

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

KENT İÇİ RAYLI SİSTEMLERDE TALEP ODAKLI TREN
SEFER ÇİZELGELEME

Serkan BUCAK

DOKTORA TEZİ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Endüstri Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Tufan DEMİREL

Temmuz, 2022

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KENT İÇİ RAYLI SİSTEMLERDE TALEP ODAKLI TREN SEFER
ÇİZELGELEME**

Serkan BUCAK tarafından hazırlanan tez çalışması 01.07.2022 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Endüstri Mühendisliği Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Tufan DEMİREL
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Tufan DEMİREL, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Metin TÜRKEY, Üye
Koç Üniversitesi

Doç. Dr. Vildan ÖZKIR, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Semih ÖNÜT, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üye. Cafer Erhan BOZDAĞ, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Tufan DEMİREL sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Kent İçi Raylı Sistemlerde Talep Odaklı Tren Sefer Çizelgeleme başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Serkan BUCAK

İmza



Aileme,

TEŞEKKÜR

Doktora eğitimim boyunca engin bilgi birikimi ve deneyimlerinden her daim istifade ettiğim, tez çalışmam esnasında kıymetli fikirleri ile beni yönlendiren, yanı sıra karşılaştığım tüm zorluklarda manevi desteğini esirgemeyen danışman hocam Doç. Dr. Tufan DEMİREL'e teşekkürlerimi sunmayı bir borç bilirim.

Tez izleme komitesinde bulunarak tezimin ilerlemesine ve gelişimine büyük katkılar sunan sayın hocalarım Prof. Dr. Metin TÜRKAY ve Doç. Dr. Vildan ÖZKIR'a teşekkürlerimi sunarım. Bu süreçte fikirlerine başvurduğum, görüş ve önerileri ile bana daima destek olan değerli hocalarım Prof. Dr. Nihan ÇETİN DEMİREL ve Doç. Dr. Muhammet DEVECİ'ye ayrıca teşekkür ederim.

Son olarak, hayatımın her evresinde olduğu gibi tez çalışmalarım süresince de her zaman yanımda olan aileme teşekkür ve minnetlerimi sunarım.

Serkan BUCAK

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	x
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	3
1.2 Tezin Amacı	6
1.3 Orjinal Katkı	6
1.4 Tezin İçeriği	7
2 RAYLI SİSTEMLERİN PLANLANMASI	8
2.1 Yolcu Talebi	10
2.2 Hat Planlama	10
2.3 Tren Sefer Çizelgeleme	11
2.4 Araç ve Ekip Çizelgeleme	12
3 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	13
3.1 Kentler Arası Raylı Sistemler	13
3.2 Kent İçi Raylı Sistemler	17
3.2.1 Talep Odaklı	17
3.2.2 Doymuş Hatlar	22
3.2.3 Enerji Verimli	26
4 TALEP ODAKLI TREN SEFER ÇİZELGELEME MODELİ	31
4.1 Model Çerçevesi	31
4.2 Problem Tanımı	33
4.3 Talep Fonksiyonu	34
4.4 Matematik Formülasyon	36
4.4.1 Notasyon	36
4.4.2 Kısıtlar	39
4.4.3 Amaç Fonksiyonu	44
5 İSTANBUL METROSUNDA BİR UYGULAMA	45
5.1 Talep Analizi	47

5.2 Vaka Tanımları	48
5.3 Model Karmaşıklığı	52
5.4 Sonuçlar	54
5.5 Duyarlılık Analizi	58
6 SONUÇ VE ÖNERİLER	60
KAYNAKÇA	62
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	69



SİMGE LİSTESİ

V	Filo büyüklüğü
$t_s^{f,i,k}$	f . yolda k . trenin i . istasyonda duruş süresi
$t_r^{f,i,k}$	f . yolda k . trenin i . istasyon ile $i + 1$. istasyon arası çalışma süresi
$t_{f,i,k}$	f . yolda k . trenin i . istasyondan kalkış zamanı
i, j	İstasyon indisi
Y	İstasyon kümesi
h_{min}	Minimum güvenlik süresi
τ_{min}	Minimum manevra süresi
$t_{r,max}^i$	Trenlerin i . istasyon ile $i + 1$. istasyon arası maksimum çalışma süresi
$t_{r,min}^i$	Trenlerin i . istasyon ile $i + 1$. istasyon arası minimum çalışma süresi
$t_{s,max}$	Trenlerin istasyonlardaki maksimum duruş süresi
$t_{s,min}$	Trenlerin istasyonlardaki minimum duruş süresi
CT	Tren kapasitesi
k	Tren sefer indisi
K	Tren sefer kümesi
M	Yeterince büyük bir sayı
f	Yol indisi
F	Yol kümesi

KISALTMA LİSTESİ

A.Ş.	Anonim Şirket
ÇY	Çift Yönlü
D	Dinamik
DOP	Doğrusal Olmayan Programlama
DP	Doğrusal Programlama
FIFO	First-In-First-Out
FOÇ	Fizibil Olmayan Çözüm
İBB	İstanbul Büyükşehir Belediyesi
KTDOP	Karışık Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama
KTDP	Karışık Tam Sayılı Doğrusal Programlama
Maks.	Maksimizasyon
Min.	Minimizasyon
OD	Origin Destination
OÇ	Optimum Çözüm
S	Statik
TDOP	Tam Sayılı Doğrusal Olmayan Programlama
TDP	Tam Sayılı Doğrusal Programlama
TOPSIS	Technique For Order Preference By Similarity To Ideal Solution
TSC	Tren Sefer Çizelgeleme
TY	Tek Yönlü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Global metro yolcu sayısının yıllara göre değişimi.....	1
Şekil 1.2 Kentler arası raylı sistem hattı örneği.....	3
Şekil 1.3 Kent içi raylı sistem hattı örneği	3
Şekil 1.4 Periyodik çizelgeler için örnek zaman konum diyagramı	4
Şekil 1.5 Periyodik olmayan çizelgeler için örnek zaman konum diyagramı	5
Şekil 2.1 Raylı sistemlerin planlanması süreci	8
Şekil 2.2 Groningen-Rotterdam hattı sefer tarifiesi için zaman konum diyagramı	12
Şekil 4.1 Model çerçeve şeması	32
Şekil 4.2 Kent içi metro hattı örneği.....	33
Şekil 4.3 Kümülatif talep fonksiyonu.....	35
Şekil 4.4 Hedef (destination) istasyona göre yolcu dengelemesi	43
Şekil 5.1 M1A Metro hattı şeması.....	45
Şekil 5.2 M1A Hattı yolcu geliş sayıları	48
Şekil 5.3 Zaman konum diyagramı (Yukarı yön).....	56
Şekil 5.4 Zaman konum diyagramı (Aşağı yön).....	56
Şekil 5.5 Seferler arası süre profili (Yukarı yön)	57
Şekil 5.6 Seferler arası süre profili (Aşağı yön)	57
Şekil 5.7 Ortalama bekleme süresinin tren sefer sayısı ve tren kapasitesine göre değişimi.....	59

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Planlama seviyeleri	9
Tablo 3.1 Kentler arası raylı sistemlerde tren sefer çizelgelemeye ilişkin literatür özetі.....	16
Tablo 3.2 Kent içi raylı sistemlerde talep odaklı tren sefer çizelgelemeye ilişkin literatür özetі.....	21
Tablo 3.3 Doymuş kent içi raylı sistem hatlarında tren sefer çizelgelemeye ilişkin literatür özetі	25
Tablo 3.4 Kent içi raylı sistemlerde enerji verimli tren sefer çizelgelemeye ilişkin literatür özetі	29
Tablo 5.1 M1A Hattı istasyonlar arası mesafeler.....	46
Tablo 5.2 Yolcu talebinin kosinüs benzerlik değeri (Yukarı yön).....	47
Tablo 5.3 Yolcu talebinin kosinüs benzerlik değeri (Aşağı yön)	48
Tablo 5.4 İstasyon çiftleri için üretilmiş kümülatif talep fonksiyonlarına ait parametre ve R-kare değeri (Yukarı yön).....	50
Tablo 5.5 İstasyon çiftleri için üretilmiş kümülatif talep fonksiyonlarına ait parametre ve R-kare değeri (Aşağı yön).....	51
Tablo 5.6 Vakalara ait parametre değeri.....	52
Tablo 5.7 GAMS’de parametre bazlı performans analizi	53
Tablo 5.8 Tren seferlerinin ilk istasyondan optimum kalkış zamanları (Yukarı yön) ...	54
Tablo 5.9 Tren seferlerinin ilk istasyondan optimum kalkış zamanları (Aşağı yön).....	55
Tablo 5.10 Optimum çizelge ile periyodik çizelge karşılaştırması.....	58

Kent İçi Raylı Sistemlerde Talep Odaklı Tren Sefer Çizelgeleme

Serkan Bucak

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Tufan DEMİREL

Nüfusa bağlı olarak artan kentsel mobilite toplu ulaşımı oldukça önemli hale getirmiştir. Kent içi raylı sistemler, yüksek kapasiteye sahip olmaları, hızlı hareket etmeleri ve yüksek güvenilirlik sunmaları sebebiyle yolcular tarafından daha fazla tercih edilmektedir. Diğer modlara kıyasla talebin daha yüksek olduğu raylı sistemlerin etkin planlanması, toplu ulaşımı daha verimli kılmak adına elzemdir.

Raylı sistemlerin planlanması, talep analizi, hat planlama, tren sefer çizelgeleme, araç çizelgeleme ve ekip yönetimi olmak üzere beş farklı problemten oluşmaktadır. Yolcu memnuniyeti ve karlılığa doğrudan etkisi sebebiyle tren sefer çizelgeleme problemi literatürde kendine geniş bir yer bulmuştur. Bu tez çalışmasında, tren sefer çizelgeleme problemi detaylı olarak incelenmiş, hem yolcular hem de firma açısından kazanımlar sağlamayı amaçlayan bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir.

Tren sefer çizelgeleme problemi, her bir trenin her bir istasyona varış ve kalkış zamanının belirlenmesi işlemidir. Gerçekleştirilecek sefer sayısı, enerji ve personel gibi doğrudan maliyetler ile arıza ve bakım gibi dolaylı maliyetleri belirleyen ana etkidir. Benzer şekilde, yolcuların bekleme süresini, başka bir deyişle, hizmet kalitesini de doğrudan belirleyecektir. Sonuç olarak, optimal tren sefer çizelgesi, en az sefer sayısı ile en fazla yolcunun taşındığı ve yolcuların en az beklediği çizelgedir.

Bu çalışmada, öncelikle mevcut literatür incelenmiş ve günümüze kadar yapılan çalışmalarda araç kapasitesi, filo büyüklüğü ve tren sirkülasyonunun yeterince dikkate alınmadığı görülmüştür. Bu boşluğu doldurmak adına, operasyonel kısıtlarla birlikte kaynak kısıtlarını da dikkate alan, yolcu talebinin dinamik olarak adapte edildiği, doğrusal olmayan bir model formüle edilmiştir. Modelin amacı, yolcuların ortalama bekleme süresini minimize etmektir. Ayrıca, sınırlı araç kapasitesinden dolayı yolcuların gelen ilk trene binememe ihtimali anlamına gelen “doygunluk durumu” modele dâhil edilmiştir. Son aşamada, yolcu memnuniyeti ve işletme maliyetleri arasındaki en iyi uzlaşımı belirlemek amacıyla bir duyarlılık analizi icra edilmiştir.

Önerilen yaklaşımın etkinliğini değerlendirmek adına İstanbul M1A metro hattında gerçek bir vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, modelin ürettiği optimal tren çizelgesinin mevcut çizelgeye kıyasla çok daha avantajlı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Kent içi raylı sistemler, tren sefer çizelgeleme, ortalama bekleme süresi, dinamik talep, doygunluk durumu

Demand-oriented Train Timetabling for Urban Rail Transit Systems

Serkan BUCAK

Department of Industrial Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Tufan DEMİREL

With greater urban mobility owing to increased population, public transit has become a tremendously important issue. As they offer greater capacity, higher speed, and greater reliability, urban rail transit systems are favored more by passengers. In order to make public transit more efficient, it is essential to more effectively plan rail transit systems which involve higher demand compared to other modes of transport.

The planning of rail transit systems consists of five steps, i.e., demand analysis, line planning, train timetabling, rolling stock scheduling, and crew scheduling. Due to its direct impact on both passenger satisfaction and profitability, train timetabling occupies a considerable place in the relevant literature. This thesis examines in detail the problem of train timetabling, and develops an optimization model with a view to providing benefits for both passengers and operators.

The train timetabling problem refers to the activity of setting arrival and departure times for each train at each station. The number of trips defined in the schedule is the primary factor determining direct costs such as energy and personnel as well as indirect costs such as failure and maintenance. Furthermore, it also impacts upon passenger waiting times or, to put it differently, the level of service. Consequently, the optimal timetable is the

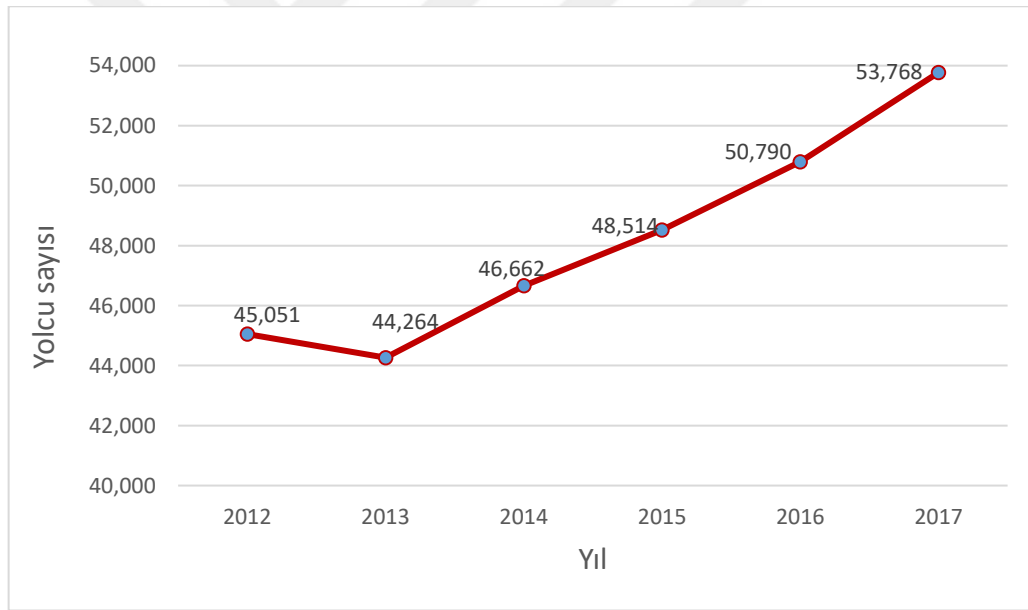
one transporting the highest number of passengers with the minimum number of trips and providing for the least waiting times for passengers.

The study primarily, starting with a review of the current literature, maintains that the existing models, for the most part, fail to sufficiently take into account train capacity, fleet size, and vehicle circulation. To bridge this research gap, a nonlinear model was formulated taking into account operational constraints along with resource constraints, adapting to dynamic behavior of passenger demand. The model in question is intended to minimize the average waiting times for passengers. Besides, the model also incorporated the oversaturated condition, referring to the possibility that some passengers may not be able to take the first incoming train due to limited train capacity. Finally, a sensitivity analysis is conducted to attain the best trade-off between passenger satisfaction and operation cost.

To evaluate the effectiveness of the proposed approach, a real-world case study is performed on the M1A metro line in Istanbul. The results show that the optimized train timetable is more advantageous when compared to its counterpart that is currently use by the operator.

Keywords: Urban rail transit systems, train timetabling, average waiting time, dynamic demand, oversaturated condition

Dünya genelinde kentleşmenin artmasıyla birlikte toplu ulaşım sistemlerinin önemi artmıştır. Bu sistemlerin verimli, sürdürülebilir ve istikrarlı olabilmesi büyük oranda, daha az enerji tüketimi, daha az çevre kirliliği ve daha dakiklik gibi avantajlara sahip olan raylı sistemlere bağlıdır. Tokyo, Pekin ve New York gibi büyük kentlerde bu sistemler ile taşınan günlük yolcu sayısı 10 milyon'un üzerine çıkmıştır. Özellikle hafta içi günlerde, sabah ve akşam pik saatlerde, ardışık iki sefer arasındaki süre (headway) 2 dakika'ya kadar inmiştir (Wang et al., 2018). Raylı sistemlere yönelik hızla artan bu talebi (Şekil 1.1) yönetmek bugün kentlerin karşı karşıya kaldığı önemli bir sorun haline gelmiştir. (Hassannayebi et al., 2017).



Şekil 1.1 Global metro yolcu sayısının yıllara göre değişimi (The UITP Observatory of Automated Metros, 2018)

Talebi karşılamak adına sürekli yeni hatların yapılması finansal olarak sürdürülebilir bir seçenek görünmemektedir. Bu nedenle, tren operasyonlarını mevcut raylı sistem altyapısından en yüksek şekilde istifade etmek üzere planlayan pek çok çalışma yapılmıştır (Lee et al., 2009; Schwan, 1994; Zhou et al., 2005). Bu çalışmaların bir kısmı verimli tren sefer çizelgeleri elde etmek üzerine odaklanırken (Fang et al., 2015) bir kısmı ise demiryolu ağ tasarımını da içine alan taktik ve stratejik planlama adımlarına yoğunlaşmıştır (Guihaire et al., 2008).

Raylı sistemlerin planlanması sırasıyla, talep analizi, hat planlama, tren sefer çizelgeleme, araç çizelgeleme ve ekip yönetimi olmak üzere beş aşamadan oluşmaktadır. (Bussieck, Winter, et al., 1997; Cordeau et al., 1998; Guihaire et al., 2008; Huisman et al., 2005). Bu planlama hiyerarşisinde en kritik adım “tren sefer çizelgeleme (TSC)” olup her bir adım kendinden sonraki adımın önkoşulu niteliğindedir.

Tren sefer çizelgesi (sefer tarifiesi), hizmet sağlayıcı firma ile yolcular arasındaki “temel bağı” temsil etmektedir. İşletmeci firma tarafından icra edilen sefer tarifiesi hizmet kalitesine doğrudan etki eder. Bu bağlamda, “ortalama bekleme süresi” ve “araç içinde geçen süre” hizmet kalitesi ölçümünde yaygın olarak kabul görmüş performans kriterileridir (Bowman et al., 1981). Verimsiz bir tarife, yolcular açısından daha uzun seyahat süresi (Amin-Naseri et al., 2015), işletmeci firma açısından ise ekstra maliyet anlamına gelecektir (T. Zhang et al., 2018).

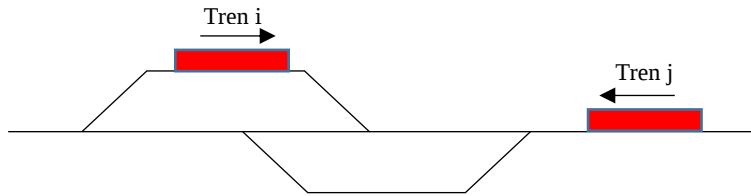
Kent içi raylı sistemlerde TSC problemi, her bir trenin her bir istasyona varış ve kalkış zamanının belirlenmesi işlemidir (Niu & Zhou, 2013). Bu işlem esnasında yol kapasitesinin ihlal edilmemesi ve bir takım operasyonel kısıtların sağlanması esastır (A. Caprara, M. Fischetti, P.L.Guida, M.Monaci, 2001). Ayrıca, verimli ve kullanışlı bir tren sefer çizelgesi elde edebilmek için yolcu talep karakteristiğine ek olarak işletmeci firma çıkarları da dikkate alınmalıdır (Niu & Tian, 2013).

Bu çalışmada, İstanbul kentinde bulunan ve İBB’ye bağlı Metro İstanbul A.Ş. firması tarafından işletilen M1A metro hattı için tren sefer çizelgesi üreten matematiksel bir optimizasyon modeli geliştirilmiştir. Modeli gerçekçi kılmak adına yolcu talebi modele dinamik (zamana bağlı) olarak dâhil edilmiştir. Amaç, istasyonlardaki ortalama bekleme süresini minimize etmektir. Odaklandığımız hat, çift yönlü ve çift yollu bir kent içi metro hattıdır. Hattaki her bir yolda trenler sadece tek yönde hareket edebilmektedir. Böylece zıt yönlerde hareket eden araçların birbirleri ile etkileşimi söz konusu değildir. Sonuç olarak, her bir yönde seferlerin varış ve kalkış zamanlarını birbirinden bağımsız olarak hesaplamak mümkün olmaktadır (Vuchic, 2007). Bu amaçla, ilk olarak, trenlerin “istasyonlara varış ve kalkış zamanları”, “istasyonlarda duruş süreleri” ve “istasyonlar arası çalışma sürelerini” eş zamanlı olarak optimize eden bir model formüle edilmiştir. Daha sonra, önerilen model bir “dal-sınır algoritması” ile çözülmüştür. Son olarak, hizmet sağlayıcı firma ve yolcular arasındaki en iyi uzlaşımı belirlemek amacıyla bir “duyarlılık analizi” icra edilmiştir.

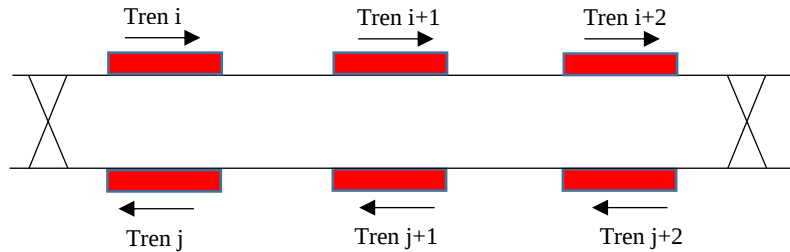
1.1 Literatür Özeti

Raylı sistemlerin planlanmasında kilit bir role sahip olan TSC problemi ile ilgili olarak bu güne kadar yapılmış pek çok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmaları farklı açılardan sınıflandırmak mümkündür. Bu alt bölümde, literatürde yaygın olarak kullanılan dört farklı sınıflandırma türü açıklanacaktır.

En temelde, TSC problemi, dikkate alınan raylı sistemin işletildiği bölgeye göre “kentler arası” ve “kent içi” olmak üzere ikiye ayrılır. Problem, her bir durum için farklı karakteristiklere sahip olacaktır. Şöyle ki, kentler arası raylı sistemler genellikle tek yoldan oluşmaktadır. Farklı istikametlere sahip araçlar, bu yolda zıt yönlerde hareket edebilmektedir. Sonuç olarak, araçlar birbirleri ile karşılaşabilmekte, özel bölgelerde (cep hatları, makas bölgeleri vb.) birbirlerini sollayabilmekte ya da geçebilmektedir (Şekil 1.2). Dolayısıyla, sınırlı bir kaynak olan altyapının yanı sıra sollama ve geçiş pozisyonları da çizelgeleme yapılırken hesaba katılmalıdır (Wang, De Schutter, et al., 2013). Kent içi raylı sistemler ise genellikle çift yoldan oluşmaktadır. Araçlar her bir yolda sadece tek yönde hareket edebilmektedir. Doğal olarak, araçların birbirleri ile karşılaşması ya da birbirlerini sollaması söz konusu değildir (Wang et al., 2015) (Şekil 1.3). İlaveten, kent içi raylı sistemlerde, istasyona göre değişkenlik göstermekle birlikte aniden oluşan ve derhal karşılanması beklenen yolcu talebi, kentler arası raylı sistemlerde önceden yapılan bilet satışları yoluyla nispeten daha kolay yönetilebilmektedir.

