayısal Sonuçları

Modelin test ağı üzerinde 5 nesil için uygulanması ile elde edilen sonuçlar Tablo 5.2’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre, model, her nesilde bir önceki nesilde seçilenden biraz daha iyi bir ağ çözümü seçmiş ve optimal çözüme 5. nesilde ulaşmıştır. Yukarıda belirtilen eğilim,

birbirini takip eden her nesildeki karşılanan talep miktarının sürekli artması veya daha da kötüleşmemesi ile doğrulanmaktadır. Bu, modelin çözüm uzayındaki bir global optimuma yakınsama kabiliyetine sahip olduğunu gösterir.

Tablo 5.2'ye bakıldığında en düşük karşılanmayan talep maliyetine Nesil 3 sahip olmasına rağmen en düşük amaç fonksiyonuna, uygunluk değerine ve standart sapmaya sahip değildir. Bu nedenle optimal ağ çözümü değildir. Bu, modelin toplam ulaşım maliyetini en aza indirmek ve sonuç olarak ağ kullanımını en üst düzeye çıkarmak olarak tanımlanmış amaç fonksiyonuna uygun olarak en iyi ağ çözümünü seçtiğini göstermektedir. Test ağı uygulama sonuçları Ek-3'de verilmiştir.

**Tablo 5.2: Test Ağı Nesil Sonuçları**

	Kullanıcı Maliyeti	İşletmeci Maliyeti	Karşılanmayan Talep Maliyeti	Amaç Fonksiyonu	Uygunluk Değeri	Standart Sapma
<b>Nesil: 0</b>	97772.0075	210313.7879	-2.7027	308083.0928	999.0	0.26266146
<b>Nesil: 1</b>	99370.8312	213964.6154	-3.8390	313331.6076	998.7012	0.18522217
<b>Nesil: 2</b>	98850.9053	209120.6448	-1.8027	307969.7474	998.5002	0.12992607
<b>Nesil: 3</b>	98344.9439	197081.4325	-4.6385	295421.7379	998.4346	0.11965192
<b>Nesil: 4</b>	97324.9799	198135.9027	-1.4641	295459.4184	998.3861	0.10441711
<b>Nesil: 5</b>	101127.3863	197980.2000	-3.8390	299103.7473	998.3221	0.08987999

### 5.3. Malatya İli Otobüs Rota Ağı Tasarımı

Önerilen model çözümünün gerçek bir toplu taşıma ağı tasarlama yeteneğini belirlemek için model, Malatya İli örnekleme üzerinde uygulanmıştır. Örnekleme bölgesinin detaylı tanımı dördüncü bölümde verilmiştir.

Ağ tasarım aşmasında, aşağıdaki şekilde verilen Malatya toplu taşıma ağının sadece bir örnekleme simüle edilecektir. Bunun nedeni, tüm ağı test etmek için gereken sürenin üstel olarak artmasıdır. Bu örnekleme içinde kalan TAZ'lar, belediye otobüslerine ait rotalar ve örnekleme oluşturmak için kullanılan maksimum rota sayısı çalışma alanı olarak seçilen alandaki tüm otobüs duraklarının kapsanmasını garanti etmek amacıyla 15 olarak alınmıştır. Kullanılan diğer parametre değerleri daha önce yapılmış olan duyarlılık analizinin sonucundan alınacaktır. Bu test durumu için kullanılan tüm parametrelerin bir listesi Tablo 5.3'de gösterilmiştir. Bir kez daha eşdeğer bir amaç fonksiyon ağırlıklandırma yaklaşımı benimsenmiştir.



**Ağ Üretimi:** Başlangıç popülasyonu sırasıyla düğüm ve bağ verilerini kullanarak rota ağı üretme algoritması ile üretilmiştir. Üretme algoritması, belirlenen çalışma bölgesi içindeki düğümler arasından rastgele düğümler seçerek çözüm uzayını oluşturacak aday otobüs rotalarını belirler. Bir başka önemli girdi de (2-7) km rota uzunluğu kısıtıdır. Bu kısıt 20 km<sup>2</sup>'lik örneklem alanı büyüklüğüne uygun büyüklükte rotalar belirlenmesini sağlayacak şekilde denemeler sonunda belirlenmiştir.

**Ağ Analizi:** Bu aşamada, üretilen ağ analiz edilir ve uygunluk değerleri hesaplanır. Buradaki temel girdiler ALTAŞ'tan alınan seyahat talep matrisidir. Üretilen otobüs ağlarına seyahat hacimlerini atamak için bir trafik ataması gerçekleştirilmiştir. Trafik atamasından sonra uygunluk değerleri hesaplanmış ve modelin son aşamasında kullanılmak üzere saklanmıştır.

**Arama Aşaması:** Bu son aşamada optimal otobüs ağı aranır. Bu aşama, 2.3.4. bölümünde açıklandığı üzere, GA operatörleri tarafından yönlendirilir. Bu aşamadaki girdiler; çaprazlama olasılığı (0.85), popülasyon sayısı (20), mutasyon olasılığı (0.15) ve nesil sayısıdır (5).

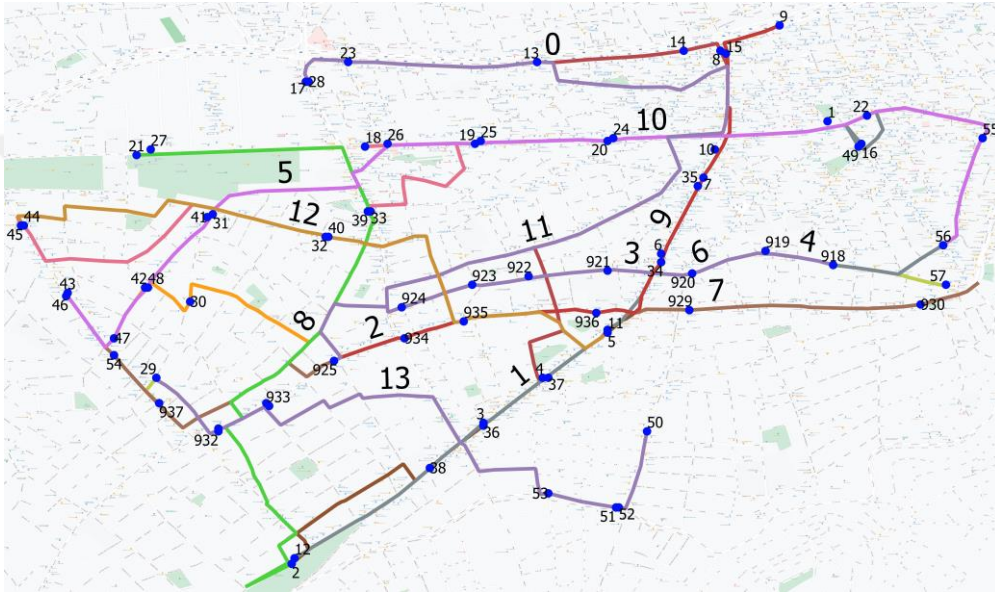
Uygulamada kullanılan tüm parametrelerin bir listesi Tablo 5.3'de verilmiştir.

**Tablo 5.3: Malatya ÖrneklemAğında Kullanılan Parametre Değerleri**

Bileşen	Parametre	Değer
Otobüs Rota Ağı Üretme Algoritması	Ağ Büyüklüğü	2121 Yol
	Maksimum Rota Sayısı	15 Rota
	Minimum Rota Uzunluğu	2 km
	Maksimum Rota Uzunluğu	7 km
	Maksimum Filo Büyüklüğü	20 Araç
Otobüs Rota Ağı Analiz Süreci	Km başına işletme maliyeti	₺15
	Zamanın para cinsinden değeri	₺15
	Kullanıcı maliyeti ağırlığı	0.333
	İşletmeci maliyeti ağırlığı	0.333
	Karşılansız talep maliyeti ağırlığı	0.333
	Otobüs seyahat hızı	{30, 50, 70} listesinden rastgele seçilmiştir
	Otobüs seyahat süresi	Hız değeri kullanılarak hesaplanmıştır
Otobüs rotası taşıt aralığı	{15, 20, 25, 30} listesinden rastgele seçilmiştir	
Otobüs Rota Ağı Üretme Algoritması	Çaprazlama olasılığı	0.85
	Mutasyon olasılığı	0.15
	Çaprazlama noktası sayısı	2
	Popülasyon büyüklüğü	20
	Nesil sayısı	5

## 5.4. Uygulama Sonuçları

Malatya İli Ulaşım Ağı örneklemini üzerinde yapılan uygulamada zaman kısıtından dolayı durdurma kriteri 5 nesil olarak alınmıştır. Örneklem üzerindeki 75 durak için maksimum rota sayısı 15 alınmış ve bu kısıt altında örneklem alanındaki tüm durakları kapsayan optimal rota ağı olarak 41.54.km uzunluğunda ve 14 rotadan oluşan bir ağ (Şekil 5.9) elde edilmiştir. Bu optimal rota ağına ait sayısal sonuçlar Tablo 5.4'te verilmiştir.



Şekil 5.9:Çalışma Alanı İçin Üretilen Optimal Rota Ağı

Tablo 5.4: Optimal Rota Ağı Sayısal Sonuçlar

Kullanıcı Maliyeti:	661641.06 br.
İşletmeci Maliyeti:	19088748.93 br
Karşılınmayan Talep Maliyeti:	-4.49 br.
Amaç Fonksiyonu:	19750385.5 br.
Ortalama Uygunluk Değeri:	998.412934
Standart Sapma:	0.06281768
Rota Sayısı:	14
Araç Sayısı:	14
Toplam Uzunluk:	41.54 km

Bu çalışmada Otobüs Rota Ağı Tasarım Algoritması kullanılarak örneklem alanındaki seyahat talebinin bu alandan geçen gerçek rota ağına göre daha kısa ama daha fazla rota içeren bir rota ağı üretilerek karşılanmış olmasının tek sebebi gerçek rotaların başlangıç-varış

noktalarının belirlenen örneklem bölgesi dışında olmasıdır. Dolayısıyla gerçek rotalar belirlenen örneklem bölgesinin içinden geçmeden önceki ve bu bölgeden geçtikten sonraki seyahat taleplerinden etkilenmektedirler. Bu nedenle örneklem alanındaki seyahat talebi belirlenen maksimum 15 rota ve 2-7 km aralığında rota uzunluğu kısıtları içinde 14 rota üretilerek gerçek rotalardan %25.11 daha kısa bir ağ üretilerek karşılanmıştır.



## 6. SONUÇLAR

Gelişmekte olan şehirlerde ortaya çıkan ulaşım sorunlarının çözümü, büyük ölçüde; ulaşım planlamacıların tecrübelerine, muhakeme yeteneklerine, mevcut talep kalıpları ve arazi kullanım hedefleri hakkındaki bilgilerine ve kaynak kısıtlarına dayanır. Bununla birlikte ulaşım problemlerine çözümler üretilirken sistematik bir yaklaşım sergilenmemesinden dolayı ulaşım ağında yapılan iyileştirmelerin çoğu ya eski rotaların yeni gelişen bölgelere doğru genişletilmesi ve/veya diğer bölgelere olan hizmetin azaltılması ile sınırlı kalmaktadır. Bu tür değişiklikler toplu taşıma hizmetleri kullanıcılarını memnun edememekte ve kullanıcıyı şahsi araç sahibi olmaya itmektedir. Bu durum; trafik sıkışıklığına, daha fazla yakıt tüketilmesine ve yoğun hava kirliliği gibi bir takım trafik problemlerinin katlanarak artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle otobüs rota ağlarında iyileştirmeler yaparken bilimsel araçlara veya sistematik yaklaşımlara ihtiyaç duyulduğu aşikârdır.

