

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GELİŞTİRİLMİŞ AKILLI SU DAMLASI ALGORİTMASI İLE
KENTSEL TOPLU TAŞIMA AĞ TASARIM PROBLEMİNİN
ÇÖZÜMÜ**

DOKTORA TEZİ

BUKET ÇAPALI

DENİZLİ, KASIM - 2020

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**



**GELİŞTİRİLMİŞ AKILLI SU DAMLASI ALGORİTMASI İLE
KENTSEL TOPLU TAŞIMA AĞ TASARIM PROBLEMİNİN
ÇÖZÜMÜ**

DOKTORA TEZİ

BUKET ÇAPALI

DENİZLİ, KASIM - 2020

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


BUKET ÇAPALI

ÖZET

GELİŞTİRİLMİŞ AKILLI SU DAMLASI ALGORİTMASI İLE KENTSEL TOPLU TAŞIMA AĞ TASARIM PROBLEMİNİN ÇÖZÜMÜ

DOKTORA TEZİ

BUKET ÇAPALI

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

(TEZ DANIŞMANI: PROF. DR. HALİM CEYLAN)

DENİZLİ, KASIM - 2020

Bu çalışma, şehir içi toplu taşıma sistemlerinin yolculuk talebini konforlu, güvenli, dakik vb. şekilde karşılayabilmesi için güzergâh tasarımını ele almaktadır. Bu amaçla, toplu taşıma güzergâhlarının belirlenmesi ve tasarımının yapılabilmesi için Akıllı Su Damlası (ASD) çözüm algoritması ve ASD algoritması ile toplu taşıma kullanıcılarını, toplu taşıma işletmesini ve çevre faktörlerini dikkate alan güzergâh tasarımının elde edilmesini hedefleyen **Toplu Taşıma Rota Optimizasyonu (ToTaRO)** modeli geliştirilmiştir. Ayrıca, toplu taşıma planlaması sürecinde teknik metotların geliştirilmesi ve toplu taşıma ağ tasarımının karar verme aşamalarından faydalanılmış, mevcut toplu taşıma sisteminin iyileştirilmesinde, aktarma ölçütünden verimlilik göstergesi olarak yararlanılmıştır.

ToTaRO modelinin validasyonu, literatürde oldukça yaygın olarak kullanılan Mandl İsviçre toplu taşıma ağı ile gerçekleştirilmiş ve Isparta toplu taşıma ağı üzerine uygulanarak cesaret verici sonuçlar elde edilmiştir.

Sonuç olarak uygulama alanı olarak seçilen Isparta toplu taşıma ağında; yolcu, işletme ve çevre maliyetlerinin mevcut otobüs rotasına göre sırası ile yaklaşık %9 ve %6 oranında azaltılabileceği hesaplanmıştır. Ayrıca, ToTaRO modeli mevcut ağa göre yolculuk talebini, aktarmasız seyahatler için yaklaşık %17, aktarmalı seyahatler için %16 oranında iyileştirme ile karşılamıştır.

ANAHTAR KELİMELER: Kentsel ulaşım, ağ tasarımı, akıllı su damlası algoritması, yolcu ataması.

ABSTRACT

**SOLUTION OF URBAN MASS TRANSPORT NETWORK DESIGN
PROBLEM WITH IMPROVED INTELLIGENT WATER DROP
ALGORITHM
PHD THESIS
BUKET ÇAPALI
PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
CIVIL ENGINEERING**

(SUPERVISOR:PROF. DR. HALİM CEYLAN)

DENİZLİ, NOVEMBER 2020

This study deals with the route design that can meet the travel demand of urban public transport systems that makes comfortable, safe, punctual, etc. For this purpose, Intelligent Water Drop (IWD) solution algorithm has been improved to determine and design public transportation routes. With the IWD algorithm, the Public Transportation Route Optimization (ToTaRO) model has been developed, which aims to achieve a route design that takes public transport users, operations and environmental factors into account. In addition, the development of technical methods and the decision-making stages of public transport network design were utilized in the public transport planning process. Transfer criterion was used as an indicator of efficiency to the improvement of the existing public transportation system.

The validation of the ToTaRO model was carried out with the Mandl Swiss public transport network, which is widely used in the literature, and encouraging results were obtained by applying it on the Isparta public transport network.

As a result, it has been calculated that passenger, operating and environmental costs can be reduced by approximately 9% and 6% respectively, compared to the current bus route in Isparta public transport network selected as an application area. In addition, ToTaRO model meets the travel demand with an improvement of about 17% for the percentage of demand satisfied without any transfers and about 16% for the percentage of demand satisfied with one transfer compared to the current network.

KEYWORDS: Urban transit, network design, intelligent water drops algorithm, passenger assignment.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
ŞEKİL LİSTESİ	iv
TABLO LİSTESİ	v
SEMBOL LİSTESİ	vi
KISALTMALAR LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ix
1. GİRİŞ	1
1.1 Giriş.....	1
1.2 Problemin Tanımı.....	3
1.3 Çalışmanın Amacı.....	5
1.4 Tezin Kapsamı.....	5
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	7
2.1 Giriş.....	7
2.2 Toplu Taşıma Ağ Tasarımı.....	8
2.3 Sezgisel Yaklaşımlar.....	18
2.4 Rota Seçim Modeli.....	22
2.4.1 Aktarmasız seyahatlerde yolcu ataması.....	32
2.4.2 Tek aktarmalı seyahatlerde yolcu ataması.....	33
2.5 Sonuçlar.....	36
3. AKILLI SU DAMLASI ALGORİTMASI	38
3.1 Giriş.....	38
3.2 Akıllı Su Damlası Algoritması.....	38
3.3 Geliştirilmiş Akıllı Su Damlası Algoritması.....	44
3.4 Geliştirilmiş ASD Algoritmasının TTAT Problemine Uyarlanması..	47
3.5 Sonuçlar.....	51
4. PROBLEM FORMÜLASYONU VE MODEL GELİŞİMİ	52
4.1 Giriş.....	52
4.2 Toplu Taşıma Ağ Tasarımı Problem Formülasyonları.....	53
4.3 Rota Seçim Davranışının Modellenmesi.....	56
4.4 ToTaRO Modeli Mandl Toplu Taşıma Ağı Uygulaması.....	62
4.5 Sonuçlar.....	68
5. ÖRNEK UYGULAMA	70
5.1 Isparta Toplu Taşıma Ağı Uygulaması.....	70
5.1.1 ToTaRO modeli parametre seçimi.....	75
6. SONUÇ VE ÖNERİLER	82
6.1 Giriş.....	82
6.2 Sonuçlar.....	82
6.3 Öneriler.....	84
7. KAYNAKLAR	85
8. ÖZGEÇMİŞ	91

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1: Toplu taşıma rota optimizasyonu için bir metodoloji.....	13
Şekil 2.2: i ve j düğümleri arasında bir aktarım kabul edilen rotalar.....	26
Şekil 2.3: Yolcuların A'dan B'ye seyahatleri için mevcut otobüs rotaları	32
Şekil 2.4: Tek aktarma ile yolcu ataması	33
Şekil 3.1: ASD algoritmasının akış şeması	40
Şekil 3.2: Geliştirilmiş ASD çözüm algoritması akış şeması.	46
Şekil 3.3: Geliştirilmiş ASD çözüm algoritması adımları.	48
Şekil 4.1: ToTaRO modeli algoritma adımları.	60
Şekil 4.2: Mandl İsviçre toplu taşıma ağı.....	63
Şekil 4.3: ToTaRO modeli ile Mandl ağında elde edilmiş en iyi rota kümesi..	67
Şekil 5.1: Isparta ili, merkez ve ilçe nüfus dağılım grafiği.	70
Şekil 5.2: Isparta ili için belirlenen düğüm noktaları.	72
Şekil 5.3: Isparta ili toplu taşıma ağ yapısı.	74
Şekil 5.4: İki amaç için pareto analizi.	77
Şekil 5.5: ToTaRO modeli yakınsama grafiği.	77
Şekil 5.6: 27 ve 36 rota setleri için aktarmasız seyahat yüzdesi ve seyahat süresi değişimi.....	78
Şekil 5.7: Isparta ili toplu taşıma rotaları.....	80

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1: HTS bileşenlerinin kombinasyonu için fiyat tahmini.....	11
Tablo 2.2: HTS öğelerinin kombinasyonu için değerlendirme sonuçları	12
Tablo 3.1: Geliştirilmiş ASD algoritması ile karşılaştırılan algoritmalar.....	45
Tablo 4.1: Mandl ağı talep matrisi.	63
Tablo 4.2: Mandl ağının karşılaştırma sonuçları.....	65
Tablo 4.3: ToTaRO modeli ile Mandl ağı sonuçları.....	66
Tablo 4.4: Sekiz rota için üç yinelemenin sefer sıklık sonuçları.	68
Tablo 5.1: Isparta ili mahalle nüfus ve yüz ölçüm tablosu.	71
Tablo 5.2: Isparta ağı mevcut rotalar.	73
Tablo 5.3: Isparta ağı talep matrisi.....	74
Tablo 5.4: ToTaRO modeli uygulama sonuçları.....	76
Tablo 5.5: 30 rota için sefer sıklığı değişimi.....	79

SEMBOL LİSTESİ

- A** : Toplu taşıma ağı bağları
 a_k : Parasal ve diğer ağırlıklar, $k=1,2,3,4$
 CAP : Aracın yolcu kapasitesi
 C_{1t} : İlk aktarma cezası
 C_{2t} : İkinci aktarma cezası
 C_k : k rotasında çalışan aracın kapasitesi
 C_{wt} : Bekleme süresi ağırlığı
DPH : En kısa yol kullanılırken i 'den j 'ye toplam yolcu/saat farkı
DPH_r : Saatlik yolcu farkı
EH_r : r rotasında bir saatlik ulaşım aracındaki kullanılmayan koltuk
 FS : Filo büyüklüğü
 f_{rmax} : r rotasının maksimum sefer sıklığı
 f_r : r rotasının sefer sıklığı
 LF_r : r rotasının yük faktörü
N : Toplu taşıma ağında bulunan düğümler
 p_{AB} : A düğümünden B düğümüne yolcu sayısı
 $P_{ij,R1}$: R_1 güzergahındaki talep değeri
PH : i ve j düğümleri arasındaki bir saatlik yolculuk süresi
PH_r : r rotasında yolcunun gittiği süre
 $Q_{k,max}$: k rotasındaki maksimum yolcu hacmi
Q_r^{max} : r rotasındaki maksimum yolcu hacmi
 t_{aiss} : Araç içi seyahat süresini
 T_{iv} : Araç içi seyahat süresi
 T_k : k rotası için gidiş-dönüş seyahat süresi
 t_t : Aktarma süresi
 t_v : Araç içi seyahat süresi
 T_w : Bekleme süresi
 t_w : Bekleme süresi
 U_i : Fayda fonksiyonu
WH_r : r rotasında yolcunun bekleme süre

- WT** : i ve j düğümleri arasındaki bekleme süresi
 x_{1t} : 1. aktarma
 x_{2t} : 2. aktarma
 $t_{AB,min}$: A düğümünden B düğümüne minimum hareket süresi
 z_1, z_2 : Amaç fonksiyonu
 λ_{ij} : En kısa seyahat süresi (i ve j düğümleri arasında)
 α_{max} : En fazla (azami) kullanım katsayısı



KISALTMALAR LİSTESİ

ASD	: Akıllı Su Damlası
B-V	: Başlangıç-Variş
ÇSC	: Çoklu Sirt Çantası Problemi
d_0	: Aktarma Yapmayan Doğrudan Seyahat Eden Yolcu Yüzdesi
d_1	: Bir Aktarma Yapan Yolcu Yüzdesi
d_1	: İki Aktarma Yapan Yolcu Yüzdesi
d_{un}	: İki Fazla Aktarma Yapan Yolcu Yüzdesi
FS	: Filo Sayısı
GSP	: Gezgin Satıcının Problemi
HTS	: Hızlı Taşıma Sistemi
IWD	: Intelligent Water Drop
KKP	: Küme Kapsama Problemi
ToTaRO	: Toplu Taşıma Rota Optimizasyonu
TSS	: Toplam Seyahat Süresi
TTASSB	: Toplu Taşıma Ağ Tasarımı ve Sefer Sıklığı Belirleme
TTAT	: Toplu Taşıma Ağ Tasarımı
TTRK	: Toplu Taşıma Rota Kümesi
TTYA	: Toplu Taşıma Yolcu Ataması
YSA	: Yapay Sinir Ağları

ÖNSÖZ

Değerli hocam ve tez danışmanım Prof. Dr. Halim CEYLAN'a akademik anlamda gelişimime katkıda bulunduğu için en içten saygılarımla teşekkürlerimi sunarım.

Bu tezin oluşmasında çok büyük katkısı olan, tezin aşamalarında fikirleriyle yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen değerli hocam Prof. Dr. Hüseyin CEYLAN'a sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum.

Benden desteğini hiçbir zaman esirgemeyen aynı zamanda yüksek lisans danışmanım saygıdeğer Prof. Dr. Serdal TERZİ hocama ve bana akademik çalışma ortamı sunan, bilgi ve deneyimlerine sonsuz güvendiğim, kişiliğini örnek aldığım saygıdeğer hocam Prof. Dr. Mehmet SALTAN'a en içten saygı ve sevgilerimi sunuyorum.

Çalışma boyunca destek ve görüşlerini esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerini paylaşan saygıdeğer hocam Prof. Dr. Soner HALDENBİLEN'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez jürimde yer alarak beni onurlandıran sayın hocam Prof. Dr. Serhan TANYEL'e teşekkürlerimi sunuyorum.

Önemli vaktini bana ayıran değerli dostum Öğr. Gör. Fatma Demir'e teşekkür ediyorum.

Bu yola birlikte başladığım ilk günden itibaren akademik olarak beni yüreklendirip bana her zaman destek olan ama en önemlisi yaşadığım her anı güzelleştiren canım eşim Dr. Öğr. Üyesi Veli ÇAPALI'ya, ayrıca bugünlerimi borçlu olduğum annem ve babama, canım kardeşime ve canım oğlum Mert ÇAPALI'ya zor zamanlarımda bana güç, verdikleri, tezimi varlıkları ile taçlandıkları için tüm sevgimle teşekkürlerimi sunarım.

1. GİRİŞ

1.1 Giriş

Kentlerde nüfusun giderek artması bir dizi problemin yanı sıra ulaşım sorununu da kent yaşayanlarının karşısına çıkarmaktadır. Kent içi ulaşım sorunu ve toplu taşıma alt yapısının geliştirilmesi uzun vadeli planlama ile çözülebilecek durumdadır. Özel araçlar ve motosikletlerin, şehir içi ve banliyö bölgelerinde, günlük kullanımındaki artış özellikle gelişmekte olan ülkelerde, sürekli trafik sıkışıklığı, ölçsüz ve güvenilmez seyahat zamanı, stres, sera gazı emisyonları ve gürültü, daha fazla trafik kazası ve enerji tüketimine neden olmaktadır. Bu olumsuzlukları ortadan kaldırmak için toplu taşımaya öncelik ve ağırlık verilmesi gerek planlama da gerekse altyapının gereksinimlerinin karşılanmasında önemlidir. Ayrıca; akaryakıt, ana yatırım, alt yapı, yedek parça, insan gücü gibi savurganlıkların yanı sıra hava kirliliği, gürültü gibi olumsuz faktörler kent yaşamını olumsuz etkilemekte ve en iyi çözüm yolunun toplu taşıma sistemlerinin iyileştirilmesi ve geliştirilmesi olduğu açıkça görülmektedir.

Toplu taşıma sistemini cazip bir duruma getirebilmek için sistemin planlanmasında ve işletilmesinde etkin bir düzeye ulaşılması önemlidir. Bunun için konuya bilimsel bir şekilde eğilmek ve sistemin problemlerine çözümler üretmek için çalışmalar yapmak gerekmektedir. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerin getirdiği olanaklarla, toplu taşıma sisteminin gerek yeniden planlanıp tasarlanmasında gerekse geliştirilmesinde bir dizi karar ile problemlerin çözümü yapılabilmektedir. Bu problemler; genel hatlarıyla toplu taşıma ağ tasarımı problemi, seçeneklerin toplu taşıma kullanıcıları üzerinde oluşturacağı etkilerin tahmini ve seçeneklerin değerlendirilip en iyisinin seçilmesi olarak belirlenebilir. Orta büyüklükteki bir kent için bile büyük sayılara erişebilecek toplu taşıma seçeneklerinin oluşturulması belli ölçüde beceriyi gerektirmektedir. Bu nedenle yolculukların başlangıç ve bitiş noktaları arasında izlenecek rotaların incelenmesini içeren ağ analizi yöntemleri geliştirilmiştir.

Toplu taşıma sistemlerinin yolcu, işletme ve çevreye olan etkileri temelde üç grupta toplanabilir. Bunlar sistemin yolcuya olan etkileri, sistemin işletmeye olan etkileri ve sistemin çevreye olan etkileridir. Yolcuya olan etkiler; trafik sıkışıklığı, konfor, güvenlik, maliyet ve aktarma gibi yolcunun toplu taşıma sistemine karşı istemini belirleyecek öğelerdir. Toplu taşıma sisteminin işletmeye olan etkisi filo boyutu ve sefer sıklığı değeridir. Çevreye olan etkisi ise hava kirliliği ve gürültü olarak sıralanabilir. Toplu taşıma sisteminin planlama sürecinde bu üç temel bileşenin fayda maliyet bakımından etkinliğinin saptanması ve değerlendirilmesi gerekmektedir.

Toplu taşıma sistemlerinin çalışma düzeni ve seyahat şartlarında yapılan herhangi bir iyileştirme, sistemin daha çok yolcuyu daha iyi şartlarda taşımalarını sağlayabilmektedir. Kent içi yolcu taşıma sistemleri arasında en esnek sistem olarak görülen otobüs sistemi, bütün dünyada gerek tek başına gerekse yardımcı ve besleyici bir sistem olarak çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Otobüs sisteminin iyileştirilmesi konusunda sistemi analiz ederken, hem kullanıcı hem işletme hem de çevre yararını göz önüne almak gerekmektedir. Özellikle çevre kirliliği, gürültü, tehlike ve estetik önemli rol oynamaktadır. Ayrıca, trafik sıkışıklığı ve bunun yarattığı masraflar da göz önünde bulundurulmalıdır. Birbiriyle çok yakından ilgili, çok fazla sayıda faktör sistemin en iyi şekilde çalışmasında rol oynamaktadır.

Tüm bu faktörlerin birbirleriyle yakından ilişkisini ve bu ilişkinin kompleks niteliğini örneklerle açıklamak mümkündür. Örneğin; daha iyi bir hizmet verebilmek için otobüs sayısını arttırmak, masrafları arttıracığı için bilet fiyatlarına bu durum yansıtılabilecektir. Artan otobüs sayısı ile birlikte, otobüslerin boyutları, ağır hareketleri, zor manevra kabiliyetleri ve duraklarda durmaları göz önüne alındığında trafik sıkışıklığı daha da artacaktır. Ayrıca, trafik sıkışıklığının artması otobüslerin geçiş aralıklarını etkileyecek, araç geçişlerinde düzensizlik başlayacak ve yolcu sayısını azaltacaktır. Bu durum göstermektedir ki sistemin iyileştirilmesi basit olmayıp, ilişkili faktörlerin oldukça fazla olduğu, kapsamlı, büyük dikkat ve özen isteyen bir konudur. Problemi bir bütün olarak ele alıp çözülemeye çalışmak için çok karmaşık olan problemleri basite indirgeyerek teknik ve analizlerle matematiksel modeller oluşturmak en ideal yol olarak görülebilir.

Toplu taşıma planlamasında; minimum seyahat süresi, minimum bekleme süresi, sık sefer sayıları, mümkün olduğu kadar az aktarma ile daha fazla yolcuya konforlu bir taşıma hizmeti sunmayı amaçlayan matematiksel modeller oluşturulmuştur. Bu koşulları sağlarken yatırım ve işletme maliyetleri ile çevre faktörünün de önemli parametreler olduğu göz önünde bulundurulması gerekmektedir. Toplu taşıma ağ tasarımı ve sefer sıklığı belirlenmesi ile belirlenen ağda rota seçim davranışı modellenerek yolcu atamasının yapılması için seçilecek yöntemler ve oluşturulacak model tüm bu koşulları sağlamalıdır.

1.2 Problemin Tanımı

Kentlerdeki trafik sıkışıklığı gün geçtikçe artmakta ve kent içinde seyahat eden insanlar sorunlarla karşı karşıya gelmektedirler. Seyahatlerin özel araçlar ile yapılması, bir yandan trafik sıkışıklığına neden olmakta diğer yandan da park yeri problemi oluşturmaktadır. Bu durum, özel araç ile seyahat edenlerin hem ülke ekonomisine hem de doğaya zarar vermesine neden olmaktadır. Özel araç kullanımı yerine toplu taşıma sistemlerinin tercih edilmesi, toplu taşımanın çekici bir duruma getirilebilmesi için sistemin planlanmasını ve işletilmesini etkin bir düzeye çıkarmak gerekmektedir. Toplu taşıma sistemlerini iyileştirerek cazibesini artırmak, toplu taşıma problemlerini hafifletmek için uygulanabilir bir çözümdür.

Toplu Taşıma Ağ Tasarımı ve Sefer Sıklığı Belirleme (TTASSB) problemi kentsel bir alandaki toplu taşıma sistemini işletmek için bir dizi rota oluşturmayı ve sefer sıklığı bulmayı içermektedir. TTASSB problemi, büyük bir arama alanı ve çoklu kısıtlamalar ile sayısız uygulanabilir çözüm getiren zor bir tümleşik optimizasyon problemidir. Etkili bir çözüm için aranacak hedef, yolcuların seyahat süresini, işletmenin filo büyüklüğünü ve çevreye salınan egzoz gazı salınımını minimize etmek olmalıdır.

Toplu taşıma sistemini kullanacak olan yolcular bu sistemin en önemli öğelerinden birini oluşturmaktadır. Yolcular genel olarak rahat, konforlu, hızlı ve ucuz toplu taşıma sistemini tercih etmektedir. Sistemin iyileştirilmesinde yolcunun seyahat süresini minimize edecek çözüm önerileri sunulmalıdır. Sistemin diğer önemli

öğelerinden biri de; toplu taşıma sisteminin gerek planlanmasında gerekse işletilmesinde etken faktör olan sistemi işletenlerdir.

Toplu taşıma sisteminin işletilmesinde; doğrudan ulaşımın olmaması, uzun yolculuk süreleri, birden çok yolculuk ihtiyacı, yetersiz ve zayıf bilgi gibi engellerin ortadan kaldırılması gerekmektedir. Toplu taşıma ağ tasarımı yapılıncı ve sefer sıklığının belirlenmesi, toplu taşıma kullanıcısının seyahat talebine göre oluşturulmaktadır. Bir toplu taşıma ağını tasarlarırken iki temel durumun dikkate alınması gerekmektedir. Birincisi, her kullanıcı için toplam genel maliyet asgari düzeyde olmalıdır. Bu maliyetler; bekleme sürelerinin toplamı, araç içi seyahat süresi, ekstra zamana neden olan aktarma süreleri ve yürüme süreleri gibi faktörlere bağlıdır. Yolcuların toplu taşıma sistemlerinden beklentisi; mümkün olduğunca hızlı seyahat etmek, az beklemek ve daha az aktarma yapmaktır. İkincisi; işletme maliyetlerinin başında yer alan; gerekli filo büyüklüğü belirlenmeli ve rotaların sefer sıklıkları düzenlenerek gidiş-dönüş süreleri en aza indirilmelidir. İşletmeler daha yüksek kazanç elde etmek için maliyetleri en aza indirmek isterler. Kullanıcıların maliyetlerini azaltmak, genellikle işletme maliyetlerinde artışa ve işletme maliyetlerini azaltmak da kullanıcı maliyetlerinin artışına neden olmaktadır. Hem kullanıcı hem de işletmeciler açısından en verimli hizmet seviyeleri ve maliyet gereksinimleri için toplu taşıma ağ tasarımıncı çok iyi planlanması gereklidir.

Toplu taşıma sisteminin iyileştirilmesi; sadece bir kısmının değil, sistemin tüm bileşenlerinin ele alınıp iyileştirilmesi ile sağlanabilir. Problemi bir bütün olarak ele alıp çözümleneye çalışmak en ideal yoldur. Ancak; sistemin bir kısmında iyileştirilme yapılacak ise değişikliklerin tüm etkileri incelenip doğru matematiksel modeller kullanılarak değerlendirilmelidir. Değerlendirmeler sonucunda birçok alternatif olması halinde, niteliksel ve niceliksel özellikler göz önüne alınarak en iyi seçenek bulunmaya çalışılmalıdır. Problemin çok yönlülüğü nedeniyle, kullanıcılar ile işletme arasındaki dengeyi ve çevresel faydaları araştırmak önemlidir. Bu çalışma belirlenen eksikleri gidermek üzere yapılmıştır.

1.3 Çalışmanın Amacı

Çalışmanın temel amacı toplu taşıma güzergahlarının belirlenmesi ve tasarımının yapılabilmesi için yolcu, işletme ve çevre faktörlerini dikkate alan **Toplu Taşıma Rota Optimizasyon (ToTaRO)** algoritması geliştirmektir. ToTaRO modelinin çözümlenebilmesi için **Akıllı Su Damlası (ASD)** algoritması geliştirilerek konveks olmayan yapıdaki ulaşım ağ tasarım problemini çözmektir. Çalışmanın özel amaçları;

1. Karmaşık ve çok kısıtlı bir problem olarak bilinen kent içi toplu taşıma ulaşım ağı için bir dizi otobüs rotası ve sefer sıklığı belirleyerek, belirlenen rotalara yolcu ataması yapmak;
2. TTASSB probleminin çözümü için literatürde geliştirilen çalışmaları kapsayan detaylı bir literatür taraması yapmak;
3. ASD algoritmasının TTASSB problemlerinin çözümündeki etkinliği araştırmak;
4. Problemin çözümü için oluşturulan modele ait ağırlık parametrelerinin optimum değerleri, pareto duyarlılık analizi ile gerçekleştirmek;
5. ToTaRO çıktılarının karşılaştırılması için literatürde oldukça yaygın olarak kullanılan Mandl İsviçre toplu taşıma ağı üzerinde validasyon yapılarak gerçek bir toplu taşıma ağı üzerine uygulamak; ve
6. Geliştirilen ToTaRO modelinin performans ve etkilerini inceleyerek mevcut sistemle karşılaştırmasını yapmaktır.

1.4 Tezin Kapsamı

Çalışmanın bölümleri aşağıda belirtildiği şekilde düzenlenmiştir:

İkinci bölümde **Toplu Taşıma Ağ Tasarımı (TTAT)** ile ilgili literatürde yapılan çalışmalar, amaç fonksiyonu ve amaç fonksiyonu bileşenleri, literatürde TTAT problemi çözümünde tercih edilen sezgisel yaklaşımlar, TTAT için örnek uygulama, aktarmasız ve tek aktarmalı rota seçim modelleri ile sonuçlar başlıkları altında incelenmiştir.

Üçüncü bölümde ASD algoritmasının çözüm aşamaları detaylı olarak açıklanmıştır. ASD algoritmasının TTAT probleminin çözümüne uygun olarak geliştirilmesi ve metodun toplu taşıma ağ tasarımına uygulanması için gerekli adımlar ayrıntılarıyla verilmiştir.

Dördüncü bölümde, problemin çözüm formülasyonları verilmiş ve çözümleri ayrıntılı olarak ele alınmıştır. Modelin yaklaşımları ve geliştirilme amaçlarına bağlı olarak sınıflandırılmış ve modelin çözüm süreçleri detaylı olarak açıklanmıştır. ToTaRO modeli için rota seçim davranışlarının modellenmesi ile ilgili kabuller ve modelin Mandl ağı ile karşılaştırması verilmiştir.

Beşinci bölümde ToTaRO modelinin Isparta ili toplu taşıma ağına uygulanması ile ilgili detaylı bilgiler ve uygulama sonuçları verilmiştir. Ek olarak ToTaRO model parametrelerinin belirlenmesinde kullanılan Pareto analiz sonuçları verilmiştir. Altıncı bölümde, bu çalışmaya ait sonuçlara ve önerilere yer verilmiştir.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Giriş

Kentlerde, giderek artan nüfus ile birlikte yolculuk talep artışını karşılamaya çalışan toplu taşıma sistemi temel sorun olarak kent yaşayanlarının karşısına çıkmaktadır. Yerleşim alanlarının genişlemesi ve kentsel hareketliliğin artması ile birlikte ulaşım sorunu katlanarak büyümektedir. Arazi kullanım türü (yerleşim, sanayi, tarım, ticaret, turizm, maden, vb.) nüfus yoğunluğu, sosyo-ekonomik yapı, vb. toplumsal parametreler trafik doğurganlığını ve/veya çekimini yaratarak trafiğin dinamik bir yapıya sahip olmasına neden olmaktadır. Hızlı kentleşen ve nüfusun yarısından fazlasının şehirlerde yaşadığı ülkemizde, kentleşmenin getirdiği sorunlar da büyümektedir. Kent içi ulaşımında, kentleşme hareketleri ve erişilebilirliğin artması ile birlikte özel araçların kent içinde kullanımı geniş ölçüde artmıştır.

Özel taşıt kullanımından kaynaklanan; akaryakıt kullanımının artması, hava kirliliği, gürültü gibi olumsuz faktörleri de beraberinde getirerek kent yaşamını etkilemektedir. Toplu taşıma bu sorunların en önemli çözüm yollarından birisidir. Kent planlamasında; toplu taşıma sisteminin ön plana çıkartılması, iyileştirilmesi, performansının geliştirilmesi ile birlikte daha fazla insanın kısa sürede taşınması önemlidir. Toplu taşımanın iyileştirilmesi ile birlikte özel taşıt kullanıcılarının toplu taşımayı tercih etmelerinin sağlanması ülke ekonomisine önemli bir katkı sağlayacaktır.

Bu bölümde literatürde yapılan çalışmalar, TTAT ve rota seçim modelleri başlıkları altında incelenmiştir. Bu kapsamda, TTAT problemlerine ve rota seçim modellerine ilişkin formülasyonlar verilmiş ve problemlerin çözümüne ilişkin literatürde geliştirilmiş olan çözüm yaklaşımları incelenmiştir.

2.2 Toplu Taşıma Ağ Tasarımı

TTASSB problemi, kentsel toplu taşıma sistemi için rota oluşturulması ve sefer sıklığının bulunmasını içermektedir. Geniş bir arama alanı ve çok sayıda kısıtlama ile sayısız uygulanabilir çözüm sunan karmaşık bir optimizasyon problemidir. Toplu taşıma ağ tasarımı, seyahat talebine ve seyahat süresine göre belirlenmektedir. Toplu taşıma ağının değerlendirilmesi toplu taşıma ağı planlama sürecinin ilk adımıdır (Fan ve diğ. 2010). TTASSB probleminin çözümünde kullanıcılar için mevcut talebi karşılayan her Başlangıç-Varış (B-V) çifti için en hızlı seyahat süresini, mümkün olan en düşük ortalama bekleme süresini ve seyahatleri tamamlamak için gerekli olan en az aktarma sayısını veya doğrudan seyahatleri maksimize etmek gerekmektedir. İşletmeler içinse, ağda en az otobüsü çalıştırmak ve toplam otobüs/km oranını minimize etmek gerekmektedir.

Ulaşım rotalarının yeniden yapılandırılması ile ilgili problem çözümünde iki ana yaklaşım bulunmaktadır. Birincisi rota seviyesinde, ikincisi ise ağ seviyesindedir. İlk yaklaşımda Pratt ve Evans (2004) TCRP 95 Raporunda yeniden yapılandırmanın; seyahat modellerine uyum sağlamak için; aktarmaların ortadan kaldırılması veya hafifletilmesi, rota tamamlama süresinin azaltılması veya farklı şekilde rota yapılandırılmasının, rotaları sadeleştirdiğini önermişlerdir. Ağ tasarım planlama faaliyetlerinde iki kategori bulunmaktadır. İlk kategoride her bir rota talebe dayalı olarak; sefer sıklıkları, zaman çizelgeleri ve gerekli filo büyüklüklerinden oluşmaktadır. İkinci kategori ise işletme ile yolcu arasındaki etkileşime dayalı olarak hizmetten etkilenen yolcu için en uygun rota seçiminden oluşmaktadır. Bunun sonucunda; işletme hizmetini ve yolcu rota seçimini dikkate alan bir çözüm elde etmişlerdir.

