

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KENT İÇİ RAYLI SİSTEMLERDE GERÇEK AKTARMA SÜRELERİYLE
ZAMAN ÇİZELGESİNİN SENKRONİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

Taha YÜKSEL

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

TEMMUZ 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**KENT İÇİ RAYLI SİSTEMLERDE GERÇEK AKTARMA SÜRELERİYLE
ZAMAN ÇİZELGESİNİN SENKRONİZASYONU**

DOKTORA TEZİ

**Taha YÜKSEL
(501172404)**

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK

TEMMUZ 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**SYNCHRONIZATION OF THE TIMETABLE WITH REAL TRANSFER
TIMES IN URBAN RAIL SYSTEMS**



Ph.D. THESIS

**Taha YÜKSEL
(501172404)**

Department of Civil Engineering

Transport Engineering Programme

Thesis Advisor: Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK

JULY 2024

İTÜ, Lisanüstü Eğitim Enstitüsü'nün 501172404 numaralı Doktora Öğrencisi Taha YÜKSEL, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “KENT İÇİ RAYLI SİSTEMLERDE GERÇEK AKTARMA SÜRELERİYLE ZAMAN ÇİZELGESİNİN SENKRONİZASYONU” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Hilmi Berk ÇELİKOĞLU**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM
Yıldız Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Şükrüye İYİNAM
İstanbul Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Hazal Yılmaz SÖNMEZ
Doğuş Üniversitesi

Teslim Tarihi : 21 Mayıs 2024
Savunma Tarihi : 09 Temmuz 2024





Eşime ve çocuklarıma,



ÖNSÖZ

Doktora eğitimim ve tez çalışmam süresince bana her türlü desteği veren, tecrübesi ve bilgisiyle tezime katkı sunan ve zorlukları aşmamda hızlı çözümler üreterek, her zaman yanımda olan tez danışmanım, kıymetli hocam Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK'e çok teşekkür ederim. Tez çalışmama, değerli yönlendirmeleriyle katkılar sunan tez izleme komitesi üyeleri, değerli hocalarım Prof. Dr. Hilmi Berk ÇELİKOĞLU ve Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Sinan YARDIM'a teşekkürlerimi sunarım. Tez kapsamında ihtiyaç duyduğum verilerin elde edilmesi konusundaki yardımlarından dolayı Metro İstanbul A.Ş.'ye ve TCDD'ye teşekkür ederim.

Tez çalışmamda bilgi ve tecrübelerini benimle paylaşarak yardımcı olan, M. Zikrullah AKÇAER'e, TCDD 1. Bölge Müdürlüğü çalışanlarına ve bugünlere gelmem de büyük emekleri olan annem, babam ve ağabeyime, desteklerini her an yanımda hissettiğim sevgili eşim ve kızlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2024

Taha YÜKSEL
(İnşaat Yüksek Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SEMBOLLER	xv
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xvii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xix
ÖZET.....	xxi
SUMMARY	xxv
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı	2
1.2 Tezin Önemi	6
2. LİTERATÜR TARAMASI	9
2.1 Raylı Sistemlerde Zaman Çizelgesinin Araştırılması Konusunda Yapılmış Çalışmalar.....	9
2.2 Raylı Sistemlerde Zaman Çizelgesinin Senkronizasyonu Konusunda Yapılmış Çalışmalar.....	13
2.2.1 Günün ilk saatinde tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmaları	16
2.2.2 Günün son saatinde tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmaları	19
2.3 Literatür Değerlendirmesi	27
3. TREN ZAMAN ÇİZELGESİ SENKRONİZASYONU.....	29
3.1 Tren Sefer Çizelgeleme Senkronizasyon Modeli	30
3.1.1 Amaç fonksiyonu ve değişkenler	30
3.1.2 Transfer süresi	32
3.1.3 Varsayımlar ve kabuller	33
3.2 Kullanılan Yöntemler	34
3.2.1 Matematiksel yöntemler.....	34
3.2.2 Sezgisel yöntemler	35
3.2.2.1 Genetik algoritma.....	35
3.2.2.2 Benzetimli tavlama.....	37
3.2.2.3 Parçacık sürü optimizasyonu.....	38
3.2.2.4 Yusufçuk algoritması	39
4. VERİLERİN ANALİZİ	41
4.1 Sefer Çizelgeleri	43
4.2 Yolcu Sayıları.....	46
4.3 Transfer Süreci	49
4.3.1 Peronda yürüme süresi	49
4.3.2 Turnike bölgesi yürüme süresi	50
4.3.3 Yürüyen merdiven yürüme süresi	50
4.3.4 Transfer süresinin belirlenmesi	50

4.3.4.1 Vagonların ortalama doluluk oranları	53
4.3.4.2 Yolcuların peronda yürüme süreleri	54
4.3.4.3 Yolcuların yürüyen merdivende yürüme süreleri.....	55
4.3.4.4 Yolcuların ortalama transfer süreleri.....	56
4.4 Transfer Süreleri.....	56
4.4.1 Varsayımlar ve kabuller	57
4.4.2 Sonuçlar.....	57
5. SEFER ÇİZELGELERİNİN SENKRONİZASYONU MODELİNİN UYGULANMASI	63
5.1 Günün İlk Saatinde Gerçek Transfer Süreleriyle Sefer Çizelgelerinin Senkronizasyonu	63
5.1.1 Mevcut sefer çizelgesine göre günün ilk saatinde transfer bilgileri.....	63
5.1.2 Senkronize sefer çizelgesine göre günün ilk saatinde transfer bilgileri	65
5.2 Günün Son Seferlerinde Gerçek Transfer Süreleriyle Sefer Çizelgelerinin Senkronizasyonu.....	70
5.2.1 Mevcut sefer çizelgesine göre son tren transfer bilgileri	71
5.2.2 Son tren transfer süresi	73
5.2.2.1 Parçacık sürüşü optimizasyonu algoritması ile transfer süresinin tahmini.....	73
5.2.2.2 Yusufçuk algoritması ile transfer süresinin tahmini	74
5.2.2.3 Benzetimli tavlama algoritması ile transfer süresinin tahmini	75
5.2.2.4 Sonuçların karşılaştırılması	75
5.2.3 Son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu	76
5.3 Günlük Sefer Çizelgesi Senkronizasyonu	79
6. SONUÇ	93
KAYNAKLAR.....	99
ÖZGEÇMİŞ	109

KISALTMALAR

BT	: Benzetimli Tavlama
GA	: Genetik Algoritma
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
YSA	: Yapay Sinir Ağları





SEMBOLLER

W	: Yolcuların bekleme süresi
s	: Transfer istasyonu
l	: Kent içi raylı sistem hattı
N	: Transfer olan yolcu sayısı
t^w	: Transfer olan yolcunun bekleme süresi
t^d	: Trenin transfer istasyonundan kalkış zamanı
t^a	: Trenin transfer istasyonuna varış zamanı
t^{tr}	: Yolcunun transfer süresi
t^{dw}	: Trenin istasyonlarda bekleme süresi
β	: Yolcuların transfer durumlarını gösteren katsayı
f_v	: Uygunluk değeri
p_i	: Seçilme olasılığı
q_i	: Kümülatif olasılık
v	: Amaç değeri
P	: Çözüm olasılığı
Δ	: Yeni çözüm ile eski çözüm farkı
V_{ij}	: Parçacığın ilk hızı
w	: Atalet ağırlık değeri
$rand_1, rand_2$	: Rastgele oluşturulmuş sayılar
c_1, c_2	: Öğrenme katsayıları
X_{ij}	: Parçacığın ilk konumu
P_{ij}	: Yerel en iyi konumu
G_{ij}	: Sürünün en iyi konumu
∇X	: Yusufçuk algoritmasında sürüdeki bireyin hızı
X	: Yusufçuk algoritmasında sürüdeki bireyin pozisyonu
s	: Ayrışma katsayısı
a	: Hizalama katsayısı
c	: Kaynaşma katsayısı
f	: Besin faktörü
e	: Düşman faktörü

w	: Atalet katsayısı
t	: İterasyon sayısı
TS	: Transfer süresi
PS	: İnilen ya da binilen vagon ile yürüyen merdiven arasındaki yürüme süresi
YMS	: Yürüyen merdivende geçen süre
YAS	: Yürüme alanında geçen süre



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Raylı sistemler sefer çizelgeleri senkronizasyonu çalışmaları.	15
Çizelge 2.2 : Günün ilk saatinde tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu.	
çalışmaları.	19
Çizelge 2.3 : Son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmaları.	26
Çizelge 2.4 : Örnek sefer çizelgeleri.	33
Çizelge 4.1 : Örnek hatların zaman dilimlerine göre sefer sayıları.	43
Çizelge 4.2 : Örnek hatların günün ilk saatinde sefer çizelgeleri.	44
Çizelge 4.3 : Örnek hatların sefer çizelgeleri.	45
Çizelge 4.4 : Örnek hatların günün son saatinde sefer çizelgeleri.	46
Çizelge 4.5 : Örnek hatlara transfer istasyonlarında transfer olan yolcuların örnek hatların toplam kentiçi raylı sistem transfer yolcu sayısına oranları.	48
Çizelge 4.6 : M2 hattında zaman dilimlerine göre yapılan ölçüm sayıları.	53
Çizelge 4.7 : Yolcuların Marmaray yürüyen merdiven arası yürüme süreleri.	55
Çizelge 4.8 : Yolcuların yürüyen merdiven metro arası yürüme süreleri.	55
Çizelge 4.9 : Yolcuların yürüyen merdivende geçirdikleri süreler.	56
Çizelge 4.10 : Yolcuların ortalama transfer süreleri.	56
Çizelge 4.11 : Örnek hatlar arasındaki transfer süreleri.	62
Çizelge 5.1 : Günün ilk saatinde transfer yolcuların bekleme süreleri.	64
Çizelge 5.2 : GA modelinde kullanılan parametrelerin bilgileri.	66
Çizelge 5.3 : GA kullanılarak günün ilk saati için oluşturulan sefer çizelgesi ve yolcuların bekleme süreleri.	67
Çizelge 5.4 : BT modelinde kullanılan parametrelerin bilgileri.	68
Çizelge 5.5 : BT kullanılarak günün ilk saati için oluşturulan sefer çizelgesi ve yolcuların bekleme süreleri.	69
Çizelge 5.6 : Algoritmaların karşılaştırılması.	70
Çizelge 5.7 : Algoritmaların transfer sürelerine göre karşılaştırılması.	70
Çizelge 5.8 : Örnek hatların son sefer bilgileri ve normal hızlara göre yolcuların transfer durumu.	72
Çizelge 5.9 : Yolcuların transfer süreleri.	73
Çizelge 5.10 : Son tren yolcuların transfer süreleri.	75
Çizelge 5.11 : Ortalama ve en yüksek transfer sürelerinin karşılaştırılmalı gösterimi.	76
Çizelge 5.12 : Örnek hatlarda normal transfer hızlarına göre yolcuların son trene transfer durumları.	77
Çizelge 5.13 : Örnek hatlarda son tren transfer hızlarına göre yolcuların son trene transfer durumları.	78
Çizelge 5.14 : Örnek hatlarda son tren transfer hızlarına göre yolcuların son trene transfer durumları.	79

Çizelge 5.15 : M1A mevcut ve güncellenen sefer çizelgesi.	81
Çizelge 5.16 : M1B mevcut ve güncellenen sefer çizelgesi.	83
Çizelge 5.17 : M2 mevcut ve güncellenen sefer çizelgesi.	85
Çizelge 5.18 : M4 mevcut ve güncellenen sefer çizelgesi.	87
Çizelge 5.19 : M5 mevcut ve güncellenen sefer çizelgesi.	89
Çizelge 5.20 : Transfer yolcuların ortalama bekleme sürelerinin karşılaştırılması. ..	91



ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 3.1 : Tezde yapılan çalışmaların şematik özeti.....	29
Şekil 3.2 : Transfer sürecinin şematik gösterimi.	30
Şekil 3.3 : Genetik algoritma adımları.....	36
Şekil 4.1 : Örnek hatların şematik gösterimi.	41
Şekil 4.2 : Marmaray ve Metro İstanbul hatlarında günlük ortalama taşınan yolcu sayısı.....	47
Şekil 4.3 : Marmaray ve Metro İstanbul hatlarında son üç yıla ait günlük ortalama taşınan yolcu sayıları.....	48
Şekil 4.4 : Transfer süresi hesabı.....	51
Şekil 4.5 : Yolcuların transfer süreçleri.	52
Şekil 4.6 : M2 hattında vagonlardaki ortalama yolcu sayıları.	53
Şekil 4.7 : M2 hattında vagonlardaki ortalama doluluk oranları.	54
Şekil 4.8 : Marmaray – M1A arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.	58
Şekil 4.9 : Marmaray - M1B arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.	58
Şekil 4.10 : Marmaray – M2 arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.	59
Şekil 4.11 : M2 – M1A arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.....	60
Şekil 4.12 : M2 – M1B arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.....	60
Şekil 4.13 : Marmaray – M4 arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.	61
Şekil 4.14 : Marmaray – M5 arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.	62
Şekil 5.1 : GA günün ilk saati kromozom vektörü.	66
Şekil 5.2 : Son tren sefer çizelgelerinin düzenlenmesine ait akış şeması.....	71
Şekil 5.3 : GA günlük sefer çizelgesi kromozom vektörü.	80
Şekil 5.4 : M1A-Marmaray transfer yolcularının ortalama bekleme süreleri.	82
Şekil 5.5 : M1B-Marmaray transfer yolcularının ortalama bekleme süreleri.....	84
Şekil 5.6 : M2-Marmaray transfer yolcularının ortalama bekleme süreleri.	86
Şekil 5.7 : M4-Marmaray transfer yolcularının ortalama bekleme süreleri.	88
Şekil 5.8 : M5-Marmaray transfer yolcularının ortalama bekleme süreleri.	90



KENT İÇİ RAYLI SİSTEMLERDE GERÇEK AKTARMA SÜRELERİYLE ZAMAN ÇİZELGESİNİN SENKRONİZASYONU

ÖZET

Kent içi toplu taşımalarda ve raylı sistemlerde entegrasyonun artmasıyla birlikte, kent içi raylı sistemi kullanan yolcuların aktarma sayıları artmıştır. Kent içi raylı sistemleri tercih eden yolcuların en önemli beklentileri arasında hız, dakiklik ve erişilebilirlik yer almaktadır. Bu nedenle, kent içi raylı sistem ağlarında farklı hatların zaman çizelgelerinin senkronize olması, transfer yolcularının bekleme ve seyahat süreleri açısından önemlidir. Bu tez çalışmasında; kent içi raylı sistemlerde sefer çizelgelerinin senkronizasyonunu iyileştirme konusunda araştırma yapılmıştır. Tez kapsamında; kent içi raylı sistem ağları arasında transfer olmak isteyen yolcuların, transfer bekleme sürelerini azaltmak ve başarılı transfer yolcu sayısını artırmak amacıyla, sefer çizelgeleri arasında senkronizasyonu sağlayacak modeller geliştirilmiştir. Kent içi raylı sistemler genellikle 24 saat işletilmediği için, günün ilk ve son saatindeki sefer çizelgelerinin senkronizasyonu ayrı bir öneme sahiptir. Bu yüzden, sefer çizelgelerinin senkronizasyonu probleminin çözümüne; günlük sefer çizelgesinin yanında, günün ilk ve son seferleri için de çalışma yapılmıştır. Sefer çizelgeleri arasında senkronizasyonu artıracak modeller sezgisel algoritmalar yardımıyla geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde; genetik algoritma (GA), benzetimli tavlama (BT), parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ve yusufluk algoritmaları kullanılmıştır. Ayrıca, son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda matematiksel programlama kullanılarak, son tren başarılı transfer yolcu sayısını artırmak amacıyla sefer çizelgelerinde düzenleme yapılmıştır.

Sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda, transfer olacak yolcunun bekleme süresini etkileyecek karar değişkenleri, trenlerin istasyona geliş, istasyondan kalkış ve yolcunun transfer süresidir. Transfer süresi, yolcuların fiziksel özellikleri ve yolcuların vagon içindeki, platformdaki ve aktarma sürecindeki davranış ve tercihleri gibi birçok koşuldaki etkilenen ve her yolcu için farklılık gösterebilen bir zaman aralığıdır. Bu yüzden, transfer olan her yolcu için ortalama bir transfer süresi değeri olarak ve istasyon yoğunluğunu düşünmeden her zaman dilimi için aynı transfer süresini kabul ederek geliştirilen model ile bulunan sefer çizelgelerinin, pratikte istediği karşılığı alamayacağı görülmektedir. Bu kapsamda, geliştirilen sefer çizelgeleri modelini test etmek ve model için gerekli transfer sürelerini toplamak için, Marmaray ve Marmaray ile entegre olan Metro İstanbul hatlarından, M1A Yenikapı – Atatürk Havalimanı ve M1B Yenikapı – Kirazlı hafif metro hatları ile M2 Yenikapı – Hacıosman, M4 Kadıköy – Sabiha Gökçen Havalimanı ve M5 Üsküdar - Samandıra metro hatları seçilmiştir.

Farklı işletmeler tarafından çalıştırılan Marmaray ve Metro İstanbul hatları, İstanbul toplu taşımasının önemli aktarma merkezlerinden olan Yenikapı, Üsküdar ve Ayrılıkçeşme istasyonlarında birbiriyle entegre olmaktadır. Marmaray ile entegre olan metro hatları yolcu sayısının ve transfer yolcu sayısının en fazla olduğu hatların

başında gelmektedir. Hatların sefer çizelgelerinin senkronizasyonuna baktığımızda ise; özellikle sefer aralıklarının fazla olduğu saatlerde, yolcuların transfer için bekleme sürelerinin fazla olduğu ve günün ilk ve son saatlerinde hatların sefer çizelgeleri arasında uyum olmadığı tespit edilmiştir. Yolcuların transfer sürelerinin hesaplanabilmesi için, Ocak – Haziran 2022 tarihleri arasında, örnek hatlar arasında transfer olan yolcuların, transfer süreçleri kamera kaydı ile incelenmiştir. Yolcuların ortalama transfer süreleri hesaplanmış, transfer sürelerinin dağılımı ve diğer istatistiki bilgiler ortaya konulmuştur.

Son trene yetişmek isteyen yolcuların normalden daha hızlı hareket ettikleri ve birbirlerinden etkilenerek sürü psikolojisi ile davrandıkları kanaati, yolcuların transfer gözlemlerinde elde edilen önemli tespitlerden olmuştur. Bu tespiti doğrulamak için yapılan ölçümlerde, son trene yetişmek isteyen yolcuların ortalama transfer sürelerinin normal zamanlardan daha düşük olduğu ölçülmüştür. Her transfer istasyonunda bu ölçümü yapmamak ve normal transfer sürelerinden son tren transfer süresini elde edebilmek amacıyla, yolcuların normal zamanlardaki ortalama transfer sürelerinden son tren transfer süreleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu tahmin sürecinin oluşmasında, yolcuların son trene yetişmek için sürü psikolojisi ile hareketleri ve birbirlerine benzemek istemeleri gözlemleri de etkili olmuştur. Son trene transfer olmak isteyen yolcuların transfer süreleri PSO, BT ve yusufçuk algoritmaları ile, normal zamanlardaki transfer sürelerinden tahmin edilmeye çalışılmıştır. Son trene transfer olmak isteyen her yolcu, algoritmadaki bir bireyi temsil etmiş ve her üç algoritma 50 kez çalıştırılarak, sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlara göre; %96 ile %99 arasında değişen yakınlık ile, en iyi tahminler PSO ile geliştirilen model ile elde edilmiştir.

Elde edilen transfer süreleri ile, günün ilk saati, son seferler ve günlük sefer çizelgeleri olmak üzere üç farklı çalışma yapılmıştır. Günün ilk saatlerinde transfer olan yolcuların bekleme sürelerini düşürmek amacıyla oluşturulan model, GA ve BT algoritması kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller, örnek olarak incelenen hatlar üzerinde test edilmiştir. Günün ilk seferleri için, toplam 33 transferde, transfer olan 450 yolcunun toplam ortalama bekleme süreleri GA ile geliştirilen model ile %33, BT ile geliştirilen model ile %6 azalmıştır. Ayrıca, GA ile geliştirilen modelde yolcuların transfer sürelerinin dağılımlarının dikkate alınmadan, her yolcu için aynı transfer süresi kullanılması halinde, yolcu başına düşen ortalama bekleme süresi 14 saniye, yolcuların toplam bekleme süresi ise 76 dakika daha fazla olmaktadır.

Günün son seferlerini düşünerek, başarılı transfer yolcularının sayısını artırmak için, PSO algoritması ile tahmin edilen transfer zamanını kullanarak, transfer olmak isteyen bütün yolcuların transfer olmasını sağlayacak şekilde, yolcuların bekleme süresinin en az olacağı son tren zaman çizelgesi senkronizasyonu yapılmıştır. Mevcut sefer çizelgesine göre, 33 transferde, 1250 son tren transfer yolcusunun 772 tanesi transfer olabilmektedir. PSO ile tahmin edilen son tren transfer süresine göre düzenlenen sefer çizelgeleri sayesinde, başarılı transfer sayısı %38 artmış ve transfer olan yolcuların ortalama bekleme süreleri ise %73 azalmıştır. Ayrıca, tahmin edilen son tren transfer süreleri yerine ortalama transfer süreleri kullanılarak, bütün yolcuların transfer olacağı şekilde sefer çizelgeleri düzenlenmiş olması halinde, transfer olan yolcuların ortalama bekleme sürelerinin 124 saniye daha fazla olacağı tespiti yapılmıştır. Bu sonuç da, sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmalarında, ortalama transfer süreleri yerine gerçek transfer verilerinin kullanılmasının önemini bir kez daha ortaya koymuştur.

Günün ilk saati ve son seferleri özelinde yapılan çalışmalardan sonra, kent içi raylı sistemlerin işletildiği 06:00-24:00 saatleri arasında örnek hatlar arasında transfer olan yolcuların bekleme sürelerini azaltmak amacıyla, oluşturulan model sezgisel algoritmardan GA ile geliştirilerek sefer çizelgeleri düzenlenmiştir. Oluşturulan yeni sefer çizelgesi ile, transfer olan yolcuların ortalama bekleme sürelerinde %41 ile %61 oranında azalma meydana gelmiştir.

Kent içi raylı sistemlerde sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmasıyla, sefer çizelgelerinin senkronizasyonlarında, gerçek transfer sürelerinin kullanılması ve günün değişen zamanlarına göre transfer süreçlerindeki değişimin, senkronizasyon çalışmasına yansıtılmasının gereklilikleri vurgulanmaya çalışılmıştır. Ayrıca, son tren transfer sürelerinin normal zamanlardaki transfer sürelerinden farklı olduğunun tespiti ve son tren sefer çizelgelerinde kullanılan transfer sürelerinin sezgisel algoritmalar ile tahmin edilmesinin, tezin diğer önemli sonuçları olduğu, değerlendirilmektedir. Sonuç olarak, transfer süreçlerini dahil ederek, gerçek transfer verileri ile, sezgisel algoritmalar ile geliştirdiğimiz modeller sayesinde, kent içi raylı sistemlerin sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda başarılı sonuçlar elde edilmiştir.