Yukarıda bahsedilen ulaşım ile ilgili problemler Malatya İli için de mevcuttur. Bu problemleri çözenin en önemli yollarından biri de toplu taşıma ağlarının kalitesini artırmaktır. Verimli bir hizmet sunan toplu taşıma ağları daha fazla kişiyi toplu taşıma kullanmaya teşvik etme potansiyeline sahiptir. Toplu taşıma kullanımının artmasının hava kirliliğinin, trafik sıkışıklığının ve enerji tüketiminin azaltılması üzerinde doğrudan etkisi vardır. Bu nedenle bu çalışmada metasezgisel teknikler kullanan bir optimizasyon modeli tasarlanmış ve Malatya İli'nin bir örneklemini için optimize edilmiş bir otobüs rota ağı oluşturulmuştur. Otobüs rota ağlarının, mevcut tasarım kapasitelerinin verimsiz kullanımı nedeniyle, rota ağlarının yeniden tasarlanması ihtiyacının giderek artması nedeniyle bu çözümün sistematik bir yaklaşım sergilenerek elde edilmesi çok önemlidir.

ORATP, sistem performans koşullarını yansıtan kısıtlara tâbi bir şekilde genel ulaşım maliyetlerinin minimize edilmesini içerir. Ayrıca doğası gereği bir NP-Zor problem olmasından dolayı çözülmesi son derece zor bir problemdir. Problemin karmaşıklığını arttıran özelliklerden bazıları; çelişen amaç fonksiyonlarına ve doğrusal olmayan kısıtlara sahip olması, non-konveks olması ve ayrık değişkenlerden kaynaklanan kombinatoriyel karmaşıklığıdır. Bu çalışmada ORATP'nin karmaşık doğası ile baş edebilmek için; başlangıç çözüm kümesi üretme, ağ analizi ve GA ile ağ arama bileşenlerinden oluşan Otobüs Rota Ağı Tasarımı Algoritması önerilmiştir. Bu algoritma kullanılarak şehir merkezinde seçilen 20 km<sup>2</sup>'lik bir örneklem üzerinde Malatya Büyükşehir Belediyesi'ne ait otobüslerin hane halkı anketleri sonucu elde edilen seyahat

taleplerine dayanan optimal rotaları belirlenmiş ve bu sayede kullanıcı, işletmeci ve karşılanmayan talebe bağlı ulaşım maliyetleri minimize edilmiştir.

Sonuç olarak Malatya İli örnekleme içinde kalan seyahat talepleri Malatya Büyük Şehir Belediyesi'ne ait toplam 55.47 km'lik bir uzunluğa sahip 9 rota ile karşılanırken bu çalışmada elde edilen sonuçta bu talebin toplam 41.54 km uzunluğundaki 14 rota ile karşılandığı görülmüştür.

Ülkemiz bütçesinin büyük bir kısmının karayolu ulaşım ağlarının yapılmasına ayrılmaktadır. Yapılan her yeni karayolu kendi trafiğini doğurmakta ve bu nedenle yeni yolar yapılmasına rağmen trafik problemleri katlanarak artmaktadır. Bu çalışmada literatüre bir gerçek hayat problemine uygulanabilir optimize edilmiş toplu taşıma ulaşım ağı tasarım modeli ve çözüm algoritması kazandırılmıştır. Karayolu yatırım bütçelerinin büyüklüğü ve trafiğin hızlı işleminin sosyo-ekonomik etkileri göz önüne alındığında literatürde bu tür çalışmalara daha çok ihtiyaç olduğu görülmektedir.

## KAYNAKÇA

- Abdulrahman H. S., Özüysal, M. (2019), "A Framework for Feeder Bus Route Design Network Problem (FBRNDP)." *The 4th Eurasian Conference on Civil and Environmental Engineering IV. ECOCEE*, (İstanbul, Turkey), 1067-1078.
- Agrawal, J., & Mathew, T. V. (2004). Transit route network design using parallel genetic algorithm. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 18(3), 248-256.
- Arbex, R. O., & da Cunha, C. B. (2015). Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. *Transportation Research Part B: Methodological*, 81, 355-376.
- Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1990). TRUST: A LISP program for the analysis of transit route configurations. *Transportation Research Record*, 1283(1990), 125-135.
- Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1991). An AI-based approach for transit route system planning and design. *Journal of advanced transportation*, 25(2), 187-209.
- Baaj, M. H., & Mahmassani, H. S. (1995). Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 3(1), 31-50.
- Babazadeh, A., Poorzahedy, H., & Nikoosokhan, S. (2011). Application of particle swarm optimization to transportation network design problem. *Journal of King Saud University-Science*, 23(3), 293-300.
- Bagherian, M., Massah, S., & Kermanshahi, S. (2013, October). A swarm based method for solving transit network design problem. In *Proceedings of the Australasian Transport Research Forum*.
- Bagloee, S. A., & Ceder, A. A. (2011). Transit-network design methodology for actual-size road networks. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(10), 1787-1804.
- Bahrami, S., Aashtiani, H. Z., Nourinejad, M., & Roorda, M. J. (2017). A complementarity equilibrium model for electric vehicles with charging. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 6(4), 255-271.
- Başkan, Ö., & Haldenbilen, S. (2011). Stokastik Kullanıcı Dengesi Trafik Atama Probleminin Sezgisel Metotlar Kullanılarak Çözülmesi.

- Beckmann, M. J., McGuire, C. B., & Winsten, C. B. (1955). *Studies in the Economics of Transportation*.
- Bell, M. G., & Iida, Y. (1997). *Transportation network analysis*.
- Beltran, B., Carrese, S., Cipriani, E., & Petrelli, M. (2009). Transit network design with allocation of green vehicles: A genetic algorithm approach. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 17(5), 475-483.
- Ben-Akiva, M., & Lerman, S. R. (1985). *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand*. Transportation Studies.
- Berechman, J. (2013). *Public transit economics and deregulation policy*. Elsevier.
- Bielli, M., & Carotenuto, P. (1998). A new approach for transport network design and optimization.
- Bielli, M., Caramia, M., & Carotenuto, P. (2002). Genetic algorithms in bus network optimization. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 10(1), 19-34.
- Black, A. (1978). Optimizing urban mass transit systems: A general model. *Transportation Research Record*, (677).
- Blum, C., & Roli, A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. *ACM computing surveys (CSUR)*, 35(3), 268-308.
- Boyd, S., Xiao, L., & Mutapcic, A. (2003). Subgradient methods. *Lecture notes of EE392o, Stanford University, Autumn Quarter, 2004*, 2004-2005.
- Buba, A. T., & Lee, L. S. (2016). Urban transit network design problems: A review of population-based metaheuristics. *Pertanika Journal of Scholarly Research Reviews*, 2(3).
- Buba, A. T., & Lee, L. S. (2018a). A Differential Evolution for Optimization of Multiobjective Urban Transit Routing Problem. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(3.20), 140-145.
- Buba, A. T., & Lee, L. S. (2018b). A differential evolution for simultaneous transit network design and frequency setting problem. *Expert Systems with Applications*, 106, 277-289.
- Bussieck, M. (1998). *Optimal lines in public rail transport* (Doctoral dissertation, Verlag nicht ermittelbar).
- Byrne, B. F., & Vuchic, V. R. (1972). Public transportation line positions and headways for minimum cost. *Traffic flow and transportation*.

- Byrne, B. F. (1975). Public transportation line positions and headways for minimum user and system cost in a radial case. *Transportation Research*, 9(2-3), 97-102.
- Byrne, B. F. (1976). Cost minimizing positions, lengths and headways for parallel public transit lines having different speeds. *Transportation Research*, 10(3), 209-214.
- Carrese, S., & Gori, S. (2002). An urban bus network design procedure. In *Transportation planning* (pp. 177-195). Springer, Boston, MA.
- Ceder, A., & Israeli, Y. (1998). User and operator perspectives in transit network design. *Transportation Research Record*, 1623(1), 3-7.
- Ceder, A., & Wilson, N. H. (1986). Bus network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(4), 331-344.
- Ceylan, H. (2009). Şehir içi ulaşım ağlarının armoni araştırması optimizasyon tekniği ile tasarımı. (Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi)
- Chakroborty, P., & Dwivedi, T. (2002). Optimal route network design for transit systems using genetic algorithms. *Engineering optimization*, 34(1), 83-100.
- Chakroborty, P. (2003). Genetic algorithms for optimal urban transit network design. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 18(3), 184-200.
- Chang, S. K., & Schonfeld, P. M. (1991). Multiple period optimization of bus transit systems. *Transportation Research Part B: Methodological*, 25(6), 453-478.
- Chang, S. K., & Schonfeld, P. M. (1993a). Welfare maximization with financial constraints for bus transit systems. *Transportation Research Record*, (1395).
- Chang, S. K., & Schonfeld, P. M. (1993b). Optimal dimensions of bus service zones. *Journal of transportation engineering*, 119(4), 567-585.
- Chew, J. S. C., & Lee, L. S. (2012). A genetic algorithm for urban transit routing problem. In *International Journal of Modern Physics: Conference Series* (Vol. 9, pp. 411-421). World Scientific Publishing Company.
- Chien, S., & Schonfeld, P. (1997). Optimization of grid transit system in heterogeneous urban environment. *Journal of Transportation Engineering*, 123(1), 28-35.
- Chien, S., Yang, Z., & Hou, E. (2001). Genetic algorithm approach for transit route planning and design. *Journal of transportation engineering*, 127(3), 200-207.



- Chien, S. I. J., Dimitrijevic, B. V., & Spasovic, L. N. (2003). Optimization of bus route planning in urban commuter networks. *Journal of Public Transportation*, 6(1), 4.
- Chow, A. H. F. (2007). *System optimal traffic assignment with departure time choice* (Doctoral dissertation, University of London).
- Cipriani, E., Fusco, G., Gori, S., & Petrelli, M. (2005). A procedure for the solution of the urban bus network design problem with elastic demand. *Advanced OR and AI Methods in Transportation Proc*, 681-685.
- Cipriani, E., Gori, S., & Petrelli, M. (2012). Transit network design: A procedure and an application to a large urban area. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 20(1), 3-14.
- Constantin, I., & Florian, M. (1995). Optimizing frequencies in a transit network: a nonlinear bi-level programming approach. *International Transactions in Operational Research*, 2(2), 149-164.
- de Dios Ortúzar, J., & Willumsen, L. G. (2011). *Modelling transport*. John Wiley & Sons.
- Delle Site, P., & Filippi, F. (2001). Bus service optimisation with fuel saving objective and various financial constraints. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(2), 157-176.
- Dial, R. B. (1971). A probabilistic multipath traffic assignment model which obviates path enumeration. *Transportation research*, 5(2), 83-111.
- Domencich, T. A., & McFadden, D. (1975). *Urban travel demand-a behavioral analysis*.
- Dubois, D., Bel, G., & Llibre, M. (1979). A set of methods in transportation network synthesis and analysis. *Journal of the Operational Research Society*, 30(9), 797-808.
- Edelkamp, S., & Schroedl, S. (2011). *Heuristic search: theory and applications*. Elsevier.
- Fan, L. (2009). *Metaheuristic methods for the urban transit routing problem* (Doctoral dissertation, Cardiff University).
- Fan, L., & Mumford, C. L. (2010). A metaheuristic approach to the urban transit routing problem. *Journal of Heuristics*, 16(3), 353-372.
- Fan, W. (2004). *Optimal transit route network design problem: Algorithms, implementations, and numerical results*. The University of Texas at Austin.