Toplu taşıma planlama süreci çok karmaşık olduğu için beş ana aşamada çözümlenmektedir. Bunlar; ağ tasarımı, sefer sıklığı belirleme, zaman çizelgesi geliştirme, otobüs planlaması ve sürücü çizelgelemedir. Toplu taşıma ağ tasarımının yapılması ve değerlendirilmesi, toplu taşıma planlama sürecinin ilk basamağıdır (Ceder ve Wilson 1986).

Bu ilk basamakta, planlama sürecinin çözümü için literatürde yer alan toplu taşıma ağ tasarımı amaç fonksiyonları incelenmiştir. Ceder (2016) çalışmasında

ulaşım ağ tasarımı problemi iki temel amaç fonksiyonunu ele almıştır. Minimum Z_1 ve minimum Z_2 sırası ile (2.1) ve (2.2) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

$$Z_1 = \begin{aligned} & a_1 \sum_{i,j \in N} WT(i,j) + a_2 \sum_r EH_r + a_4 \sum_{i,j \in N} DPH(i,j), \\ & a_1 \sum_{i,j \in N} WT(i,j) + a_2 \sum_r EH_r + \sum_{i,j \in N} [a_3 PH(i,j) - a_4 DPH(i,j)], \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$Z_2 = FS \quad (2.2)$$

Burada $WT(i,j)$ i ve j düğümleri arasındaki bekleme süresini (iki düğüm arasındaki duraklarda yolcunun harcadığı süre olarak tanımlanır), EH_r r rotasında boş koltuk/saat (bir saatlik ulaşım aracındaki kullanılmayan koltuk/boşluk olarak tanımlanır), $PH(i,j)$ i ve j düğümleri arasındaki yolcu/saat (bir saatlik ulaşım aracındaki yolcunun gittiği süre olarak tanımlanır; iki düğüm arasında yolcunun araçta harcadığı süre hesaplanmaktadır). $DPH(i,j)$ $PH(i,j)$ en kısa yol kullanılırken i 'den j 'ye toplam yolcu/saat farkıdır.. FS Filo büyüklüğü (seçilen rota boyunca tüm seyahatleri sağlamak için gerekli ulaşım araç sayısı). a_k parasal ve diğer ağrılıklar, $k=1,2,3,4$.

Eşitlik (2.1) Z_1 amaç fonksiyonu için iki seçenek içermektedir. Bunlar minimum bekleme süresi ve maksimum fayda olarak değerlendirilebilir. Eşitlik (2.2) basitçe gerekli minimum filo büyüklüğüdür. Eşitlik (2.1) ve (2.2)'de verilen fonksiyon beş amaç fonksiyon bileşenleri verilmiştir. İlk amaç; yolcuların toplam bekleme süresini en aza indirmektir. Bu toplu taşıma kullanıcıları için önemli bir bakış açısı olup Eşitlik (2.3)'de verilmiştir (Ceder 2016).

$$Min a_1 \sum_{i,j \in N} WT(i,j) \quad (2.3)$$

Burada; a_1 bir saatlik bekleme süresinin parasal karşılığıdır. İkinci amaç daha tutarlı taşıma araçlarına izin vermek için kullanılmayan boş koltuk kapasitesini minimize etmektir. İşletmelerin istediği mevcut koltukların dolu olduğunu görmektir. Bu amaç Eşitlik (2.4)'de verilmiştir:

$$Min a_2 \sum_r EH_r \quad (2.4)$$

Burada a_2 bir saatlik ortalama parasal gelir kaynaklarının ortalama saatlik binen yolcu sayısına göre eşit olarak bölünmesidir. Amaç kullanılmayan boş koltuk kapasite değerinin toplam maliyetini minimize etmektir.

Üçüncü ve dördüncü amaçlarda aynı hedefe yönelik iki durum bulunmaktadır. Bunlar: (a) taşıma aracı seyahati ile özel araç seyahati (en kısa yol olduğu kabul edilerek) arasındaki toplam kaybı (parasal değer olarak) minimize etmektir. (b) eğer tüm yolcular en kısa yola yönelirse toplam kaybı (parasal olarak) minimize etmektir. Bu iki durum (a) ve (b) Eşitlik (2.5) ve (2.6)'da verilmiştir.

$$\text{Min } a_4 \sum_{i,j \in N} DPH(i,j) \quad (2.5)$$

$$\text{Min } \sum_{i,j \in N} [a_3 PH(i,j) - a_4 DPH(i,j)] \quad (2.6)$$

Burada a_3 bir saate eşdeğer en kısa yol (araba veya taşıma aracıyla) ile ulaşım rotası arasındaki ortalama maliyet/ücret farkı olup, a_4 araç içinde bir saatlik parasal değerdir. Eşitlik (2.6)'da eğer tüm yolcular en kısa yola yönelirse toplam parasal kayıp ifade edilmektedir. Burada; $a_3 PH$, eğer tüm yolcular en kısa yola yönelirse sadece maliyet/ücret ile ilgili olarak toplam parasal kayıptır ve $a_4 DPH$, eğer tüm yolcular en kısa yola yönelirse kurtarılan zamanın toplam parasal değeridir. Bu amaçlar yolcuların bakış açısını temsil etmektedir (Ceder 2016).

Beşinci amaç, verilen rota ve sefer sıklıkları için gerekli araç sayısını minimize etmektir. En az sayıda araçla tüm seyahatleri gerçekleştirmek işletmelerin istediği bir bakış açısidir. Bu amaç Eşitlik (2.7)'de verilmiştir.

$$\text{Min } FS \quad (2.7)$$

Eşitlik (2.3)-(2.6) ile yolcu/saat maliyeti açısından, Eşitlik (2.1) de gösterilen minimum Z_1 özetlenmiştir. Eşitlik (2.7)'de tek bir ölçüde, Eşitlik (2.2)'deki minimum Z_2 özetlenmiştir. Eşitlik (2.1)'in ilk fonksiyonu Z_1 hem duraklardaki hem de aktarmadaki toplam bekleme saatidir. r rotasında tahmin edilen bekleme süresi sefer süresinin yarısı olup Eşitlik (2.8)'de verilmiştir (Ceder 2016):

$$w_r = \frac{1}{2F_r}, \quad r \in R \quad (2.8)$$

Yin ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada Eşitlik (2.1)-(2.6)'da verilen amaç fonksiyonlarını kullanan bir uygulama sunulmuştur. Bu uygulama, bir dizi adımda Hızlı Taşıma Sistemi (HTS) otobüsleri için elverişli genel bir yapı sağlayan uygulama planlama yöntemi sunmaktadır. Sistemi geliştirmek için HTS bileşenleri aşağıda verilmiştir.

- a. Otobüs sinyal önceliği;
- b. Özel yollar;
- c. Körüklü otobüsler;
- d. Çoklu iniş ve biniş kapıları;
- e. Durdurma iyileştirmeleri;
- f. Elektronik ücret ödeme;
- g. Dakiklıktır.

HTS bileşenleri göz önüne alındığında; uygulama planlama yöntemi, sistem geliştirme için düşük maliyetli kombinasyonları kullanmıştır. HTS bileşenlerinin hesaplamalarından en uygun kombinasyon seçilmiş ve uygulama için tavsiye edilmiştir. Tablo 2.1'de, çalışmada ele alınan HTS bileşenlerinin kombinasyonu için tahmini maliyetleri verilmiştir. Çalışmada oluşturulan yedi alternatif A, B, C, D, E, F, G yukarıda sıralanan HTS bileşenleri (a,b,c,d,e,f,g) ile oluşturulmuştur (Yin ve diğ. 2005).

Tablo 2.1: HTS bileşenlerinin kombinasyonu için fiyat tahmini (Yin ve diğ. 2005).

Alternatif	HTS bileşenleri	Maliyet (M\$)
A	a,b,c,d,e,f	99.9
B	a,b,c,d,e,f,g	101.4
C	a,b,e,f	19.9
D	a,b,e,f,g	21.4
E	a,c,d,e,f	93.9
F	a,c,d,e,f,g	95.4
G	a,b,c,d	86.6

Yin ve diğ. (2005) çalışmalarında, HTS bileşenleri uygulanması için bütçe sınırı olarak 90 milyon dolar kabul etmiştir. Bütçe bu sınır değerden yüksekse bileşenler arasında bir değişiklik olmamıştır. Bu nedenle mali açıdan uygulanabilir alternatif tahminler C, D ve G olarak kabul edilmiştir. Ayrıca E alternatifi (e) bileşeni

hariç tutularak durak artışı ve finansal açıdan uygulanabilir hale getirilerek; otobüs sinyal önceliği (a), körüklü otobüsler (c), çoklu iniş ve biniş kapıları (d) ve elektronik ücret ödeme (f) içeren yeni bir H alternatifi oluşturulmuştur. Toplam maliyet 83.9 milyon dolar olarak belirlenmiştir.

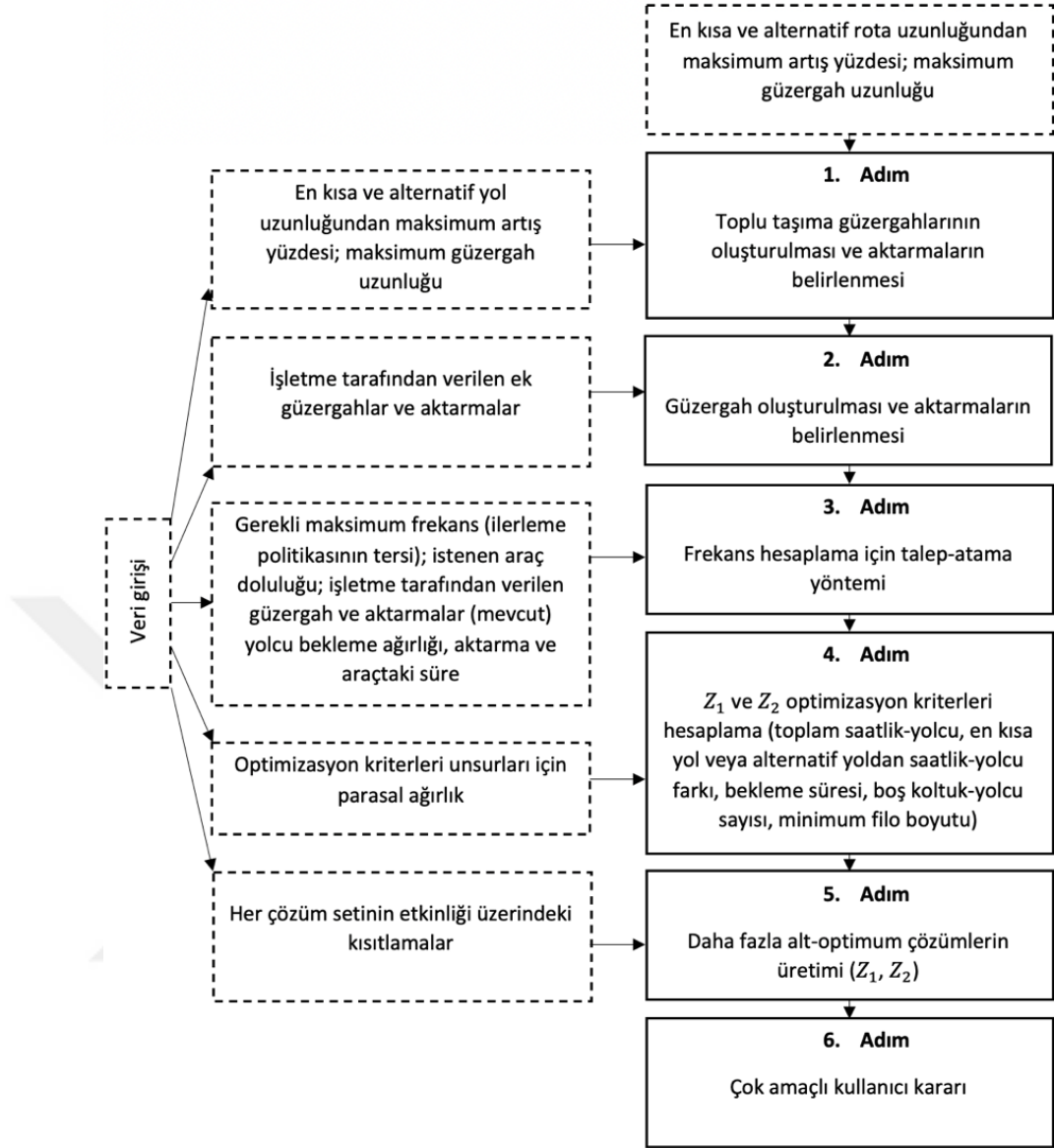
Yin ve diğ. (2005) analiz sonuçlarında Tablo 2.2’de minimum Z_1 ve minimum Z_2 eşitlikleri ile buldukları en iyi alternatifleri değerlendirmişlerdir. Tablo 2.2’de H alternatifinin G alternatifi tarafından baskın olduğu ve G ve D alternatiflerinin baskın olmadığı görülmektedir. D alternatifi sermaye maliyetine rağmen G alternatifinden daha azdır. Daha büyük filo boyutu daha yüksek işletme ve bakım maliyetlerine neden olmaktadır. Bu nedenle taşıma işletmeleri bu iki hedef arasındaki dengeyi dikkatle incelemiş ve tercihlerinde sayısal olmayan değerlendirmelerine dayanarak, önerilen iki alternatifin (G ve D) kurulması gerektiğine karar vermişlerdir.

Tablo 2.2: HTS öğelerinin kombinasyonu için değerlendirme sonuçları (Yin ve diğ, 2005).

	Yolcu seyahat süresi (yolcu/saat)	Yolcu bekleme süresi (yolcu/saat)	Saatlik boş koltuk (yolcu/saat)	Z_1	Z_2
Alternatif D	1999	94	1614	23966	138
Alternatif G	2025	139	1639	28648	84
Alternatif H	2075	139	1665	29065	86

Ceder ve Wilson (1986) çalışmalarında, yüksek sefer sıklığı değerlerinin işletme maliyetine doğrudan etki ettiğini ve toplam filoyu etkilediğini belirtmişlerdir. Diğer yandan; yolcuların aktarma için daha az bekleyeceği bir toplu taşıma sisteminin oluşturulması, sistemin daha kaliteli olmasında etkili olduğu çalışmalarında vurgulanmış ve bir model kurmuşlardır. Ceder ve Wilson (1986), kurdukları modelde aday rota kümeleri oluşturup test etmek için iki şablona odaklanmışlardır. Birinci şablon; sadece yolcunun bakış açısı, ikinci şablon ise hem yolcu hem operatör bakış açısını dikkate alırken toplam seyahat süresini en aza indirmeyi amaçlamıştır ve gerekli araç sayısı ile dengeli seyahat süresi ve bekleme süresi oluşturmuştur.

TTAT probleminin çözümünde kullanılan amaç fonksiyonları, etkili bir ulaşım ağı rota tasarımı için yapıyı kolaylaştırmaktadır. Toplu taşıma ağı, karar verme teknikleri matematiksel programlama yaklaşımı ile birleştirilerek Şekil 2.1’de adımlar verilmiştir.



Şekil 2.1: Toplu taşıma rota optimizasyonu için bir metodoloji (Ceder 2016).

Ulaşım rota tasarım adımları Şekil 2.1’de verildiği gibi altı adımdan oluşmaktadır. İlk adım bütün terminallerden mümkün olan tüm rota ve aktarmaları tüm ağ boyunca üretilmektedir. En kısa yol hesaplaması dahil olmak üzere başlangıçta, ağ, genellikle pik saatlerdeki bir zaman dilimini temsil eden ortalama seyahat süresini kapsamaktadır. Bu ölçülen ortalama seyahat süresi daha sonra her B-V arasındaki en kısa yolun hesaplanmasında girdi olarak kullanılmaktadır. Verilen rota uzunluğu sınırına göre rotalar elenmektedir. Ayrıca her bir B-V çifti için rotanın ortalama seyahat süresinin bir sınırı bulunmaktadır. Belirli bir yolcu talebi (genellikle pik saatlerde), ortalama seyahat süresi en kısa yol süresine verilen yüzdelikten fazla ise, aday rota belirlenemez. Uygulanabilir aktarmalar (doğrudan rotaları olmayan B-V

çiftleri arasında) yüksek B-V talebiyle tanımlanan B-V çiftleri arasında ek olarak kurulmuş doğrudan rotalara bağlanmaktadır. Fizibilite en kısa yol ile karşılaştırılan seyahat süresi sınırlarıyla yapılmıştır. Uygulanabilir aktarmalı rotalar bir haritalama algoritması ile oluşturulur. Sonuç olarak, düşük B-V talebi, doğrudan bir rota olmadan, bir taşıma servis hizmeti için düşünülemez.

Şekil 2.1'deki ikinci adım, minimum bir rota seti ve bağlantılı aktarmalardan oluşmaktadır. Böylece düğümler arasındaki bağlantı kurulur ve en kısa yoldan sapması en aza indirilir. Bu Küme Kapsama Problemi (KKP) uygulanabilir rotaların matrisinde minimum rota setini tahmin etmektedir. Burada her sütun, uygulanabilir bir aktarma veya rotayı temsil etmektedir. Seçilen rota için tüm B-V talebi *üçüncü adımda* belirlenmektedir. Rota seçimi, karar araştırması ile ilgili adımı içermektedir. Yani algoritma ilk gelen veya alternatif olarak, daha hızlı aracı bekleyen taşıma aracını seçen yolcular için olasılık fonksiyonunu içermektedir. Yolcuların stratejisi araç içinde ve aktarmalarda beklemlerin toplam ağırlığını minimize etmektedir. *Dördüncü adım* yolcu ve işletme perspektiflerinden optimizasyon kriterlerini temsil etmektedir. *Beşinci adım* en uygun Z_1 ve Z_2 değerlerinin araştırılması için alternatif rota setlerinin oluşturulmasından oluşmaktadır. Araştırma için bu yöntem rota setlerinde bilinen azaltılmış gradyan yöntemler gibi artan değişikliklere dayanmaktadır. Verilen minimum Z_1 değeri ile ilişkili rota setleri, en kötü katkısı olan tek rotadan Z_1 için silinir ve sonra üçüncü ve dördüncü elamanların uygulanmasını takiben KKP çözümlenmektedir. Bu süreç ancak bir önceki alternatifin tekrar etmeyeceği garanti edilerek devam edilebilir. Bu problemin üstesinden gelmek için, her yinelemede kötü aday kümesinden oluşan yeni bir matris oluşturulmuştur. Örneğin; yeni bir KKP matrisi sütunlar ve her bir satır için en uygun (Z_1, Z_2) çevresinde tanımlanmış olan bir önceki rota setini temsil etmektedir. Bu yeni KKP matrisinin çözümü; önceki alternatif çözümü tekrarlamayacak şekilde rota setlerini reddetmektedir. Bu süreçte benzersiz toplanan bir sürü rota, belirli bir talebin sadece birini yerine getirebilecekleri için 'sütunlar' olarak adlandırılmaktadır. Bu sütunlara çözümde yer almaması için yüksek maliyet değeri atanmaktadır. Bu işlem aynı zamanda (Z_1, Z_2) çözüm sayısına ve yineleme sayısına bağlıdır. *Altıncı adım* Z_1 ve Z_2 iki amaç fonksiyonunun çok amaçlı programlamasını içeren en son adımdır. Amacı beşinci adımdan türetilen, alternatif rota setlerinden en verimli (Z_1, Z_2) çözümler için alternatif çeşitliliği araştırmaktır. Bu öğede seçilen yöntem, uzlaşma kümesi yöntemi olarak adlandırılmaktadır. Uzlaşma

kümesi yöntemi sonucu, nispeten minimum değer olarak elde ettiği (Z_1, Z_2) teorik noktadadır. Çalışmada, Z_1 değeri artarken Z_2 'nin belirli bir değer arttığı veya tam tersi için azaldığı tespit edilmiştir (Ceder 2016).

Toplu taşıma ağ tasarım problemine yönelik yaklaşımlar; yolcu akımlarını simüle eden, ideal ağları ele alan ve matematiksel programlamayı temel alan yaklaşımlar olarak gruplandırılabilir. Simülasyon modelleri Dial (1967), Heathington ve diğ. (1968) ve Vandebona ve Richardson (1985) tarafından sunulmuştur. Bu modellerde önemli ölçüde veri gerekli olup optimuma yaklaşımları belirsizdir. İdeal ağ modelleri (yöntemleri) geniş bir yelpazedeki tasarım parametrelerini temel alarak, kullanıcı ve işletme çıkarlarını yansıtan bir hedef seçmektedir. Bu tür yöntemler Kocur (1984), Tsao ve Schonfeld (1984) ve Kuah ve Perl (1988) çalışmalarında görülmektedir. Bu yöntemlerde analiz için tam bir tasarımdan ziyade yaklaşık tasarım parametreleri belirlenmektedir. Bu nedenle, bu yöntemlerin gerçek durumları temsil edemediği tespit edilmiştir. Matematiksel programlama modelleri, geliştirilmiş ağ tasarım modelleri ve taşıma özel ağ modelleri olarak ayrılmıştır. Bilinen en yaygın ağ modelleri Kim ve Barnhart (1999) ayrıca bir örnek olarak, Farvolden ve Powell (1994) de sezgisel yaklaşım geliştirmişlerdir. Bu kısmi optimizasyon yaklaşımları Lampkin ve Saalman (1967), Silman ve diğ. (1974), Dubois ve diğ. (1979), Mandl (1979) ve Keudel (1988) çalışmalarında görülmektedir.

Wardman (2001), tarafından yapılan çalışmada, aktarmalı geçiş aşamalarının her birindeki zaman değeri (bekleyen, araç içi ve aktarmalar) birden fazla parametreye göre değişmektedir. Böylece, gerçek algılamayı daha iyi göstermek için bekleme süresi ve aktarma ceza değerleri, toplam bekleme süresi ve gerekli aktarmalar için bir katsayı uygulamıştır. Çalışmada ayrıca yolcuların bitiş noktasına ikiden fazla aktarma ile ulaşabildikleri zaman yalnızca taşıma sistemi kullanacakları kabul edilmiş ve daha fazla aktarmayı gerektirebilecek seyahatleri, memnuniyetsiz talep olarak kabul etmiştir. Aktarma sayısı küçültülerek, kullanıcı masrafları amaç fonksiyonuna dahil edilmiştir. İşletmeler; gerekli olan filoyu kullanarak, sadece önemli işletme maliyetlerini temsil etmekle kalmaz aynı zamanda rota uzunluklarından da etkilenmektedir.

Chakroborty (2003) çalışmasında TTASSB problemini matematiksel bir programlama formülasyonu ile modellemenin ve hesaplamının zorluğuna dikkat

çekmiştir. Newell (1979) ise çalışmasında problemin çok kısıtlı ve zor bir optimizasyon problemi olduğunu vurgulamaktadır. Buna ek olarak; çözüm için tek bir rota kalitesini değerlendirmek, tüm ağ bağlantısına bakmadan mümkün olmadığını ortaya koymuşlardır.

TTAT problemi, çok kısıtlı ve çözümlerin uygulanabilirliği ele alınması gereken önemli olduğu için Mumford (2013) ve Nayeem (2014) çalışmalarında, bu problemi şu varsayımlar altında çözmüştür:

1. Rota ağında bulunan düğümler birbirine bağlıdır; her bir düğümden, ağdaki yolları kullanarak diğer bütün düğümlere ulaşmak mümkündür. Bu tüm talebin zorunlu olarak karşılanması anlamına gelmez. Çünkü, rota seti bağlı olsa bile üç veya daha fazla aktarma gerektiren bazı B-V çiftleri olabilir.
2. Her rota, bir rotadaki geri dönüşleri ve döngüleri önlemek için tekrarlanan düğümlerden bağımsızdır.
3. Toplu taşıma taleplerinin tamamına hizmet edebilmek için tüm ulaşım ağı düğümleri en az bir rotada bulunmalıdır. Bu kısıtlama, hizmet kapsama alanını garanti etmektedir. Ancak, rota ağı tüm orijinal ulaşım ağ bağlantılarını içermeyebilir.
4. Rota ağı içindeki tek bir rota benzersiz olmalıdır. Aynı yoldaki iki rota aslında tek bir yüksek sefer sıklığına sahip rotaya cevap vermektedir.
5. Rota ağı, taşıma işletmesi tarafından önceden tanımlanmış sabit sayıda rotadan oluşmaktadır. Bulunan çözümlerin kalitesindeki rota sayısının etkisini değerlendirmek için geniş bir duyarlılık analizi yapılmıştır.
6. Her rotanın sefer sıklığı, önceden belirlenmiş bir aralık içinde yer almalıdır. Çok yüksek sefer sıklıkları, kısa mesafeler ve aralarındaki etkileşimler otobüsün kalabalıklaşmasına ve gruplaşmasına neden olmaktadır (Fattouche 2011). Diğer yandan; düşük sefer sıklığına sahip servisler, yolcuları programa bağımlı kılar, yolculuk kalkış zamanı karar verme özgürlüğünü azaltır ve bekleme sürelerini arttırmaktadır. Bir servis veya bağlantı kaçırırsa toplam seyahat süresi önemli ölçüde artmaktadır.
7. Araç yük faktörü; araçların içinde kalabalığı sınırlandırarak, yolculara hizmet kalitesi sağlamak için maksimum değerden daha az olmalıdır.

8. Rota uzunluğu, sürücü yorgunluğu ve programın sürdürülmesinin zorluğu (Zhao ve Gan 2003) gibi faktörler göz önünde bulundurulacak şekilde önceden tanımlanmış minimum ve maksimum sayıda düğüm içinde olmalıdır.
9. Belirlenen rotaları çalıştırmak, gereken toplam filo, kaynaklar ve bütçe kısıtlamaları ile başa çıkabilmek için önceden belirlenmiş bir üst limite tabi olmalıdır.

Mazloumi ve diğ. (2009) çalışmalarında, sabah zirve saatlerde toplu taşıma hizmetleri için yüksek seyahat süresi değişkenliği tanımlamıştır. B-V matrisi de dönemden döneme değişmektedir. Kentsel seyahat talepleri o kadar dinamiktir ki, sabah zirve saatlerde oluşan taşıma talepleri gün ortası taleplerinden çok farklıdır. Yine aynı şekilde gece geç saatlerde ve hafta sonları seyahat ihtiyaçları da yoğun saat taleplerinden önemli ölçüde farklılık göstermektedir.

Mazloumi ve diğ. (2009), Yapay Sinir Ağları (YSA) modeli kullanarak yaptıkları çalışmalarında, girdi değişkenlerini regresyon modellemesi yoluyla belirlenen tahmin için geliştirmişlerdir. Trafik verilerinin toplanması her zaman kolay olmadığından, iki alternatif model geliştirerek trafik tahmin sonuçlarının doğruluğunu incelemişlerdir. Tarihsel verilere dayalı modellerde, zaman çizelgesi uyumu ile birlikte günün saati, haftanın günü ve yılın ayı gibi zamansal değişkenler kullanılmıştır. Zaman çizelgesine dayalı modeller, seyahat sürelerini tahmin etmek için, planlanan seyahat sürelerini kullanmışlar ve en zayıf tahmin performansı göstermişlerdir. Trafik akışı verilerine dayalı modelin ise metodolojiden elde edilen sonuçlara göre, geçmiş verilere dayalı modele kıyasla tahmin doğruluğunda yalnızca küçük iyileştirmeler ile iyi sonuçlar sağladığı görülmüştür.

TTAT probleminin çözümlenmesinin zor ve karmaşık olması nedeniyle, çözüme en yakın olan uygun değeri verebilmesi için sezgisel yaklaşımlar tercih edilmektedir. Problemin çözümünde sezgisel algoritmaların literatürde oldukça yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. Sezgisel yaklaşımlar Bölüm 2.2.3'de ele alınmıştır.

2.3 Sezgisel Yaklaşımlar

Birçok araştırmacı, ağ tasarımı probleminin hesaplamalı karmaşıklığını geliştirmek için sezgisel ve meta-sezgisel algoritmalar geliştirerek çözmeye çalışmışlardır. Meta-sezgisel algoritmalar, katı kombinasyonel optimizasyon problemlerini çözmek için uzun yıllardır kullanılmaya başlanmıştır (Holland 1975; Kirkpatrick 1983; Goldberg 1989; Mladenovic' 1997).

Genel olarak, optimizasyon problemleri iki tipte sınıflandırılır. Bunlar: deterministik ve stokastik yöntemlerdir. Deterministik yöntemler, farklı işlemler için aynı çözümü sunmaktadırlar. Öte yandan, stokastik yöntemler bazı rastgelelikler göstermekte ve farklı çalışmalarda farklı çözümler üretmektedir. Deterministik yöntemler, doğrusal programlama, dal ve sınır gibi çeşitli yaklaşımları ve en iyi ilk arama gibi bazı yerel arama yöntemlerini içermektedir. Bu yöntemlerin sınırlandırılması, aramanın yerel bir optimum olarak elde edilmesidir. Stokastik yöntemler ise, aynı zamanda arama alanının birkaç bölgesini de keşfetmekte, yerel optimumdan kaçabilmekte ve küresel maksimum veya minimum noktaya ulaşabilmektedir (Basem 2014).

Bir toplu taşıma sisteminin genel planlamasındaki ana unsur, bir dizi rotanın tanımlandığı ağ tasarımıdır. TTAT problemini modellemek için çeşitli formülasyonlar önerilmiştir. TTAT problemi; kullanıcıların ve işletmecilerin maliyetlerini optimize ederek bir rota seti bulmayı amaçlamaktadır (Baaj ve Mahmassani 1991). TTAT problemi, birleşimsel optimizasyon problemidir (Karp 1975). Özellikle, genel ağ tasarımı problemini çözmek için etkili bir algoritma geliştirme olasılığı çok düşüktür (Magnanti 1984).

Beirão ve Cabral (2007) çalışmalarında uzun yolculuk süresini, toplu taşıma kullanımında bir engel olarak tanımlamaktadırlar. Çalışmada; Her B-V çifti için sıfır olmayan seyahat talebi; ideal en kısa yoldan ve aktarmasız olarak, seyahat süresine karşılık gelen, yolculuk süresi en hızlı yolu veri tabanına bir otobüs rotası olarak eklemektedirler. Sapma faktörü, B-V çiftleriyle bağlantılı olan rota seçimi için farklılık göstermektedir. Bununla birlikte; bu faktörü, en kısa doğrudan seyahat süresinin yüzdesi olarak ifade ederek ideal yollardan büyük sapmalara sahip rotaları önlemek için mümkün olduğunca düşük olması gerektiğini savunmaktadırlar.

Genetik algoritma ile yapılan çalışmalarda (Chew 2012); popülasyon sezgisel başlatılırken ağdaki her 'izole edilmiş düğüme' hizmet etmek için öncelikle rastgele rotalar seçilmektedir. Seçilen rota mutlaka bu düğüme başlamalı veya bitmelidir. İkinci adımda, eklenen rotalar tarafından kapsanan tüm düğümler belirlenmektedir. Bir B-V çifti bu düğümler arasından rastgele seçilmekte fakat hizmet verilmemektedir. B-V çiftlerine hizmet edenler arasından rota veri tabanından bunları birbirine bağlayan bir rota rastgele seçilmektedir. Gözlemlenmemiş düğüm çiftleri, veri tabanında rotalar birbirine bağlı değilse (örneğin çok yakın olması durumunda), tüm çiftler incelenene kadar başka bir düğüm rastgele seçilmektedir. Sonuç olarak; eğer kalan tüm gözlemlenmemiş çiftler denetlenmiş ve B-V çiftlerini birbirine bağlayan bir rota bulunamazsa, genetik algoritma ile elde edilen sonuç uygulanamaz ve dolayısıyla atılmaktadır. Bu durum oluşturulan rotaların sayısı önceden tanımlanmış rota sayılarının üzerindeyse de geçerlidir. Bu işlemler, genetik algoritmanın erken yakınsamasını önlemek için çeşitli çözümlerin üretilmesini sağlamaktadır. Popülasyon başlatma işlemi, tüm başlangıç popülasyonu yalnızca uygulanabilir çözümlerle oluşturulana kadar sürmektedir (Talbi 2009).