SYNCHRONIZATION OF THE TIMETABLE WITH REAL TRANSFER TIMES IN URBAN RAIL SYSTEMS

SUMMARY

Urban rail systems have an important place in public transport with their speed, capacity, comfort and integration. Metro networks, which are becoming more widespread especially in big cities, are integrated with both urban rail systems and other urban transport modes. With the integration, the number of transfers of passengers using urban rail systems has increased. Speed, punctuality and accessibility are among the most important expectations of passengers who prefer urban rail systems. Therefore, synchronization of the timetables of different lines in urban rail networks is important in terms of waiting and travel times of transfer passengers. In this thesis, the synchronization of timetables in urban rail systems is investigated. Within the scope of the thesis; models that will ensure synchronization between timetables have been developed in order to reduce the transfer waiting times of passengers who want to transfer between urban rail system networks and to increase the number of successful transfer passengers. Since urban rail systems are generally not operated 24 hours a day, the synchronization of the timetables at the first and last hours of the day is of particular importance. Therefore, in addition to the daily timetable, the first and last timetables of the day were also studied to solve the synchronization problem. Models to increase the synchronization between timetables have been developed with the help of heuristic algorithms. Genetic algorithm (GA), simulated annealing (SA), particle swarm optimisation (PSO) and dragonfly algorithms were used in the developed models.

Within the scope of the thesis, firstly, the sample lines where the developed models will be tested were investigated in detail. In these investigations; daily journey times, journey time intervals, timetables of the lines and their compatibility with each other were analysed. The number of passengers carried by the lines (daily/hourly) and the information of the passengers transferring at the transfer stations were evaluated. Following these studies, the transfer time calculation, which is one of the important parameters in the synchronization of timetables, was studied. In the synchronization of timetables, the decision variables that will affect the waiting time of the passenger to be transferred are the arrival and departure of the trains to and from the station and the transfer time of the passenger. The transfer time is affected by many conditions such as the physical characteristics of the passengers and the behaviour and preferences of the passengers in the carriage, on the platform and in the transfer process and may vary for each passenger. Therefore, it is seen that the timetables found with the model developed by taking an average transfer time value for each transfer passenger and assuming the same transfer time for each time period without considering the station density cannot get the desired response in practice. In this context, M1A Yenikapı - Atatürk Airport and M1B Yenikapı - Kirazlı light metro lines, M2 Yenikapı - Hacıosman, M4 Kadıköy - Sabiha Gökçen Airport and M5 Üsküdar - Samandıra metro lines were selected from Marmaray and Metro Istanbul

lines integrated with Marmaray to test the developed timetable model and to collect the transfer times required for the model.

Marmaray and Metro Istanbul lines, which are operated by different companies, are integrated with each other at Yenikapı, Üsküdar and Ayrılıkçeşme stations, which are important transfer centres of Istanbul public transport. The metro lines integrated with Marmaray are among the lines with the highest number of passengers and transfer passengers. When we look at the synchronization of the timetables of the lines; it is determined that the waiting time of the passengers for transfer is high, especially in the hours when the intervals are high and there is no coordination between the timetables of the lines in the first and last hours of the day. In order to calculate the transfer times of the passengers, the transfer processes of the passengers who transferred between the sample lines between January - June 2022 were examined by camera recording. As a result of the observations made for the calculation of the transfer times of the passengers, the transfer processes of the passengers were divided into three parts. These are: time spent on the platform, time spent on the escalator and time spent in the turnstile area. Since it is important in the calculation of the time spent on the platform which wagon the passengers get off and which wagon they get on, this situation was observed in Marmaray-M2 line. Transfer times were calculated by determining the occupancy rates of the wagons, determining the passengers standing and moving on the escalators, and determining the speed of the passengers in the turnstile area. The transfer times of all sample lines in our study were given with normal distribution graphs and average transfer times were calculated. In addition, the distributions of transfer times were shown with normal distribution graphs and average, maximum and minimum speeds and other statistical information were presented.

The belief that passengers who want to catch the last train move faster than normal and behave with herd psychology by being influenced by each other has been one of the important findings obtained from the transfer observations of the passengers. In the measurements made to verify this finding, it was measured that the average transfer times of the passengers who wanted to catch the last train were lower than normal times. In order not to make this measurement at every transfer station and to obtain the last train transfer time from the normal transfer times, the last train transfer times were tried to be estimated from the average transfer times of the passengers at normal times. This estimation process was also influenced by the observations that passengers behaved with herd psychology and wanted to be similar to each other in order to catch the last train. The transfer times of the passengers who want to transfer to the last train were estimated from the transfer times in normal times with PSO, SA and dragonfly algorithms. Each passenger who wanted to transfer to the last train represented an individual in the algorithm and the results were obtained by running all three algorithms 50 times. According to the results, the best predictions were obtained with the model developed with PSO, with an accuracy ranging between 96% and 99%.

With the transfer times obtained, three different studies were carried out: first time of the day, last trips and daily timetables. In order to reduce the waiting times of passengers transferring at the first hours of the day, the model was developed using GA and BT algorithm. Transfer times of passengers were calculated from the data obtained as a result of observations. Passenger numbers and timetables were obtained from Metro Istanbul between January 2022 and April 2024. The developed models were tested on our sample lines. For the first trips of the day, the total waiting time of 450 transfer passengers was found to be 2134 minutes in 33 transfers, 21 at Yenikapı

Station, 7 at Ayrılıkçeşme Station and 5 at Üsküdar Station. The total waiting time of the passengers decreased to 1250 minutes according to the timetable generated with the model developed with GA and 1882 minutes with the model developed with SA. For the 450 transfer passengers, the total waiting time decreased by 41% with GA and 12% with BT. While the average waiting time of the transfer passengers was normally 268 seconds, it was found to be 178 seconds with a 33% decrease with the model developed with GA and 252 seconds with a 6% decrease with the model developed with SA. In addition, if the distribution of the transfer times of the passengers is not taken into account in the model developed with GA, the average waiting time per passenger is 14 seconds more and the total waiting time of the passengers is 76 minutes more.

In the rest of the study, the last train timetables are synchronized by considering the transfer times. Considering that urban rail systems are generally operated until 24:00, passengers who cannot catch the last train have little or no public transport alternatives. Therefore, to increase the number of passengers travelling by transferring between rail systems, especially in the last hours of the day, it is important to arrange timetables between lines in integrated urban rail systems in order to increase the number of successful transfer passengers. In this study, to increase the number of successful transfer passengers considering the last departures of the day, using the transfer time obtained with the PSO algorithm, the waiting time of the passengers is minimised by synchronizing the last train time timetable so that all passengers who want to transfer are transferred. According to the current timetable, 772 of 1250 last train transfer passengers can transfer in 33 transfers at Yenikapı, Üsküdar and Ayrılıkçeşmesi stations. With the synchronization of the timetables according to the last train transfer time estimated by PSO, the number of successful transfers increased by 38% and the average waiting time of the transfer passengers decreased by 73%. In addition, if the timetables had been organised in such a way that all passengers would be transferred by using the average transfer times instead of the estimated last train transfer times, the average waiting time of the transferred passengers would have been 124 seconds. This result once again shows the importance of using actual transfer data instead of average transfer times in the synchronization of timetables.

Following the studies on the first and last timetables of the day, a model has been developed to synchronize the daily timetables in urban rail systems. In order to reduce the waiting time of transfer passengers, the model developed with GA, one of the heuristic algorithms, was used to optimise the timetables and synchronization between the timetables was tried to be achieved. The reason for choosing GA from heuristic algorithms is that it has given successful results in previous studies conducted within the scope of the thesis. Urban rail systems are generally operated between 06:00 and 24:00. The developed model was tested on our sample lines Marmaray-M1A and M1B, Marmaray-M2, Marmaray-M4 and Marmaray-M5 between 06:00-24:00. The new timetable reduced the average waiting time of transfer passengers by 41% to 61% compared to the existing timetable.

With the study of synchronization of timetables in urban rail systems, it was tried to emphasise the necessity of using real transfer times in the synchronization of timetables and reflecting the changes in transfer processes according to the changing times of the day in the synchronization study. Considering that all passengers transfer at the same speed prevented finding realistic results since the transfer process was a passenger specific situation. Furthermore, the fact that the last train transfer times were different from the normal transfer times and that the transfer times used in the last train

timetables were estimated by heuristic algorithms contribute to the studies on this subject. As a result, successful results were been obtained in the synchronization of the timetables of urban rail systems thanks to the models developed with heuristic algorithms by including transfer processes.



1. GİRİŞ

Taşıt ve yolcu hareketliliğinin fazla olduğu yerlerde, trafik sıkışıklığı, çevre ve hava kirliliği, yüksek enerji kaybı, işgücü ve zaman kaybı gibi önemli problemler oluşmaktadır [1]. Yolcu ve sürücüler üzerindeki fiziksel ve psikolojik etkiler gibi birçok sorunu bebaberinde getiren ulaştırma kaynaklı bu olumsuz durumları azaltmak, sürdürülebilir bir ulaşım ağı oluşturmak için toplu taşıma sistemleri ve özellikle raylı sistemler büyük önem arz etmektedir [2]. Son yıllarda raylı sistemlerde kullanılan teknolojinin artmasıyla birlikte, gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde raylı sistemlerin ulaştırmadaki önemi artmakta, taşımacılıktaki payı da yükselmektedir [1]. Şehirler arası ulaşımında yüksek hızlı ve hızlı tren, şehir içi ulaşımında da metro, hafif metro, banliyö gibi raylı sistem projeleri hızla hayata geçirilmekte ve yolcular tarafından da ciddi miktarda talep görmektedir [3]. Kent içi raylı sistemler, yüksek taşıma kapasitesi, karayolu trafiğine karışmaması, güvenilirliği, enerji verimliliği ile, özellikle büyük şehirlerde, şehir içi ulaşım problemini çözmede ve ulaştırma kaynaklı şehir kirliliğini azaltmada en önemli çözüm haline gelmiştir [4]. Birbiriyle entegre olmuş, aktarma istasyonlarının olduğu, gelişmiş bir şehir içi raylı sistem ağı, yolcuların ve ürünlerin taşınmasında göstermiş olduğu performansla, şehrin sosyal ve ekonomik olarak gelişmesine büyük oranda katkı sunmaktadır. Pekin, Tokyo, Paris, New York şehirleri sahip oldukları kent içi raylı sistemler ile bu durumun güzel örneklerindendir [5].

Kent içi raylı sistemler, hızlı, konforlu, dakik ve erişilebilir olması ile ulaşım probleminin çözümünde anahtar rol üstlenmektedir [6]. Raylı sistemlerin bir diğer tercih sebebi ve en önemli performans ölçütlerinden biri de, “European ON-TIME” projesinde anlatıldığı gibi zaman çizelgesinin güvenilirliğidir. Sefer çizelgesinin istikrarı, sefer süreleri, yolcuların tren bekleme ve trene binebilme sürelerinin değişmemesi ya da tolere edilebilir düzeyde değişmesi ve sefer çizelgelerinin birbirleriyle uyumu, raylı sistemlerin önemli performans ölçütlerini oluşturan bileşenlerdir [7]. Özellikle bazı büyük şehirler geniş, kendi içinde ve diğer ulaşım türleri ile entegrasyonu yüksek kent içi raylı sistem ağına sahiptir. Bazı yolcular ulaşacakları yerlere bir ya da daha fazla aktarma yaparak ulaştıkları için transfer

istasyonlarında aktarma yapacakları hattın peronda bekleme süresinin düşük olmasını isterler [8, 9]. Ulaşım aracını bekleme süresinin, toplu taşıma seçiminde önemli bir parametre olduğu düşünüldüğünde, entegre hatların sefer çizelgelerinin uyumlarının önemi ortaya çıkmaktadır [10]. Aktarma istasyonlarında, transfer yolcularının bekleme süreleri yolcuların seyahat süresini etkilemektedir. Dolayısıyla, kent içi raylı sistemlerin sefer çizelgelerinin birbirleriyle senkronize olması, yolcuların transfer istasyonlarındaki bekleme sürelerinin ve toplam seyahat sürelerinin azalmasını sağlamaktadır [9].

1.1 Tezin Amacı ve Kapsamı

Yolculara entegre ve kesintisiz kent içi raylı sistem hizmetlerini sağlamak için yapılacak planlamaları üçe ayırabiliriz. Bu planlamalar; stratejik, taktik ve operasyonel planlamalardır. Stratejik düzeyde planlamayı, altyapı planlaması ve ağ tasarımı olarak ikiye ayırabiliriz. Toplu taşıma işletmecileri ağdaki aktarma sayısını azaltabilir, aktarmaları kolaylaştırmak için aktarma merkezlerinin düzenini optimize edebilir ve rotalar arası veya türler arası hizmet bağlantısını artırmak için ödeme yöntemlerini entegre edebilir. Operasyonel düzeyde, iyileştirilmiş araç ve demiryolu aracı planlaması, araç bekletme, durak atlama ve araçların yeniden planlanması gibi gerçek zamanlı izleme ve kontrol önlemlerinin yanı sıra çevrimiçi seyahat bilgisi sağlayarak, yolcuların transferlerini kolaylaştıracak planlamalar yapılabilir. Taktik düzeyde ise, işletmeciler yolcuların transfer bekleme sürelerini azaltmak için sefer çizelgelerini optimize edebilir. Tez kapsamında ise, kent içi raylı sistem transfer senkronizasyonunu iyileştirmek için taktik düzeyde zaman çizelgesi senkronizasyon çalışması yapılmıştır.

Bu tez çalışmasının amacı, kent içi raylı sistem ağında, birbirleriyle entegre olan farklı raylı sistemlerin sefer çizelgelerinin uygun senkronizasyonunun araştırılmasıdır. Tez kapsamında, entegre hatlar için, sabah saatlerinde ilk tren sefer çizelgelerinin, gece saatlerinde son tren sefer çizelgelerinin ve günlük sefer çizelgelerinin senkronizasyonları şeklinde üç farklı zaman diliminde sefer çizelgelerinin araştırılması ve birbirleriyle uyumlarının geliştirilmesi incelenmiştir. Yapılan çalışmalarda yolcuların transfer süreçleri de dikkate alınmıştır. Sefer çizelgelerinin senkronizasyonları çalışmalarında günlük hayattaki olaylara daha uygun yaklaşımlar sunan sezgisel algoritmalar, genetik algoritmalar (GA), parçacık sürü optimizasyonu (PSO), benzetimli tavlama (BT), yusufçuk algoritması ve

matematiksel programlama kullanılmıştır. Sefer çizelgelerinin senkronizasyonu ve yolcuların transfer süreçleriyle ilgili geliştirilen modeller, Marmaray ve Marmaray ile entegre olan Metro İstanbul'un M1A (Yenikapı-Atatürk Havalimanı), M1B (Yenikapı- Kirazlı) hafif metroları ve M2 (Yenikapı-Hacıosman) metrosu ile, M4 (Kadıköy - Sabiha Gökçen Havalimanı) ve M5 (Üsküdar – Samandıra) metro hatları arasında test edilmiştir.

Tez kapsamında, öncelikle geliştirilen modellerin test edileceği örnek hatların detaylı araştırılması yapılmıştır. Bu araştırmalarda; günlük sefer süreleri, sefer süresi aralıkları, hatların sefer çizelgeleri ve birbirleriyle uyumları incelenmiştir. Hatlarla taşınan yolcu sayıları (günlük/saatlik), aktarma istasyonlarında aktarma yapan yolcuların bilgileri değerlendirilmiştir. Bu çalışmaların ardından, sefer çizelgelerinin senkronizasyonundaki önemli parametrelerden olan transfer süresi hesabı için yolcuların transfer süreçleri Ocak 2022 ile Haziran 2022 tarihleri arasında yapılan 50 gözlem ile incelenmiştir. Yolcuların transfer süreleri hesabında, yolcuların perondaki hareketleri, trene binmek için hangi kapıya yöneldikleri, vagonlardaki ortalama doluluk oranları vb. hususlar da istatistiki olarak incelenmiştir.

Kent içi raylı sistemler genellikle 06:00-24:00 saatleri arasında işletilirken, gece saatleri ise, hat ve araç bakımı için ayrılır. Özellikle büyük şehirlerde günün ilk ve son seferlerinde bile azımsanmayacak kadar yolcu seyahat etmektedir. Günün ilk sefer saatinde sefer aralıkları fazla olduğu için, senkronize olmayan kent içi raylı sistemlerde yolcular transfer istasyonlarında uzun süre bekleyebilirler. Günün son sefer saati için ise, son tren bazı yolcuların ulaşacakları adrese gidebilmeleri için toplu taşıma aracı olarak son şansları olabilir. Bu sebeplerden ötürü kent içi raylı sistemlerde ilk ve son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu son yıllarda ilgi çeken konular olmaktadır. Bu nedenle, tez kapsamında kent içi raylı sistemlerin sefer çizelgelerinin senkronizasyonunun yanında ilk tren ve son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu için de çalışmalar yapılmıştır.

İstanbul'daki kent içi raylı sistemler genellikle geceleri çalışmaz ve ilk seferleri yaklaşık olarak sabah saat 06:00'da olur. Normalde sabahın ilk saatlerinde toplu taşıma araçlarını kullanan yolcu sayısı düşüktür. Ancak İstanbul gibi büyük şehirlerde sabahın ilk saatlerinde seyahat eden birçok insan bulunmaktadır. Bazı iş yerlerinde çalışma saatinin erken başlaması, yolcuların seyahat sürelerinin fazla olmasından dolayı evlerinden erken saatlerde yola çıkmaları ya da şehirler arası seyahat edecek yolcuların

sabahın erken saatlerinde havaalanı, otogar, tren garı gibi ulaşım yerlerine gitmek istemeleri, vb. sebeplerden dolayı, kent içi raylı sistem kullanan yolcular günün ilk trenini kullanmak ve mümkün olduğunca hızlı bir şekilde gidecekleri yere ulaşmak isterler. Bunun için kent içi raylı sistemleri kullanan ve farklı kent içi raylı sistemler arasında aktarma yapan yolcular için aktarma istasyonlarında ilk treni bekleme süresi önemlidir. Sabahın erken saatlerinde sefer aralıkları günün diğer saatlerine göre daha fazla olduğu için, sefer çizelgeleri arasında koordinasyonun olmadığı hatlar arasında aktarma yapmak isteyen yolcuların ilk seferlerde bekleme süreleri daha uzun olabilir. İlk tren sefer çizelgesi senkronizasyonu ile ilgili geliştirdiğimiz modelin amacı literatürdeki diğer benzer çalışmalarda olduğu gibi transfer yolcuların bekleme sürelerini düşürmektir. Fakat, literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak yolcuların transfer süreleri ile ilgili gözlemler yapılmıştır. Yolcuların transfer süreleri Ocak 2022 ile Haziran 2022 arasında Yenikapı, Üsküdar ve Ayrılıkçeşme transfer istasyonlarında yapılan kamera kayıtlarından hesaplanmıştır. Yolcu sayıları ve sefer çizelgeleri ise, Ocak 2022 ile Nisan 2024 arasında Metro İstanbul A.Ş'den elde edilmiştir. Tez kapsamında ilk tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu ile ilgili yapılan çalışmada, transfer olan yolcuların transfer süreleri literatürdeki gibi 2 ya da 3 dakika almak yerine, ölçümü yapılarak, her yolcu için transfer süresi hesaplanmıştır. Bu şekilde yolcuların transfer süreleri ile ilgili istatistiki bilgiler elde edilmiş ve sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda gerçek transfer verileri kullanılarak, daha gerçekçi sonuçlar elde edilmiştir. Sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda sezgisel algoritmalarından GA ve BT kullanılmış ve yolcuların bekleme sürelerinde önemli miktarda azalma sağlanmıştır.

Çalışmanın devamında ise, son tren sefer çizelgelerinin transfer süreleri düşünülerek senkronize edilmektedir. Kent içi raylı sistemlerin genelde saat 24:00'e kadar işletildiği düşünüldüğünde, son trene yetişemeyen yolcuların, toplu taşıma alternatifleri ya çok az olmakta ya da olmamaktadır. Bu yüzden özellikle günün son saatlerinde raylı sistemler arasında aktarma yaparak seyahat eden yolcular için, son tren başarılı transfer yolcu sayısını artırabilmek adına, entegre kent içi raylı sistemlerde hatlar arası sefer çizelgelerinin düzenlenmesi önemlidir. Literatürde, entegre hatlarda son tren tarifelerinin senkronizasyonunda başarılı transfer yolcu sayılarını artırabilmek için, genellikle sezgisel algoritmalarından faydalanılarak tren tarifelerinin optimizasyonunun yapıldığı, görülmektedir. Bu çalışmalarda, transfer süresi genellikle

ortalama bir değer olarak alınmakta, ayrıca, son trene yetişmek isteyen yolcuların transfer sürelerinin değişimini ile ilgili bir çalışma bulunmamaktadır. Bu kapsamda tezde yapılan çalışmanın öncelikli ve en önemli amacı; son trene transfer olan yolcuların transfer sürelerinin normal transfer sürelerinden farklı olduğunu ve son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda normal transfer süresi yerine son tren transfer süresinin kullanılması gerekliliğini ortaya koymaktır. Bu amaçla, Yenikapı transfer istasyonunda M1 ve M2 metro hatları ile Marmaray hattı için, yolcuların transfer sürelerini hesaplayabilmek adına veri toplama çalışması yapılmıştır. Normal zamanlarda ve son tren zamanında transfer süreleri ölçümü yapılmıştır. Elde edilen iki farklı duruma karşılık gelen transfer süreleri karşılaştırıldığında, son trene transfer olmak isteyen yolcuların genelde daha hızlı oldukları ve ortalama transfer sürelerinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, yolcuların trene yetişebilmek amacıyla birbirlerinden etkilenerek, sürü psikolojisi ile hareket ettikleri gözlemlenmiştir. Her transfer istasyonunda bu ölçümü yapmamak ve normal transfer sürelerinden son tren transfer süresini elde edebilmek amacıyla, transfer süreleri arasındaki farkı en iyi hangi algoritma ile bulabileceğimizi tespit etmek için, sezgisel algoritmalarından PSO, Yusufçuk ve BT algoritmaları seçilmiştir. Standart transfer sürelerinin PSO algoritması ile hızlandırılmasıyla elde edilen sonuçlar, son tren transfer süreleri için ölçülen gerçek sonuçlara oldukça yakın sonuçlar vermiştir. Daha sonra örnek hatların sefer izelgeleri, PSO ile elde edilen transfer süreleri de kullanılarak bütün yolcuların transfer olması sağlanacak şekilde düzenlenmiştir. Sonuçta transfer olan yolcu sayıları artmış ve transfer olan yolcuların bekleme süreleri azalmıştır. Ayrıca çalışmanın, literatürdeki diğer çalışmalardan farkını ortaya koymak adına, standart transfer süreleri kullanılarak da sefer izelgesi düzenlenmiş ve her iki durum için oluşan sonuçların karşılaştırılması yapılmıştır.