- Fan, W., & Machemehl, R. B. (2006a). Optimal transit route network design problem with variable transit demand: genetic algorithm approach. *Journal of transportation engineering*, 132(1), 40-51.
- Fan, W., & Machemehl, R. B. (2006b). Using a simulated annealing algorithm to solve the transit route network design problem. *Journal of transportation engineering*, 132(2), 122-132.
- Fan, W., & Machemehl, R. B. (2008a). Tabu search strategies for the public transportation network optimizations with variable transit demand. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 23(7), 502-520.
- Fan, W. D., & Machemehl, R. B. (2008b). Some computational insights on the optimal bus transit route network design problem. In *Journal of the Transportation Research Forum* (Vol. 47, No. 3, pp. 1-16).
- Fan, W., & Machemehl, R. B. (2008c). A tabu search based heuristic method for the transit route network design problem. In *Computer-aided Systems in Public Transport* (pp. 387-408). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Fletterman, M. (2008). *Designing multimodal public transport networks using metaheuristics* (Doctoral dissertation, University of Pretoria).
- Furth, P. G., & Wilson, N. H. (1981). Setting frequencies on bus routes: Theory and practice. *Transportation Research Record*, 818(1981), 1-7.
- Fusco, G., Gori, S., & Petrelli, M. (2002, June). A heuristic transit network design algorithm for medium size towns. In *Proceedings of the 13th mini-euro conference, Bari*.
- Goldberg, D.E. (1989), *Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning*. Addison-Wesley, Reading, Mass.
- Gunby, H., & Gustavsen, S. (2015). *A Combined Swarm System for the Urban Transit Routing Problem* (Master's thesis, NTNU).
- Gundaliya, P. J., Shrivastava, P., & Dhingra, P. L. (2000). Model for simultaneous routing and scheduling using genetic algorithm.
- Han, J., Lee, S., & Kim, J. (2006). Meta-heuristic algorithms for a transit route design. *Advanced OR and AI Methods in Transportation*, 686-691.

- Hasselström, D. (1981). *Public transportation planning - A mathematical programming approach* (Ph.D. thesis, Dept. of Business Administration, University of Göteborg, Sweden).
- Holroyd, E. M. (1967). "The optimum bus service: a theoretical model for a large uniform urban area", *Proceedings of the 3rd International Symposium on the Theory of Road Traffic Flow, New York*.
- Hoogendoorn, S. P., Botma, H., & Minderhoud, M. M. (2007). *Traffic flow theory and simulation*. Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Transportation and Traffic Engineering Section.
- Hu, J., Shi, X., Song, J., & Xu, Y. (2005, August). Optimal design for urban mass transit network based on evolutionary algorithms. In *International Conference on Natural Computation* (pp. 1089-1100). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Huang, H., & Gartner, G. (2012). Collective intelligence-based route recommendation for assisting pedestrian way finding in the era of Web 2.0. *Journal of location based services*, 6(1), 1-21
- Hurdle, V. F. (1973). Minimum cost locations for parallel public transit lines. *Transportation Science*, 7(4), 340-350.
- Imam, M. O. (1998). Optimal design of public bus service with demand equilibrium. *Journal of transportation engineering*, 124(5), 431-436.
- Israeli, Y., & Ceder, A. (1989, September). Designing transit routes at the network level. In *Conference Record of papers presented at the First Vehicle Navigation and Information Systems Conference (VNIS'89)* (pp. 310-316). IEEE.
- Jiang, H., Yu, Q., & Huang, Y. (2010, August). An improved ant colony algorithm for urban transit network optimization. In *2010 Sixth International Conference on Natural Computation* (Vol. 5, pp. 2739-2743). IEEE.
- Kechagiopoulos, P. N., & Beligiannis, G. N. (2014). Solving the urban transit routing problem using a particle swarm optimization based algorithm. *Applied Soft Computing*, 21, 654-676.
- Kepaptsoglou, K., & Karlaftis, M. (2009). Transit route network design problem. *Journal of transportation engineering*, 135(8), 491-505.

- Khan, O. A. (2007). *Modelling passenger mode choice behaviour using computer aided stated preference data* (Doctoral dissertation, Queensland University of Technology).
- Kılıç, F. (2010) *A Public Transportation Route Planning Tool: ToTRoP*.(Doktora tezi, Çukurova Üniversitesi)
- Kılıç, F., & Gök, M. (2014). A demand based route generation algorithm for public transit network design. *Computers & operations research*, 51, 21-29.
- Knight, F. H. (1924). Some fallacies in the interpretation of social cost. *The Quarterly Journal of Economics*, 38(4), 582-606.
- Kocur, G., & Hendrickson, C. (1982). Design of local bus service with demand equilibration. *Transportation Science*, 16(2), 149-170.
- Koutsopoulos, H. N., Odoni, A., & Wilson, N. H. (1985). Determination of headways as a function of time varying characteristics on a transit network. *Computer scheduling of public transport*, 2(1), 391-413.
- Lampkin, W., & Saalmans, P. D. (1967). The design of routes, service frequencies, and schedules for a municipal bus undertaking: A case study. *Journal of the Operational Research Society*, 18(4), 375-397.
- LeBlanc, L. J. (1988). Transit system network design. *Transportation Research Part B: Methodological*, 22(5), 383-390.
- Lee, Y. J., & Vuchic, V. R. (2005). Transit network design with variable demand. *Journal of Transportation Engineering*, 131(1), 1-10.
- Lei, D., & Yan, X. (2008). Multi-Objective Transit Route Network Design Using Tabu Search. In *Plan, Build, and Manage Transportation Infrastructure in China* (pp. 308-316).
- Liu, L., Olszewski, P., & Goh, P. C. (2010, October). Combined simulated annealing and genetic algorithm approach to bus network design. In *International Conference on Transport Systems Telematics* (pp. 335-346). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Lučić, P., & Teodorović, D. (2003). Computing with bees: attacking complex transportation engineering problems. *International Journal on Artificial Intelligence Tools*, 12(03), 375-394.
- Magnanti, T. L., & Wong, R. T. (1984). Network design and transportation planning: Models and algorithms. *Transportation science*, 18(1), 1-55.

- Mandl, C. E. (1980). Evaluation and optimization of urban public transportation networks. *European Journal of Operational Research*, 5(6), 396-404.
- Marwah, B. R., Umrigar, F. S., & Patnaik, S. B. (1984). Optimal design of bus routes and frequencies for Ahmedabad. *Transportation Research Record*, 994, 41-47.
- Mathew, T. V., & Mohan, S. (2003). Transit route network design using frequency coded genetic algorithm. *Journal of transportation engineering*, 129(2), 186-195.
- Mathew, T. V. (2009). Lecture notes in Transportation Systems Engineering (<http://www.civil.iitb.ac.in/tvm/1100 LnTse/136 Intse/plain/plain.html>, Erişim Tarihi: 11.02.2020)
- Mohaymany, A. S., & Gholami, A. (2010). Multimodal feeder network design problem: ant colony optimization approach. *Journal of transportation engineering*, 136(4), 323-331.
- Morlok, E. K., & Viton, P. A. (1984). Feasibility of profitable transit service in radial urban corridors. *Transportation Research Record*, 980, 46-54.
- MUAP Raporları, Malatya Büyük Şehir Belediyesi Ulaşım Daire Başkanlığı
- Muijlwijk, H. (2012). *Static traffic assignment with junction modelling* (Master's thesis, University of Twente).
- Nagurney, A., & Zhang, W. B. (2007). Mathematical models of transportation and networks. *Mathematical Models in Economics*, 2, 346-384.
- Nayeem, M. A., Rahman, M. K., & Rahman, M. S. (2014). Transit network design by genetic algorithm with elitism. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 30-45.
- Ngamchai, S., & Lovell, D. J. (2003). Optimal time transfer in bus transit route network design using a genetic algorithm. *Journal of Transportation Engineering*, 129(5), 510-521.
- Nikolić, M., & Teodorović, D. (2013). Transit network design by bee colony optimization. *Expert Systems with Applications*, 40(15), 5945-5955.
- Nikolić, M., & Teodorović, D. (2014). A simultaneous transit network design and frequency setting: Computing with bees. *Expert Systems with Applications*, 41(16), 7200-7209.
- Nnene, O. A. (2014). *The design of public transit networks with heuristic algorithms: case study Cape Town* (Master's thesis, University of Cape Town).

- Nnene, O. A., Zuidgeest, M. H. P., & Beukes, E. A. (2017). Application of metaheuristic algorithms to the improvement of the MyCiTi BRT network in Cape Town. *Journal of the South African Institution of Civil Engineering*, 59(4), 56-63.
- Nnene, O. A., Joubert, J. W., & Zuidgeest, M. H. (2019a). An agent-based evaluation of transit network design. *Procedia Computer Science*, 151, 757-762.
- Nnene, O. A., Joubert, J. W., & Zuidgeest, M. H. (2019b). Transit network design with meta-heuristic algorithms and agent based simulation. *IFAC-PapersOnLine*, 52(3), 13-18.
- Patriksson, M. (2015). *The traffic assignment problem: models and methods*. Courier Dover Publications.
- Pattnaik, S. B., Mohan, S., & Tom, V. M. (1998). Urban bus transit route network design using genetic algorithm. *Journal of transportation engineering*, 124(4), 368-375.
- Peterson, A. (2007). *The origin-destination matrix estimation problem: analysis and computations* (Doctoral dissertation, Institutionen för teknik och naturvetenskap).
- Petrelli, M. (2004). A transit network design model for urban areas. *WIT Transactions on The Built Environment*, 75.
- Pigou, A. C. (1920). *The Economics of Welfare*. Macmillan, London.
- Poorzahedy, H., & Safari, F. (2011). An ant system application to the bus network design problem: an algorithm and a case study. *Public Transport*, 3(2), 165-187.
- Rea, J. C. (1971). *Designing urban transit systems: an approach to the route-technology selection problem* (No. 72-7410 UMI). Seattle: University of Washington.
- Russo, F. (1998). Transit Frequencies Design for Enhancing The Efficiency Of Public Urban Transportation Systems: An Optimization Model And An Algorithm. *Logistics Management and Environmental Aspects... Intelligent Transportation Systems and Telemetrics... Marketing, Vehicle Finance and Leasing*.
- Salter, R. J. (1996). *Highway traffic analysis and design*. Macmillan International Higher Education.
- Salzborn, F. J. (1972). Optimum bus scheduling. *Transportation Science*, 6(2), 137-148.
- Saw, K., Katti, B. K., & Joshi, G. (2015). Literature review of traffic assignment: static and dynamic. *International Journal of Transportation Engineering*, 2(4), 339-347.

- Schéele, S. (1980). A supply model for public transit services. *Transportation Research Part B: Methodological*, 14(1-2), 133-146.
- Sheffi, Y. (1985). *Urban transportation networks* (Vol. 6). Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Shih, M. C., & Mahmassani, H. S. (1994). Vehicle sizing model for bus transit networks. *Transportation Research Record*, 1452, 35.
- Shih, M. C., Mahmassani, H. S., & Baaj, M. H. (1998). Planning and design model for transit route networks with coordinated operations. *Transportation Research Record*, 1623(1), 16-23.
- Silman, L. A., Barzily, Z., & Passy, U. (1974). Planning the route system for urban buses. *Computers & operations research*, 1(2), 201-211.
- Soehodho, S. (2000). Optimal scheduling of public transport fleet at network level. *Journal of advanced transportation*, 34(2).
- Sörensen, K., & Glover, F. (2013). Metaheuristics. *Encyclopedia of operations research and management science*, 62, 960-970.
- Spasovic, L. N., Boile, M. P., & Bladikas, A. K. (1993, August). A methodological framework for optimizing bus transit service coverage. In *73rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*.
- Spasovic, L., Boile, M. P., & Bladikas, A. K. (1994). Bus transit service coverage for maximum profit and social welfare. *Transportation Research Record*, (1451).
- Stützle, T., & Hoos, H. H. (2000). MAX-MIN ant system. *Future generation computer systems*, 16(8), 889-914.
- Szeto, W. Y., & Wu, Y. (2011). A simultaneous bus route design and frequency setting problem for Tin Shui Wai, Hong Kong. *European Journal of Operational Research*, 209(2), 141-155.
- Szeto, W. Y., & Jiang, Y. (2012). Hybrid artificial bee colony algorithm for transit network design. *Transportation Research Record*, 2284(1), 47-56.
- Szeto, W. Y., & Jiang, Y. (2014). Transit route and frequency design: Bi-level modeling and hybrid artificial bee colony algorithm approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 67, 235-263.