Storn ve Price (1997) yaptığı çalışmada popülasyona dayalı stokastik optimizasyon yöntemi olan Diferansiyel Evrim metodu kullanmışlardır. Son 10 yıl boyunca diferansiyel evrim ile ilgili araştırmalar etkileyici bir duruma ulaşmıştır. Diferansiyel evrim, küresel optimizasyon için nüfus tabanlı stokastik bir yöntemdir. Temel bir vektörün, farklı bir temel vektör kullanılarak mutasyona dayalı etkili bir çözüm için aranacak hedef nesiller boyunca değiştirilir. Çalışmalarında temel aldıkları varsayımlar aşağıda maddeler halinde özetlenmiştir:

1. Her rota minimum ve maksimum uzunluğa sahip olmalıdır. Minimum uzunluk düğümler arasındaki ağ bağlantısını sağlarken, maksimum uzunluk toplu taşıma aracının zaman çizelgesine bağlı kalmasını sağlamaktadır.
2. Sınırlı kaynaklardan dolayı toplu taşıma işletmesi tarafından önceden tanımlanmış rota kümesinde tam olarak rota sayısı olmalıdır.
3. Toplu taşıma çizelgesi bağlantılı olmalı ve rota ağını kullanan herhangi bir yolcunun iki düğüm arasında gidip gelebileceği bağlantılı bir yol olmalıdır.

4. Rota kümesindeki her bir rota tekrarlanan düğümlerden arındırılmıştır. Bu nedenle bireysel rotalarda döngü veya geri dönüşlere izin verilmemiştir.
5. Tüm düğümler tam bir rota kümesi oluşturmak için dahil edilmiştir.
6. Talep ve seyahat süresi aynı rota kümesi boyunca simetriktir.
7. Çalışma süresi boyunca talep seviyesi esnek olmayıp yolcuların rota seçimi en kısa seyahat süresine dayanmaktadır.
8. Seyahat önlemleri dikkate alınmazsa yeterli araç ve kapasite olduğu kabul edilmiştir.
9. Çalışmada tüm hesaplamalar Dijkstra algoritması ile hesaplanmaktadır.

Yukarıda verilen varsayımların yanı sıra; tam bir ağ tasarımı, yalnızca geçerli çözümlerin sağlanması ve hesaplama aşamasında talep ataması ile sefer sıklığı değerinin belirlenmesini sağlamak için önemlidir. Ağ tasarımında önerilen fizibilite için; rota ağının bağlı olup olmadığını, diğer bir deyişle tüm düğümlerin diğer tüm düğümlerden erişilebildiği kontrol edilmelidir. Bu yöntem, çizge-arama (breadth-first graph) yaklaşımıdır. Toplu taşıma ağı çözümleri, düğümleri ve bağlantıları tarafından oluşturulan alt grafiğe etki etmektedir (Storn ve Price 1997).

Dijkstra (1959) algoritmasının temelinde başlangıçta bütün düğümlere erişim olmadığı kabul edilerek boş değer atanmaktadır. Ardından başlangıç düğümünün komşusu olan bütün düğümler dolaşarak bu düğümlere ulaşım mesafesi güncellenmektedir. Bu güncelleme işleminden sonra güncellenen düğümlerin komşuları güncellenmekte olup ağ üzerinde yeni bir güncelleme olmayana kadar bu işlem tekrarlanmaktadır. Son olarak her düğümden her düğüme gidilebilen en kısa yol mesafesi elde edilmektedir.

Franciosa ve diğ. (1997) çalışmalarında; herhangi bir rotadan seçilen düğümü, araştırılacak ilk düğüm olarak seçmektedirler. İkinci olarak, her rotada bu düğümle bağlantısı olan her düğüm ziyaret edilir ve listeler oluşturulur. Bu listeler; ziyaret edilmiş düğümler listesi ve ziyaret edilmemiş düğümler listesidir. Ziyaret edilmemiş düğümler hâlâ var olmakla birlikte, bulunan düğüm sayısı araştırılacak olanlardan daha azdır. Hizmet ettiği her rotada, her bir düğümü aramak için algoritma geri döner ve araştırılacak hiçbir düğüm kalmayana kadar bu işlem devam etmektedir. Bulunan düğümlerin sayısı ağıdaki düğümlerin sayısına eşitse, çözüm kabul edilmiştir.

Her düğüm kendi rotasında benzersiz olmalı, ancak rota ağında tekrar edilmelidir. Bu kısıtlama, rota oluşturulması sürecinde karşılanmaktadır. Yalnızca benzersiz düğümlere sahip yollar, rota veri tabanına olası rotalar olarak eklenmektedir. Tüm ulaşım ağ düğümleri, toplu taşıma talebine hizmet edebilmek için en az bir rota içinde bulunmalıdır. Bu kısıtlamanın yerine getirilip getirilmediğini kontrol etmek için, rotalar tarafından sunulan her düğüm tek bir veri yapısına eklenmekte olup sonra her bir düğümün hizmet verip vermediği kontrol edilmiştir. Çözümü tanımlayan rotalar dizisi içerisinde, eşit veya simetrik rotalar ile çakışan rotalar tespit edilerek çözüm kümesinden çıkarılmaktadır. Açıklanan başlangıç popülasyon sürecinde tüm bu kontroller gerçekleştirilir ve uygulanabilir çözümler veri tabanına eklenmektedir. Uygulanamayan çözümler atılmakta ve fizibilite kontrolleri de dahil olmak üzere aynı başlatma sürecinin yerine getirilmesi için uygulanabilir bir çözüm elde edilene kadar işlem tekrarlanır (Franciosa ve diğ. 1997).

Fan ve Mumford (2010) tarafından yapılan çalışmada; tepe tırmanışı algoritması ile hedef işlevinin daha küçük bir değerine sahip olan bir rota kümesi, her zaman adımında geçerli en iyi sonuç olarak tutulmaktadır. Sonlandırıldığında, algoritmanın tüm çalışması sırasında bulunan en iyi rota kümesi ortaya çıkmaktadır.

2007 yılında, ASD algoritması adı verilen yeni, akıllı sürü tabanlı doğa temelli bir optimizasyon sezgisel bir algoritma olarak literatüre eklenmiştir. Bir nehrin yukarı ve aşağı havzası arasında optimum bir yol oluşturan, akan su damlacıklarının gözlemine dayanmaktadır. ASD algoritması su damlaları ile nehir ortamındaki değişiklikler arasındaki bazı doğal etkileşimleri simüle etmektedir. Başlangıçta, ASD algoritması Gezgin Satıcı Problemi (GSP) çözmek için kullanılmıştır (Shah-Hosseini 2006; 2007). Sonrasında Shah-Hosseini tarafından zorlu optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilmiştir (Shah-Hosseini 2009; 2012a; 2012b).

ASD algoritmasının başarısı iki önemli özellikten kaynaklanmaktadır. Birincisi; öğrenme mekanizması, bağımsız ajanların arama bilgilerini arama ortamı ve parametreleri yoluyla paylaşmasına izin vermektedir. İkincisi; sağlam öğrenme mekanizması, algoritmanın arama geçmişini öğrenmesine izin vermektedir. Bu bölümdeki metodolojinin temel amacı, belirli bir hedef talebi için taşıma ağı yoluyla en uygun maliyetli yöntemi sağlamaktır (Shah-Hosseini 2007).

TTAT probleminin karmaşık yapısından dolayı sezgisel algoritma ile çözüm yöntemi seçilmiştir. Sezgisel algoritmalar içerisinde ASD algoritması seçilmesinin iki önemli nedeni bulunmaktadır. Birincisi; ASD algoritmasının geliştirilmiş gezgin satıcı problemi çözümünde etkili olması, ikincisi ise literatürde TTAT probleminin çözümünde rastlanılmamasıdır. Bölüm 2.5’de rota seçim modeli ile ilgili literatür verilmiştir.

2.4 Rota Seçim Modeli

Çalışmanın bu aşamasında, yolcu ataması ile ilgili yapılan literatürdeki çalışmalar irdelenmektedir. TTAT problemlerinin çözümünde yolcu rota seçim davranışlarının modellenmesi geçmişte birkaç araştırmacı tarafından incelenmiştir. Araştırmacılar, TTAT probleminin kısıtlamalarına tabi olarak istenen amaca ulaşan bir dizi rotadan ve sefer sıklıklarından oluşan bir konfigürasyon belirlemeye çalışmaktadır (Lampkin and Saalmans 1967; Rea 1971; Silman ve diğ. 1974; Mandl 1979; Newel 1979; Dubois ve diğ. 1979; Hasselstrom 1981; Ceder ve Wilson 1986).

Ağ tasarım probleminin çözümünde, objektif fonksiyon bileşenlerini (matematik programlama formülasyonlarında) ve işletmeye yönelik diğer etkinlik veya hizmet kalitesi ölçümlerini değerlendirme yöntemine başvurulmaktadır. Ayrıca ağ tasarım değerlendirme yöntemlerinden bir diğeri de, yolculuk talebi matrisinin, ağ yapılandırmasını tanımlayan rota setine atanması işlemidir. Spiess ve Florian (1989) çalışmalarında belirttiği gibi, toplu taşıma rota seçim problemi geçmişte birkaç araştırmacı tarafından da ayrı bir problem (Dial 1967; Rapp ve diğ. 1976) ya da toplu taşıma ağ tasarımı (Lampkin ve Saalmans 1967; Mandl 1979; Hasselstrom 1981) veya multimodal ağ dengesi (Florian ve Spiess 1983) gibi daha karmaşık modellerin bir alt problemi olarak incelemişler ve sonuç olarak ağ tasarım değerlendirme yöntemi olarak rota seçim davranış modelleri oluşturmuşlardır.

Han ve Wilson (1982) tarafından sunulan çalışmada, rakip rotalar arasındaki seçimde birincil seçim kriteri olarak aktarmadan kaçınma ve/veya en aza indirgeme yöntemi sunulmuştur. Toplu taşıma ağ tasarımı; toplu taşıma ağlarına özgü bekleme süresini yansıtabilecek şekilde geliştirilen sefer sıklığı prosedürlerini çalışmalarında ele almışlardır. Bununla birlikte; bir toplu taşıma ağında, özellikle

çakışan rotalara sahip büyük kentsel alanlarda, rota seçimini sefer sıklığı prosedürü ile gerçekleştirmişlerdir.

Toplu taşıma ağ tasarımı belirlendikten sonra sefer sıklığının belirlenmesi, modelin bir sonra ki aşamasıdır. Bu durumda ağa dahil edilecek olan bağlantıları belirleyerek seçilen bağlantıları birleştirip tasarlanan rotaların her birinde sefer sıklığı değeri belirlenmektedir. Sadece geçerli çözümler içeren geçiş ağına rota talebi atanmalıdır. Talep ataması, bazı basitleştirilmiş kabuller gerektiren TTASSB probleminin bir alt sorgusudur. İdeal olarak, riskten kaçınan yolcu davranışı, talep ve arz belirsizliği, seyahat süresi değişkenliği ve araç işgali gibi konuların yanı sıra, Szeto ve diğ. (2011) tarafından çalışmalarında belirtildiği gibi, rota seçim yöntemleri de dikkate alınmalıdır.

Baaj ve Mahmassani (1991) ve Afandizadeh ve diğ. (2013) çalışmalarında; yolcuların rota seçimini daha iyi temsil edebilmek için, daha ileri bir yöntem önermişlerdir. Çalışmalarında; taşıma talebi olmayan her bir B-V çifti için, kullanıcının başlangıçta doğrudan bir rota alternatifi aradığı ve böylece aktarmalardan kaçınacağı kabul edilmiştir. Doğrudan bir yolun mevcut olmaması durumunda, kullanıcı daha sonra sadece tek aktarma gerektiren bir yol seçecektir. Son olarak, eğer B-V çiftini bağlayan geçerli aktarma seçeneği yoksa, bu durumda hizmet dışı olarak kabul edilmiştir. Bir B-V çiftini bağlayan çoklu doğrudan seçenekler mevcut olduğunda, her olası doğrudan rotanın, kendi sefer sıklığı ile doğru orantılı olarak seçilme şansı bulunmaktadır. Doğrudan rota bulunmadığında, tek bir aktarma seçeneği mevcutsa, tüm alternatifler hesaplanmakta ve kullanıcı hesaplanan olasılıklardan birini seçmektedir. Hesaplanan seçilme olasılıklarında fayda fonksiyonu U_i , ulaşım alternatifinin genelleştirilmiş maliyeti ile verilen çok terimli matematiksel modele dayanmaktadır. Bu nedenle; bir B-V çiftine hizmet eden en az sayıda aktarma ile doğrudan olmayan her geçiş seçeneği için, bir geçiş seçeneğinin seçilme olasılığı ve karşılık gelen fayda fonksiyonu sırasıyla Eşitlik (2.9) ve (2.10) ifadeleri ile hesaplanmaktadır.

$$P_{TaşımaSeçeneği} = \frac{e^{U_i}}{\sum_{i \in \text{seçenek}} e^{U_i}} \quad (2.9)$$

$$U_i = T_w \cdot C_{wt} + T_{iv} + x_{1t} \cdot C_{1t} + x_{2t} \cdot C_{2t} \quad (2.10)$$

Burada; $P_{TaşımaSeçeneği}$ birden fazla yolun ve aktarma noktasının/noktalarının birleşiminden oluşan belirli bir taşıma seçeneği seçme olasılığını, U_i fayda fonksiyonu, T_w bekleme süresini, C_{wt} bekleme süresi ağırlığını, T_{iv} araç içi seyahat süresini, x_{1t} 1. aktarmayı, x_{2t} 2. aktarmayı, C_{1t} ilk aktarma cezasını, C_{2t} ikinci aktarma cezasını ifade etmektedir.

Sefer sıklıklarını hesaplamak için Ceder (1987) çalışmasında nokta kontrol periyodu maksimum yük yöntemini kullanmıştır. Bu yöntemde sefer sıklıkları; otobüslerin doluluk oranının, aracın doluluk oranı bakımından, rotanın en hareketli kısmı boyunca bile aşılmaması için hesaplanmaktadır. İstenen doluluk; aracın yolcu kapasitesinin, yolcu hacmine oranını temsil eden bir yük faktörü kullanılarak modellenmiştir. Sefer sıklığı hesaplamasını sağlayan ifade, Eşitlik (2.11)'de verilmiştir.

$$f_r = \frac{Q_r^{max}}{LF_r \cdot CAP} \leq f_{rmax} \quad (2.11)$$

Burada f_r r rotasının sefer sıklığını, f_{rmax} r rotasının maksimum sefer sıklığını, Q_r^{max} r rotasındaki maksimum yolcu hacmini, LF_r r rotasının yük faktörünü ve CAP aracın yolcu kapasitesini ifade etmektedir.

Ceder (1987) hesaplamalarında, tüm rotaların sefer sıklıklarının aynı değerle başlatıldığını kabul etmiştir. İlk yinelemeden sonra maksimum yük faktörünün doluluk açısından tüm rotaların en yoğun bölümleri boyunca aşılmamasını, böylece tüm geçiş seçeneklerinin bekleme sürelerini etkilemesini ve sonuç olarak genelleştirilmiş maliyetleri değiştirmesini sağlamak için sefer sıklıklarını güncellemiştir. Diğer yinelemeler, sefer sıklıklarında önemli bir değişiklik olmadıkça uygulanmamaktadır. Çalışmasında atama prosedürünün sonunda ağ parametreleri, kullanıcı ve işletme maliyetleri hesaplanmaktadır. Ağdaki kullanıcılar tarafından deneyimlenen toplam seyahat süresi, araç içi seyahat süresi, bekleme süresi ve aktarma süresinin toplamına eşit kabul edilmiştir. Aktarmaların ilgili yüzdeleri (aktarmaya eşdeğer olduğu kabul edilen önceden belirlenmiş bir süre cezasını yansıtır) toplam talep ziyaretlerinin yanı sıra, karşılanamayan veya tek aktarmadan memnun olan talep yüzdelerini ifade etmektedir. Her bir düğümde atanamayan seyahatlerin sayısı ve her bir düğümde aktarma yapan yolcu seyahatlerinin sayısı; her rotadaki bağlantılara ve rotadaki

maksimum yük faktörüne bağlı olarak hesaplanmakta ve maksimum yük faktörü LF_{mak} olarak ifade edilmektedir. Talebi yolcu yük faktörünün altında tutmak için, her bir rotada gerekli olan otobüslerin sayısı, sefer sıklığı ve tüm ağ için gerekli olan sonuçların sayısı belirlenmektedir.

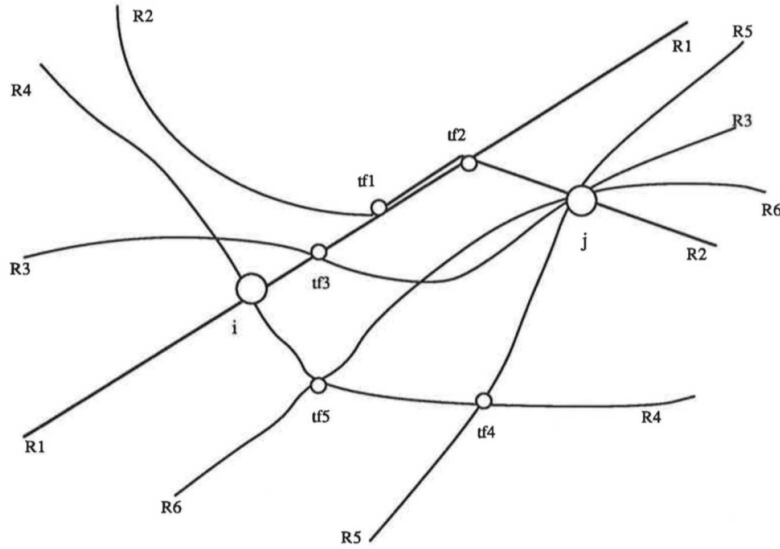
Ceder (1987) belirli bir konfigürasyona ait analiz çalışmasında; çıkış sefer sıklıklarının (yani tüm rotaların yük faktörlerini önceden belirlenmiş LF_{mak} altında tutmak için gereken sefer sıklıklar) giriş sefer sıklıklarından farklı kabul etmiş (yüzde 5'ten daha fazla farklılık gösterdiği kabul edilmiştir) ve önceki çalışmanın çıkış sefer sıklıklarının yeni giriş sefer sıklıkları olarak kullanıp işlemi tekrarlamıştır. Bu yinelemeler sonucunda ağdaki rotalara ait sefer sıklıklarını belirlemiştir.

Taylor (1989), farklı rota seçim problemlerini çözmek için Prolog'da yazılmış basit program kullanmıştır. Çalışmaları, programlama kolaylığının yanı sıra kodun özgünlüğünü vurgulamaktadır. Bu programların temelinde, küme üyeliğini test eden veya kümeye yeni bir öğe ekleyen bazı genel “yüklemeler” (Prolog meta cümleleri) bulunmaktadır. Bu tür ifadeler çözüm için gerekli koşulu tanımlar, böylece programlayıcının FORTRAN, Pascal ve C geleneksel programlama dillerinde olduğu gibi temel hesaplamalar yapmaktadır. Çalışmanın olumsuz tarafı, matematiksel hesaplamalar söz konusu olduğunda nispeten yavaş hesaplama performansı göstermesidir. Program bir tasarım prosedürüne dahil edildiğinde, uzmanların tasarım kuralları veya yol araştırması gibi, geleneksel diller tarafından en verimli ve etkili şekilde yürütülen faaliyetlerin programlanmasını öngörmektedir. Belirli bir programın yürütülmesinde çoklu dillerin bu şekilde kullanımı, yapay zekâ araçlarının ve mühendislik problemleri için etkili tasarım prosedürlerinin geliştirilmesinde standart bilimsel hesaplamaların avantajlarını birleştirmek için giderek daha çekici bir yaklaşım haline gelmektedir.

Han ve Wilson'un (1982) davranış gerçekçiliği ve akla yatkınlığı nedeniyle bir karar yapısı uygulanmıştır. Modellerinin temel özelliği, aktarma sayısının en önemli kriter olması ve diğer değerlendirmelere göre öncelikli bir öneme sahip olmasıdır. Bu nedenle, prosedür ilk önce i ve j düğümleri arasındaki herhangi bir aktarma içermeyen tüm geçiş yollarını tanımlayarak başlar. Aktarma içermeyen rota bulunamazsa, sadece bir aktarmayı içeren yollar dikkate alınacaktır. Birden fazla aktarma yolu mevcutsa, ek kriterler devreye girer. Aynı sayıda aktarımla birden fazla yol mevcut olduğunda,

kullanıcının etkili seçim kümesinin yalnızca belirli bir aralıkta ilgili seyahat sürelerine sahip olan yolları içerdiği kabul edilmiştir. Seyahatler daha sonra alternatif yollardaki göreceli hizmet sefer sıklıklarının yansıtan bir atama formülü kullanılarak bu yollara atanmaktadır.

Şekil 2.4’de Baaj ve Mahmassani (1990)’nın çalışmalarında kullandıkları i ve j düğümleri arasında kabul edilebilir rotaları gösteren toplu taşıma ağı verilmiştir. Atama işlemi her düğüm çiftini ayrı olarak dikkate almaktadır. Belirli bir düğüm çifti için (i, j) , i ve j düğümünden geçen rotalar herhangi bir toplu taşıma rotası tarafından sunulamazsa d_{ij} talebi atanamayacaktır. Bu durumda, (i, j) , d_{ij} listesi başlangıçta boş olan “memnuniyetsiz talep listesi” ’ne eklenmektedir. Boş değilse, o zaman “aktarmasız atama” prosedürüne bir çağrı yapılmıştır. Bu prosedür, talebin aktarmalar olmadan doğrudan tahsis edilip edilemeyeceğini kontrol etmektedir. Bu, yalnızca i ve j düğümlerinde “düğüm listesindeki” tüm rotaların alt kümesi olan toplu taşıma rota kümesinin kesişimi boş değilse mümkündür. Durum böyle olduğunda, kesişim kümesi, kabul edilebilir yollar arasında d_{ij} talebini dağıtan “aktarmasız seyahat” prosedürüne geçirilir.



Şekil 2.2: i ve j düğümleri arasında bir aktarım kabul edilen rotalar (Baaj ve Mahmassani 1990).

“Aktarmasız seyahat” prosedürü, araç içi seyahat süresinin minimum olduğu rotayı bulduktan sonra bir filtreleme işlemi başlatmaktadır. Araç içi seyahat süresi minimum değeri belirtilen bir eşik değerini (%50) aşan yol elenmektedir. Talep d_{ij} ,

basit bir “sefer sıklığı paylaşım” kuralı kullanılarak, filtreleme işleminden sonra kalan rotalara atama yapılmıştır. Sefer sıklığının, tüm rotaların sefer sıklıklarının toplamı oranına eşit talep miktarını taşıyan rota kabul edilmektedir. Örneğin; kabul edilebilir üç rota R_1 , R_2 ve R_3 , sefer sıklıkları sırasıyla f_1 , f_2 ve f_3 için R_1 güzergahındaki talep değerleri Eşitlik (2.12) ile hesaplanmaktadır (Baaj ve Mahmassani 1990).

$$P_{ij,R1} = \frac{f_1}{(f_1 + f_2 + f_3)} \times d_{ij} \quad (2.12)$$

Burada $P_{ij,R1}$ R_1 güzergahındaki talep değerini ifade etmektedir. Talep i ve j düğümleri arasındaki tüm bağlantılarda taşınmaktadır.

Birden fazla doğrudan rota seçeneği mevcutsa, tüm doğrudan rotaların sefer sıklıklarının toplamı dikkate alınarak hesaplanmaktadır. Tek aktarma ve iki aktarma seçenekleri için bekleme süresi, başlangıç düğümünü aktarma noktasına bağlayan olası rotaların sefer sıklıklarının toplamına oranı ile hesaplanmaktadır. Benzer şekilde; aktarma düğümündeki bekleme süresi, aktarma noktasını varış noktasına bağlayan tüm olası rotaların sefer sıklıklarının toplamına oranı ile hesaplanmaktadır. Bu tür bir talep atamasında ortalama bekleme süresi (dakika olarak) Eşitlik (2.13) ile hesaplanmaktadır (Baaj ve Mahmassani 1990).

$$W_1 = \frac{60.0}{2x(f_1 + f_2 + f_3)} \quad (2.13)$$

Burada W_1 bekleme süresini ifade etmektedir. R_2 ve R_3 'te de aynı ortalama bekleme süresine neden olmaktadır. Bu kural, eşit şekilde gelen yolcuların duraklarına ulaşan ilk otobüse bindiği kabulüne dayanmaktadır. Bekleme süresi hesaplaması, otobüs duraklarındaki stokastikliği dikkate almaz. “Aktarmasız seyahat” sürecinde, i ve j arasındaki talep doğrudan (aktarmasız) bağlanamayacak durumda ise “tek aktarmalı seyahat” prosedürü çağırılır. Sonraki kontrol yolculuğun bir aktarma ile tamamlanıp tamamlanamayacağını kontrol etmektedir. Bu kontrol, “düğüm listesi” kesişim kümesinin, bir rota numarasının her olası kombinasyonu için incelenerek gerçekleştirilir. Eğer kesişim kümesi boş değilse, R_1 ve R_2 arasındaki olası aktarma düğümlerini içermektedir. Bir aktarımı içeren her olası rota için toplam seyahat süresi elde edilmektedir. Bu nedenle, yukarıda sözü geçen ilk rota için toplam seyahat süresi Eşitlik (2.14) ile hesaplanmaktadır:

$$t_{ij} = t_{aiss, i tf_1 | R_1} + t_{aiss, tf_1 j | R_1} + [60/(2f_1)] + [60/(2f_2)] + * aktarma - ceza * \quad (2.14)$$

Burada t_{aiss} araç içi seyahat süresini, R rotayı ve f sefer sıklığı ifade etmektedir. Baaj ve Mahmassani (1990) çalışmalarında aktarma ceza süresi olarak 5 dakika almaktadır. Çalışmada ayrıca i ve j arasındaki bütün rotalar bulunup, seyahat süreleri hesaplanıp birleştirilmekte ve aktarmasız duruma benzer bir filtreleme işlemi uygulanmaktadır. Toplam seyahat süresi, bu düğüm çifti arasındaki herhangi bir rota tarafından belirtilen eşik değerden daha fazla olan (%10), i ve j arasındaki tüm rotalar elenmektedir.

Prosedür “tek aktarmalı seyahat” sonradan d_{ij} filtreleme işlemi rotalar arasında dağıtır. “Tek aktarmalı seyahat”, bireysel rotalardan ziyade rota sınıflarına uygulanması dışında, yukarıda açıklanan “sefer sıklığı paylaşım” kuralını kullanır. Prosedür “sınıflandırılmış rotalar”, i düğümünde binilebilecek sırasıyla R_1 ve R_4 rotalarına karşılık gelen C_1 ve C_4 iki rota sınıfı olduğunu göstermektedir (Şekil 2.3). C_1 sınıfı üç olası rota içermektedir. Bunlar:

1. $((R_1 i tf_3) (R_3 tf_3 j))$,
2. $((R_1 i tf_1) (R_2 tf_1 j))$ ve
3. $((R_1 i tf_2) (R_2 tf_2 j))$.

Bu üç olası rota, yolcunun tf_1 veya tf_2 'deki R_2 rotasına aktarma yapılabileceğini göstermektedir. Çünkü tf_1 ve tf_2 'nin bağlandığı bağlantı hem R_1 hem de R_2 rotalarında ortaktır. C_1 'e tahsis edilen rotadaki yolcu sayısı Eşitlik (2.15) ile hesaplanmaktadır.

$$PC_1 = \frac{f_1}{(f_1 + f_4)} \times d_{ij} \quad (2.15)$$

Bu yolcu akımının üçte biri C_1 'in üç rotanın her birine atanmaktadır. i düğümündeki ortalama bekleme süresi Eşitlik (2.16) ile hesaplanmaktadır.

$$PC_1 = \frac{60}{2 \times (f_1 + f_4)} \quad (2.16)$$

Burada R_1 ve R_4 'ün sefer sıklıkları sırasıyla f_1 ve f_4 'dür. Aktarım düğümünde ilave bekleme süresi bulunmaktadır; C_1 'in 1. rotası için bekleme süresi Eşitlik (2.17) ile hesaplanmaktadır.

$$PC_1 = \frac{60}{2 \times (f_3)} \quad (2.17)$$

2. ve 3. rotalar için Eşitlik (2.18) ile hesaplanmaktadır.

$$PC_1 = \frac{60}{2 \times (f_2)} \quad (2.18)$$

Benzer şekilde, C_4 iki farklı rota içermektedir. Bunlar:

1. $((R_4 i t f_4) (R_5 t f_4 j))$ ve
2. $((R_4 i t f_5) (R_6 t f_5 j))$.

C_4 'e tahsis edilen yolcu akımı Eşitlik (2.19) ile hesaplanmaktadır.

$$PC_4 = \frac{f_4}{(f_1 + f_4)} \times d_{ij} \quad (2.19)$$

PC_4 'ün yarısı iki rotanın her birine atanmaktadır. Tüm prosedürler uygulandıktan sonra bir rota bulunmazsa, i ve j arasındaki talep karşılanamayacaktır. Başka bir deyişle, bir yolcunun daha fazla aktarma gerektiren bir yolculuğa çıkmak için toplu taşıma araçlarına binmeyi düşünmeyeceği kabul edilmektedir.

Han ve Wilson'un (1982) çalışmalarında, ağdaki toplu taşıma seyahatleri için talep noktalarını temsil edecek şekilde “düğüm listesi” adı verilen düğümlerin bir listesini tutmuştur. Toplu taşıma için düğümler arası süreleri temsil eden “süre listesi” tanımlanmıştır. Her bir düğüm için bitişik veya komşu düğümlerin kümesi belirtilmiş ve her bir komşu düğüm arasındaki araç içi seyahat süresi dakika cinsinden belirtilmiştir. Tüm düğümler için genel liste “bağlantı listesi” olarak adlandırılmaktadır. Yolcu seyahat talebi her zaman, her bir düğümden diğerine yapılan yolculukların sayısını içeren, “talep matrisi” olarak adlandırılan bir B-V matrisi olarak belirtilir. Çalışmalarında matrisin kolaylık sağlaması için genel bir kayıp olmadan simetrik olduğu kabul edilmiştir. Bir toplu taşıma rotası, her rota için kullanıcı tarafından girilen ve böylece “rota listesi” oluşturan bir düğüm dizisi olarak temsil edilmiştir. Her bir rota ile dört özellik ilişkilendirilir. Bunlar: “düğümlerin listesi”, “sefer sıklığı”, “gidiş-dönüş zamanı” ve “bağlantıların akış listesi”’dir. İlk iki özellik ve değerleri giriş verilerinden elde edilmiştir. Sefer sıklığı her rota için kullanıcı

tarafından belirlenmektedir. Bununla birlikte, program aynı zamanda sefer sıklık belirleme yeteneğine sahiptir, bu durumda girilen değerler başlangıç değerleri olarak işlev görür. Üçüncü ve dördüncü özellikler program tarafından dahili olarak belirlenmektedir. Üçüncü özellik, yukarıda belirtilen “bağlantı listesi” ’nde yer alan bilgiler kullanılarak (rotaların gidiş-dönüş prosedürüne uygun) atanmaktadır. Dördüncü özellik, programın ana hedeflerinden birine tekabül etmekte ve atama prosedürü sonucu belirlenmektedir. Bağlantı akışı değerleri sıfırla başlatılır. Ağ ve sistem tanımlayıcılarına ek olarak, program için: “aktarma ceza süresi” (araç içi seyahat süresinin eşdeğer dakikalarında), “otobüs oturma kapasitesi” ve “maksimum yük faktörü” parametre değerleri olarak belirlenmektedir (Han ve Wilson 1982).