Tez kapsamında, ilk tren ve son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu haricinde bir de İstanbul ili için birbiriyle entegre olan kent içi raylı sistemlerde yolcuların transfer bekleme sürelerini azaltmak amacıyla sefer çizelgelerinin senkronizasyonu yapılmıştır. Günlük yaklaşık 2 milyon yolcunun kullandığı Marmaray ve onunla entegre olan M1, M2, M4 ve M5 hatlarının sefer çizelgelerinin senkronizasyonu sezgisel algoritmalar yardımıyla optimize edilmiştir.

1.2 Tezin Önemi

Ampirik çalışmalar, hizmetler arasında aktarmanın, kullanıcıların hizmetten memnuniyeti ve rota seçim kararları üzerinde ciddi olumsuz etkiye sahip olduğunu göstermektedir [11, 12]. Transferlerin yolculuk deneyimi üzerindeki olumsuz etkisini azaltmaya yönelik en önemli çalışma, yolcuların transfer bekleme sürelerinin azaltılmasıdır [13]. Özellikle büyük şehirlerde kent içi raylı sistemlerin yaygınlaşmasıyla ve entegrasyonun artmasıyla birlikte; raylı sistem ağının birbiriyle daha entegre olması konusunda çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Ayrıca, kent içi raylı sistemlerin 24 saat işletilmemesi nedeniyle günün ilk ve son saatleri için de sefer çizelgelerinin senkronizasyonu popüler bir çalışma alanı olmuştur. Bu yüzden, tez kapsamında hem günlük, hem de ilk ve son sefer çizelgelerinin senkronizasyonu konularında çalışma yapılmıştır. Tez kapsamında yapılan çalışmalarımızın literatüre en önemli katkısı, transfer olan yolcuların transfer süreçlerini daha gerçekçi bir şekilde değerlendirerek, sefer çizelgelerinin senkronizasyonuna dahil edilmesidir. Literatür taramasında da görüleceği üzere, kent içi raylı sistemlerde sefer çizelgelerinin optimizasyonu/sekronizasyonu ile ilgili yapılmış çalışmalarda, yolcuların transfer süreleri yaklaşık bir değer olarak alınmıştır. Ayrıca yolcuların transfer süreçlerindeki davranışları da dikkate alınmamıştır. Sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda trenlerin istasyona geliş ve istasyonlardan kalkış saatlerinin yanında bir diğer karar değişkeni de yolcuların transfer süreleridir. Dolayısıyla yolcuların transfer sürelerini yaklaşık bir değer olarak kabul etmek, yapılacak çalışmayı gerçeklikten uzaklaştırabilmektedir. Bu kapsamda, geliştirilen modelleri test ettiğimiz transfer istasyonlarında, hatlar arasında aktarma yapan yolcuların transfer sürelerini tespit etmek amacıyla ölçümler yapılarak gerçek değerlere ulaşılmaya çalışılmıştır. Ayrıca, son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu için yapılan çalışmada, yolcuların son trene yetişebilmek psikolojisi ile normalden daha hızlı hareket ettiği gözlemlenmiştir. Yolcuların bu transfer sürelerini normal transfer sürelerinden elde etmek adına sezgisel algoritmalar kullanılmıştır. Yolcuların normal zamandaki transfer süreleri PSO, BT ve Yusufçuk algoritmaları ile güncellenmiş ve son tren transfer süresine en yakın sonucu PSO vermiştir. Çıkan bu sonuç, son trene yetişmek isteyen yolcuların birbirlerinden görerek ve etkilenecek sürü psikolojisi ile daha hızlı hareket ettikleri gözlemimizi doğrulamıştır. Bunun yanı sıra çalışmada, Marmaray (banliyö) ve Metro İstanbul A.Ş.

hatlarında, yani farklı kuruluşlar tarafından işletilen farklı tip kent içi raylı sistemler arasında test yapılmıştır.

Bu tez çalışmasıyla, İstanbul’da yoğun olarak kullanılan Marmaray ve entegre metro hatlarının en uygun sefer çizelgeleri elde edilmiş olacaktır. Bu durum raylı sistemlerin en önemli tercih sebeplerinden olan seyahat ve bekleme sürelerinin kısılmasına ve raylı sistem dakikliğinin artmasında etkili olacaktır. Bu durumunun, İstanbul’da kent içi raylı sisteme olan talebin artmasına neden olacağı öngörüldüğünde, dolaylı olarak kent içi trafik sıkışıklığının ve ulaştırma kaynaklı problemlerin de azalmasına katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Tezin gerçekleşmesiyle elde edilen sonuçların, TCDD ve Metro İstanbul A.Ş. başta olmak üzere, demiryolu kurum ve kuruluşları, raylı sistem kullanıcıları ve bu konuda araştırma yapan kişilere önemli katkılar sunacağı düşünülmektedir.



2. LİTERATÜR TARAMASI

Literatür bölümü; raylı sistemlerde zaman çizelgesi ile ilgili ve entegre hatların zaman çizelgesi senkronizasyonu ile ilgili olmak üzere 2 ana bölümden ve literatür değerlendirmesinden oluşmaktadır. Entegre hatlarda zaman çizelgesi senkronizasyonu ile ilgili çalışmalar günlük, ilk tren ve son tren olmak üzere 3 alt bölümden oluşmuştur.

2.1 Raylı Sistemlerde Zaman Çizelgesinin Araştırılması Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Literatürde; özellikle raylı sistemlerin gelişmesi ve yaygınlaşmasıyla birlikte yapılmış olan birçok tren çizelgeleme çalışmaları bulunmaktadır. İncelenen çalışmaların özeti aşağıdadır.

Peeters ve Kroon (2001) yaptıkları çalışmada, doğrusal olmayan tamsayılı programlama yaparak; raylı sistem kullanan yolcuların seyahat sürelerini düşürmeyi ve geçerliliği yüksek bir tren çizelgeleme yapmayı hedeflemişlerdir [14].

Shafia ve Jamili (2002) yaptıkları çalışmada, tren çizelgesinin, pratikte ne kadar tutarlı olduğunu araştırmış ve çizelgenin daha sağlam, bir başka ifade ile planlanan çizelgeye daha uygun tren çizelgelerinin oluşması için 2 metod geliştirmiştir. Geliştirdikleri bu metodları bir örnek üzerinde denemişler ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [15].

Chang ve Chung (2005), istasyonlardaki yolcu yoğunluklarının tren seferlerinde gecikmeye neden olabileceğini belirterek, yeniden sefer çizelgeleme yapılmasının gerekliliğini açıklamıştır. GA kullanarak yapılan sefer çizelgesi optimizasyonunda, yolcuların bekleme sürelerini azaltan sonuçlar elde edilmiştir [16].

Yolcuların bakış açısından, tren sefer çizelgelerinin gecikme yönetimini yapmaya çalışan Kanai ve diğ. (2011), çalışmalarında hem yolcuların akışı ve davranışlarının

simulasyonunu hem de sefer çizelgesi optimizasyonunu yapmışlardır. Sefer çizelgesi optimizasyonunda tabu araması algoritması kullanmışlardır [17].

Goverde ve Hansen (2013) yaptıkları çalışmada, demiryolu sefer çizelgelerinin performans ölçütleri hakkında bilgi vermişlerdir. Raylı sistemlerde sefer çizelgesinin performansının, raylı sistemlerin diğer ulaştırma sistemleri ile rekabet etmesindeki önemi vurgulanmıştır. Çalışmada; performans ölçütü olarak, sefer çizelgesinin gerçekliği, istikrarı ve sağlamlığı gibi ölçütler belirlenmiş ve bu ölçütler detaylı olarak açıklanmıştır [7].

Niu ve Zhou (2013), yolcu yoğunluğunun fazla olduğu kent içi demiryolu hattı için yolcuların peronda bekleme sürelerini düşürmeyi amaçlamışlardır. GA kullanılarak geliştirilen modeli, Guangzhou metrosunda denemişler ve yolcuların binebilecekleri trenin ortalama bekleme süresinde %40 azalma elde etmişlerdir [18].

Sato ve diğ. (2013), çalışmasında, yolcu davranışlarına ve yolcuların beklemeden duydukları rahatsızlığa değer verilerek karışık tamsayı programlama ile yolcuların bekleme sürelerini azaltmaya çalışan bir çözüm geliştirilmiştir [19].

Andersson ve diğ. (2015), doğrusal olmayan tamsayılı programlama kullanarak tren sefer çizelgelerinin optimizasyonunu yapmışlardır. Geliştirdikleri model, Malmö ve Stockholm arasındaki banliyö hattına uygulanmış ve son trendeki gecikmenin %28 oranında azaldığı görülmüştür [20].

Khoshniyat ve Peterson (2015), tren aralıkları düşürülerek, daha tutarlı bir sefer çizelgesi oluşturmaya çalışmışlardır. İsveç'te yapılan bu çalışmada; pik ve diğer saatlerde ölçümler yapılmış ve gecikmeler hesaplanmıştır. Tren sefer aralıkları daha az tutularak, doğrusal olmayan tamsayı programlama metodu ile geliştirilen çalışmada, toplam gecikmelerin azalacağı tespit edilmiştir [21].

Sels ve diğ. (2016), raylı sistem yolcularının toplam seyahat süresinin düşürülmesini hedeflemiştir. Doğrusal olmayan tamsayılı programlama kullanan yazarlar, Belçika'daki örnek hat üzerinde geliştirdikleri modeli uygulamışlar ve toplam seyahat süresinin %3,8 azaldığını tespit etmişlerdir [22].

Wang ve diğ. (2016) en uygun tren rotalama ve sefer çizelgesi oluşturma konusunda yazmış oldukları kitapta, tren sefer çizelgemesi ile ilgili tanımlar detaylı olarak incelenmiştir. Yolcu karakteristikleri, yolcu araç etkileşimi, yolcuların perondaki dağılımları gibi konularda da bilgilendirme yapılmıştır. Ayrıca matematiksel ve sezgisel çözüm yollarından bahsedilen kitapta, örnek çalışmalarla çözüm yöntemleri karşılaştırılmıştır [23].

Besinovic'in (2017) yazmış olduğu doktora tezi; yoğun demiryolu hatlarında hem kapasite hem de sefer çizelgelemenin bir arada olduğu bir çalışmadır. Tez; geniş demiryolu ağı için kapasite hesabı, demiryolu sefer çizelgelerinin performans ölçütü ve analizleri, tren sefer çizelgelerinin dakiklik ve sağlamlığı, enerji verimli tren sefer çizelgeleri, trenlerin dinamik hız simülasyonları gibi konularda yapılmış 7 adet yayından oluşmaktadır. Yapılan çalışmalar daha çok şehirler arası demiryolu hatları için yapılmış olup, örnek hatlar Hollanda'dan seçilmiştir. Doğrusal olmayan tamsayılı programlama ve sezgisel algoritmalar ile optimizasyon yapılmıştır [24].

Toletti (2018) yazmış olduğu doktora tezinde, gerçek zamanlı yeniden tren sefer çizelgeleme ve yolcu bilgilendirme konularını araştırmıştır. Geliştirmiş olduğu sezgisel ve metasezgisel algoritmaları, pik saatlerde farklı gecikme senaryolarına göre İsviçre'deki örnek hat üzerinde uygulamış ve hızlı çözümler üreterek, gerçek zamanlı tren sefer çizelgeleri oluşturmuştur [25].

Duan (2018) yazmış olduğu doktora tezinde; son yıllarda demiryolunda artan yolcu sayılarına dikkat çekerek, tren sayısını artırmadan, yolcu talebini karşılayacak şekilde tren sefer çizelgelerinin iyileştirmesine yönelik optimizasyon yapmıştır [26].

Palmqvist (2019) yazmış olduğu doktora tezinde, daha çok trenlerin gecikmeleri üzerinde durmuştur. Raylı sistemlerin tercih edilmesindeki önemli etkenlerden olan dakiklik konusu ayrıntılı olarak incelenmiştir. İsveç'te bu konuda araştırma yapan Palmqvist, raylı sistem kullanan yolcular ile anket yapmıştır. Tren sefer süreleri, gecikme süreleri ve bekleme süreleri gibi parametreleri yolcuların değerlendirmesine sunan yazar, bu konuda kapsamlı bir çalışma yapmıştır. Trenlerin gecikmiş kabul edilme sürelerinin ülkeden ülkeye değiştiğinin belirtildiği tezde, kimi ülkelerde bu sürenin 3, kimi ülkelerde 5 dakika olmasına rağmen, bazı yolcularda bu sürenin dakika değil, saniye ile ifade edildiği belirtilmektedir. Trenlerin çok büyük bir kısmının 1 ya

da 2 dakika geciktiği belirtilen çalışmada, farklı sefer aralıkları, bekleme ve gecikme sürelerine göre örnekler üzerinde incelemeler yapılmıştır. İstatiksel çalışmalarla desteklenen tezde, Stockholm ve Tokya’da trenlerin %96-97 civarında 5 dakikadan daha az gecikmeler yaşadığı belirtilmiş ve bu gecikmelerin Stockholm için %91’i, Tokyo için %88’inin istasyonlardaki gecikmelerden kaynaklandığı belirtilmiştir [27].

Bu çalışmaların haricinde, ülkemizde bu konu ile ilgili yazılan aşağıda kısa özetleri verilen 3 tane doktora tezi incelenmiştir.

Dündar (2009) doktora tezinde, tek hatlı bir demiryolu hattında tren gecikmelerini minimuma indirecek yeniden çizelgeleme yapmak adına modeller geliştirmiştir. Genetik algoritmalar hakkında detaylı bilgiler veren Dündar, genetik algoritma, yapay sinir ağı (YSA) ve genetik algoritmanın başarısını artırmak adına geliştirdiği melez modelleri örnek hat ve değişken tren sayıları ile çalıştırmıştır. Geliştirdiği melez modeli ve genetik algoritma ile yaptığı modeli karşılaştıran yazar, melez modelin başarı artışında kayda değer bir farklılık olmadığını tespit etmiştir. Ankara-İstanbul hattında, 18 istasyonu bulunan tek hatlı Arifiye-Çukurhisar kısmı için, Ankara yönünden İstanbul yönüne giden 9, İstanbul yönünden Ankara yönüne giden de 8 adet tren çalıştırarak, geliştirdiği modelleri deneyen yazar, genetik algoritma kullanarak yaptığı model ile trenlerin toplam gecikmesini 67,33 dakika, YSA kullanarak yaptığı model ile trenlerin toplam gecikmesini 120,37 dakika bulmuştur [28].

Yalçinkaya (2010) doktora tezinde tren çizelgeleme problemi üzerine araştırma yapmıştır. GA ve geliştirdiği melez algoritma ile oluşturduğu model ile seyahat sürelerini de minimize etmek amacıyla yeniden çizelgeleme yapmıştır [29].

Aydın (2015) doktora tezinde, tek hatlı bir demiryolu hattında, planlanan sefer çizelgesine göre herhangi bir gecikme olduğunda, sefer çizelgesinin bu durumdan etkilenmemesi için, kısa sürede yeniden sefer çizelgelemesi yapacak sezgisel bir algoritma geliştirmiştir. Ankara-İstanbul hattında, 18 istasyonu bulunan tek hatlı Arifiye-Çukurhisar kısmı için olası gecikme senaryolarına göre sezgisel algoritma kullanılarak yeniden çizelgeleme yapılmış ve 3 dakikanın altında sonuç elde edilmiştir [30].

2.2 Raylı Sistemlerde Zaman Çizelgesinin Senkronizasyonu Konusunda Yapılmış Çalışmalar

Raylı sistemlerde zaman çizelgelerinin senkronizasyonu konusu ile ilgili incelenen çalışmaların özeti aşağıda belirtilmiştir.

Nachtigal ve Voget (1996) yaptıkları çalışmada, demiryolu ağında yolcuların bekleme sürelerini düşürecek çözümler aramıştır. Açgözlü algoritma ile desteklenerek geliştirilen GA, Almanya'daki örnek hat üzerinde denenmiş ve yaklaşık 2 dakika süren çözüm ile toplam bekleme süresinin %7 oranında düşeceği belirtilmiştir. Dallanma ve sınır metodu ile daha iyi sonuçlar elde edilmesine karşın çözüm süresinin 11 saat sürdüğü ve uygulanmasının zor olacağı ifade edilmiştir [31].

Goverde (1998) yaptığı araştırmada, raylı sistem yolcularının transfer sürelerini sabit olarak, aktarma yapacak yolcuların bekleme sürelerini düşürecek metodlar geliştirmiştir [32].

Friedrich (2001), otobüs ve tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu ile ilgili bir çalışma yapmıştır. Aktarmaların olduğu otobüs ve tren sefer çizelgelerinin optimizasyonunu dallanma ve sınırlandırma yaklaşımı ile yapmış ve yolcuların bekleme sürelerini azaltmıştır [33].

Wong ve Leung (2004), aktarma istasyonlarında yolcuların bekleme sürelerini düşürmek için optimizasyon yapmışlardır. Doğrusal olmayan tam sayılı programlama ile geliştirdikleri modelde çözümün uzun sürmesi sebebiyle, modeldeki bazı değişkenleri sezgisel değerlendirmişlerdir. Hong Kong'taki 12 metro hattı ve 10 aktarma istasyonunda sabah 08.00 – 09.00 saatleri arasında 154 tren ile yapılan çalışmada, yolcuların toplam bekleme süresinde %72 oranında azalma tespit edilmiştir [34].

Kang ve diğ. (2014), farklı sefer çizelgelerine sahip ve aktarma yapabilen hatları kullanan yolcuların son trene yetişme oranlarının artırılmasını amaçlamıştır. Pekin metro hattı için BT algoritması kullanılarak yapılan çalışmada, son treni kaçıran yolcularda azalma olduğu tespit edilmiştir [35].

Kang ve Zhu (2015), farklı sefer çizelgelerine sahip entegre hatları kullanan yolcuların, aktarma istasyonlarında ilk treni bekleme sürelerini düşürmek için model geliştirmişlerdir. BT algoritmasından yararlanan yazarlar, geliştirdikleri modeli Pekin

metro hattında denemişler ve yolcuların ilk treni toplam bekleme sürelerinin 705,1 dakikadan 567,2 dakikaya düştüğünü belirtmişlerdir [36].

Guo ve diğ. (2016), metro ağında, entegre iki hat arasında transfer senkronizasyonunu artırmak adına sezgisel algoritmalarından faydalanmıştır. PSO ve BT algoritmaları kullanarak geliştirdikleri modeli Pekin metro hattında denemişlerdir. Sabah 09.00 ve 09.40 saatleri arasında hareket eden trenlerin aktarma istasyonlarındaki bekleme zamanları da katılarak hesaplanan seyahat sürelerinde, yapılan optimizasyonla birlikte %10-20 arasında azalma meydana gelmiştir [37].

Wang ve diğ. (2018), İsveç'teki örnek banliyö hattı üzerinde yolcuların transfer süreçleri konusunda incelemeler ve analizler yapmışlardır. Çalışmada, mevcut durum tespit edilmiş ve entegre hatlarda sefer çizelgesi optimizasyonun gerekliliğine vurgu yapılmıştır [38].

Tian ve Niu (2018), yüksek hızlı hatlardaki transfer senkronizasyonunu iyileştirmek için yaptıkları çalışmada, sezgisel algoritmalarından yararlanmışlardır. Pekin-Guangzhou arasındaki yüksek hızlı hatlarda çalışmalarını denemişler ve toplam bekleme sürelerinde kayda değer bir azalış tespit etmişlerdir [39].

Zhou ve diğ. (2019), bir metro ağında farklı sefer çizelgelerine sahip hatların, aktarma istasyonlarına son trenlerin geliş ve gidiş saatleri ve transit yolcuların aktarma yapacakları trene yetişebilme durumlarını incelemişlerdir. Entegre hatların, aktarma istasyonunda yolcuların, transfer yapacakları hattaki son trene ulaşma oranlarını artırmak için kullanılan dallanma ve sınırlandırma metodu yaklaşımı ile yolcuların aktarma istasyonundaki son trene yetişebilme oranları %4-8 arasında artış göstermiştir [40].

Abdolmelaki ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, yolcuların aktarma bekleme sürelerini düşürmek için, sezgisel algoritma çeşidi olan yerel arama algoritmasından faydalanmışlardır [41].

Kent içi raylı sistem yolcuların bekleme sürelerini düşürmek için yapılan bir diğer çalışmada, yolcuların turnikelerden geçme zamanlarına göre tren eşleştirmeleri yapılmıştır. Markov Zinciri Monte Carlo – Genetik BT algoritmasının kullanıldığı çalışma Pekin metrosunda test edilmiş ve yolcuların toplam bekleme zamanında %15.5 azalma olduğu görülmüştür [42].

Metro yolcularının toplam bekleme sürelerini düşürmek için sefer çizelgelerinin senkronizasyonu ile birlikte, “dur-atla” stratejisinin de uygulandığı çalışmada, yolcu yoğunluğuna göre bazı istasyonların pas geçilmesi düşünülmüştür. Sezgisel algoritmalarından GA kullanılan model, Tahran metrosunda gerçek veriler ile denenmiş ve yolcuların ortalama bekleme süresinin pik zamanlarda %32 düştüğü, belirtilmiştir [43].

Yin ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada, tren tarifelerinin senkronizasyonu için geliştirdikleri modelin iki temel amacı vardır. Bunlardan ilki yolcuların toplam bekleme sürelerini azaltmak, ikincisi ise yolcuların transfer rahatlığını değerlendirmek için önerdikleri parçalı doğrusal formülasyonlu bir senkronizasyon kalite göstergesidir. Çalışmalarında, oluşturdukları yeni zaman çizelgesinin yolcuların ortalama bekleme süresini %1,5 oranında azalttığını ve Pekin metrosunun bağlantı kalitesini %14,8 oranında artırdığını ifade etmişlerdir [44].

Yolcuların bekleme ve transfer sürelerini azaltma ile birlikte enerji verimliliğinin de düşünüldüğü çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, hem rejeneratif frenleme enerjisinden daha fazla yararlanmayı sağlayacak hem de yolcuların transfer sürelerini azaltacak sefer çizelgeleri oluşturulmaya çalışılmıştır [4, 45].

Raylı sistemlerde sefer çizelgeleri ve senkronizasyonu ile ilgili incelenen literatür çalışmalarından, yolcuların perondaki bekleme ve seyahat sürelerini azaltmaya yönelik olan çalışmalar, Çizelge 2.1’de özet halinde sunulmuştur. Çizelge 2.1’de çalışmaların amacı, çalışmalarda kullanılan çözüm algoritmaları ve transfer sürelerinin nasıl kullanıldığı belirtilmiştir.

Çizelge 2.1 : Raylı sistemler sefer çizelgeleri senkronizasyonu çalışmaları.

Çalışma	Amaç	Çözüm algoritması	Transfer süresi
Nachtigal ve Voget (1996)	Bekleme sürelerini düşürmek	GA	Sabit ve/veya ortalama
Goverde (1998)	Bekleme sürelerini düşürmek	Max-plus gecikme yayılımı	Sabit ve/veya ortalama
Friedrich 2001	Bekleme sürelerini düşürmek	Dal-sınır	Sabit ve/veya ortalama
Wong ve Leung (2004)	Bekleme sürelerini düşürmek	Karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama	Sabit ve/veya ortalama
Chang ve Chung (2005)	Bekleme sürelerini düşürmek	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama

Çizelge 2.1 (devam): Raylı sistemler sefer çizelgeleri senkronizasyonu çalışmaları.