- Taşkın, Ç., & Gökay, E. G., (2009). Sayısal Yöntemlerde Genetik Algoritmalar. Bursa: Alfa Aktüel Yayınları.
- Tsao, S. M., & Schonfeld, P. (1983). Optimization of zonal transit service. *Journal of Transportation Engineering*, 109(2), 257-272.
- van Nes, R., Hamerslag, R., & Immers, L. H. (1988). *The design of public transport networks* (Vol. 1202). National Research Council, Transportation Research Board.
- van Nes, R., & Bovy, P. H. (2000). Importance of objectives in urban transit-network design. *Transportation Research Record*, 1735(1), 25-34.
- van Nes, R. (2002). Multi user-class urban public transport network design. In *Transport, Infrastructure and Logistics. Proceedings 7th TRAIL Congress 2002. Selected Papers*. Delft University Press.
- Van Oudheusden, D. L., Ranjithan, S., & Singh, K. N. (1987). The design of bus route systems—An interactive location-allocation approach. *Transportation*, 14(3), 253-270.
- Vaughan, R. (1986). Optimum polar networks for an urban bus system with a many-to-many travel demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, 20(3), 215-224.
- Wan, Q. K., & Lo, H. K. (2003). A mixed integer formulation for multiple-route transit network design. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 2(4), 299-308.
- Wardrop, J. G. (1952). Some theoretical aspects of road traffic research. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, (Part II), 325-378.
- Yang, Z., Yu, B., & Cheng, C. (2007). A parallel ant colony algorithm for bus network optimization. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 22(1), 44-55.
- Yu, B., & Yang, Z. (2006). Model and algorithm for iterative design of bus network. In *Applications of Advanced Technology in Transportation* (pp. 731-736).
- Zhang, J., Lu, H., & Fan, L. (2010, August). “The multi-objective optimization algorithm to a simple model of urban transit routing problem.” In *2010 Sixth International Conference on Natural Computation* (Vol. 6, pp. 2812-2815). IEEE.
- Zhao, F., & Gan, A. (2003). *Optimization of transit network to minimize transfers* (No. Final Report).
- Zhao, F., & Ubaka, I. (2004). Transit network optimization-minimizing transfers and optimizing route directness. *Journal of Public Transportation*, 7(1), 4.



Zhao, F., Ubaka, I., & Gan, A. (2005). Transit network optimization: minimizing transfers and maximizing service coverage with an integrated simulated annealing and tabu search method. *Transportation research record*, 1923(1), 180-188.

Zhao, F. (2006). Large-scale transit network optimization by minimizing user cost and transfers. *Journal of Public Transportation*, 9(2), 6.

Zhao, F., & Zeng, X. (2006). Optimization of transit network layout and headway with a combined genetic algorithm and simulated annealing method. *Engineering Optimization*, 38(6), 701-722.

Zhao, F., & Zeng, X. (2007). Optimization of user and operator cost for large-scale transit network. *Journal of Transportation Engineering*, 133(4), 240-251.

Zhao, F., & Zeng, X. (2008). Optimization of transit route network, vehicle headways and timetables for large-scale transit networks. *European Journal of Operational Research*, 186(2), 841-855.

Zhao, H., W. Xu & Jiang, R. (2015). The memetic algorithm for the optimization of urban transit network. *Expert Systems with Applications*, 42(7), 3760-3773.

<http://www.aequilibrae.com> (Erişim tarihi:10.09.2020)

<https://www.altasmuhendislik.com> (Erişim tarihi:25.03.2019)

<http://www.ausder.org.tr/wp-content/uploads/2017/10/akilli-ulasim-sistemleri-terimleri-sozlugu.pdf> (Erişim tarihi:07.03.2020)

## Ek-1: Dijkstra En Kısa Yol Algoritması (Huang, 2012)

```
1 function Dijkstra(Graph, source):
2   for each vertex v in Graph:      # Başlama
3     dist[v] := infinity             # Kaynaktan v'ye bilinmeyen mesafe fonksiyonu
4     previous[v] := undefined        #Kaynaktan çıkan optimal yolda bir önceki düğüm
5   dist[origin] := 0                 # Kaynaktan kaynağa mesafe
6   Q := the set of all nodes in Graph # Graftaki hiçbir düğüm optimize edilmemiş
7   while Q is not empty:           # Ana döngü
8     u := vertex in Q with smallest dist[]
9     if dist[u] = infinity:
10      break # Geriye kalan hiçbir köşe ulaşılabilir değil
11    remove u from Q
12    for each neighbor v of u:      # v henüz Q'dan çıkarılmamış
13      alt := dist[u] + dist_between(u, v)
14      if alt < dist[v]
15        dist[v] := alt
16        previous[v] := u
17  return previous[]
```

## Ek-2 Sioux Falls Test Verisi Python Formatı

### Düğüm veri formatı

```
{1: (-96.7704197365753, 43.612827917361315), 2: (-96.71125062731737, 43.60581297632311), 3: (-96.77430341162146, 43.572961604399), 4: (-96.74716842960285, 43.563653622104695), 5: (-96.73156909211392, 43.56403356790594), 6: (-96.71164388792634, 43.587585527559966), 7: (-96.69342281304426, 43.56384359530485), 8: (-96.71138171418701, 43.56232379292953), 9: (-96.73124137493977, 43.54859634101294), 10: (-96.73143800524426, 43.54527088220962), 11: (-96.74684071242872, 43.544130682672304), 12: (-96.7801367773211, 43.5439406473194), 13: (-96.79337655115627, 43.4907071825455), 14: (-96.75103549225767, 43.529306126207956), 15: (-96.73150354867909, 43.529401167022485), 16: (-96.71138171418701, 43.54674360802701), 17: (-96.71138171418701, 43.54128008947837), 18: (-96.69407824739254, 43.54674360802701), 19: (-96.7113161707522, 43.52959124820228), 20: (-96.71118508388255, 43.515333497404875), 21: (-96.73097920120046, 43.51048509455848), 22: (-96.73124137493977, 43.5148581810143), 23: (-96.75090440538804, 43.5148581810143), 24: (-96.74920027608252, 43.503164218940974)}
```

### Bağ veri formatı

```
[(1, 2, {'capacity': 25900.20064, 'length': 6, 'fft': 6, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (1, 3, {'capacity': 23403.47319, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (2, 1, {'capacity': 25900.20064, 'length': 6, 'fft': 6, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (2, 6, {'capacity': 4958.180928, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (3, 1, {'capacity': 23403.47319, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (3, 4, {'capacity': 17110.52372, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (3, 12, {'capacity': 23403.47319, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (4, 3, {'capacity': 17110.52372, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (4, 5, {'capacity': 17782.7941, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (4, 11, {'capacity': 4908.82673, 'length': 6, 'fft': 6, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (5, 4, {'capacity': 17782.7941, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (5, 6, {'capacity': 4947.995469, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (5, 9,
```

{'capacity': 10000, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (6, 2, {'capacity': 4958.180928, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (6, 5, {'capacity': 4947.995469, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (6, 8, {'capacity': 4898.587646, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (7, 8, {'capacity': 7841.81131, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (7, 18, {'capacity': 23403.47319, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (8, 6, {'capacity': 4898.587646, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (8, 7, {'capacity': 7841.81131, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (8, 9, {'capacity': 5050.193156, 'length': 10, 'fft': 10, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (8, 16, {'capacity': 5045.822583, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (9, 5, {'capacity': 10000, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (9, 8, {'capacity': 5050.193156, 'length': 10, 'fft': 10, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (9, 10, {'capacity': 13915.78842, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (10, 9, {'capacity': 13915.78842, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (10, 11, {'capacity': 10000, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (10, 15, {'capacity': 13512.00155, 'length': 6, 'fft': 6, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (10, 16, {'capacity': 4854.917717, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (10, 17, {'capacity': 4993.510694, 'length': 8, 'fft': 8, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (11, 4, {'capacity': 4908.82673, 'length': 6, 'fft': 6, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (11, 10, {'capacity': 10000, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (11, 12, {'capacity': 4908.82673, 'length': 6, 'fft': 6, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (11, 14, {'capacity': 4876.508287, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (12, 3, {'capacity': 23403.47319, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (12, 11, {'capacity': 4908.82673, 'length': 6, 'fft': 6, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (12, 13, {'capacity': 25900.20064, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (13, 12, {'capacity': 25900.20064, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (13, 24, {'capacity': 5091.256152, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (14, 11, {'capacity': 4876.508287, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (14, 15, {'capacity': 5127.526119, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (14, 23, {'capacity': 4924.790605, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (15, 10, {'capacity': 13512.00155, 'length': 6, 'fft': 6, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (15, 14, {'capacity': 5127.526119, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (15, 19, {'capacity': 14564.75315, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (15, 22, {'capacity': 9599.180565, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0}), (16, 8, {'capacity':

5045.822583, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (16, 10, {'capacity': 4854.917717, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (16, 17, {'capacity': 5229.910063, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (16, 18, {'capacity': 19679.89671, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (17, 10, {'capacity': 4993.510694, 'length': 8, 'fft': 8, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (17, 16, {'capacity': 5229.910063, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (17, 19, {'capacity': 4823.950831, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (18, 7, {'capacity': 23403.47319, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (18, 16, {'capacity': 19679.89671, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (18, 20, {'capacity': 23403.47319, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (19, 15, {'capacity': 14564.75315, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (19, 17, {'capacity': 4823.950831, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (19, 20, {'capacity': 5002.607563, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (20, 18, {'capacity': 23403.47319, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (20, 19, {'capacity': 5002.607563, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (20, 21, {'capacity': 5059.91234, 'length': 6, 'fft': 6, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (20, 22, {'capacity': 5075.697193, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (21, 20, {'capacity': 5059.91234, 'length': 6, 'fft': 6, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (21, 22, {'capacity': 5229.910063, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (21, 24, {'capacity': 4885.357564, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (22, 15, {'capacity': 9599.180565, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (22, 20, {'capacity': 5075.697193, 'length': 5, 'fft': 5, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (22, 21, {'capacity': 5229.910063, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (22, 23, {'capacity': 5000, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (23, 14, {'capacity': 4924.790605, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (23, 22, {'capacity': 5000, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (23, 24, {'capacity': 5078.508436, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (24, 13, {'capacity': 5091.256152, 'length': 4, 'fft': 4, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (24, 21, {'capacity': 4885.357564, 'length': 3, 'fft': 3, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0)), (24, 23, {'capacity': 5078.508436, 'length': 2, 'fft': 2, 'alpha': 0.15, 'beta': 4, 'speedLimit': 0})]

### Ek-3 Sioux Falls Test Ağı Uygulama Sonuçları

#### 21 Araç/30 Rota

Düğüm No	Enlem	Boylam	Rota No	Durak Sıra No
19	-96.7113	43.52959	0	1
15	-96.7315	43.5294	0	2
22	-96.7312	43.51486	0	3
17	-96.7114	43.54128	1	1
16	-96.7114	43.54674	1	2
8	-96.7114	43.56232	1	3
6	-96.7116	43.58759	1	4
2	-96.7113	43.60581	1	5
1	-96.7704	43.61283	1	6
21	-96.731	43.51049	2	1
20	-96.7112	43.51533	2	2
18	-96.6941	43.54674	2	3
7	-96.6934	43.56384	2	4
8	-96.7114	43.56232	2	5
6	-96.7116	43.58759	2	6
21	-96.731	43.51049	3	1
22	-96.7312	43.51486	3	2
15	-96.7315	43.5294	3	3
19	-96.7113	43.52959	3	4
17	-96.7114	43.54128	3	5
19	-96.7113	43.52959	4	1
17	-96.7114	43.54128	4	2
16	-96.7114	43.54674	4	3
8	-96.7114	43.56232	4	4
6	-96.7116	43.58759	4	5
5	-96.7316	43.56403	4	6
4	-96.7472	43.56365	4	7
2	-96.7113	43.60581	5	1
6	-96.7116	43.58759	5	2
8	-96.7114	43.56232	5	3
16	-96.7114	43.54674	5	4
17	-96.7114	43.54128	5	5
19	-96.7113	43.52959	5	6
15	-96.7315	43.5294	5	7
12	-96.7801	43.54394	6	1
11	-96.7468	43.54413	6	2
10	-96.7314	43.54527	6	3
9	-96.7312	43.5486	6	4
24	-96.7492	43.50316	7	1
13	-96.7934	43.49071	7	2
12	-96.7801	43.54394	7	3
3	-96.7743	43.57296	7	4
1	-96.7704	43.61283	7	5