Filtreleme işleminden sonra, kalan rotalar, seyahat başlangıcı i olan ilk rota aynı sınıfın üyeleri gibi paylaşılacak şekilde farklı rota sınıflarına ayrılır. Talep d_{ij} daha sonra tarif edilen tek aktarma durumuna benzer bir şekilde alternatif rotalara atanmaktadır. Özetle, atama talebi, seyahatine sıfır, bir veya daha fazla aktarma ile atanıp atanamayacağını belirlemek için her bir düğüm çiftini (talep matrisinin bir elemanı) kontrol etmektedir. Talep listesini olası üç talep listesinden birine ekler: “memnuniyetsiz aktarma listesi”, “aktarmasız seyahat listesi” “tek aktarmalı seyahat listesi”. Ayrıca, bu atamanın ağ genelinde kullanıcı maliyetinin ölçülmesine katkısı da hesaplanmaktadır. Talep matrisinin tamamı atandığında, “toplam seyahat süresi” ’ni oluşturan üç bileşenin nihai değerlerinin toplamı olarak hesaplanmaktadır. Bu üç bileşen; “araç içi seyahat süresi”, “bekleme süresi”, ve “aktarma ceza süresi” ’dir. Program ayrıca; seyahatlerinden memnun olmayan, sıfır veya bir aktarma ile karşılanan toplam yolcu seyahatlerinin yüzdesini hesaplamak için yukarıdaki üç talep listesinin her birini dikkate almaktadır. Program çıktısı üç talep listesinin her birini içermektedir. Böylece seçilen bir düğüm çiftiyle ilişkili talebin nasıl verildiğini ve son listenin nasıl oluşturulduğunu belirleyebilir. “Bağlantı akımları” her bir rota ile ilişkilendirilir. Bu bilgi, belirli bir toplu taşıma rota ağı yapılandırmasının değerlendirilmesinde ilgilenilen temel hizmet kalitesi ve kullanıcı maliyetleri ölçümlerini sağlamaktadır. Diğer önlem türleri, işletme tarafından ihtiyaç duyulan kaynaklardan, öncelikle bu özel yapılandırmaya hizmet etmek için gerekli olan otobüs sayısından oluşmaktadır (Han ve Wilson 1982).

Nikolic' ve Teodorovic' (2013), çalışmalarında toplu taşıma yolcu akımını toplu taşıma ağı tasarımına bağlamışlardır. Toplu taşıma ağı tasarımı gerçekleştirilirken, oluşturulan her bir rota için yolcu talebinin belirlenmesi gerektiğini ortaya koymuşlardır. B-V çifti için, yolcuların, yolcu tarafından seçilen rotalarda aktığını tespit etmişlerdir. Bu akış, bireysel yolcu kararları olarak modellenmiştir. Her yolcu, B-V çifti arasında seyahat ederken rota seçme problemiyle karşı karşıyadır. Bu seçimde; aktarmasız ve tek aktarmalı yolculuklarda yolcu rota seçimi göz önünde bulundurulmaktadır. Yolcu rota seçim mekanizmasının iyi anlaşılması, toplu taşıma ağı tasarım prosedüründe kilit faktörlerden biridir. Ayrıca, tüm yolcuların başlangıç noktasından varış noktasına seyahat ederken bir veya en fazla iki otobüs hattı kullanabileceği kabul edilmektedir. Aksi takdirde yolcunun toplu taşıma ile seyahat etmeyeceği varsayılmaktadır.

Shih ve Mahmassani (1994) ve Shih, Mahmassani ve Baaj (1997) çalışmalarında kullandıkları yolcu atama prosedürü aşağıda verilmiştir.

Procedure Yolcu_atama()

do

for i = 1 **to** n

for j=1 **to** n

if i'den j'ye seyahat eden yolcu sayısı 0'dan büyükse

then

 i'den j'ye seyahat için en az aktarma sayısını belirleyin

if i'den j'ye aktarmasız gidilebiliyorsa **then**

 i'den j'ye tek otobüs hattı kullanan yolcuları ata.

else if aksi takdirde eğer yolcular i'den j'ye bir aktarma ile gidebiliyorsa

then

 i'den j'ye iki otobüs hattı kullanan yolcuları ata.

else

 i'den j'ye seyahatten memnuniyetsiz yolcuları ata.

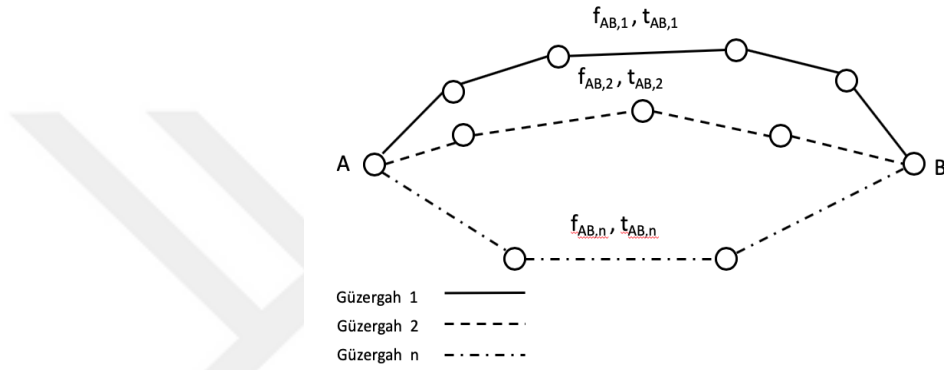
 Her satır için sefer sıklığı ve gerekli otobüs sayısını belirle.

while (sefer sıklıklar yakınsak değil)

Aktarmasız seyahatlerde yolcu atamasında “sefer sıklığı paylaşım” kuralı Bölüm 2.3.1’de, tek aktarmalı seyahatlerde Bölüm 2.3.2’de örnek ağ ile detaylı verilmiştir.

2.4.1 Aktarmasız seyahatlerde yolcu ataması

Nikolic' ve Teodorovic' (2013) çalışmalarında, Şekil 2.4'de gösterilen ağı temel almıştır. L ağıdaki tüm otobüs hatlarının kümesini ifade etmektedir. Başlangıç istasyonundan (A) varış istasyonuna (B) seyahat etmek isteyen yolcuların şekildeki otobüs hatlarını kullanabileceğini kabul etmişlerdir. Buna göre; $L_{AB} = \{l \in L | A \in l, B \in l\}$ bu otobüs hatlarının bazıları terminal olarak A ve B düğümlerine sahipken, bazıları sadece A ve B düğümlerinden geçmektedir.



Şekil 2.3: Yolcuların A'dan B'ye seyahatleri için mevcut otobüs rotaları (Nikolic' ve Teodorovic' 2013).

Sırasıyla f_l ve $t_{AB,l}$ sefer sıklığı ve $l \in L_{AB}$ otobüs hattı boyunca toplam seyahat süresi ile gösterilir. A düğümünden B düğümüne minimum hareket süresini $t_{AB,min}$ (2.20) eşitliği ile gösterilir.

$$t_{AB,min} = \min_{l \in L_{AB}} \{t_{AB,l}\} \quad (2.20)$$

Bazı otobüs hatları boyunca seyahat süresinin, A düğümü ile B düğümü arasındaki minimum seyahat süresinden çok daha yüksek olması, yolcuların böyle bir otobüs hattını, A ve B düğümleri arasında planlanan yolculuk için bir seyahat seçeneği olarak görmediği kabul edilmiştir. Başka bir deyişle, A düğümü ile B düğümü arasındaki yolculuk için yolcular tarafından dikkate alınması gereken potansiyel seyahat rota kümeleri $L_{AB,t}$ Eşitlik (2.21)'de tanımlanmıştır:

$$L_{AB,t} = \{l | l \in L_{AB}; t_{AB,l} \leq c_t t_{AB,min}\} \quad (2.21)$$

Burada; $c_t \geq 1$ araştırmacı tarafından öngörölen eşik değeridir. i . otobüs hattını kullanması beklenen yolcu sayısı $p_{AB,i}$ (2.22) eşitliği ile ifade edilmiştir:

$$p_{AB,i} = \frac{f_{AB,i}}{\sum_{l \in L_{AB,t}} f_{AB,l}} d_{AB} \quad (2.22)$$

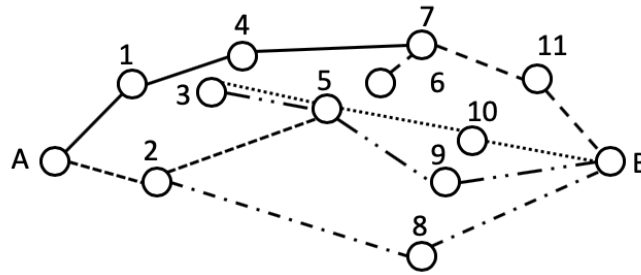
Burada: d_{AB} A istasyonundan B istasyonuna seyahat eden toplam yolcu talep sayıdır (Nikolic' ve Teodorovic' 2013).

2.4.2 Tek aktarmalı seyahatlerde yolcu ataması

Yolcular, tek aktarma ile seyahat etmeleri durumunda otobüs hatlarını başlangıç istasyonunda ve aktarma istasyonunda olmak üzere iki kez seçmek durumundadır. Yolcuların seyahat süreleri yüksek olan rotaları dikkate almadığı ve en kısa rotaları tercih ettikleri temel olarak alınmaktadır.

şekil 2.5 'te Nikolic' ve Teodorovic' (2013)'nin araştırmalarında sunduğu toplu taşım ağı göz önüne alınarak, A'dan B'ye seyahat eden yolcuların ataması için kullanılabilir rotalar verilmiştir.

Güzergah 1 : A $\xrightarrow{\text{Hat1}}$ 1 $\xrightarrow{\text{Hat4}}$ 4 $\xrightarrow{\text{Hat7}}$ 7(aktarma noktası) $\xrightarrow{\text{Hat11}}$ 11 $\xrightarrow{\text{Hat4}}$ B
 Güzergah 2 : A $\xrightarrow{\text{Hat2}}$ 2 $\xrightarrow{\text{Hat5}}$ 5(aktarma noktası) $\xrightarrow{\text{Hat10}}$ 10 $\xrightarrow{\text{Hat5}}$ B
 Güzergah 3 : A $\xrightarrow{\text{Hat2}}$ 2 $\xrightarrow{\text{Hat5}}$ 5(aktarma noktası) $\xrightarrow{\text{Hat9}}$ 9 $\xrightarrow{\text{Hat6}}$ B
 Güzergah 4 : A $\xrightarrow{\text{Hat2}}$ 2(aktarma noktası) $\xrightarrow{\text{Hat8}}$ 8 $\xrightarrow{\text{Hat3}}$ B



Otobüs hattı 1 ————— Otobüs hattı 4 - - - - -
 Otobüs hattı 2 - - - - - Otobüs hattı 5
 Otobüs hattı 3 - Otobüs hattı 6 —

şekil 2.4: Tek aktarma ile yolcu ataması (Nikolic' ve Teodorovic' 2013).

A otobüs durağından binen yolcular, 1. ve 2. otobüs hatları arasında sırasıyla Eşitlik (2.23) ve (2.24) ile atama yapılmıştır:

$$p_{AB,l_1} = \frac{f_{l_1}}{f_{l_1} + f_{l_2}} d_{AB} \quad (2.23)$$

ve

$$p_{AB,l_2} = \frac{f_{l_2}}{f_{l_1} + f_{l_2}} d_{AB} \quad (2.24)$$

1 nolu hattı kullanan yalnızca 1. güzergah olması nedeniyle, tüm yolcular (p_{AB,l_1}) bu rotaya atanmaktadır.

Diğer taraftan, 2 numaralı hattı içeren üç hat bulunmaktadır. Bu durumda, 2 numaralı hattın yolcuları (p_{AB,l_2}), bu güzergahlar arasında Eşitlik (2.25)'de görüldüğü gibi eşit olarak paylaştırılmaktadır:

$$p_{AB,l_2,p_2} = p_{AB,l_2,p_3} = p_{AB,l_2,p_4} = \frac{p_{AB,l_2}}{3} \quad (2.25)$$

Otobüs hattı 5'i, 5. istasyondan B istasyonuna seyahat etmek için kullanan yolcu sayısı, Eşitlik (2.26) ile hesaplanmaktadır:

$$p_{AB,l_2,5,l_5} = \frac{f_{l_5}}{f_{l_5} + f_{l_6}} p_{AB,l_2,5} \quad (2.26)$$

ve, otobüs hattı 6'yı, 5. istasyondan B istasyonuna seyahat etmek için kullanan yolcu sayısı, (2.27) eşitliği ile belirlenmektedir:

$$p_{AB,l_2,5,l_6} = \frac{f_{l_6}}{f_{l_5} + f_{l_6}} p_{AB,l_2,5} \quad (2.27)$$

Yolcu ataması yapıldıktan sonra, dikkate alınan herhangi bir çözümü karakterize eden temel miktarların (hizmet sıklığı, gerekli sayıda otobüs, otobüs rotası vb.) değerleri hesaplanmaktadır.

k rotası boyunca hizmet sıklığı (2.28) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$f_k = \frac{Q_{k,max}}{\alpha_{max} C_k} \quad (2.28)$$

Burada: $Q_{k,max}$, k rotasındaki maksimum yolcu hacmini; α_{max} , en fazla (azami) kullanım katsayısı; C_k , k rotasında çalışan aracın kapasitesini ifade etmektedir.

k rotasına atanacak gerekli otobüs sayısı Eşitlik (2.29)'da görüldüğü gibi hesaplanmaktadır.

$$N_{sk} = \frac{f_k T_k}{60} \quad (2.29)$$

Burada: T_k k rotası için gidiş-dönüş seyahat süresidir.

Yolcuların toplam seyahat süresi (2.30) eşitliği ile hesaplanmaktadır:

$$t_{tt} = t_v + t_w + t_t \quad (2.30)$$

Burada: t_v , araç içi seyahat süresi; t_w , bekleme süresi; t_t , aktarma süresini ifade etmektedir.

k rotasındaki otobüs yolculuk aralığı (2.31) eşitliği ile hesaplanmaktadır.

$$h = \frac{60}{f} = \frac{60}{\sum_{l \in L_{AB,t}} f_1} \quad (2.31)$$

Yolcu bekleme süresi Eşitlik (2.32) ile hesaplanmaktadır.

$$t_w = \frac{1}{2} h = \frac{60}{2 \sum_{l \in L_{AB,t}} f_1} = \frac{30}{\sum_{l \in L_{AB,t}} f_1} \quad (2.32)$$

Daha önce de belirtildiği gibi, birbirini etkileyen ve birbiriyle çelişen yolcu ve işletme hedefleri göz önüne alındığında, TTASSB karmaşık bir problemdir. Daha yüksek sefer sıklıkları, yolcuların daha fazla beklemesine neden olduğu için kullanıcı maliyetini artırır. Aynı zamanda gerekli toplam otobüs sayısının doğrudan etkilenmesi de işletme maliyetlerini de arttırmaktadır. Ayrıca, literatürde sonuçların ortaya konulmasının iyileştirilmesi için bir fırsat olduğu gözlemlenmiştir. Daha spesifik olarak, bu iki hedefle ilgili olduğu için doğrudan seyahatlerin yüzdesi ve otobüs sayısını en aza indiren en iyi çözümün elde edilmesi gerekmektedir.

“Aktarmasız seyahat”, “tek aktarmalı seyahat” prosedürlerinin farklı yolcuların rota seçim davranış mekanizmalarını modellemek için; aktarmasız seyahat süresinin %50’sine kadar, tek aktarmalı seyahat süresinin %10’una kadar kabul edilen araç içi seyahat süresinin koşulları daha iyi yansıtacak şekilde kolayca değiştirilebildiği görülmektedir. Bu çalışma kapsamında bu kabuller esas alınmıştır.

2.5 Sonuçlar

Toplu taşımanın iyileştirilmesinde en önemli parametre seyahat süresidir. Toplu taşıma aracını kullanan bir yolcu için seyahat süresi; yolcunun otobüs durağına yürüme süresi, durakta bekleme süresi ve toplu taşıma aracı içerisinde seyahatinin biteceği durağa kadar geçen sürelerin toplamıdır.

Literatür incelendiğinde, toplu taşıma ağı rotalarının belirlenmesi ve sefer sıklıklarından oluşan alternatif toplu taşıma rota ağı konfigürasyonunun analizi ve değerlendirilmesi için genellikle programlar yazılmış olduğu görülmektedir. Bu programların başlıca işlevi, B-V çiftleri arasında bilinen talepleri toplu taşıma ağına atamak ve kullanıcıların ihtiyaç duyduğu kaynağın yanı sıra, kullanıcıların sunduğu hizmet kalitesini ve maliyetini yansıtan çeşitli performans ölçütlerini hesaplamaktır. Programlar, genel olarak aşağıdakiler de dahil olmak üzere mevcut atama yaklaşımlarından farklı olarak ayrılmaktadır. Bunlar:

1. Sıralama prosedürünün temeli olan rota seçim mekanizmaları;
2. Kabul edilen atama prosedürü türüne özgü rota arama ve numaralandırmanın uygulanmasını büyük ölçüde kolaylaştıran uygulamalar; ve
3. Özellikle talep tarafında hesaplanan ve görüntülenen daha geniş performans ölçütleri ve tanımlayıcılarıdır.

Bu programlar en az iki farklı şekilde kullanılabilir:

1. Kısa mesafeli bir toplu taşıma ağ tasarımı (mevcut bir toplu taşıma ağını iyileştirmeyi amaçlayan değişiklikler ve hizmet değişiklikleri) sürecinde toplu taşıma planlayıcısı tarafından incelenebilecek belirli bir toplu taşıma ağ analizi

için bilgisayarlı bir araç olarak düzenli toplu taşıma sistem planlaması sağlayan bir araçtır.

2. Etkili duyarlılık analizi için bir araç olarak, rota yapılandırmasındaki, rota sefer sıklığı, otobüs oturma kapasitesi, aktarma cezası ve izin verilen maksimum rota yük faktörleri ile birlikte veya ayrı olarak değerlendirildiğinde, toplu taşıma ağ tanımlayıcılarının değerlendirildiği bir araçtır.

Üçüncü bölümde ASD algoritması ile ilgili temel bilgiler, TTAT problemine göre geliştirilmesi, analizler ve sonuçlara yer verilmiştir.



3. AKILLI SU DAMLASI ALGORİTMASI

3.1 Giriş

TTAT problemlerinin çözümünde, doğadan evrimsel hesaplama (Eiben ve Smith 2003), sinir ağları (Haykin 1999), karınca kolonisi optimizasyonu (Dorigo ve Stutzle 2004), arı kolonisi optimizasyonu (Sato ve Hagiwara 1997), parçacık sürüsü optimizasyonu (Eberhart ve Kennedy 1995), DNA bilgisayar (Adleman 1994) ve elektromanyetizma benzeri optimizasyon (Birbil ve Fang 2003) gibi sezgisel algoritma tekniklerinden yararlanılarak çalışmalar yapılmıştır.

Bu bölümde ASD algoritması hakkında Bölüm 3.2’de literatürdeki ASD algoritmasının genel prensipleri, 3.3’de TTAT probleminin çözümü için ASD algoritmasının geliştirilmesi, son olarak çalışmada kullanılan geliştirilmiş ASD algoritmasının TTAT problemine uyarlanması için işlem adımları verilmiştir.

3.2 Akıllı Su Damlası Algoritması

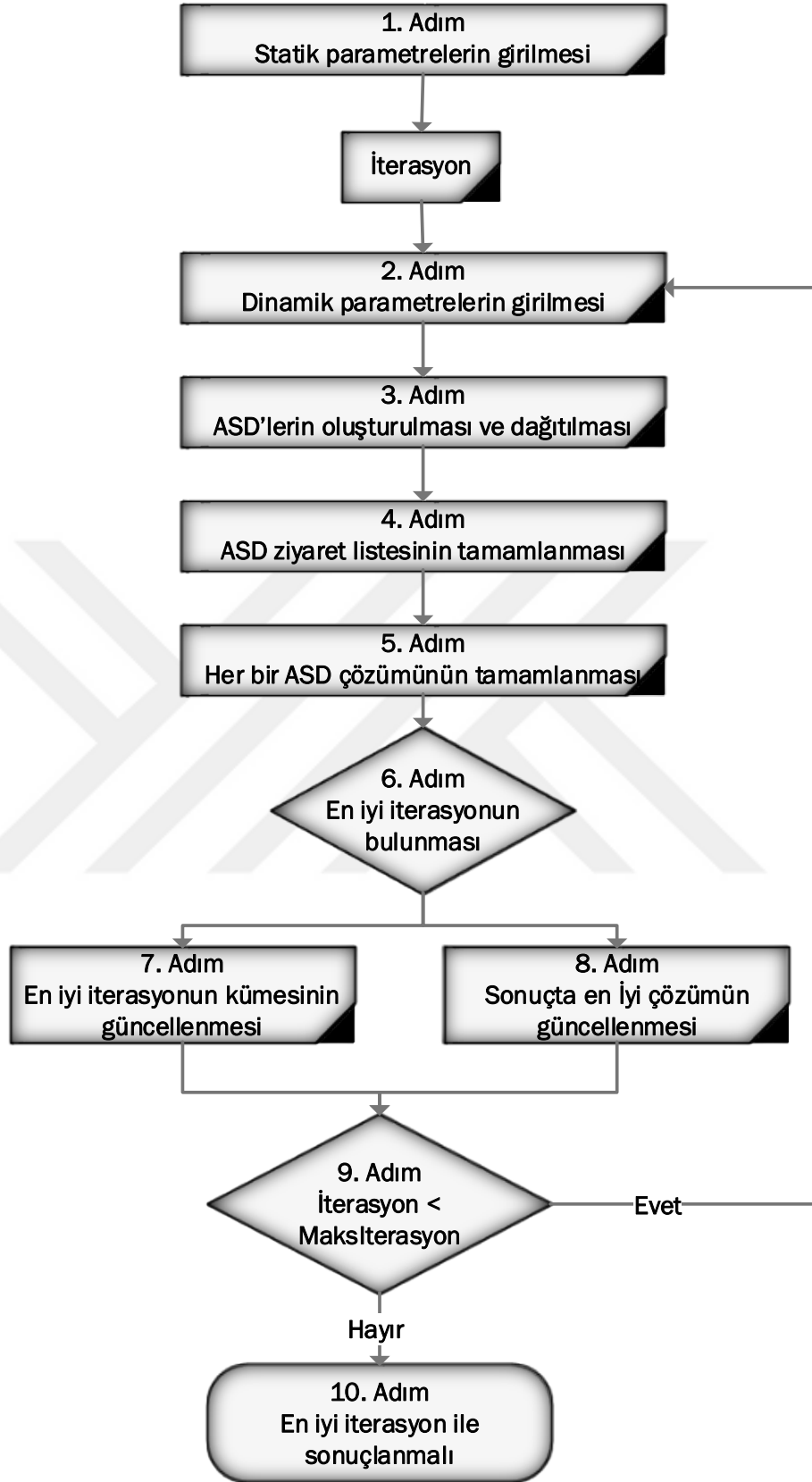
Doğaya bakıldığında nehirlerin kıvrımlarının çokluğu ve kendi yolları boyunca döndüğü görülmektedir. Bu dönmelerin neden oluştuğu ve arkasındaki mantık veya zekanın bulunması nehirlerde meydana gelen mekanizmaların nasıl kullanılacağı araştırmacıların dikkatini çekmiş ve sonuç olarak algoritma tasarlanıp geliştirilmiştir. ASD algoritması doğal bir nehrin akışı matematiksel fonksiyonların kullanımıyla modellenerek oluşturulmuş bir algoritmadır. Doğal bir nehir, hedeften kaynağa olan yollardan, çoğu zaman mümkün olan çok sayıda yol arasından en iyi yolu bularak akmaktadır. Bu akış sistematığı, optimal veya optimale yakın çözümler sunmaktadır. Sistemattteki fonksiyon; su damlaları ve nehir yatakları arasında meydana gelen eylemleri ve reaksiyonları temel almaktadır. ASD algoritması, nehirlerde akan doğal su damlaları gözlemlenerek esin kaynağı olan, geliştirilmiş gezgin satıcı yöntemine dayalı sürü tabanlı bir optimizasyon algoritmasıdır.

ASD algoritması ilk olarak 2007 yılında seyahat eden gezgin satıcı problemini çözmek için tasarlanmıştır. Seyahat eden gezgin satıcı probleminde, satıcıya bir

düğüm haritası verilmekte ve bir turu tamamlamak için tüm düğümleri yalnızca bir kez ziyaret etmesi gerekmektedir; tur uzunluğu olarak, bu harita için tüm olası turlar arasında en kısa olan tur seçilmektedir (Cerny 1985). ASD'ler hem problem çözme teknikleriyle diğer algoritmalar ile rekabet etmekte hem de iş birliği yapmakta ve daha iyi çözümlere giden yollar daha kolay erişilebilir hale gelmektedir. Başlangıçta her bir ASD olasılıklar çerçevesinde verilen problem için çözüm üretmektedir.

Shah-Hosseini (2007), çalışmasında sürü zekası algoritmalarından biri olan ASD algoritmasını önermiştir. ASD algoritması doğal nehir akışı olayının işleyişinden esinlenen bir algoritmadır. ASD algoritması, nehirlerde su damlaları arasında meydana gelen eylem ve reaksiyonlar ile nehir sistemlerinin dinamiğine dayanmaktadır. Doğal su damlaları ASD'yi geliştirmek için kullanılmakta ve ASD'ler, verilen problemin daha iyi bir çözüme ulaşması için birlikte çalışmaktadırlar. Algoritma maksimizasyon ve minimizasyon problemleri için kullanılabilir. Çözümler ASD algoritması tarafından aşamalı olarak inşa edilmiştir. Bu nedenle, ASD algoritması popülasyon tabanlı yapıcı bir optimizasyon algoritmasıdır (Shah-Hosseini 2008).

ASD algoritmasında, ASD'ler iki ana özellik ile oluşmaktadır. Bunlar, hız ve topraktır. ASD'lerin her iki özelliği ömür boyu değişebilir. ASD, bir kaynaktan hedefe doğru akar. Yolculuğuna, başlangıç hız ve toprak değeri sıfır ile başlar. Akıntı sırasında, çevrede bazı toprakları temizler ve hız kazanabilir. Bir ASD'nin ayrık adımlar halinde akması gerekmektedir (Shah-Hosseini 2009). ASD algoritması iki tip parametreye sahiptir. Bunlar: statik ve dinamik parametrelerdir. Statik parametreler, ASD algoritması sürecinde sabittir. Dinamik parametreler ise, ASD algoritmasının her yinelemesinden sonra yeniden başlatılmaktadır. Şekil 3.1' de Shah-Hosseini (2009) tarafından önerilen ASD algoritmasının akış şeması verilmiştir.



Şekil 3.1: ASD algoritmasının akış şeması (Shah-Hosseini 2009).

Adım 1: Statik parametrelerin girilmesi.

Statik parametre başlatma aşamasında statik parametre değerleri ile N_{ASD} , su damlaları sayısı ve N_c düğüm sayısı girilir.

Adım 2: Dinamik parametrelerin girilmesi.

Dinamik parametre başlatma aşamasında ise: maksimum iterasyon sayısı, ASD'lerin dinamik parametre değerleri girilir.

Adım 3: ASD'lerin oluşturulması ve dağıtılması.

ASD'ler oluşturulduktan sonra her bir ASD'nin çözümü için i düğümünden j düğümüne seçilecek sonraki düğümün olasılığı Eşitlik (3.1)-(3.3) ile hesaplanmaktadır.

$$p_i^{ASD}(j) = \frac{f(s_{-s}(i,j))}{\sum_{k \in vc(ASD)} f(s_{-s}(i,k))} \quad (3.1)$$

ve

$$f(s_{-s}(i,j)) = \frac{1}{\varepsilon_s + g(s_{-s}(i,j))} \quad (3.2)$$

ve

$$g(s_{-s}(i,j)) = \begin{cases} s_{-s}(i,j) & \text{if } \min_{l \in vc(ASD)} (s_{-s}(i,l)) \geq 0 \\ s_{-s}(i,j) - \min_{l \in vc(ASD)} (s_{-s}(i,l)) & \text{else} \end{cases} \quad (3.3)$$

$\varepsilon_s = 0.01$, $f(\cdot)$ işlevinde olası bir bölünmeyi sıfır ile önlemek için küçük pozitif bir sayıdır. $\min(\cdot)$ işlevi, bağımsız değişkeni için mevcut tüm değerler arasında minimum değeri döndürür.

Adım 4: ASD ziyaret listesinin tamamlanması.

$Vc(ASD) = \{\}$ ile ziyaret listesi ifade etmektedir. Başlangıçta her bir düğüm için boş liste ve bağlantı listesi eklenmektedir.

Adım 5: Her bir ASD çözümünün tamamlanması.

Bu adımda eşitliklerden minimum dönen değer $V_{C(ASD)}$ ASD'nin ziyaret edilen düğümler listesine eklenmektedir. i düğümünden j düğüme her ASD için Eşitlik (3.4), (3.5) ve (3.6) ile hesaplanmaktadır.

$$tp^{ASD}(t+1) = tp^{ASD}(t) + \frac{a_v}{b_v + c_v \cdot s_s(i,j)} \quad (3.4)$$

Hesaplanan s_s ve $\Delta s_s(i,j)$

$$\Delta s_s(i,j) = \frac{a_s}{b_s + c_s \cdot time(i,j; tp^{ASD})} \quad (3.5)$$

ve

$$time(i,j; tp^{ASD}) = \frac{c(i,j)}{\max(\epsilon_v, tp^{ASD})} \quad (3.6)$$

bu eşitlik i düğümlerinden j düğümlerine tp^{ASD} değerini hesaplar. Burada, c işlevi düğümler için iki boyutlu pozisyon vektörüdür.

Adım 6: En iyi iterasyonun bulunması.

Her ASD için Eşitlik (3.7) ile güncellenmektedir:

$$s_s(i,j) = (1 - \rho) \cdot s_s(i,j) - \rho \cdot \Delta s_s(i,j) \quad (3.7)$$

sonrasında adımlar tekrarlanarak rota tamamlanır. Daha sonra Tur^{ASD} denklemleri hesaplanmakta ve bu yinelemede tüm ASD turları arasında minimum değerler bulunur. Bu minimum tur uzunluğu T_M ile ifade edilmiştir. Eşitlik (3.8) ve (3.9) ile hesaplanmaktadır.

$$s_s^{ASD} = s_s^{ASD} + \Delta s_s(i,j) \quad (3.8)$$

$$s_s(i,j) = (1 - \rho) \cdot s_s(i,j) + \rho \cdot \frac{2 \cdot s_s^{ASD}}{N_c(N_c - 1)} \quad \forall (i,j) \in T_M \quad (3.9)$$

Adım 7: En iyi iterasyon kümesinin güncellenmesi.

Minimum tur T_M , şimdiye kadar bulunan en iyi tur olan T_B 'den daha kısaysa, en iyi tur Eşitlik (3.10) ile güncellenmektedir:

$$T_B = T_M \quad ve \quad Len(T_B) = Len(T_M) \quad (3.10)$$

Adım 8: En iyi çözümün güncellenmesi.

ASD algoritması sonucu elde edilen i 'inci çözümün amaç fonksiyon değeri T_i ile gösterilmektedir. O_i ile i 'inci çözümün amaç fonksiyon değerinin normalleştirilmiş değeri Eşitlik (3.11) yardımıyla yapılmaktadır.

$$O_i = \frac{T_{max} - T_i}{T_{max} - T_{min}} \quad (3.11)$$

Burada T_{max} amaç fonksiyonunun maksimum değerini, T_{min} minimum değerini ifade etmektedir.

Adım 9: Başlangıçta girilen maksimum iterasyon değerine kadar işlemin devam etmesi.