Çalışma	Amaç	Çözüm algoritması	Transfer süresi
Niu ve Zhou (2013)	Bekleme sürelerini düşürmek	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Sato ve diğ. (2013)	Bekleme sürelerini düşürmek	Karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama	Sabit ve/veya ortalama
Sels ve diğ. (2016)	Seyahat süresini düşürmek	Karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama	Sabit ve/veya ortalama
Guo ve diğ. (2016)	Seyahat süresini düşürmek	Parçacık sürü, benzetimli tavlama	Sabit ve/veya ortalama
Wang ve diğ. (2018)	Tespit	Analiz	
Tian ve Niu (2018)	Bekleme sürelerini düşürmek	Sezgisel algoritmalar	Sabit ve/veya ortalama
Abdolmelaki ve diğ. (2020)	Bekleme sürelerini düşürmek	Sezgisel algoritmalar	Sabit ve/veya ortalama
Huang ve diğ. (2021)	Bekleme sürelerini düşürmek	Genetik benzetimli tavlama	Sabit ve/veya ortalama
Naeini ve diğ. (2022)	Bekleme sürelerini düşürmek	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Yin ve diğ. (2023)	Bekleme sürelerini düşürmek, entegrasyon kalitesini artırmak	Karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama	Sabit ve/veya ortalama
Mo ve diğ. (2019)	Bekleme sürelerini düşürmek, enerji verimliliğini artırmak	Sezgisel algoritmalar	Sabit ve/veya ortalama
Sun ve diğ. (2023)	Bekleme sürelerini düşürmek, enerji verimliliğini artırmak	Karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama	Sabit ve/veya ortalama

2.2.1 Günün ilk saatinde tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmaları

İncelenen tren sefer çizelgeleri çalışmalarına ek olarak, bu bölümde ilk tren tarifelerinin senkronizasyonu ile ilgili yapılmış çalışmalar da dikkate alınmıştır. Çalışmaların hepsinde ortak amaç, yolcuların ilk tren bekleme süresini düşürmek olmuştur. Literatürde bu konuyla ilgili yapılmış bütün çalışmalar incelenmiş ve aşağıdaki özet bilgiler çıkarılmıştır.

Zhou ve diğ. (2013) yaptıkları çalışmada, yolcuların hem ilk hem de son treni bekleme sürelerini azaltmayı amaçlamışlardır. Sezgisel algoritmalarından GA kullanarak, geliştirdikleri model ile ilk tren sefer çizelgeleri senkronize ederek, yolcuların bekleme sürelerini azaltmışlardır. [46]

Kang ve Zhu (2016), farklı sefer çizelgelerine sahip entegre hatları kullanan yolcuların, aktarma istasyonlarında ilk treni bekleme sürelerini düşürmek için model geliştirmişlerdir. BT algoritmasından yararlanan yazarlar, geliştirdikleri modeli Pekin

metro hattında denemişler ve yolcuların ilk treni toplam bekleme sürelerinin 705,1 dakikadan 567,2 dakikaya düştüğünü belirtmişlerdir [36].

Aktarma yapan raylı sistem yolcularının, aktarma istasyonunda ilk treni bekleme sürelerinin azaltılmasına yönelik yapılan bir diğer sefer çizelgesi düzenlemesi çalışmasında, Kang ve diğ. (2016), sezgisel yaklaşımlarla optimizasyonlarını geliştirmişlerdir. Geliştirilen modeli, yine Pekin metro hattında denemişler ve yolcuların ilk treni toplam bekleme sürelerinin 1605 dakikadan 345 dakikaya düştüğünü tespit etmişlerdir [47].

Guo ve diğ. (2016), karma tamsayılı doğrusal programlama, ve sezgisel algoritmalar kullanarak geliştirdikleri model ile yolcuların ilk treni bekleme sürelerini düşürmeyi amaçlamışlardır. Ayrıca hatların ve istasyonların önem derecelerini ifade eden değerler hesaplayarak, sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda bu değerleri kullanmışlardır [48].

Li ve diğ. (2019), yolcuların algılanan transfer kalitesini değerlendirmek için transfer bekleme süresinin maliyet fonksiyonunu formüle etmişlerdir. Transfer yolcularının taleplerini dikkate alarak, transfer yolcularının toplam bekleme maliyetini en aza indirmek için bir ilk tren zaman çizelgesi koordinasyon modeli önermişlerdir. Bu modelde, yolcuların algılanan transfer kalitesi maksimize edilirken, yolcuların bekleme olasılığı da minimize edilmeye çalışılmıştır. Modeli çözmek için GA uygulanmıştır. Vaka çalışmasının sonuçlarına göre, ilk tren transfer yolcularının toplam bekleme maliyeti, %49,67 oranında azaltılmıştır [49].

Kent içi raylı sistemlerin yanında otobüsler için de ilk sefer senkronizasyonunun yapıldığı çalışmada, geliştirilen model için GA kullanılmıştır. Sefer çizelgeleri optimizasyonunun sonuçları Pekin metro ağında test edilmiş ve bu durum da GA'nın büyük boyutlu ağ zaman çizelgeleme problemini çözmek için uygulanabileceğini göstermektedir. Çalışma, Pekin metrosundan ilk otobüse ve Pekin metro ağında trenler arasındaki aktarmalar olmak üzere iki bölümde incelenmiştir. Önerilen modelin kullanılmasıyla, otobüs sistemindeki toplam bağlantı süresi %13 oranında azalırken, metro sistemindeki toplam bağlantı süresi Pekin metro ağında %35 oranında azaltılmıştır [50].

Li ve diğ. (2020) yaptıkları çalışmada, yolcuların aktarma bekleme süresi memnuniyetini en üst düzeye çıkarmak amacıyla, kent içi raylı ulaşım ağları için ilk

tren tarifelerini optimize etmek için yeni bir model önermişlerdir. Aktarma bekleme süresi ve yolcu memnuniyeti arasındaki ilişkiyi kurmak için, yolcuların beklentileri, toleransları ve "kaçırma" konusundaki memnuniyetsizlikleri göz önünde bulundurularak bir fonksiyon formüle etmişlerdir. Sefer çizelgeleme senkronizasyonu için yapay arı kolonisi algoritması geliştirilmiştir. Geliştirdikleri modeli Şanghay metro ağı için ilk tren seferlerine uygulayarak, yeni oluşturdukları çizelge ile; memnun olan yolcu sayısında, tolere edilebilir bekleme süresinde, yolcuların ortalama ve toplam transfer bekleme sürelerinde iyileştirme sağlamışlardır [51].

Kang ve diğ. (2021), büyük metro ağlarında ilk tren bağlantılarını ve senkronizasyonlarını iyileştirmek için ilk tren ve otobüs koordinasyonu sağlamak amacıyla çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında ilk tren zamanlama problemi için kullandıkları karma tamsayılı doğrusal olmayan programlama modelini yardımcı ikili değişkenleri ile geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri algoritmayı, Pekin metro ağına uygulamışlardır. Sonuçlar, ilk tren kalkış saatlerinin ayarlanması ve 7 güzergahta 27 köprüleme otobüsünün çalıştırılmasının birleşik etkisiyle toplam yolcu bekleme süresini %53,4 oranında azalttığını göstermiştir [52].

Yolcu talep koşulları altında metro ağlarında ilk tren zaman çizelgesi senkronizasyonunun incelendiği bir diğer çalışmada, yolculara ağıdaki seyahat rotalarının esnek bir şekilde seçilmesine izin verilmiştir. Baskın olmayan sıralı GA kullanılarak yapılan model ile yolcuların biniş ve varış yerlerine ve yolcu taleplerine göre ilk tren sefer çizelgesi düzenlenmiştir. Oluşturan yeni çizelgeye göre yolcuların toplam seyahat süreleri azalmıştır [53].

Chen ve diğ. (2023), yolcuların ilk treni bekleme sürelerini düşürmeyi amaçlamışlardır. İlk tren zaman çizelgesi senkronizasyonu modeli bir karma tamsayılı programlama problemi olarak formüle edilmiş ve Pekin metro ağında vaka çalışmasını yapabilmek için, bir genetik benzetimli tavlama algoritması geliştirilmiştir. Optimizasyondan sonra, Pekin metro ağı için toplam aktarma bekleme süresi ve uzun bekleme süreli aktarma yönlerinin sayısı önemli ölçüde azalmıştır. Diğer çalışmalardan farklı olarak, aralıklı tren işletmenin sabah erken saatlerde uzun bekleme süresi sorununu çözmek için etkili bir yol olabileceğini ifade etmişlerdir [54].

Yüksel ve Öztürk (2024), bu tez çalışmasından ürettikleri makalede, ortalama transfer süresine yerine gerçek transfer verileriyle, günün ilk saati için sezgisel algoritmalar ile

kent içi raylı sistemlerde sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmasını yapmışlardır. GA ile geliştirdikleri model ile transfer olan yolcuların bekleme sürelerinde 104 saniye azalma meydana gelmiştir [55].

Çizelge 2.2’de, günün ilk saatindeki trenlerin sefer çizelgeleri senkronizasyonu ile ilgili yapılan çalışmalar özet olarak sunulmuştur.

Çizelge 2.2 : Günün ilk saatinde tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmaları.

Çalışma	Amaç	Çözüm algoritması	Transfer süresi
Zhou ve diğ. (2013)	İlk treni bekleme sürelerini azaltmak.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Kang ve Zhu (2016)	İlk trene transfer olan yolcuların toplam bekleme sürelerini azaltmak.	Benzetimli tavlama	Sabit ve/veya ortalama
Kang ve diğ. (2016)	İlk treni bekleme sürelerini azaltmak.	Yerel arama algoritması, Karma tamsayı doğrusal olmayan programlama	Sabit ve/veya ortalama
Guo ve diğ. (2016)	Hatların ve istasyonların önem derecelerini ifade eden değer hesaplanarak, yolcuların ilk treni bekleme sürelerini düşürmek amaçlanmıştır.	Karma tamsayı doğrusal programlama, Sezgisel algoritmalar	Sabit ve/veya ortalama
Li ve diğ. (2019)	Yolcuların bekleme süreleri, bekleme maliyetini de düşünülerek azaltmaya çalışılmış.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Guo ve diğ. (2019)	Kentiçi raylı sistem ve otobüsler için ilk tren sefer senkronizasyonu yapılmış.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Li ve diğ. (2020)	Bekleme süresinden memnun olan ilk tren transfer yolcu sayısını artırmak.	Yapay arı kolonisi algoritması	Değişken
Kang ve diğ. (2021)	Büyük metro ağlarında ilk tren bağlantılarını ve senkronizasyonlarını iyileştirmek için ilk tren ve otobüs koordinasyonu sağlanmaya çalışılmış.	Karma tamsayı doğrusal programlama	Sabit ve/veya ortalama
Chai ve diğ. (2022)	Yolcuların biniş ve varış yerlerine ve yolcu taleplerine göre ilk tren sefer çizelgesi düzenlenmiş. Yolcuların toplam seyahat süreleri azaltılmış.	Baskın olmayan sıralı genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Chen ve diğ. (2023)	Yolcuların ilk treni bekleme sürelerini düşürmek	Genetik benzetimli tavlama algoritması	Sabit ve/veya ortalama

2.2.2 Günün son saatinde tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmaları

Günün son treni bazı yolcuların ulaşacakları adrese ulaşmalarında toplu taşıma aracı olarak son şansları olabilir. Bu yüzden literatürdeki son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmalarının iki önemli amacı bulunmaktadır. Bu amaçlar, transfer

olan yolcuların sayısını artırmak ve yolcuların transfer için bekleme sürelerini düşürmektir. Son tren sefer çizelgesi senkronizasyonu ile ilgili yapılmış çalışmalar incelenmiş olup, aşağıda özet halinde gösterilmiştir.

Zhou ve diğ. (2013), yolcuların hem ilk hem de son treni bekleme sürelerini azaltmayı amaçlamışlardır. Yolcuların başarılı bir şekilde son trene transfer olabilmeleri ve aynı zamanda bekleme sürelerini de düşürmeyi hedefleyen yazarlar, geliştirdikleri modelde sezgisel algoritmalarından GA kullanmışlardır. Trenlerin doluluk oranlarını da göz önünde bulundurarak, geliştirdikleri modeli Guangzhou Metrosu'nda denemişlerdir. Değişen doluluk oranlarına göre yolcuların ortalama bekleme sürelerindeki değişimi de ifade etmişlerdir [46].

Başarılı transfer sayısını artırmak ve yolcuların son treni bekleme sürelerini düşürmeyi amaçlayan bir diğer çalışmada hatların yolcu yoğunlukları da dikkate alınmıştır. Çok amaçlı model kullanılarak geliştirilen model ile önerilen yöntemin son tren için en uygun koordinasyon zaman çizelgesini sağlayabileceğini ve bunun da kentsel toplu taşıma ağının verimliliğini artırmaya yardımcı olduğu ifade edilmiştir [56].

Kang ve diğ. (2014) çalışmalarında, büyük metro ağları için son tren zaman çizelgesi senkronizasyon modeli geliştirmişlerdir. Çalışmada, entegre hatlar arasındaki son sefer çizelgesi koordinasyonu, yolcuların transfer olacakları treni kaçırmaması ve yeni kaçırmaması olarak iki durumda değerlendirilmiştir. Genetik BT algoritması kullanılarak geliştirilen model, Pekin metro hattına uygulanmış ve kaçırılan son tren sayısı 20'den 12'ye, yeni kaçırılan tren sayısı ise 6'dan 1'e düşürülerek, son tren entegrasyonu geliştirilmiştir [57].

Kang ve diğ. (2015) yaptıkları çalışmada, trenlerin gecikmelerini düşünerek son tren sefer çizelgesi yapmışlardır. Çalışmalarında hem trenlerin seyahat ve bekleme sürelerini düşürmek, hem de yolcuların transfer erişilebilirliğini artırarak, bekleme süresini düşürmeyi amaçlamışlardır. Pekin demiryolu toplu taşıma ağında yapılan örnek olay çalışması, bir bölümde bir gecikme meydana geldiğinde, zaman çizelgesini ayarlamanın en etkili yolunun trenlerin seyahat sürelerini ayarlamak olduğunu göstermiştir [35].

Bir diğer çalışmada, kartlı geçiş sistem verilerinden elde edilen gerçek yolcu akışı talebine dayalı olarak son biniş saatinde transfer yolcu sayısının maksimize edilmesi amaçlanmıştır. Optimize edilmiş senaryo ile son biniş saatinde 2000'den fazla ilave

yolcunun varış noktalarına ulaşabildiği gösterilmiştir. Şanghai metro ağına ilişkin vaka çalışmasında elde edilen başarılı sonuçlar, yöntemin gerçek hayattaki büyük ölçekli metro ağları için uygulanabileceğini göstermiştir [58].

Kent içi demiryolu toplu taşıma ağlarındaki stratejik açıdan son tren planlama sorununu ele alındığı çalışmada ise; son trene transfer olacak yolcuların bekleme sürelerinin standart sapmasını en aza indirmek ve metro ağlarındaki son tren transferlerini dengelemek amacıyla, son trenler için iki pratik optimizasyon modeli önerilmiştir. Önerilen model sezgisel algoritma ile geliştirilerek Pekin metro ağında 18 hat ve 31 transfer istasyonuna uygulanmış ve sonuçta son trenlerin seyahat sürelerinin yaklaşık %10 daha az olacağı tahmin edilmiştir [59].

Yang ve diğ. (2017) çalışmalarında, kent içi raylı sistemleri işletenlerin risk tercihlerini dikkate alarak model geliştirmişlerdir. Çalışmada, trenlerin işletme sürelerindeki, yani hızlarındaki farklılıklara göre son tren başarılı transfer yolcu sayılarındaki değişim ortaya konulmuştur. Geliştirdikleri modelde tabu arama algoritması kullanmışlar ve çalışmalarını Pekin metrosuna uygulamışlardır. Sonuçlar, Pekin metro ağındaki son trenlerin seyahat süreleri ile son tren başarılı transfer yolcu sayıları arasında zıt bir ilişki olduğu göstermiştir [60].

Kang ve diğ. (2017), çalışmalarında büyük ölçekli kent içi metro ağları için son tren sefer koordinasyonu problemini çözebilecek küresel bir optimizasyon yöntemi geliştirmeyi amaçlamaktadır. Bunu yapmak için, bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli formüle etmişlerdir. Ancak, gerçek hayat ve büyük ölçekli örnekler için, formüle edilen bu model ile çözüm üretilmeyeceği için, iki aşamalı ayrıştırma yöntemi önerilmiştir. Yönteminin verimliliğini ve uygulanabilirliğini değerlendirmek ve duyarlılık analizini gerçekleştirmek için Pekin metro ağından gerçek bir vaka çalışması yapılmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir [61].

Li ve diğ. (2019) çalışmalarında, taksi ve otobüs dahil olmak üzere toplu taşıma türlerinden gelen potansiyel yolcu talebini kullanarak son tren transferlerinin koordinasyonuna odaklanmışlardır. Çalışmalarında öncelikle son trenlerin yolcu taleplerini belirlemişler ve daha sonra bu talebi karşılayacak şekilde, son trenlere başarılı şekilde transfer olan yolcu sayılarını geliştirmek adına GA kullanarak model geliştirmişlerdir [62].

Diğer çalışmalardan farklı olarak, yolcuların yeniden yönlendirilmesini ve başlangıç noktalarından varış noktalarına giden yolların tüm sürecini dikkate alacak şekilde yapılan bir diğer çalışmanın büyük ağırları çözmede yararlı olacağı ifade edilmiştir. Büyük kent içi raylı sistem ağlarında son tren erişilebilirliğini hesaplamak üzere geliştirilen model, GA ile birlikte zaman çizelgesi tabanlı bir Dijkstra algoritması kullanılarak tasarlanmıştır. Önerilen model ve algoritma Shenzhen metro ağı üzerinde test edilmiştir. Optimize edilmiş son tren zaman çizelgesinin, ağ erişilebilirliğini geliştirdiği ve son trenler arasındaki transfer bağlantılarını artırdığı ifade edilmiştir [63].

Chen ve diğ. (2019), diğer çalışmalardan farklı olarak yolcuların değişken transfer sürelerini düşünmüşlerdir. Çalışmada, trenlerin işletim ve bekleme sürelerinin alt ve üst sınırları dahilinde değişmesine bağlı olarak, yolcuların son trene transfer olabilme durumlarının değişimleri gösterilmiştir. Önerilen bu modelde yolcuların transfer sürelerindeki farklılıklar dikkate alınmıştır. Geliştirilen modellerde dal-sınır algoritması ile doğrudan çözülebilen doğrusal kısıtlamalara sahip karma tamsayılı ikinci dereceden programlama kullanılmıştır [64].

Kent içi raylı sistem son tren sefer çizelgeleri ile ilgili yapılan bir diğer çalışma yolcu talep analizidir. Bu çalışmada, son trenlerin potansiyel yolcu talebi için veriye dayalı bir tahmin yöntemi önerilmiştir. Coğrafi bilgiler aracılığıyla, taksi ve otobüs dahil olmak üzere harici trafik verileri, son tren döneminde başlangıç-bitiş noktası yolcu akışını eşleştirmek için detaylı analiz edilmiştir. Daha sonra, hedef istasyonların tüm aktarma yönleri için potansiyel yolcu akışını tahmin etmek üzere, taksi ve otobüs için bir çözüm geliştirilmiştir. Tahmin edilen potansiyel yolcu akışı ile metro akıllı kart verilerinden elde edilen gerçek yolcu akışı birleştirilerek, son trenlerin toplam potansiyel yolcu talebi elde edilmiştir [65].

Zhou ve diğ. (2019), yolcuların varış noktasına ulaşabilirliğini en üst düzeye çıkarmak için son tren çizelgeleme çalışması yapmışlardır. Karma tamsayılı programla ile geliştirilen model Pekin metrosunda test edilmiştir. Sonuçlar, zaman çizelgesi koordine edildiğinde, son tren hizmetinin performansının önemli ölçüde arttığını göstermiştir. Yolcu sayısı açısından varış noktasına ulaşılabilirlik %62,8'den hesaplanan zaman çizelgesiyle %75,1'e yükseldiği ifade edilmiştir [40]. Son trene erişilebilirliği artırmak adına yapılan bir diğer çalışmada ise, yolcuların son trene başarılı bir şekilde transfer olabilme oranını artırmanın yanında, işletme giderlerinin

de düşürülmesi dikkate alınmıştır. GA kullanılarak geliştirilen model ile daha az işletme gideri ile, son trene transfer olan yolcu sayıları artırılmış ve yolcuların ortalama bekleme süreleri 70 saniye düşürülmüştür [66].

Nie ve diğ. (2021) yaptıkları çalışmada, büyük kent içi raylı sistem ağlarını düşünerek, son tren zamanında yolcu erişilebilirliğini artırmayı ve yolcuların transfer için bekleme sürelerini düşürmeyi hedeflemişlerdir. Geliştirdikleri modelde, iki genetik tabanlı algoritma, bir tamsayı kodlu genetik algoritma ve bir ikili kodlu genetik algoritma kullanmışlardır [67].

Son tren sefer çizelgesi koordinasyonu çalışmasında 3 farklı model geliştiren Huang ve diğ. (2021), çalışmalarında önerdikleri modellerin kent içi raylı sistem ağı içindeki son trenler arasındaki ve bağlantı türleri arasındaki koordinasyonun etkili bir şekilde iyileştirebileceğini ifade etmişlerdir. Çalışmalarındaki ilk model, istasyon ayrımı yapmaksızın aktarma istasyonlarındaki aktarılabilirliği en üst düzeye çıkarmaya yaramakta, ikinci model istasyon ve hat sınıflandırmasına göre farklı ulaştırma türleri arasındaki aktarma istasyonlarında aktarılabilirliği optimize etmektedir. Üçüncü model ise, bağlantı modlarının geliş ve gidişlerinin uzay-zaman dağılımını dikkate alarak çok modlu koordinasyonu arttırmaya çalışmaktadır. Bu modellerin çözümünde, doğrusallaştırma teknikleri ile karma tamsayılı doğrusal programlama kullanılmıştır. Önerilen modeller, üç demiryolu istasyonu ve iki havaalanı terminalini birbirine bağlayan Pekin kent içi raylı sistem ağında test edilmiştir. Sayısal sonuçlar, önerilen modellerin kent içi raylı sistem ağı içindeki son trenler arasındaki ve bağlantı türleri arasındaki koordinasyonu etkili bir şekilde iyileştirebileceğini göstermektedir [68].