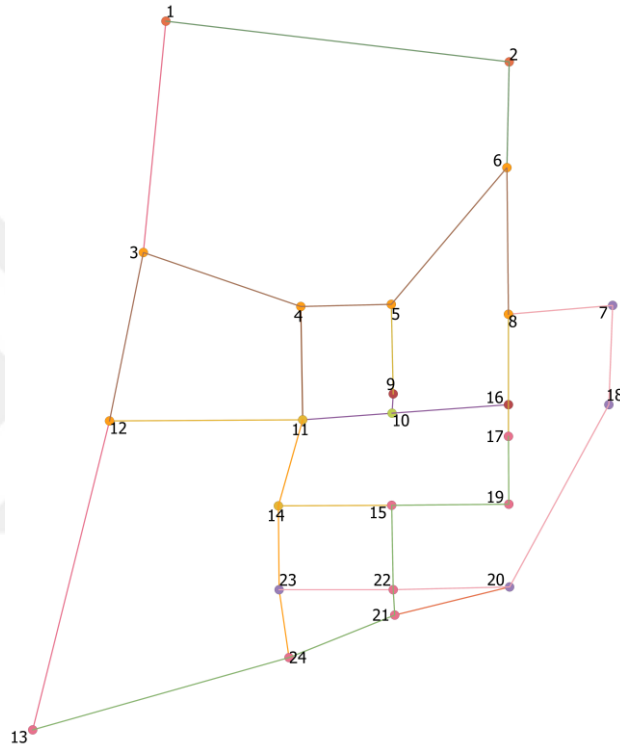
6	-96.7116	43.58759	8	1
5	-96.7316	43.56403	8	2
9	-96.7312	43.5486	8	3
10	-96.7314	43.54527	8	4
6	-96.7116	43.58759	9	1
5	-96.7316	43.56403	9	2
9	-96.7312	43.5486	9	3
2	-96.7113	43.60581	10	1
1	-96.7704	43.61283	10	2
3	-96.7743	43.57296	10	3
1	-96.7704	43.61283	11	1
2	-96.7113	43.60581	11	2
6	-96.7116	43.58759	11	3
8	-96.7114	43.56232	11	4
22	-96.7312	43.51486	12	1
20	-96.7112	43.51533	12	2
18	-96.6941	43.54674	12	3
7	-96.6934	43.56384	12	4
8	-96.7114	43.56232	12	5
6	-96.7116	43.58759	12	6
2	-96.7113	43.60581	12	7
3	-96.7743	43.57296	13	1
4	-96.7472	43.56365	13	2
11	-96.7468	43.54413	13	3
14	-96.751	43.52931	13	4
15	-96.7315	43.5294	13	5
16	-96.7114	43.54674	14	1
8	-96.7114	43.56232	14	2
6	-96.7116	43.58759	14	3
5	-96.7316	43.56403	14	4
4	-96.7472	43.56365	14	5
2	-96.7113	43.60581	15	1
6	-96.7116	43.58759	15	2
8	-96.7114	43.56232	15	3
16	-96.7114	43.54674	15	4
17	-96.7114	43.54128	15	5
12	-96.7801	43.54394	16	1
11	-96.7468	43.54413	16	2
14	-96.751	43.52931	16	3
15	-96.7315	43.5294	16	4
17	-96.7114	43.54128	17	1
16	-96.7114	43.54674	17	2
8	-96.7114	43.56232	17	3
6	-96.7116	43.58759	17	4
5	-96.7316	43.56403	17	5
4	-96.7472	43.56365	17	6
7	-96.6934	43.56384	18	1
8	-96.7114	43.56232	18	2
6	-96.7116	43.58759	18	3

5	-96.7316	43.56403	18	4
4	-96.7472	43.56365	18	5
3	-96.7743	43.57296	18	6
21	-96.731	43.51049	19	1
20	-96.7112	43.51533	19	2
18	-96.6941	43.54674	19	3
24	-96.7492	43.50316	20	1
21	-96.731	43.51049	20	2
20	-96.7112	43.51533	20	3
18	-96.6941	43.54674	20	4
7	-96.6934	43.56384	20	5
24	-96.7492	43.50316	21	1
21	-96.731	43.51049	21	2
22	-96.7312	43.51486	21	3
11	-96.7468	43.54413	22	1
14	-96.751	43.52931	22	2
23	-96.7509	43.51486	22	3
24	-96.7492	43.50316	22	4
2	-96.7113	43.60581	23	1
1	-96.7704	43.61283	23	2
3	-96.7743	43.57296	23	3
12	-96.7801	43.54394	23	4
13	-96.7934	43.49071	23	5
24	-96.7492	43.50316	23	6
10	-96.7314	43.54527	24	1
16	-96.7114	43.54674	24	2
17	-96.7114	43.54128	24	3
8	-96.7114	43.56232	25	1
7	-96.6934	43.56384	25	2
18	-96.6941	43.54674	25	3
20	-96.7112	43.51533	25	4
22	-96.7312	43.51486	25	5
23	-96.7509	43.51486	25	6
1	-96.7704	43.61283	26	1
2	-96.7113	43.60581	26	2
6	-96.7116	43.58759	26	3
8	-96.7114	43.56232	26	4
16	-96.7114	43.54674	26	5
15	-96.7315	43.5294	27	1
19	-96.7113	43.52959	27	2
17	-96.7114	43.54128	27	3
16	-96.7114	43.54674	27	4
8	-96.7114	43.56232	27	5
6	-96.7116	43.58759	27	6
12	-96.7801	43.54394	28	1
3	-96.7743	43.57296	28	2
4	-96.7472	43.56365	28	3
5	-96.7316	43.56403	28	4
6	-96.7116	43.58759	28	5



8	-96.7114	43.56232	28	6
13	-96.7934	43.49071	29	1
24	-96.7492	43.50316	29	2
21	-96.731	43.51049	29	3
22	-96.7312	43.51486	29	4
15	-96.7315	43.5294	29	5
19	-96.7113	43.52959	29	6
17	-96.7114	43.54128	29	7

### 21 Araç/ 30 Rota



### 21 Araç/ 30 Rota

hızlar = [30, 50, 70]