ASD'nin önceden oluşturulmuş çözüme sadık olma olasılığı Eşitlik (3.12) ile hesaplanmaktadır.

$$p_i = e^{-(O_{max}-O_i)} \quad (3.12)$$

i 'inci çözümünün ASD'ler tarafından seçilme olasılığı Eşitlik (3.13) yardımıyla bulunmaktadır:

$$p_i = \frac{O_i}{\sum_{k \in L} O_k} \quad (3.13)$$

Adım 10: Yakınsama kriterinin sağlanması.

Yakınsama koşulu karşılanmadığı sürece 1. adıma gidilmektedir. Algoritma, toplam en iyi tur T_B tutulacak ve uzunluğu $Len(T_B)$ olacak şekilde oluşturulmaktadır.

Toplu taşıma ağ tasarımı problemi, optimal çözümün bulunmasının kolay olmadığı kombinasyonel optimizasyon problem sınıfına girmektedir. TTAT probleminin doğası, konkav yapısı ve ASD algoritmasının gezgin satıcı algoritmasına benzerliği ve optimizasyon için gelişmiş bir yön bulma algoritmasına sahip olması nedeniyle bu çalışmada tercih edilmiştir. Literatür taramalarına bakıldığında daha önce toplu taşıma ağ tasarımı problemlerinin çözümde ASD algoritması ile ilgili bir çalışmaya rastlanılmamıştır.

Literatürde görüldüğü gibi ASD algoritması optimizasyon probleminin çözümünde geliştirilmeye açık bir metottur. Çalışmada geliştirilmiş ASD algoritması ToTaRO için kullanılmıştır. Kullanılan ASD algoritması literatürdeki çalışmalardan farklı olarak TTAT için oluşturulan matematiksel modelin en iyi çözüm değerini elde etmek ve önceden verilen kısıt vektörlerine bağlı iterasyon boyunca sınırlandırılmaktadır. ToTaRO için TTAT probleminin çözümünde kullanılan ASD algoritmasının adımları ve çalışma prensipleri Bölüm 3.3’de verilmiştir. TTAT için oluşturulan matematiksel model ve kısıt vektörleri ise 4. Bölümde verilmiştir.

3.3 Geliştirilmiş Akıllı Su Damlası Algoritması

Bu çalışmada; geliştirilmiş ASD algoritması metodunda, yöntemin temel farklılığı, algıtmada kullanılan girdi verilerinin toplu taşıma ağ tasarımıında etkili olan talep ve süre değeri olmasıdır. Toplu taşıma ulaşım planlamasının uygulanabilmesi için gerekli varsayımlar maddeler halinde verilmiştir.

- Her rota minimum ve maksimum uzunluğa sahip olmalı (minimum uzunluk yol ağı bağlantısını sağlarken, maksimum uzunluk otobüsün zaman çizelgesine bağlı kalmasını sağlamaktadır),
- Sınırlı kaynaklardan dolayı toplu taşıma işletmesi tarafından önceden tanımlanmış bir rota kümesinde tam olarak rota sayısı olmalı,
- Toplu taşıma çizelgesi bağlantılı olmalı bu nedenle rota ağını kullanan herhangi bir yolcunun herhangi iki düğüm arasında gidip gelebileceği iki düğümü birbirine bağlayan bir yol olmalı,
- Rota kümesindeki her bir rota, aynı rota içerisinde döngü veya geri dönüşlerin oluşmaması için, tekrarlanan düğümlerden arındırılmalı,

- Tüm düğümler, eksik düğüm olmadan tam bir rota kümesi oluşturmak için dahil edilmeli,
- Bir rotada bir düğüm birden fazla kez ziyaret edilmemeli,
- Her rota, aktarmalara daha fazla olanak sağlamak için, bir veya birden fazla düğüm ile kesişmeli,
- Talep ve seyahat süresi aynı rota kümesi boyunca simetrik kabul edilmeli,
- Çalışma süresi boyunca talep seviyesi esnek olmayıp yolcuların rota seçimleri en kısa seyahat süresine dayanmalıdır.

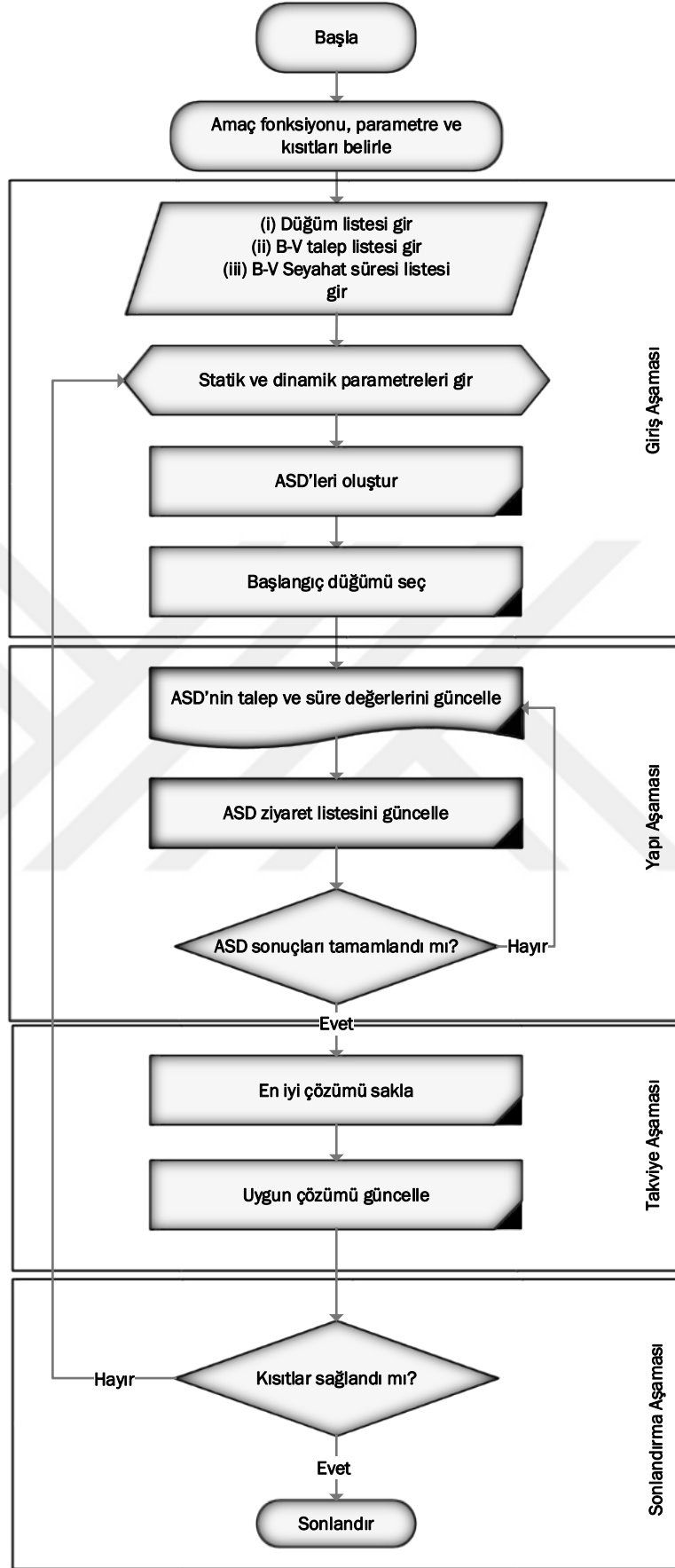
Yapılan araştırmalardan; ulaşım ağ yapısını modellerken ağdaki her düğümün yeri ve diğer düğümlerle olan bağlantısını belirlemek için talep ve süre matrislerinin kullanılması kaçınılmazdır. Talep ve süre matrisleri toplu taşıma ağ tasarımı için modellerde girdi verileri olarak kullanılmaktadır. Girdi verilerinde önemli bir yer teşkil eden B-V matrisi ile ilgili olarak; model karmaşıklığını basitleştirmek için, matrisler simetrik kabul edilmiştir.

Toplu taşıma ağının, optimize edilmesi için girdi verilerine dayanmasına dikkat edilmelidir. Literatürde ilgili kaynaklar incelendiğinde, toplu taşıma ağ tasarımı ve sefer sıklığının belirlenmesi ile ilgili çalışmalarda, araştırmacıların halihazırda Mandl'ın ağındaki mevcut girdi verilerini kullandığı görülmektedir. Geliştirilen ASD algoritmasının etkinliği ve performansını gösterebilmek için Bölüm 4.4'de ayrıntılı olarak test sonuçları verilmiştir.

Çalışmada ASD algoritması toplu taşıma ağ tasarımının yapılması ve rotaların bulunmasında kullanılmıştır. Tablo 3.1'de geliştirilmiş ASD algoritması ile karşılaştırılan algoritmalar verilmiştir. Geliştirilen ASD modelinin çözüm prosedürü dört aşamadan oluşmakta ve adım adım akış şeması Şekil 3.2'de verilmiştir.

Tablo 3.1: Geliştirilmiş ASD algoritması ile karşılaştırılan algoritmalar.

Algoritma	Kaynak	Rota Sayısı
Sezgisel Algoritma	Mandl (1980)	4
Yapay Zeka	Baaj ve Mahmassani (1991)	4,6,7,8
Genetik Algoritma	Chakroborty ve Wivedi (2002)	4,6,7,8
Arı kolonisi Algoritması	Nikolić, M. ve Teodorović, D. (2013)	4,6,7,8



Şekil 3.2: Geliştirilmiş ASD çözüm algoritması akış şeması.

Geliştirilmiş ASD algoritması dört aşamadan oluşmaktadır.

1. Aşama: Giriş aşaması.

Birinci aşama olan giriş aşamasında düğüm listesi, B-V talep ve seyahat listesi girilmektedir. Daha sonra statik ve dinamik parametreler girilir. Bu aşamada ASD'ler oluşturulur ve ASD'lerin başlangıç düğümleri rastgele seçilmektedir.

2. Aşama: Yapı aşaması.

İkinci aşama olan yapı aşamasında; ASD'nin talep ve süre değerleri güncellenmektedir. ASD'nin ziyaret ettiği düğümlerin listesi güncellenmektedir. ASD sonuçları tamamlanana kadar devam edilmiştir.

3. Aşama: Takviye aşaması.

Üçüncü aşama takviye aşaması olup bu aşamada en iyi çözüm saklanır. Daha sonra bulunan en uygun çözüm güncellenmektedir.

4. Aşama: Sonlandırma aşaması.

Son olarak sonlandırma aşamasında kısıtların sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmiştir. Bu aşamadan sonra kısıtlar sağlanmış ise algoritma sonlandırılır.

3.4 Geliştirilmiş ASD Algoritmasının TTAT Problemine Uyarlanması

ASD çözüm algoritmasının ilk planlanması geliştirilmiş gezgin satıcı problemine göre yapılmıştır. Bu plan dahilinde algoritma en kısa rotayı veren tek bir rota elde etmektedir. Toplu taşıma ağ tasarımında ise istenen; bir rota kümesi elde etmektir. Bu nedenle algoritma uygulamasında matematiksel modeli minimize eden; düğümler arasındaki süre ve talep değerlerini kullanarak istenilen sayıda rota kümesi elde edilmiş ve metot toplu taşıma ağ tasarım problemine uygulanmıştır.

Metodun uygulanması aşamasındaki kabuller aşağıda listelenmiştir.

1. Rota oluşturma aşamasında rastgele iki sayı üretilir. İlk sayı 1. düğüm 2. sayı son düğümdür.
2. Tüm rotalar için önceden belirlenmiş minimum ve maksimum düğüm noktası oluşturulmuştur. Bu kural bir rotanın uzunluğunu sınırlamaktadır. Gerekli sayıda, minimum 3 düğüm maksimum 9 düğüme ulaşana kadar tekrarlanır.
3. Ağda aynı rota iki kez tekrarlanamaz.
4. Tüm düğümler rotaların en az birinde mutlaka olmalıdır.
5. Aynı rotada düğümler tekrarlanamaz. Bir rotada bir düğüm birden fazla kez ziyaret edilmemelidir.
6. Ağdaki her rota bir veya birden fazla düğüm ile keşişmelidir. Bu kural ağ bağlantısını garantiye almakta ve ağdaki aktarmalara izin vermektedir.

Geliştirilmiş ASD zm algoritması adımları Şekil 3.3'de verilmiştir.

Adım 1:	B-V çiftleri arasındaki seyahat talebi, seyahat süresi, düğüm bağlantı listesi tanımla. İterasyon
Adım 2:	ASD'lerin statik ve dinamik parametrelerini başlat
Adım 3:	ASD'lerin oluşturulması
Adım 4:	Ziyaret edilmemiş düğümler listesini güncelle.
Adım 5:	ASD'nin düğüm seçme olasılığını hesapla.
Adım 6:	Ziyaret edilen düğümler listesini güncelle.
Adım 7:	TTAT için oluşturulan modelin optimum değerini veren rotayı bul.
Adım 8:	ASD turları arasından minimum rota değerini güncelle.
Adım 9:	En iyi rotayı belirle ve güncelle.
Adım 10:	zmn amaç fonksiyon değeri normalize et.
Adım 11:	zmn sadık olma olasılığını hesapla.
Adım 12:	ASD tarafından seçilme olasılığını hesapla.
Adım 13:	Sonlandırma kriterleri sağlanmışsa algoritma sonlandır.

Şekil 3.3: Geliştirilmiş ASD zm algoritması adımları.

Literatürdeki ASD algoritmasında hız ve toprak parametreleri kullanılırken, geliştirilmiş ASD algoritmasında talep ve seyahat süresi parametreleri kullanılmıştır. ASD'nin mevcut konumundan bir sonraki konumuna akımında; talep ile iki konum arasındaki seyahat süresi ters orantılı miktarda artmaktadır. Bu nedenle; seyahat süresi miktarı daha az olan bir rota, daha fazla olan bir rotadan daha hızlı ASD'ye izin vermektedir. ASD, gezisinde seyahat süreleri toplanmaktadır. Bu seyahat süreleri, iki

farklı konumu birleştiren yoldan kaldırılır. ASD'ye eklenen seyahat süresi miktarı; mevcut konum ile bir sonraki konum arasında geçen zaman aralığı ile orantılıdır.

Metodun TTAT problemine uyarlanmasında aşağıdaki adımlar izlenmiştir:

Adım 1: B-V çiftleri arasındaki seyahat talebi, seyahat süresi, düğüm bağlantı listesi tanımla.

ASD algoritması, performansını düzenleyen iki parametreden oluşmaktadır. Bu parametrelerden biri olan seyahat süresi değeri, B-V çifti arasındaki seyahat süre değerine karşılık gelmektedir. Bu parametrelerden bir diğeri olan talep değeri, düğümler arasında taşınan yolcu sayısı değerine karşılık gelmektedir.

Adım 2: ASD'lerin statik ve dinamik parametrelerini başlat.

Statik parametre başlatma aşamasında: N_{ASD} , su damlaları sayısı ve N_c düğüm sayısı girilir. Dinamik parametre başlatma aşamasında ise: ASD'lerin seyahat süresi ve talep değerleri girilir. Ek olarak oluşturulması istenen rota kümesi sayısı bu aşamada girilir.

Adım 3: ASD'lerin oluşturulması.

Başlangıçta her bir düğüm için boş liste ve bağlantı listesi eklenmektedir. V_c $(ASD) = \{ \}$ ziyaret edilen her düğümü ifade etmektedir. B-V çiftleri belirlendikten sonra bağlantı listesi, her bir düğümün bağlı olduğu düğümlerin bir listesini içermektedir. Seyahat süresi ve talep değerlerinin güncellenmesinin yanı sıra tüm ASD'lerin ziyaret edilen düğüm listeleri güncellenmektedir.

Adım 4: Ziyaret edilmemiş düğümler listesini güncelle.

Algoritmaya girecek düğümü seçerken, seçim daha önce ziyaret edilmemiş düğüme göre yapılmıştır. Daha önce ziyaret edilmiş düğümler listesinden rastgele bir düğüm noktası seçilmektedir. Bunun nedeni oluşturulan rota dizisi içerisinde benzer düğümlerin oluşturulması ile yolcuların rotalar arasında aktarma yapmasına izin vermektir. V_c $(ASD) = \{ \}$ listesinde olan ziyaret edilen şehirler güncellenmektedir.

Adım 5: ASD'nin düğüm seçme olasılığını hesapla.

Bu aşamada oluşturulan rotanın; TTAT problemi çözümünde kullanılan matematiksel modelin en iyi sonucu vermesi beklenir. Bu nedenle düğüm seçme olasılığı hesaplanırken modelin optimum değeri dikkate alınır. Problem formülasyonu Bölüm 4'te ayrıntıları ile birlikte verilmiştir.

Adım 6: Ziyaret edilen düğümler listesini güncelle.

Bu aşamada; minimum dönen değer $V_{C(ASD)}$ ASD'nin ziyaret edilen düğümler listesine eklenmektedir. i düğümünden j düğümüne her ASD için (3.4) eşitliği ile güncellenmektedir. Oluşturulan rotada düğümler arasındaki talep ve geçen süre hesaplanmaktadır. Her ASD değeri güncellenmektedir.

Adım 7: TTAT için oluşturulan modelin optimum değerini veren rotayı bul.

TTAT için oluşturulan matematiksel model Bölüm 4'de kısıt vektörleri ile birlikte ayrıntılı olarak verilmiştir. Bu modele göre optimum değeri veren rota bulunmaktadır.

Adım 8: ASD turları arasından minimum rota değerini güncelle.

Her ASD için, adımlar tekrarlanarak rota tamamlanır. Tüm ASD turları arasında minimum değerler bulunur. Bu minimum olan değerler güncellenmektedir.

Adım 9: En iyi rotayı belirle ve güncelle.

Minimum tur, şimdiye kadar bulunan en iyi tur değerinden daha kısaysa, en iyi tur olarak güncellenmektedir. Yakınsama koşulu karşılanmadığı sürece 1. adıma gidilir. Algoritma, en iyi tur değerini tutarak, tur uzunluğunu güncellemektedir.

Adım 10: Çözümün amaç fonksiyon değeri normalize et.

ASD algoritması sonucu elde edilen çözümün amaç fonksiyon değerinin normalleştirilmiş değeri Eşitlik (3.11) yardımıyla yapılmaktadır.

Adım 11: Çözümün sadık olma olasılığını hesapla.

Bu aşamada; ASD'nin önceden oluşturulmuş çözüme sadık olma olasılığı Eşitlik (3.12) ile hesaplanmıştır:

Adım 12: ASD tarafından seçilme olasılığını hesapla.

Bu aşamada; çözümünün ASD'ler tarafından seçilme olasılığı Eşitlik (3.13) yardımıyla bulunmaktadır.

Adım 13: Sonlandırma kriterleri sağlanmışsa algoritma sonlandırılır.

Bu adımda; sonlandırma kriterlerinin kontrolü yapıldıktan sonra kriterler sağlanmış ise algoritma sonlandırılır.

3.5 Sonuçlar

Bu bölümde ASD algoritmasının temelindeki çalışma mantığı verildikten sonra TTAT problemi çözümü için geliştirilen ASD algoritmasının uygulama adımları açıklanmıştır. Ayrıca metodun TTAT için probleme uyarlanması ve algoritma adımları verilmiştir.

Bölüm 4'te TTAT problemi için oluşturulan model formülasyonu ve model gelişimi hakkında bilgiler verilmiştir. TTAT modeli ve çözümü açıklanarak toplu taşıma sistemini kullanan yolcuların ToTaRO modeli ile oluşturulan rotalara yolcu ataması yapılması açıklanmıştır. Son olarak ToTaRO modelinin uygulamasının gerçekleştirildiği Mandl ağı sonuçları verilmiştir.

4. PROBLEM FORMÜLASYONU VE MODEL GELİŞİMİ

4.1 Giriş

Toplu taşıma sistemlerinde otobüs taşımacılığı dünyadaki birçok kentte tek başına veya raylı sistemlerin yanında yardımcı bir sistem olarak kullanılmaktadır. Ülkemizde ise otobüs ile gerçekleştirilen toplu taşıma sistemi birçok kentte ana sistemi oluşturmaktadır. Bu şekildeki ana sistemlerde ise; toplu taşımanın yolcu çekimindeki en önemli parametresi seyahat süresidir. Toplu taşıma sistemlerinde seyahat süresinde yapılan iyileştirmeler ile birlikte daha çok yolcunun taşındığı görülmektedir.

Toplu taşıma araçlarının ve yolcuların seyahat süresini etkileyen faktörlerin her birinin parametrelere ayrılarak hem ayrı hem de birbirlerine olan etkilerini inceleyen bir amaç fonksiyonunun literatürdeki eksikliği ile yukarıda bahsedilen tüm bu problemlerin çözümüne yönelik bir matematiksel modelin olmaması; mevcutta kullanılan ve oluşturulması planlanan toplu taşıma sistemleri ve kullanıcıları için seyahat süresi analizlerinde ve iyileştirilmelerinde öngörülen bir eksikliklerdir. Literatürde toplu taşıma araçlarının seyahat sürelerinin hesaplanmasına yönelik matematiksel modeller yer almasına rağmen, bu modeller içerisinde toplu taşıma araçlarının çevreye olan etkisi bu modellere dahil edilmemiştir.

Toplu taşıma rota tasarımı ve ağı değerlendirilmesi olarak tanımlanan uygulamalı planlama sürecinin ağ tasarım faaliyetine odaklanılmış ve bu süreçte, geliştirilen ASD algoritmasında kullanılan, matematiksel model bu bölümde verilmiştir. Rota ağının tasarlanma sürecinde; toplu taşıma ağında meydana gelecek toplu bir değişimde yolcuların yeni ağdaki seçim davranışı modellenmiştir. Buna ek olarak, rotalar karşılaştırılmış ve toplu taşıma rotaları değerlendirilmiştir.

Model, karar teknikleri ile matematiksel programlama teknikleri felsefesi birleştirilerek bir dizi rota seçimi gerçekleştirmiştir. Aynı zamanda, toplu taşıma ağ tasarımının karar verme aşamalarında kullanılan amaç fonksiyonuna yolcu, işletme ve çevre faktörleri dahil edilmiştir.

Bir sonraki bölümde TTAT problem formülasyonları anlatılmaktadır.

4.2 Toplu Taşıma Ağ Tasarımı Problem Formülasyonları

Kullanıcı ve işletme maliyetlerinin yanı sıra çevresel faktörlerinde toplu taşıma ağ tasarımında göz önünde bulundurulması önemlidir. Şehirlerde artan özel araç sahipliği, kapasite artışına bağlı trafik sıkışıklığına neden olmaktadır. Toplu taşıma sistemi, trafik sıkışıklığı ve buna bağlı trafik kazalarını hafifletmek için kentsel ulaşım ağında önemli ve dengeli bir unsurdur. Sürdürülebilir bir toplu taşıma sistemi için toplu taşıma rotalarını etkili ve daha kısa seyahat süresiyle tasarlamak esastır.

Toplu taşımanın iyileştirilmesi; ana sistem içerisinde bir yerden bir yere kısa sürede, minimum maliyetle çok sayıda insanı taşıyacak sistemlerin geliştirilmesiyle mümkündür. Toplu yolcu taşımacılığında toplu taşıma gereksinimi, sadece seyahat talebini karşılayacak sistemi oluşturmaktan ziyade en iyi seyahat dağılımını sağlayacak ulaşım olanağı verebilmektir. Kent içi ulaşımında yolcu çekiminde; düzenlilik, konfor ve güvenlik gibi hizmet kalitesini etkileyen faktörler büyük rol oynamaktadır. Yolcuların toplu taşıma sisteminden beklentileri; gereksinimlerinin karşılanması, zaman ve mekân açısından elverişli olması, seyahat süresinin minimum olması, ücretlendirmelerin düşük olması ve emniyetli bir ulaşımın sağlanması iken işletmecilerin beklentileri; daha düşük masraf daha yüksek gelir ile hizmet sunmaktır. Ayrıca özel araç sahipleri ise, toplu taşıma araçlarının trafik akışını engellemeyecek bir sistem içerisinde hizmet sunmasını istemektedir. Toplum gereksinimleri ise; özellikle çevre kirliliği, gürültü, trafik sıkışıklığı ve bunun getirdiği maliyettir.

Toplumun gereksinimlerinin başında yer alan çevreyi, toplu taşıma filosunun yaydığı egzoz gazı güçlü bir şekilde etkilenmektedir. Karayolu taşıma araçları, çoğunlukla fosil yakıtları kullanan ve dolayısıyla iklim değişikliğinde önemli bir faktör olan CO₂ yayan içten yanmalı motorlar tarafından desteklenmektedir. Ayrıca, toplu taşıma yolcularının çoğunluğu şehirlerde yoğunlaştığı için, otobüslerin zararlı egzoz emisyonları insan sağlığı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Çevresel yükün karşılaştırılması için, yolculuk süresinin uzunluğu ve NO_x emisyon bilgileri kullanılmaktadır. Mevcut haliyle model, aynı tipte birkaç aracı içermektedir. Emisyon faktörleri çoğunlukla G/kwh km cinsinden kullanıcı tarafından girilmektedir (Oprešnik ve diğ. 2018).

Toplu taşımanın temel parametreleri birbirleri ile yakından ilişkilidir. Örneğin; daha iyi ve hızlı hizmet verebilmek için otobüs sayısını arttırmak, masrafları da artıracığından maliyet getirecektir. Ayrıca; otobüslerin boyutları, manevra ve hız kabiliyetleri ile durak ve sinyalize kavşaklarda durmaları trafik sıkışıklığını daha da arttıracaktır. Toplu taşıma kullanıcılarının yürüme sürelerini azaltmak için durak sayısını arttırmak veya durak sayısını azaltarak seyahat süresini kısaltmak toplu taşıma sistemi için etkili faktörlerdir. Bu nedenle toplu taşıma sisteminin iyileştirilmesi, tek bir faktörden çok tüm faktörlerden etkilenen ve tüm bu faktörlerin her birinin birbirlerine olan etkisinin analizini gerektiren oldukça önemli bir konudur.

Bu çalışmada, toplu taşıma ağ tasarımı problemi için verimli rotalar oluşturan ASD algoritması geliştirilmiştir. Yöntem çerçevesinde, daha sonra karşılaştırmalar için temel olarak kullanılacak, hem yolcuların, hem de işletme maliyetini ve çevreye verilen zararı minimize edecek bir matematiksel model oluşturulmuştur. Modelin en üst seviyesinde önerilen problem, geliştirilen ASD optimizasyon algoritması çözüm çerçevesine dayalı olarak çözülmüştür. Alt seviyede sefer sıklığı ve seyahat yüzdeleri elde edilmiştir. Rotalar, ağdaki tüm düğümler bağlantılı ve en kısa rotadan toplam sapma oranları minimize edilecek şekilde oluşturulmuştur.

Kullanıcının, işletmenin ve çevrenin (her ikisi aynı anda) maliyeti göz önüne alındığında, önerilen optimizasyon problemi, Eşitlik (4.1)'de görüldüğü gibi formüle edilmiştir:

$$\min F = P_1 \sum_{i,j \in N} d_{ij} x t_{ij} + P_2 \sum_{k \in R} f r_k x L_k \quad (4.1)$$

Kısıtlamalar:

Sefer sıklığı kısıtlaması

$$f_k \geq f_{min} \text{ her } k \in SR \text{ için} \quad (4.2)$$

Yük faktörü kısıtlaması:

$$LF_k = \frac{(Q_k)_{max}}{f_k CAP} \leq LF_{max} \quad (4.3)$$

Filo boyutu kısıtlaması

$$\sum_{k \in R} \frac{fr_k x T_k}{60} + 1 \leq FS \quad (4.4)$$

Burada; d_{ij} i ve j düğümleri arasındaki talep değerini, t_{ij} i ve j düğümleri arasındaki seyahat süresini, fr_k k rotasındaki frekans değerini, L_k k rotasının uzunluğunu (km), T_k k rotasının gidiş-dönüş seyahat süresini, SR ; toplu taşıma rotalarını, P_1, P_2 iki maliyet bileşeninin (P_1 yolcu maliyeti ağırlığı; P_2 işletme ve çevre maliyet ağırlığı) göreceli önemini yansıtan ağırlıkları, f_{min} herhangi bir rotada işletilen otobüsün en düşük sefer sıklığını, LF_k k rotasındaki yük faktörünü, FS filo boyutu, CAP rotadaki otobüs yolcu kapasitesini ifade etmektedir.

Her bir rota için maksimum yük faktörü bulunarak yolcu ataması yapılırken yolcunun rota seçim davranışını tanıyan ve mevcut otobüs sayısına ek kısıtlamalara tabi olan yolcu bekleme süresi ve maksimum yük faktörü seviyeleri ile her bir rotanın taşınması için yeterli kapasitenin sağlanmasını içeren objektif bir işlemi en aza indirmeyi amaçlayan problem formülasyonu temel alınmıştır. Amaç, asgari sayıda otobüs kullanarak tüm kısıtlamaları karşılayan uygulanabilir bir çözüm sunmaktır. Genel olarak bir veya daha fazla rota için otobüsün eklenmesine yol açacak herhangi bir çözümde, tüm otobüsler tahsis edilene kadar orantılı olarak artırılır.

Eşitlik (4.1)'in; birinci kısmı yolcu maliyetine, ikinci kısmı ise işletme ve çevre maliyetine karşılık gelmektedir. Önerilen problemin amacı, yolcu maliyetleri (yolcuların talep ve düğümler arasında yolculuk süresi çarpımı) ve işletme ve çevre maliyetleri (otobüslerin sefer sıklıkları ve toplam taşıma mesafesi hizmet km'si çarpımı) toplamını en aza indirmektir. Burada, Kısıt (4.2) her toplu taşıma rotasının önceden tanımlanmış izin verilen minimum ve maksimum sefer sıklığı değerleri karşılamasını sağlamaktadır. Kısıt (4.3) otobüs oturma kapasitesine ve sefer sıklığına bağlı olan yolcu yükü değerinin belirlenen maksimum değerden küçük olmasını sağlamaktadır. Kısıt (4.4), gerekli filo boyutunun mevcut filo boyutunu aşmamasını sağlamaktadır.

P_1 ve P_2 'yi değiştirerek kullanıcı maliyetleri ile işletme ve çevre maliyetleri arasında farklı bir denge sağlayan yapılandırmalar üretilebilir. Uygulamada, doğası

gereği çok amaçlı bu problemin önemli değişimlerinin ele alınması gerekmektedir. Örneğin, bazı taleplerin karşılanmadığı anlamına gelse bile, bazı kaynakların düşük yoğunluklu rotalara tahsis edildiği tüm talepler karşılanmalı mı, yoksa daha verimli yollarda yüksek hizmet seviyeleri sağlamak için hizmet daha da yoğunlaştırılmalı mı sorularına cevap aranmaktadır. Bu durum matematiksel formülasyona dahil edilmiştir. Pareto duyarlılık analizi ile P_1 ve P_2 ağırlıklarının optimum değerleri elde edilerek ASD algoritmasında matematiksel modelde uygulanmış ve ToTaRO bu ağırlıklara göre yapılmıştır.

Problemin çözümünde belirlenen amaçlar; yolcuların seyahat süresini en aza indirmek, filo boyutunu en aza indirmek ve otobüsün çevreye verdiği zararı en aza indirmektir. Kullanıcı maliyeti; seyahat süresi ile ilgilidir. İşletme maliyeti; filo boyutu ile ilgilidir. Çevre maliyeti; aracın taşıma mesafesi ile ilgilidir. Çünkü araç ne kadar uzun mesafe çalışırsa o kadar egzoz gazı salınımı yapacaktır.

Toplu taşıma planlama ve tasarım problemleri için etkili prosedürler sağlama yönündeki temel motivasyona ek olarak, metodolojik açıdan ek bir motivasyon, ulaşım ağı analizi ve tasarım problemleri için rota seçim davranışının modellenmesi olmuştur. Toplu taşıma yolcularının rota seçim kuralları ve araştırılan atama mantığı bakımından oldukça esneklik sağladığı doğrulanmıştır. Bölüm 4.3’de rota seçim davranışının modellenmesi açıklanmıştır.