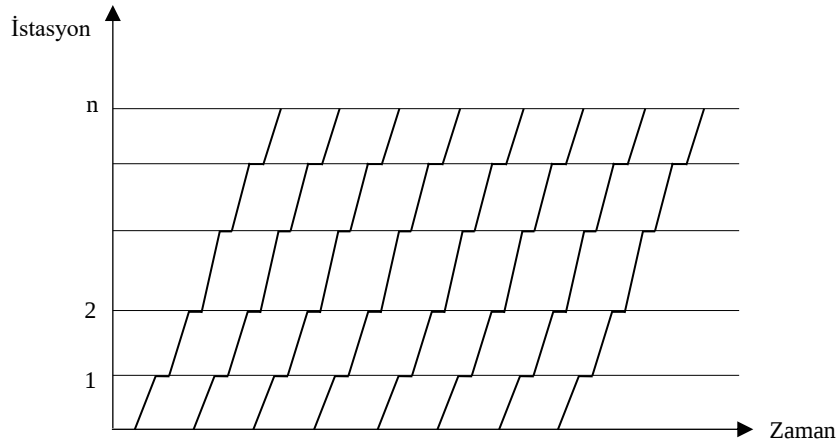


Şekil 1.2 Kentler arası raylı sistem hattı örneği (Xu et al., 2014)

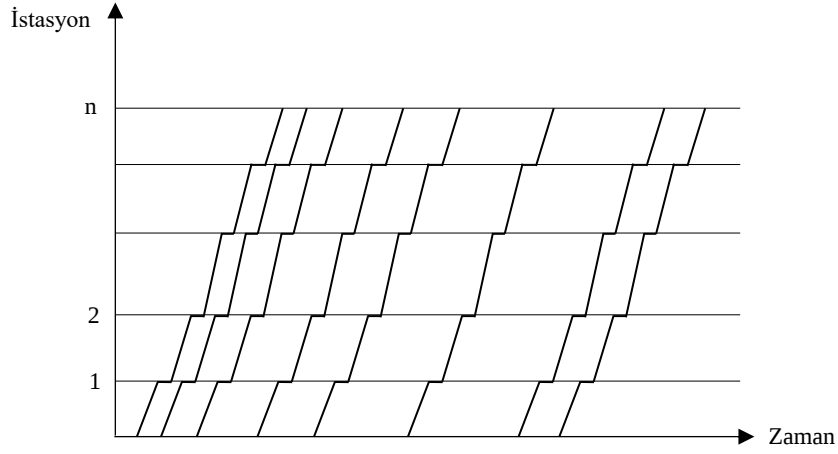


Şekil 1.3 Kent içi raylı sistem hattı örneği (Mo et al., 2019)

Tren sefer çizelgeleri, “periyodiklik” durumuna göre “periyodik” ve “periyodik olmayan” olmak üzere iki gruba ayrılır. Periyodik çizelgeler, sabit bir zaman aralığında yinelenen (3 dakikada bir tren, 5 dakikada bir tren vb.) çizelgelerdir (Şekil 1.4). Bu çizelgeler, büyük ölçekli raylı sistem ağlarının ihtiyaçlarına cevap verebilme (Kroon et al., 2009), daha kolay tasarlanabilme (Wardman et al., 2004) ve kolayca akılda kalma (Goverde, 2007) gibi bir takım avantajlara sahiptir. Yeterli kaynağın bulunduğu bir senaryoda bu tür çizelgeler oldukça iyi performans gösterir. Ancak bakım ve işletme maliyetlerinden dolayı firmalar gün içinde sınırlı hizmet sunabilmektedir (Hassannayebi et al., 2016). Dahası, kent içi raylı sistemlerde yolculuk talebi sabit olmayıp gün içinde değişen, dalgalı bir yapı göstermektedir. Dolayısıyla, yolcu akış oranlarına göre ayarlanmamış sabit sefer aralıklı (periyodik) çizelgelerin uzun bekleme sürelerine yol açması muhtemeldir. Sonuç olarak, talepteki zamansal değişimi dikkate almak ve bunu dinamik olarak sefer frekansına adapte etmek kritik öneme sahiptir. Zira yolcular gün içi seyahatlerinde, bekleme sürelerine karşı dakika seviyelerinde duyarlıdır (Kroon et al., 2009). Bu nedenle, işletmeci firmalar, sınırlı tren kapasitesi ile daha fazla talebi karşılamak için, yolcuların davranışlarını mevcut hizmet şekline göre ayarlayacağını varsaymak yerine talep dinamiklerinin doğasını daha iyi anlama ve talep odaklı çizelgeler (Şekil 1.5) oluşturma zorunluluğunu giderek daha fazla hissetmektedir (Ceder, 2007).



Şekil 1.4 Periyodik çizelgeler için örnek zaman konum diyagramı



Şekil 1.5 Periyodik olmayan çizelgeler için örnek zaman konum diyagramı

Bazı kent içi demiryolu hatlarında, özellikle sabah ve akşam pik saatlerde, talep, sunulan araç kapasitesinin üstüne çıkabilir. Buna binaen, bir yolcu istasyona vardığı an itibariyle gelen ilk trene binemeyebilir. Üstelik bu durum birden fazla kez tekrar edebilir. Günün belli zamanlarında talebin arzı aştığı bu tür hatlara “doymuş hat”, yolcunun araç doluluğundan dolayı gelen ilk trene bineme ihtimalinin olduğu bu duruma “doygunluk durumu” denir. Tersî şekilde, sunulan kapasitenin günün her anında talepten daha fazla olduğu hatlara “doymamış hat”, yolcuların gelen ilk trene daima binebildikleri duruma ise “doymama durumu” denir. Dolayısıyla, doymuş bir hatta yolcu bekleme sürelerini azaltarak hizmet seviyesini artırmayı hedefleyen TSC modellerinde doygunluk durumunun dikkate alınması önemli bir ölçüttür (S. Li et al., 2019).

TSC optimizasyonu çalışmalarında sistem verimliliğinin maksimizasyonunu sağlamak esastır. Bu amaçla, bazı araştırmalarda konuya sadece “yolcu” perspektifinden yaklaşmış ve bekleme süresi ya da toplam seyahat süresi minimizasyonu yoluyla hizmet seviyesinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Diğer bir grup çalışmada ise “hizmet sağlayıcı firma” çıkarları dikkate alınarak tren operasyon maliyetleri ile enerji tüketimi arasındaki güçlü ilişkiden (Xue et al., 2019) hareketle enerji verimliliğinin artırılması amaçlanmıştır.

Bu alt bölümde, TSC problemi literatüründe yaygın olarak kullanılan sınıflandırma kriterleri açıklanmıştır. Buna göre, mevcut çalışmalar, raylı sistemin işletildiği bölgeye (kent içi, kentler arası), seferler arası sürenin (headway) sabit olup olmamasına (periyodik, periyodik olmayan), hattın yolcu yoğunluk derecesine (doymuş hat, doymamış hat) ve son olarak odak noktasına (yolcu memnuniyeti odaklı, enerji verimliliği odaklı) göre gruplandırılmaktadır. Bahse konu bu kriterler ışığında tezin üçüncü bölümünde kapsamlı bir literatür araştırması sunulmuştur.

1.2 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amaçları aşağıda belirtildiği gibidir;

- Kent içi raylı sistemlerde kaynak ve operasyonel kısıtları dikkate alan bir TSC optimizasyon modeli geliştirmek.
- Tasarlanan modele yolcu talebini dinamik olarak adapte etmek.
- Talep yapısına göre belirlenmiş optimum tren sefer çizelgesini (istasyon varış ve kalkış zamanlarını) elde etmek.
- Trenlerin istasyonda duruş sürelerini optimize etmek.
- Trenlerin istasyonlar arası çalışma sürelerini optimize etmek.
- Yolcuların istasyonlarda bekleme süresini minimuma indirmek.
- İşletmeci firmanın gerçekleştirdiği sefer sayısını minimuma indirmek.

1.3 Orijinal Katkı

Bu çalışmada, kent içi raylı sistemlerde TSC problemini çözmek üzere sonlu bir planlama ufku boyunca ve belirli operasyonel kısıtlar dâhilinde doğrusal olmayan bir matematiksel programlama modeli önerilmektedir. Şu ana kadar literatürde sınırlı sayıda çalışmanın dikkate aldığı “araç kapasitesi” ve “araç filosu” kısıtlarının yanı sıra sınırlı araç kapasitesinden dolayı yolcuların gelen ilk trene binememe ihtimali anlamına gelen “doygunluk durumu” da modele dâhil edilmiştir.

Zamana bağlı (dinamik) yolcu talebi, geleneksel “kalkış-varış yeri matrisleri” yerine talebin sürekli temsilini esas alan “kümülatif talep eğrileri” yoluyla modele entegre edilmiştir. Her ne kadar literatürde bu yaklaşımı kullanan az sayıda örnek bulmak mümkünse de, bildiğimiz kadarıyla, ilk defa bu çalışmada “Gauss fonksiyonu” kullanılarak yapılmıştır.

Model, literatürdeki çoğu çalışmadan farklı olarak, “tek yön” ile sınırlandırılmamış olup araçların “çift yönlü” hareketleri dikkate alınmıştır. Doğal olarak, araçların bir yönden diğer yöne geçişi anlamına gelen “manevra operasyonu” da model kapsamına dâhil edilmiştir. Son tahlilde, model, çıktı olarak “talep odaklı bir tren sefer çizelgesi” üretmektedir. Üretilen çizelgenin periyodik ya da periyodik olmayan nitelikte bir çizelge olma zorunluluğu bulunmamaktadır.

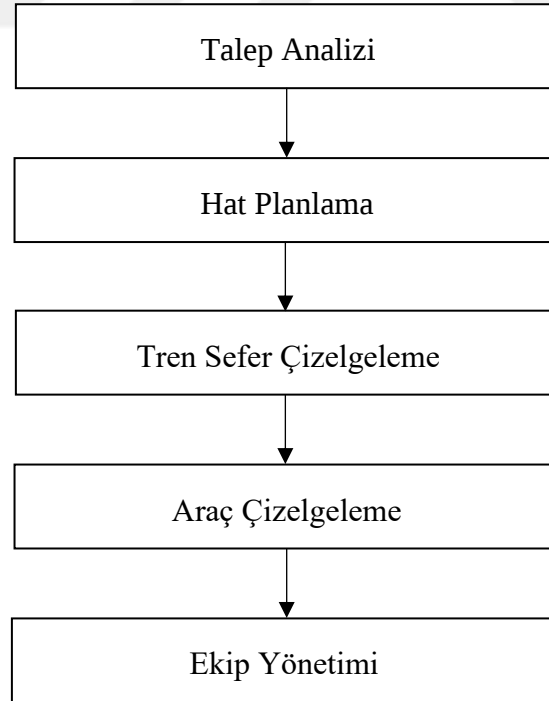
1.4 Tezin İçeriği

Çalışma, “Giriş” ile “Sonuç ve öneriler” bölümleri de dâhil olmak üzere toplam altı bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm olan “Giriş” bölümünde tezin arka planı, literatür zeti, tezin amacı, orijinal katkı ve tezin içeriği konuları ele alınmıştır. İkinci bölümde, raylı sistemlerin planlanması süreci incelenmiş, TSC probleminin bütün süreç içindeki yeri ve önemi açıklanmıştır. nc bölümde, giriş bölümünde yer alan literatür sınıflandırma kriterleri eşliğinde TSC problemine ilişkin kapsamlı bir literatür araştırması sunulmuştur. Dördüncü bölümde, ilk olarak problemin yapısı ve varsayımlar sunulmuş daha sonra çözüm için doğrusal olmayan bir matematiksel model nerisi getirilmiştir. Beşinci bölümde, kurulan model bir İstanbul metro hattında (M1A) test edilmiş ve sonuçlar paylaşılmıştır. Son olarak, altıncı bölümde, önerilen modelin etkinliği değerlendirilmiş ve gelecekte yapılabilecek potansiyel çalışmalar ile ilgili araştırmacılara önerilerde bulunulmuştur.

RAYLI SİSTEMLERİN PLANLANMASI

Günümüzde raylı ulaşım sistemlerinin planlanması oldukça karmaşık bir görev haline gelmiştir. Zira bu sistemler birbiri ile etkileşimde bulunan çok fazla öge barındırmakta ve tüm bu öğelerin eş zamanlı olarak yönetilmesi gerekmektedir. Planlama süreci, ağ tasarımı, çizelgeleme ve rotalama gibi farklı yapısal özelliklere sahip alt problemlerden oluşmaktadır. Bununla birlikte, genellikle bir alt problemin çözümü bir diğer alt problemin çözümüne bağlıdır. Raylı sistem sektörü, artan talep ile birlikte operasyonel verimliliği artırabilmek adına planlama sürecini daha rasyonel kılmak istemektedir. Bu bakımdan, bir yönetim karar destek aracı olarak analitik modeller giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Raylı sistem trafiğinin oldukça yüksek boyutlara ulaşması nedeniyle planlama süreci bazı adımlara bölünmüştür. Bu hiyerarşik ayrıştırmanın bir diyagramı Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1 Raylı sistemlerin planlanması süreci (Thomas Lindner, 2000)

İlk adımda “yolcu talebi” analiz edilmelidir. Bu analiz ile belirli bir kalkış noktasından belirli bir varış noktasına gitmek isteyen yolcu miktarı bilinir olacaktır. Sonraki adımda “hatlar”, başka bir deyişle, trenlerin çalışacağı rotalar belirlenir. Hatlardaki trenlerin çalışma frekansları da yine bu adımda belirlenir. “Tren sefer çizelgeleme” adımıyla ise operasyonel kısıtlara bağlı alınarak, belirlenmiş hat ve sefer frekansına göre her bir trenin her bir istasyona varış ve kalkış zamanı sabitlenir. Araçların ya da vagonların elde edilen uygun tren sefer çizelgelerine atanması “araç çizelgeleme” adımıyla gerçekleştirir. “Ekip yönetimi” buna benzer bir adım olup gerekli personelin araçlara dağıtılması anlamına gelir.

Bir diğer klasik yaklaşıma göre ise, planlama süreci, Tablo 2.1’de gösterildiği gibi “stratejik”, “taktik” ve “operasyonel” olarak ayrıştırılır (Bowman et al., 1981; Hooghiemstra, 1996).

Tablo 2.1 Planlama seviyeleri

Planlama Seviyesi	Planlama Ufku	Amaç
Stratejik	5 - 15 yıl	Kaynak edinme
Taktik	1 - 5 yıl	Kaynak tahsisatı
Operasyonel	24 saat - 1 yıl	Günlük kararlar

Stratejik planlama seviyesinde olası altyapı yatırımları ele alınır. Burada amaç, yeni bağlantı hatlarının yapılması gibi kaynak edinme kararlarını vermektir. Bu tür projelerin süresi 5-15 yıl olup “geleceğe bakış” şekli bu aşamada önemli bir rol oynar. Talep analizi ve hat planlama adımları bu seviyede yer alır. Tren sefer çizelgeleri de kısmen (örneğin belirli bir altyapı tasarımının yolculuk süresi üzerindeki etkisini incelemek için) bu seviyede ele alınabilir.

Taktik planlama seviyesinde orta vadeli kaynak tahsisatı üzerine odaklanılır. Burada, sabit altyapı ve yolcu talep verisinden hareketle genel bir trafik akış düzeni üretilir. Detaylı hat planları ve tren sefer çizelgelerinin yanı sıra araç sirkülasyon düzeni ve personel görev listeleri bu adımda geliştirilir.

Operasyonel planlama seviyesi günlük kararlardan oluşur. Arızalar gibi beklenmedik olaylar, özel seferler veya şantiye bölgelerindeki kısa süreli altyapı değişiklikleri nedeniyle ekip, araç ya da tren sefer çizelgesinin yeniden düzenlenmesi bu seviyenin konusunu oluşturur.

Şekil 2.1’de gösterilen hiyerarşik planlama adımlarına şu ana kadar kısaca değinildi. Birbirlerini etkilemeleri nedeniyle, bu adımları ve TSC ile olan bağlantılarını tartışmak ilgi çekici olacaktır. Bu konudaki açıklamalar (Bussieck, 1998) ‘i esas alacaktır.

2.1 Yolcu Talebi

Yolcu odaklı bir ulaşım sistemi tesis edebilmek için “yolcu talebi” ya da “trafik yoğunluğu” verilmeli yahut tahmin edilmelidir. Geleneksel yolcu talebi veri formatı “kalkış-varış yeri (OD)” matrisidir. Matristeki her bir veri, belirli bir kaynak konumdan belirli bir hedef konuma seyahat etmek isteyen yolcu sayısını ifade eder.

OD matrisleri belirleyebilmek için bir takım ileri model ve metotlar geliştirilmiştir. Müşterilerle yapılacak bir dizi “mülakat”, toplam talebi tahmin eden istatistik metotlar için bir temel oluşturabilir. Daha basit bir alternatif ise ulaşım kanallarındaki (raylı sistem yolları, otobüs yolları vb.) trafik yoğunluğunu ortaya çıkarmaktır. Bu tür bir “trafik sayımı” vasıtasıyla OD matris üreten istatistik (Cascetta et al., 1988; M.J.Maher, 1983) ve matematik programlama (Barbour et al., 1994; Sherali et al., 1994) metotları mevcuttur.

Hangi metot (mülakat ya da trafik sayımı) esas alınırsa alınsın, yolcu davranışının tahmin edilmesi ile ilgili not edilmesi gereken önemli bir husus, elde edilecek OD matrisin mevcut ulaşım hizmet durumuna ait bir resim olacağıdır. Dolayısıyla, hat planı ya da sefer çizelgesi değiştiğinde yolcu davranışı öngörülemeyen bir şekilde değişebilir.

2.2 Hat Planlama

Bir hat, bir rota ve o rotaya ait frekans ile ifade edilir. Rota, demiryolu ağındaki belirli bir güzergâha karşılık gelir. Frekans, çizelge periyoduna göre bahse konu hattın hangi sıklıkta hizmet vereceğini tayin eder. Hat planlama ise bir dizi fizibil hat arasından belirli amaçlara ulaşmak maksadıyla bir takım kısıtlara bağlı kalarak bir ya da daha fazla hattın seçilmesi anlamına gelmektedir.

Bazı olası kısıtlar, tüm yolcuların taşınmasına yetecek kadar hattın ve seferin var olması, yol kapasitesinin aşılmaması ve gerekli araç sayısının bulunmasıdır. Yaygın olarak

dikkate alınan amaçlar ise maliyetleri minimize etmek veya taşınan yolcu sayısını maksimize etmektir.

Bir şehirdeki demiryolu ağı genellikle farklı tren servislerine tekabül eden birden fazla “tedarik ağına” ayrıştırılır. Eğer münferit bir tedarik ağı için bir hat planı geliştiriliyorsa bu durumda OD matrisi yoluyla elde edilen global talep bilgisi söz konusu tedarik ağına uyarlanmalıdır. Literatürde bir OD matrisi farklı tedarik ağları için birden çok matrise ayrıştırmak ile ilgili çeşitli yaklaşımlar bulunmaktadır (Bussieck, Kreuzer, et al., 1997; Claessens et al., 1998; Goossens et al., 2004).

Hat planı, hatlardaki varış ve kalkış zamanlarının belirlendiği TSC probleminin doğrudan girdisi durumundadır. Buna ek olarak, hat planı, seyahatleri süresince hangi yolcuların tren değiştirmek (aktarma yapmak) zorunda kalacağını ve bu yolcuların ne kadar aktarma süresine ihtiyaç duyacağını belirler.

2.3 Tren Sefer Çizelgeleme

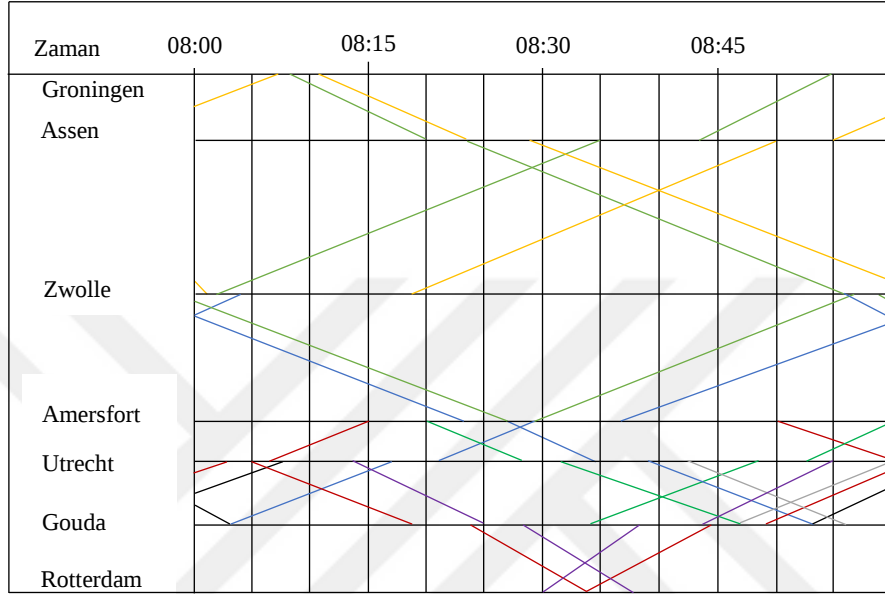
Tren sefer çizelgeleme, demiryolu taşıma sistemlerinin omurgasını oluşturur. Bu tez çalışmasının odağında tren sefer çizelgesi üretme yer almaktadır. Bir sefer tarifi, demiryolu ağına yer alan hatların belli noktalarına ait varış ve kalkış zamanlarını içerir. Çözünürlüğe bağlı olarak, bu noktalar istasyonlar (düşük çözünürlük), makas noktaları ya da önemli sinyal noktaları (yüksek çözünürlük) olabilir.

Toplu ulaşımında kullanılan çizelgeler genel olarak periyodiktir. Başka bir deyişle, belirli bir zaman (periyot) sonra kendini tekrarlar. Çizelge, hat için ve dolayısıyla hattaki tüm trenler için varış ve kalkış zamanlarını sabitler. Hattaki her bir tren bir sefere karşılık gelir. Araçların (vagon, tren dizisi) seferlere atanması planlamanın bir sonraki adımında yapılır.

Çizelgeler, geleneksel olarak, Şekil 2.2’de gösterildiği gibi “zaman konum diyagramları” ile görselleştirilir. Bu tür diyagramlarda demiryolu ulaşım ağının belirli bir rotasında hizmet veren tüm trenler temsili olarak gösterilir. Dolayısıyla sadece diyagrama bakılarak kritik noktalar veya potansiyel çatışmalar tespit edilebilir. Trenlerin hızları eğimler ile temsil ediliyor olup, kesişmeler, trenlerin karşılaşmasına ya da sollamalara işaret etmektedir.

Bir TSC problemi için pek çok kısıt söz konusudur. En önemlilerinden biri “güvenlik kısıtı” olup aynı yolda ilerleyen trenler arasında belirli bir mesafe (headway) bulunması

zorunluluğu anlamına gelir. Bir diğeri, ağ bağlantı yolunun tek yoldan oluştuğu durumlarda farklı yönlerde bulunan araçların aynı anda sefere başlayamayacak olmasıdır. Sıklıkla kullanılan amaçlar, seyahat süresinin minimize edilmesi, belirli maliyetlerin minimize edilmesi veya belirli karların maksimize edilmesidir. Problem ile ilgili kısıtlar, amaçlar ve farklı modeller üçüncü bölümde kapsamlı olarak incelenmiştir.



Şekil 2.2 Groningen-Rotterdam hattı sefer tarifesi için zaman konum diyagramı
(Zimmermann et al., 2003)

2.4 Araç ve Ekip Çizelgeleme

Sefer tarifesinde belirlenen seferler, araç (vagon, tren dizisi) ve personel (makineci, kondüktör vb.) kullanılarak gerçekleştirilir. Toplu taşımada araç çizelgeleme için geliştirilen optimizasyon metotları (Löbel, 1997)'de açıklanmıştır. Araç ve personel sevki, ulaşım hizmeti sunulurken oluşan toplam maliyetin başlıca kalemlerinden olduğundan optimizasyon metotları bu adım için elzemdir. Ayrıca, burada yapılan işlemler planlamanın diğer adımlarında revizyon gerektirebilir.

Ekip yönetimi sadece aracı kullanacak personelin (makineci) değil, aynı zamanda temizlik elemanı, manevracı, gişeci gibi bölgesel olarak çalışan personelin yönetimi anlamına da gelir. Bu tür görevler için çalışma süreleri, mola düzenlemeleri ve sendika sözleşmeleri gibi konulardan kaynaklanan karmaşık kısıtlar söz konusudur. Raylı sistemlerde ekip yönetimi ile ilgili deneyimler (Caprara et al., 1997)'de bulunabilir.

Raylı sistemlerin stratejik, taktik ve operasyonel planlama seviyelerini oluşturan talep analizi, hat planlama, tren sefer çizelgeleme, araç çizelgeleme ve ekip yönetimi problemlerini çözmek için günümüze kadar farklı optimizasyon yaklaşımları kullanılmıştır. Bu bölümde çalışmamızın odağında bulunan TSC problemi için literatürde yer alan farklı modelleme yaklaşımları ve çözüm yöntemleri birinci bölümde açıklanan sınıflandırma kriterleri esas alınarak incelenecektir.

3.1 Kentler Arası Raylı Sistemler

TSC problemi seferlerin gerçekleştirildiği bölgeye göre farklı karakteristikler taşımaktadır. Kentler arası raylı sistemler genellikle tek yoldan oluşmakta ve bu yolda hareket eden araçların karşılaşması ya da sollama manevrası yapması genellikle mümkün olmaktadır. Bununla birlikte, kent içi raylı sistemlerden farklı olarak gün içinde istasyondan istasyona değişen yolcu talebi değişkenliği söz konusu olmamaktadır. Bu alt bölümde, kentler arası raylı sistemlerde TSC problemini çözmek üzere yapılmış çalışmalara yer verilmiştir.

Cai ve Goh (Cai et al., 1994), trenleri tek yol üzerinde çizelgelemek üzere bir KTDOP modeli geliştirmiştir. Yazarlar, trenler arasında oluşabilecek geçiş çakışmalarını kesin olarak çözmenin zor olduğunu gözlemiş ve bu nedenle yaklaşık optimal çözümler üreten iki aşamalı bir açgözlü sezgisel prosedür önermiştir. İlk aşamada, tüm trenlerin mevcut zaman ve konumları güncellenerek her biri bir cep hattında konumlandırılır. İkinci aşamada ise açgözlü sezgiselin daha rafine bir sürümü uygulanarak trenler arası çakışmalar çözülür. Önerilen strateji, bir Asya demiryolu şirketi tarafından benimsenmiş ve uygulanmıştır.

Higgins vd. (Higgins et al., 1996), hem sefer tarifesi geliştirmek hem de gerçek zamanlı trafik yönetimi sağlamak üzere bir KTDOP modeli formüle etmiştir. Model, tek yollu uzun bir hatta uygulanmıştır. Yazarlar, öncelik kurallarını esas alan ve en kısa yol metodunu kullanan bir dal-sınır algoritması sunmuştur. Çakışmaların çözümü için tren öncelikleri, mevcut tren gecikmeleri ve kalan gecikme miktarı kriterleri dikkate alınmıştır.