max. araç = 30

max. rota sayısı = 30

popülasyon = 35

Başlama: 16:41:39.664279

Bitiş: 16:44:07.615649

Toplam süre: 2 dakika 27.951 saniye

#### En iyi sonuç

Nesil: 7

Worst: 998.369475

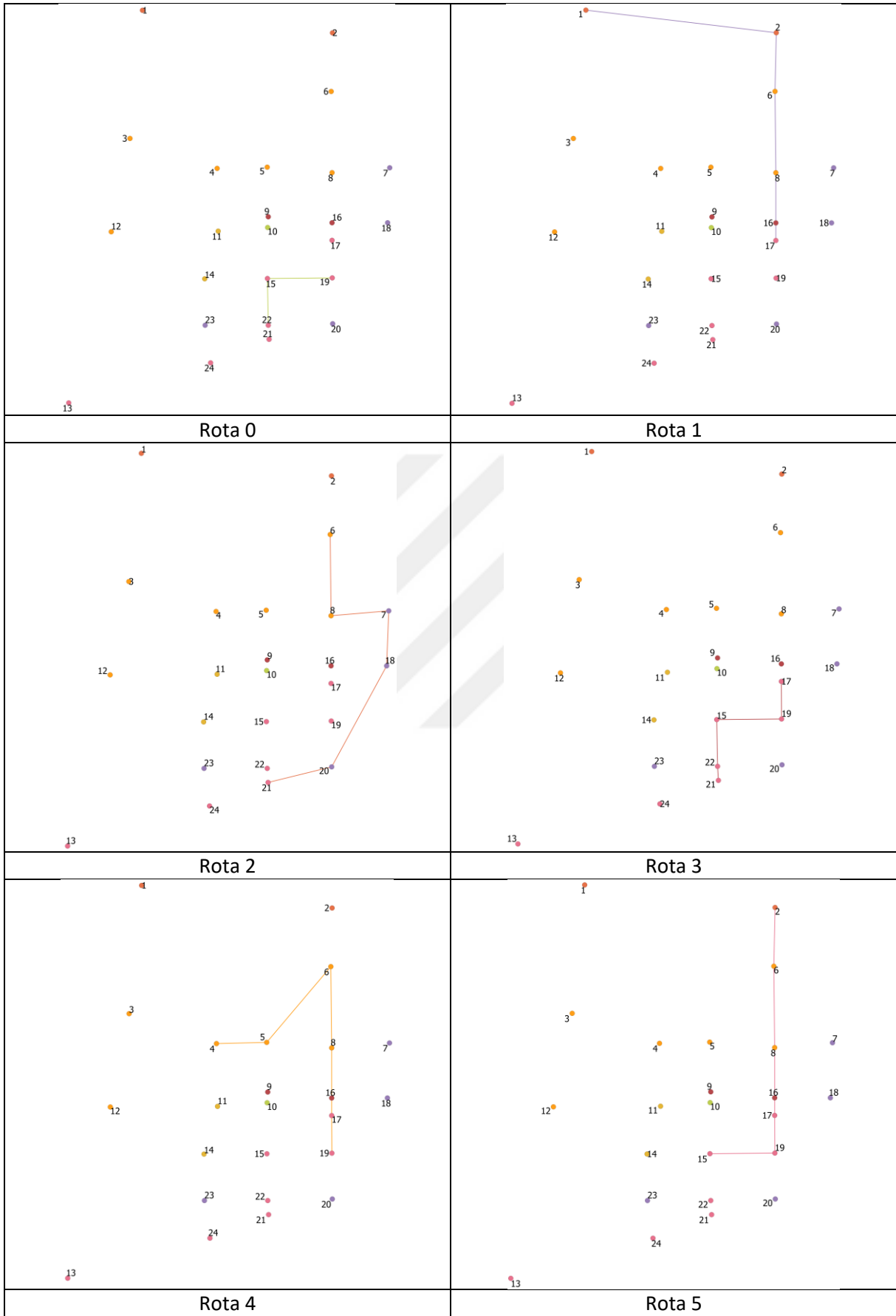
Best: 998.369475

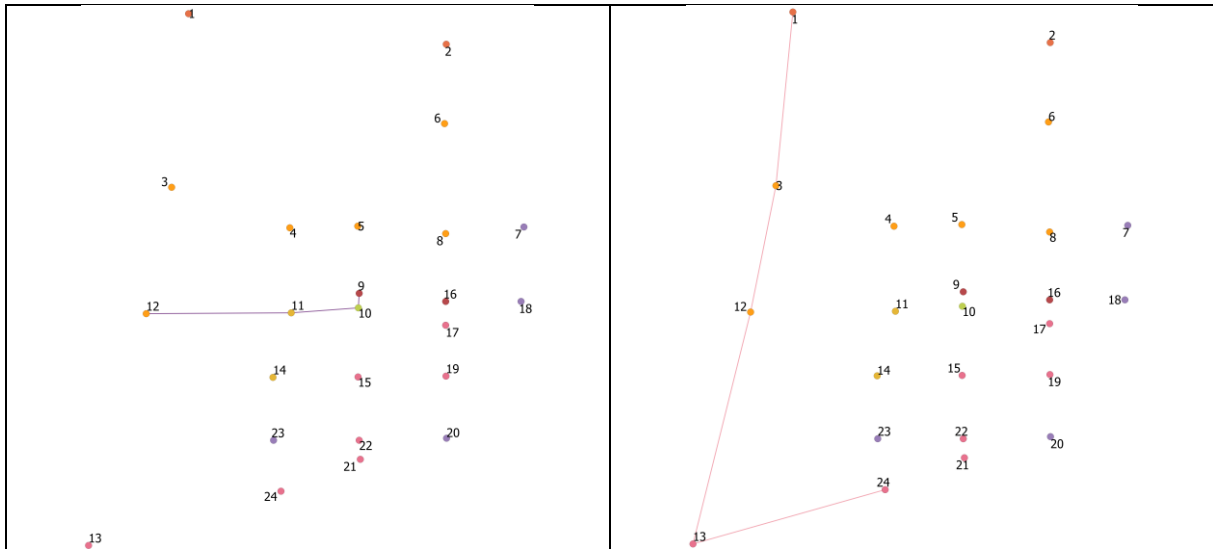
Median: 998.369475

Average: 998.369475

Std.Sapma: 0

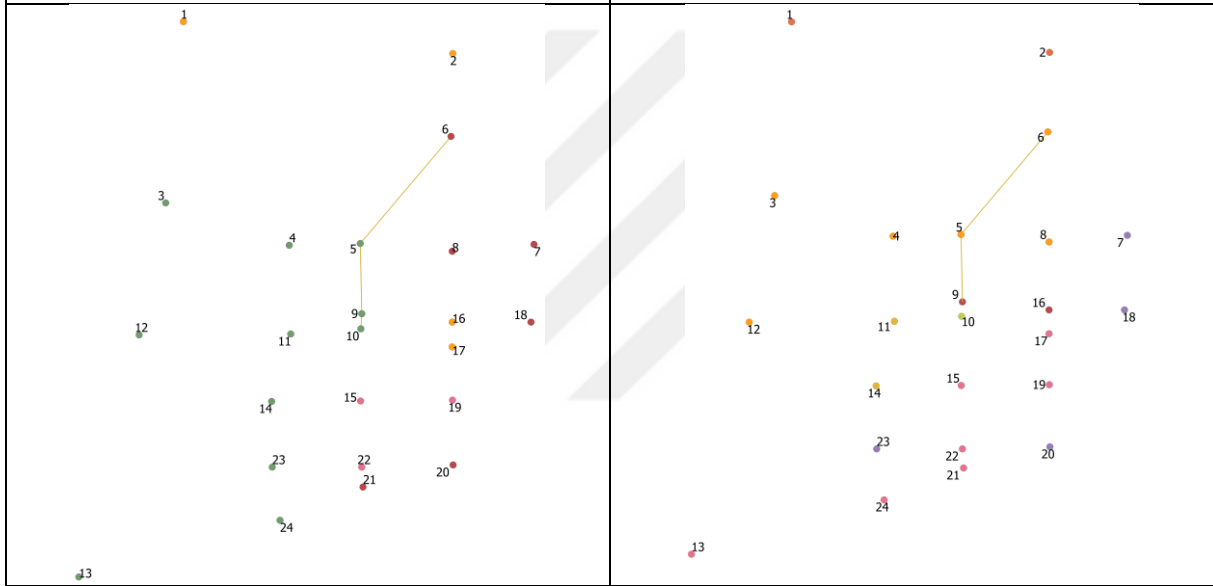
Min.z: 802978623.7517954





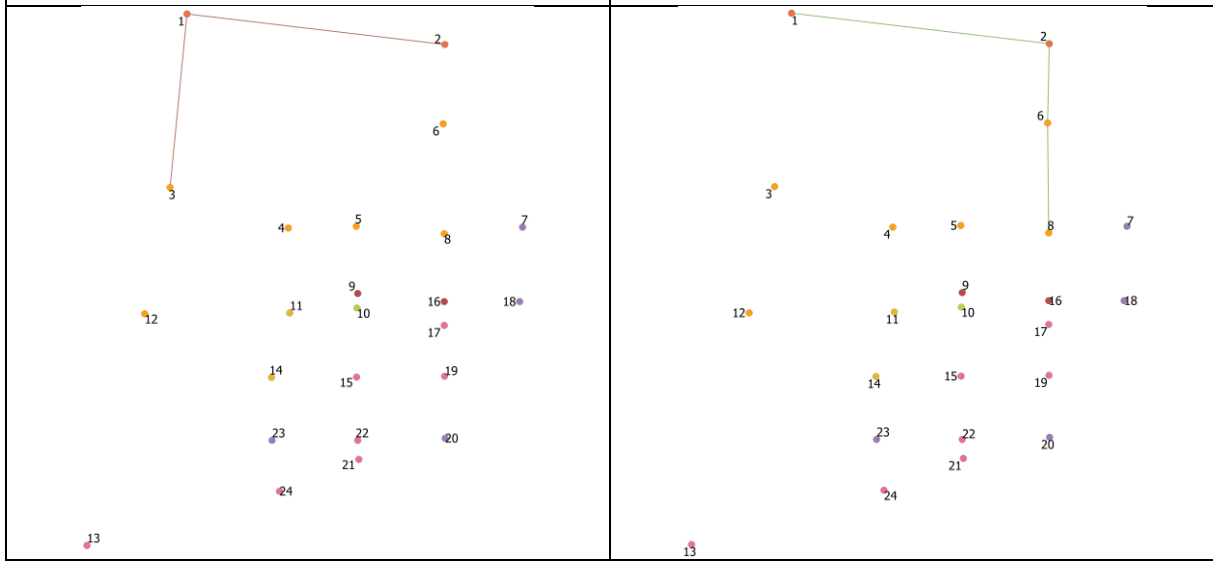
Rota 6

Rota 7



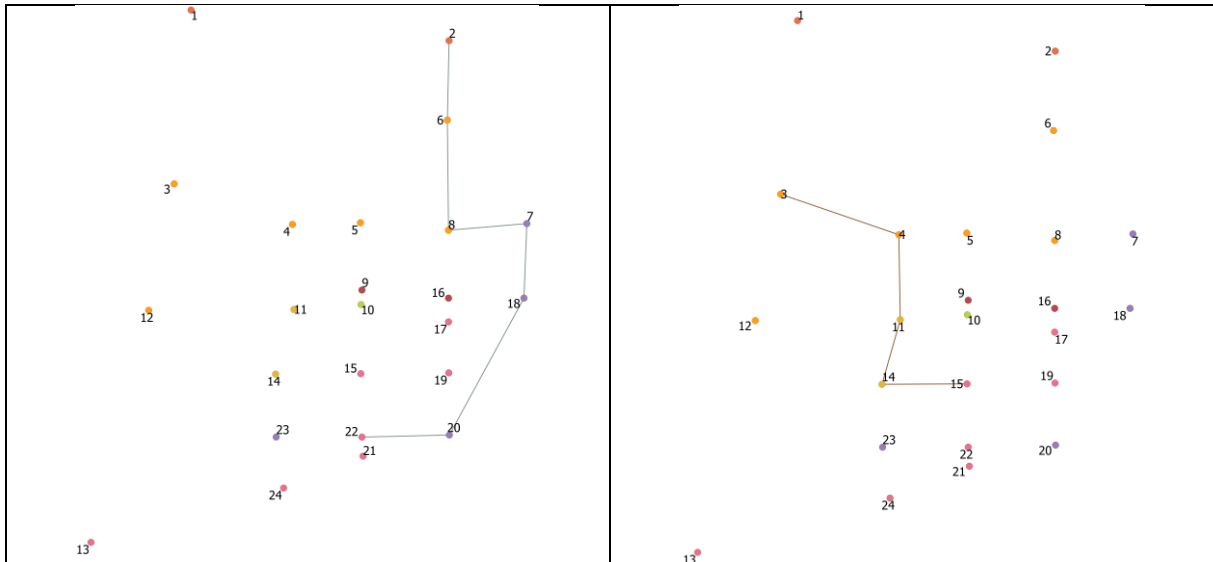
Rota 8

Rota 9



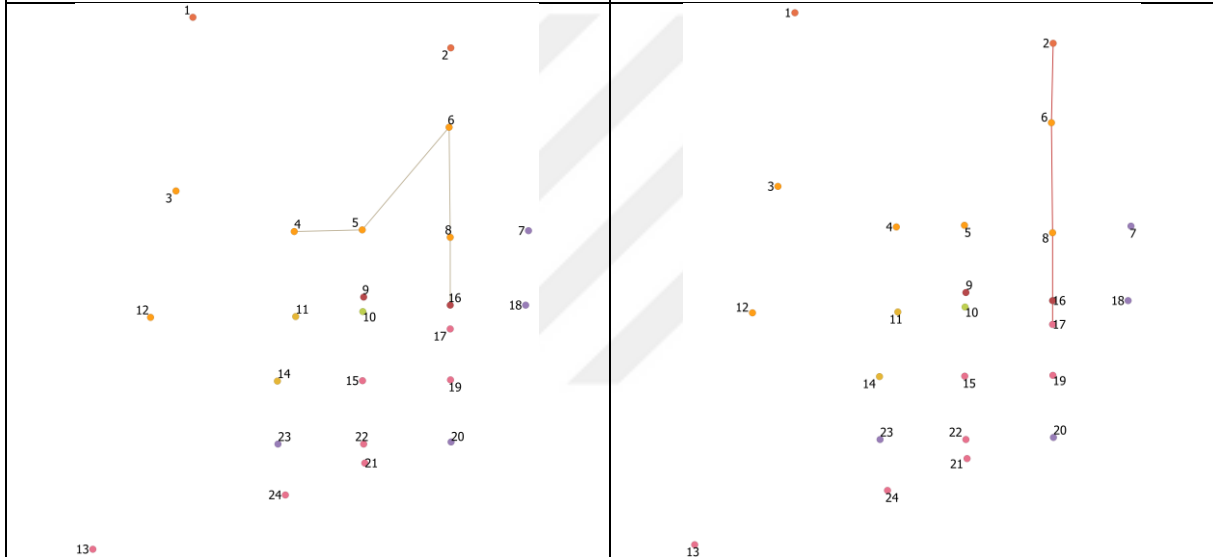