4.3 Rota Seçim Davranışının Modellenmesi

Toplu taşıma rota seçim davranışının modellenmesi; yolcu akımlarının, talep matrisi değerlerine göre, oluşturulan rota setlerine, bütün taleplerin karşılanacağı şekilde atanmasıdır. Bu atama işleminde aktarmasız (doğrudan) yolculuklar veya aktarmalı yolculuklar oluşmaktadır. Bu çalışmada, toplu taşıma yolcu ataması için öncelikli olarak ASD algoritması ile rota setleri elde edilmiştir. Sonraki adımda, her bir rota için sefer sıklığı değeri belirlenip mevcut talep matrisi atanmıştır. Toplu taşıma yolcu ataması temelinde talep matrisinin rotalara atanması yatmaktadır. Oluşturulan yeni rotalara sefer sıklığı paylaşım kuralına göre yolcu ataması yapılmıştır.

Çalışma süresi boyunca talep seviyesi esnek olmayıp rotaların yolcu seçimleri en kısa seyahat süresine dayanmaktadır. Çünkü, yolcuların hedeflerine ulaşmak için en kısa yolu tercih ettikleri kabul edilmiştir. Yolcular, toplu taşıma araçları ile seyahatlerini doğrudan gerçekleştirebileceği gibi, aktarmalı daha kısa sürede seyahat edebilecekleri durumda, aktarmalı seyahat etmeyi de tercih edebilmektedirler.

ToTaRO modeli, aktarmaları açıkça dikkate alan bir yol seçim mantığına göre toplu taşıma ağına talebi yükler (Şekil 4.1). ToTaRO modeli ile; varış yerine ulaşamayan yolcunun, bir aktarma, iki aktarma ya da karşılanamayan (iki veya daha fazla aktarma ile) toplam seyahat taleplerinin yüzdesi hesaplanmıştır. Ayrıca; toplu taşıma ağı planlama ve tasarım sürecinde, kullanım için çeşitli düğüm seviyesi ve ağ seviyesi tanımlayıcıları belirlenmiştir. Yolcu ataması yapıldıktan sonra, yolcu yükü faktörünü belirtilen bir maksimumun altında tutmak için her rotada gerekli sefer sıklığı hesaplanmıştır. İşlem; hesaplanan sefer sıklıkları, giriş sefer sıklıklarıyla tutarlı olana kadar tekrarlı olarak devam etmektedir.

Hesaplamalı bakış açısından dolayı tüm işlemler C# yazılım dilinde, özel amaçlı bir iş istasyonunda yapılmıştır. Çünkü; “veri yapısı”, bir toplu taşıma ağına uygun olan atama mantığı ve yol seçim kurallarında bulunan yol arama ve numaralandırma faaliyetlerini desteklemek için gerekli özelliklere uygundur. Bu, atama mantığını uygulamak ve istenen performans ölçütlerini hesaplamak için gerekli olan yol arama ve numaralandırma ölçütleri dikkate alındığında oldukça etkili olmuştur.

ToTaRO modelinin temelinde iki ana kriter göz önünde bulunur. Bunlar; seyahatin varış yerine ulaşmak için gerekli aktarma sayısı; ve farklı alternatif seçimlerde yapılan yolculuk süreleridir. Yolcunun mümkün olan en az sayıda aktarımı içeren yolu izleyerek, her zaman hedefine ulaşmaya çalıştığı kabul edilmiştir. Beraberlik durumunda (yani, aynı en az aktarma sayısına sahip birden fazla yol olduğunda) rakip yolların yolculuk zamanları dikkate alındıktan sonra bir karar verilmiştir. Seyahat süresi; minimum seyahat süresinin eşliğinde olan bir veya daha fazla alternatif rota olduğunda “*sefer sıklığı paylaşım*” kuralı uygulanmıştır.

ToTaRO modelinin girdi verileri dört kategoride toplanabilir:

1. Ağ: Toplu taşıma ağında yer alan düğümlerin sayısı, ağda faaliyet gösteren rotaların adlarının yanı sıra her rotayı tanımlayan düğümlerin listesi ve her düğüm için erişilebilir komşu düğümlerin araç içi seyahatlerini belirten seyahat süresi matrisi;
2. Sefer sıklığı: Her rotadaki otobüs hizmetinin sefer sıklıkları;
3. Talep: Her bir B-V düğüm çifti arasındaki yolcu seferlerinin sayısını temsil eden simetrik bir talep matrisi; ve
4. Tasarım parametreleri: Araç içi seyahat süresinin eşdeğer dakikalarında ifade edilen aktarma başına düşen aktarma ceza süresi, otobüs oturma kapasitesi ve maksimum yük faktörüdür.

ToTaRO modelinde herhangi bir rota numaralandırma biçiminden kaçınmak için ulaşım ağı uygulamalarında yaygın olarak kullanılan liste biçimi tercih edilmiştir. Mevcut atama işlemlerinin çoğu en kısa yol yapılarıyla sınırlıdır. ToTaRO modelinin hesaplama ana adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 1: Toplu taşıma ağındaki rotalara ait sefer sıklığı ve rotalardaki maksimum yolcu sayısı değerlerinin belirlenmesi;

Adım 2: Aktarmasız ve aktarmalı seyahatlerin talep yüzdelerinin belirlenmesi;

Adım 3: Yolcuların toplam seyahat süresi değerinin elde edilmesidir.

Eşitlik (4.5)'de verildiği gibi toplam seyahat süresi; araç içi seyahat süresi, bekleme süresi ve aktarma sürelerinin toplamıdır.

$$t_{ij} = t_{aiss,ij} + t_{bs,ij} + t_{ss,ij} \quad (4.5)$$

Burada $t_{aiss,ij}$ i ve j düğümleri arasındaki araç içindeki seyahat süresini; $t_{bs,ij}$ i ve j düğümleri arasında seyahat ederken gerçekleşen durakta bekleme süresini; $t_{ss,ij}$ i ve j düğümleri arasındaki seyahatlerde aktarma ceza süresini ifade etmektedir.

Durakta bekleme süresini belirleyen ve işletme amacını oluşturan en önemli etken sefer sıklığı değeridir. Durakta bekleme süresi Eşitlik (4.6) ile hesaplanmıştır.

$$T_{BS} = \frac{60}{2xf_k} = \frac{30}{f_k} \quad (4.6)$$

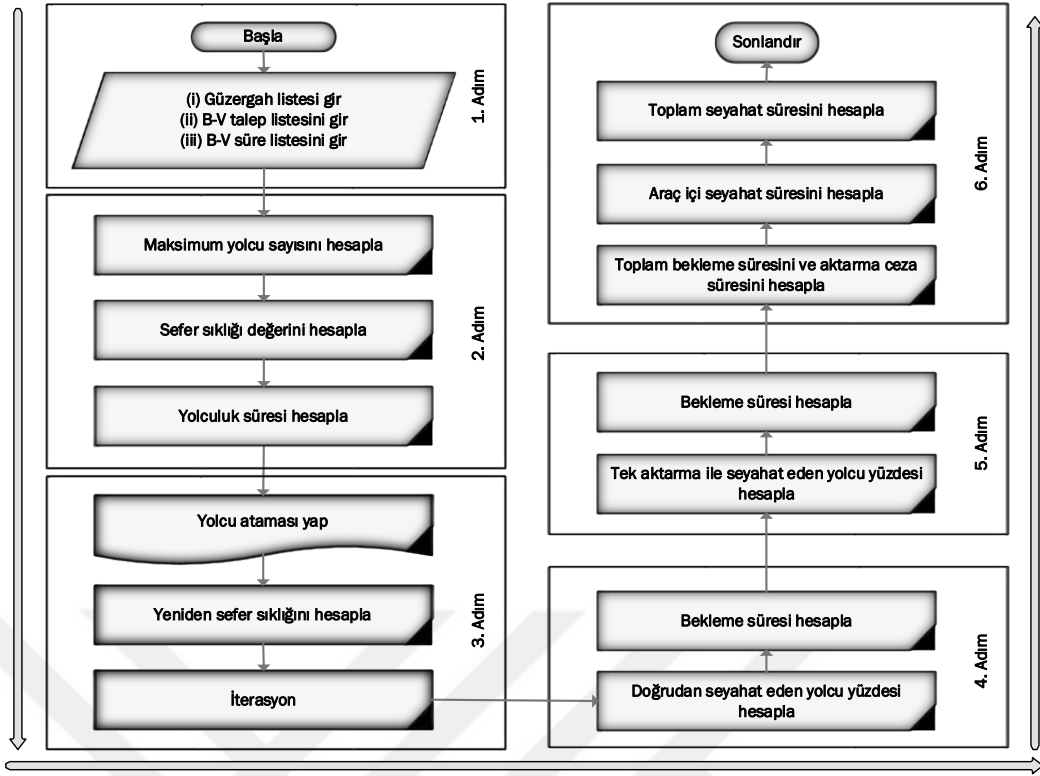
Burada f_k k rotasının sefer sıklığını ifade etmektedir. Rotanın maksimum yük faktörü, rotanın en yüksek hacmi taşıyan yolun bağlantısını bulmak için kullanılmıştır. Çalışma kapsamında izin verilen maksimum yük faktörünü elde etmek ve rotanın yük faktörünü korumak için gerekli otobüs sefer sıklığı Eşitlik (4.7) ile hesaplanmıştır.

$$f_k = \frac{Q_{k,max}}{\alpha_{max} \times C_k} \quad k \in SR \quad (4.7)$$

Burada; $(Q_k)_{max}$ k rotasındaki herhangi bir bağdaki maksimum yolcu sayısını, α_{max} yolcu yük faktörünü, C_k ise ağda işletilen otobüslerin oturma kapasitesini ifade etmektedir.

Eşitlik (4.7) ile hesaplanan sefer yolcu atamasından sonra tekrar hesaplanmıştır. İki sefer sıklık değeri arasındaki fark, verilen yakınsama kriteri olarak sıfır olana kadar algoritma yinelenir. Sefer sıklık değeri toplu taşıma yolcu ataması yapılırken önemlidir. Rota seçim davranışı modellenirken kullanılan “*sefer sıklığı paylaşım*” kuralı Bölüm 2.3’de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Yolcu ataması aktarmasız seyahat durumunda (d_0), en kısa seyahat süresinin %50’sine kadar kabul edilmiştir. Tek aktarmalı seyahat durumunda (d_1) ise en kısa seyahat süresinin %10’una kadar olan rotalar kabul edilerek kalan rotalar arasında sefer sıklığı paylaşım kuralı uygulanmaktadır. Şekil 4.1’de ToTaRO modeli adımları ayrıntılı olarak verilmiştir.



Şekil 4.1: ToTaRO modeli algoritma adımları.

Adım 1: Talep, süre listelerini ve rota listesini gir.

Adım 1’de kullanıcı tarafından talep, süre listelerine ek olarak rota listesi girişi yapılmaktadır.

Adım 2: Maksimum yolcu sayısını, sefer sıklığını ve yolculuk süresini hesapla.

Adım 2’de öncelikle seçilen rota parçalanarak düğümlere ayrılmıştır. Birbirini takip eden iki düğüm arasındaki seyahat süreleri süre listesinden hesaplanmıştır. Yine iki düğüm arasındaki talep değeri talep listesinden hesaplanarak rotadaki maksimum yolcu yükü belirlenmiştir. Maksimum yolcu yükü belirlendikten sonra sefer sıklığı değeri Eşitlik (4.7) yardımı ile hesaplanmıştır.

Adım 3: Yolcu ataması yap.

Adım 3’de sefer sıklıkları, 1. Adımda girilmiş olan talep matrisi sefer sıklığı paylaşım kuralına göre belirlenen rotalara atanmıştır. Bu atama sonucunda oluşan yeni taleplerin bir listesi oluşturulduktan sonra Adım 2’de olduğu gibi maksimum yolcu yükü yeniden hesaplanmıştır. Hesaplanan maksimum yolcu yüküne göre yeni sefer

sıklığı değeri belirlenmiştir. Bu iki giriş ve çıkış sefer sıklığı değerleri arasındaki fark %0 olana kadar iterasyon tekrarlanmıştır. Giriş ve çıkış sefer sıklığı değerleri aynı olduğunda işlem sonlandırılarak yolcu ataması yapılır ve talep listesi güncellenmektedir.

Adım 4: Doğrudan seyahat eden yolcu yüzdesini ve yolcu bekleme süresini hesapla.

Bu adımda öncelikle B-V düğümü belirlenmiş, eğer düğümler aynı rota içerisinde bulunuyorsa eşleşen rota listesine eklenmiştir. Eğer farklı rotalarda bulunuyor ise eşleşmeyen rota listesine eklenmiştir. Eşleşen rota listesi içerisinde bulunan rotaların B-V düğümleri arasındaki seyahat süreleri hesaplanmıştır. Hesaplanan seyahat sürelerinden en kısa seyahat süresinin %50'sine kadar olan rotalar listeye eklenmiştir. %50'den fazla olan rotalar listeye dahil edilmeden elenmiş, listeye eklenen rotalar arasında talep matrisinden elde edilen talep, sefer sıklığı paylaşım kuralına göre atanmıştır. Bu atamadan sonra tek bir rotadaki iki düğüm arasında doğrudan seyahat eden yolcuların yüzdesi elde edilmiştir. Yolcu bekleme süresi Eşitlik (4.6) ile hesaplanmıştır.

Adım 5: Tek aktarma ile seyahat eden yolcu yüzdesini ve bekleme süresini hesapla.

Adım 5'de B-V düğümlerine göre 4. Adımda elde edilen eşleşmeyen rota listesinden yararlanılmıştır. Bu liste ile farklı rotalarda bulunan iki düğüm arasındaki seyahat süresi Adım 4'de olduğu gibi hesaplanmıştır. Ek olarak aktarma yapılabilmesi için iki rota arasındaki ortak düğüm noktası belirlenmiştir. Tek aktarma ile seyahat eden yolcu yüzdesini hesaplarken, en kısa seyahat süresinin %10'una kadar olan rotalar listeye eklenmiş, listeye eklenen rotalar arasında talep matrisinden elde edilen talep, sefer sıklığı paylaşım kuralına göre atanmıştır. Atamadan sonra iki farklı rotada bulunan düğümler arasındaki tek aktarma ile seyahat eden yolcu yüzdesi elde edilmiş ve yolcu bekleme süresi Eşitlik (4.8) yardımı ile hesaplanmıştır.

$$t_{BS} = \frac{60}{2xf_1} + \frac{60}{2xf_2} \quad (4.8)$$

Burada f_1 1. rotanın sefer sıklığını, f_2 2. rotanın sefer sıklığını ifade etmektedir.

Adım 6: Aktarmasız ve tek aktarma ile seyahat eden yolcu bekleme sürelerinin toplamı, toplam aktarma ceza sürelerini, toplam araç içi seyahat sürelerini ve son olarak toplam seyahat sürelerini hesaplayarak işlemi sonlandır.

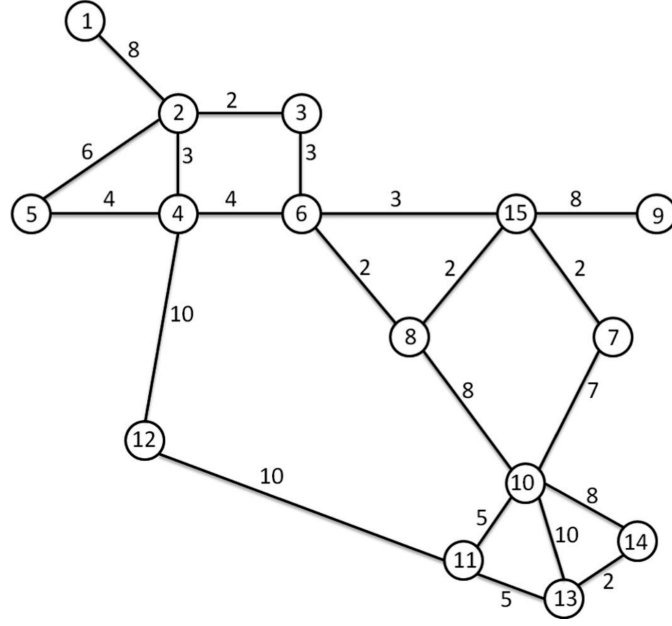
Bu adımda 4. Adımda elde edilen aktarmasız (doğrudan) seyahatlerin bekleme süreleri ile 5. Adımda elde edilen tek aktarmalı seyahatlerin bekleme süreleri toplanarak toplam bekleme süresi elde edilmiştir. Rotalardan elde edilen araç içi seyahat süreleri ve toplam aktarma ceza süre değerleri toplanarak Eşitlik (4.5) ile toplam seyahat süresi hesaplanarak işlem sonlandırılmıştır.

Bölüm 4.4'te ToTaRO modelinin Mandl ağına uygulanması sonucunda elde edilen bulgular verilmiştir.

4.4 ToTaRO Modeli Mandl Toplu Taşıma Ağı Uygulaması

Mandl (1980) şehir içi toplu taşıma ağ tasarım probleminin çözümü için iki aşamalı bir çözüm önermiştir. Birinci aşamada uygun bir rota grubunun oluşturulması ve ikinci aşamada başlangıç rota setinin kalitesini iyileştirmek için buluşsal yöntemlerin uygulanmasıdır. Rota oluşturma aşamasında, Dijkstra (1959) algoritması ve Floyd (1962) algoritmasından yararlanarak, tüm köşe çiftleri arasındaki en kısa yolların hesabını ve daha sonra belirlenen düğümlerin konumunu dikkate alarak, düğümleri içeren en kısa yollarla yerleştirilen rotayı oluşturmayı amaçlamışlardır. Rotalara dahil olmayan düğümler ile yeni rotalar oluşturmuşlardır.

Mandl (1979) rota kalitesini değerlendirirken araç içi seyahat sürelerini dikkate almıştır. İlk rota setinde iyileştirilmelerin yapılabildiği birkaç sezgisel yöntem önermiş ve bunları ikinci aşamada kullanmıştır. Çalışmasında bir kesişim noktasında rota parçalarını değiştirerek yeni rotalar elde etmiştir. Ayrıca çalışmada araç içi seyahat sürelerine ek olarak bekleme sürelerini de dikkate almıştır. Bekleme süreleri, belirtilen araç sefer sıklıklarına göre sabit değerler olarak belirlenmiştir.



Şekil 4.2: Mandl İsviçre toplu taşıma ağı (Mandl 1980).

Literatürde yaygın olarak kullanılan Mandl (1980) toplu taşıma ağı ve duraklar arası seyahat süreleri (dakika) Şekil 4.2’de verilmiştir. 15 durak noktası ve 21 bağlantıdan oluşan ağda günde toplam 15.570 yolcu seyahat etmektedir.

Mandl (1980) şehir içi toplu taşımayı yönlendirmek için çözüm geliştirmiştir. Bu çözümün temeli, uygun bir rota grubunun oluşturulması ve rota setinin kalitesinin iyileştirilmesidir. Tüm düğüm noktaları arasındaki en kısa yolun ilk bilgisayarla hesaplamasını gerçekleştirerek en kısa yollarla yerleştirilen rotayı seçmeyi amaçlamıştır. Rotalara dahil olmayan düğümler ile yeni rotalar oluşturulmuştur. Tablo 4.1’de Mandl toplu taşıma ağı talep B-V matrisi verilmiştir.

Tablo 4.1: Mandl ağı talep matrisi.

<i>Başlangıç Varış</i>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	<i>Toplam</i>
<i>1</i>	0	400	200	60	80	150	75	75	30	160	30	25	35	0	0	1320
<i>2</i>	400	0	50	120	20	180	90	90	15	130	20	10	10	5	0	1140
<i>3</i>	200	50	0	40	60	180	90	90	15	45	20	10	10	5	0	815
<i>4</i>	60	120	40	0	50	100	50	50	15	240	40	25	10	5	0	805
<i>5</i>	80	20	60	50	0	50	25	25	10	120	20	15	5	0	0	480
<i>6</i>	150	180	180	100	50	0	100	100	30	880	60	15	15	10	0	1870
<i>7</i>	75	90	90	50	25	100	0	50	15	440	35	10	10	5	0	995
<i>8</i>	75	90	90	50	25	100	50	0	15	440	35	10	10	5	0	995
<i>9</i>	30	15	15	15	10	30	15	15	0	140	20	5	0	0	0	310
<i>10</i>	160	130	45	240	120	880	440	440	140	0	600	250	500	200	0	4145
<i>11</i>	30	20	20	40	20	60	35	35	20	600	0	75	95	15	0	1065
<i>12</i>	25	10	10	25	15	15	10	10	5	250	75	0	70	0	0	520
<i>13</i>	35	10	10	10	5	15	10	10	0	500	95	70	0	45	0	815
<i>14</i>	0	5	5	5	0	10	5	5	0	200	15	0	45	0	0	295
<i>15</i>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<i>Toplam</i>	1320	1140	815	805	480	1870	995	995	310	4145	1065	520	815	295	0	15570

Bu çalışmada, Mandl toplu taşıma ağı talep değerleri ve duraklar arası seyahat süreleri girilmiş ve geliştirilen ASD algoritması ile rotalar elde edilmiştir. Sonrasında, elde edilen verilerle gerçekleştirilen ASD algoritması hesaplamalarının çıktıları literatürdeki farklı optimizasyon çalışmalarının sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Model; parametre değerleri, “seyahat süresi” ve “talep” parametreleri temel değişkenlerimizi oluştururken, iterasyon sayısı hesaplamanın yineleme sayısını ifade etmektedir. Parametre değeri olarak; ASD sayısı rotadaki düğüm sayıları, seyahat süresi değerleri talep değerleri kullanılmıştır. Seyahat süresi ve talep temel parametresi altında statik parametreler başlangıçta yüklenir daha sonra Eşitlik (4.1) ile (4.4) arasında yer alan matematiksel fonksiyonlarda ve kısıtlarda bu temel parametreler kullanılarak ASD algoritması Mandl ağına uygulanmaktadır. Atanan yineleme değerine göre hesaplamalar gerçekleştirildikten sonra rota setleri elde edilmiştir.

Eşitlik (4.1) yardımıyla, TTAT probleminin çözümü için geliştirilen ASD algoritması ile gerçekleştirilmiş uygulamalar ve ToTaRO modeli ile yolcu atama sonuçları verilmiştir. ToTaRO modeli ile Mandl (1980) toplu taşıma güzergah tasarımını yapmak için aşağıdaki parametreler kabul edilmiştir.

- Her otobüste koltuk sayısı: 40.
- Maksimum yük faktörü: 1.25.
- Bekleme süresi ceza çarpanı: 5.
- Rotadaki minimum düğüm sayısı: 3.
- Rotadaki maksimum düğüm sayısı: 10.

Çözümün doğruluğunu test etmek için, ASD algoritması ile 4, 6, 7 ve 8 rota setleri Mandl ağı için elde edilmiştir. Mandl örnek toplu taşıma ağını 4 rota için çözmüş ve karşılaştırma bu rotalar yapılmıştır. Diğer 6, 7 ve 8 rotalı çözümleri geliştirilen ASD algoritması ile yapılarak literatürdeki çözümler ile karşılaştırılmıştır. Tablo 4.2’de literatürdeki optimizasyonlardan elde edilmiş rota setlerinin sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Tablo 4.2’de yer alan karşılaştırmalı sonuçlar analiz edildiğinde, geliştirilen ASD algoritması literatürdeki çalışmalara göre daha iyi sonuç verdiği sayısal değerlerle ortaya konmuştur. Mandl çalışmasında kullandığı sezgisel algoritma ile 4 rota dizisi için yaklaşık %70 aktarmasız seyahat elde ederken, geliştirilen ASD

algoritması ile yaklaşık %90 aktarmasız seyahat ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Mandl'ın çalışmasında kullandığı sezgisel algoritmaya göre geliştirilen ASD algoritması toplu taşıma ağında doğrudan seyahatlerde %28 iyileştirme sağlamıştır. Çalışmada d_0 aktarmasız talep yüzdesini, d_1 bir aktarma yapan talep yüzdesini, d_2 iki aktarma yapan talep yüzdesini, d_{un} ikiden fazla aktarma yapan memnuniyetsiz talep yüzdesini ifade etmektedir. Bu çalışmada ele alınan dört durumun hepsinde, geliştirilen ASD algoritması ile tüm seyahat talebini karşılamak için yalnızca bir aktarma (d_1) ile gerçekleşmiştir. Ayrıca, en iyi rota setlerinde, karşılanamayan talep (d_{un}) 0.00 değeriyle tanımlanmıştır ve tüm durumlar için geliştirilen ASD algoritması tarafından oluşturulan rota kümelerinin oldukça başarılı olduğu görülmektedir.

Tablo 4.2: Mandl ağının karşılaştırma sonuçları.

Rota Sayısı	Parametreler	Mandl	YZ	GA	AK	ASD
4	d_0	69.94	n/a	86.86	80.48	89.78
	d_1	29.93	n/a	12.00	12.84	10.22
	d_2	0.13	n/a	1.14	0.00	0.00
	d_{un}	0.00	n/a	0.00	6.68	0.00
6	d_0	v/y	78.61	86.04	87.73	94.245
	d_1	v/y	21.39	13.96	12.27	5.755
	d_2	v/y	0.00	0.00	0.00	0.00
	d_{un}	v/y	0.00	0.00	0.00	0.00
7	d_0	v/y	80.99	89.15	90.62	92.51
	d_1	v/y	19.01	10.85	9.38	6.08
	d_2	v/y	0.00	0.00	0.00	0.00
	d_{un}	v/y	0.00	0.00	0.00	0.00
8	d_0	v/y	79.97	90.38	91.91	93.17
	d_1	v/y	20.03	9.62	8.09	6.83
	d_2	v/y	0.00	0.00	0.00	0.00
	d_{un}	v/y	0.00	0.00	0.00	0.00

NOT : v/y: veri yok, **Mandl:** Sezgisel (Mandl 1980), **YZ:** Yapay zeka (Baaj ve Mahmassani 1991), **GA:** Genetik Algoritma (Chakroborty ve Wivedi 2002), **AK:** Arı kolonisi Algoritması (Nikolić, M. ve Teodorović, D. 2013), **ASD:** Geliştirilen ASD Algoritması (Mandl).

Çalışmada 8'den fazla düğüm noktasının olduğu durumlarda aktarmasız seyahat yüzdesi değerinin arttığı gözlemlenmiş ve aktarma ile daha kısa seyahat süresi ile gidecekken doğrudan aktarmasız daha uzun sürede yolculuk yaptıkları gözlemlenmiştir. Rota uzunluğunun artırılması ulaşım hizmetinin kalitesini iyileştirmek için yeterli değildir.

Mandl ağı için ToTaRO modelinin validasyonu yapıldıktan sonra, belirlenen rotalara yolcu ataması yapılmıştır. Atama yapılırken aşağıdaki varsayımlar kabul edilmiştir.

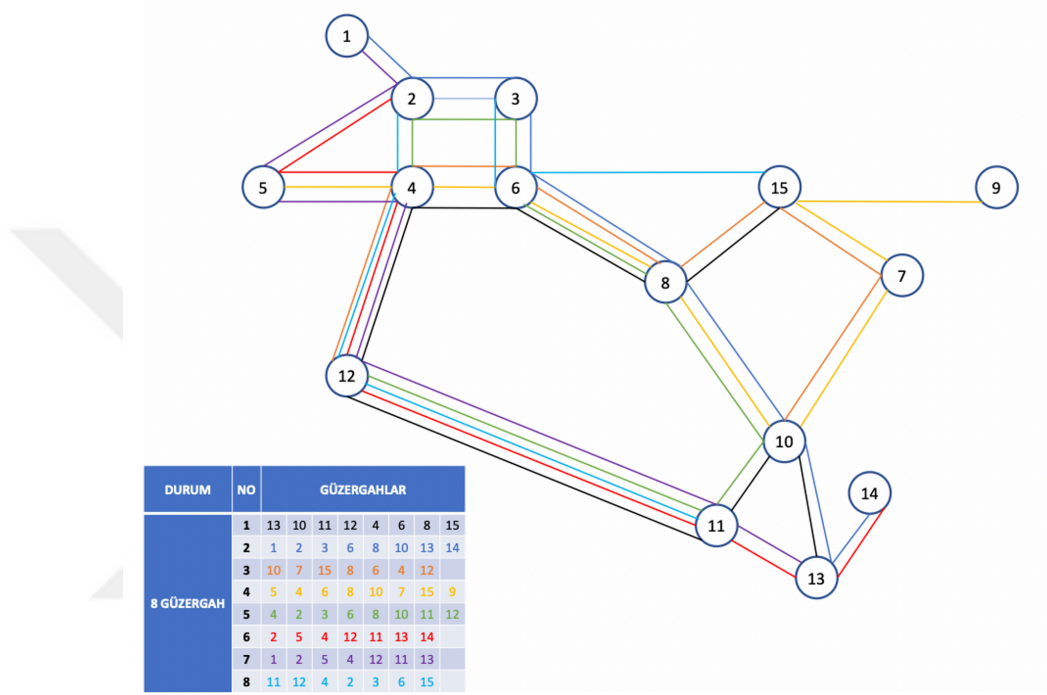
- Uygun bir rota kümesi elde edildikten sonra bunun değerlendirilmesi için talebin, verilen çift, düğüm veya aktarmalara bakılmaksızın, mümkün olan en kısa yoldan karşılandığı kabul edilmiştir.
- Aktarmasız seyahatlerde yolcu ataması yapılırken, yolcuların seyahat süreleri en kısa seyahat süresinin %50'sinden yüksek olan yolları dikkate almadığı kabul edilmiştir. Yolcu ataması yapılırken kalan seyahatler arasında “sefer sıklığı paylaşım” kuralına göre atama yapılmıştır.
- Tek aktarmalı seyahatlerde yolcu ataması yapılırken, yolcuların seyahat süreleri yüksek olan yolları dikkate almadığı kabul edilmiştir. Seyahat süresi hesaplandıktan sonra, tek aktarmalı seyahatlerde en kısa seyahat süresinin %10'unu geçen seyahatler iptal edilmiş, kalan seyahatler arasında “sefer sıklığı paylaşım” kuralına göre atama yapılmıştır.
- Başlangıç noktası ve aktarma noktası aynı ise yine “sefer sıklığı paylaşım” kuralı uygulanmıştır. Eğer başlangıç noktası ve aktarma noktası farklı ise eşit oranda dağıtılmıştır.

Mandl ağı ile model doğrulamasının karşılaştırılmasından sonra 4 durum için elde edilen rota setlerine yolcu ataması yapılarak toplam seyahat süreleri elde edilmiştir. Elde edilen değerlere Tablo 4.3'de yer verilmiştir.

Tablo 4.3: ToTaRO modeli ile Mandl ağı sonuçları.

Durum	Rota Sayısı	Sefer Sıklığı	Rotalar (Mandl)	Toplam Seyahat Süresi	Araç içi Seyahat Süresi	Bekleme Süresi	Aktarma Ceza Süresi
I	4	39 63 13 60	1 2 4 12 11 13 14 9 3 2 5 4 6 8 10 11 11 10 7 15 9 1 2 3 6 8 10 11 12	207.277	185.117	14.180	7.980
II	6	19 27 25 36 21 23	3 2 4 6 8 15 7 1 2 5 4 6 8 15 9 1 2 4 12 11 13 14 10 10 7 15 6 4 12 11 13 5 2 3 6 15 7 10 14 9 15 6 8 10 11 13 14	212.698	188.235	19.983	4.480
III	7	17 33 34 25 23 16 30	5 2 3 6 8 15 7 1 2 4 6 8 10 7 15 1 2 4 12 11 10 14 13 3 6 8 10 7 15 9 11 13 10 8 6 4 12 4 5 2 3 6 8 15 9 5 4 6 8 15 7 10 14	198.410	175.188	18.482	4.740
IV	8	23 33 25 30 33 8 10 14	13 10 11 12 4 6 8 15 1 2 3 6 8 10 13 14 10 7 15 8 6 4 12 5 4 6 8 10 7 15 9 4 2 3 6 8 10 11 12 2 5 4 12 11 13 14 1 2 5 4 12 11 13 11 12 4 2 3 6 15	189.728	164.150	20.258	5.320

Tablo 4.3 incelendiğinde 4 durum için rota setlerinin araç içi seyahat süreleri, bekleme süresi ve aktarma ceza sürelerinin elde edildiği görülmektedir. Aktarma ceza süresi olarak her aktarma için 5 dakika süre eklenmiştir. Bu üç sürenin toplamı toplam seyahat süresini vermektedir. En iyi seyahat süresinin 8 rota setine sahip olan 4. durumda elde edildiği görülmektedir. Şekil 4.3’de bu rotanın Mandl ağındaki durumu verilmiştir.