İşletmeciye aşırı maliyet yüklemekten ortalama aktarma bekleme süresini, başarısız aktarma oranını ve rastgele yolcu akışının olumsuz etkisini en aza indirmeyi amaçlayan bir diğer çalışmada, işletme parametreleri ve aktarma yolcu sayısı kısıtları altında son tren dönemindeki tren senkronizasyonunu optimize eden bir model geliştirilmiştir. Transfer talebinin belirsiz özelliklerini tasvir etmek için, stokastik simülasyon ile rastgele yolcu akışı oluşturma yöntemi, geliştirilmiş bir kuantum parçacık sürüşü algoritmasına dahil edilmiştir. Örnek olarak 2019 yılında Shenzhen Metro ağı ele alındığında, optimize edilen modelin rasyonelliği, kuantum davranışlı parçacık sürüşü optimizasyonu modelinin uygulanabilirliği ve bu problemi çözmede geleneksel PSO modeline göre üstünlüğü, başarıyla doğrulanmıştır. Sonuçlar, optimize edilmiş son tren bağlantıları ile transfer yolcuları için ortalama bekleme

süresinde %18,54'lük bir düşüşün yanı sıra, optimizasyondan sonra başarılı transfer yolcularının ve yönlerinin sayısında sırasıyla %8,31 ve %6,54'lük bir artış olduğunu göstermektedir [69].

Son tren sefer çizelgeleri ile ilgili yapılan bir diğer çalışmada ise, Wang ve diğ. (2022) gecikme senaryolarını düşünerek, son tren sefer çizelgelerinin koordinasyonu için programlama modeli önermişlerdir. Son trenin gecikmesi durumunda, gecikmeden kaynaklanan bu zamanı iki şekilde düşünmüşlerdir. Bunlar; transfer olmak için bekleyen yolcuların bekleme süresinin artması ve normalde transfer olamayacak yolcuların da transfer olmasına sebep olması şeklindedir. Geliştirdikleri bu model ile son tren zamanında kent içi raylı sistem erişilebilirliğini artırmışlardır [70].

Ning ve diğ. (2022), son tren sefer çizelgeleme problemi ile ilgili yaptıkları çalışmalarında mümkün olduğunca çok sayıda yolcuyla varış noktalarına ulaştırabilecek ve aynı zamanda varış noktalarına ulaşamayan yolcuları varış noktalarına mümkün olduğunca yakın istasyonlara taşıyabilecek, iyi koordine edilmiş bir son tren tarifi yapmayı amaçlamışlardır. Ulaşılabilir yolcu sayısını maksimize etmek ve tüm yolcuların kalan toplam seyahat mesafesini minimize etmek için iki amaçlı bir karma tamsayılı doğrusal programlama modeli geliştirmişlerdir. Chengdu kent içi raylı sistem ağına uygulanan modelin sonuçları, mevcut kullanımdaki zaman çizelgesine kıyasla, optimize edilen zaman çizelgesinin ulaşılabilen yolcu sayısını artırdığını ve aynı zamanda ulaşamayan yolcuların kalan ortalama seyahat mesafesini azalttığını göstermektedir [71].

Wang ve diğ. (2022) enerji verimliliğini artırmak adına yaptıkları çalışmada, metro hatlarında enerji tüketiminin fazla olduğunu belirtmişlerdir. Yaptıkları çalışma ile enerji verimliliğini artırarak, son sefer çizelgelerinin optimizasyonunu geliştirmişlerdir. GA kullanarak geliştirdikleri modeli Pekin metrosunda test etmişler ve başarılı sonuçlar elde etmişlerdir [72].

Maliyet fonksiyonu kullanarak, kent içi raylı sistemlerde son tren erişilebilirliğinin artırılmasının istendiği bir diğer çalışmada ise, kent içi demiryolu ağlarının son tren tarifelerini optimize etmek ve son tren döneminde metro ağları için başlangıç-bitiş noktası erişilebilirliğini arttırmak için genel bir model önerilmiştir. Genelleştirilmiş bir maliyet fonksiyonu kullanılarak, bir kent içi demiryolu ağında yer alan tüm ulaşım faaliyetleri tanımlanmış ve erişilebilirlik kriteri olarak son tren için genelleştirilmiş bir

maliyet fonksiyonu oluşturulmuştur. Yolcuların seyahat güzergahlarına ve tüm başlangıç-bitiş rotasının erişilebilirliğine daha fazla önem veren bir karma tamsayılı programlama modeli geliştirilmiştir. K-en kısa yol algoritması ile birleştirilmiş bir GA kullanılarak geliştirilen model, Xi'an kent içi demiryolu ağında denenmiş ve sonuçlara göre varış noktalarına başarıyla ulaşan yolcu sayısının %12,03 oranında arttığı belirtilmiştir [73].

Yin ve diğ. (2023), çalışmalarında geliştirdikleri modellerinin iki önemli amacı bulunmaktadır. İlk amaçları, gelen ve transfer yolcuları da dahil olmak üzere yolcuların toplam bekleme süresini en aza indirmektir. İkinci hedefleri ise, yolcuların transfer rahatlığını değerlendirmek için önerdikleri parçalı doğrusal formülasyonlu bir senkronizasyon kalite göstergesidir. Zaman çizelgelerinin senkronizasyonu için bir karma tamsayı programlama formülasyonu önermişlerdir. Büyük ölçekli hatlar için ise, modellerini sezgisel algoritmalar ile geliştirmişlerdir. Pekin metrosunda çalışmalarını test etmişler ve yolcuların ortalama bekleme süresi %1,5 oranında azalmış, senkronizasyon kalitesi ise %14,8 oranında artmıştır [44].

Literatürde son tren sefer çizelgesi senkronizasyonu ile ilgili yapılan diğer güncel çalışmaların ise, özellikle büyük kent içi raylı sistem ağları düşünülerek, yolcuların son tren döneminde farklı metro hatları arasında aktarma erişilebilirliği veya başlangıç istasyonundan son tren servisine bindikten sonra varış noktalarına ulaşabilmelerini geliştirmeye yönelik olduğu görülmektedir [74-76].

Son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu ile ilgili yapılmış çalışmalar, özet halinde Çizelge 2.3'de verilmiştir. Çizelge 2.3'e bakıldığında, ilk sütunda çalışmalar, ikinci sütunda çalışmaların amaçları, üçüncü sütunda ise çalışmalarda kullanılan algoritmalar yer almaktadır. Kullanılan algoritmaların büyük çoğunluğunu sezgisel algoritmalar oluşturmaktadır. Çalışmaların amaçlarının genellikle son tren başarılı transfer yolcu sayısını artırmak olduğu görülmektedir. Çizelge 2.3'de son sütunda ise, çalışmalarda yolcuların transfer sürelerinin nasıl alındığına dair bilgilendirme yapılmıştır. Buna göre, sadece bir çalışmada son tren yolcularının transfer sürelerinin değişkenliğine göre çalışma yapılmış, diğer bütün çalışmalarda ise transfer süresi sabit ya da ortalama bir değer olarak alınmıştır.

Çizelge 2.3 : Son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmaları.

Çalışma	Amaç	Çözüm algoritması	Transfer süresi
Kou ve diğ. (2014)	Başarılı transfer sayısını artırmak ve yolcuların son treni bekleme sürelerini düşürmek.	Çok amaçlı optimizasyon	Sabit ve/veya ortalama
Kang ve diğ. (2014)	Son tren erişilebilirliğini artırmak.	Genetik benzetimli tavlama algoritması	Sabit ve/veya ortalama
Kang ve diğ. (2015)	Yolcuların transfer erişilebilirliğini artırarak, bekleme süresini düşürmek.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Li ve diğ. (2016)	Son trene transfer olan yolcu sayısını artırmak.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Kang ve Zhou (2017)	Transfer bekleme zamanını düşürmek ve son tren senkronizasyonunu iyileştirmek.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Yang ve diğ. (2017)	Son trene transfer olan yolcu sayısını artırmak.	Tabu arama algoritması	Sabit ve/veya ortalama
Kang ve diğ. (2017)	Son trene transfer olan yolcu sayısını artırmak.	Karma tamsayılı doğrusal programlama	Sabit ve/veya ortalama
Li ve diğ. (2019)	Son tren yolcu talebini belirleyerek, başarılı transfer yolcu sayısını artırmak.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Chen ve diğ. (2019)	Son tren erişilebilirliğini geliştirmek ve son trenler arasındaki transfer bağlantılarını artırmak.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Chen ve diğ. (2019)	Başarılı transfer sayılarını artırmak.	Dal sınır algoritması	Değişken
Li and Luo (2019)	Son tren için potansiyel yolcu talebini belirlemek.	Veri toplama, analiz	
Zhou ve diğ. (2019)	Yolcuların varış noktasına ulaşabilirliğini en üst düzeye çıkarmak.	Karma tamsayılı doğrusal programlama	Sabit ve/veya ortalama
Yin ve diğ. (2019)	Son tren servis erişilebilirliğini artırmak, işletme giderlerini düşürmek.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Nie ve diğ. (2021)	Yolcu erişilebilirliğini artırmak ve yolcuların transfer için bekleme sürelerini düşürmek.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Huang ve diğ. (2021)	Diğer ulaşım türlerinden transferler de düşünülmüş.	Karma tamsayılı doğrusal programlama	Sabit ve/veya ortalama
Wang ve diğ. (2023)	Başarılı transfer sayısını artırmak ve yolcuların son treni bekleme sürelerini düşürmek.	Parçacık Sürü Optimizasyonu	Sabit ve/veya ortalama
Wang ve diğ. (2022)	Son tren zamanında kent içi raylı sistem erişilebilirliğini artırmak.	Karma tamsayılı doğrusal programlama	Sabit ve/veya ortalama
Ning ve diğ. (2022)	Ulaşılabilir yolcu sayısını artırmak ve yolcuların toplam seyahat mesafesini azaltmak.	Karma tamsayılı doğrusal programlama	Sabit ve/veya ortalama
Wang ve diğ. (2022)	Enerji verimliliğini artırarak son tren sefer çizelgelerini senkronize etmek.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Zhang ve diğ. (2023)	Maliyeti düşünerek, son tren erişilebilirliğini artırmak.	Genetik algoritma	Sabit ve/veya ortalama
Yin ve diğ. (2023)	Son tren yolcularının bekleme süresini düşürmek, senkronizasyon kalitesini artırmak.	Karma tamsayılı doğrusal programlama	Sabit ve/veya ortalama

2.3 Literatür Değerlendirmesi

Yukarıda özetlenen çalışmaları genel olarak değerlendirdiğimizde, kent içi raylı sistemlerde zaman çizelgesi senkronizasyonu ile ilgili yapılan çalışmalarda, transfer olan yolcuların transfer sürelerinin sadece 2 çalışmada [61, 64] değişken değerler olarak alındığı, diğer çalışmalarda ise ortalama ve sabit değer olarak alındığı görülmektedir. Aktarma süreçlerinde, trenlerin istasyona geliş ve istasyondan kalkış zamanlarının yanında, transfer süresinin de yolcuların transfer durumlarının tespitinde ve bekleme sürelerinde önemli bir değişken olduğu düşünüldüğünde, yolcuların transfer süreçlerinin daha detaylı bir şekilde incelenerek, gerçek verilerle zaman çizelgesi senkronizasyonlarında kullanılmasının daha doğru sonuçlar vereceği düşünülmektedir.

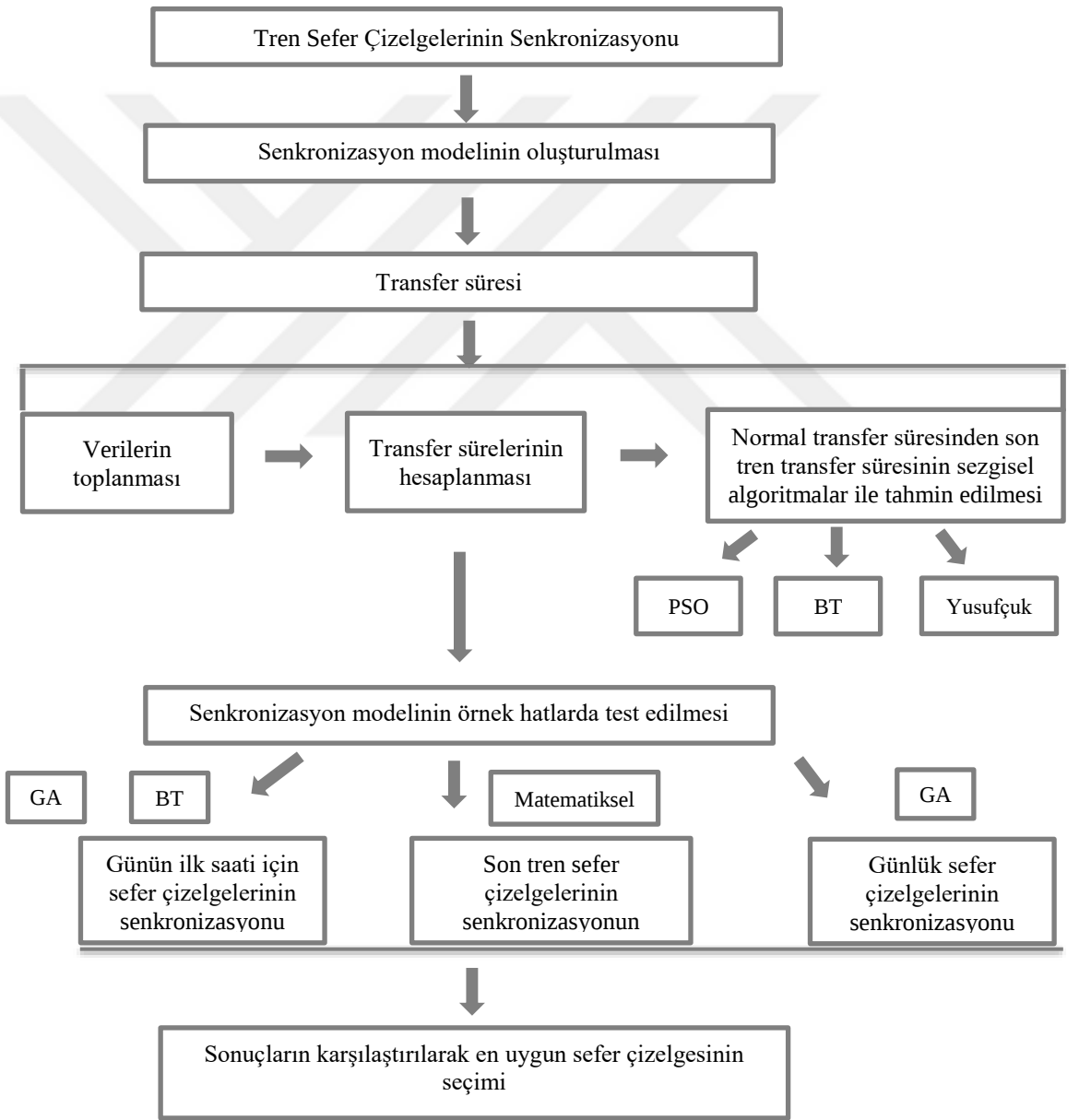
Bu kapsamda, kent içi raylı sistemlerde zaman çizelgesi senkronizasyonu çalışmalarında, yolcuların transfer süreleri gerçek verilerden elde edilmiş olup, gün içinde değişen transfer süreçleri de dikkate alınmıştır.

.



3. TREN ZAMAN ÇİZELGESİ SENKRONİZASYONU

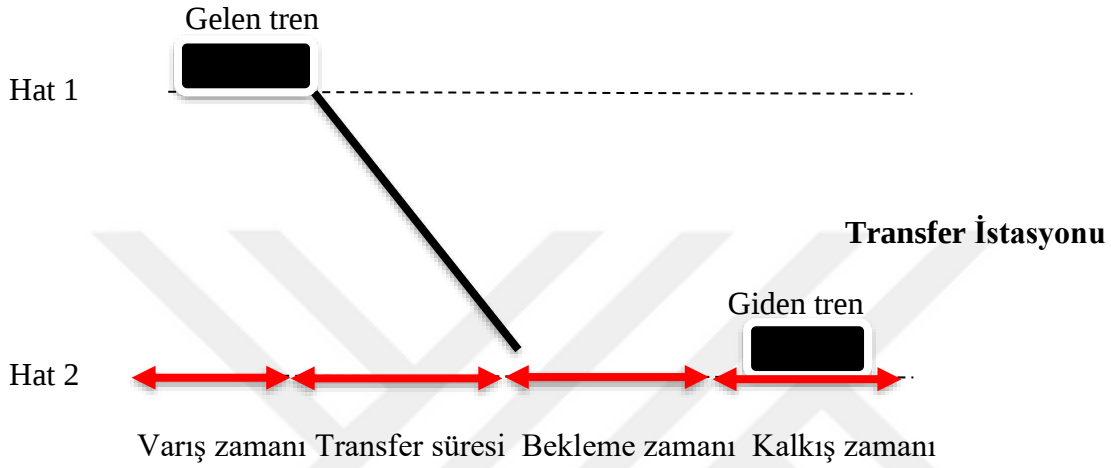
Tezde yapılan çalışmaların özeti, Şekil 3.1’de görülen akış şeması ile verilmiştir. Bu bölümde, tren sefer çizelgeleme senkronizasyonu modeli, modelde kullanılan varsayımlar ve kabuller, parametreler, karar değişkenleri, kısıtlar ve amaç fonksiyonu ile modelde kullanılan algoritmalar açıklanmıştır.



Şekil 3.1 : Tezde yapılan çalışmaların şematik özeti.

3.1 Tren Sefer Çizelgeleme Senkronizasyon Modeli

Literatür bölümünde özetlendiği gibi raylı sistemlerin sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmalarının en önemli amacı, aktarma yapacak yolcuların transfer istasyonlarındaki bekleme sürelerini minimuma indirmektir [31-54]. Son tren için yapılan çalışmaların amacı ise, hem başarılı şekilde transfer olan yolcuların sayısını artırmak hem de yolcuların bekleme sürelerini düşürmektir [55-76].



Şekil 3.2’de transfer süreci gösterilmeye çalışılmıştır. Şekil 3.2’den de anlaşılacağı üzere Hat 1’deki trenin transfer istasyonuna varış zamanı, Hat 1’den Hat 2’ye transfer olacak yolcuların transfer süreleri ve Hat 2’deki trenin kalkış zamanı, transfer olacak yolcuların bekleme zamanını etkileyen parametrelerdir.

3.1.1 Amaç fonksiyonu ve değişkenler

Literatürdeki çalışmalarda, kent içi raylı sistemlerdeki tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmasında kullanılan amaç fonksiyonları ve bu fonksiyonlardaki değişkenler ve tanımları bu bölümde verilmiştir.

$$W = \min \sum_{s_i \in S} \sum_{l_i \in L} N_{s,l_i-l_j} \times t_{s,l_i-l_j}^w \quad (3.1)$$

Denklem 3,1’de;

$W = s$ transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına transfer olan yolcuların toplam bekleme süresi

s = transfer istasyonu

l = kent içi raylı sistem hattı

N_{s,l_i-l_j} = s transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına transfer olan yolcu sayısı

$t_{s,l_i-l_j}^w$ = s transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına transfer olan yolcunun bekleme süresidir.

$$t_{s,l_i-l_j}^w = t_{s,l_j}^d - t_{s,l_i}^a - t_{s,l_i-l_j}^{tr} \quad (3.2)$$

Denklem 3.2’de;

t_{s,l_j}^d = l_j hattındaki trenin s transfer istasyonundan kalkış zamanı

t_{s,l_i}^a = l_i hattındaki trenin s transfer istasyonuna varış zamanı

$t_{s,l_i-l_j}^{tr}$ = s transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına transfer olan yolcunun transfer süresidir.

$$t_{s,l_i}^d = t_{s_0,l_i}^d + \sum_{s_i \in S} t_{s_i,l_i}^r + \sum_{s_i \in S} t_{s(s-1),l_i}^{dw} + t_{s,l_i}^{dw} \quad (3.3)$$

$$t_{s,l_2}^a = t_{s_0,l_2}^d + \sum_{s_i \in S} t_{s(s-1),l_2}^r + \sum_{s_i \in S} t_{s(s-1),l_2}^{dw} \quad (3.4)$$

Denklem 3.3 ve 3.4’de;

t_{s_0,l_i}^d = l_i hattındaki trenin s_0 istasyonundan kalkış zamanı

t_{s,l_i}^r = l_i hattındaki trenin s istasyonuna kadar hareket süresi

$t_{s(s-1),l_i}^{dw}$ = l_i hattındaki trenin transfer istasyonundan bir önceki istasyona kadarki, istasyonlardaki bekleme süreleri

t_{s,l_i}^{dw} = l_i hattındaki trenin s transfer istasyonundaki bekleme süresi

Son trene transfer olmak isteyen yolcular için en önemli unsur son trene yetişmek olduğu için, son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda transfer olan yolcuların sayısını maksimuma çıkaran amaç fonksiyonları Denklem 3.5’de görülmektedir.

$$N = \max \sum_{s_i \in S} \sum_{l_i \in L} N_{s,l_i-l_j} \times \beta_{s,l_i-l_j} \quad (3.5)$$

$$\beta_{l_i-l_j,s} = \begin{cases} 1, & t^w \geq 0 \\ 0, & t^w < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Denklem 3.5’de;

$N_{s,l_i-l_j} = s$ transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına başarılı bir şekilde transfer olan yolcu sayısı

Denklem 3.6’daki katsayı son tren senkronizasyonunda, son trene transfer olacak yolcuların transfer durumlarını belirlemek için oluşturulmuş bir ifadedir.

$\beta_{s,l_i-l_j} = s$ transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına transfer olan yolcuların bekleme süresi 0’dan büyükse yolcuların başarılı bir şekilde transfer olduğu, aksi durumda yolcuların son trene transfer olamadığı kabul edilir.