Rota 10

Rota 11



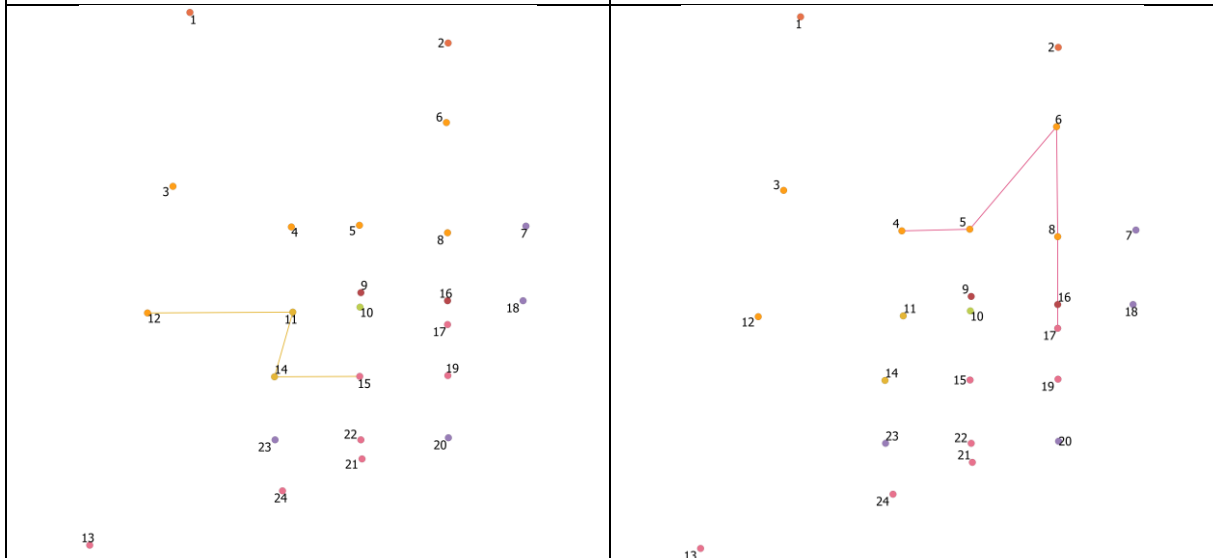
Rota 12

Rota 13



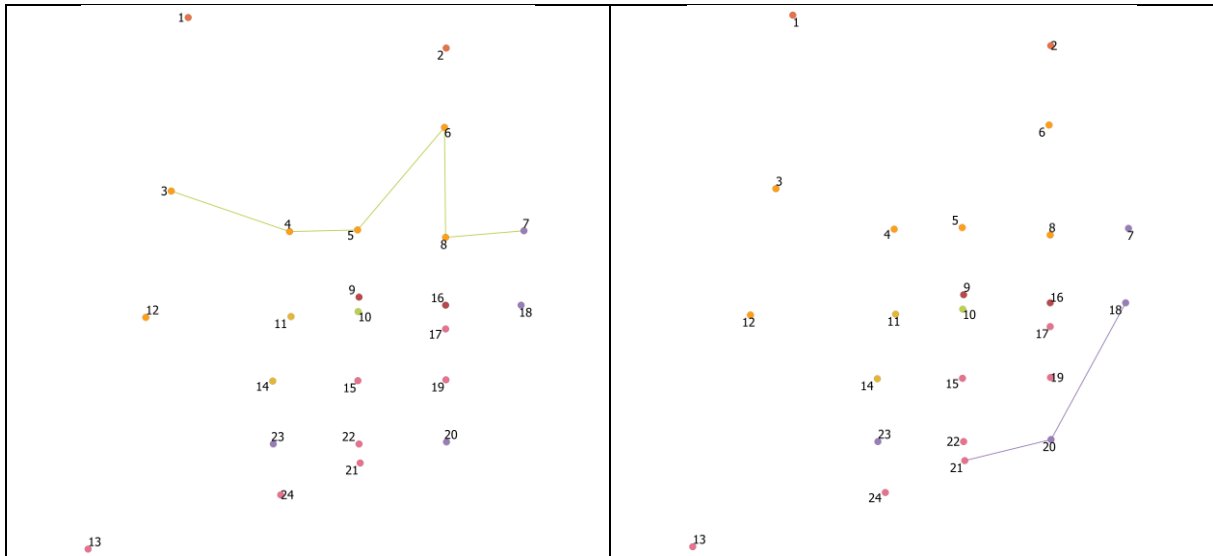
Rota 14

Rota 15



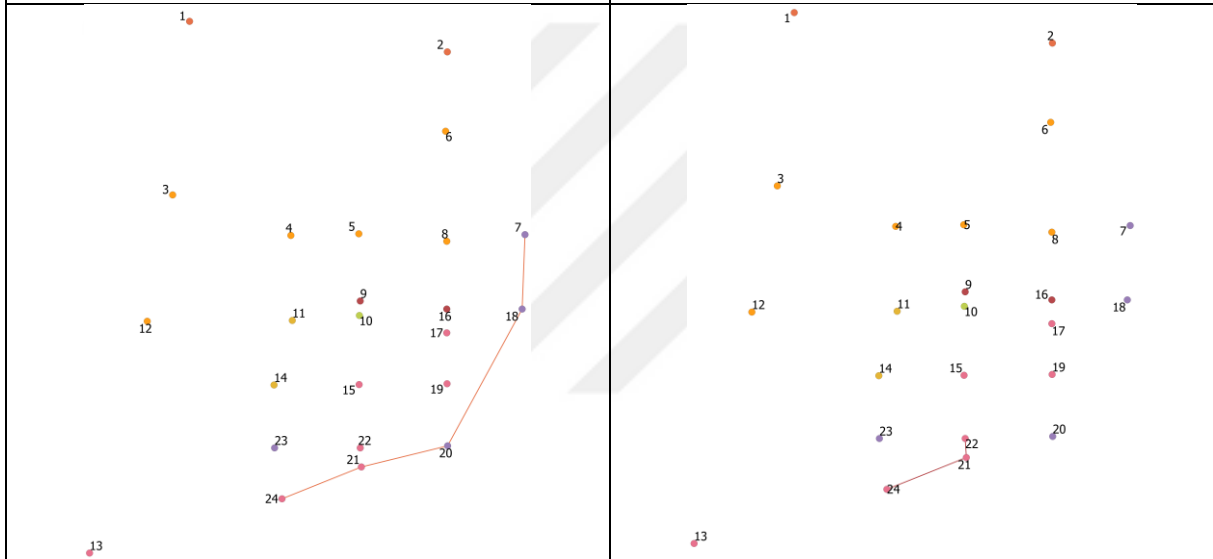
Rota 16

Rota 17



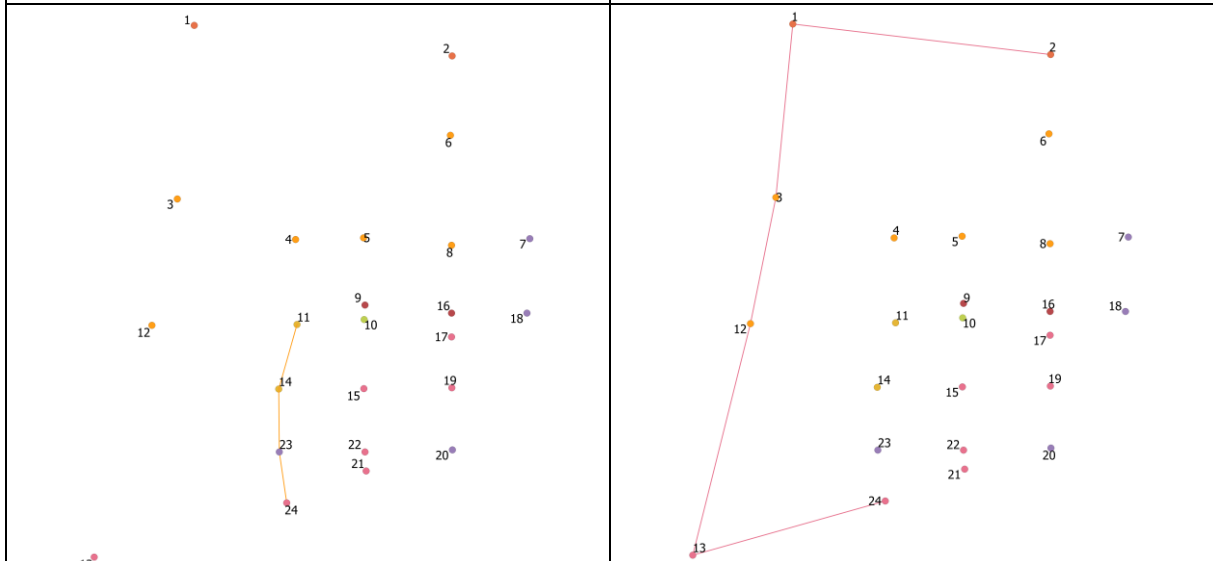
Rota 18

Rota 19



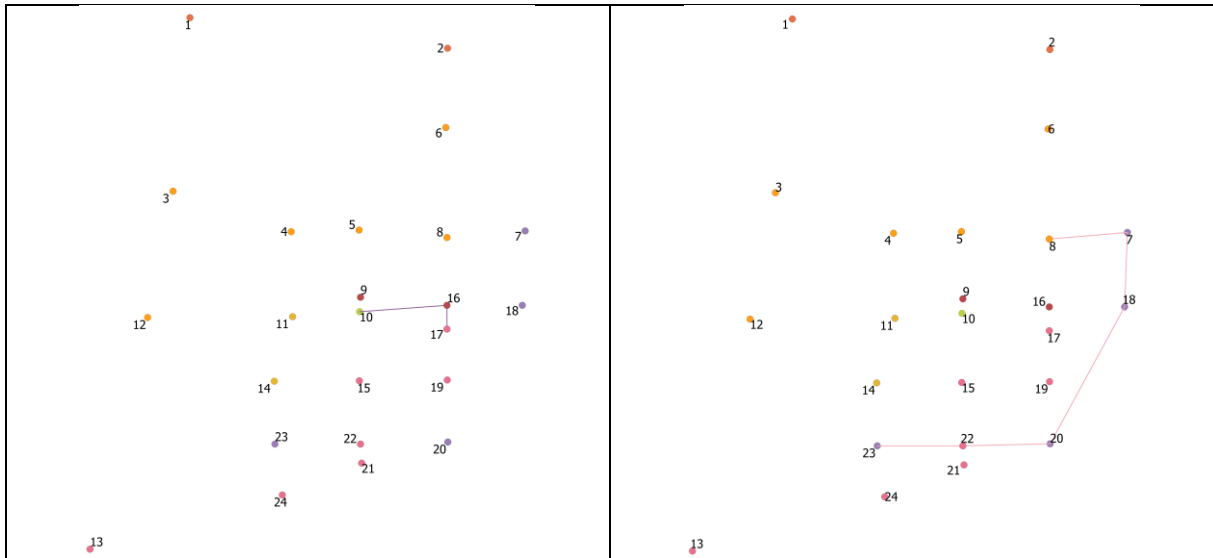
Rota 20

Rota 21



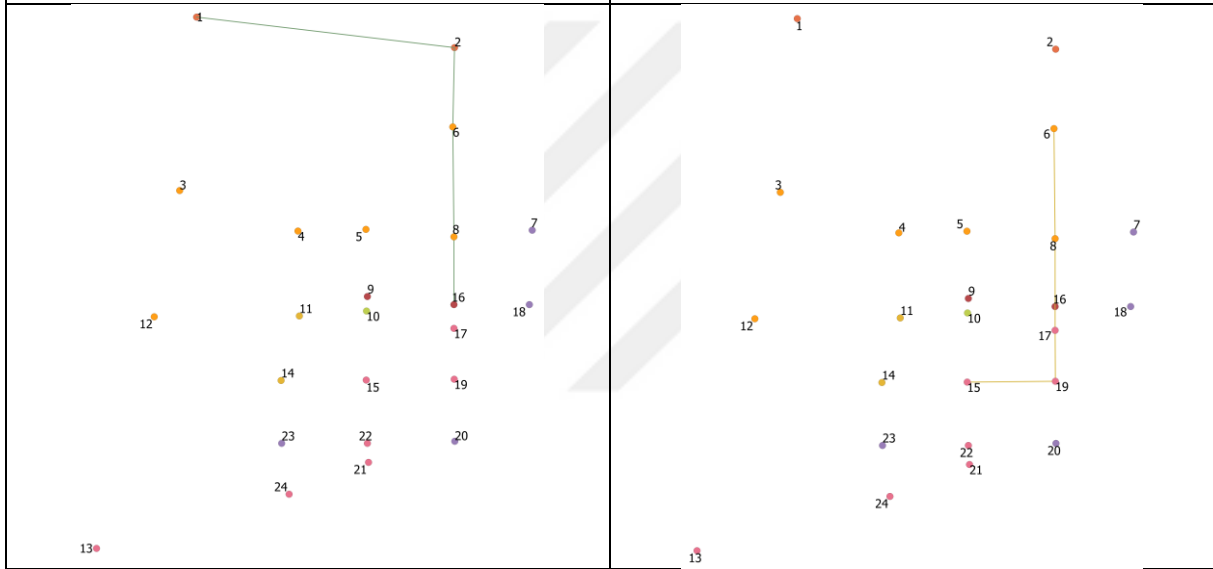
Rota 22

Rota 23



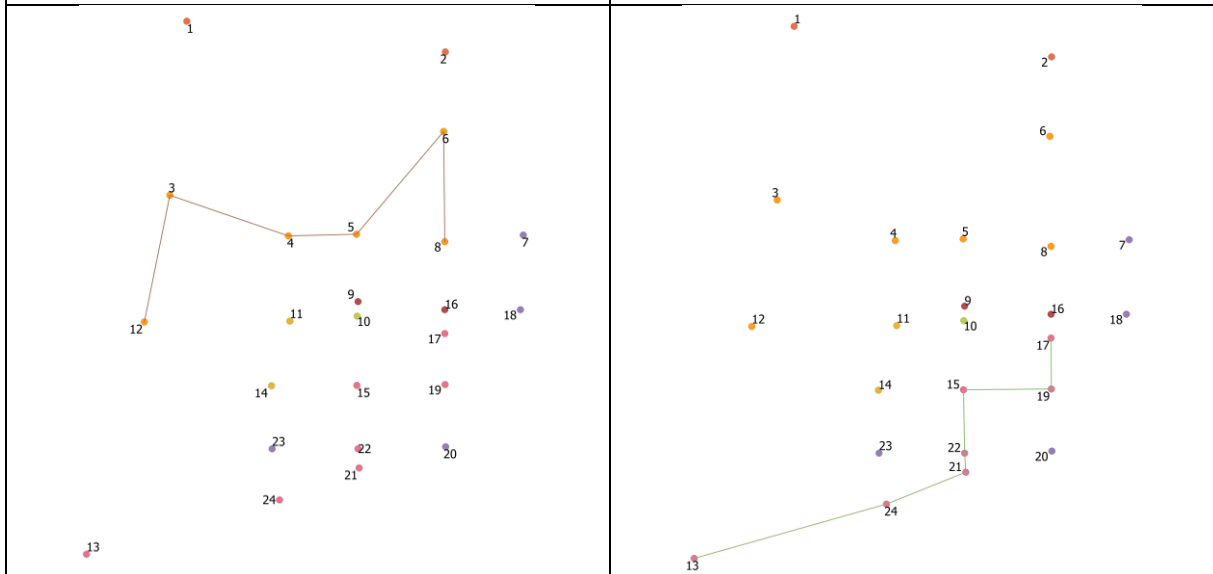
Rota 24

Rota 25



Rota 26

Rota 27



Rota 28

Rota 29

#### Ek-4: MUAP Tabloları

Ek-4 Tablo 1: Yolculuk Amacına Göre Yolculuk Oranları (MUAP-ALTAŞ)