Nachtigall ve Voget (Nachtigall et al., 1996), açgözlü sezgisel algoritma ve lokal gelişim algoritmasını genetik algoritma ile birleştirerek uyguladıkları çalışmada aktarma (transfer) sürelerini minimize etmek amacıyla periyodik bir çizelge tasarlamıştır. Modelde her bir tren çifti için aktarma yapacak yolcu sayısının önceden bilindiği varsayılmaktadır. Çalışma, tren kalkış zamanlarında yapılacak değişiklik ile aktarma yapacak yolcular için bekleme sürelerinin azaltılabileceğini göstermektedir.

Brännlund vd. (Brännlund et al., 1998), tek yollu bir hatta yolcu ve yük trenlerini çizelgelemek için bir TDP modeli önermiştir. Amaç, yol kapasitesi kısıtına bağlı kalarak tüm trenlerin kârını maksimize etmektir. Kâr, trenin kalkış anındaki kârından hat boyunca yapılan gereksiz duruşların dakika başına maliyeti çıkarılarak hesaplanır. Problem, Lagrange gevşetmesi tekniği ile orijinal problem her bir tren için en kısa yol alt problemine indirgenerek çözülmüştür.

Caprara vd. (Caprara et al., 2002), çizelgeleme problemini, aralarında bazı istasyonların bulunduğu iki ana istasyonu birbirine bağlayan tek yollu ve tek yönlü bir hat için ele almıştır. Grafik-teorik formüle edilen problem, kombinatoriyal teklif kısıtlarının olmadığı optimal yol tahsisi problemine eşdeğerdir. Grafik üzerindeki düğüm noktaları, verilen bir zamanda belirli bir istasyon için varış ve kalkış zamanlarına tekabül etmektedir. Çözüm için sadece grafikteki düğümler ile ilgili kısıtlar Lagrange yoluyla gevşetilmiştir. Sezgisel algoritmaya gömülü olan bu özellik çözüm sürecini önemli ölçüde hızlandırmıştır.

Ghoseiri vd. (Ghoseiri et al., 2004), çalışmasında tek ve çoklu yolların bulunduğu bir demir yolu ağı için maliyetleri azaltacak ve yolcuları memnun edecek bir sefer tarifi üretmeye odaklanmıştır. İstasyonlarda farklı tren kapasitelerine sahip birden fazla platform bulunmaktadır. Çok amaçlı problemin çözümü iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada Epsilon kısıt yöntemi ile işletme zamanı ve enerji tüketimi arasındaki uzlaşımın Pareto eğrisi belirlenir. Daha sonra uzaklık bazlı yöntem kullanılarak Pareto eğrisinden fizibil çözüm hesaplanır.

Chierici ve Cordone (Chierici et al., 2004), İtalya'nın kuzeybatısında yer alan demiryolu ağına ait gerçek örnekleri çözmek üzere bir KTDOP modeli geliştirmiştir. Model, dalsınır algoritmasının yanı sıra sezgisel bir algoritma kullanarak araçlar tarafından karşılanan toplam talebi maksimize etmeyi hedefleyen periyodik çizelgeler üretmektedir. Ayrıca, tren sefer çizelgesinin kalitesi ile raylı sistem tarafından karşılanan talep arasındaki ilişki yazarlar tarafından incelenmiştir.

Vansteenwegen ve Oudheusden (Vansteenwegen et al., 2006), yolcu hizmet kalitesini iyileştirmek amacıyla Belçika demiryolu ağının küçük bir kısmı üzerine eğilmişler ve dayanıklı bir çizelge oluşturmak üzere iki aşamalı bir yaklaşım geliştirmişlerdir. İlk olarak araçların daima geciktiğinden hareketle her bir aktarma (transfer) noktası için ideal tampon süresi hesaplanmış daha sonra bu süreler yeni periyodik çizelgeyi yapılandırmak için kurulan DP modelinde kullanılmıştır. Son olarak ise mevcut ve yeni çizelge arasında kıyas yapmak için bir kesikli olay simülasyonu kurgulanmıştır. Yazarlar, sonuçların önemli oranda iyileşmeye işaret ettiğini raporlamışlardır.

Kaspi ve Raviv (Kaspi et al., 2013), talep odaklı çalışmalarında hem hat planı hem de periyodik sefer tarifesi üretmeye dayalı entegre bir model önermiştir. Modelin amacı, yolcuların raylı sistem içinde harcadıkları süreyi ve operasyonel maliyetleri minimize etmektir. Model, tren kapasite kısıtını dikkate almamaktadır. Bu durum, çapraz entropi sezgiseli kullanılarak elde edilen çözümün hesaplanma süresini azaltmıştır. Bütünleşik yaklaşım, 1000 km yol uzunluğu, 77 istasyon ve 28 farklı rotaya sahip İsrail demiryolu ağında test edilmiş ve mevcut çizelgeye kıyasla yolculuk sürelerinde %20 oranında bir düşüş sağlanmıştır.

Bešinović vd. (Bešinović et al., 2016), Hollanda demiryolu ağı üzerinde çalışan hem yolcu hem de yük trenleri için gecikmelere dayanaklı döngüsel (periyodik) bir sefer tarifesi geliştirmek amacıyla mikroskobik ve makroskobik modellerden oluşan hiyerarşik bir yaklaşım önermiştir. Mikroskobik model, her bir tren için istasyonlar arası çalışma sürelerini ve güvenli süreleri hesaplar. Makroskobik model ise bu bilgileri girdi olarak alır ve tüm çizelgeyi hesaplar. Modelin çözümü için geliştirilen çok başlangıçlı açgözlü sezgisel algoritma, sefer iptal maliyeti, tren çalışma maliyeti, tren duruş maliyeti, aktarma süresi uzama maliyeti ve dayanıklılık maliyetinden oluşan toplam maliyeti iteratif olarak minimize etmektedir.

Robenek vd. (Robenek et al., 2018), yolcu odaklı sefer çizelgeleme problemini ücretlendirme konusuyla beraber ele almıştır. Bu bağlamda, modele yolcu rota tercihini tahmin eden bir logit model ile bir bilet fiyatlandırma problemi dâhil edilmiştir. Tavlama benzetimi sezgiseli aracılığıyla İsrail demiryolu ağı için çözölen problem, yolcu davranışları hesaba katıldığında gelirleri %15 oranında artırmanın mümkün olduğunu göstermiştir.

Tablo 3.1 Kentler arası raylı sistemlerde tren sefer çizelgelemeye ilişkin literatür özeti

Yazar	Yıl	Amaç Fonksiyonu	Model Tipi	Çözüm Yöntemi	Çizelge Türü
Cai ve Goh	1994	Toplam gecikme min.	KTDP	Açgözlü Sezgisel Algoritma	Periyodik olmayan
Higgins vd.	1996	Tren gecikmesi ve işletme maliyetleri min.	KTDOP	Dal-sınır Algoritması	Periyodik olmayan
Nachtigall ve Voget.	1996	Aktarma süresi min.	KTDP	Genetik Algoritma	Periyodik
Brännlund vd.	1998	Toplam kâr maks.	TDP	Langrange Gevşetmesi	Periyodik olmayan
Caprara vd.	2002	Çizelgelenmiş trenlere ait kârın maks.	TDP	Langrange Gevşetmesi + Sezgisel Algoritma	Periyodik
Ghoseiri vd.	2004	Yakıt tüketim maliyeti ve toplam yolculuk süresi min.	KTDOP	Epsilon Kısıt Yöntemi + Uzaklık Bazlı Yöntem	Periyodik olmayan
Chierici ve Cordone	2004	Karşılanan talebin maks.	KTDOP	Dal-sınır Algoritması + Sezgisel Algoritma	Periyodik
Vansteenwegen ve Oudheusden	2006	Toplam bekleme maliyeti min.	DP + Simülasyon	-	Periyodik
Kaspi ve Raviv	2013	Toplam araç seyahat süresi ve toplam yolculuk süresi min.	KTDOP	Çapraz Entropi Sezgisel Algoritması	Periyodik
Bešinović vd.	2016	Toplam maliyet min.	TDP	Çok Başlangıçlı Açgözlü Sezgisel Algoritma	Periyodik
Robenek vd.	2018	Gelir maks.	KTDOP	Tavlama Benzetimi	Yarı Periyodik

3.2 Kent İçi Raylı Sistemler

Her gün milyonlarca yolcu tarafından tercih edilen kent içi raylı sistem hatları genellikle iki yoldan oluşmaktadır. Her bir yolda araçlar sadece tek yönde hareket edebilmekte ve dolayısıyla araçların birbirleri ile karşılaşması ya da birbirlerini sollaması söz konusu olmamaktadır. Kentler arası raylı sistemlerde, bir istasyonda aynı anda birden fazla tren bulunabiliyor iken kent içi raylı sistemlerde, bir istasyonda bir anda sadece bir tren bulunabilmektedir. Bu alt bölümde, kent içi raylı sistemlerde TSC problemini çözmek üzere yapılmış çalışmalar üç farklı başlık altında incelenmiştir.

3.2.1 Talep Odaklı

Kent içi raylı sistemlerde yolcu talebi istasyonlar arasında eşit şekilde dağılmamıştır. Talep, her istasyonda diğer istasyonlardan bağımsız olarak ve zamana göre değişen bir yapıda gerçekleşir. Talebin zamana göre sahip olduğu bu yüksek heterojenliği göz ardı eden sefer tarifeleri, yolcular açısından daha uzun bekleme sürelerine, firmalar açısından daha fazla işletme maliyetine neden olmaktadır. Bu bağlamda, yolculuk verisine erişimi mümkün kılan teknolojilerin de katkısıyla, kent içi raylı sistemlerde talep yapısını dikkate alan (talep odaklı) TSC çalışmaları son yıllarda büyük artış göstermiştir. Bu kısımda bu özellikte çalışmalar ele alınmıştır.

Chang ve Chung (Chang et al., 2005), Tayvan’da çift yönlü bir metro hattını baz aldıkları çalışmada, ortalama yolculuk süresini azaltmak ve kapasite kullanımını artırmak amacıyla iki aşamalı bir işletme mekanizması geliştirmişlerdir. İlk aşamada, geçmiş yolcu akış verileri kullanılarak planlı bir sefer çizelgesi oluşturulur. İkinci aşamada ise herhangi bir aksamadan kaynaklı bozulan planlı çizelge için yeniden çizelgeleme yapılır. Model, belirli bir seviyeye kadar olan aksamaların (gecikmelerinin) etkisini giderebilecek kabiliyete sahiptir.

Cadarso ve Marín (Cadarso et al., 2012), hızlı metro ağlarında artan yolcu talebini karşılamak ve trafik yoğunluğunu dindirmek amacıyla TSC ile araç çizelgeleme işlemini beraber gerçekleştiren bütünleşik bir KTDP modeli önermişlerdir. Çalışmada maksimum ve minimum sefer sayılarının önceden (hat planlama aşamasında) belirlendiği varsayılmış ve araçların depoda yaptıkları yolcusuz manevra operasyonları dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, geride bırakılan yolcular ihmal edilmiş, araç istasyondan ayrıldıktan sonra geride yolcu kalmadığı varsayılmıştır. Ayrıca, yolcu transferleri de ihmal edilmiş,

belirli bir rotadaki yolcu sayısının sabit olduğu ve sefer tarifesinden etkilenmediği varsayılmıştır.

Wang vd. (Wang, De Schutter, et al., 2013), toplam yolculuk süresini minimize etmek amacıyla gerçek zamanlı bir TSC yaklaşımı önermiştir. Talebin statik olduğu varsayılmıştır ki bu, gerçek hayat koşullarından uzak bir varsayımdır. Problem, DOP modeli ile formüle edilmiş ve sıralı karesel programlama metodu kullanılarak çözülmüştür. Çözüm, trenlerin optimal kalkış zamanı, istasyonlar arası çalışma süresi ve istasyonlarda duruş süresini içermektedir. Çalışmada istasyonlardaki yolcu talebinin optimal seferler arası süreyi (headway) etkilediği sonucuna varılmıştır.

Barrena vd. (Barrena et al., 2014a), planlama ufkunun ayrıştırıldığı (indekslendiği) ve yolcu gelişlerinin her bir zaman aralığında homojen dağıldığı varsayılan bir yaklaşım geliştirmiştir. Amaç fonksiyonunun doğrusal temsilini mümkün kılmak adına yolcu akış değişkenlerinin kullanıldığı modelde tren kapasitesi ihmal edilmiştir. Diğer taraftan, çift yöllü raylı sistemler için sefer çizelgeleme problemi, iki bağımsız probleme ayrılmış ve dal-kesme algoritması kullanılarak bir yol için çözüm yapılmıştır. Önerilen metod, Madrid metrosundan edinilen veriler ile test edilmiş, makul sürelerde üretilemeseler de yeni çizelgelerin mevcut çizelgeye kıyasla bekleme sürelerini ortalama %30 oranında iyileştirdiği gözlenmiştir.

Barrena vd. (Barrena et al., 2014b), ortalama yolcu bekleme süresini minimize etmek için iki adet KTDOP modeli formüle etmiştir. Önceki çalışmada kullanılan algoritma büyük ölçekli problemleri çözmede yetersiz kaldığından bu çalışmada Riemann toplam teorisi öne sürülmüş ve daha kısa sürelerde çözüm üreten bir adaptif büyük komşuluk arama sezgiseli geliştirilmiştir. Algoritma araması, tren seferlerinin çizelgeye iteratif olarak eklenmesi ve çıkarılmasını esas almaktadır. Bununla birlikte, bu çalışmada da tren kapasitesinin tüm yolcu talebini karşılayabilecek büyüklükte olduğu varsayılmıştır.

Sun vd. (L. Sun et al., 2014), tek yolu dikkate alan ve yolcu talebi ile tren operasyonlarını senkronize kılmak amacıyla eşdeğer zaman kavramını ileri sürdükleri çalışmada talep odaklı sefer tarifeleri üreten üç adet optimizasyon modeli geliştirmiştir. Eşdeğer zaman aralıklarında yolcu gelişlerinin homojen dağıldığı varsayılan modeller bir Singapur metro hattından toplanan veriler ile performans açısından kıyaslanmış ve kapasite kısıtlarının dâhil edildiği modelin en avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Hassannayebi vd. (Hassannayebi et al., 2014), kent içi raylı sistemlerin planlamasında seyahat süresi, talep belirsizliği ve araç duruş süresi değişkenliğinin üstesinden gelmek amacıyla iki aşamalı, genetik algoritma temelli bir simülasyon ile optimizasyon yaklaşımı geliştirmiştir. Yolcu talebi, Poisson dağılımına uyan saatlik geliş oranları ile temsil edilmiştir. Optimizasyon, çift yönlü işletilen bir hatta dayanaklı sefer çizelgeleri elde etmek üzere seferler arası sürelerin (headway) simülasyon deneyleri yoluyla ayarlanmasını amaçlamaktadır.

Sun vd. (X. Sun et al., 2015), tasarladıkları çift amaçlı optimizasyon modelinde yolcu bekleme süresinin yanı sıra tren işletme maliyetinin minimizasyonunu hedeflemiştir. Tren duruş süresinin inen ve binen yolcu miktarının bir fonksiyonu olarak modellendiği problemin çözümü için Lagrange dualite teorisi kullanılmıştır. Son olarak, bir Pekin metro hattında test edilen modelin yolcu talebini karşılamada sınırlandırılmış duruş sürelerinin esas alındığı modele kıyasla daha verimli olduğu görülmüştür.

Shang vd. (Shang et al., 2016), tek yönlü bir hat için toplam yolculuk süresi minimizasyonunu amaçlayan bir KTDOP modeli geliştirmiştir. Çalışmada, kümülatif yolculuk talebinin temsili için S biçimli (Sigmoid) fonksiyonlar önerilmiştir. Dal-sınır algoritması kullanılarak çözülen model, bir Pekin metro hattında test edilmiş ve optimize edilen sefer çizelgesinin mevcut çizelgeye göre toplam yolculuk sürelerini %60 oranında azalttığı sonucuna varılmıştır.

Yue vd. (Yue et al., 2017), iki seviyeli bütünlük bir optimizasyon metodolojisi önermiştir. Üst seviye model TSÇ için kullanılırken, alt seviye model araç çizelgeleme için kullanılmaktadır. Üst seviyede elde edilen sefer çizelgesi alt seviyenin girdisini oluşturur. Çalışmada, hat topolojisinin doğrusal değil döngüsel olduğu varsayılmıştır. Bu varsayıma göre araçlar yön değiştirmek zorunda kalmayacağından manevra işlemi doğal olarak dikkate alınmamıştır. Çözüm için yaklaşık optimal çözümler üreten tavlama benzetimi bazlı bir sezgisel algoritma kullanılmıştır.

Shakibayifar vd. (Shakibayifar et al., 2017), kent içi raylı sistemlerde yolcu gelişlerinde oluşan dalgalanma ile baş edebilmek için iki aşamalı bir stokastik programlama modeli önermiştir. İlk aşamada çizelgeleme kararları verilir. İkinci aşamada ise geliş oranları gerçekleştirilir ve yolcu akışları belirlenir. Beklenen değer hedefini değerlendirmenin yüksek hesaplama maliyetinden dolayı çözüm için örnek ortalama yakınsaması metodu benimsenmiştir.

Wang vd. (Wang et al., 2018), TSC ve araç sirkülasyon planlamayı entegre ettiği çok amaçlı optimizasyon modelinde filo büyüklüğü ve araç kapasitesi gibi kısıtlara bağlı olarak yolcular için hizmet kalitesini artırmanın yanı sıra operasyonel karmaşıklığı ve çizelgeleme maliyetlerini azaltmayı hedeflenmiştir. Komşu istasyonlar arasındaki zamana bağlı yolcu talebinin dikkate alındığı çalışmada çok amaçlı KTDOP modelinin çözümü için üç farklı yöntem önerilmiş ve bu metotlar etkinlik ve verimlilik açısından kıyaslanmıştır.

Zhang vd. (M. Zhang et al., 2018), birden fazla depoya sahip bir kent içi metro hattı için sefer çizelgeleme ile kısa-dönüş stratejisini entegre eden bir optimizasyon modeli geliştirmiştir. Modelde kısa uzunluktaki seferler ile tam uzunluktaki seferler, yolcu talep analizi yoluyla önceden belirlenmiş seferler arası süreler (headway) esas alınarak optimize edilmektedir. Yaklaşımın performansı bir Pekin metro hattında test edilmiş ve araç kullanım oranının yaklaşık %21 azaldığı gözlenmiştir.

Nitisiri vd. (Nitisiri et al., 2019), tren kapasitesinin sınırsız varsayıldığı TSC problemini çözmek için hibrit örnekleme ve öğrenme bazlı mutasyonu baz alan bir paralel çok amaçlı evrimsel algoritma tasarlamıştır. Çalışmanın ana amacı hem yolcu hem de işletmeci firmayı memnun edecek en iyi çözümü bulmaktır. Bu doğrultuda, Pareto çözüm kümesinden en iyi çözümü seçmek için TOPSIS metodu kullanılmıştır.

Xue vd. (Xue et al., 2019), çift yönlü bir kent içi metro hattında kullanılmayan kapasite ile yolcu bekleme süresini beraber azaltacak dengelenmiş bir optimal çizelge üretmek amacıyla bir TDOP modeli formüle etmiştir. Geliştirilen yaklaşımda yolcuların rota tercihlerinin yanı sıra tren kapasitesi ve araç sirkülasyonu dikkate alınmıştır. Bununla birlikte, filo büyüklüğü kısıtı ihmal edilmiştir. Genetik algoritma ile çözülen model bir Pekin metrosunda test edilmiş ve kapasite kullanımında %4.5, yolcu bekleme süresinde %9.5 oranında iyileşme gözlenmiştir.

Yang vd. (L. Yang et al., 2021), zamana bağlı yolcu talebini esas alan optimal tren sefer çizelgesi ve buna tekabül eden araç sirkülasyonunu elde etmeyi hedeflediği çalışmaya esnek bir kısa-dönüş stratejisi dâhil etmiştir. Problem, çift katmanlı bir uzay-zaman ağında çok ürünlü ağ akış optimizasyon modeli olarak formüle edildikten sonra kuplaj kısıtı gevşetilerek çözümü kolay alt problemlere ayrıştırılmış ve Lagrange gevşetmesi metodu ile çözülmüştür. Modelin etkinliği, sanal olarak üretilmiş bir dizi küçük veri kümesinin yanı sıra Pekin metro ağından alınan gerçek bir veri seti ile test edilmiştir.

Tablo 3.2 Kent içi raylı sistemlerde talep odaklı tren sefer çizelgelemeye ilişkin literatür özeti

Yazar	Yıl	Amaç Fonksiyonu	Model Tipi	Çözüm Yöntemi	Altyapı	Yolcu Talebi
Chang ve Chung	2005	Ortalama yolculuk süresi min. ve ortalama araç doluluk oranı maks.	DOP	Genetik Algoritma	ÇY	D
Cadarso ve Marín	2012	İşletme maliyetleri ve müşteri memnuniyetsizlik cezaları min.	KTDP	CPLEX	Ağ	D
Wang vd.	2013	Toplam yolculuk süresi min.	DOP	Sıralı Karesel Programlama	TY	S
Barrena vd.	2014a	Ortalama yolcu bekleme süresi min.	KTDP	Dal-kesme Algoritması	TY	D
Barrena vd.	2014b	Ortalama yolcu bekleme süresi min.	KTDP	Adaptif Büyük Komşuluk Arama Algoritması	TY	D
Sun vd.	2014	Ortalama yolcu bekleme süresi min.	KTDP	Dal-sınır Algoritması	TY	D
Hassannayebi vd.	2014	Beklenen yolcu bekleme süresi min.	DOP	Simülasyon + Genetik Algoritma	ÇY	D
Sun vd.	2015	Yolcu bekleme süresi ve işletme maliyeti min.	DOP	Langrange Ayrıştırması	TY	S
Shang vd.	2016	Toplam yolculuk süresi min.	KTDP	Dal-sınır Algoritması	TY	D
Yue vd.	2017	Yolcu bekleme süresi, işletme maliyetleri ve uygun olmayan tren yolu sayısı min.	DOP	CPLEX + Tavlama Benzetimi	ÇY	D

Tablo 3.2 Kent içi raylı sistemlerde talep odaklı tren sefer çizelgelemeye ilişkin literatür özeti (devamı)

Shakibayifar vd.	2017	Beklenen yolcu bekleme süresi min.	İki Aşamalı Stokastik Programlama	Örnekleme Ortalama Yakınsaması	TY	D
Wang vd.	2018	Seferler arası süre (headway) varyasyonu, doluluk faktörü varyasyonu ve depo operasyonu sayısı min.	KTDOP	CPLEX + İteratif Yaklaşım	ÇY	D
Zhang vd.	2018	Seferler arası süre (headway) varyasyonu ve tren sefer sayısı min.	KTDP	CPLEX	ÇY	S
Nitisiri vd.	2019	Ortalama yolcu bekleme süresi ve tren sefer sayısı min.	DOP	Genetik Algoritma	ÇY	D
Xue vd.	2019	Yolcu bekleme süresi ve kullanılmayan kapasite min.	TDOP	Genetik Algoritma	ÇY	D
Yang vd.	2021	Toplam yolculuk süresi min.	TDP	Langrange Gevşetmesi	Ağ	D

3.2.2 Doymuş Hatlar

Bir raylı sistem hattının doymuş olması yolcu yoğunluğunun yüksekliğine işaret eder. Doymuş bir metro hattında günün belli zamanlarında oluşan yüksek yolcu talebi maksimum tren kapasitesinin üzerine çıkar. Bu durumda bazı yolcular gelen ilk araca binemeyip sonraki uygun araçları beklemek zorunda kalır ki, bu da söz konusu yolcuların seyahat süresinin artması anlamına gelir. Dolayısıyla, doymuş bir hat odağında yapılacak TSC çalışmaları en temelde tren kapasitesinin dikkate alınması gerekmektedir. Bununla birlikte, yolcu akış değişkenleri ve kısıtları aracılığıyla yolcunun gelen ilk araca binememesi anlamına gelen doygunluk durumu da modele dâhil edilmelidir. Bu kısımda bu özellikteki çalışmalar incelenecektir.

Niu ve Zhou (Niu & Zhou, 2013), literatürde ilk defa aşırı kalabalık (doymuş) bir metro hattına odaklanmış ve talebin kapasiteyi aştığı durumda sistemin nasıl davrandığını incelemişlerdir. Yazarlar, otomatik ücret toplama sisteminden elde edilen zamana bağlı OD talep matrislerini kullanarak ve kaynak kısıtlarına bağlı kalarak ara istasyonlardaki yolcu yoğunluğunu azaltmayı hedefleyen bir sefer tarifiesi tasarım modeli geliştirmişlerdir. Model, sisteme ilk defa dâhil olan yolculara ek olarak sınırlı kapasiteden dolayı araca binemeyen yolcuları da dikkate almakta ve her ikisi için bekleme süresini düşürmeyi amaçlamaktadır. Tek istasyonlu durum için lokal arama algoritması, çok istasyonlu durum için ise genetik algoritma ile çözüm önerilmiştir.

Niu ve Tian (Niu & Tian, 2013), dinamik yolcu talebini ölçmek için planlama ufkunu eşit aralıklara böldükleri çalışmada kısıtlı kapasiteye sahip olan araçların ilk istasyondan kalkış zamanlarını belirlemek için çift amaçlı bir optimizasyon modeli geliştirmişlerdir. Sisteme daha erken dâhil olan yolcuların daha önce hizmet aldığı (FIFO) varsayılan modelin çözümü için lokal geliştirme ve akıllı aramanın baz alındığı bir hibrit algoritma tasarlanmıştır.