3.1.2 Transfer süresi

Denklem 3.2’de görüldüğü gibi, tren sefer çizelgesi modelin karar değişkenleri transfer istasyonuna gelen trenlerin varış zamanları, transfer istasyonundan kalkan trenlerin kalkış zamanı ve yolcuların transfer süreleridir. Yolcuların transfer süreleri, bekleme sürelerini ve hatta transfer olma durumlarını da etkilemektedir. Bu durumu Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi basit bir örnekle ifade edelim. Çizelge 3.1’in 1. satırında sabahın ilk seferleri için bir transfer örneği verilmiştir. Buradaki değerlere göre Hat1’den Hat2’ye transfer olacak yolcuların ortalama transfer süresinin 2 dakika olduğu düşünüldüğünde, ortalama bekleme sürelerinin 12 dakika olduğu görülmektedir. Transfer istasyonuna saat 11’de gelen Hat1’deki trenden inen yolcular, Hat 3’e ortalama 2 dakikada transfer olduklarında ise, ortalama 4 dakika beklemek durumunda kalıyorlar. Transfer örneğine günün son seferleri için bakıldığında ise Hat 3’den saat 23:35’de transfer istasyonuna gelen yolcuların, 23:37’de kalkan Hat 1’deki trene transfer durumlarının “olabilir/olamayabilir” şeklinde yazıldığı görülmektedir. Esasında ortalama transfer sürelerinin 2 dakika olduğu düşünüldüğünde, bütün yolcuların transfer olabileceği de literatürdeki birçok çalışmada kabul edilmiştir. Fakat pratikte 2 dakikadan daha fazla sürede transfer olan yolcular da olacağı için bazı yolcular bu trene transfer olabilecek iken, bazıları da olamayacaktır. Aynı şekilde, Hat 2’den saat 23:59’da aktarma istasyonuna gelen yolcuların, büyük bir kısmının saat 24:00’de kalkacak Hat 3’ün son trenine yetişemeyecekleri görülmektedir. Fakat bu örnekte de 1 dakika ve altında transfer süresi olan bazı yolcuların bu trene transfer olabilme ihtimalleri bulunmaktadır. Bu örnek kısaca özetlenirse; gün içinde bir yolcu transfer istasyonuna gelen trenden indikten sonra, transfer olacağı hattın peronuna gelir ve bineceği treni peronda birkaç dakika bekleyebilir. Bu durum sefer sıklıklarının

yoğun olduğu gün içinde, uzun bekleme sürelerine neden olmasa da, günün ilk saatlerinde yolcuların 10-15 dakika ya da daha uzun süre transfer olacağı trenleri beklemesine sebep olabilir. Ayrıca bu durumu son tren için düşündüğümüzde, Çizelge 3.1’de görüldüğü gibi 23:35’de transfer istasyonuna gelen bir trenden inen yolcu, 23:37’de hareket eden son trene transfer olamayabilir. Çizelge 3.1’deki transfer ve bekleme süreleri ortalama sürelerdir. Fakat bu süreler yolcular için değişkenlik gösterebilir. Örneğin, Çizelge 3.1’de 2 dakika olan transfer süresi bazı yolcular için 1, bazıları için ise 3 dakika olabilir. Bu durum yolcuların transfer olabilme durumlarını ve bekleme sürelerini etkilemektedir. Dolayısıyla, bu açıklamadan da anlaşılacağı üzere transfer sürelerinin gerçek değerler ile belirlenmesi, sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda önem arz etmektedir.

Çizelge 3.1 : Örnek sefer çizelgeleri.

Transfer Yönü	Varış Zamanı	Kalkış Zamanı	Transfer Süresi (dk.)	Transfer Durumu	Bekleme Süresi (dk.)
Hat1-Hat2	06:01	06:15	2	Olabilir	12
Hat1-Hat3	11:00	11:06	2	Olabilir	4
Hat3-Hat1	23:35	23:37	2	Olabilir/Olamayabilir	
Hat2-Hat3	23:59	24:00	2	Olamayabilir	

Bu nedenle, sefer çizelgelerinin senkronizasyonu modelinde karar değişkenlerinden biri olan, transfer süresini elde etmek için, yerinde ölçümler yapılarak, gerçek veriler kullanılmıştır.

3.1.3 Varsayımlar ve kabuller

Kent içi raylı sistem sefer çizelgesinin senkronizasyonu için geliştirilen modeli basitleştirmek ve daha makul sonuçlar elde edebilmek için, literatürdeki çalışmalarda bazı varsayımlar ve kabuller yapılmıştır. Bu varsayımlar ve kabuller aşağıdaki gibidir:

- Yolcuların transfer istasyonlarında beklemeden, yürüyerek aktarma yapacakları perona gideceği kabul edilmektedir.
- Transfer yapacak yolcu sayıları bilinmektedir.
- Transfer olunacak trenlerin kapasitesinin, transfer olmak için peronda bekleyen yolcu talebini karşılayacağı kabul edilmektedir.

- Yolcuların transfer süreleri genellikle ortalama ve sabit değer olarak alınmaktadır.
- Hatların günlük sefer çizelgelerine göre hareket ettiği kabul edilmektedir.
- Trenlerin istasyondaki bekleme süreleri sabittir ve bilinmektedir.
- Yolcuların perona ilk gelen trene aktarma yapacağı, bir sonraki treni beklemek istemeyecekleri kabul edilmektedir.
- Bazı hatlarda hafta sonu uygulanan gece tarifeleri ihmal edilmektedir.

3.2 Kullanılan Yöntemler

Literatürdeki çalışmalara göre, toplu taşımalarda sefer çizelgelerinin optimizasyonunda kullanılan çözüm yaklaşımlarını 2 ana kategoride sınıflandırabiliriz. Bunlar: matematiksel ve sezgisel yaklaşımlardır. Tez kapsamında çalışmada kullanılan yöntemler aşağıda özetlenmiştir.

3.2.1 Matematiksel yöntemler

Kent içi raylı sistemlerde sefer çizelgelerinin senkronizasyonu modellerinde amaç fonksiyonlarımızı en iyilemek için kesin çözüm yöntemlerini kullanan çalışmalar bulunmaktadır. Literatürdeki çalışmalarda genellikle transfer istasyonlarında araçların kalkış ve varış sürelerini karar değişkenleri olarak kullanarak, senkronizasyon problemini, tamsayılı program ya da karmaşık tamsayılı program olarak formüle ederek çözülmektedir. Modeller, toplam transfer bekleme sürelerini en aza indirme, senkronizasyon sayısını en üst düzeye çıkarma ve başarılı transfer yolcu sayısını en üst düzeye çıkarma dahil olmak üzere amaç fonksiyonu formülasyonlarında çeşitlilik göstermektedir [48, 52, 63]. Literatürde, sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmalarında en çok kullanılan matematiksel yöntemler dal ve sınır algoritmasıdır. Geliştirilen modelleri çözmek için genellikle CPLEX programı kullanılmaktadır [31, 33, 40]. Matematiksel yöntemler, kısıtlar dahilinde özellikle küçük raylı sistem ağında optimum çözüm verirler. Fakat, büyük boyutlu problemlerde en iyi sonuca ulaşma süresi çok uzun olabilmekte ya da en iyi çözüme ulaşılmakta zorlanılmaktadır. Bu nedenle, kent içi raylı sistem ağlarının büyümesiyle birlikte, özellikle son yıllarda, sefer çizelgeleme problemlerinde matematiksel yöntemler daha az tercih edilmektedir.

Tez çalışması kapsamında, son tren seferlerinde bütün yolcuların transfer olacağı şekilde, sefer çizelgelerinin senkronizasyonunu sağlamak amacıyla matematiksel model kullanılmıştır.

3.2.2 Sezgisel yöntemler

Sezgisel yöntemler, günlük hayattaki olaylara daha uygun yaklaşımlar sunan yöntemlerdir. Elde edilen çözümün doğruluğunun ispat edilmesi gerekmeyen fakat genellikle en iyiye yakın çözümler veren sezgisel algoritmalar, matematiksel yöntemlere göre daha kolay ve hızlı çözümlerin üretilebildiği yöntemlerdir [77]. Sezgisel algoritmalar, optimizasyon ve senkronizasyon problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılmaktadır [36, 57, 78]. Literatürde sefer çizelgeleme problemlerinde sezgisel yöntemler sıklıkla kullanılmaktadır. Tez kapsamında kullanılan sezgisel algoritmalar sırasıyla açıklanmıştır.

3.2.2.1 Genetik algoritma

Doğada gözlemlenen evrimsel sürece benzer bir şekilde çalışan arama ve eniyileme yöntemidir [79]. Karmaşık çok boyutlu arama uzayında en iyinin hayatta kalması ilkesine göre bütünsel en iyi çözümü arar [80]. GA, rastgele arama tekniklerini kullanarak çözüm bulmaya çalışan parametre kodlamaya dayalı bir arama tekniğidir [81]. GA'nın temel adımları aşağıda açıklanmıştır.

Başlangıç Popülasyonu: GA'da popülasyon, kromozomlardan oluşan topluluğa denilir. Kromozom yani birey ise, birden fazla genin bir araya gelmesiyle oluşmaktadır. Kromozomları oluşturan ve genetik bilgi taşıyan en küçük birime de gen denilmektedir. GA ile model geliştirebilmek için, öncelikle bir başlangıç çözümü olması gerekmektedir. Başlangıç popülasyonu, basit ve kullanışlı olmasından dolayı genellikle rastgele oluşturulur. Başlangıç popülasyonundaki her bir kromozom, problemin olası bir çözümünü temsil etmektedir.

Uygunluk fonksiyonu hesaplama: Popülasyondaki her kromozomun uygunluk (amaç) fonksiyonu değerleri hesaplanır. Amaca göre, uygunluk fonksiyonunun maksimum ya da minimum olması istenir.

Yeni popülasyon: Yeni popülasyonu oluşturmak için mevcut popülasyondan çaprazlanacak ve mutasyona uğrayacak bireyler seçilmelidir. Teoriye göre iyi bireyler yaşamlarına devam etmeli ve yeni bireyler oluşmalıdır. Bu nedenle tüm seçim

yöntemlerinde uygunluk değeri (f_v) yüksek olan bireylerin seçilme olasılığı daha yüksektir. Her bir birey için seçilme olasılığı (p_i) Denklem 3.7’de görüldüğü gibi hesaplanır.

$$p_i = \frac{f_v}{\sum_{i=1}^N f_v} \quad (3.7)$$

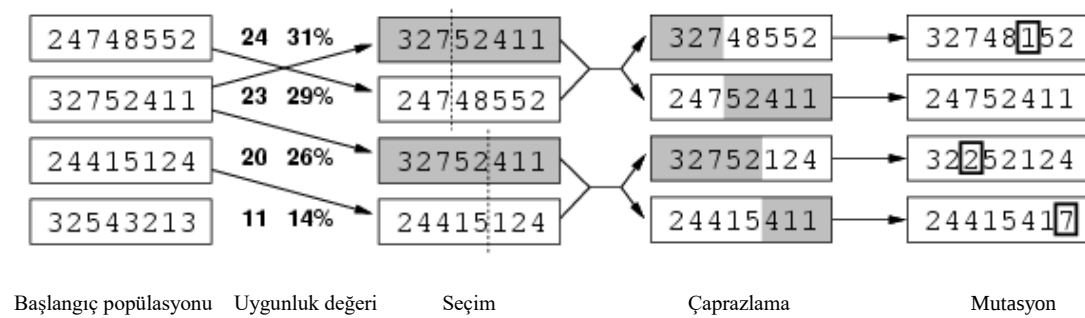
$i=(1,2,..., N)$ burada N birey sayısına eşittir.

Ardından, her bir birey için kümülatif olasılık (q_i) hesaplanır. Eğer 0-1 arasında rastgele seçilen r sayısı q_1 'den küçükse, q_1 değeri seçilir. Bu şekilde, büyük uygunluk değerlerine sahip bireyler seçilmiş olur.

Çaprazlama: Ana kromozomda genlerin yerleri değiştirilerek çocuk kromozomlar üretilir. Çocuk kromozomların uygunluk değeri daha yüksek olan kromozomlar olması beklenir. Çalışmamızda, daha sık tercih edilmesinden dolayı, çaprazlama işlemi rulet çarkı yöntemi ile yapılacak ve tek noktalı çaprazlama kullanılacaktır. Çaprazlama sonrası elde edilen bireylerin çaprazlanan bireylerden daha iyi olması beklenir, ancak bu her zaman doğru olmayabilir. Bireyler arasındaki benzerlik çaprazlama ile değiştirilemiyorsa, mutasyon işlemi gerçekleştirilir.

Mutasyon: Mutasyon fonksiyonu ile toplulukta aynı bireylerin bulunması engellenebilir. Ayrıca mutasyona uğrayan bireyden daha iyi skora sahip bir bireyin elde edilmesi beklenir.

Şekil 3.3’de şimdiye kadar anlatılan kısımlara yönelik basit bir örnek verilmiştir.



Şekil 3.3 : Genetik algoritma adımları.

Kontrol: En iyi bireyler ile yeni popülasyon oluşturulur. Eğer, amaç fonksiyonunda belirlenen kriter karşılanırsa, algoritma sonlandırılır.

Sonlandırma: Sonlandırma kriteri karşılanana kadar hesaplamalar Adım 1’den itibaren tekrarlanır.

3.2.2.2 Benzetimli tavlama

Benzetimli tavlama, stokastik arama yöntemidir. Katıların fiziksel tavlama süreci ile olan benzerliklerinden ileri gelmektedir. Katıların ısıtılması ve sonra yavaş yavaş soğutulması esasına dayanır. Benzetimli tavlama algoritmasının işleyişi, adımı aldığı demir tavlama sürecine benzemektedir [82]. Demir tavlama işlemi sırasında nasıl bir demir parçasını ısıtıp, sonra soğumaya bırakıyorsak benzer bir yaklaşım herhangi bir sayısal ölçüme de uygulanabilir [83]. Dolayısıyla demiri oluşturan hücrelerin ısıtılması ve soğutulması sırasında zamana bağlı değerler elde etmek mümkündür. Bir benzetilmiş tavlama algoritması genellikle bir başlangıç çözümü, bir komşu çözüm üretme yöntemi ve bir tavlama programından oluşur. Tavlama işleminin işlevi, yeterince yüksek sıcaklıktaki bir çözümle başlayıp, sıcaklığı kademeli olarak düşürerek iyi ve kötü çözümler arasında geçiş yapmak ve en iyi çözümü bulmaktır [83]. Tezde, Denklem 3.2 ile elde edilen yolcuların bekleme sürelerine göre oluşturulan değerler, tavlama simülasyonu algoritması ile soğutularak en iyi çözüm bulunacaktır. Tren tarifelerinin senkronize edilmesi için oluşturulan BT algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 1: Başlangıç sıcaklığı için rastgele bir çözüm oluşturulur.

Adım 2: Başlangıç algoritması soğutma verimliliği C_c katsayısı ile başlangıç sıcaklığından, bitiş sıcaklığına kadar soğutulur.

Adım 3: Bu şekilde iki amaç değeri elde edilir. Eğer $v_{yeni} > v_{eski}$, ise yeni bulunan değer çözüm olarak kabul edilir; eğer $v_{yeni} < v_{eski}$, ise çözümün kabul olasılığı Denklem 3.8 ile hesaplanır.

$$P = e^{-\Delta/T} \quad (3.8)$$

$$\Delta = v_{yeni} - v_{eski} \quad (3.9)$$

Burada;

P = çözüm olasılığı

Δ = yeni çözüm ile eski çözüm farkını ifade eder. Denklem 3.9 ile hesaplanır.

Adım 4: Kabul edilebilir bir çözüm bulunduğunda ya da soğutma işlemi bittiğinde algoritma sona erer. Böylece en iyi çözüm bulunmuş olur.

3.2.2.3 Parçacık sürü optimizasyonu

PSO, kuş ve balık sürülerinin sosyal davranışları gözlemlenerek geliştirilen popülasyon temelli bir optimizasyon algoritmasıdır. PSO, sürü halinde hareket eden hayvanlardan esinlenerek oluşturulmuş sezgisel bir optimizasyon tekniğidir. İlk kez Kennedy ve Eberhart (1995) tarafından kullanılmıştır [84]. Sürü halinde hareket eden hayvanların yiyecek arama ya da bir tehlikeden uzaklaşma karşısında sergiledikleri hareketlerin hedeflerine kolay ulaşmalarını sağladıkları gözlemlenmiştir. PSO’da her bireye parçacık denir. Parçacıklardan oluşan popülasyon sürüyü oluşturur. Sürüdeki bireylerin pozisyonlarının, sürüdeki en iyi pozisyondaki bireye yaklaştırmaya çalışması algoritmanın temelini oluşturur. Rastgele üretilen hızlarla başlatılan PSO’da, parçacıkların hızları güncellenerek, en uygun çözüm bulunmaya çalışılır. Parçacığın en iyisi pbest ve tüm parçacıkların en iyisi gbest kullanılarak, parçacıkların hızlarının güncellenmesi yapılır.

PSO algoritmasının temel adımları aşağıdaki gibidir;

Adım 1: Başlangıç sürüsü, hızları ve pozisyonları oluşturulur.

Adım 2: Sürüdeki bütün parçacıkların uygunluk değeri, Denklem 3.10 ile hesaplanır.

$$V_{ij} = w * V_{ij} + c_1 * rand_1 * (P_{ij} - X_{ij}) + c_2 * rand_2 * (G_{ij} - X_{ij}) \quad (3.10)$$

Denklem 3.10’da;

V_{ij} = Parçacığın ilk hızı

w = Atalet ağırlık değeri

$rand_1, rand_2$ = Rastgele oluşturulmuş sayılar

c_1, c_2 = Öğrenme katsayıları

X_{ij} = Parçacığın ilk konumu

P_{ij} = Yerel en iyi konumu

G_{ij} = Sürünün en iyi konumunu

ifade eder.

Adım 3: Daha sonra, her jenerasyondaki tüm parçacıklar önceki jenerasyonun en iyisi ile karşılaştırılır. Eğer daha iyi ise, yer değiştirilir.

Adım 4: En iyi yerel değerler kendi aralarında karşılaştırılır ve en iyisi küresel en iyi değer olarak atanır.

Adım 5: Hız ve pozisyon değerleri güncellenir.

3.2.2.4 Yusufçuk algoritması

Literatürde az rastlanan sürü algoritmalarından biri olan yusufçuk algoritması ilk kez 2016 yılında kullanılmıştır [85]. Sürü algoritmalarında, sürüdeki bireylerin 3 temel davranışları olduğu kabul edilir. Bu davranışlar: Ayrışma, hizalama ve kaynaşmadır. Ayrışma, sürüdeki bireylerin birbirlerine çarpmadan hareket etmek isteklerini ifade eder. Hizalama, sürüdeki bireylerin birbirlerine benzemek istediklerinden dolayı hızlarını eşitlemek istemelerini ifade eder. Kaynaşma ise, sürüdeki bireylerin hedefe yönelmelerini ifade etmektedir. Diğer sürü algoritmalarına ek olarak, yusufçuk algoritmasına yiyecek yönelimi ve düşmandan kaçma parametreleri de eklenmiştir. Dolayısıyla yusufçukların besin kaynaklarına doğru giderken komşularına çarpmadan hızlarını ve konumlarını güncelleyebilmelerini düşündüğümüzde, diğer sezgisel algoritmalar ve özellikle PSO ile karşılaştırma yapabilmek adına tez çalışmasında kullanılması uygun bulunmuştur. Yusufçuk algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 1: Sürü oluşturulur. Yusufçuk algoritmasında besin kaynağı bulmaya yönelik amaç fonksiyonu minimum, düşman bulmaya yönelik amaç fonksiyonu ise maksimumdur. Dolayısıyla çalışmada bu durum göz önünde bulundurularak amaç fonksiyonu seçilecektir.

Adım 2: Sürüdeki bireylerin hızları ve konumları Denklem 3.11 ve 3.12 ile hesaplanır.

$$\nabla X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w\nabla X_t \quad (3.11)$$

$$X_{t+1} = X_t + \nabla X_{t+1} \quad (3.12)$$

Burada;

∇X : Hız

X : Pozisyonu

ifade etmektedir.

Denklem 3.11'deki s , a ve c değerleri ayrışma, hizalama ve kaynaşma katsayılarını temsil etmektedir. Denklem 3.12'deki f , e , w ve t değerleri sırasıyla besin faktörü,

düşman faktörü, atalet katsayısı ve iterasyon sayısını temsil etmektedir. Ayrıca, Denklem 3.12 yusufçukların hızlarını ve pozisyonlarını göstermektedir.

Adım 3: Bireylerin birbirleriyle çarpışmaması için ayırma fonksiyonları, hızlarının birbirine yakın olması için hizalama ve konumlarının birbirine göre olması için uyum fonksiyonları eklenir.

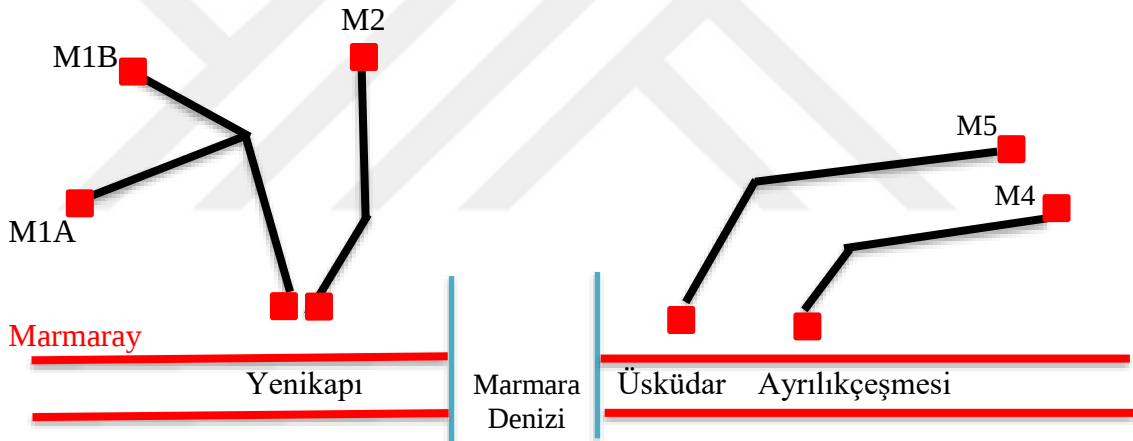
Adım 4: Elde edilen değerlerle hız ve konum güncellenir.

Adım 5: Son olarak, güncellenmiş değerlerle amaç fonksiyonu elde edilir.



4. VERİLERİN ANALİZİ

Tezin bu bölümünde, tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu için geliştireceğimiz modeli test edeceğimiz, kent içi raylı sistem hatlarının bilgileri, sefer çizelgeleri, yolcu sayıları, transfer yolcu sayıları ve yolcuların transfer sürelerinin ölçümleri ile ilgili bilgiler yer almaktadır. Öncelikle, örnek hatların bilgileri, sefer çizelgeleri ve yolcu sayıları verilecektir. Daha sonra ise, transfer koşulları göz önünde bulundurularak, günün ilk saati, günün son saati ve günün diğer zamanları için yolcuların transfer süreleri ölçümleri ile ilgili bilgiler verilecektir.



Şekil 4.1 : Örnek hatların şematik gösterimi.

Sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışması için geliştirdiğimiz model, Şekil 4.1’de şematik olarak gösterilen Metro İstanbul’daki bazı hatlar ile Marmaray üzerinde test edilecektir. Metro İstanbul, 7 metro, 2 hafif metro, 4 tramvay, 2 föniküler ve 2 teleferik hattından oluşan yaklaşık 225 km toplam hat uzunluğu ile, 2024 Nisan ayı verilerine göre günde ortalama 2.5 milyon yolcu taşımaktadır.

Vaka çalışmalarının yapılacağı M1 hafif metro, M2, M4, M5 metro hatları ve Marmaray ile ilgili özet bilgiler aşağıda verilmiştir.

M1A ve M1B hattından oluşan M1 hafif raylı sistemin toplam uzunluğu 26,8 km olup, 2024 yılı günlük ortalama yolcu sayısı 373.735'dir. M1A Yenikapı-Atatürk

havalimanı hattının toplam istasyon sayısı 18 ve seyahat süresi 35 dakikadır. Hattın ilk seferi 06:00'da, son seferi ise 24:00'de yapılmaktadır. Günlük sefer çizelgesinde headway süresi (minimum izleme aralığı) 6 dakikadır. M1B Yenikapı-Kirazlı hattı da 13 istasyondan oluşmakta ve seyahat süresi 25 dakikadır. Bu hattın minimum headway süresi 4 dakika olarak verilmiş ve günün ilk seferi 06:00'da, son seferi ise 23:55'de yapılmaktadır. M1A ve M1B hatlarında hafta içi günlük tek yönde 150'şer sefer yapılmaktadır.