	N	Sütun %
HBW (Ev Bazlı İş Yolculukları)	292.749	21,4
HBS (Ev Bazlı Okul Yolculukları)	455.900	33,4
HBO (Ev Bazlı Diğer Yolculuklar)	508.226	37,2
NHB (Ev Bazlı olmayan)	108.755	8,0
Toplam	1.365.630	100,0

Ek-4 Tablo 2: Yolculuk Amacına Göre Toplam Hareketlilik Oranları (MUAP-ALTAŞ)

	Brüt Hareketlilik Oranı	Net Hareketlilik Oranı
Ev Bazlı İş	0,38	1,90
Ev Bazlı Okul	0,59	2,14
Ev Bazlı Diğer	0,66	2,04
Ev Bazlı Olmayan	0,14	1,39
Toplam Yolculuklar	1,77	2,45

Ek-4 Tablo 3: Araç Hareketlilik Oranları (MUAP-ALTAŞ)

	Brüt Hareketlilik Oranı	Net Hareketlilik Oranı
Ev Bazlı İş	0,24	1,86
Ev Bazlı Okul	0,21	1,91
Ev Bazlı Diğer	0,27	1,79
Ev Bazlı Olmayan	0,07	1,31
Toplam Yolculuklar	0,79	2,15

Ek-4 Tablo 4: Yolculuk Amacına Göre Brüt-Net Yolculuk İstatistikleri (MUAP-ALTAŞ)

	Yolculuk Yapan Kişi	Toplam Yolculuk	BRÜT			NET		
			Yolculuk Oranı	Std. Hata	Std. Sapma	Yolculuk Oranı	Std. Hata	Std. Sapma
Ev Bazlı İş	139.464	265.511	0,38	0,0010	0,7966	1,90	0,0014	0,5302
Ev Bazlı Okul	193.470	414.104	0,59	0,0012	1,0235	2,14	0,0016	0,6879
Ev Bazlı Diğer	226.575	463.034	0,66	0,0013	1,0649	2,04	0,0017	0,8232
Ev Bazlı Olmayan	71.180	98.985	0,14	0,0006	0,4857	1,39	0,0029	0,7624
Toplam	506.800	1.241.633	1,77	0,0017	1,3801	2,45	0,0014	0,9875

**Ek-4 Tablo 5: Yolculuk Amacına Göre Araçlı-Araçsız Yolculuk/Nüfus Oranları (MUAP-ALTAŞ)**

Nüfus: 769.533	Araçlı		Araçsız	
	Toplam Yolculuk	Nüfus Başına Ortalama	Toplam Yolculuk	Nüfus Başına Ortalama
Ev Bazlı İş	188.446	0,24	77.093	0,10
Ev Bazlı Okul	159.521	0,21	254.582	0,33
Ev Bazlı Diğer	208.528	0,27	254.361	0,33
Ev Bazlı Olmayan	51.584	0,07	47.372	0,06
Toplam	608.080	0,79	633.409	0,82

**Ek-4 Tablo 6: Araçlı/Araçsız Yapılan Yolculukların Amaçlarına Göre Dağılımı**

	Araçsız	Araçlı	Toplam Yolculuklar
Ev Bazlı İş	12,2	31,0	21,4
Ev Bazlı Okul	40,2	26,2	33,4
Ev Bazlı Diğer	40,2	34,3	37,3
Ev Bazlı Olmayan	7,5	8,5	8,0
Toplam	100,0	100,0	100,0

**Ek-4 Tablo 7: Yolculuk Amacına Göre Araçlı-Araçsız Kişi Başına Yolculuk Sayıları (MUAP-ALTAŞ)**

	Araçlı			Araçsız		
	Toplam Yolculuk	Yolculuk Yapan Kişi	Kişi Başına Ortalama Yolculuk	Toplam Yolculuk	Yolculuk Yapan Kişi	Kişi Başına Ortalama Yolculuk
Ev Bazlı İş	188.446	101.518	1,86	77.093	40.169	1,92
Ev Bazlı Okul	159.521	83.614	1,91	254.582	113.690	2,24
Ev Bazlı Diğer	208.528	116.788	1,79	254.361	122.773	2,07
Ev Bazlı Olmayan	51.584	39.384	1,31	47.372	34.664	1,37
Toplam	608.080	282.513	2,15	633.409	269.780	2,35



**Ek-4 Tablo 8: Araç Türlerine Göre Yolculuk Süre Aralıkları (dk )**

	0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100	101-110	111-120	121 Ve
	Arası	Arası	Arası	Arası	Arası	Arası	Arası	Arası	Arası	Arası	Arası	Arası	Üzeri
	Satır	Satır	Satır	Satır	Satır	Satır	Satır	Satır	Satır	Satır	Satır	Satır	Satır
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
YAYA	52,9	29,4	14,1	1,5	0,9	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
ÖZEL ARAÇ	27,1	30,5	25,3	3,8	2,7	5,3	0,5	0,8	1,7	0,1	0,1	0,7	1,4
TAKSI	18,8	33,4	24,3	3,8	3,6	6,7	1,7	0,7	3,3	0,0	0,0	0,0	3,6
SERVİS	12,1	21,4	34,0	9,1	8,2	11,0	1,0	0,6	1,7	0,3	0,1	0,2	0,3
DOLMUŞ	4,7	19,0	28,8	9,7	9,8	15,7	2,0	2,2	4,7	0,5	0,4	1,4	0,8
MİNİBÜS	4,0	22,0	32,9	7,6	8,8	13,5	1,9	1,9	4,0	0,3	0,3	1,2	1,7
BELEDİYE OTOBÜSÜ	2,3	17,0	34,2	9,7	11,4	17,9	1,5	1,3	3,4	0,2	0,3	0,3	0,5
ÖZEL HALK OTOBÜSÜ	0,0	14,9	26,3	4,9	8,5	31,8	2,4	3,9	3,4	1,4	0,9	1,6	0,0
MOTOSİKLET	36,2	30,9	16,0	0,9	2,0	14,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
BİSİKLET	42,3	34,0	11,7	2,4	1,0	8,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
TRAMBÜS	0,2	4,2	18,2	11,8	19,4	27,1	4,3	4,1	8,1	0,2	0,8	1,1	0,6
KAMYONET	21,5	31,3	32,2	0,0	5,0	0,0	0,0	5,1	5,0	0,0	0,0	0,0	0,0
DİĞER	14,0	15,1	18,1	1,1	2,2	14,7	0,3	0,3	3,7	0,0	0,0	1,6	29,1

**Ek-4 Tablo 9: Yolculuk Türüne Göre Ortalama Seyahat Süresinin Zaman Aralıklarına Göre Dağılımı**

	HBW (Ev Bazlı İş Yolculukları)		HBS (Ev Bazlı Okul Yolculukları)		HBO (Ev Bazlı Diğer Yolculuklar)		NHB (Ev Bazlı olmayan)		Toplam	
	Sütun %	Satır %	Sütun %	Satır %	Sütun %	Satır %	Sütun %	Satır %	Sütun %	Satır %
0 - 10 ARASI	22,25	14,22	37,40	37,22	36,23	40,20	35,21	8,36	33,54	100,0
11 - 20 ARASI	24,12	19,57	28,33	35,80	25,64	36,12	28,28	8,52	26,43	100,0
21 - 30 ARASI	30,44	29,44	18,54	27,93	20,89	35,08	21,02	7,55	22,16	100,0
31 - 40 ARASI	5,49	27,08	4,27	32,79	3,69	31,60	4,66	8,53	4,35	100,0
41 - 50 ARASI	5,02	26,56	4,12	33,96	3,58	32,87	3,36	6,61	4,05	100,0
51 - 60 ARASI	9,27	32,32	5,06	27,44	5,77	34,92	4,10	5,31	6,15	100,0
61 - 70 ARASI	0,81	32,01	0,58	35,60	0,32	21,78	0,72	10,62	0,54	100,0
71 - 80 ARASI	0,62	24,91	0,46	28,64	0,50	34,88	0,78	11,58	0,54	100,0
81 - 90 ARASI	1,26	22,35	0,86	23,66	1,52	46,81	1,09	7,17	1,21	100,0
91 - 100 ARASI	0,12	27,50	0,09	32,43	0,08	32,26	0,09	7,80	0,09	100,0
101 - 110 ARASI	0,11	29,40	0,10	38,89	0,05	23,81	0,08	7,91	0,08	100,0
111 - 120 ARASI	0,24	17,93	0,14	15,85	0,47	61,24	0,18	4,98	0,29	100,0
121 VE ÜZERİ	0,24	8,90	0,06	3,60	1,25	81,51	0,43	6,00	0,57	100,0

**Ek-4 Tablo 10: Yolculuk Süre Aralığına Göre Amacına Göre Yolculuk Oranları**

		0-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70	71-80	81-90	91-100	101-110	111-120	121 Ve Üzeri
TOPLU TAŞIMA	HBW (Ev Bazlı İş Yolculukları)	2,81	16,70	37,72	8,86	8,99	17,78	1,56	1,43	2,84	0,32	0,31	0,24	0,44
	HBS (Ev Bazlı Okul Yolculukları)	2,08	12,37	25,97	10,75	15,23	21,69	2,99	2,55	4,49	0,37	0,58	0,85	0,08
	HBO (Ev Bazlı Diğer Yolculuklar)	3,38	21,12	34,34	8,81	9,87	14,02	0,91	1,09	3,61	0,21	0,13	0,83	1,68
	NHB (Ev Bazlı olmayan Yolculuklar)	4,12	27,39	33,80	11,17	7,82	8,34	2,11	2,09	2,35	0,15	0,12	0,29	0,24

**Ek-4 Tablo 11: Araç Türlerine Göre Aktarma**

	AKTARMASIZ YOLCULUKLAR		AKTARMALI YOLCULUKLAR	
	Count	Column N %	Count	Column N %
YAYA	693.278	51,98	0	0,00
ÖZEL ARAÇ	221.772	16,63	1.166	3,66
TAKSİ	5.297	,40	450	1,41
SERVİS	142.747	10,70	3.225	10,12
DOLMUŞ	26.731	2,00	3.341	10,49
MİNİBÜS	73.283	5,49	10.281	32,27
BELEDİYE OTOBÜSÜ	135.970	10,19	21.311	66,90
ÖZEL HAL OTOBÜSÜ	1.907	,14	441	1,39
MOTOSİKLET	3.379	,25	0	0,00
BİSİKLET	2.268	,17	0	0,00
TRAMBÜS	17.335	1,30	8.665	27,20
KAMYONET	657	,05	0	0,00
DİĞER	9.152	,69	1.588	4,98
Toplam	1.333.775	100,00	31.855	100,00