Canca vd. (Canca et al., 2014), uzun dönemli değişken yolcu verisini yenilikçi bir yaklaşımla ele aldıkları çalışmada trenlerin varış ve kalkış zamanlarını talebin dinamik yapısına göre ayarlayan bir KTDOP modeli önermiştir. Yazarlar, üretilen sefer tarifiesinin kalitesini belirlemek amacıyla bazı kullanışlı performans ölçütleri sunmuş ve operasyonel maliyetler ile hizmet kalitesi arasındaki uzlaşımı belirlemek amacıyla bir duyarlılık analizi icra etmiştir.

Zhu vd. (Zhu et al., 2015), tren ve istasyon kapasite kısıtlarını dikkate alarak trenlerin ilk istasyondan kalkış zamanlarını çizelgeleyen bir optimizasyon modeli önermiştir. Çalışmada araç hareketleri ve yolcu akışı bir kesikli-olay sümülasyon modeli kullanılarak simüle edilmektedir. Sistem maliyetlerini minimize etmeye çalışan modelin çözümü için sümülasyon modelinden elde edilen fizibil başlangıç çözümlerini kullanan genetik algoritma sezgiseli kullanılmıştır.

Hassannayebi vd. (Hassannayebi et al., 2016), çift yöllü bir metro hattında uzun bekleme sürelerini ve yolcu yoğunluğunu önlemek maksadıyla yol indeksli bir DOP modeli formüle etmiştir. Filo büyüklüğüne ek olarak her iki yöndeki araç sirkülasyonunu da dikkate alan modeli makul sürelerde çözebilmek için Lagrange gevşetmesi tekniği kullanılmıştır.

Shi vd. (Shi et al., 2018), aşırı yoğun metro hatlarına ait platformlardaki kalabalığı yatıştırmak amacıyla tren sefer çizelgesi ile birlikte yolcu akış stratejisini optimize eden efektif bir metot önermiştir. Modelde, yolcuların istasyon girişi dışında kuyruk oluşturacakları, yolculuk talebinden vazgeçmeyecekleri ya da başka bir ulaşım moduna geçmeyecekleri varsayılmıştır. Bu varsayımlar ile tüm talebin karşılanacağı garanti altına alınmıştır. Problemin çözümü için CPLEX çözücü ve lokal arama algoritmasının birleştirildiği bir hibrit algoritma tasarlanmıştır.

Zhang vd. (T. Zhang et al., 2018), trenlerin istasyonlar arası çalışma süresini, istasyonlarda duruş süresini ve gün içinde gerçekleştirilecek sefer sayısını eş zamanlı olarak optimize eden bir yaklaşım geliştirmiştir. Bu amaçla, tren kapasitesinin sınırlandırılmadığı ve sınırlandırıldığı iki farklı doğrusal olmayan model önerilmiştir. Modeller gerçek hayat koşullarında incelenmiş ve araç doluluk oranını makul seviyelerde tutan ikinci modelin daha iyi sonuçlar ürettiği gözlenmiştir.

Shen vd. (Shen et al., 2018), bağımsız bir hatta odaklandıkları çalışmada tren kapasitesine ek olarak platform kapasitesini de dikkate almışlardır. Çok amaçlı olarak kurgulanan model, yolcular için toplam seyahat süresini ve yolcu yoğunluğundan dolayı platform kapasitesinin aşılma sayısını minimuma indirmeyi amaçlamaktadır. Önerilen metot, yarı periyodik ve periyodik olmayan sefer tarifiesi üreten mevcut iki yöntem ile kıyaslanmış ve sonuçlar önerilen metodun daha iyi performans sergilediğini göstermiştir.

Li vd. (S. Li et al., 2019), doymuş bir hat için heterojen sefer aralıkları (headway) ile kısa-dönüş seferlerinin eş zamanlı olarak optimize edildiği bir KTDOP modeli önermiştir. Tek yönlü tren hareketlerinin dikkate alındığı çalışmada hat üzerinde bir adet kısa ve bir adet tam uzunlukta olmak üzere iki adet rota bulunduğu varsayılmıştır. Bununla birlikte, kısa uzunluktaki sefer sayısının sabit ve tam uzunluktaki sefer sayısının belirli bir oranında gerçekleştiği kabul edilmiştir. Modelin karmaşıklığından ötürü çözüm için iki aşamalı bir sezgisel algoritma (genetik algoritma) kullanılmıştır.

Li vd. (D. Li et al., 2019), mevcut TSC çalışmalarında tüm yolcular için eşit bekleme süresi öngörüldüğünü gözlemiş ve etkin bir çizelge ile adil bir çizelge arasında her zaman pozitif bir korelasyon olmadığından hareketle hem etkin hem adil bir sefer tarifiesi oluşturmaya odaklanmıştır. Bu amaçla, uzun mesafe yolcularının daha fazla, kısa mesafe yolcularının daha az beklemesini sağlayacak bir KTDOP modeli tasarlanmış ve kurulan model tavlama benzetimi bazlı bir komşuluk arama algoritması kullanılarak çözülmüştür.

Blanco vd. (Blanco et al., 2020), kent içi otomatik metro ağlarında hat planı ve sefer tarifesi oluşturma problemini eş zamanlı olarak optimize eden bütünleşik bir model önermiştir. Kısa-dönüşlerin, aktarma (transfer) istasyonlarının ve trenlere ait teknik özelliklerin dâhil edildiği model hem firma hem de yolcu çıkarlarını dikkate almaktadır. Yolcu gelişlerinin parçalı doğrusal fonksiyon ile temsil edildiği problem yazarlar tarafından geliştirilen yeni bir Mat-sezgisel yaklaşım kullanılarak çözülmüştür.

Liu vd. (Liu et al., 2020), çift yönlü bir kent içi metro hattında TSC ve araç çizelgeleme problemini yolcu akış kontrol stratejisi ile entegre eden bir KTDP modeli kurgulamıştır. Orijinal problem, Lagrange gevşetmesi bazlı bir yaklaşım ile iki küçük probleme ayrılarak çözülmüştür. Bir Pekin metro hattına ait veriler kullanılarak yapılan testler önerilen çözüm yaklaşımının CPLEX çözücüsünden daha iyi performans sergilediğini ve modelin yolcu talebine duyarlı olmadığını göstermiştir.

Tablo 3.3 Doymuş kent içi raylı sistem hatlarında tren sefer çizelgelemeye ilişkin literatür özeti

Yazar	Yıl	Amaç Fonksiyonu	Model Tipi	Çözüm Yöntemi	Altyapı	Yolcu Talebi
Niu ve Zhou	2013	Yolcu bekleme süresi ve geride kalan yolcu sayısı min.	KTDOP	Genetik Algoritma	ÇY	D
Niu ve Tian	2013	Yolcu bekleme süresi ve araç sayısı min.	DOP	Sezgisel Algoritmalar	TY	D
Canca vd.	2014	Ortalama yolcu bekleme süresi ve ortalama doluluk oranı min.	KTDOP	Dal-sınır Algoritması	TY	D
Zhu vd.	2015	Yolcu bekleme maliyeti ve işletme maliyeti min.	TDOP	İki Aşamalı Simülasyon Bazlı Genetik Algoritma	ÇY	D
Hassannayebi vd.	2016	Ortalama yolcu bekleme süresi min.	DOP	Lagrange Gevşetmesi	ÇY	S
Shi vd.	2018	Yolcu bekleme süresi min.	TDP	CPLEX + Lokal Arama Algoritması	ÇY	D

Tablo 3.3 Doymuş kent içi raylı sistem hatlarında tren sefer çizelgelemeye ilişkin literatür özeti (devamı)

Zhang vd.	2018	Toplam yolculuk süresi min.	KTDOP	Adaptif Büyük Komşuluk Arama Algoritması	TY	D
Shen vd.	2018	Toplam yolculuk süresi ve platformların kalabalık olma sayısı min.	TDOP	Genetik Algoritma	ÇY	D
Li vd.	2019	Yolcu bekleme süresi, işletme maliyeti ve dengesiz araç doluluğu min.	KTDOP	Genetik Algoritma	TY	D
Li vd.	2019	Toplam yolculuk süresi ve yolcu memnuniyetsizlik uzlaşımı	KTDOP	Tavlama Benzetimi + Adaptif Büyük Komşuluk Arama Algoritması	TY	D
Blanco vd.	2020	İşletme maliyetleri ve yolcu bekleme süresi min.	KTDP	Mat-sezgisel Algoritma	Ağ	D
Liu vd.	2020	Araç kullanım oranı maks., geride kalan yolcu sayısı ve kontrol stratejisi genliği min.	KTDP	Lagrange Gevşetmesi + Sezgisel Algoritma	ÇY	S

3.2.3 Enerji Verimli

Kent içi raylı sistemler tipik olarak yer altında, cadde seviyesinde ya da cadde üstü seviyede konumlanmış elektrikli sistemlerdir. Her ne kadar enerji verimli bir ulaşım modu olsalar da her yıl büyük miktarda elektrik enerjisi bu sistemler tarafından tüketilmektedir. Esasen operasyonel maliyetlerin önemli bir kısmı enerji tüketim maliyetinden kaynaklanmaktadır. Gün içinde oluşan talep dalgalanmalarını dikkate alarak tasarlanan sefer tarifeleri sadece yolcu bekleme ve seyahat süresini değil aynı zamanda enerji tüketimini de etkilemektedir. Bu nedenle, hizmet kalitesini yükseltme amacının yanı sıra enerji verimliliğini artırma amacındaki TSC yaklaşımı son yıllarda

literatürde sıklıkla ele alınan bir konu haline gelmiştir. Bu kısımda bu özellikteki çalışmalar gözden geçirilecektir.

Wang vd. (Wang et al., 2014), tek yönlü bir kent içi raylı sistem hattında TSC problemini istasyon atlama strateji uygulayarak çözmek için bir optimizasyon yaklaşımı önermiştir. OD yolcu oranları dikkate alınarak ve aktarmalar ihmal edilerek formüle edilen problem için iki seviyeli bir çözüm yaklaşımı geliştirilmiştir. Üst seviye istasyon atlama problemi genetik algoritma, alt seviye yolcu atama problemi ise sıralı karesel programlama metodu kullanılarak çözülmüştür.

Yang vd. (X. Yang et al., 2014), yolcu davranışını deterministik olarak ele almış ancak trenlerin istasyonlardaki duruş süresi belirsizliğini göz ardı etmiştir. Çalışmada yolcu bekleme süresini azaltmak ve rejeneratif enerji kullanımını artırmak amacıyla çift yönlü bir hatta aşağı ve yukarı yönde hareket eden trenler aynı istasyona denk gelecek şekilde koordine edilmiştir. Bir Pekin metrosunda test edilen model mevcut çizelgeye kıyasla yolcu bekleme süresini %3.3 oranında düşürmüş, enerji tasarrufunda ise %8.7 oranında iyileşme sağlamıştır.

Wang vd. (Wang et al., 2015), birden fazla hattın oluşan bir kent içi raylı sistem ağı için üç farklı vakayı (tren varışı, tren kalkışı ve yolcu gelişlerindeki değişim) içeren bir DOP modeli formüle etmiştir. Aktarma yolcularını dikkate alan model, bu yolcuların transfer istasyonlarındaki rota tercihlerini belirlemektedir. Çalışmada farklı destinasyonlara sahip yolcuların istasyonlara rastgele geldikleri ve her bir istasyonda karıştıkları varsayılmaktadır. Başka bir deyişle, farklı destinasyonlara sahip yolcuların araca binme şansı toplam bekleyen yolcu sayısı içindeki oranlarına eşittir.

Huang vd. (Huang et al., 2016), enerji tasarruf stratejisi ve hizmet kalite seviyesine odaklanan iki amaçlı bir model önermiştir. Operasyonel enerji tüketim hesabı, çekme (traction) gücüne ek olarak yardımcı güçleri de içermektedir. Bununla birlikte, bir trenin fren yapmasıyla üretilen ve hareket halindeki diğer bir tren tarafından eş zamanlı olarak kullanılan rejeneratif enerji, transmisyon kaybı hesaplanırken dikkate alınmıştır. Seferler arası süreyi zamana bağlı yolcu talebine göre ayarlayan model, genetik algoritma kullanılarak çözülmüş ve optimum çizelge ile mevcut çizelge kıyaslandığında ekstra iki sefer ilavesi durumunda yolcu bekleme süresinde %23.9, enerji tüketiminde ise sefer başına 4.9 kWh iyileşme sağlandığı gözlenmiştir.

Yin vd. (Yin et al., 2017), iki yönlü bir metro hattında, dinamik yolcu talebini her bir istasyon çifti için her bir zaman aralığında değişen yolcu oranları şeklinde dikkate alarak yolcu bekleme süresi ve toplam enerji tüketimini azaltmayı hedefleyen iki aşamalı bütünleşik bir yaklaşım önermiştir. İlk aşamada çekme (traction) enerji tüketimi ve yolcu bekleme süresi beraber minimize edilirken, ikinci aşamada trenler arasındaki rejeneratif enerji kullanımı dikkate alınmıştır. Sonuçlar, üretilen optimal çizelgenin mevcut çizelgeye kıyasla yolcu bekleme süresini, özellikle pik saatlerde, düşürdüğünü bununla birlikte, enerji tüketiminin nispeten düşük kalmaya devam ettiğini göstermiştir.

Sun vd. (H. Sun et al., 2018), her bir istasyonda yolcu talebinin zamana bağlı değişim gösteren karakteristiğini dikkate alan çok amaçlı bir TSC optimizasyon modeli geliştirmiştir. İstasyonda bekleyen yolcuların tümünün gelen araca binemeyeceği durumlar için FIFO disiplininin esas alındığı çalışmada hızlanan ve yavaşlayan trenler arasında bire bir (one-to-one) enerji iletimi metodu esas alınmıştır. Genetik algoritma ile bir Pekin metrosu için çözülen modelin mevcut çizelgeye göre hem yolcu bekleme süresini hem de enerji tüketimini azalttığı gözlenmiştir.

Yang vd. (S. Yang et al., 2018), sefer tarifesi ve hız profillerini belirlemek üzere çift yönlü bir metro hattını bir çok bölgeye ayırmış ve her bir bölgenin sabit bir hız limitine sahip olduğunu varsaymıştır. Maliyet fonksiyonundaki rejeneratif enerji kullanım oranı, seferler arasındaki çekme (traction) ve frenleme süreçleri arasındaki örtüşme (overlapping) süresine göre hesaplanmıştır. Yüksek derecede doğrusal olmayan problem Taylor yaklaşımı kullanılarak klasik kuadratik programlaya dönüştürüldükten sonra MATLAB ve LINGO yazılımı kullanılarak çözülmüştür.

Mo vd. (Mo et al., 2019), çift yönlü bir hatta her iki yöndeki homojen olmayan yolcu akışını ve farklı kapasitelere sahip araç tiplerini dikkate alarak enerji maliyeti ve yolcu bekleme süresini eş zamanlı olarak minimize etmeyi amaçlamıştır. Gün içinde zamana bağlı değişen elektrik fiyatlarından hareketle enerji tasarruf ölçütü olarak enerji tüketimi yerine enerji maliyeti kullanılmıştır. KTDOP olarak formüle edilen model, öncelik numaralandırma metodu ile modifiye edilmiş bir tabu arama algoritması kullanılarak çözülmüştür.

Yang vd. (S. Yang et al., 2020), yolcular için toplam seyahat süresini azaltmak ve rejeneratif enerji kullanımını artırmak amacıyla bir yolcu atama metodu ve bire çok (one-to-many) bir enerji iletim metodu önermiştir. Tren varış, kalkış ve duruş sürelerinin eş

zamanlı olarak optimize edildiği modelin çözümü için genetik algoritma bazlı bir algoritma kullanılarak verimli Pareto sınır çözümleri elde edilmiştir. Bir Pekin metrosunda test edilen model her iki amacın performansını önemli oranda iyileştirmiştir.

Gong vd. (Gong et al., 2021), yolcu talebinin rassal ve dinamik yapısını dikkate alarak toplam sefer sayısı, seferler arası süre ve hız profili seçimini eş zamanlı olarak optimize eden bir TDOP modeli formüle etmiştir. Doymamış hatlar için tasarlanan model, görece düşük yolcuya sahip olan orta ölçekli kentler ya da kalabalık büyük kentlerin yoğun olmayan saatleri için uygundur. Bir dizi yardımcı değişken yardımıyla doğrusal hale getirilen problem, ilk olarak ticari bir yazılım ile daha sonra çözüm kalitesi ve süresini iyileştirmek adına değişken komşuluk arama algoritması kullanılarak çözülmüştür.

Tablo 3.4. Kent içi raylı sistemlerde enerji verimli tren sefer çizelgelemeye ilişkin literatür özeti

Yazar	Yıl	Amaç Fonksiyonu	Model Tipi	Çözüm Yöntemi	Altyapı	Yolcu Talebi
Wang vd.	2014	Toplam yolculuk süresi ve enerji tüketimi min.	KTDOP	İki Seviyeli Optimizasyon	TY	S
Yang vd.	2014	Rejeneratif enerji kullanımı maks. ve yolcu bekleme süresi min.	KTDOP	Genetik Algoritma	ÇY	S
Wang vd.	2015	Toplam yolculuk süresi ve enerji tüketimi min.	DOP	Genetik Algoritma + Sıralı Karesel Programlama	Ağ	D
Huang vd.	2016	Toplam yolculuk süresi ve enerji tüketimi min.	DOP	Genetik Algoritma	ÇY	D
Yin vd.	2017	Yolcu bekleme süresi ve enerji tüketimi min.	KTDP	Lagrange Gevşetmesi Bazlı Sezgisel Algoritma	ÇY	D

Tablo 3.4. Kent içi raylı sistemlerde enerji verimli tren sefer çizelgelemeye ilişkin literatür özeti (devamı)

Sun vd.	2018	Yolcu bekleme süresi ve enerji tüketimi min.	TDOP	Genetik Algoritma	TY	D
Yang vd.	2018	Yolcu bekleme süresi ve enerji tüketimi min.	DOP	MATLAB + LINGO	ÇY	D
Mo vd.	2019	Yolcu bekleme süresi ve enerji maliyeti min.	KTDOP	Tabu Arama Algoritması	ÇY	D
Yang vd.	2020	Rejeneratif enerji kullanımı maks. ve toplam yolculuk süresi min.	KTDOP	Genetik Algoritma	ÇY	D
Gong vd.	2021	Yolcu bekleme süresi, işletme maliyeti ve enerji tüketimi min.	TDOP	CPLEX + Değişken Komşuluk Arama Algoritması	TY	D

TALEP ODAKLI TREN SEFER ÇİZELGELEME MODELİ

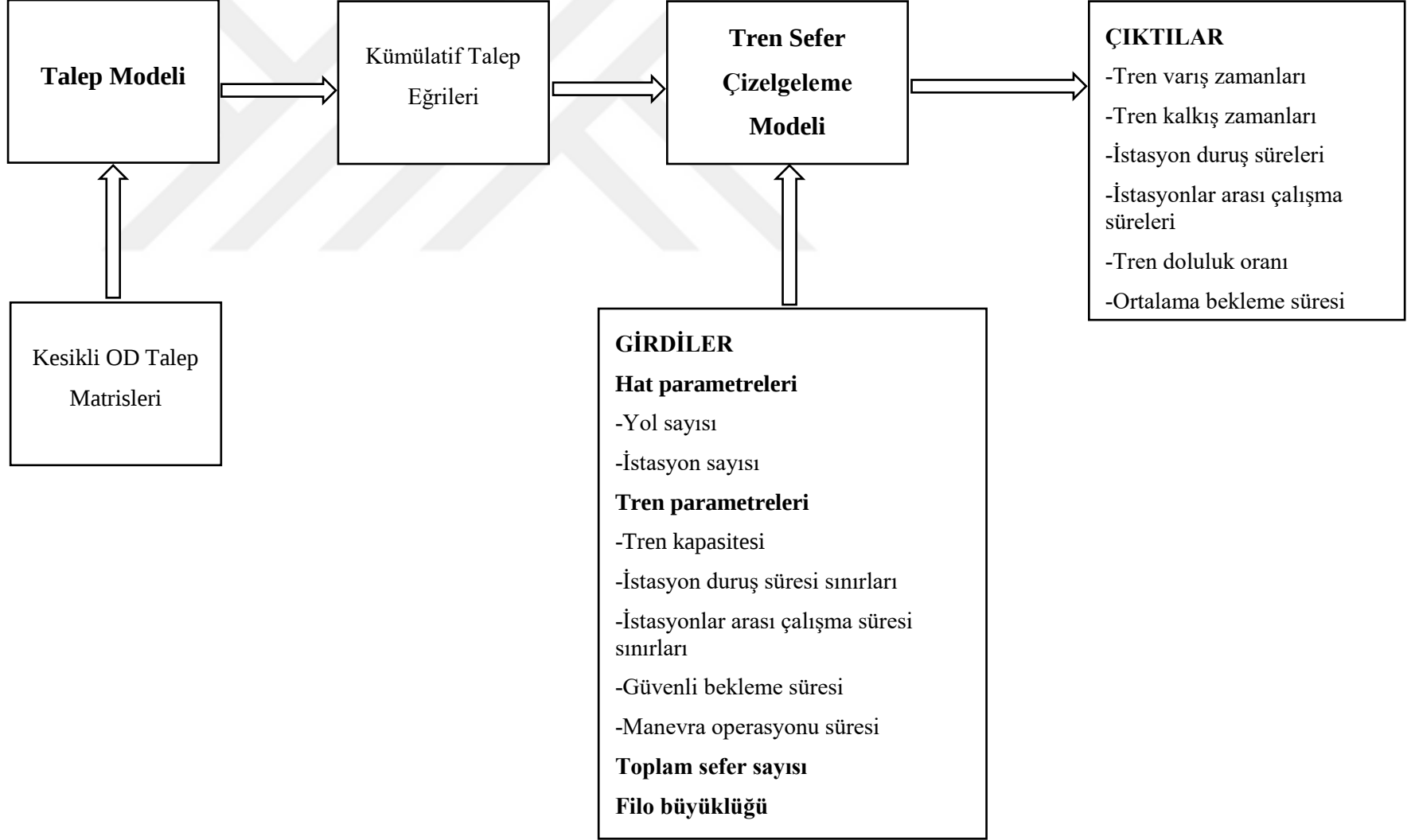
Tren sefer çizelgeleme problemi, sonlu bir planlama ufku dâhilinde belirli kaynak ve operasyonel kısıtlara bağlı kalarak trenlerin istasyonlara varış ve kalkış zamanlarının belirlenmesini gerektirir. Bu tür problemlerin çözümüne yönelik yapılan modelleme çalışmalarında yolcular için hizmet kalitesinin artırılması öncelikli amacı teşkil eder. Dolayısıyla, yolcu talebinin gerçek hayat koşullarını en iyi yansıtacak şekilde formülasyona dâhil edilmesi kritik öneme haizdir. Dikkate alınması gereken bir diğer kriter ise hizmet sağlayıcı firmanın katlanmak zorunda olduğu doğrudan (enerji vb.) ve dolaylı (bakım vb.) işletme maliyetleridir. Sonuç olarak, etkin bir tren sefer planlama modelinin birbiri ile çatışan bu iki hedef için bir uzlaşım sağlayabilmesi gerekmektedir.

Bu bölümde, tren sefer çizelgeleme problemini çift yöllü doymuş bir kent içi metro hattı koşullarında çözmek için yeni bir doğrusal olmayan programlama modeli formüle edilmiştir. Gün içinde değişen yolcu talebinin dinamik (zamana bağlı) olarak dâhil edildiği modelin amacı istasyonlardaki yolcular için ortalama bekleme süresini azaltmaktır. Tasarlanan model, yolcu memnuniyeti ile firma çıkarlarının dengelenmesine olanak sağlayan bir altyapıya sahip olup, yolcu akış değişkenleri ve kısıtları aracılığıyla doygunluk durumunu da dikkate almaktadır.

4.1 Model Çerçevesi

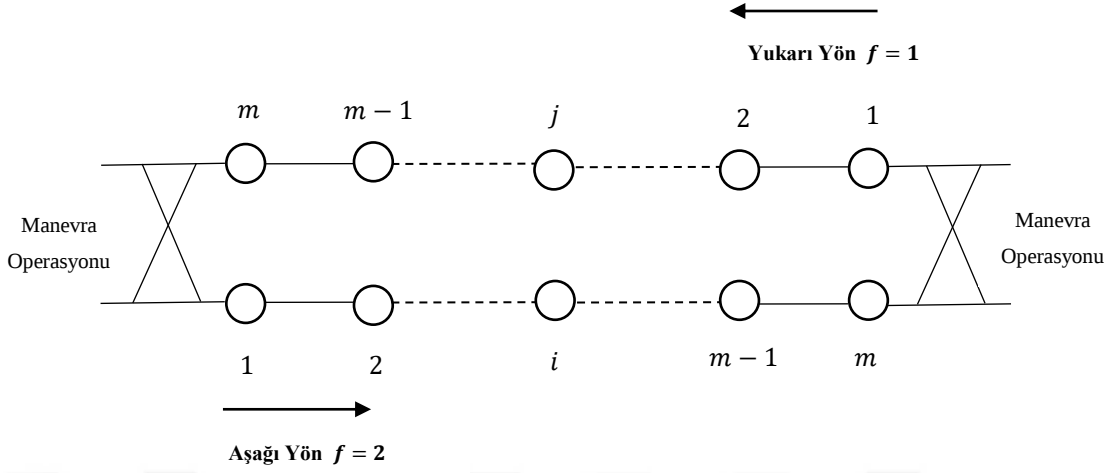
Model çerçeve şeması Şekil 4.1’de gösterildiği gibidir. İlk olarak, talep modeli aracılığıyla kümülatif talep verisi Gauss fonksiyonuna uydurulur. Bu yolla talep, geleneksel kesikli OD matrisler yerine sürekli bir formda ve planlama ufkundan bağımsız olarak tanımlanmış olur.