M2 Yenikapı-Hacısoman hattı 23,5 km uzunluğunda olup, 16 istasyondan oluşmaktadır. Hattın sefer süresi ise 32 dakikadır. 2024 yılı günlük ortalama yolcu sayısı 473.212'dir. Hattın ilk seferi saat 05:57'de, son seferi ise 23:59'da yapılmaktadır. Bu hattın minimum headway süresi, 3 dakika 55 saniye olarak verilmiştir. M2 hattında hafta içi tek yönde günlük 199 sefer yapılmaktadır.

M4 Kadıköy-Sabiha Gökçen Havalimanı hattı 33,5 km uzunluğunda olup, 23 istasyona sahiptir. Sefer süresi 52 dakika olan hattın, 2024 yılı günlük ortalama yolcu sayısı 315.705'dir. Minimum headway süresi 5 dakika olan hattın ilk seferi saat 06:00'da, son seferi ise 23:59'da yapılmaktadır. M4 hattında hafta içi tek yönde günlük 182 sefer yapılmaktadır.

26,5 km uzunluğunda olan M5 Üsküdar-Samandıra Merkez hattı, 20 istasyondan oluşmakta ve sefer süresi 43 dakikadır. 2024 yılı günlük ortalama yolcu sayısı 284.578'dir. İlk seferi 06:00'da, son seferi 23:59'da olan hattın, minimum headway süresi 4 dakika 10 saniyedir. M5 hattında hafta içi tek yönde günlük 207 sefer yapılmaktadır.

76,6 km uzunluğunda ve 43 durağı olan Marmaray'da günde yaklaşık toplam 287 sefer yapılmaktadır. Yolculuk süresinin yaklaşık 108 dakika olduğu Halkalı-Gebze arasında seferler 15 dakika aralıklarla, Ataköy-Pendik arası seferler ise 8 dakika aralıklarla yapılmaktadır. Marmaray ile seyahat eden yolcu sayısı günlük ortalama yaklaşık 600.000'dir.

Çalışma, Şekil 4.1'de görüldüğü gibi 3 farklı transfer istasyonunda yapılacaktır. Bu istasyonlar: Yenikapı, Ayrılıkçeşmesi ve Üsküdar istasyonlarıdır. Bu istasyonlardan; Yenikapı, M1, M2 ve Marmaray hatlarının entegre olduğu ve aynı zamanda T1 tramvay hattının Aksaray istasyonuna da çok yakın mesafede bulunan kent içi raylı sistem yolcu sayısının ve transfer yolcu sayısının en fazla olduğu istasyondur.

Ayrılıkçeşmesi ve Üsküdar istasyonları da sırası ile M4 ve M5 metro hatlarının Marmaray ile entegre olduğu hatlardır. M4 hattının Sabiha Gökçen’e kadar uzatılması, aynı şekilde M5 hattının da Samandıra’ya kadar uzatılması ile birlikte yolcu sayılarının giderek arttığı, iki önemli metro hattının Marmaray ile entegre olduğu iki istasyon çalışmadaki diğer transfer istasyonlarıdır.

4.1 Sefer Çizelgeleri

Zaman aralığı hız kısıtlaması olmadan ilerleyen iki tren arasındaki süre olarak tanımlanır. Maksimum hızda ilerleyen iki tren için en kötü senaryoda bile, trenler arasında güvenli bir mesafenin olması gerekmektedir [86]. Yolcu yoğunluğunun fazla olduğu metro hatlarında sefer aralıkları özellikle pik saatlerde düşük sürelerle inmektedir.

Çizelge 4.1’de çalışma yapılan hatların zaman dilimlerine göre sefer aralıkları bulunmaktadır. Metro İstanbul A.Ş. tarafından işletilen hatlara baktığımızda, günün ilk saatinde ve son saatinde sefer aralıklarının fazla olduğu, pik saatlerde ise sefer aralıklarının düştüğü gözlemlenmektedir. Marmaray’da ise sefer aralıklarının aynı olduğu Çizelge 4.1’de görülmektedir. Bu yüzden, kent içi raylı sistem sefer çizelgeleri senkronizasyonu, günün ilk ve son saatleri için de özel olarak yapılacaktır.

Çizelge 4.1 : Örnek hatların zaman dilimlerine göre sefer sayıları.

Örnek Hatlar	M1A	M1B	M2	M4	M5	Marmaray
Zaman Dilimleri	Örnek Hatların Zaman Dilimlerine Göre Sefer Aralıkları (dk)					
06:00-06:29	8	8	8	9	8	8
06:30-06:59	8	8	8	5	4	8
07:00-08:59	6	6	5	5	4	8
09:00-16:59	8	8	6	6	6	8
17:00-19:59	6	6	4	5	4	8
20:00-20:59	8	8	8	5	4	8
21:00-22:59	8	8	8	9	6	8
23:00-23:59	10	10	9	9	8	8

İncelenen hatlar, İstanbul’da yolcu yoğunluğunun en fazla olduğu hatlardır. Şekil 4.2’de görüldüğü gibi Metro İstanbul’da M2, M4 ve M5 metro hatları ile M1 hafif metro hattı yolcu sayılarının en fazla olduğu hatlardır. Örnek hatların sefer çizelgelerinin mevcut senkronizasyon durumlarını ifade etmek için günün ilk ve son saatleri ile gün içi bir saat seçilerek, Çizelge 4.2, 4.3 ve 4.4 oluşturulmuştur.

Çizelge 4.2’de günün ilk seferleri yer almaktadır. Çizelge’de, Metro İstanbul hatlarının Marmaray ile entegre olduğu Yenikapı, Ayrılıkçeşmesi ve Üsküdar istasyonlarında trenlerin istasyonlara varış ve istasyondan kalkış zamanları ile her iki zaman arasındaki farklar gösterilmiştir. Çizelge 4.2’de yolcuların transfer sürelerine yer verilmemiştir. (*) ile gösterilen satırlarda, bazı yolcuların transfer olmak istediği hattaki ilk trene transfer olabileceği, bazılarının ise olamayacağı ifade edilmek istenmiştir. Bu durum da transfer yolcularının transfer sürelerinin tespitinin ne kadar önemli olduğunu ifade etmektedir. Çizelge 4.2’yi incelediğimizde, trenlerin istasyonlara geliş ve istasyonlardan kalkış zamanları arasındaki farkın 12 dakikaya kadar çıktığı gözlemlenmektedir. Bu durum özellikle farkın yüksek olduğu yerlerde, yolcuların transfer bekleme sürelerinin fazla olduğunu göstermektedir.

Çizelge 4.2 : Örnek hatların günün ilk saatinde sefer çizelgeleri.

Transfer İstasyonu	Transfer Yönü	Varış Zamanı	Kalkış Zamanı	Kalkış ve Varış Zamanı Farkı (dk)
Yenikapı	Marmaray-M1A*	06:06:00	06:08:00	2
	Marmaray-M1A	06:06:00	06:16:00	10
	Marmaray-M1A	06:15:00	06:24:00	9
	Marmaray-M1A	06:00:00	06:08:00	8
	Marmaray-M1A	06:08:00	06:16:00	8
	M1A-Marmaray	06:29:00	06:36:00	7
	M1A-Marmaray	06:29:00	06:38:00	9
	Marmaray-M1B	06:06:00	06:12:00	6
	Marmaray-M1B	06:15:00	06:20:00	5
	Marmaray-M1B	06:00:00	06:04:00	4
	Marmaray-M1B	06:08:00	06:12:00	4
	M1B-Marmaray	06:23:00	06:29:00	6
	M1B-Marmaray	06:23:00	06:30:00	7
	Marmaray-M2	06:06:00	06:12:00	6
	Marmaray-M2	06:15:00	06:20:00	5
	Marmaray-M2	06:00:00	06:04:00	4
	Marmaray-M2	06:08:00	06:12:00	4
	M2-Marmaray	06:29:00	06:36:00	7
	M2-Marmaray	06:36:00	06:44:00	8
	M2-Marmaray	06:29:00	06:38:00	9
Ayrılıkçeşmesi	M2-Marmaray	06:36:00	06:45:00	9
	Marmaray-M4	06:10:00	06:19:00	9
	Marmaray-M4	06:17:00	06:28:00	11
	Marmaray-M4	06:11:00	06:19:00	8
	Marmaray-M4	06:19:00	06:28:00	9
	M4-Marmaray	06:38:00	06:48:00	10
	M4-Marmaray*	06:38:00	06:41:00	3
Üsküdar	M4-Marmaray	06:38:00	06:49:00	11
	Marmaray-M5	05:59:00	06:09:00	10
	Marmaray-M5	06:07:00	06:18:00	11
	M5-Marmaray*	06:35:00	06:37:00	2
	M5-Marmaray	06:35:00	06:45:00	10
	M5-Marmaray	06:35:00	06:44:00	9

Çizelge 4.3’de örnek hatların gün içindeki çeşitli zaman dilimlerindeki transfer istasyonuna varış ve transfer istasyonundan kalkış zamanları ile iki zaman arasındaki farklar verilmiştir. Buradaki farkların, Çizelge 4.2’ye oranla daha az olduğu görülmektedir. Bu durumun sebebi ise; gün içindeki sefer aralıklarının, özellikle pik saatlerdeki günün ilk seferlerine göre daha az oluşudur.

Çizelge 4.3 : Örnek hatların sefer çizelgeleri.

Transfer İstasyonu	Transfer Yönü	Varış Zamanı	Kalkış Zamanı	Kalkış ve Varış Zamanı Farkı (dk)
Yenikapı	Marmaray-M1A	07:30:00	07:35:00	5
	Marmaray-M1A	09:52:00	09:58:00	6
	Marmaray-M1A	12:00:00	12:05:00	5
	Marmaray-M1A	14:53:00	14:59:00	6
	Marmaray-M1A	17:52:00	17:56:00	4
	Marmaray-M1A	18:23:00	18:26:00	3
	Marmaray-M1A*	21:15:00	21:17:00	2
	Marmaray-M1A	21:15:00	21:25:00	10
	M1A-Marmaray	08:27:00	08:30:00	3
	M1A-Marmaray	12:21:00	12:30:00	9
	M1A-Marmaray	18:27:00	18:30:00	3
	Marmaray-M1B	09:07:00	09:14:00	7
	Marmaray-M1B	14:15:00	14:24:00	9
	Marmaray-M1B	17:07:00	17:13:00	6
	Marmaray-M1B	21:08:00	21:13:00	5
	M1B-Marmaray	09:17:00	09:22:00	5
	M1B-Marmaray	16:56:00	17:00:00	4
	M1B-Marmaray	20:43:00	20:52:00	9
	Marmaray-M2	08:00:00	08:03:00	3
	Marmaray-M2	11:08:00	11:12:00	4
	Marmaray-M2	17:07:00	17:11:00	4
	Marmaray-M2	21:15:00	21:22:00	7
	M2-Marmaray	08:04:00	08:08:00	7
	M2-Marmaray	11:10:00	11:15:00	5
	M2-Marmaray	14:33:00	14:38:00	5
	M2-Marmaray	18:04:00	18:08:00	4
Ayrılıkçeşmesi	Marmaray-M4	10:10:00	10:18:00	8
	Marmaray-M4	14:18:00	14:25:00	7
	Marmaray-M4	17:40:00	17:45:00	5
	Marmaray-M4	21:40:00	21:47:00	7
	M4-Marmaray	09:01:00	09:10:00	9
	M4-Marmaray*	14:15:00	14:18:00	3
	M4-Marmaray	14:15:00	14:25:00	10
Üsküdar	M4-Marmaray	19:10:00	19:17:00	7
	Marmaray-M5*	08:59:00	09:02:00	3
	Marmaray-M5	08:59:00	09:06:00	7
	Marmaray-M5	15:07:00	15:12:00	5
	Marmaray-M5	19:00:00	19:05:00	5
	M5-Marmaray*	08:25:00	08:29:00	4
	M5-Marmaray*	08:25:00	08:33:00	8
	M5-Marmaray	11:08:00	11:15:00	7
	M5-Marmaray	17:37:00	17:42:00	5
	M5-Marmaray	22:02:00	22:08:00	6

Çizelge 4.4’de Yenikapı, Ayrılıkçeşmesi ve Üsküdar istasyonlarında entegre olan ve örnek alınan hatların son seferlerine ait, transfer istasyonlarına geliş ve transfer istasyonlarından kalkış zamanları verilmiştir. Bu çizelgede (*) işareti olan satır sayısının daha fazla olduğu dikkat çekmektedir. Bu durumun nedeni hatların son seferlerinin birbirleriyle senkronizasyonunun daha az olmasıdır. Örneğin saat 00:37’de M4 hattından Ayrılıkçeşmesi’nde inen yolcu, Marmaray’ın hem Gebze yönüne hem de Halkalı yönüne aktarma yapamamaktadır.

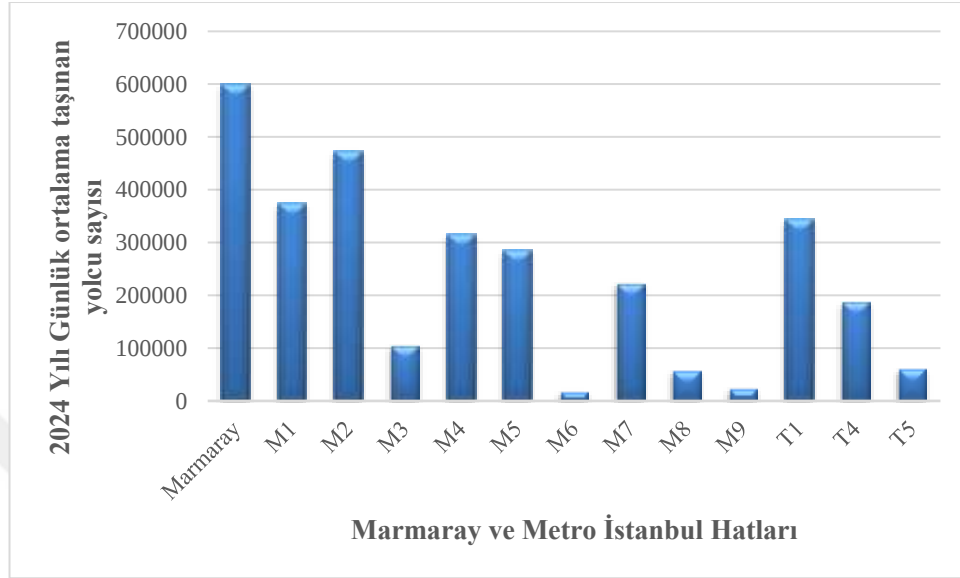
Çizelge 4.4 : Örnek hatların günün son saatinde sefer çizelgeleri.

Transfer İstasyonu	Transfer Yönü	Varış Zamanı	Kalkış Zamanı	Kalkış ve Varış Zamanı Farkı (dk)
Yenikapı	Marmaray-M1A*	00:06:00	00:00:00	-
	Marmaray-M1A	23:51:00	00:00:00	10
	Marmaray-M1A	23:30:00	23:41:00	11
	M1A-Marmaray	00:05:00	00:06:00	1
	M1A-Marmaray	23:26:00	23:30:00	4
	Marmaray-M1B*	00:06:00	23:55:00	-
	Marmaray-M1B	23:51:00	23:55:00	4
	Marmaray-M1B	23:30:00	23:36:00	6
	M1B-Marmaray	23:59:00	00:06:00	7
	M1B-Marmaray*	23:27:00	23:30:00	3
	M1B-Marmaray	23:27:00	23:38:00	11
	Marmaray-M2*	00:06:00	00:00:00	-
	Marmaray-M2	23:51:00	00:00:00	9
	Marmaray-M2	23:30:00	23:40:00	10
	M2-Marmaray	23:59:00	00:06:00	7
	M2-Marmaray	23:26:00	23:30:00	4
	M2-M1A	23:54:00	00:00:00	6
	M1A-M2	23:56:00	00:00:00	4
	M2-M1B	23:44:00	23:55:00	11
	M1B-M2	23:57:00	00:00:00	3
Ayrılıkçeşmesi	Marmaray-M4	23:55:00	00:01:00	6
	Marmaray-M4	23:41:00	23:52:00	11
	M4-Marmaray*	00:37:00	23:55:00	-
	M4-Marmaray	23:44:00	23:55:00	11
	M4-Marmaray*	00:37:00	23:41:00	-
	M4-Marmaray	23:35:00	23:41:00	6
Üsküdar	Marmaray-M5*	23:59:00	23:59:00	0
	Marmaray-M5	23:50:00	23:59:00	9
	Marmaray-M5	23:37:00	23:42:00	5
	M5-Marmaray*	23:58:00	23:59:00	1
	M5-Marmaray	23:49:00	23:59:00	10
	M5-Marmaray*	23:58:00	23:37:00	-
	M5-Marmaray	23:32:00	23:37:00	5

4.2 Yolcu Sayıları

Bu bölümde, öncelikle Metro İstanbul A.Ş. hatları ve Marmaray’ın yolcu verileri ile ilgili bilgiler verilmiştir. Ardından, örnek hatlardaki yolcu sayıları hem 2024 yılı için

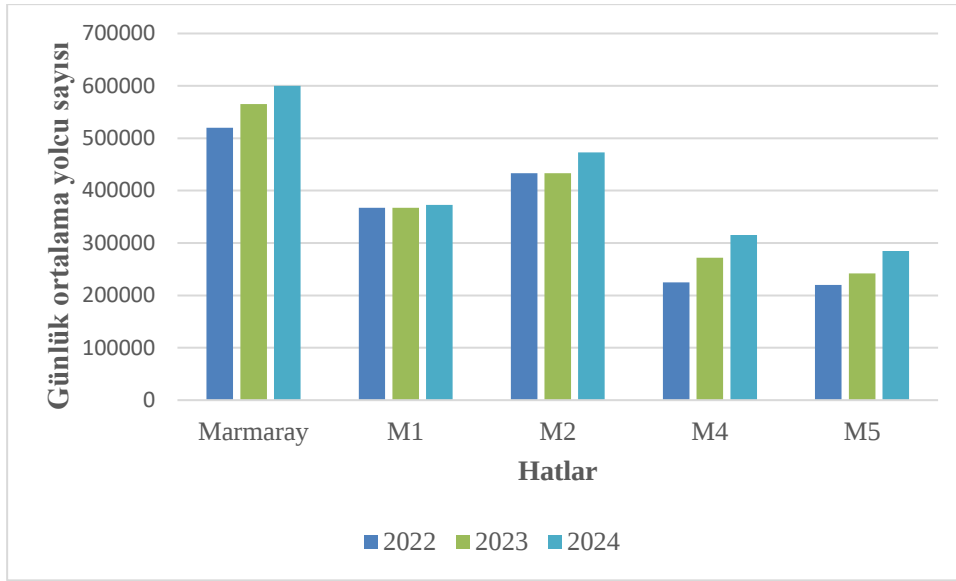
hem de geçmiş yıllara ait karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Daha sonra, sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda kullanılacak olan transfer yolcu sayılarına ait bilgiler yer almaktadır. Şekil 4.2’de Marmaray ve Metro İstanbul’daki hatların 2024 yılına ait günlük ortalama taşınan yolcu sayıları bulunmaktadır.



Şekil 4.2 : Marmaray ve Metro İstanbul hatlarında günlük ortalama taşınan yolcu sayısı.

Şekil 4.2’de, çalışmanın yapıldığı Marmaray, M1, M2, M4 ve M5 hatlarındaki günlük ortalama yolcu sayılarının yüksek olduğu görülmektedir. Örnek hatlarda taşınan yolcu sayıları İstanbul’da kent içi raylı sistemler ile seyahat eden yolcuların yaklaşık %66’sını, bir başka ifadeyle üçte ikisini oluşturmaktadır.

Şekil 4.3’de örnek hatların son üç yılına ait günlük ortalama yolcu sayıları verilmiştir. Grafikte; Marmaray, M4 ve M5 hatlarında günlük ortalama yolcu sayılarının her yıl arttığı, M2 hattında 2024 yılında bir artış olduğu ve M1 hattında ise diğer hatlara nazaran günlük ortalama taşınan yolcu sayılarındaki artışın durağan olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3 : Marmaray ve Metro İstanbul hatlarında son üç yıla ait günlük ortalama taşınan yolcu sayıları.

Söz konusu hatlardaki transfer yolcu sayılarına baktığımızda ise, Çizelge 4.5’de olduğu gibi, M1, M2, M4 ve M5 hatlarına kent içi raylı sistem kullanıp, aktarma yaparak binen yolcuların yaklaşık %60 ile %70 arasında değişen oranlarının, çalışma yaptığımız hatlar arasındaki transferlerden kaynaklandığı görülmektedir. Çizelge 4.5’e göre: Yenikapı İstasyonu’nda M1 hattına kent içi raylı sistemlerden transfer olan yolcuların %61’i M2 hattından ve Marmaray’dan transfer olan yolculardan, M2 hattına kent içi raylı sistemlerden transfer olan yolcuların ise %66’sı M1 hattından ve Marmaray’dan transfer olan yolculardan oluşmaktadır. Aynı şekilde, kent içi raylı sistemlerden M4 hattına transfer olan yolcuların %73’ü Ayrılıkçeşme İstasyonu’nda, M5 hattına ise %71’i Üsküdar İstasyonu’nda Marmaray’dan transfer olan yolculardan oluşmaktadır.

Çizelge 4.5 : Örnek hatlara transfer istasyonlarında transfer olan yolcuların örnek hatların toplam kent içi raylı sistem transfer yolcu sayısına oranları.

Örnek Hatlar	Transfer İstasyonu	Transfer istasyonlarında transfer olan yolcuların toplam kent içi raylı sistem transfer yolcu sayısına oranları
M1	Yenikapı	61%
M2		66%
M4	Ayrılıkçeşmesi	73%
M5	Üsküdar	71%

4.3 Transfer Süreci

Bu bölümde, öncelikle yolcuların transfer süreçleri, transfer süresinin nasıl hesaplandığı açıklanmakta, sonra, transfer süresinin nasıl bulunduğu bir örnek üzerinde detaylı bir şekilde anlatılmaktadır.