Şekil 4.3: ToTaRO modeli ile Mandl ağında elde edilmiş en iyi rota kümesi.

Elde edilen 8 rota için 3 yinelemeli adımda sefer sıklık değerleri belirlenmiş ve bu değerlere Tablo 4.4’de yer verilmiştir. Çalışmada sefer sıklık değerlerinin yinelemeli bir süreç ile belirlenmesi sağlanmaktadır. İlk olarak sefer sıklık değeri sabit 10 dakika girilmiştir. Çıktı değeri incelendiğinde -30 ile +220 arasında değişmiştir. İkinci adımda sefer sıklık değerlerinin, ilk çalışmadan çıkan çıktı değerleri girdi değerleri olarak girilmiş ve -10 ile +10 arasında değişmiştir. Son adımda ikinci adımdan çıkan çıktı değerleri girdi değeri olarak belirlenmiş ve değişiklik görülmemiştir. Bu durum sefer sıklık değerinin 3 adımda belirlenebildiğini göstermektedir.

Tablo 4.4: Sekiz rota için üç yinelemenin sefer sıklık sonuçları.

Rota Adı	1. Yineleme			2. Yineleme			3. Yineleme		
	Girdi Sıklık	Çıktı Sıklık	% değişim	Girdi Sıklık	Çıktı Sıklık	% değişim	Girdi Sıklık	Çıktı Sıklık	% değişim
G1	10	24	140	24	23	-10	23	23	0
G2	10	32	220	32	33	10	33	33	0
G3	10	26	160	26	25	-10	25	25	0
G4	10	29	190	29	30	10	30	30	0
G5	10	32	220	32	33	10	33	33	0
G6	10	7	-30	7	8	10	8	8	0
G7	10	10	0	10	10	0	10	10	0
G8	10	15	50	15	14	-10	14	14	0

Mandl ağının geliştirilen ASD algoritması ile çözümlenmesinin sonucunda gerçekleştirilen analizlerde aşağıda belirtilen temel bulgulara ulaşılmıştır:

- Rota çözümlerinin sayısı rota sapma faktörleri sınırlarını aşmamıştır.
- Aktarmaları dikkate alan rota seçim mantığına göre toplu taşıma ağına yolcu ataması yapıldığı ve en fazla bir aktarma ile çözüm üretilmiştir.
- Çözümlerin başarılı olduğunun bir göstergesi, doğrudan yolculukların yüksek oranda ve memnuniyetsiz yolculukların düşük oranda olduğu belirlenmiştir.
- Fizibilite kısıtlamalarına bakıldığında rotaların asgari işletme sefer sıklıkları, maksimum yük faktörü ve azami otobüs filosu dikkate alınmıştır.
- Toplu taşıma ağındaki tüm talepler karşılanmıştır.
- Toplu taşıma rota tasarımı ile sefer sıklığı değerleri iterasyonla belirlenirken yolcuların yolculuk süreleri düşmüştür.
- Toplu taşıma talebinin doğrudan bağlantılarla yani aktarmasız seyahatten memnun olanların yüzdesi yüksektir.
- Sefer sıklıklarının belirlenmesi ile mevcut otobüs sayısı dikkate alınarak yolcuların toplam yolculuk süresi ve otobüslerin yolcu sayısının fazla olmasından kaynaklanacak rahatsızlıklar azalmıştır.

4.5 Sonuçlar

Bu bölümde literatürde mevcut olan ve bu çalışmada gerçekleştirilen ToTaRO modeli verilmiştir. Geliştirilen ASD algoritmasının TTAT problemine uyarlanmış ve yolcu atama çözümü gerçekleştirilmiştir.

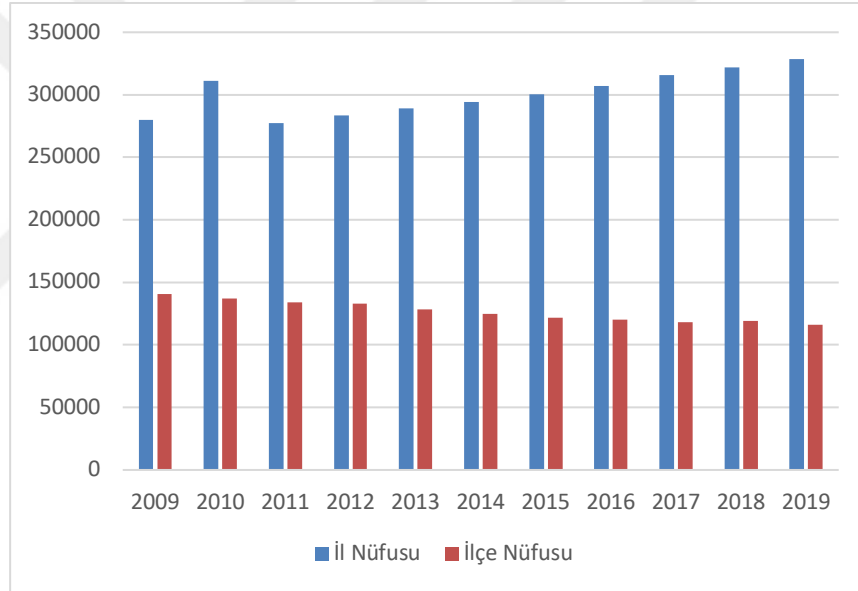
Bölüm 5’te ToTaRO ve rota seçim davranışının modellenerek yolcu atamasının yapıldığı örnek toplu taşıma ağları olan Mandl ve Isparta ağı ile ilgili detaylı bilgi verilerek sonuçlar anlatılmıştır.



5. ÖRNEK UYGULAMA

5.1 Isparta Toplu Taşıma Ağı Uygulaması

Isparta ili Akdeniz bölgesinin kuzeyinde, göller bölgesinde yer almaktadır. Kuzeyinde Afyon, güneyinde Antalya, batısında Burdur ve doğusunda Konya illeri ile çevrilmiştir. 8.276 km² yüzölçümüne sahip Isparta, 2019 Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre, 328.678 (%74) kişi il merkezinde 116.236 (%26) kişi ilçelerde olmak üzere toplam nüfusu 444.914'dür (TÜİK, 2020). 2009-2019 yılları arasındaki toplam nüfusun; il merkezindeki ve ilçelerdeki nüfus değişimleri Şekil 5.1'de verilmiştir.



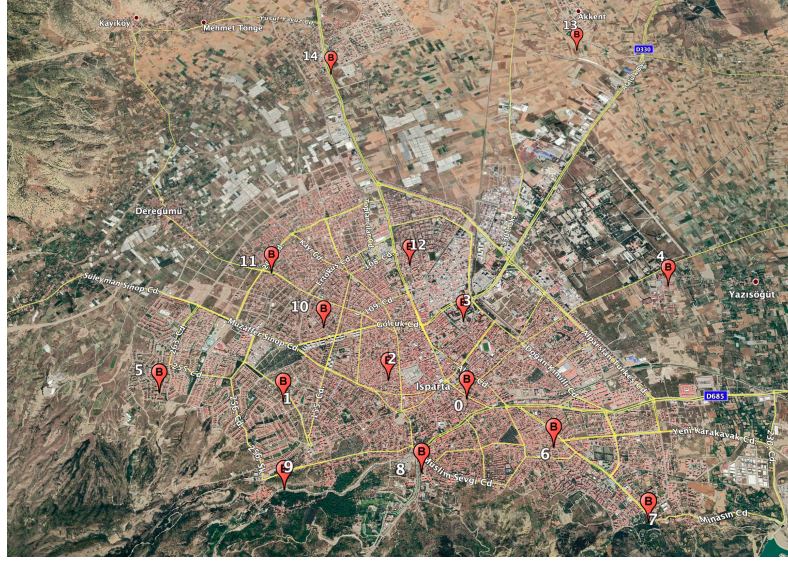
Şekil 5.1: Isparta ili, merkez ve ilçe nüfus dağılım grafiği.

Kırk dört mahallesi bulunan Isparta ili nüfus yoğunluğu 54 kişi/km²'dir. Bu veriler ışığında Tablo 5.1'de mahallelerin nüfus, yoğunluk ve km²'ye düşen kişi sayılarına yer verilmiştir. Isparta ili mahalle yüz ölçüm değerleri Isparta Belediyesi'nden alınmıştır.

Tablo 5.1: Isparta ili mahalle nüfus ve yüz ölçüm tablosu.

	Mahalle Adı	Nüfusu	Kişi/km²
1	Akkent	2.843	4945
2	Anadolu	7.304	4054
3	Ayazmana	6.224	3803
4	Bağlar	8.151	16534
5	Bahçelievler	7.188	10403
6	Batıkent	6.691	7149
7	Binbirevler	2.464	2597
8	Çelebiler	825	8871
9	Çünür	8.005	837
10	Davraz	19.980	2907
11	Dere	1.737	840
12	Doğancı	2.045	3760
13	Emre	3.976	2859
14	Fatih	11.946	6265
15	Gazi Kemal	1.162	12495
16	Gülcü	3.009	8622
17	Gülevler	2.649	6881
18	Gülistan	3.749	10357
19	Halıkent	6.971	16559
20	Halife Sultan	5.473	15461
21	Hızırbey	9.891	8911
22	Hisar	1.853	11163
23	Işıkkent	7.623	3499
24	İskender	1.622	12105
25	İstiklal	7.509	13703
26	Karaağaç	7.143	11945
27	Keçeci	1.304	3563
28	Kepeci	2.905	13205
29	Kurtuluş	1.063	11812
30	Kutlubey	357	3337
31	Mehmet Tönge	2.629	1143
32	Modern Evler	6.544	3139
33	Muzaffer Türkeş	3.612	3281
34	Pirimehmet	4.775	14128
35	Sanayi	1.171	182
36	Sermet	1.756	8825
37	Sidre	2.233	1774
38	Sülübey	1.211	8905
39	Turan	1.695	9212
40	Vatan	4.528	1658
41	Yayla	1.942	13034
42	Yedişehitler	12.831	14434
43	Yenice	1.228	1537
44	Zafer	7.449	7784

Isparta ilinde “Özel Halk Otobüsleri” firması tarafından hizmet verilen 32 Hat ve 536 durak bulunmaktadır. 94 otobüsün bulunduğu filo ile ortalama aylık 750.000 yolcu seyahatini gerçekleştirmektedir. Otobüslerin oturan yolcu kapasite değeri 31’dir. Ayrıca filo içerisindeki tüm araçlar engelli uyumludur.



Şekil 5.2: Isparta ili için belirlenen düğüm noktaları.

Isparta toplu taşıma ağı yolcu üretim ve çekim noktaları ağı yansıtabilecek şekilde 15 yolcu üretim ve çekim noktası ve 19 bağlantıya sahiptir (Şekil 5.2). Yolculuk talep verileri elektronik seyahat kartı sisteminden elde edilen gerçek verilere dayanmaktadır. Her yolculuk için başlama zamanı, konum ve başlangıç durağı bilgileri bulunmaktadır. Tablo 5.2’de Isparta ili mevcut rotalar verilmiştir. Bu rotalara ait aktarmasız seyahat eden yolcu yüzdesi 78.63’tür ve Toplam Seyahat Süresi (TSS) 314.640 (dakika)’dır.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında Isparta il merkezi için geliştirilmiş ASD algoritmasına göre yeniden rotalar oluşturulmuştur. Isparta ilinde toplu taşıma ağı tasarımını yapmak için aşağıdaki parametreler kabul edilmiştir.

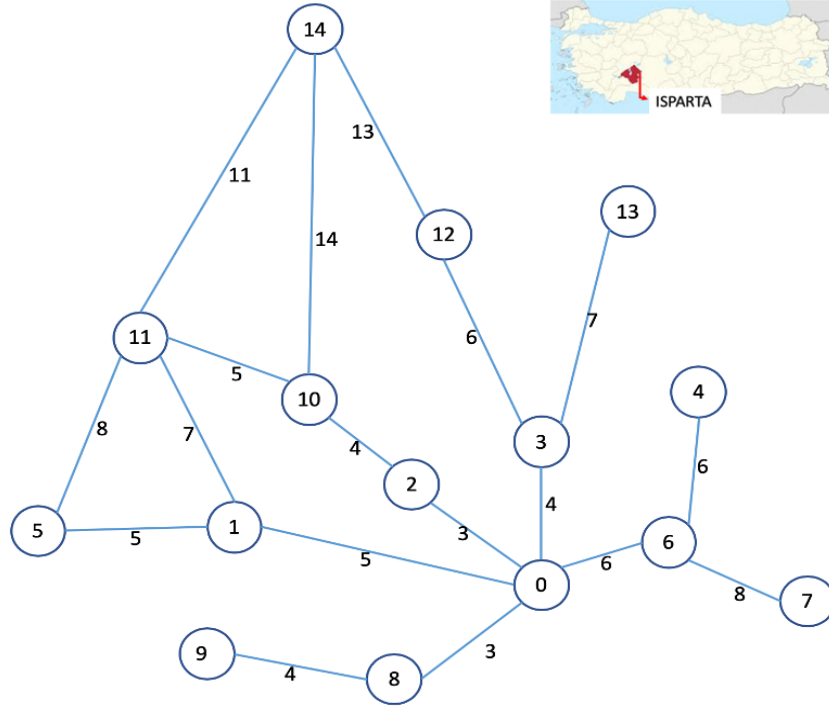
- Her otobüste koltuk sayısı: 31.
- Maksimum yük faktörü: 1.25.
- Bekleme süresi ceza çarpanı: 5.
- Rotadaki minimum düğüm sayısı: 3.
- Rotadaki maksimum düğüm sayısı: 10.

ToTaRO Modelinin uygulanabilmesi için Isparta ili toplu taşıma sisteminin seçiminde, hizmetin götürüleceği bölge ve bu bölgedeki mevcut tüm özellikler dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında, Isparta ili toplu taşıma ağı tasarımı ve sefer sıklıkları belirlenerek, belirlenen ağlara yolcu ataması yapılmıştır.

Tablo 5.2: Isparta ağı mevcut rotalar.

NO	ROTA NO: ROTA ADI
1	Rota No:1 Fatih Mahallesi
2	Rota No:2 Anadolu Modernevler
3	Rota No:3 Gülistan Mahallesi
4	Rota No:4 S.D.Ü Batı Yerleşkesi
5	Rota No:5 Işıkkent-Borsa
6	Rota No:6 M.Türkeş-Eda Sit. Işıkkent
7	Rota No:7 Yedişehitler – Otogar
8	Rota No:8 Tıp Fakültesi
9	Rota No:9 Çünür Toki Mahallesi
10	Rota No:10 Işıkkent-Çelik-Anadolu Çıraklık
11	Rota No:11 Hızırbey-Ufuktalebe-Anadolu
12	Rota No:12 S.D.Ü Doğu Yerleşkesi
13	Rota No:13 Halıkent-Çarşı
14	Rota No:14 Halıkent-Yıldızhan Hattı
15	Rota No:15 Dere Mahallesi , Vatan Mahallesi
16	Rota No:16 Emre Mahallesi
17	Rota No:17 Işıkkent-Gölyaş-Halıkent Telekom
18	Rota No:18 Mehmet Tönge Mahallesi
19	Rota No:19 Köy Garajı-Çarşı
20	Rota No:20 Şehir Hastanesi
21	Rota No:21 Yedişehitler Mevlana Hattı
22	Rota No:25 Sermet Mahallesi
23	Rota No:29 Davraz Mahallesi
24	Rota No:30 Zafer Mahallesi Hattı
25	Rota No:31 Halıkent – Hanifesultan Hattı
26	Rota No:32 Fatih Mahallesi Hattı
27	Rota No:33 Oktaypetrol Çevreyolu Hattı
28	Rota No:34 Köy Garajı – Gülistan
29	Rota No:35 Köygarajı – Işıkkent – Batıkent
30	Rota No:36 Akkent – 1001 Evler Hattı
31	Rota No:46 Batıkent – S.D.Ü – Doğu – Batı Yerleşkesi – Tıp Fakültesi
32	Rota No:47 Halıkent – S.D.Ü Doğu – Batı Yerleşkesi – Tıp Fakültesi

Şekil 5.3’de yolcu üretim ve çekim noktası arasındaki rakamlar süreyi (dakika) ifade etmektedir. 15 yolcu üretim ve çekim noktası arasındaki talep matrisi Tablo 5.3’de verilmiştir.



Şekil 5.3: Isparta ili toplu taşıma ağ yapısı.

Tablo 5.3: Isparta ağı talep matrisi.

<i>B-V</i>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	<i>Toplam</i>
0	0	300	800	340	160	300	140	40	60	400	60	140	60	0	1700	4500
1	300	0	80	40	20	360	880	880	20	40	20	100	20	40	40	2840
2	800	80	0	240	40	60	180	180	20	20	40	20	20	20	60	1780
3	340	40	240	0	100	200	100	100	20	80	80	40	20	20	0	1380
4	160	20	40	100	0	100	40	20	20	40	40	20	20	0	20	640
5	300	360	60	200	100	0	200	200	20	20	20	20	20	20	40	1580
6	140	880	180	100	40	200	0	100	20	20	60	20	20	20	180	1980
7	40	880	180	100	20	200	100	0	20	20	140	0	140	0	460	2300
8	60	20	20	20	20	20	20	20	0	280	40	20	40	20	20	620
9	400	40	20	80	40	20	20	20	280	0	40	20	20	20	60	1080
10	60	20	40	80	40	20	60	140	40	40	0	140	180	20	20	900
11	140	100	20	40	20	20	20	0	20	20	140	0	20	20	60	640
12	60	20	20	20	20	20	20	140	40	20	180	20	0	20	720	1320
13	0	40	20	20	0	20	20	0	20	20	20	20	20	0	20	240
14	1700	40	60	0	20	40	180	460	20	60	20	60	720	20	0	3400
<i>Toplam</i>	4500	2840	1780	1380	640	1580	1980	2300	620	1080	900	640	1320	240	3400	25200

Eşitlik (4.1)'de verilen ve geliştirilen ToTaRO modeli incelendiğinde yolcu (P1) ile işletme ve çevre (P2) ağırlık parametrelerinin modele etkisini matematiksel olarak ortaya koymak için Pareto analizine ihtiyaç duyulmuştur. Pareto analizi parametreler arasında optimal değerlendirmeyi yapabilen bir analiz yöntemi olduğundan bu çalışmada objektif ağırlıklarının modele etkisini belirlemek, oranlarını ve önem derecelerini görmek için Pareto analizi ile çözüm yapılmış, Bölüm 5.1.1'de detaylarıyla açıklanmıştır.

5.1.1 ToTaRO modeli parametre seçimi

TTAT probleminin çok amaçlı objektif doğasını değerlendirmek için; ToTaRO modelinde kullanılan yolcu (P1) ile işletme ve çevre (P2) maliyetleri arasındaki etkileşimi gösteren Pareto çözümleri analiz edilerek objektif ağırlıkların optimal değerleri belirlenmiştir.

Pareto analizi 1886 yılında İtalyan ekonomist tarafından yapılan çalışma ile formüle edilerek ortaya konulmuştur (Pareto 1886). Pareto analizi, bir problemin önemli sebeplerini nispeten daha önemsiz sebeplerden ayırmak için gelir dağılımının eşit olmadığını göstermek amacıyla kullanılan bir çubuk diyagramı esasına dayanmaktadır. Pareto gözlemine göre, olaylarda sonuçların %80'ini nedenlerin %20'sinden kaynaklandığı 80/20 kuralı uygulamıştır. İtalyan ekonomistin gözlemine göre, İtalya'nın bütün gelirinin %80'ine İtalyan nüfusunun %20'si sahiptir. Bu duruma ek olarak bir mağaza incelemesinde satış hacminin %80'ini müşterilerin %20'sinin oluşturduğu gözlemlenmiştir (Pareto 1987).

Talbi (2009)'nin çalışmasında çok amaçlı problemler için en uygun çözümün Pareto analizi olduğu ve Pareto analizinin problem için bir dizi optimal çözüm sunduğu görülmüştür. Belirli bir hedefi iyileştirmek mümkün değilse Pareto analizi en azından bir amacı bozmadan optimal bir çözüm sunmaktadır. Çözüm setleri farklı tutarsız hedefler arasındaki çözüm uyumsuzluğunu temsil etmektedir. Ceylan ve Özcan (2018), çalışmalarında farklı çatışan hedefler arasındaki uzlaşma çözümlerini temsil eden TTAT problemi için Pareto optimal çözümleri olarak bilinen bir dizi Pareto optimal çözüm kümesi ile Pareto sınırı belirlemiş ve parametre ağırlıkları hesaplamıştır.

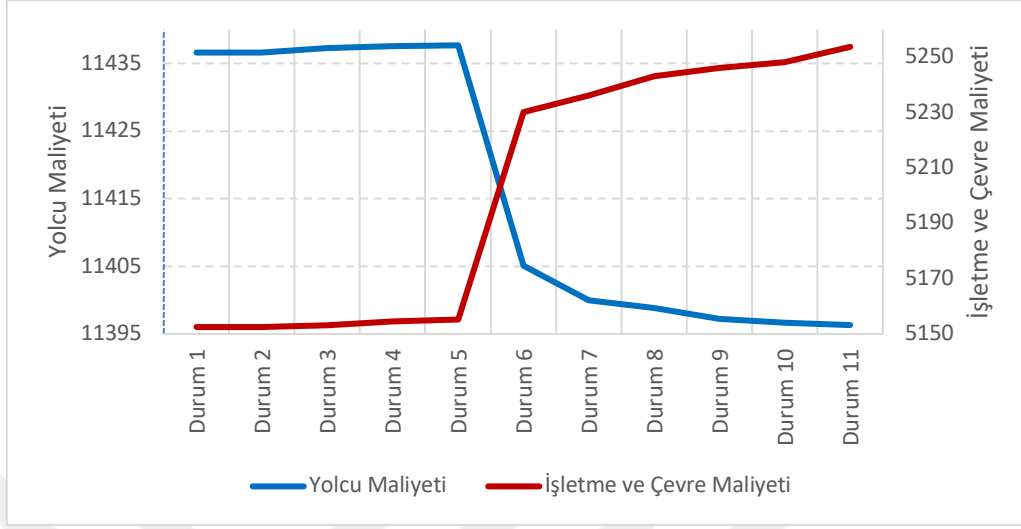
ToTaRO modelinde çok amaçlı problem, kullanıcı maliyet ağırlığı (P1) ile işletme ve çevre maliyet ağırlığı (P2) arasındaki etkileşim, 11 farklı ağırlık değeri uygulanarak çözülmüştür. Hedef ağırlıkların optimal değerleri belirlendikten sonra, ToTaRO modeli hem uzaklaşma mesafesi hem de ofset değişkenleri dikkate alınarak ağa uygulanmıştır.

Tablo 5.4: ToTaRO modeli uygulama sonuçları.

Durum	Ağırlıklar		Yolcu Maliyeti (Dakika)	İşletme ve çevre maliyeti (Km)	Amaç değeri	Seyahat süresindeki değişiklik (yüzdeler oran)	Servis km değerindeki değişiklik (yüzdeler oran)
	P1	P2					
1	0.0	1.0	11436.64	5152.52	5152.52	0.0	0.0
2	0.1	0.9	11436.64	5152.52	5780.93	0.0	0.0
3	0.2	0.8	11437.23	5153.18	6409.99	0.005	0,01
4	0.3	0.7	11437.55	5154.46	7039.387	0.002	0.02
5	0.4	0.6	11437.67	5155.27	7668.23	0.001	0.01
6	0.5	0.5	11405.12	5230.1	8317.61	-0.284	1.45
7	0.6	0.4	11399,99	5236.24	8934.49	-0.044	0.11
8	0.7	0.3	11398.86	5243.12	9552.13	-0.009	0.13
9	0.8	0.2	11397.22	5246.03	10166.98	-0.01	0.05
10	0.9	0.1	11396.71	5248.3	10781.81	-0.004	0.04
11	1.0	0.0	11396.32	5253.75	11396.32	0.0	0.0

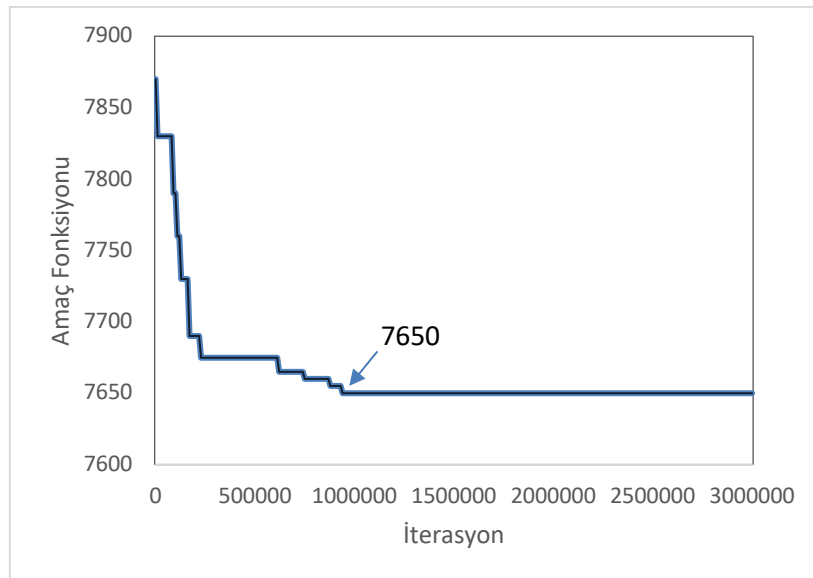
Tablo 5.4'de pareto çözümü incelenen 11 durum verilmiştir. Burada; P1 ağırlığı 0'dan başlayarak 1.0'e kadar 0.1 adım ağırlığı ile artarken, P2 değeri 1.0'dan başlayarak 0 değerine 0.1 adım ağırlığı ile azaltılmıştır. P1 ve P2 ağırlık değişimlerine karşılık gelen; yolcu maliyeti, işletme ve çevre maliyeti, amaç fonksiyon değeri, seyahat süresindeki değişkenler ve servis km değerindeki değişkenler belirlenmiştir. P1 ve P2 ağırlıkları incelendiğinde, objektif ağırlıkların $P1 = 0$ ve $P2 = 1,0$ olduğu durum 1 için yolcu maliyetinin yaklaşık 11437 (dakika), işletme ve çevre maliyetinin yaklaşık 5153 (km) olduğu görülmektedir. $P1 = 1.0$ ve $P2 = 0$ olan son durumda (durum 11) yolcu maliyetinin 11397 (dakika)'ya azalırken, işletme ve çevre maliyetinin 5254 (km)'ye yükseldiği görülmektedir. Pareto analizi sonucunda durum 11, durum 1'e göre karşılaştırıldığında da yolcu maliyeti %35, işletme ve çevre maliyetinin yaklaşık %2 iyileştiği bulunmuştur. Her iki objektif değerdeki değişimler incelendiğinde yolcu maliyet düşüşünün; 0,28, işletme ve çevresel maliyet artışının; 1,45 olduğu 5. durumdan sonra görülmektedir. Durum 5 önerilen en uygun çözüm olarak kabul edilmiştir. P1 ve P2 ağırlıkları için en uygun değerler sırasıyla; 0,40 ve 0,60 olarak alınmıştır.

Şekil 5.4’de her iki durum işlevi için Pareto etkili çözümleri gösterilmektedir. Bu ağırlıkların fonksiyondaki maliyet değerlerine etkisi analiz edilmiştir.



Şekil 5.4: İki amaç için Pareto analizi.

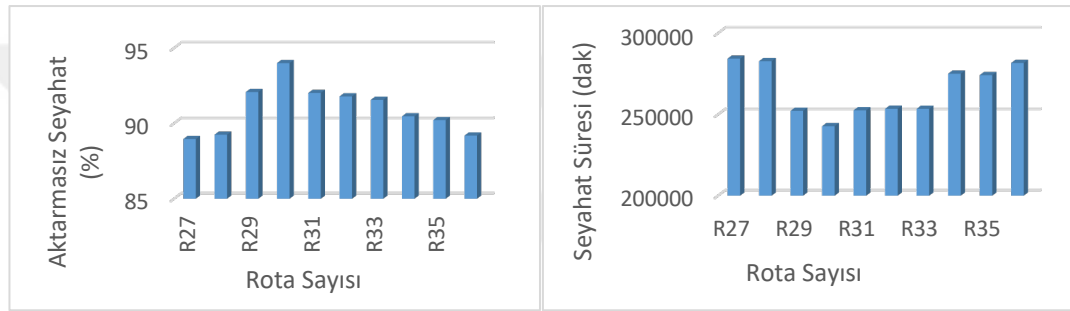
ToTaRO modeli çözüm sürecinin yakınsama grafiği Şekil 5.5’de verilmiştir. ToTaRO modeli yaklaşık 9.4×10^5 iterasyondan sonra amaç fonksiyon değeri olarak 7650 sabit yakınsama değeri elde edilmiştir. ToTaRO modeli stabilitesini göstermek için, model farklı başlangıç değerleri ile çalıştırılarak 3×10^6 iterasyon yapılmıştır. İterasyon sonucunda minimum, maksimum ve ortalama amaç fonksiyon değerleri sırasıyla 7650, 7870 ve 7663 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5.5: ToTaRO modeli yakınsama grafiği.

Şekil 5.5’de verilen ToTaRO modeli yakınsama grafiği incelendiğinde amaç fonksiyonu 7850’den 2.3×10^5 iterasyon sonucu 7675 değerine inerek yaklaşık %2 iyileşme sağlamıştır. Toplam iyileşme yaklaşık %3 olarak bulunmuştur. İterasyonların yaklaşık %31’i ile optimum amaç fonksiyon değerine ulaşılırken, standart sapma 3.56 olarak hesaplanmıştır.

Şekil 5.6’da 27-36 rota seti için seyahat süresi yüzdeleri incelendiğinde aktarmasız seyahat süresi yüzdesinin 30. rota için en yüksek olduğu ve seyahat süresinin de en düşük olduğu gözlemlenmiştir. Bu nedenle toplu taşıma ağ tasarımında 30 rota ile çözüm yapılmasının uygun olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 5.6: 27 ve 36 rota setleri için aktarmasız seyahat yüzdesi ve seyahat süresi değişimi.

TTAT problem çözümünün analizinde sefer sıklık değeri toplu taşıma yolcu rota seçim davranışının modellenmesinde önemli bir parametredir. Bu nedenle ToTaRO modeli sonucu elde edilen rotaların sefer sıklık değerleri yinelemeli bir süreç ile elde edilmiştir.

Tablo 5.5’de 30 rota için üç yinelemede sefer sıklığı değerlerinin değişim yüzdeleri gösterilmektedir. Üçlü yinelemenin sonuçları incelendiğinde; ilk yineleme için, tüm giriş veri yolu sefer sıklıkları isteğe bağlı olarak 10 dakika olarak belirlendi; Sonraki yinelemede, sefer sıklığı girdisi, daha önceki yineleme çıkış sefer sıklıkları olarak seçilmiştir. Birinci yinelemeden sonra çıkış sefer sıklıkları, 30 rotadan 9’unda 10 ve altında, diğer 11 rotada 10 ila 20 ve kalan 10 rotada 20’den fazladır. İkinci yinelemeden sonra, 30 rotadan sadece 7’sinde hala 10’un altında, diğer 9 rotada da 10 ila 20 arasında ve kalan 14 rotada 20’nin üstündedir. Son ve üçüncü yineleme sonucunda giriş sefer sıklığı ile çıkış sefer sıklığı arasındaki fark sıfırdır. Sonuçlar incelendiğinde aktarmasız yolcu yüzdesinin 1. yinelemede yaklaşık %96, 2.

yinelemede yaklaşık %94, 3. yinelemede ise yaklaşık %94 karşılandığı görülmektedir. Bunun nedeni, yolcu atama mantığına göre, seyahat süresinin kısalması nedeniyle doğrudan seyahat etmek yerine aktarmalı seyahatlere atama yapılmasıdır.