Kümülatif talep eğrileri, hat parametreleri, tren parametreleri, toplam sefer sayısı ve filo büyüklüğü önerilen tren sefer çizelgeleme modelinin girdileri durumunda olup, tamamı modeli daha gerçekçi kılmaktadır. Modelin çıktıları, bir sefer tarifesinin zorunlu öğeleri olan trenlerin her bir istasyona varış ve kalkış zamanları, ara sonuçlar olarak trenlerin istasyonlarda duruş süreleri, istasyonlar arası çalışma süreleri, tren doluluk oranı ve son olarak amaç fonksiyonu değerini temsil eden yolcular için ortalama bekleme süresidir.



Şekil 4.1 Model çerçeve şeması

4.2 Problem Tanımı



Şekil 4.2 Kent içi metro hattı örneği

Şekil 4.2’de gösterildiği üzere bu tez çalışmasında çift yönlü ve çift yönlü bir kent içi metro hattı dikkate alınmıştır. Her bir yolda trenler sadece bir yönde hareket edebilmektedir. Her bir yönde istasyonlar $1, 2, \dots, m$ şeklinde ardışık olarak numaralandırılmıştır. İstasyon 1 ve m , her iki yön için sırasıyla ilk ve son istasyonu temsil etmektedir. İşletme boyunca trenler her bir yönde ($f = 1$ yukarı yön, $f = 2$ aşağı yön) 1. istasyondan m . istasyona doğru hareket eder. Coğrafik olarak, $(1, m), (2, m - 1), \dots, (m - 1, 2), (m, 1)$ istasyon çiftleri farklı yönlerdeki aynı istasyonlara işaret eder. Bu çalışmada, zıt yönlerdeki yolcu taleplerinin birbirinden bağımsız gerçekleştiği varsayılmaktadır.

Sistemde tren sayısı sınırlıdır ve toplam V adet tren bulunmaktadır. Her bir yönde yapılacak sefer sayısı önceden verilmiştir ve v_f adet tren f . yolda ilk servislerini sunmak üzere beklemektedir. Başka bir deyişle, v_f parametresi gün başında her bir yolda hazır bulunan araç sayısını ifade eder. Dolayısıyla, V filo büyüklüğü olmak üzere $V = v_1 + v_2$ eşitliği yazılabilir. Filodaki her bir tren bulunduğu yönde 1. istasyondan ayrılır, hat boyunca sırasıyla tüm istasyonlara uğrar (istasyon atlama söz konusu değildir) ve son istasyonda tüm yolcuları boşalttıktan sonra verilen belirli bir sürede manevra operasyonunu gerçekleştirerek diğer yöndeki sefere hazır hale gelir. Trenler, gün boyunca bu döngüyü tekrar ederler ve hattın herhangi bir bölgesinde sollama yapamazlar. Manevra operasyonu sadece ilk ve son istasyonlarda (1 ve m) yapılabilir. Bu terminal istasyonlara

ait tren kapasitesinin sınırsız olduğu kabul edilmiştir. Ancak ara istasyonlarda herhangi bir anda sadece bir tren bulunabilir. Eğer son istasyonlarda birden fazla tren varsa trenlerin sevki için FIFO kuralı uygulanır. Modele dair diğer varsayımlar aşağıdaki gibidir:

Varsayım 1: Araç kapasitesi sınırlıdır ve filodaki tüm trenler için aynıdır. Yolcular kapasitesi dolmuş bir araca binemezler ve bu durum birden fazla kez tekrar edebilir. Yani bir yolcu birden fazla kez gelen trene binemeyebilir (doğunluk durumu).

Varsayım 2: Gelen, bekleyen, araca binen ve geride bırakılan yolcu sayıları gerçek sayıdır. Bu varsayım, optimizasyon sürecini kolaylaştırmaktadır. Bununla birlikte, yolcu sayıları oldukça yüksek olduğu için hata oranı önemsenecek kadar düşüktür (Wang et al., 2018; Wang, Schutter, et al., 2013).

Varsayım 3: İstasyonların yolcu kapasitesi sınırsızdır. Gelen tüm yolcular istasyonlara giriş yapabilir.

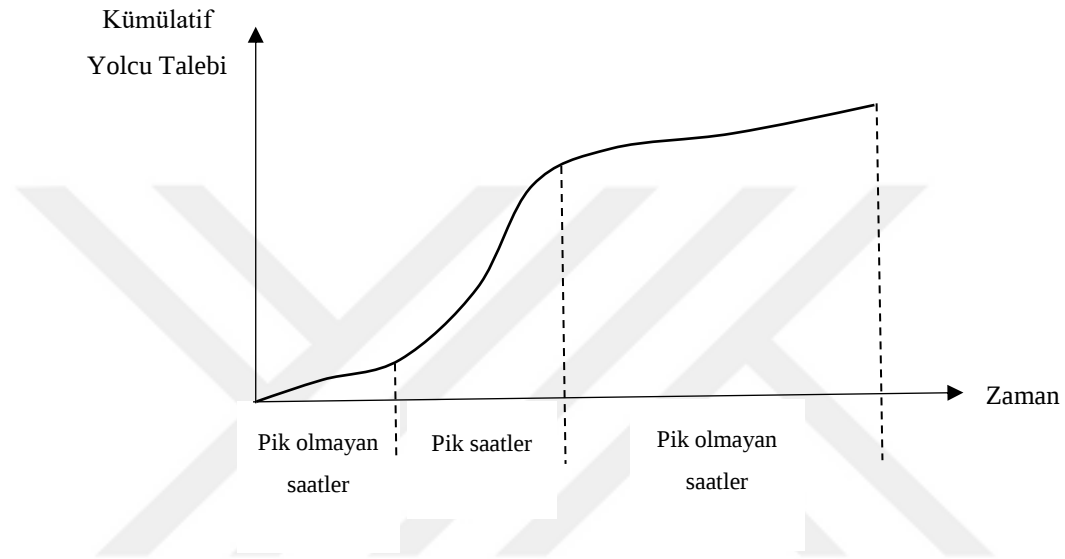
Varsayım 4: Gelen yolcular ne kadar beklerse beklesin istasyonu terk etmezler ve seyahat talebinden vazgeçmezler.

4.3 Talep Fonksiyonu

Bir sefer çizelgeleme modeline yolcu talebini dinamik olarak dâhil etmenin yollarından biri OD matrisler kullanmaktır. OD matrisin bir hücresi, kalkış yerinden (sıra) varış yerine (sütun) olan yolcu sayısını temsil eder. Bu tür matrisler belirli bir zaman aralığı (genellikle 5 ya da 15 dakika) için düzenlenirler. Ancak işletmeci firma tarafından sağlanan veri genellikle eşit zaman aralıklarında ayrıştırılmamıştır. Bu nedenle OD matrisler düzenlenirken istenilen çözünürlüğe getirmek için çeşitli matematiksel teknikler kullanılır.

Bir diğer yaklaşım, talebin sürekli olarak tanımlanmasıdır ki, bu çalışmada bu metot benimsenmiştir. Bu yaklaşımda gerçek talep verisinin hangi zaman aralığında olduğu önemli değildir. Çünkü geleneksel kesikli OD matrisler kullanmak yerine, iki istasyon arasındaki kümülatif talep spesifik bir fonksiyona uydurulur. Yolcu davranışına dair daha gerçekçi bir hipotez ortaya koyduğundan ve trenlerin kalkış/varış zamanlarını sürekli değişken olarak ele alma avantajı barındırdığından literatürde yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. (Barrena et al., 2014a, 2014b; Blanco et al., 2020; Canca et al., 2014; Shang et al., 2016; T. Zhang et al., 2018)

Bazı araştırmacılar değişken talebi, farklı açılardan tanımlanan fonksiyonlar aracılığıyla ele almıştır. Kümülatif bir basamak fonksiyonu kullanan Hurdle (Hurdle, 1973), türevlenebilir bir fonksiyon ile yolcu geliş paternine yakınsamanın mümkün olduğunu varsaymıştır. Bu bağlamda, fonksiyonun cebirsel ifadesine gerek olmayıp sadece çizimi yeterlidir. Canca (Canca et al., 2014), orijinal talep verileri düzenli bir paternde gelmediği için her bir istasyon çiftine ait kümülatif talebe S biçimli fonksiyonlar kullanarak yakınsamıştır.



Şekil 4.3 Kümülatif talep fonksiyonu

İki istasyon arasındaki kümülatif yolcu talebi genel olarak Şekil 4.3’de gösterildiği gibi pik olmayan saatlerde düzgün bir artış sergiliyorken, pik saatlerde ani bir artış göstermektedir. Yüksek uygunluk değerleri sağlayabilme kabiliyetinden dolayı istasyon çiftleri arasında bu şekilde oluşan kümülatif yolcu talebine yakınsamak için (4.1)’de gösterilen Gauss fonksiyonu önerilmiştir.

$$D_{ij}(t) = \sum_{r=1}^M a_{ij}^r * e^{-\left(\frac{t-b_{ij}^r}{c_{ij}^r}\right)^2} \quad (4.1)$$

$D_{ij}(t)$, i ve j aynı yönde bulunan iki istasyon ve $i < j$ olmak üzere, i istasyonundan j istasyonuna t zamanından önceki kümülatif yolcu talep fonksiyonudur. M pik sayısı, a_{ij}^r , b_{ij}^r ve c_{ij}^r ise fonksiyon parametreleri olup her bir istasyon çifti için gerçek verinin uydurulması yoluyla bulunur. a_{ij}^r genlik, b_{ij}^r sentroid ve c_{ij}^r pik genişliği ile ilgilidir. Örneğin, iki istasyon arasında gün boyunca toplam 3 pik ($M = 3$) olduğunu

varsaydığımız bir vaka için r üst indisi sırasıyla 1, 2 ve 3 değerini alacak, dolayısıyla hesaplayacağımız parametre sayısı toplam 9 olacaktır ($a_{ij}^1, a_{ij}^2, a_{ij}^3, b_{ij}^1, b_{ij}^2, b_{ij}^3, c_{ij}^1, c_{ij}^2, c_{ij}^3$). Buna göre, pik sayısı (M) ile hesaplanacak parametre sayısı ($a_{ij}^r, b_{ij}^r, c_{ij}^r$) arasında doğrusal bir ilişki olduğu söylenebilir.

4.4 Matematik Formülasyon

Bu alt bölümde, istasyon çiftleri arasında bilinen zamana bağlı kümülatif yolcu talebini baz alarak, iki yönlü ve iki yönlü bir şehir içi raylı sistem hattında, her bir trenin her bir istasyona varış ve kalkış zamanlarını, istasyonlar arası çalışma sürelerini ve istasyonda duruş sürelerini belirlemek üzere doğrusal olmayan bir formülasyon önerilmiştir. Daha önce de belirtildiği üzere, araç kapasitesinin yolcu talebini aşması durumunda yolcuların araca binemeyip sonraki aracı bekleme durumu söz konusu olabilir. Bu olgu (doygunluk durumu), yolcu davranışını modelleyen özel değişkenler ve kısıtlar aracılığıyla formülasyona dâhil edilmiştir. İlk olarak kullanılacak notasyon tanıtılmış daha sonra kısıtlar ve amaç fonksiyonu formülize edilmiştir.

4.4.1 Notasyon

Matematik formülasyonda kullanılan tüm küme, indis, parametre ve karar değişkenleri aşağıda listelenmiştir.

Kümeler

$F = \{1, 2\}$	: Yol kümesi
$Y = \{1, 2, \dots, m, m + 1, \dots, 2m\}$	: İstasyon kümesi
$Y_f = \{1, 2, \dots, m\}$	: f . yoldaki istasyon kümesi
$K = \{1, 2, \dots, n, n + 1, \dots, z\}$	: Tren sefer kümesi
$K_f = \{1, 2, \dots, n\}$	: f . yoldaki tren sefer kümesi

İndisler

$f \in F$	: Yollar
$i, j \in Y$	: İstasyonlar
$k \in K$	: Tren sefer numarası

Parametreler

V	: Filo büyüklüğü (toplam araç sayısı)
V_f	: Gün başında f . yolda bulunan toplam araç sayısı
CT	: Tren kapasitesi
$[0, T]$	: Planlama ufku
M	: Yeterince büyük bir sayı
$t_{r,max}^i$	: Trenlerin i . istasyon ile $i + 1$. istasyon arası maksimum çalışma süresi (dakika)
$t_{r,min}^i$	: Trenlerin i . istasyon ile $i + 1$. istasyon arası minimum çalışma süresi (dakika)
$t_{s,max}$	: Trenlerin istasyonlardaki maksimum duruş süresi (dakika)
$t_{s,min}$	: Trenlerin istasyonlardaki minimum duruş süresi (dakika)
h_{min}	: Minimum güvenlik süresi (dakika)
τ_{min}	: Minimum manevra süresi (dakika)
$D_{ij}(t)$	: i . istasyondan j . istasyona t zamanından önceki kümülatif yolcu talebi fonksiyonu

Karar Değişkenleri

$t_{f,i,k}$	: f . yolda k . trenin i . istasyondan kalkış zamanı
$t_r^{f,i,k}$	: f . yolda k . trenin i . istasyon ile $i + 1$. istasyon arası çalışma süresi
$t_s^{f,i,k}$	: f . yolda k . trenin i . istasyonda duruş süresi
$RC_{f,i,k}$	: f . yolda i . istasyondan ayrılan k . trenin kullanılabilir kapasitesi

$P_{f,i,j,k} = D_{ij}^{[t_{f,i,k-1}, t_{f,i,k}]}$	: $[t_{f,i,k-1}, t_{f,i,k}]$ zaman aralığında (ardışık iki tren seferi arasında) f . yolda i . istasyona j . istasyona gitmek üzere gelen yolcu sayısı
$PSB_{f,i,k}$	: $[t_{f,i,k-1}, t_{f,i,k}]$ zaman aralığında (ardışık iki tren seferi arasında) f . yolda i . istasyona herhangi bir j . istasyona ($j > i$) gitmek üzere gelen yolcu sayısı
$PSD_{f,j,k}$	: $[t_{f,i,k-1}, t_{f,i,k}]$ zaman aralığında (ardışık iki tren seferi arasında) f . yolda herhangi bir i . istasyona ($j > i$) j . istasyona gitmek üzere gelen yolcu sayısı
$pr_{f,i,j,k}$	: $[t_{f,i,k-1}, t_{f,i,k}]$ zaman aralığında (ardışık iki tren seferi arasında) f . yolda i . istasyona j . istasyona gitmek üzere gelen ve k . trene binen yolcu sayısı
$pu_{f,i,j,k}$	: $[t_{f,i,k-1}, t_{f,i,k}]$ zaman aralığında (ardışık iki tren seferi arasında) f . yolda i . istasyona j . istasyona gitmek üzere gelen ve k . trene binemeyen yolcu sayısı
$W_{f,i,j,k}$	: $[0, t_{f,i,k-1}]$ zaman aralığında ($k - 1$. tren seferinden önce) f . yolda i . istasyona j . istasyona gitmek üzere gelen ve k . tren kalkmadan önce platformda bekleyen yolcu sayısı
$wr_{f,i,j,k}$	: $[0, t_{f,i,k-1}]$ zaman aralığında ($k - 1$. tren seferinden önce) f . yolda i . istasyona j . istasyona gitmek üzere gelen ve k . trene binen yolcu sayısı
$wu_{f,i,j,k}$	: $[0, t_{f,i,k-1}]$ zaman aralığında ($k - 1$. tren seferinden önce) f . yolda i . istasyona j . istasyona gitmek üzere gelen ve k . trene binemeyen yolcu sayısı

$WSB_{f,i,k}$	: $[0, t_{f,i,k-1}]$ zaman aralığında ($k - 1$. tren seferinden önce) f . yolda i . istasyona herhangi bir j . istasyona ($j > i$) gitmek üzere gelen ve k . tren kalkmadan önce platformda bekleyen yolcu sayısı
$WSD_{f,j,k}$	: $[0, t_{f,i,k-1}]$ zaman aralığında ($k - 1$. tren seferinden önce) f . yolda herhangi bir i . istasyona ($i < j$) j . istasyona gitmek üzere gelen ve k . tren kalkmadan önce platformda bekleyen yolcu sayısı
$G_{f,i,j,k}$	: f . yolda i . istasyona j . istasyona gitmek üzere gelen ve k . trene binen yolcu sayısı
$GSB_{f,i,k}$	: f . yolda i . istasyona herhangi bir j . istasyona ($j > i$) gitmek üzere gelen ve k . trene binen yolcu sayısı
$GSD_{f,j,k}$	: f . yolda herhangi bir i . istasyona ($i < j$) j . istasyona gitmek üzere gelen ve k . trene binen yolcu sayısı

4.4.2 Kısıtlar

Bu çalışmada geliştirilen TSC model, tren seferlerinin aşağı ve yukarı olmak üzere çift yönlü gerçekleştiği bir kent içi raylı sistem hattında yolcu başına ortalama bekleme süresini minimize etmek amacındadır. Bu cihetle, model, aşağıdaki gibi formülize edilmiştir.

4.4.2.1 Sanal Sefer Kısıtları

$$t_{f,i,0} = 0 \quad f \in F, i \in Y \quad (4.2)$$

$$t_{f,i,n+1} = T \quad f \in F, i \in Y \quad (4.3)$$

(4.2) ve (4.3) planlama ufkunun başında ve sonunda iki adet sanal sefer tanımlamaktadır. Söz konusu seferler yolcular tarafından kullanılabilen gerçek seferler değildir. Ancak, bu kısıtlar aracılığıyla planlama ufkı boyunca gerçekleşen tüm yolcu talebinin dikkate alınması sağlanır. Bu kısıtlar tanımlanmamış olsa (tüm seferler gerçek olmuş olsa), optimizasyon sonrasında trenlerin kalkış zamanları planlama ufkunun tamamını kapsamayıp sadece bir bölgesine yoğunlaşacaktır.

4.4.2.2 Operasyonel Kısıtlar

$$t_{f,i+1,k} = t_{f,i,k} + t_r^{f,i,k} + t_s^{f,i+1,k} \quad f \in F, i \in Y \setminus \{m\}, k \in K \quad (4.4)$$

$$t_{f,i,k+1} = t_{f,i,k} + h_{min} + t_s^{f,i,k+1} \quad f \in F, i \in Y, k \in K \setminus \{n\} \quad (4.5)$$

$$t_{r,min}^i \leq t_r^{f,i,k} \leq t_{r,max}^i \quad f \in F, i \in Y \setminus \{m\}, k \in K \quad (4.6)$$

$$t_{s,min} \leq t_s^{f,i,k} \leq t_{s,max} \quad f \in F, i \in Y, k \in K \quad (4.7)$$

(4.4), trenlerin kalkış düzenini tanımlar. Buna göre, f . yolda bulunan bir tren i . istasyondan $t_{f,i,k}$ zamanında kalkıyorsa sonraki $i + 1$. istasyondan kalkacağı zaman, $t_{f,i,k}$ zamanına i . istasyondan $i + 1$. istasyona gitmesi için gereken çalışma (seyahat) süresi ile $i + 1$. istasyondaki duruş (bekleme) süresinin eklenmesi ile bulunur. (4.5), ardışık k ve $k + 1$ trenleri arasındaki minimum güvenli süreyi temin eder. Bu, iki treninin aynı anda aynı istasyonda bulunamayacağı ve trenler arasında bir minimum süre (headway) olacağı anlamına gelir. (4.6) ve (4.7) ise sırasıyla trenlerin istasyonlar arası çalışma süresi ve istasyonlardaki duruş süresi için alt ve üst sınırları tanımlar.

4.4.2.3 Manevra (Filo) Kısıtı

$$t_{f,1,v_f+k} \geq t_{3-f,m,k} + \tau_{min} \quad f \in F, v_f + k \leq K_f \quad (4.8)$$

Manevra işlemi, trenlerin bir yönden diğer yöne geçmesine olanak sağlar. Hat boyunca, manevra işlemi, yukarıda belirtildiği üzere sadece terminal istasyonlarda (1 ve m) gerçekleşir. Tren sirkülasyonu açısından büyük öneme haiz olan bu operasyon (4.8)'de

tanımlanmıştır. Formülasyon kolaylığı ve sadeliği sağlamak açısından bir yönden diğer yöne geçerken gerekli olan çalışma süresi manevra süresine (τ_{min}) dâhil edilmiştir.

4.4.2.4 Yolcu Akış Kısıtları

$$P_{f,i,j,k} = D_{ij}^{[t_{f,i,k-1}, t_{f,i,k}]} = \sum_{r=1}^M a_{ij}^r * e^{-\left(\frac{t_{f,i,k}-b_{ij}^r}{c_{ij}^r}\right)^2} - \sum_{r=1}^M a_{ij}^r * e^{-\left(\frac{t_{f,i,k-1}-b_{ij}^r}{c_{ij}^r}\right)^2} \quad f \in F, i, j \in Y, i < j, k \in K \quad (4.9)$$

(4.9), yolcu talebi ile trenlerin kalkış zamanı arasındaki ilişkiyi tesis eder. Her bir yolda ardışık iki tren (k ve $k + 1$) kalkışı aralığında her bir istasyon çifti (i 'den j 'ye) arasında seyahat etmek üzere gelen yolcu sayısı bölüm 4.3'de açıklanan kümülatif talep fonksiyonu kullanılarak ifade edilir.

$$PSB_{f,i,k} = \sum_{\{i,j \in Y: j > i\}} P_{f,i,j,k} \quad f \in F, i \in Y \setminus \{m\}, k \in K \quad (4.10)$$

$$PSD_{f,j,k} = \sum_{\{i,j \in Y: i < j\}} P_{f,i,j,k} \quad f \in F, j \in Y \setminus \{1\}, k \in K \quad (4.11)$$

(4.10) ve (4.11), toplam yolcu geliş değişkenlerini tanımlar. İlki, $j > i$ olmak üzere i istasyonuna herhangi bir j istasyonuna gitmek üzere gelen toplam yolcu sayısını, ikincisi, $i < j$ olmak üzere belirli bir j istasyonuna gitmek üzere farklı istasyonlara gelen toplam yolcu sayısını temsil eder.

$$P_{f,i,j,k} = pr_{f,i,j,k} + pu_{f,i,j,k} \quad f \in F, i, j \in Y, i < j, k \in K \quad (4.12)$$

(4.12), tren kapasitesi yolcu talebinden daha az olması durumunda hizmet alamayan yolcuların hesaplanmasını temin eder. Buna göre, gelen yolcular araca binebilen ($pr_{f,i,j,k}$) ve binemeyen ($pu_{f,i,j,k}$) olarak ikiye ayrılır.

$$W_{f,i,j,k} = wr_{f,i,j,k} + wu_{f,i,j,k} \quad f \in F, i, j \in Y, i < j, k \in K \quad (4.13)$$

(4.13), $t_{f,i,k-1}$ 'den önce gelip k . treni bekleyen yolcu sayısını k . trene binebilen ($wr_{f,i,j,k}$) ve binemeyen ($wu_{f,i,j,k}$) olarak ikiye ayırır.

$$WSB_{f,i,k} = \sum_{\{i,j \in Y: j > i\}} W_{f,i,j,k} \quad f \in F, i \in Y \setminus \{m\}, k \in K \quad (4.14)$$

$$WSD_{f,j,k} = \sum_{\{i,j \in Y: i < j\}} W_{f,i,j,k} \quad f \in F, j \in Y \setminus \{1\}, k \in K \quad (4.15)$$

Daha önce geliş değişkenleri için yapıldığı gibi ((4.10) ve (4.11)) bekleme değişkenleri de kaynak (origin) ve hedef (destination) istasyonlara göre (4.14) ve (4.15)'deki gibi toplanır.

$$G_{f,i,j,k} = pr_{f,i,j,k} + wr_{f,i,j,k} \quad f \in F, i, j \in Y, i < j, k \in K \quad (4.16)$$

$$GSB_{f,i,k} = \sum_{\{i,j \in Y: j > i\}} G_{f,i,j,k} \quad f \in F, i \in Y \setminus \{m\}, k \in K \quad (4.17)$$

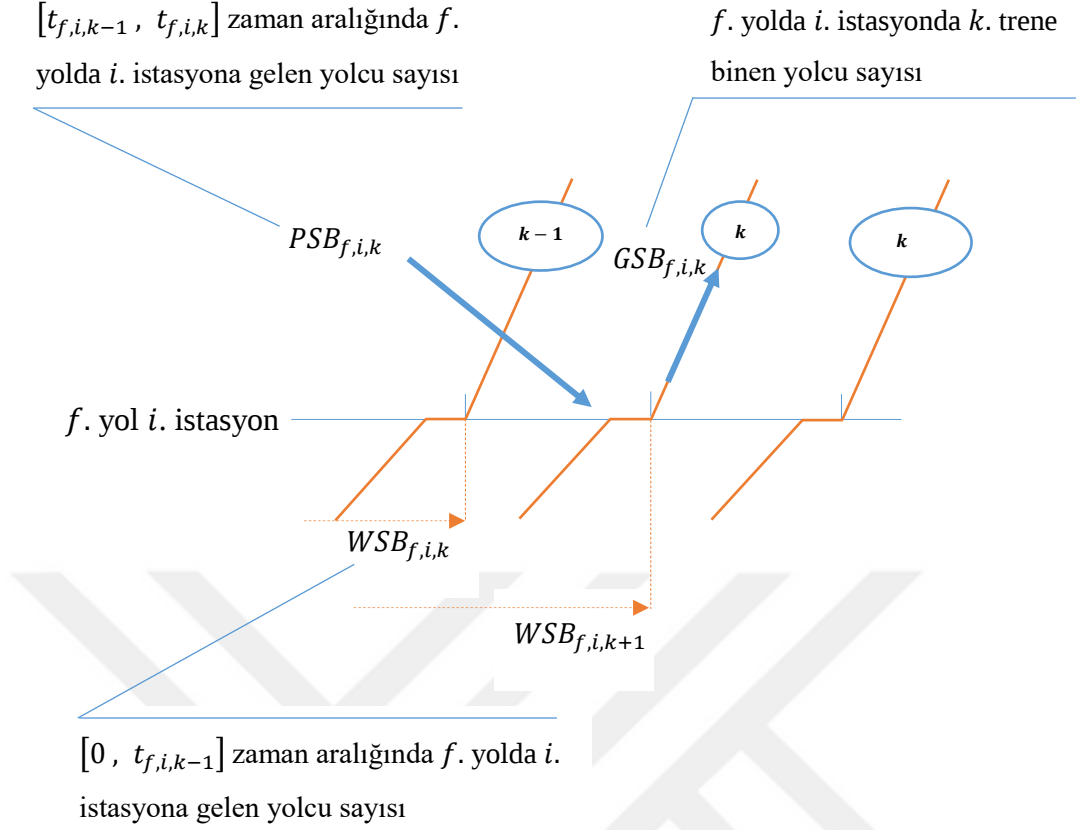
$$GSD_{f,j,k} = \sum_{\{i,j \in Y: i < j\}} G_{f,i,j,k} \quad f \in F, j \in Y \setminus \{1\}, k \in K \quad (4.18)$$

(4.16), k . trene binen yolcuları ardışık iki tren kalkışı arasında ($[t_{f,i,k-1}, t_{f,i,k}]$ zaman aralığında) gelip binenler ile önceki tren seferini ($k - 1$. tren seferi) kaçırdıktan sonra binenler olarak ikiye ayırır. (4.17) ve (4.18)'de ise binen yolcular kaynak (origin) ve hedef (destination) istasyonlara göre toplanır.

$$WSB_{f,i,k+1} = WSB_{f,i,k} + PSB_{f,i,k} - GSB_{f,i,k} \quad f \in F, i \in Y \setminus \{m\}, k \in K \setminus \{n\} \quad (4.19)$$

$$WSD_{f,j,k+1} = WSD_{f,j,k} + PSD_{f,j,k} - GSD_{f,j,k} \quad f \in F, j \in Y \setminus \{1\}, k \in K \setminus \{n\} \quad (4.20)$$

f . yolda i . istasyondan k . tren ayrıldığı anda platformda bekleyen yolcu sayısı (4.19) ve (4.20)'yi sağlamalıdır. Bu iki kısıt tipinin kullanılmasının nedeni, yolcuları Şekil 4.4'te gösterildiği üzere kaynak (origin) ve hedef (destination) istasyonlara göre dengelemektir.



Şekil 4.4 Hedef (destination) istasyona göre yolcu dengelemesi

4.4.2.5 Kapasite Kısıtları

Bu noktada, daha önce tanımlanan değişkenler ve kullanılabilir kapasite değişkeni $RC_{f,i,k}$ kullanılarak kapasite kısıtları yazılabilir.

$$RC_{f,1,k} = CT - GSB_{f,1,k} \quad f \in F, k \in K \quad (4.21)$$

$$RC_{f,i,k} = RC_{f,i-1,k} + GSD_{f,i,k} - GSB_{f,i,k} \quad f \in F, i \in Y \setminus \{1, m\}, k \in K \quad (4.22)$$

$$RC_{f,m,k} = RC_{f,m-1,k} + GSD_{f,m,k} \quad f \in F, k \in K \quad (4.23)$$

İlk istasyonlarda trenlere yolcu binışı olur ancak yolcu inişi söz konusu değildir. Ara istasyonlarda hem yolcu binışı hem yolcu inişi olabilir. Son istasyonlarda ise yolcu inişi olur ancak binışı olmaz. Buradan hareketle, (4.21) ilk istasyonlardaki, (4.22) ara istasyonlardaki ve (4.23) son istasyonlardaki kapasite kısıtı olarak tanımlanır.

$$\begin{aligned}
P_{f,i,j,k}, W_{f,i,j,k}, G_{f,i,j,k}, pr_{f,i,j,k}, pu_{f,i,j,k}, wr_{f,i,j,k}, wu_{f,i,j,k} &\geq 0 & f \in F, i, j \in Y, i \neq j, k \in K \\
PSB_{f,i,k}, PSD_{f,j,k}, WSB_{f,i,k}, WSD_{f,j,k}, GSB_{f,i,k}, GSD_{f,j,k}, RC_{f,i,k} &\geq 0 & f \in F, i, j \in Y, i \neq j, k \in K \\
t_{f,i,k}, t_r^{f,i,k}, t_s^{f,i,k} &\geq 0 & f \in F, i \in Y, k \in K \\
W_{f,i,j,1} &= 0 & f \in F, i, j \in Y, i \neq j
\end{aligned}$$

4.4.3 Amaç Fonksiyonu

Bu çalışmada geliştirilen TSC optimizasyon modelinin amacı yolcu başına ortalama bekleme süresini minimize etmektir. Bu hesap temel olarak planlama ufku boyunca gerçekleşen yolcu bekleme süresinin gelen yolcu sayısına bölünmesinden ibarettir. Toplam yolcu bekleme süresini hesaplamak için $WSB_{f,i,k}$ değişkeninden faydalanırız. Yukarıda belirtildiği üzere herhangi bir k. trenden önce istasyonda bekleyen yolcu sayısı $WSB_{f,i,k}$ değişkeni ile ifade edilir. Buna göre, amaç fonksiyonu ilk olarak (4.24)'te gösterildiği gibi yazılabilir.

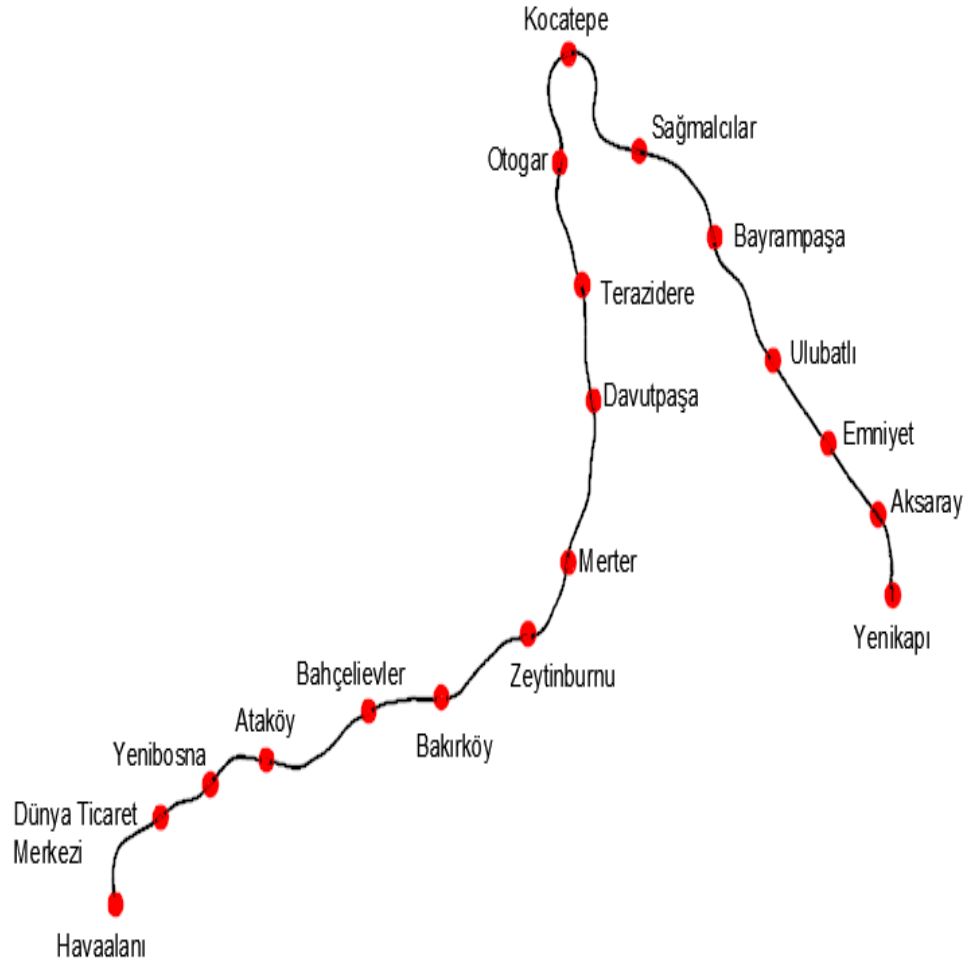
$$\text{Min } \frac{\sum_{f=1}^2 \sum_{i=1}^{Y_f-1} \sum_{k=1}^{K_f} (t_{f,i,k} - t_{f,i,k-1}) WSB_{f,i,k}}{\sum_{f=1}^2 \sum_{i=1}^{Y_f-1} \sum_{j=i+1}^{K_f} D_{ij}^{[0, T]}} \quad (4.24)$$

Bu denklemde son seferden sonra sistemde kalan yolcular dikkate alınmamaktadır. Dolayısıyla, amaç fonksiyonu olarak bu denklem belirlenirse optimizasyon sonucunda yolcuların büyük bir kısmının son sefere kadar bekletildiği ve hizmet almadığı görülecektir. Bu durumu gidermek adına hizmet almayan yolcular için bir ceza puanı uygulanarak formülasyon genişletilir. Bununla birlikte, toplam talep sabit olduğundan amaç fonksiyonunda dikkate alınmaz. Sonuç olarak, amaç fonksiyonu (4.25)'deki gibi belirlenir.

$$\text{Min } \sum_{f=1}^2 \sum_{i=1}^{Y_f-1} \sum_{k=1}^{K_f} (t_{f,i,k} - t_{f,i,k-1}) WSB_{f,i,k} + M \sum_{f=1}^2 \sum_{i=1}^{Y_f-1} \sum_{k=1}^{K_f} (pu_{f,i,j,n} - wu_{f,i,j,n}) \quad (4.25)$$

İSTANBUL METROSUNDA BİR UYGULAMA

Bu bölümde, önerilen tren sefer çizelgeleme optimizasyon yaklaşımının performansı sorgulanmış ve test için İstanbul metro ağında bulunan M1A hattı seçilmiştir. Hat, ilk olarak 1989 yılında devreye alınmış olup hâlihazırda günlük yaklaşık 400.000 yolcu ile İstanbul raylı sistem ağının en yoğun hatlarından biridir. Özellikle pik saatlerde yolcuların çoğu denk geldikleri ilk araca binememektedir. Şekil 5.1’de görüleceği üzere, hatta toplam 18 istasyon bulunmaktadır. Bu istasyonların üç tanesi (Yenikapı, Otogar, Zeytinburnu) transfer istasyonudur. Hattın toplam uzunluğu 19.94 km’dir. İstasyonlar arası mesafe Tablo 5.1’de gösterildiği gibi olup her iki yön için aynıdır.



Şekil 5.1 M1A Metro hattı şeması

Tablo 5.1 M1A Hattı istasyonlar arası mesafeler

Kısım	Mesafe (m)	Kısım	Mesafe (m)
Yenikapı – Aksaray	861	Davutpaşa - Merter	1530
Aksaray – Emniyet	957	Merter – Zeytinburnu	914
Emniyet – Ulubatlı	1045	Zeytinburnu - Bakırköy	1419
Ulubatlı - Bayrampaşa	1857	Bakırköy - Bahçelievler	997
Bayrampaşa-Sağmalcılar	1027	Bahçelievler - Ataköy	1572
Sağmalcılar - Kocatepe	1584	Ataköy - Yenibosna	875
Kocatepe – Otogar	1123	Yenibosna - Dünya Ticaret Merkezi	758
Otogar - Terazidere	1148	Dünya Ticaret Merkezi - Havaalanı	1174
Terazidere - Davutpaşa	1103	Havaalanı	-

Hattın günlük işletme saatleri 06:00 ile 24:00 arasındadır. İlk tren Yenikapı ve Havaalanı istasyonundan karşılıklı olarak 06:00’da kalkar. Son tren ise yine aynı istasyonlardan karşılıklı olarak 24:00’da kalkar.

Trenler Yenikapı istasyonundan ayrılır, tüm istasyonlara uğrar ve Havaalanı istasyonunda manevra işlemi yaparak diğer yöndeki sefere hazır hale gelir. Dolayısıyla, Yenikapı-Havaalanı yönü “yukarı yön”, Havaalanı-Yenikapı yönü “aşağı yön” olarak tanımlanmıştır. Hatta, mevcut durumda, trafik planlayıcıları tarafından manuel olarak üretilen periyodik sefer tarifiesi kullanılmaktadır. Bu tarifeye göre trenler 6 dakika arayla hareket etmektedir.

5.1 Talep Analizi

M1A hattındaki günlük yolcu talebi varyasyonunu analiz etmek amacıyla kosinüs benzerliği metodu kullanılmıştır (L. Sun et al., 2014). Bu doğrultuda ilk olarak, y f . yöndeki istasyonu ve u zaman aralığı indeksini temsil etmek üzere, haftanın tüm günleri için bir E_y^u ($\forall y, \forall u$) talep matrisi tanımlanır. Buradan hareketle a ve b günü arasındaki talep benzerliği (5.1)'deki gibi ifade edilir.

$$Sim_E(a, b) = \frac{\sum_{y \in Y_f} \sum_{u \in T} x_{y,u}^a x_{y,u}^b}{\sqrt{\sum_{y \in Y_f} \sum_{u \in T} (x_{y,u}^a)^2} \sqrt{\sum_{y \in Y_f} \sum_{u \in T} (x_{y,u}^b)^2}} \quad (5.1)$$

Denklemden $x_{y,u}^a = \frac{E_y^u(a)}{\sum_{y \in Y_f} \sum_{u \in T} E_y^u(a)}$ a gününe ait yolcu talep dağılımını ifade etmektedir.

Buna göre, benzerlik değeri 0 ve 1 arasında oluşacaktır. Sim_E değerinin 1'e yakın olması söz konusu iki matrisin (günün) daha benzer olduğu anlamına gelecektir.

Zaman aralığı uzunluğu $\Delta r = 15$ dakika olmak üzere, yolcu talep verisi esas alınarak haftanın günlerine göre hesaplanan kosinüs benzerlik (Sim_E) değerleri her bir yön için Tablo 5.2 ve Tablo 5.3'de verilmiştir. Sonuçlardan görüleceği üzere, her iki yönde de hafta içi günler için talep benzerlik değerleri 0.96'nın üzerindedir. Bu değerler, söz konusu günler arasında güçlü bir benzerlik olduğuna, günlük talep varyasyonunun oldukça küçük ve ihmal edilebilir olduğuna işaret etmektedir.

Tablo 5.2 Yolcu talebinin kosinüs benzerlik değerleri (Yukarı yön)

Sim_E	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma	Cumartesi	Pazar
Pazartesi	—	0.97	0.96	0.97	0.96	0.75	0.66
Salı	0.97	—	0.97	0.98	0.97	0.74	0.67
Çarşamba	0.96	0.97	—	0.96	0.97	0.75	0.67
Perşembe	0.97	0.98	0.96	—	0.97	0.76	0.68
Cuma	0.96	0.97	0.97	0.97	—	0.78	0.72
Cumartesi	0.75	0.74	0.75	0.76	0.78	—	0.94
Pazar	0.66	0.67	0.67	0.68	0.72	0.94	—

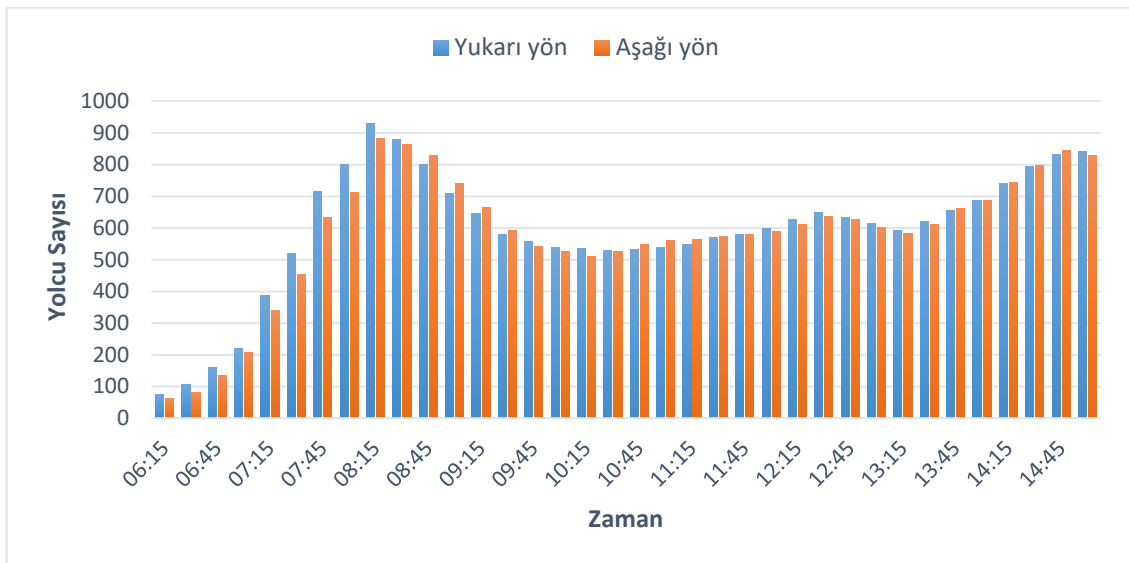
Tablo 5.3 Yolcu talebinin kosinüs benzerlik değerleri (Aşağı yön)

Sim_E	Pazartesi	Salı	Çarşamba	Perşembe	Cuma	Cumartesi	Pazar
Pazartesi	—	0.97	0.96	0.96	0.97	0.74	0.67
Salı	0.97	—	0.96	0.98	0.96	0.73	0.66
Çarşamba	0.96	0.96	—	0.97	0.96	0.75	0.68
Perşembe	0.96	0.98	0.97	—	0.97	0.76	0.68
Cuma	0.97	0.96	0.96	0.97	—	0.77	0.73
Cumartesi	0.74	0.73	0.75	0.76	0.77	—	0.95
Pazar	0.67	0.66	0.68	0.68	0.73	0.95	—

Sonuç olarak yapılan analiz, seçilen hatta hafta içi günler için günlük yolcu talebinin büyük bir homojenliğe sahip olduğunu göstermiştir. Buradan hareketle, önerilen modelin performansının test edildiği müteakip analizlerde kolaylık olması açısından hafta içi günleri kapsayan ortalama talep profili kullanılmıştır.

5.2 Vaka Tanımları

Vaka çalışmaları M1A hattının 6 istasyonluk (Yenikapı, Aksaray, Emniyet, Ulubatlı, Bayrampaşa, Sağmalcılar) bir bölümü üzerinde icra edilmiştir. Planlama ufku 06:00'dan 15:00'a kadar (540 dakika) alınmıştır. Bu süre, sabah pikinin yanı sıra pik olmayan saatleri de kapsamaktadır. Tipik bir hafta içi günü için planlama ufku boyunca her iki yöndeki ortalama yolcu talebi Şekil 5.2'de verilmiştir.

**Şekil 5.2** M1A Hattı yolcu geliş sayıları

Veriler her bir 15 dakika için toplanmış olup 2016 yılına aittir. İşletmeci firma olan Metro İstanbul A.Ş.'den temin edilen gerçek veriler ile bu 6 istasyon arasındaki kümülatif talep fonksiyonları üretilmiştir. Alt bölüm 4.3'de vurgulandığı üzere, her bir istasyon çifti için bir adet üretileceğinden bir yönde 15 adet olmak üzere toplam 30 adet kümülatif talep fonksiyonu model girdisi olarak kullanılmıştır. Üretilen eğrilerin parametre değerleri ve bu eğrilerin yolculuk verisini ne kadar iyi temsil ettiğinin istatistik ölçüsü olan R-kare değerleri yön bazlı olarak Tablo 5.4 ve Tablo 5.5'de verilmiştir.

Deneyisel çalışmalar için 21.336'sı yukarı yöne, 20.955'i aşağı yöne ait olmak üzere toplam 42.291 adet global yolcu talebi dikkate alınmıştır. Şekil 5.2'de görüleceği üzere, gerçekleşen toplam talep ve bu talebin planlama ufku boyunca dağılımı her iki yön için birbirinden çok farklı değildir. Bu nedenle vaka çalışmalarında her iki yön için tren sefer sayısı eşit ($K_1 = K_2$) alınmıştır.

Bu bölümde iki adet vaka tanımlanmıştır. İlk olarak, Vaka 1 aracılığı ile önerilen çözüm yaklaşımının performansı değerlendirilmiş ve elde edilen optimum çizelge ile mevcut periyodik çizelge kıyaslanmıştır. Daha sonra, Vaka 2 kullanılarak tren sefer sayısı ve araç kapasitesinin ortalama yolcu bekleme süresi üzerindeki etkisi incelenmiş ve yolcular ile işletmeci firma çıkarları arasında bir uzlaşım bulunmaya çalışılmıştır. Her iki vakaya ait parametre değerleri Tablo 5.6'da listelenmiştir.

Tablo 5.4 İstasyon çiftleri için üretilmiş kümülatif talep fonksiyonlarına ait parametre ve R-kare değerleri (Yukarı yön)

	Yenikapı-Aksaray	Yenikapı-Emniyet	Yenikapı-Ulubathı	Yenikapı-Bayrampaşa	Yenikapı-Sağmalcılar	Aksaray-Emniyet	Aksaray-Ulubathı	Aksaray-Bayrampaşa	Aksaray-Sağmalcılar	Emniyet-Ulubathı	Emniyet-Bayrampaşa	Emniyet-Sağmalcılar	Ulubathı-Bayrampaşa	Ulubathı-Sağmalcılar	Bayrampaşa-Sağmalcılar
a^1	2518	2078	1520	902.3	-44550	1986	47450	681.6	6798	1396	1150	1629	1140	422100	1603
b^1	592.7	644.7	789.1	602.4	481.7	586.7	1807	573.4	486.2	543.6	602.5	621.7	593.9	483.3	592.5
c^1	218.6	220.3	269	207.1	141.3	215.8	628.9	106.5	35.56	212.8	157.9	88.41	220.8	154.5	190.5
a^2	25970	864.3	342.6	458.1	45850	-81.08	-109500	-33.78	1607	-406.1	683.9	532.3	557.7	-420300	548.5
b^2	287.4	361.2	377.6	338.6	482	486.6	218.3	514.1	594.6	484.1	363.3	289	321.8	483.2	245.7
c^2	120.1	153.6	161.9	137.8	144.7	50.5	70.26	30.27	240.9	100.5	146.9	110.2	140.6	154	103.1
a^3	34.54	426.5	172.5	276.4	-509	513.8	145.3	511.7	-6869	179.7	225.1	1530	307.1	-583.6	543.4
b^3	430.8	212.1	201.9	193.3	365.1	300.9	388.1	395.4	486.3	210.9	183.1	488.7	183.8	363.6	376
c^3	42.04	107.2	87.92	82.46	78.52	135.6	104.8	162.7	35.74	106.2	85.38	147.5	81.5	87.89	114.7
a^4	-25060	0	0	0	348.2	111.9	109600	140.3	200.6	0	0	219.1	0	392.7	270.1
b^4	287.4	0	0	0	183.9	150.6	218.3	184.2	231.2	0	0	163.9	0	181.3	155.1
c^4	118.7	0	0	0	77.55	80.48	70.28	83.34	121	0	0	73.18	0	81.9	73.48
R-kare	0.9998	0.9997	0.9996	0.9991	0.9995	0.9999	0.9999	0.9996	0.9993	0.9998	0.9996	0.9999	0.9995	0.9999	0.9999

Tablo 5.5 İstasyon çiftleri için üretilmiş kümülatif talep fonksiyonlarına ait parametre ve R-kare değerleri (Aşağı yön)

	Sağmalcılar- Bayrampaşa	Sağmalcılar- Ulubatlı	Sağmalcılar- Emniyet	Sağmalcılar- Aksaray	Sağmalcılar- Yenikapı	Bayrampaşa- Ulubatlı	Bayrampaşa- Emniyet	Bayrampaşa- Aksaray	Bayrampaşa- Yenikapı	Ulubatlı- Emniyet	Ulubatlı- Aksaray	Ulubatlı- Yenikapı	Emniyet- Aksaray	Emniyet- Yenikapı	Aksaray- Yenikapı
a^1	2599	1956	260.5	652.5	-16260	2583	944.1	568.5	-1207	546.2	1198	2285	8279	1913	1598
b^1	612	614	576.2	597.1	513.8	693.8	641.3	576.7	391.6	577.2	617.2	603.5	475.8	586.5	601.1
c^1	193.4	215.9	57.65	97.92	175.7	257.1	285.6	70.21	63.06	80.03	190.6	153.7	148.8	147.6	235.8
a^2	275.2	7.9	580.6	0	17610	20.15	-90.6	-10.89	-3994	717.1	574.1	6780	-7288	672.2	540.7
b^2	441	450	511.4	485.6	517.4	451.1	483.1	453.5	497	457.4	353.1	262	473.6	414.9	311.6
c^2	78.93	1.778	140.5	0.9284	182.3	19.8	71.19	18.38	7858	204.8	139.7	100	138.1	95.25	134.5
a^3	1053	771.3	-6114	654.9	11.41	647.5	63.05	104.1	-1062	107.8	211.3	617.4	421.1	-5990	350.9
b^3	325.6	347.1	286.4	442.3	334.7	343.5	215	485.3	441.3	203.7	186.7	429.2	213.8	252.8	180.4
c^3	126.8	142.9	103.6	143.1	12.55	153.9	87.75	56.12	55.94	87.67	83.45	87.38	100.2	93.05	85.13
a^4	371.3	406.1	6420	301.8	331.9	139	0	529.1	5802	0	0	-6166	69.29	6761	0
b^4	188.8	208.8	286.2	285.4	203.4	178.6	0	418.4	482.1	0	0	260.1	160.4	253.3	0
c^4	93.71	103.2	106	103.5	91.66	101.6	0	173.8	113.3	0	0	95.65	41.81	97.46	0
a^5	0	0	0	249.2	0	0	0	119.3	261.2	0	0	0	0	0	0
b^5	0	0	0	186.5	0	0	0	192.1	228.8	0	0	0	0	0	0
c^5	0	0	0	75.16	0	0	0	81.34	105.1	0	0	0	0	0	0
R-kare	0.9999	0.9998	0.9995	0.9995	0.9987	0.9997	0.9998	0.9997	0.9999	0.9998	0.9997	0.9999	0.9998	0.9999	0.9998

Tablo 5.6 Vakalara ait parametre değerleri

Parametre	Vaka 1	Vaka 2
K	126	[20-140]
K_1	63	[10-70]
K_2	63	[10-70]
V_1	3	3
V_2	3	3
CT	170	[40-240]
$t_{r,max}^i$	3 dk.	3 dk.
$t_{r,min}^i$	2 dk.	2 dk.
$t_{s,max}$	0.5 dk.	0.5 dk.
$t_{s,min}$	0.25 dk.	0.25 dk.
h_{min}	6 dk.	6 dk.
τ_{min}	5 dk.	5 dk.