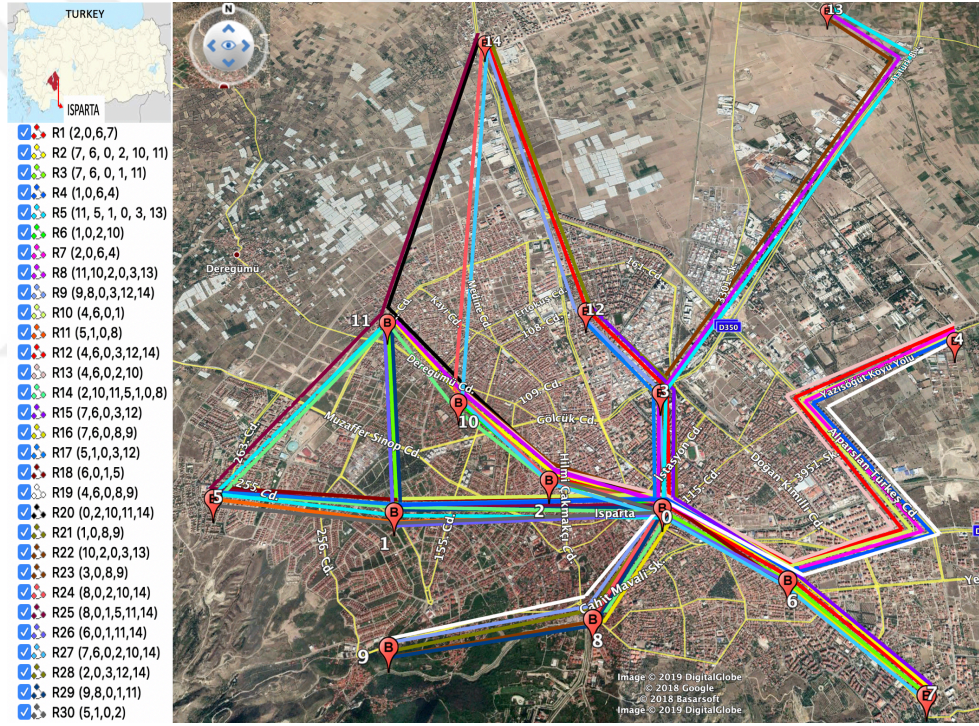
Tablo 5.5: 30 rota için sefer sıklığı değişimi.

Rota No	1. Yineleme			2. Yineleme			3. Yineleme		
	Giriş Sıklık	Çıkış Sıklık	% değişim	Giriş Sıklık	Çıkış Sıklık	% değişim	Giriş Sıklık	Çıkış Sıklık	% değişim
R1	10	9	-10	9	6	-33.33	6	6	0
R2	10	19	90	19	22	15.78	22	22	0
R3	10	38	280	38	41	7.89	41	41	0
R4	10	7	-30	7	3	-57.14	3	3	0
R5	10	24	140	24	24	0	24	24	0
R6	10	12	20	12	12	0	12	12	0
R7	10	8	-20	8	6	-25	6	6	0
R8	10	20	100	20	19	-5	19	19	0
R9	10	45	350	45	45	0	45	45	0
R10	10	20	100	20	23	15	23	23	0
R11	10	18	80	18	18	0	18	18	0
R12	10	10	0	10	12	20	12	12	0
R13	10	14	40	14	15	7.14	15	15	0
R14	10	31	210	31	30	-3.22	30	30	0
R15	10	15	50	15	15	0	15	15	0
R16	10	10	0	10	10	0	10	10	0
R17	10	22	120	22	22	0	22	22	0
R18	10	21	110	21	23	9.52	23	23	0
R19	10	9	-10	9	9	0	9	9	0
R20	10	42	320	42	43	2.38	43	43	0
R21	10	8	-20	8	5	-37.5	5	5	0
R22	10	18	80	18	17	-5.55	17	17	0
R23	10	9	-10	9	5	-44.44	5	5	0
R24	10	42	320	42	42	0	42	42	0
R25	10	39	290	39	39	0	39	39	0
R26	10	51	410	51	54	5.88	54	54	0
R27	10	60	500	60	62	3.33	62	62	0
R28	10	45	350	45	45	0	45	45	0
R29	10	6	-40	6	11	83.33	11	11	0
R30	10	19	90	19	18	-5.26	18	18	0
Toplam talep: 25200 seyahat									
Aktarmasız Talep Yüzdesi			95.73	93.91			93.8		
Tek Aktarmalı Talep Yüzdesi			4.27	6.09			6.2		
2 Aktarmalı Talep Yüzdesi			0	0			0		
Karşılanamayan Talep			0	0			0		
Toplam Seyahat Süresi (dak)			326087	249519			248208		
Araç içi Seyahat Süresi (dak)			239449	211002			210438		
Bekleme Süresi (dak)			81258	30847			29960		
Ağ aktarma süresi (dak)			5380	7670			7810		

Tablo 5.5’de verilen 1. ve 3. yineleme sonuçları incelendiğinde; araç içi seyahat süresinin 1. yinelemeye göre yaklaşık % 24 azaldığı; bekleme süresinin de 1. yinelemeye göre yaklaşık % 63 azaldığı; aktarma süresinin ise % 45 civarında arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sonucunda toplam seyahat süresinin değişimi

gözlemlendiğinde yaklaşık % 24'lük bir azalmanın olduğu görülmektedir. Bu durum doğru sıklık değerlerinin elde edilmesinin seyahat süresini azalttığını ve yolcuların doğrudan uzun seyahatler yerine aktarmalı daha kısa seyahatleri tercih ettiğini göstermektedir.

Isparta ağı için geliştirilmiş ASD algoritması ile oluşturulan 30 rotada sefer sıklığı değeri belirlendikten sonra yapılan yolcu ataması sonucunda, toplu taşıma talep matrisi için, yaklaşık %94'ü aktarmasız, %6'sı bir aktarma ile hizmet almış ve toplam seyahat süresi 248.208 (dakika) olarak elde edilmiştir. İki aktarma ve memnuniyetsiz aktarma yüzdesi sıfır olarak bulunmuştur. Şekil 5.7'de ToTaRO modeli sonucu oluşturulan Isparta toplu taşıma hatları görülmektedir.



Şekil 5.7: Isparta ili toplu taşıma rotaları.

Şekil 5.7'de “0. düğüm noktası” Isparta il merkezinde bulunan ana yolcu üretim ve çekim noktasını temsil etmektedir. Diğer her bir numaralandırılmış alan yolcu üretim ve çekim noktalarını ifade etmektedir.

Bu bölümde TTAT problemlerinin çözümü için önerilen geliştirilmiş ASD algoritması, Isparta ağına uygulanarak sonuçlar verilmiştir. Geliştirilmiş ASD algoritması metodu ile TTAT çözümünün Isparta toplu taşıma ağı için olumlu sonuç

vermiştir. Hesaplamalar sonucunda Isparta ağında mevcut seyahat süresi 314.640 dakika iken, geliştirilmiş ASD algoritması sonucu belirlenen yeni rota setlerinin toplam seyahat süresinin 248.208 dakikaya düştüğü görülmektedir. Atanamayan talep bulunmamaktadır. Bu noktada amaç, yolculara kısa seyahat süreleri sağlayan ve gerekli otobüs sayısını sınırlamak için aşırı derecede uzun olmayan bir toplu taşıma ağı elde etmektir. Isparta toplu taşıma ağı üzerinde yapılan çalışmada, geliştirilmiş ASD yaklaşımının yüksek kaliteli çözümler üretebileceği doğrulanmıştır.



6. SONUÇ VE ÖNERİLER

6.1 Giriş

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

6.2 Sonuçlar

Bu çalışmada TTAT problemlerinin ana prensipleri, matematiksel formülasyonları ve önceki çalışmalar verilmiştir. TTAT problemi ile ilgili literatürde birçok çalışma olup birbirinden farklı birçok çözüm üretilmektedir. Bu kapsamda TTAT ile ilgili son yıllarda yapılan çalışmalarda sezgisel metotlar ile probleme çözüm arandığı ve problemi çözmeye sezgisel yöntemlerin oldukça başarılı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada TTAT probleminin çözümü için ASD algoritması geliştirilmiştir. TTAT problemi çözümü için ToTaRO modeli önerilmiştir. Ayrıca çalışmada toplu taşıma ağı, rota tasarımı yapılarak hizmet seviyesinin yükseltilmesine katkı sağlamak amacıyla ASD çözüm algoritması geliştirilmiştir. Geliştirilen ToTaRO modeli Mandl ve Isparta toplu taşıma ağlarına uygulanmış ve cesaret verici sonuçlar bulunmuştur.

Mandl çalışmasında kullandığı sezgisel algoritma ile 4 rota dizisi için yaklaşık %70 aktarmasız seyahat elde ederken, geliştirilen ASD algoritması ile %90 aktarmasız seyahat ile çözüm gerçekleştirilmiştir. Mandl’ın çalışmasında kullandığı sezgisel algoritmaya göre geliştirilen ASD algoritması toplu taşıma ağına doğrudan seyahatlerde %28 iyileştirme sağlamıştır.

Literatürde mevcut olan ve TTAT problemlerinin çözümünde önerilen modeller incelenmiş, TTAT ’da anahtar rol oynayan parametrelerin analizleri, analiz sonuçları, geliştirilen ASD algoritması ile ToTaRO yöntemi, matematiksel model ve rota seçim davranışının modellenmesiyle yolcu ataması ile elde edilen sonuçlara yer

verilmiştir. Geliştirilen ASD algoritması TTAT problemlerine uyarlanmış ve atama çözümü için algoritma önerilmiştir.

ToTaRO için önerilen matematiksel modelin yolcu ile işletme ve çevre maliyetlerini dengeleyen parametre ağırlıklarının bulunmasında Pareto analizinden yararlanılmıştır. Pareto duyarlılık analizi sonucunda modelin ağırlık parametre değerinin yolcu için 0.4, işletme ve çevre için 0.6 alınması durumunda optimum performansı gösterdiği bulunmuştur. Pareto analizi sonucunda yolcu maliyeti %35, işletme ve çevre maliyeti yaklaşık %2 iyileşmiştir. Bu çalışmada elde edilen değerler; sisteme etki eden parametrelerin belirlenmesi ve değerlendirilmesi, gereksiz yapılacak yatırımların önüne geçerek işletme açısından ekonomik katkı sağlayacaktır. Örneğin sefer sıklığının gereksiz yere artırılması işletme açısından masraflara neden olurken trafiği de olumsuz etkileyecektir. Bir diğer örnek ise durak sayısının artırılmasıdır. Durak sayısının artması ile otobüsün durma ve kalkmada harcadığı yakıt miktarı artacak, aynı zamanda bu durum seyahat süresinin artmasına neden olacak ve trafiği de olumsuz yönde etkileyecektir.

TTAT analizi için gerçekleştirilen yolcu atama sürecinde, yolcu rota seçim mekanizması sefer sıklığı paylaşım kuralına göre modellenmiş ve algoritma adımları bu kurala göre oluşturulmuştur. Model örnek ağlara uygulanmış ve talebin tamamının karşılandığı sonucu elde edilmiştir. Rota seçim davranışının modellendiği atama algoritması sonucu belirgin avantajlara sahip olmasından ToTaRO modeli için kullanılmıştır.

Toplu taşıma ağ tasarımı problemi için geliştirilen ASD algoritması ile elde edilen sonuçlar, literatürdeki diğer optimizasyon yaklaşımları ile açıkça rekabet ettiğini göstermektedir.

TTAT problemi çözümü için oluşturulan modelin yolcu, işletme ve çevre maliyetlerinin mevcut otobüs rotasına göre sırası ile %9 ve %6 oranında azaltılabileceği belirlenmiştir. Ağırlıklarının optimal değerleri belirlendikten sonra önerilen model, sefer sıklığı değerleri dikkate alınarak ağa uygulanmıştır. Sonuçta, ToTaRO modeli mevcut ağı aktarmasız seyahatlerde yaklaşık %17, toplam seyahat süresinde yaklaşık %30 iyileştirmiştir.

ToTaRO modeli yakınsama grafiği incelendiğinde ToTaRO modeli yaklaşık 9.4×10^5 iterasyondan sonra amaç fonksiyon değeri olarak 7650 sabit yakınsama değeri elde edilmiştir. ToTaRO modeli stabilitesini göstermek için, model farklı başlangıç değerleri ile çalıştırılarak 3×10^6 iterasyon yapılmıştır. İterasyon sonucunda minimum, maksimum ve ortalama amaç fonksiyon değerleri sırasıyla 7650, 7870 ve 7663 olarak elde edilmiştir. Ek olarak, amaç fonksiyonu 7850'den 2.3×10^5 iterasyon sonucu 7675 değerine inerek yaklaşık %2 iyileşme sağlamıştır. Toplam iyileşme yaklaşık %3 olarak bulunmuştur. İterasyonların yaklaşık %31'i ile optimum amaç fonksiyon değerine ulaşılırken, standart sapma 3.56 olarak hesaplanmıştır.

6.3 neriler

Bu alışma kapsamında geliştirilen ASD modeli Isparta toplu taşıma ağı için uygulanmış ve cesaret verici sonuçlar elde edilmiştir. Bu kapsamda; ToTaRO model kullanılarak daha kapsamlı ve karmaşık yapılardaki toplu taşımaların yer aldığı şehirlere uygulanabilir. Gelecekteki çalışmalarda, önerilen modele, farklı tür ve kapasitelerdeki otobüsler de dahil olmak üzere ortak bir filoyu dağıtabilen bir otobüs tahsis algoritması entegre edilerek çalışmalar yapılabilir.

Farklı duyarlılık analizi seçilerek bir araç için, rota yapılandırmasındaki, rota sefer sıklığı, otobüs oturma kapasitesi, aktarma cezası ve izin verilen maksimum rota yükleme faktörleri ile birlikte veya ayrı olarak değerlendirilebilir. Farklı yolcu rota seçim davranış mekanizmaları modellenerek yeni yolcu atama modelleri oluşturulabilir veya mevcut modellere bir parametre olarak eklenebilir.

Talep bilgilerinin kullanımında tasarım sürecinde çoklu kriterler dikkate alınarak bu çalışmadan elde edilen sonuç ve bulgular ile yapay zeka algoritmalarının öğrenme modellemesi gerçekleştirilebilir. ğrenme süreci gerçekleşmiş olan bir zeka ile toplu taşıma ağ tasarımı ve yolcu ataması verilecek olan parametrelere göre şehirler için otomatik olarak gerçekleştirilebilir. Bu alışma 21. Yüzyıl teknolojisinde ön plana çıkan yapay zeka algoritmalarını besleyecek ve endüstri 4.0'ı ile uyumlu gelecek nesil toplu taşıma alt yapılarını kurmak için çalışan öncelikle büyük şehir belediyelerine çözüm nerisi için temel teşkil edebilecektir.

7. KAYNAKLAR

Adleman, L.M., “Molecular computation of solutions to combinatorial problem”, *Science*, syf.1021–1023, (1994).

Afandizadeh, S., Khaksar, H., ve Kalantari, N., “Bus fleet optimization using genetic algorithm a case study of Mashhad”. *International Journal of Civil Engineering*, 11(1), 43-52, (2013).

Baaj, M. Hadi ve Mahmassani Hani S., “TRUST: A LISP program for the analysis of transit route configurations”, *Transportation Research Record* 1283.1990: 125-135, (1990).

Baaj, M.H. ve Mahmassani, H.S., “An AI-Based Approach for Transit Route System Planning and Design”. *Journal of Advanced Transportation*, 25, 187-209. <http://dx.doi.org/10.1002/atr.5670250205>, (1991).

Basem A. O., Alijla, B. O., Wong, L. P., Lim, C. P., Khader, A. T., ve Al-Betar, M. A., “A modified intelligent water drops algorithm and its application to optimization problems”, *Expert Systems with Applications* 41.15, 6555-6569, (2014).

Beirão, G., ve Cabral, J. S., “Understanding attitudes towards public transport and private car: A qualitative study”, *Transport policy*, 14(6), 478-489, (2007).

Birbil, I. ve Fang, S.C., “An electro-magnetism-like mechanism for global optimization”, *Journal of Global Optimization*, Vol. 25, syf.263–282, (2003).

Cerny, V., “Thermodynamical approach to the travelling salesman problem: And efficient simulation algorithm”, *Journal of Optimization. Theory and Applications*, 45, 41-55, (1985).

Ceder, A. ve Wilson N. H. M., “Bus network design”, *Transportation Research Part B: Methodological* 20.4: 331-344, (1986).

Ceder, A. “Methods for creating bus timetables”. *Transportation Research Part A: General*, 21(1), 59-83, (1987).

Ceder, A., “*Public transit planning and operation: Modeling, practice and behavior*”. CRC press, (2016).

Ceylan, H., ve Ozcan, T., “Optimization of Headways and Departure Times in Urban Bus Networks: A Case Study of Çorlu, Turkey”. *Advances in Civil Engineering*, (2018).

Chakroborty, P., “Genetic algorithms for optimal urban transit network design”. *Comput. Aided Civil Infrastruct. Eng.* 18, 184–200, (2003).

Chakroborty, P. ve Wivedi, T., "Optimal Route Network Design for Transit Systems Using Genetic Algorithms". *Engineering Optimization*, 34, 83-100. <http://dx.doi.org/10.1080/03052150210909>, (2002).

Chew, J.S.C., "Genetic Algorithms for Urban Transit Routing Problems". M.Sc. Thesis, Universiti Putra Malaysia, Malaysia, (2012).

Dial R. B., "Transit Pathfinder Algorithm". In *Highway Research Record* 205, TRB, National Research Council, Washington, D.C., syf. 67- 85, (1967).

Dijkstra, E., "Structured programming". In *Classics in software engineering*, syf. 41-48, (1979).

Dorigo, M. ve Stutzle, T., "Ant Colony Optimization, Prentice-Hall", (2004).

Dubois D., Bell G., ve Llibre M., "A Set of Methods in Transportation Network Synthesis and Analysis". *Journal of the Operations Research Society*, Vol. 30, syf 797-808, (1979).

Eberhart, R.C. ve Kennedy, J., "A new optimizer using particle swarm theory", Proc. Sixth Int. Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, syf:39–43, (1995).

Eiben, A.E. ve Smith, J.E., "Introduction to Evolutionary Computing, Springer-Verlag", (2003).

Fan, L. ve Mumford, C.L., "A Metaheuristic Approach to the Urban Transit Routing Problem". *Journal of Heuristics*, 16, 353-372. <http://dx.doi.org/10.1007/s10732-008-9089-8>, (2010).

Farvolden, J. M., ve Powell, W. B., "Subgradient methods for the service network design problem". *Transportation Science*, 28(3), 256-272, (1994).

Fattouche, G., "How to improve high-frequency bus service reliability through scheduling". *Proceedings of the ITRN, 31st August–1st September, University College Cork*, (2011).

Florian M. ve Spiess H., "On Two Mode Choice/Assignment Models". *Transportation Science*, Vol. 17, syf: 32-47, (1983).

Floyd, R. W., "Algorithm 97: shortest path". *Communications of the ACM*, 5(6), 345, (1962).

Franciosa, P. G., Daniele F., ve Roberto G., "Semi-dynamic shortest paths and breadth-first search in digraphs", *Annual Symposium on Theoretical Aspects of Computer Science*, Springer, Berlin, Heidelberg, (1997).

Goldberg, D., "Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning". New York: Addison Wesley Publishing Company Inc, (1989).

Han A. F. ve Wilson N. H. M., "The allocation of buses in heavily utilized networks with overlapping routes," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 16, no. 3, syf. 221–232, (1982).

Hasselstrom D., "*Public Transportation Planning- A Mathematical Programming Approach*", Ph.D. thesis. University of Gothenburg, Sweden, (1981).

Haykin, S., "Neural Networks: A Comprehensive Foundation, 2nd ed., Prentice-Hall", (1999).

Heathington, K. W., Miller, J., Knox, R. R., Hoff, G. C., ve Bruggeman, J., "Computer simulation of a demand-scheduled bus system offering door-to-door service" No. 234, (1968).

Holland, J., "Adaptation in natural and artificial systems". Ann Arbor: University of Michigan Press, (1975).

Karp, R. M., "On the computational complexity of combinatorial problems". *Networks*, 5, 45-68, (1975).

Keudel, W., "Computer-aided line network design (DIANA) and minimization of transfer times in networks (FABIAN)", *Computer-Aided Transit Scheduling*. Springer, Berlin, Heidelberg, 315-326, (1988).

Kim, D., ve Cynthia B., "Transportation service network design: Models and algorithms." *Computer-Aided Transit Scheduling*. Springer, Berlin, Heidelberg, 259-283, (1999).

Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D., ve Vecchi, M. P., "Optimization by simulated annealing". *Science*, 220, 671–680, (1983).

Kocur, G., ve Tore, J. D., "FRACAS: A strategic planning model for bus transit systems". *Transportation Research Record*, 994, 13-23, (1984).

Kuah, G. K., ve Jossef P., "Optimization of feeder bus routes and bus-stop spacing", *Journal of Transportation Engineering* 114.3, 341-354, (1988).

Lampkin W. ve Saalmans P. D., "The Design of Routes, Service Frequencies and Schedules for a Municipal Bus Undertaking: A Case Study". *Operations Research Quarterly*, Vol. 18, syf: 375- 397, (1967).

Magnanti, T. T., ve Wong, R. T., "Network design and transportation planning: Models and algorithms". *Transportation Science*, 18(1), 1-55, (1984).

Mandl, C.E., "Evaluation and optimization of urban public transport networks", Presented at the 3rd European Congress on Operations Research, Amsterdam, Netherlands, (1979).

Mandl, C.E., "Evaluation and Optimization of Urban Public Transportation Networks", *European Journal of Operational Research*, 5, 396-404, [http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217\(80\)90126-5](http://dx.doi.org/10.1016/0377-2217(80)90126-5), (1980).

Mazloumi, E., Currie, G., Rose, G., ve Sarvi, M., "Using SCATS data to predict bus travel time", In *32nd Australian Transport Research Forum (ATRF), Auckland, New Zealand*, (2009).

Mladenović, N., ve Hansen, P., "Variable neighborhood search", *Computers and Operations Research*, 24(11), 1097–1100, (1997).

Mumford, C. L., "New heuristic and evolutionary operators for the multi-objective urban transit routing problem", In *2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, syf: 939-946, IEEE, (2013).

Nayeem, M.A., Rahman, M.K. ve Rahman, M.S., "Transit Network Design by Genetic Algorithm with Elitism". *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 30-45, <http://dx.doi.org/10.1016/j.trc.2014.05.002>, (2014).

Newell G., "Some Issues Related to the Optimal Design of Bus Routes", *Transportation Science*, Vol. 13, syf: 20- 35, (1979).

Nikolić, M. ve Teodorović, D. "Transit Network Design by Bee Colony Optimization", *Expert Systems with Applications*, 40, 5945-5955, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2013.05.002>, (2013).

Oprešnik, R. S., Seljak, T., Vihar, R., Gerbec, M., ve Katrašnik, T., "Real-World Fuel Consumption, Fuel Cost and Exhaust Emissions of Different Bus Powertrain Technologies", *Energies*, 11(8), 2160, (2018).

Pareto, V. "Whether it is a good idea to fix by law a minimum salary for work and a maximum of wealth for speculation". *Atti della Reale Accademia economico-agraria dei Georgofili di Firenze*, 103-130, (1886).

Pareto, V., "Escritos sociológicos", No. 301 P35y, (1987).

Pratt, Richard H., ve J. E. Evans., "Bus routing and coverage. TCRP report 95: traveler response to transportation system changes." *Transportation Research Board, Washington, DC*, (2004).

Rapp M. H., Manenberger P., Piguet S., ve Robert-Grand- Pierre A. "Interactive Graphic System for Transit Route Optimization". In *Transportation Research Record 619*, TRB National Research Council, Washington, D.C., (1976).

Rea J. C., "Designing Urban Transit Systems: An Approach to the Route-Technology Selection Problem", Report 204881, University of Washington, Seattle, Wash., (1971).

Sato, T. ve Hagiwara, M. “Bee system: finding solution by a concentrated search”, IEEE Int. Conf. on Computational Cybernetics and Simulation, syf:3954–3959, (1997).

Shah-Hosseini, H., “The time adaptive self-organizing map is a neural network based on artificial immune system”, Proc. IEEE World Congress on Computational Intelligence, Vancouver, Canada, July, syf:1007–1014, (2006).

Shah-Hosseini, H., “Problem solving by intelligent water drops”, Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation, Swisotel The Stamford, Singapore, September, syf:3226–3231, (2007).

Shah-Hosseini, H., “Intelligent water drops algorithm: A new optimization method for solving the multiple knapsack problem”. International Journal of Intelligent Computing and Cybernetics, 1(2), 193–212, (2008).

Shah-Hosseini, H., “Optimization with the nature-inspired intelligent water drops algorithm”. InTech, syf: 297–320, (2009).

Shah-Hosseini, H., “Intelligent water drops algorithm for automatic multilevel thresholding of grey-level images using a modified Otsu’s criterion”. International Journal of Modelling, Identification and Control, 15(4), 241–249, (2012a).

Shah-Hosseini, H., “An approach to continuous optimization by the intelligent water drops algorithm. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 32, 224–229. (2012b).

Shih, M., ve Mahmassani, H. S., “*A design methodology for bus transit networks with coordinated operations*”, No: SWUTC/94/60016-1, (1994).

Shih, M., Mahmassani, H. S., ve Baaj, M. H., “Trip assignment model for timed-transfer transit systems.” Transportation research record 1571.1: 24-30, (1997).

Silman L. A., Barzly Z., ve Passy U., “Planning the Route System for Urban Buses”. *Comp. Oper. Res.* Vol. 1, syf: 201-211, (1974).

Spiess H. ve Florian M., “Optimal Strategies: A New Assignment Model for Transit Networks”, *Transportation Research B*, Vol. 23B, No. 2, syf: 83-102, (1989).

Storn, R., ve Kenneth P., “Differential evolution a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces.” Journal of global optimization, 11.4: 341-359, (1997).

Szeto, W. Y., Muthu S., ve Yu J., “Reliability-based transit assignment for congested stochastic transit networks.”, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26.4: syf:311-326, (2011).

Talbi, E., "Metaheuristics: from design to implementation", Vol. 74, John Wiley and Sons, (2009).

Taylor M. A. P. "Knowledge-Based Systems for Transport Network Analysis: A Fifth Generation Perspective on Transport Network Problems", Department of Civil Engineering, Monash University, Victoria, Australia, (1989).

Tsao, S., ve Paul S., "Branched transit services: an analysis." *Journal of transportation engineering* 110.1 112-128, (1984).

Vandebona, U. ve Anthony J. R., "Simulation of transit route operations.", *Transportation Research Record* 1036, (1985).

Wardman, M., "A review of British evidence on time and service quality valuations". *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 37(2-3), 107-128, (2001).

Yin, Y., Miller, M. ve Ceder, A., "Framework for deployment planning of us rapid transit systems. *Transportation Research Record*, 1903, 11-19, (2005).

Zhao, F., ve Gan, A., *Optimization of transit network to minimize transfers* (No. Final Report), (2003).

8. ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Buket ÇAPALI

Doğum Yeri ve Tarihi : ISPARTA – 19.08.1981

Lisans Üniversite : Süleyman Demirel Üniversitesi

Y. Lisans Üniversite : Süleyman Demirel Üniversitesi

Elektronik posta : buketcapali@sdu.edu.tr

İletişim Adresi : Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik
Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalı

Yayın Listesi :

• **Capali, B.**, ve Ceylan, H. “A multi-objective meta-heuristic approach for the transit network design and frequency setting problem”. *Transportation Planning and Technology*, 1-17. (2020).

• Erişkin E., Karahançer Ş., Terzi S., Saltan M., **Çapalı B.**, Üncü İsmail S., Coşkunsu S. Increasing the visibility of roads using phosphorous paint. *Road Materials and Pavement Design*, 20(1), 199-210., Doi: 10.1080/14680629.2017.1374999 (2019).

Karahançer, Ş., Erişkin, E., **Çapalı, B.**, Saltan, M., Terzi, S. Superpave Volumetric Mix Design Of Hot Mix Asphalt: Case Study Of Isparta. *Mühendislik Bilimleri Ve Tasarım Dergisi*, 6(1), 108-117. (2018).

• Karahançer Ş., Erişkin E., **Çapalı B.**, Terzi S., Saltan M. Route 93, Arizona’s IRI estimation using least squares method and fuzzy logic. *Global Journal of Information Technology: Emerging Technologies*, 7(3), 157-162., Doi: 10.18844/gjit.v7i3.2836 (Yayın No: 3923293) (2017).

• Karahancer S., Eriskin E., **Çapalı B.**, Saltan M., Terzi S., Investigation of Using Waste Welded Tuff Material as Mineral Filler in Asphalt Concrete, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, In Press (2016).

• Karahancer, S., Eriskin, E., Sarioglu, O., **Çapalı, B.**, Saltan, M., Terzi, S., 2016, Utilization of Arundo donax in Hot Mix Asphalt as a fiber, Construction and Building Materials, 125. 981-986 (2016).

• Terzi S., Saltan M., Eriskin E., Sargin Karahancer S., **Çapalı B.**, Cold-in Place and Full Depth Reclamation with Foamed Asphalt, Computational Techniques for Civil and Structural Engineering Chapter 18, Saxe-Coburg Publications, Editör: Kruis J, Tsompanakis Y, Topping B H V, ISBN: 978-1-874672-71-5, syf: 417-437 (2015).

• Sarıoğlu, O., Erişkin, E., **Çapalı, B.**, Karahançer, Ş., Saltan, M., & Terzi, S. Ltp Test Bölgesi Verilerinden İri Değerlerinin Matematiksel Modellenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(2), 1-6. (2013).

Konferans listesi :

• **Çapalı, B.**, ve Ceylan, H. Intelligent Water Drops Algorithm for Urban Transit Network Design and Frequency Setting. In *The International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering* (syf: 894-897). Springer, Cham. (2019).

• Ergezer F., Terzi S., Erişkin E., **Çapalı B.**, Akbaş M. Y.. Investigation of The Use of Glass Beads Powder in Bitumen Modification. First International Symposium on Innovations in Civil Engineering and Technology, 2(1), 689-696. (Tam Metin Bildiri/Sözlü Sunum)(Yayın No:5615351) (2019).

• **Çapalı B.**, Ceylan H. (2017). A Study on Public Transit Users' Route Choice and Assignment Function. 4th International Conference On Recent Advances In Pure And Applied Mathematics (Özet Bildiri/Sözlü Sunum)

• Karahancer Ş., **Çapalı B.**, Erişkin E., Morova N., Serin S., Saltan M., Terzi S., Özdemir Küçükçapraz D., Marshall Stability Estimating Using Artificial Neural Network with Polyparaphenylene Terephthalamide Fibre Rate, 2016 International

Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA), 2 - 5 August, Sinaia, Romania (2016).

• Karahançer, Ş., Erişkin, E., **Çapalı, B.**, Terzi, S., Saltan, M., IRI Estimation of Route 93, Arizona by Least Squares Method and Fuzzy Logic, 6th World Conference on Innovation and Computer Science, 12-14 May, Antalya (2016).

• Serin, S., Terzi, S., Saltan, M., Karaşahin, M., Sargın, Ş., Uzun, İ., Bayrak, M. Ç., **Çapalı, B.**, Morova, N. Asfalt Kaplamalı Yollarda Sıkışma Kontrollerinin Farklı Tahribatsız Test Metotlarıyla Gerçekleştirilmesi. 3. Karayolu Ulusal Kongresi, 205-213 (2014).

• **Çapalı, B.**, Saplıoğlu, M., Terzi, S., Saltan, M., Kısa Süreli Yoğun Kontrollerin Emniyet Kemer ve Kask Kullanımına Etkilerinin Araştırılması: Isparta Örneği, 10. Ulaştırma Kongresi, İzmir (2013).