5.3 Model Karmaşıklığı

Deneylerin tamamı GAMS 30.1.0’da kodlanmış ve Ipopt çözücü kullanılarak çözülmüştür. Koşumlar, 1.80 GHz frekanslı Intel i5-8250U işlemcili 8 GB RAM’e sahip Windows 10 64 bit işletim sistemi altında çalışan kişisel bir bilgisayar üzerinde icra edilmiştir. Deneylerde optimum çözümleri elde etme süresi yaklaşık 15 dakikadır.

Ipopt büyük ölçekli doğrusal olmayan optimizasyon problemleri için geliştirilmiş açık kaynak bir yazılım paketidir. Kodlama Andreas Wächter ve Carl Laird tarafından yapılmıştır. İlk sürüm (pre-3.0) FORTRAN’da yazılmış ancak geliştirilmeye devam edilmemiştir. C++ versiyonu ilk defa 26 Ağustos 2005 yılında sürüm 3.0.0 olarak yayınlanmış ve bugüne kadar 14 ana sürüm geliştirilmiştir. Ipopt, DOP modellerinin lokal çözümünü bulmayı amaçlayan bir iç nokta satır arama filtre metodu kullanır. Algoritmanın matematiksel detaylarını açıklayan bazı çalışmalar bulunmaktadır (Nocedal et al., 2009; Wächter, 2002; Wächter et al., 2005, 2006, 2003).

Kent içi raylı sistemler için tasarlanan TSC problemlerinde çözüm zorluğu tipik olarak istasyon sayısı (Y), tren sefer sayısı (K) ve planlama ufku (T) olmak üzere üç parametre değerine bağlıdır (Barrena et al., 2014a; T. Zhang et al., 2018). Bu tez çalışmasında önerilen modelin GAMS’de bu üç parametrenin hangi değerleri için “optimum çözüm (OÇ)” hangi değerleri için “fizibil olmayan çözüm (FOÇ)” ürettiği Tablo 5.7’de belirtilmiştir.

Tablo 5.7 GAMS’de parametre bazlı performans analizi

İstasyon Sayısı (adet)		6						12						18					
Planlama Ufku (saat)		3	6	9	12	15	18	3	6	9	12	15	18	3	6	9	12	15	18
Tren Sefer Sayısı (Adet)	20	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ
	40	FOÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	FOÇ	FOÇ	OÇ	OÇ	OÇ	OÇ	FOÇ	FOÇ	OÇ	OÇ	FOÇ	FOÇ
	60	FOÇ	FOÇ	OÇ	OÇ	OÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	OÇ	OÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ
	80	FOÇ	FOÇ	OÇ	OÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ
	100	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ
	120	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ
	140	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ
	160	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ
	180	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ	FOÇ

Modelin pik ve pik olmayan saatlerde beklendiği gibi çalışıp çalışmadığını gözlemleyebilmek için planlama ufkunun yarım ya da 1 gün alınması literatürde oldukça yaygındır. Bununla birlikte, planlama ufku dâhilinde artan sefer sayısına göre amaç fonksiyonundaki iyileşmeyi net olarak gözlemleyebilmek için deneylerimizde istasyon sayısı 6, planlama ufku 9 saat olarak alınmıştır.

5.4 Sonuçlar

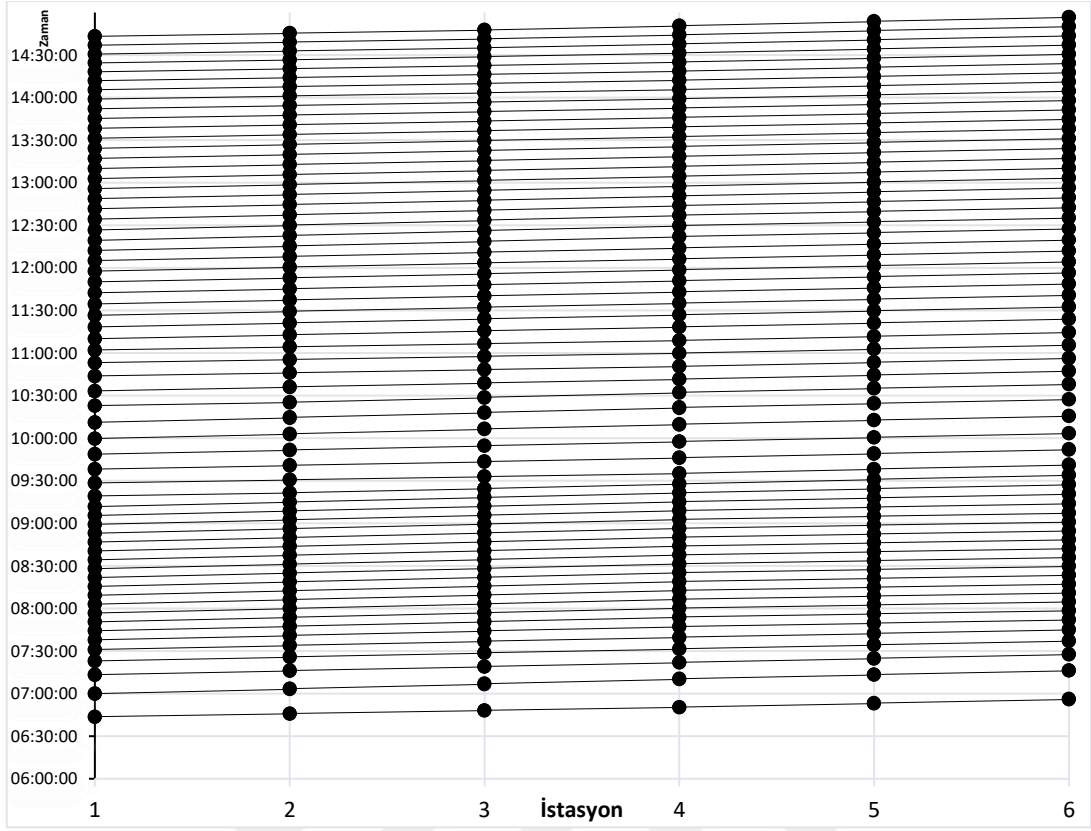
Geliştirilen matematik model kullanılarak alt bölüm 5.2’de tanımlanan Vaka 1 için tren seferlerinin ilk istasyonlardan kalkış zamanları ve ilişkili araç numaraları her iki yön için belirlenmiştir. Sonuçlar, Tablo 5.8 ve Tablo 5.9’da verilmiştir. Bu tablolardaki verilere tekabül eden zaman konum diyagramları ise Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’te gösterildiği gibidir. Bu şekillerde gösterilen tren kalkış zamanlarının Şekil 5.2’de verilen yolcu talep profili ile tutarlılık arz ettiği gözlenmektedir. Örneğin, talebin daha yüksek olduğu 08:00-09:00 saatleri arasında tren seferlerinin frekansı daha yüksek iken talebin daha düşük olduğu 09:30-10:30 saatleri arasında daha düşüktür.

Tablo 5.8 Tren seferlerinin ilk istasyondan optimum kalkış zamanları (Yukarı yön)

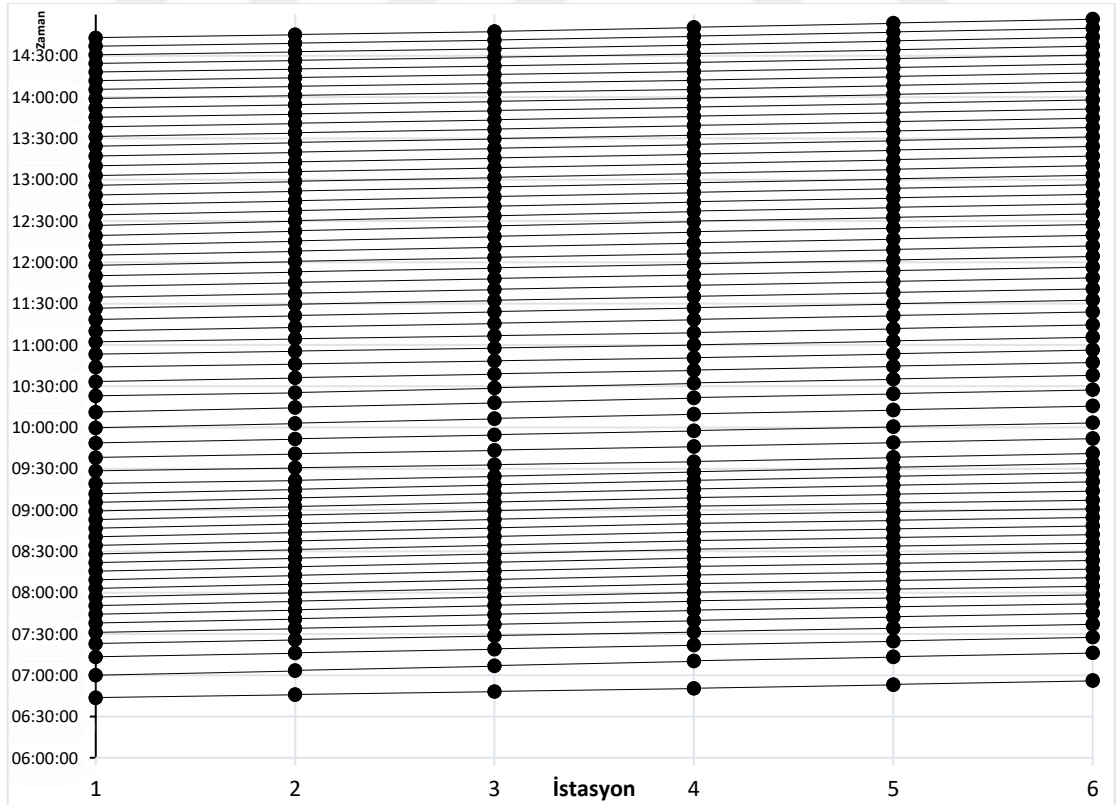
Araç No	Tren Sefer No	Kalkış Zamanı	Araç No	Tren Sefer No	Kalkış Zamanı	Araç No	Tren Sefer No	Kalkış Zamanı
1	1	06:43:46	4	22	09:19:21	1	43	12:26:46
2	2	07:00:01	5	23	09:28:30	2	44	12:34:26
3	3	07:13:23	6	24	09:38:14	3	45	12:41:46
4	4	07:23:04	1	25	09:48:47	4	46	12:48:53
5	5	07:31:08	2	26	09:59:48	5	47	12:55:56
6	6	07:37:57	3	27	10:11:14	6	48	13:03:00
1	7	07:44:20	4	28	10:23:01	1	49	13:10:05
2	8	07:50:35	5	29	10:33:22	2	50	13:17:13
3	9	07:56:50	6	30	10:43:56	3	51	13:24:20
4	10	08:03:05	1	31	10:53:17	4	52	13:31:25
5	11	08:09:20	2	32	11:02:13	5	53	13:38:26
6	12	08:15:35	3	33	11:10:09	6	54	13:45:22
1	13	08:21:50	4	34	11:18:28	1	55	13:52:12
2	14	08:28:05	5	35	11:26:38	2	56	13:59:01
3	15	08:34:20	6	36	11:34:39	3	57	14:05:37
4	16	08:40:35	1	37	11:42:30	4	58	14:11:59
5	17	08:46:50	2	38	11:50:13	5	59	14:18:14
6	18	08:53:05	3	39	11:57:48	6	60	14:24:29
1	19	08:59:20	4	40	12:05:13	1	61	14:30:44
2	20	09:05:35	5	41	12:12:22	2	62	14:36:59
3	21	09:11:50	6	42	12:19:27	3	63	14:43:14

Tablo 5.9 Tren seferlerinin ilk istasyondan optimum kalkış zamanları (Aşağı yön)

Araç No	Tren Sefer No	Kalkış Zamanı	Araç No	Tren Sefer No	Kalkış Zamanı	Araç No	Tren Sefer No	Kalkış Zamanı
1	1	06:46:48	4	22	09:19:12	1	43	12:26:09
2	2	07:04:02	5	23	09:27:44	2	44	12:33:41
3	3	07:13:48	6	24	09:37:15	3	45	12:41:15
4	4	07:22:02	1	25	09:47:45	4	46	12:48:52
5	5	07:29:46	2	26	09:59:04	5	47	12:56:35
6	6	07:37:16	3	27	10:10:53	6	48	13:04:23
1	7	07:44:26	4	28	10:22:22	1	49	13:12:14
2	8	07:51:05	5	29	10:32:41	2	50	13:20:05
3	9	07:57:20	6	30	10:42:11	3	51	13:27:46
4	10	08:03:35	1	31	10:51:10	4	52	13:35:11
5	11	08:09:50	2	32	10:59:47	5	53	13:42:11
6	12	08:16:05	3	33	11:08:04	6	54	13:48:58
1	13	08:22:20	4	34	11:16:08	1	55	13:55:36
2	14	08:28:35	5	35	11:23:57	2	56	14:01:59
3	15	08:34:50	6	36	11:31:40	3	57	14:08:14
4	16	08:41:05	1	37	11:39:40	4	58	14:14:29
5	17	08:47:20	2	38	11:47:50	5	59	14:20:44
6	18	08:53:35	3	39	11:55:47	6	60	14:26:59
1	19	08:59:50	4	40	12:03:30	1	61	14:33:14
2	20	09:06:05	5	41	12:11:06	2	62	14:39:29
3	21	09:12:20	6	42	12:18:38	3	63	14:45:44

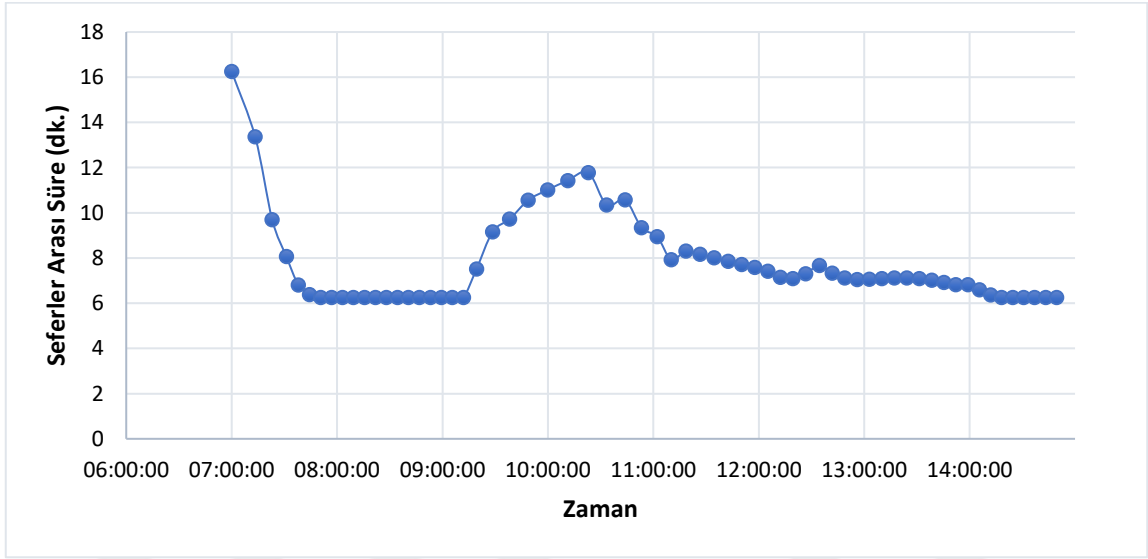


Şekil 5.3 Zaman konum diyagramı (Yukarı yön)

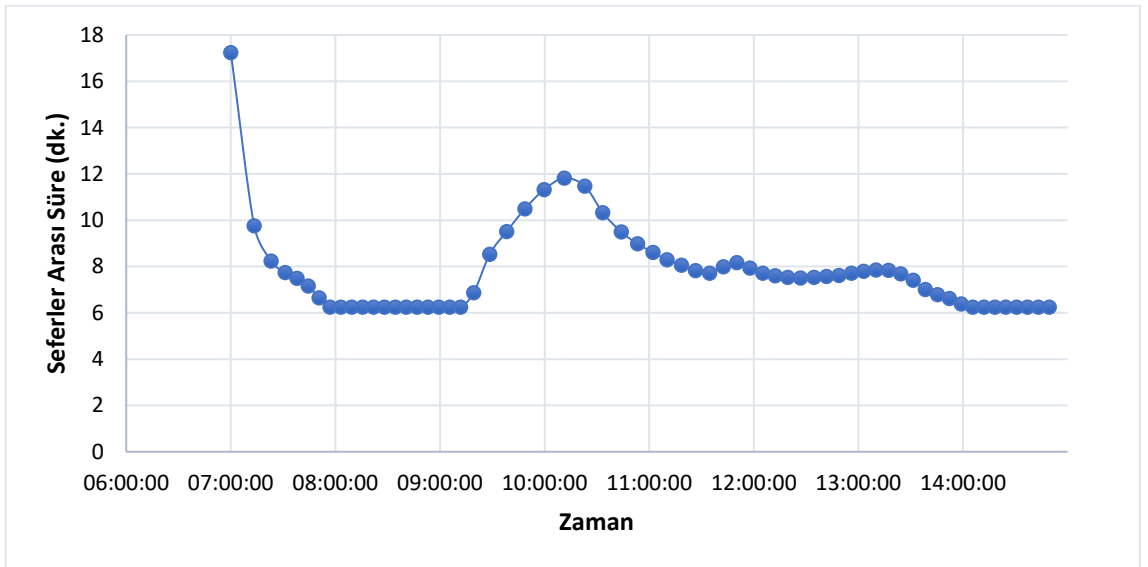


Şekil 5.4 Zaman konum diyagramı (Aşağı yön)

Optimum çizelgenin talep değişimi ile arasındaki tutarlılığı net olarak ortaya koymak adına ardışık tren kalkışları arasındaki zaman farklarını hesaplayarak bulduğumuz seferler arası süre (headway) değişimleri Şekil 5.5 ve Şekil 5.6’da gösterilmiştir. İşletmeci firmanın hâlihazırda kullandığı periyodik çizelgede seferler arası süre sabit ve 6 dakika iken optimum çizelgede beklendiği üzere yolcu talebine bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Başka bir deyişle, yolcu talebinin artması ile seferler arası süre azalırken azalması ile artışa geçmektedir.



Şekil 5.5 Seferler arası süre profili (Yukarı yön)



Şekil 5.6 Seferler arası süre profili (Aşağı yön)

Önerilen modelin ne derece iyi olduğunu test etmek amacıyla optimum çizelge ile mevcut (periyodik) çizelge karşılaştırılmıştır. Tablo 5.10 planlama ufku, filo büyüklüğü ve ilgili diğer tüm parametreler aynı olmak kaydıyla her iki çizelgeye ait sonuçları göstermektedir. Buna göre, periyodik çizelgeye kıyasla ortalama bekleme süresi %64.12, tren sefer sayısı %29.21 oranında azalmıştır. Diğer bir ifadeyle, daha az tren seferi yapılarak yolcular için daha düşük ortalama bekleme süresi sağlanmıştır ki, bu da önerdiğimiz çizelge optimizasyon modelinin etkinliğini açıkça ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar temelde optimizasyon modelinin periyodik çizelgeye kıyasla daha esnek olmasından, her bir trenin kalkış zamanı ile ardışık tren kalkışları arasındaki süreleri zamana göre değişen yolcu talebine göre ayarlayabilmesinden kaynaklanmaktadır.

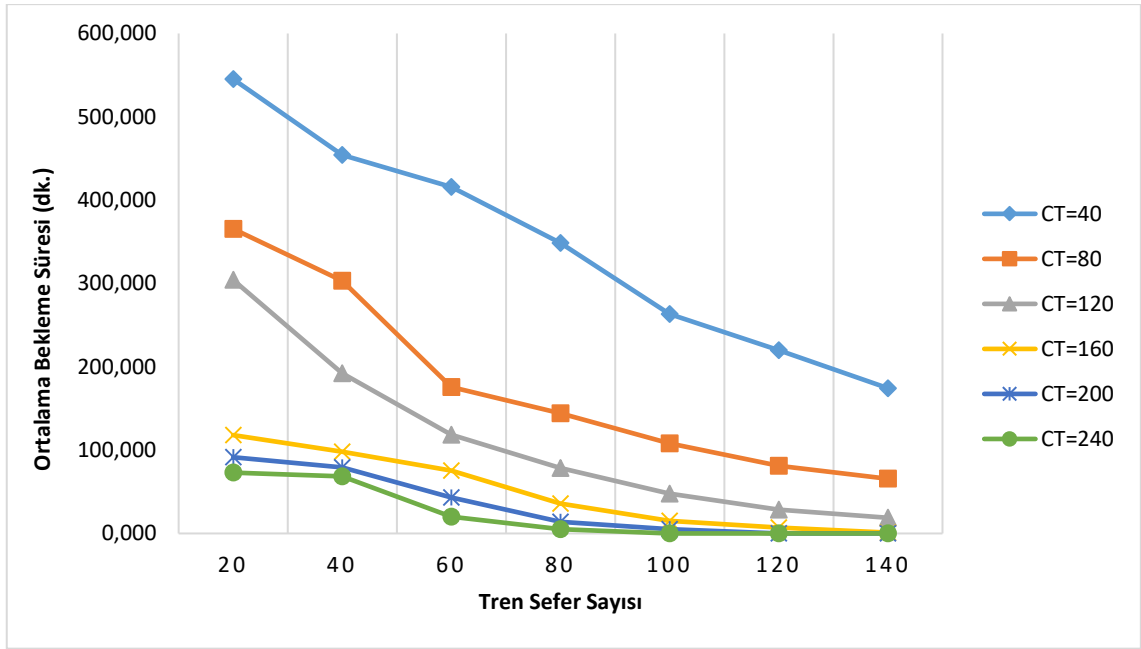
Tablo 5.10 Optimum çizelge ile periyodik çizelge karşılaştırması

Çizelge	Tren Sefer Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (dk.)	Ortalama Doluluk Oranı (%)
Optimum	63	0.573	83.7
Periyodik	89	1.597	78.3

5.5 Duyarlılık Analizi

Hizmet sağlayıcı açısından bakıldığında olabildiğince düşük kapasite ile en az sayıda sefer yapmak daha düşük maliyetlere neden olacaktır. Bununla birlikte, müşteri memnuniyetinin en önemli göstergesi bekleme süresinin minimum olmasıdır. Ancak bekleme süresinin azalması sunulan kapasite ve tren sefer sayısının artması ile mümkündür. Dolayısıyla tren sefer sayısı, tren kapasitesi ve yolcu bekleme süresi arasında farklı uzlaşımlar vardır. Bu alt bölümde, Vaka 2 kullanılarak hizmet sağlayıcı ve müşteri çıkarları arasındaki bu dengeler değerlendirilmiştir.

Deneyleri icra etmek için tren kapasitesi (CT) 40'tan 240'a yükseltilmiştir (her seferinde 40). Her bir sabit kapasite için tren sefer sayısı (K) 20'den 140'a yükseltilmiştir (her seferinde 20). Ayrıca her bir deney için her iki yolda yapılan sefer sayısının birbirine eşit olduğu ($K_1 = K_2$) varsayılmıştır. Her bir sabit kapasite için 7 adet olmak üzere toplam 42 adet çizelge elde edilmiş ve sonuçlar Şekil 5.7'de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 Ortalama bekleme süresinin tren sefer sayısı ve tren kapasitesine göre değişimi

Sonuçlar, tren kapasitesi arttıkça ortalama bekleme süresinin azaldığına işaret etmektedir. Benzer şekilde, herhangi bir sabit kapasite için tren sefer sayısı arttıkça ortalama bekleme süresi yine azalmaktadır. Bununla birlikte, tren kapasitesinin 200 ve 240 olduğu senaryolar için ortalama bekleme süreleri arasındaki fark oldukça küçüktür. Daha fazla vagon firma için daha fazla maliyet anlamına geldiğinden kapasitenin 240 olduğu durumun dikkate alınmaması makul görünmektedir. Yanı sıra, grafikte tren kapasitesinin 200 olduğu senaryo incelendiğinde tren sefer sayısı 120'ye ulaştıktan sonra ortalama bekleme süresinin önemli bir değişim göstermediği gözlenmektedir. Dolayısıyla bu sonucun diğerlerine göre daha tercih edilebilir olduğu söylenebilir.

Bu tez çalışmasında kent içi raylı sistemlerde yolcu talebinin zamansal değişimi ile tren sefer çizelgesinin homojenliği arasındaki çatışmayı çözümlmek için talep odaklı tren sefer çizelgeleme problemi ele alınmıştır. Bu amaçla, aşağı ve yukarı yönlü tren seferlerinin birbirine bağlı olduğu tek döngülü (single-loop) bir metro hattında tren kapasitesi ve filo büyüklüğünün sınırlı olduğu varsayımı altında yolcu başına bekleme süresini minimize etmek üzere bir doğrusal olmayan programlama modeli geliştirilmiştir. Belirli bir planlama ufku dâhilinde her bir istasyon çifti arasındaki yolcu talebinin tanımından başlanarak trenlerin varış/kalkış zamanları, istasyonda duruş süreleri ve istasyonlar arası çalışma süreleri eş zamanlı olarak optimize edilmiştir. Yolcu talebi modele geleneksel kesikli OD matrisler aracılığıyla değil talebin sürekli temsilini esas alan kümülatif talep eğrileri kullanılarak dâhil edilmiştir. Planlama ufkundan bağımsız bir yakınsama sağlaması nedeniyle bu yaklaşım talebin daha gerçekçi bir şekilde tanımlanmasına olanak sağlamıştır.

Matematiksel optimizasyon modelinin performansı İstanbul metro ağına ait M1A hattında test edilmiştir. Sonuçlar, doygunluk durumu altında, önerilen modelin ürettiği optimum çizelgenin periyodik çizelgeye kıyasla dinamik yolcu talebine daha fazla uyum sağladığına işaret etmektedir. Buna ek olarak, optimal çizelgenin halihazırda kullanımda olan periyodik çizelgeye kıyasla yolcu başına ortalama bekleme süresinde %64.12, tren sefer sayısında ise %29.21 oranında iyileşme sağladığı görülmüştür. Son olarak araç kapasitesi ve tren sefer sayısının yolcu bekleme süresine etkisini incelemek amacıyla bir duyarlılık analizi icra edilmiştir. Analiz sonuçları, araç kapasitesi ve sefer sayısının artması ile ortalama bekleme süresinin azaldığını ve dolayısıyla işletmeci firma ve yolcu çıkarları arasında farklı uzlaşımalar olduğunu göstermiştir.

Araştırmacılar ve demiryolu sektöründe yer alan firmalar arasında talep odaklı tren sefer çizelgeme çalışmalarına artan bir ilgi bulunmaktadır. Yolcu bekleme süresinde elde edilecek herhangi bir tasarruf raylı taşıma sistemlerini daha cazip ve arzu edilir kılacaktır. Ancak raylı sistem endüstrisi yöneticileri açısından bütçe kısıtlarına tabi olan işletme maliyetlerine bağlı olarak yolcu memnuniyetini sağlamak oldukça zorlu bir görevdir. Önerilen model, hizmet sağlayıcı firmanın belirli bir hizmet kalitesini garanti eden en uygun tren kapasitesi ve tren sefer sayısı ile ilgili uygun kararlar almasına olanak

sağlamaktadır. Sonuç olarak, bu metodun gerçek hayat koşullarında uygulanması işletmeciler için firmaların iş verimliliğini artırılması ve maliyetlerin düşürülmesi gibi avantajlar sağlarken müşteriler açısından daha düşük bekleme süresi anlamına gelecektir.

Bu çalışmanın gelecekte yapılabilecek olası çalışmalar açısından geliştirilebilir birkaç yönü bulunmaktadır. İlk olarak, daha büyük vakaların daha kısa sürelerde çözümünü sağlayacak hızlı optimizasyon algoritmaları geliştirilebilir. Bir diğer gelişime açık yön ise optimum çizelgeye yolcuların nasıl karşılık verdiğinin analiz edilmesidir. Son olarak, hizmet sağlayıcı firmanın maliyetleri açısından, ekip çizelgeleme probleminin modele dâhil edilmesi oldukça faydalı olabilir.



- A. Caprara, M. Fischetti, P.L. Guida, M. Monaci, P. T. (2001). Solution of real-world train timetabling problems. *Proceedings of the 34th Hawaii International Conference on System Sciences - 2001*, c, 1–10.
- Amin-Naseri, M. R., & Baradaran, V. (2015). Accurate estimation of average waiting time in public transportation systems. *Transportation Science*, 49(2), 213–222. doi: 10.1287/trsc.2013.0514
- Barbour, R., & Fricker, J. D. (1994). Estimating an origin-destination table using a method based on shortest augmenting paths. *Transportation Research Part B*, 28(2), 77–89. doi: 10.1016/0191-2615(94)90018-3
- Barrena, E., Canca, D., Coelho, L. C., & Laporte, G. (2014a). Exact formulations and algorithm for the train timetabling problem with dynamic demand. *Computers and Operations Research*, 44, 66–74. doi: 10.1016/j.cor.2013.11.003
- Barrena, E., Canca, D., Coelho, L. C., & Laporte, G. (2014b). Single-line rail rapid transit timetabling under dynamic passenger demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, 70, 134–150. doi: 10.1016/j.trb.2014.08.013
- Bešinović, N., Goverde, R. M. P., Quaglietta, E., & Roberti, R. (2016). An integrated micro-macro approach to robust railway timetabling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 87, 14–32. doi: 10.1016/j.trb.2016.02.004
- Blanco, V., Conde, E., Hinojosa, Y., & Puerto, J. (2020). An optimization model for line planning and timetabling in automated urban metro subway networks. A case study. *Omega (United Kingdom)*, 92. doi: 10.1016/j.omega.2019.102165
- Bowman, L. A., & Turnquist, M. A. (1981). Service frequency, schedule reliability and passenger wait times at transit stops. *Transportation Research Part A: General*, 15(6), 465–471. doi: 10.1016/0191-2607(81)90114-X
- Brännlund, U., Lindberg, P. O., & A. Nöu, J.-E. N. (1998). Railway timetabling using Lagrangian relaxation. *Transportation Science*, 32(4), 306–404. doi: <https://doi.org/10.1287/trsc.32.4.358>
- Bucak, S., & Demirel, T. (2022). Train timetabling for a double-track urban rail transit line under dynamic passenger demand. *Computers and Industrial Engineering*, 163(February 2021), 107858. doi: 10.1016/j.cie.2021.107858
- Bussieck, M. R. (1998). Optimal lines in public rail transport. In PhD Thesis, TU Braunschweig (Issue September).
- Bussieck, M. R., Kreuzer, P., & Zimmermann, U. T. (1997). Optimal lines for railway systems. *European Journal of Operational Research*, 96(1), 54–63. doi: 10.1016/0377-2217(95)00367-3
- Bussieck, M. R., Winter, T., & Zimmermann, U. T. (1997). Discrete optimization in public rail transport. *Mathematical Programming*, 79(1–3), 415–444. doi: 10.1007/BF02614327
- Cadarso, L., & Marín, Á. (2012). Integration of timetable planning and rolling stock in rapid transit networks. *Annals of Operations Research*, 199(1), 113–135. doi: 10.1007/s10479-011-0978-0

- Cai, X., & Goh, C. J. (1994). A fast heuristic for the train scheduling problem. *Computers and Operations Research*, 21(5), 499–510. doi: 10.1016/0305-0548(94)90099-X
- Canca, D., Barrena, E., Algaba, E., & Zarzo, A. (2014). Design and analysis of demand-adapted railway timetables. *Journal of Advanced Transportation*, 48(2), 119–137. doi: 10.1002/atr.1261
- Caprara, A., Fischetti, M., & Toth, P. (2002). Modeling and solving the train timetabling problem. *Operations Research*, 50(5), 851–861. doi: 10.1287/opre.50.5.851.362
- Caprara, A., Fischetti, M., Toth, P., Vigo, D., & Guida, P. L. (1997). Algorithms for railway crew management. *Mathematical Programming, Series B*, 79(1–3), 125–141. doi: 10.1007/BF02614314
- Cascetta, E., & Nguyen, S. (1988). A unified framework for estimating or updating origin/destination matrices from traffic counts. *Transportation Research Part B*, 22(6), 437–455. doi: 10.1016/0191-2615(88)90024-0
- Ceder, A. (2007). Public transit planning and operation: Theory, modeling and practice. In *Public Transit Planning and Operation*. Elsevier, Butterworth-Heinemann. doi: 10.1201/b12853
- Chang, S.-C., & Chung, Y.-C. (2005). From timetabling to train regulation—a new train operation model. *Information and Software Technology*, 47(9), 575–585. doi: 10.1016/j.infsof.2004.10.008
- Chierici, A., Cordone, R., & Maja, R. (2004). The demand-dependent optimization of regular train timetables. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 17, 99–104. doi: 10.1016/j.endm.2004.03.017
- Claessens, M. T., Van Dijk, N. M., & Zwaneveld, P. J. (1998). Cost optimal allocation of rail passenger lines. *European Journal of Operational Research*, 110(3), 474–489. doi: 10.1016/S0377-2217(97)00271-3
- Cordeau, J.-F., Toth, P., & Vigo, D. (1998). A survey of optimization models for train routing and scheduling. *Transportation Science*, 32(4), 380–404. doi: 10.1287/trsc.32.4.380
- Fang, W., Yang, S., & Yao, X. (2015). A survey on problem models and solution approaches to rescheduling in railway networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(6), 2997–3016. doi: 10.1109/TITS.2015.2446985
- Ghoseiri, K., Szidarovszky, F., & Asgharpour, M. J. (2004). A multi-objective train scheduling model and solution. *Transportation Research Part B: Methodological*, 38(10), 927–952. doi: 10.1016/j.trb.2004.02.004
- Gong, C., Shi, J., Wang, Y., Zhou, H., Yang, L., Chen, D., & Pan, H. (2021). Train timetabling with dynamic and random passenger demand: A stochastic optimization method. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 123(January), 102963. doi: 10.1016/j.trc.2021.102963
- Goossens, J. W., van Hoesel, S., & Kroon, L. (2004). A branch-and-cut approach for solving railway line-planning problems. *Transportation Science*, 38(3), 379–393. doi: 10.1287/trsc.1030.0051
- Goverde, R. M. P. (2007). Railway timetable stability analysis using max-plus system

- theory. *Transportation Research Part B: Methodological*, 41(2), 179–201. doi: 10.1016/j.trb.2006.02.003
- Guihaire, V., & Hao, J. K. (2008). Transit network design and scheduling: A global review. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 42(10), 1251–1273. doi: 10.1016/j.tra.2008.03.011
- Hassannayebi, E., Sajedinejad, A., & Mardani, S. (2014). Urban rail transit planning using a two-stage simulation-based optimization approach. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 49, 151–166. doi: 10.1016/j.simpat.2014.09.004
- Hassannayebi, E., & Zegordi, S. H. (2017). Variable and adaptive neighbourhood search algorithms for rail rapid transit timetabling problem. *Computers and Operations Research*, 78, 439–453. doi: 10.1016/j.cor.2015.12.011
- Hassannayebi, E., Zegordi, S. H., & Yaghini, M. (2016). Train timetabling for an urban rail transit line using a Lagrangian relaxation approach. *Applied Mathematical Modelling*, 40(23–24), 9892–9913. doi: 10.1016/j.apm.2016.06.040
- Higgins, A., Kozan, E., & Ferreira, L. (1996). Optimal scheduling of trains on a single track. *Transportation Research Part B: Methodological*, 30(2), 147–161. doi: [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(95\)00022-4](https://doi.org/10.1016/0191-2615(95)00022-4)
- Hooghiemstra, J. S. (1996). Design of regular interval timetables for strategic and tactical railway planning. *Proceedings of the International Conference on Computer Aided Design, Manufacture and Operation in the Railway and Other Mass Transit Systems*, 1, 393–402.
- Huang, Y., Yang, L., Tang, T., Cao, F., & Gao, Z. (2016). Saving energy and improving service quality: Bicriteria train scheduling in urban rail transit systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 17(12), 3364–3379. doi: 10.1109/TITS.2016.2549282
- Huisman, D., Kroon, L. G., Lentink, R. M., Vromans, M. J. C. M., Huisman, D., Kroon, L. G., Lentink, R. M., & Vromans, M. J. C. M. (2005). Operations research in passenger railway transportation. *Statistica Neerlandica*, 59(4), 467–497. doi: 10.1111/j.1467-9574.2005.00303.x
- Hurdle, V. F. (1973). Minimum cost schedules for a public transportation route—I. Theory. *Transportation Science*, 7(2), 109–137. doi: 10.1287/trsc.7.2.109
- Kaspi, M., & Raviv, T. (2013). Service-oriented line planning and timetabling for passenger trains. *Transportation Science*, 47(3), 295–311. doi: 10.1287/trsc.1120.0424
- Kroon, L., Huisman, D., Abbink, E., Fioole, P.-J., Fischetti, M., Maróti, G., Schrijver, A., Steenbeek, A., & Ybema, R. (2009). The new Dutch timetable: The OR revolution. *Interfaces*, 39(1), 6–17. doi: 10.1287/inte.1080.0409
- Lee, Y., & Chen, C. Y. (2009). A heuristic for the train pathing and timetabling problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(8–9), 837–851. doi: 10.1016/j.trb.2009.01.009
- Li, D., Zhang, T., Dong, X., Yin, Y., & Cao, J. (2019). Trade-off between efficiency and fairness in timetabling on a single urban rail transit line under time-dependent demand condition. *Transportmetrica B*, 7(1), 1203–1231. doi: 10.1080/21680566.2019.1589598

- Li, S., Xu, R., & Han, K. (2019). Demand-oriented train services optimization for a congested urban rail line: Integrating short turning and heterogeneous headways. In *Transportmetrica A: Transport Science* (Vol. 15, Issue 2). Taylor & Francis. doi: 10.1080/23249935.2019.1608475
- Liu, R., Li, S., & Yang, L. (2020). Collaborative optimization for metro train scheduling and train connections combined with passenger flow control strategy. *Omega (United Kingdom)*, 90, 101990. doi: 10.1016/j.omega.2018.10.020
- Löbel, A. (1997). Optimal vehicle scheduling in public transit. In PhD Thesis, TU Berlin (Issue November).
- M.J.Maher. (1983). Inferences on trip matrices from observations on link volumes: a Bayesian statistical approach. *Transportation Research Part B*, 17B(6), 435–447.
- Mo, P., Yang, L., Wang, Y., & Qi, J. (2019). A flexible metro train scheduling approach to minimize energy cost and passenger waiting time. *Computers and Industrial Engineering*, 132(March), 412–432. doi: 10.1016/j.cie.2019.04.031
- Nachtigall, K., & Voget, S. (1996). A genetic algorithm approach to periodic railway synchronization. *Computers & Operations Research*, 23(5), 453–463. doi: 10.1016/0305-0548(95)00032-1
- Nitisiri, K., Gen, M., & Ohwada, H. (2019). A parallel multi-objective genetic algorithm with learning based mutation for railway scheduling. *Computers & Industrial Engineering*, 130, 381–394. doi: 10.1016/j.cie.2019.02.035
- Niu, H., & Tian, X. (2013). An approach to optimize the departure times of transit vehicles with strict capacity constraints. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 1–9. doi: 10.1155/2013/471928
- Niu, H., & Zhou, X. (2013). Optimizing urban rail timetable under time-dependent demand and oversaturated conditions. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 36, 212–230. doi: 10.1016/j.trc.2013.08.016
- Nocedal, J., Wächter, A., & A. Waltz, R. (2009). Adaptive barrier update strategies for nonlinear interior methods. *SIAM Journal on Optimization*, 19(4), 1674–1693. doi: 10.1137/060649513
- Robenek, T., Azadeh, S. S., Maknoon, Y., de Lapparent, M., & Bierlaire, M. (2018). Train timetable design under elastic passenger demand. *Transportation Research Part B: Methodological*, 111, 19–38. doi: 10.1016/j.trb.2018.03.002
- Schwan, W. (1994). The status of German railway operations management in research and practice. *Transportation Research Part A*, 28(6), 495–500.
- Shakibayifar, M., Hassannayebi, E., Jafary, H., & Sajedinejad, A. (2017). Stochastic optimization of an urban rail timetable under time-dependent and uncertain demand. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 33(6), 640–661. doi: 10.1002/asmb.2268
- Shang, P., Li, R., & Yang, L. (2016). Optimization of urban single-line metro timetable for total passenger travel time under dynamic passenger demand. *Procedia Engineering*, 137, 151–160. doi: 10.1016/j.proeng.2016.01.245
- Shen, Y., Ren, G., & Liu, Y. (2018). Timetable design for minimizing passenger travel time and congestion for a single metro line. *Promet - Traffic - Traffico*, 30(1), 21–33. doi: 10.7307/ptt.v30i1.2281

- Sherali, H. D., Sivanandan, R., & Hobeika, A. G. (1994). A linear programming approach for synthesizing origin-destination trip tables from link traffic volumes. *Transportation Research Part B*, 28(3), 213–233. doi: 10.1016/0191-2615(94)90008-6
- Shi, J., Yang, L., Yang, J., & Gao, Z. (2018). Service-oriented train timetabling with collaborative passenger flow control on an oversaturated metro line: An integer linear optimization approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, 110, 26–59. doi: 10.1016/j.trb.2018.02.003
- Sun, H., Wu, J., Ma, H., Yang, X., & Gao, Z. (2018). A Bi-Objective timetable optimization model for urban rail transit based on the time-dependent passenger volume. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(2), 604–615. doi: 10.1109/TITS.2018.2818182
- Sun, L., Jin, J. G., Lee, D.-H., Axhausen, K. W., & Erath, A. (2014). Demand-driven timetable design for metro services. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 46, 284–299. doi: 10.1016/j.trc.2014.06.003
- Sun, X., Zhang, S., Dong, H., Chen, Y., & Zhu, H. (2015). Optimization of metro train schedules with a dwell time model using the lagrangian duality theory. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(3), 1285–1293. doi: 10.1109/TITS.2014.2361894
- The UITP Observatory of Automated Metros. (2018). *World Metro Figures September 2018*. Retrieved from [https://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/Statistics Brief - World metro figures 2018V4_WEB.pdf](https://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/Statistics%20Brief%20-%20World%20metro%20figures%202018V4_WEB.pdf)
- Thomas Lindner. (2000). Train schedule optimization in public rail transport. In PhD Thesis, TU Braunschweig (Issue April). doi: 10.1007/978-3-642-55753-8_53
- Vansteenwegen, P., & Oudheusden, D. Van. (2006). Developing railway timetables which guarantee a better service. *European Journal of Operational Research*, 173(1), 337–350. doi: 10.1016/j.ejor.2004.12.013
- Vuchic, V. R. (2007). Urban transit systems and technology. In *The Civil Engineering Handbook*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc. doi: 10.1002/9780470168066
- Wächter, A. (2002). An interior point algorithm for large-scale nonlinear optimization with applications in process engineering. In Dissertation, CMU Pennsylvania.
- Wächter, A., & Biegler, L. T. (2005). Line search filter methods for nonlinear programming: Motivation and global convergence. *SIAM Journal on Optimization*, 16(1), 1–31. doi: 10.1137/S1052623403426556
- Wächter, A., & Lorenz T. Biegler. (2006). On the implementation of an interior-point filter line-search algorithm for large-scale nonlinear programming. *Math. Program.*, 57, 25–57. doi: 10.1007/s10107-004-0559-y
- Wächter, A., & T. Biegler, L. (2003). Line search filter methods for nonlinear programming: Local convergence. *Dominoweb.Draco.Res.Ibm.Com*, RC23033 (W0312-090).
- Wang, Y., D'Ariano, A., Yin, J., Meng, L., Tang, T., & Ning, B. (2018). Passenger demand oriented train scheduling and rolling stock circulation planning for an urban rail transit line. *Transportation Research Part B: Methodological*, 118, 193–227. doi: 10.1016/j.trb.2018.10.006

- Wang, Y., De Schutter, B., Van Den Boom, T. J. J., Ning, B., & Tang, T. (2014). Efficient Bilevel approach for urban rail transit operation with stop-skipping. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(6), 2658–2670. doi: 10.1109/TITS.2014.2323116
- Wang, Y., De Schutter, B., van den Boom, T., Ning, B., & Tang, T. (2013). Real-time scheduling for single lines in urban rail transit systems. *2013 IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings*, 1–6. doi: 10.1109/ICIRT.2013.6696258
- Wang, Y., Schutter, B. De, Boom, T. J. J. Van Den, Ning, B., & Tang, T. (2013). Real-time scheduling for trains in urban rail transit systems using nonlinear optimization. *Proceedings of the 16th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, Itsc, 1334–1339.
- Wang, Y., Tang, T., Ning, B., van den Boom, T. J. J., & De Schutter, B. (2015). Passenger-demands-oriented train scheduling for an urban rail transit network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 60, 1–23. doi: 10.1016/j.trc.2015.07.012
- Wardman, M., Shires, J., Lythgoe, W., & Tyler, J. (2004). Consumer benefits and demand impacts of regular train timetables. *International Journal of Transport Management*, 2(1), 39–49. doi: 10.1016/j.ijtm.2004.04.002
- Xu, X., Li, K., Yang, L., & Ye, J. (2014). Balanced train timetabling on a single-line railway with optimized velocity. *Applied Mathematical Modelling*, 38(3), 894–909. doi: 10.1016/j.apm.2013.07.023
- Xue, Q., Yang, X., Wu, J., Sun, H., Yin, H., & Qu, Y. (2019). Urban rail timetable optimization to improve operational efficiency with flexible routing plans: A nonlinear integer programming model. *Sustainability (Switzerland)*, 11(13). doi: 10.3390/su11133701
- Yang, L., Yao, Y., Shi, H., & Shang, P. (2021). Dynamic passenger demand-oriented train scheduling optimization considering flexible short-turning strategy. *Journal of the Operational Research Society*, 72(8), 1707–1725. doi: 10.1080/01605682.2020.1806745
- Yang, S., Liao, F., Wu, J., Timmermans, H. J. P., Sun, H., & Gao, Z. (2020). A bi-objective timetable optimization model incorporating energy allocation and passenger assignment in an energy-regenerative metro system. *Transportation Research Part B: Methodological*, 133, 85–113. doi: 10.1016/j.trb.2020.01.001
- Yang, S., Wu, J., Sun, H., Yang, X., Gao, Z., & Chen, A. (2018). Bi-objective nonlinear programming with minimum energy consumption and passenger waiting time for metro systems, based on the real-world smart-card data. *Transportmetrica B*, 6(4), 302–319. doi: 10.1080/21680566.2017.1320775
- Yang, X., Ning, B., Li, X., & Tang, T. (2014). A two-objective timetable optimization model in subway systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 15(5), 1913–1921. doi: 10.1109/TITS.2014.2303146
- Yin, J., Yang, L., Tang, T., Gao, Z., & Ran, B. (2017). Dynamic passenger demand oriented metro train scheduling with energy-efficiency and waiting time minimization: Mixed-integer linear programming approaches. *Transportation Research Part B: Methodological*, 97, 182–213. doi: 10.1016/j.trb.2017.01.001

- Yue, Y., Han, J., Wang, S., & Liu, X. (2017). Integrated train timetabling and rolling stock scheduling model based on time-dependent demand for urban rail transit. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(10), 856–873. doi: 10.1111/mice.12300
- Zhang, M., Wang, Y., Su, S., Tang, T., & Ning, B. (2018). A short turning strategy for train scheduling optimization in an urban rail transit line: the case of Beijing subway line 4. *Journal of Advanced Transportation*, 2018. doi: 10.1155/2018/5367295
- Zhang, T., Li, D., & Qiao, Y. (2018). Comprehensive optimization of urban rail transit timetable by minimizing total travel times under time-dependent passenger demand and congested conditions. *Applied Mathematical Modelling*, 58, 421–446. doi: 10.1016/j.apm.2018.02.013
- Zhou, X., & Zhong, M. (2005). Bicriteria train scheduling for high-speed passenger railroad planning applications. *European Journal of Operational Research*, 167(3), 752–771. doi: 10.1016/j.ejor.2004.07.019
- Zhu, Y., Mao, B., Liu, L., & Li, M. (2015). Timetable design for urban rail line with capacity constraints. *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2015, 1–11. doi: 10.1155/2015/429219
- Zimmermann, U. T., & Lindner, T. (2003). Train schedule optimization in public rail transport. *Mathematics — Key Technology for the Future*, 703–716. doi: 10.1007/978-3-642-55753-8_53

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Makaleler

1. Bucak, S., & Demirel, T. (2022). Train timetabling for a double-track urban rail transit line under dynamic passenger demand. *Computers and Industrial Engineering*, 163(February 2021), 107858. doi: 10.1016/j.cie.2021.107858