Yolcular, transfer süreçlerinde yatay ve düşey dolaşım elemanlarını kullanarak, transfer olacağı hatta ulaşabilir. Yatay ve düşey dolaşım elemanlarını aşağıdaki gibi sıralayabiliriz:

- Düşey Dolaşım Elemanları:
 - a. Asansör
 - b. Merdiven
 - c. Yürüyen Merdiven
- Yatay Dolaşım Elemanları:
 - a. Peron
 - İniş Peronu
 - Biniş Peronu
 - b. Turnike Bölgesi

Yolcuların transfer sürelerini hesaplariken, Denklem 4.1’de görüldüğü gibi, peronda yürüme süreleri, yürüyen merdivenlerde yürüme süreleri ve turnike bölgesinde yürüme süreleri kullanılmıştır.

$$TS = PS + YMS + YAS + YMS + PS \quad (4.1)$$

TS = Transfer süresi

PS = İnilen ya da binilen vagon ile yürüyen merdiven arasındaki yürüme süresi

YMS = Yürüyen merdivende geçen süre

YAS = Yürüme alanında geçen süre

4.3.1 Peronda yürüme süresi

Peronda yürüme süresi hesabında, yolcuların hızları ve yürüyen merdivenlere olan mesafeleri kullanılmaktadır. Bu yüzden vagonlardaki yolcu sayıları ya da vagonlara

binmek için peronda bekleyen yolcu sayıları, peronda yürüme süresi hesabında önemli bir parametre olmaktadır. Yolcuların peronlardaki dağılımları ile yapılmış bazı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalarda genel olarak yolcuların tercihlerinde, kendilerine en yakın kapıdan binmeleri ya da inecekleri istasyondaki çıkışa en yakın kapıdan binmeleri ön plana çıkmaktadır [87-89]. Kim ve diğ. (2014) yaptıkları çalışmada, yolcuların %76,6'sının bineceği vagonu seçmekte ve bu kişilerin de büyük çoğunluğunun inecekleri istasyonda çıkışa yakın olan yerden binmeyi tercih ettikleri belirtilmiştir [88]. Genellikle metro hatlarında vagonlardaki yolcu dağılımları eşit olmayacağı için, yolcuların yürüyen merdivenlere erişim süreleri de farklı olacaktır. Çalışmada bu farklılığı ortaya koyabilmek için örnek hatta işletilen trenlerin vagonlarındaki yolcu dağılımları günün belirli zaman dilimlerinde gözlemlenmiş, vagonlardaki ve peronlardaki ortalama yolcu dağılımı bulunmuştur.

4.3.2 Turnike bölgesi yürüme süresi

Transfer istasyonuna gelen trenden inen yolcu yürüyen merdivenden yukarı çıktıktan sonra, transfer olacağı perona inmeden önce yürüdüğü alanda geçirdiği süre, turnike bölgesindeki yürüme süresi olarak adlandırılmıştır. Yolcuların bu mesafeyi geçirdikleri süre göz önünde bulundurularak, ortalama hızları hesaplanmıştır.

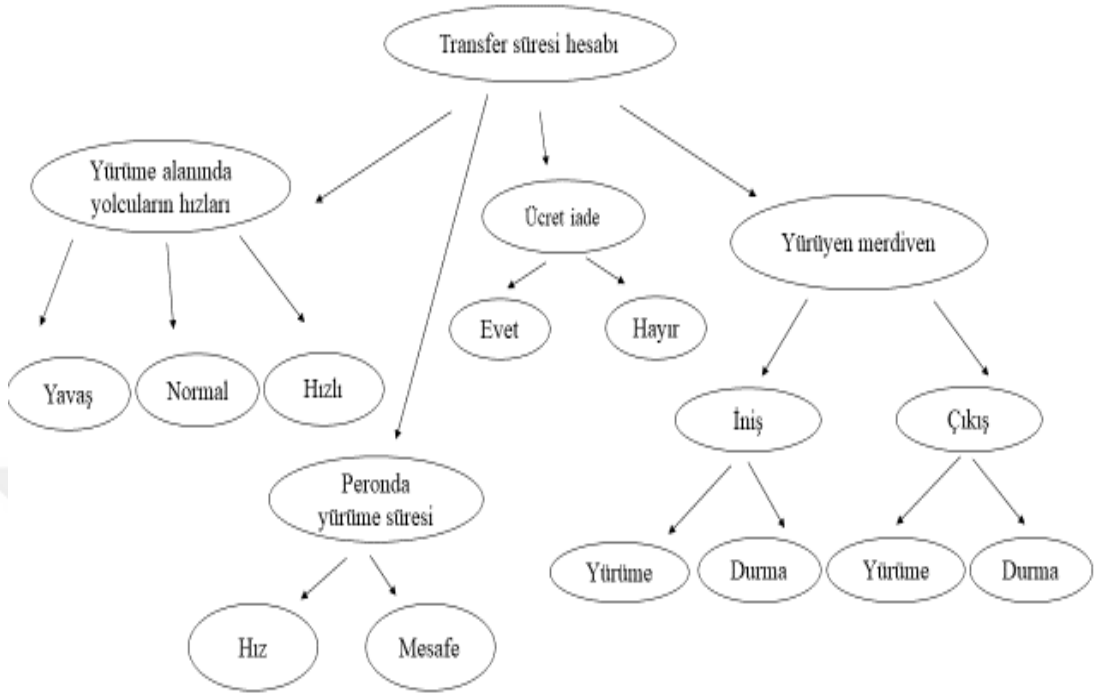
4.3.3 Yürüyen merdiven yürüme süresi

Yolcuların yürüyen merdivende geçirdikleri süre de, transfer süresinin hesabında kullanılan diğer parametredir. Çıkış merdiveni ve iniş merdiveni olmak üzere 2 tane yürüyen merdiven bulunmaktadır. Yürüyen merdivenlerde yolcuların hızlarının hesaplanabilmesi için, yatay ve düşey mesafe bilinmesi gerektiğinden, bu bölümde hesap kolaylığı açısından yürüyen merdivenlerde yolcuların geçirdikleri süre hesaba katılmıştır. Normal şartlarda yolcular arasında normal merdiven ya da asansör kullanan yolcular çıkabilir, fakat yaptığımız ölçümlerde bu yolcuların oranının yaklaşık %2 olmasından dolayı, düşey dolaşım elemanı olarak yürüyen merdiven kabul edilmiştir.

4.3.4 Transfer süresinin belirlenmesi

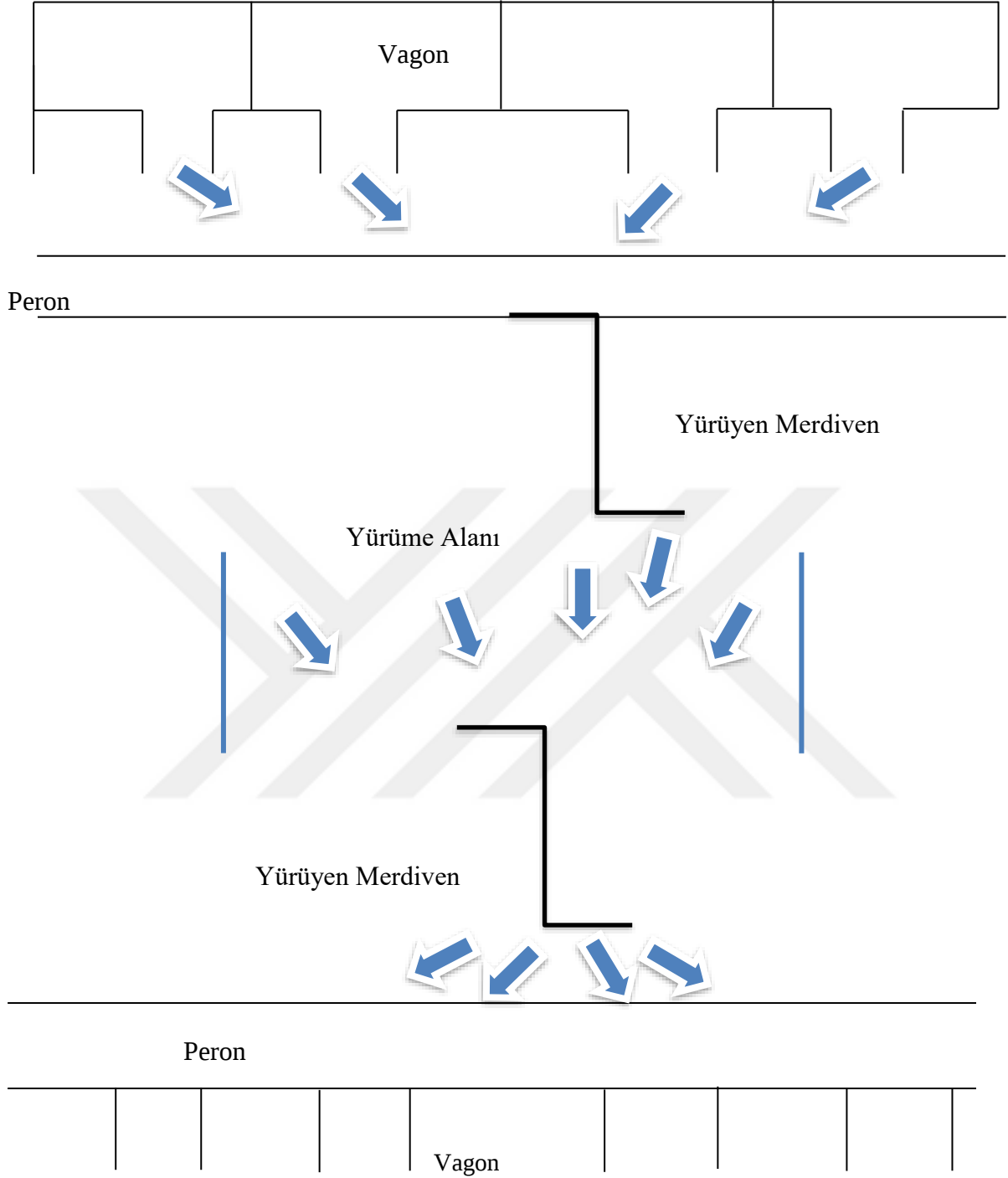
Bu bölümde, kent içi raylı sistem sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda kullandığımız transfer sürelerinin ölçümünün ve hesaplanmasının nasıl yapıldığını anlatabilmek adına, örnek hatlarımızdan Marmaray ve M2 arasındaki transfer süreci

detaylı olarak incelenmektedir. Transfer süresi hesabı ve adımları Şekil 4.4’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : Transfer süresi hesabı.

Transfer süresi hesabı için yapılan örnekte, İstanbul’un kent içi raylı sistem ağının en önemli transfer istasyonlarından Yenikapı istasyonunda, Marmaray ve M2 hatları arasındaki transfer süreci incelenmiştir. Şekil 4.5’de sembolize edilmeye çalışılan transfer sürecinde görüldüğü gibi, Yenikapı istasyonuna gelen trenden inen yolcular, ilk olarak peronda yürüyen merdivene doğru yürürler, daha sonra yürüyen merdivenden çıktıktan sonra transfer olacakları hattın turnike bölgesine doğru hareket ederler. Yürüyen merdivenden indikten sonra, transfer olacağı trenin istediği vagonuna binerler.



Şekil 4.5 : Yolcuların transfer süreçleri.

Yolcuların perondaki yürüme sürelerine, hangi vagonlardan indikleri ya da hangi vagona binecekleri etki ettiği için, önce vagonların ortalama doluluk oranlarını hesaplamak gerekir.

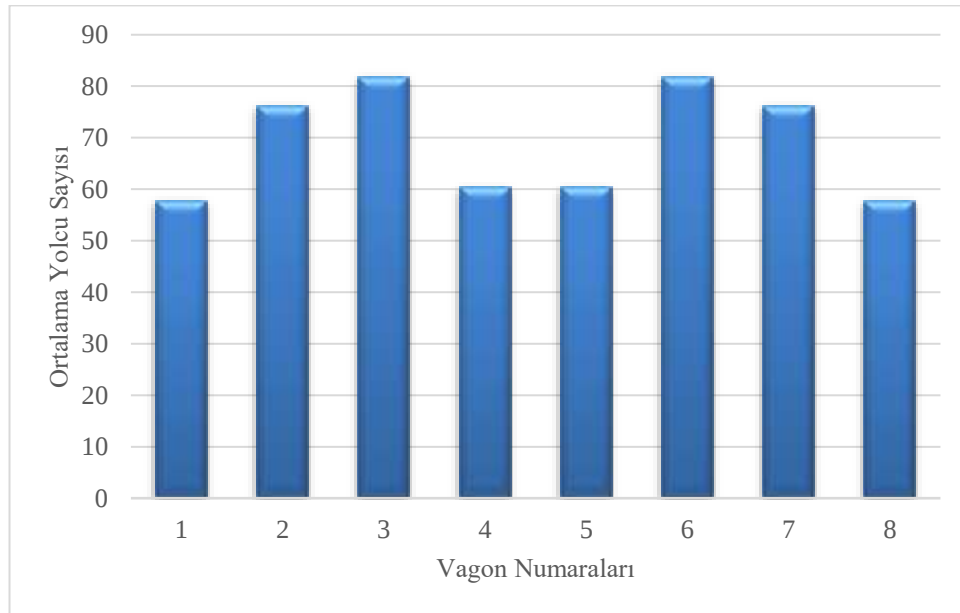
4.3.4.1 Vagonların ortalama doluluk oranları

Yolcu sayımları Yenikapı transfer istasyonunda M2 hattına binen yolcuların vagonlardaki dağılımını tespit edebilmek için yapılmıştır. Yenikapı istasyonunda M2 hattına yolcuların binebilmesi için 2 tane yürüyen merdiven bulunmaktadır. M2 hattında işletilen trenler 8 vagonludur ve her vagonun 4 kapısı bulunmaktadır. Yürüyen merdivenlerin en yakın olduğu vagon 3. vagon, diğer yürüyen merdivenin en yakın olduğu kapı ise 6. vagonudur. 3. ve 6. vagonların ilk kapısı yürüyen merdivenlerin en yakın olduğu kapılardır.

Çizelge 4.6 : M2 hattında zaman dilimlerine göre yapılan ölçüm sayıları.

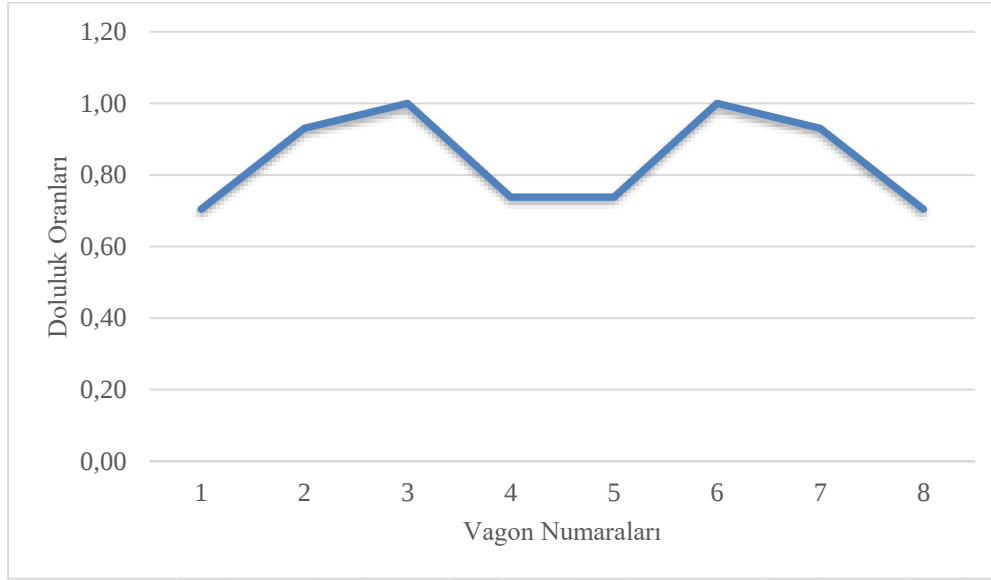
Zaman dilimleri	Ölçüm sayısı
06:00-06:59	8
07:00-08:59	10
09:00-16:59	8
17:00-19:59	10
20:00-22:59	8
23:00-23:59	10

Yolcuların, M2 hattına binmek için indikleri perondaki dağılımları ve trene bindikten hemen sonra Yenikapı istasyonunda vagonlardaki dağılımlarını tespit edebilmek için, 19 Ocak-20 Haziran 2022 tarihleri arasında Çizelge 4.6’da belirtilen zaman dilimlerinde ve sayılarda toplam 52 tane yolcu sayımı yapılmıştır. Yapılan sayımlara göre, vagonlardaki ortalama yolcu sayıları Şekil 4.6’da gösterilmiştir.



Şekil 4.6 : M2 hattında vagonlardaki ortalama yolcu sayıları.

Buna göre, ortalama yolcu sayısının en fazla olduğu 3. ve 6. vagonlardır. Vagonlardaki ortalama yolcu sayılarına göre, vagonların doluluk oranları birbirine oranlandığında, Şekil 4.7’deki değerler oluşmaktadır. En yüksek ortalama yolcu sayısının olduğu 3. ve 6. vagonlar 1 puan olarak değerlendirilmiştir. Buna göre, 1. ve 8. vagonlar 0,7, 2. ve 7. vagonlar 0,93, 4. ve 5. vagonlar ise 0,74 değerini almışlardır. Elde edilen bu değerler, yolcuların peronda yürüme sürelerinin hesaplanmasında kullanılmıştır.



Şekil 4.7 : M2 hattında vagonlardaki ortalama doluluk oranları.

Marmaray’da vagonlardaki yolcu dağılımları için yapılan gözlemlerde, vagonlardaki yolcu sayılarının birbirine yakın olduğu tespit edilmiştir. 10 vagonlu trenlerle işletilmesi ve çok fazla istasyondan yolcu alması vagonlardaki yolcu sayılarının homojen dağılıma sahip olmasındaki önemli etkenler olarak belirlenmiştir. Bu yüzden, Marmaray trenlerinin vagonlarındaki yolcu dağılımları eşit kabul edilmiştir.

4.3.4.2 Yolcuların peronda yürüme süreleri

Yolcuların peronda yürüme sürelerini tespit edebilmek için, Marmaray ve M2 hattı peronunda, 19 Ocak - 20 Haziran 2022 tarihleri arasında Çizelge 4.6’da belirtilen toplam 52 ölçüme göre, yürüyen merdivenlerden, trenin en yakın kapısına ulaşım süresi 5 ve 7 olmak üzere ortalama 6 saniyedir. Kapılar arasındaki yürüme süresi ise yaklaşık 4 saniyedir.

10 vagonlu Marmaray ve 8 Vagonlu M2 hattı trenlerinden, vagon numaralarına göre yürüyen merdivene erişim süreleri Çizelge 4.7 ve 4.8’de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Yolcuların Marmaray yürüyen merdiven arası yürüme süreleri.

Vagon No	1				2				3				4				5			
Kapı No	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Süre (sn)	54	50	46	42	38	34	30	26	22	18	14	10	6	10	14	18	22	26	30	34
Ortalama Süre (sn)	48				32				16				12				28			
En Hızlı Süre (sn)	40	37	34	31	28	25	22	19	16	13	10	7	4	8	10	13	16	19	22	25
En Hızlı Ortalama Süre (sn)	35,5				23,5				11,5				8,75				20,5			

Yolcuların perondaki ortalama yürüme hızları Çizelge 4.8'e göre hesaplanmıştır.

Çizelge 4.8 : Yolcuların yürüyen merdiven metro arası yürüme süreleri.

Vagon No	1				2				3				4			
Kapı No	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Süre (sn)	38	34	30	26	22	18	14	10	6	10	14	18	22	26	30	34
Ortalama Süre (sn)	32				16				12				28			
En Hızlı Süre (sn)	22	19	16	13	22	19	16	13	22	19	16	13	22	19	16	13
En Hızlı Ortalama Süre (sn)	23,5				11,5				8,5				20,5			

Çizelge 4.8'e göre, yürüyen merdivene en uzak konumdaki 1. vagonun 1. kapısından, yürüyen merdivene erişim süresi 38 saniye bulunmuştur. Bu mesafenin yaklaşık 47-48 metre olduğu düşünüldüğünde ortalama hız olarak 1,25 m/s bulunmuştur. Daha önce yapılmış çalışmalarda yolcuların ortalama hızlarının 1-1,8 m/sn aralığında olduğu düşünüldüğünde, bulunan değer ortalama bir değer olduğu görülmektedir [90-92]. En düşük ortalama hız yaklaşık 1,72 m/sn, 103 m/dakika iken, en yüksek ortalama hız yaklaşık 0,92 m/s, 55 m/dakika olarak tespit edilmiştir.

4.3.4.3 Yolcuların yürüyen merdivende yürüme süreleri

Transfer olan yolcuların yürüyen merdivende geçirdikleri süreyi hesaplamak adına iniş ve çıkış ayrı ayrı 32 ölçüm yapılmıştır. Ölçümler neticesinde bulunan değerler Çizelge 4.9'da gösterilmiştir. Çizelge 4.9'da görüldüğü gibi, çıkış yürüyen merdiveninde ortalama süre 18,9 sn iken, iniş yürüyen merdiveninde bu süre 16 sn olarak

görülmektedir. Minimum ve maksimum süreler, çıkışta 14 ve 23, inişte ise 12 ve 20 saniye olarak tespit edilmiştir. Literatürdeki çalışmalarda, yolcuların iniş merdivenindeki hızlarının çıkış merdivenine göre %10-20 arasında fazla olduğu bulunmuştur [90, 93]. Bu kapsamda çalışmada iniş ve çıkış merdivenlerinde bulunan %15 oranın, literatürdeki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmektedir.

Çizelge 4.9 : Yolcuların yürüyen merdivende geçirdikleri süreler.

Süre (sn.)	Çıkış	İniş
Ortalama	18,9	16
Maksimum	23	20
Minimum	14	12
Medyan	18,5	16
Standart Sapma	2,9	1,75

4.3.4.4 Yolcuların ortalama transfer süreleri

Marmaray - M2 metro hattı arasında transfer olan yolcuların ortalama hızlarını bulmak için yapılan çalışma sonucunda ortalama transfer süresi 127,4, en yüksek ortalama süre 173,5 ve en düşük ortalama süre ise 91 saniye olarak bulunmuştur. Çizelge 4.10'daki değerlerin hepsi ortalama değerlerdir. Bu verilere göre transfer süreleri; pik saatlerde yapılan ölçümlerde istasyon yoğunluğunun fazla olmasından dolayı yolcuların ortalama transfer sürelerinin en yüksek ortalama transfer süresi, son trene yetişmek için hızlı hareket eden yolcuların ortalama transfer sürelerinin en düşük ortalama süresi ve diğer zamanlardaki transfer sürelerinin ise ortalama transfer süresi olarak alınmıştır.

Çizelge 4.10 : Yolcuların ortalama transfer süreleri.

Transfer Aşamaları	Ortalama Süre (sn)	En Düşük Süre (sn)	En Yüksek Süre (sn)
Marmaray-Yürüyen merdiven	27,2	19,9	37,2
Yürüyen merdiven çıkış	18,9	14	23
Turnike bölgesi	44,6	30	65
Yürüyen merdiven iniş	16	12	20
Yürüyen merdiven-M2 hattı	20,8	15,1	28,3
Toplam	127,5	91	173,5

4.4 Transfer Süreleri

Bir önceki bölümde yolcuların transfer süreçleri detaylı bir şekilde anlatılarak, yapılan ölçümler neticesinde transfer süresinin nasıl hesaplandığı Marmaray-M2 hattı örneğinde gösterilmiştir. Bu bölümde ise, örnek hatlarımızda yaptığımız ölçümler

neticesinde elde edilen yolcuların transfer süreleri ve transfer sürelerinin dağılımı ile ilgili veriler paylaşılmaktadır, ölçümler esnasında yaptığımız varsayımlar ve kabuller aşağıdaki gibidir.

4.4.1 Varsayımlar ve kabuller

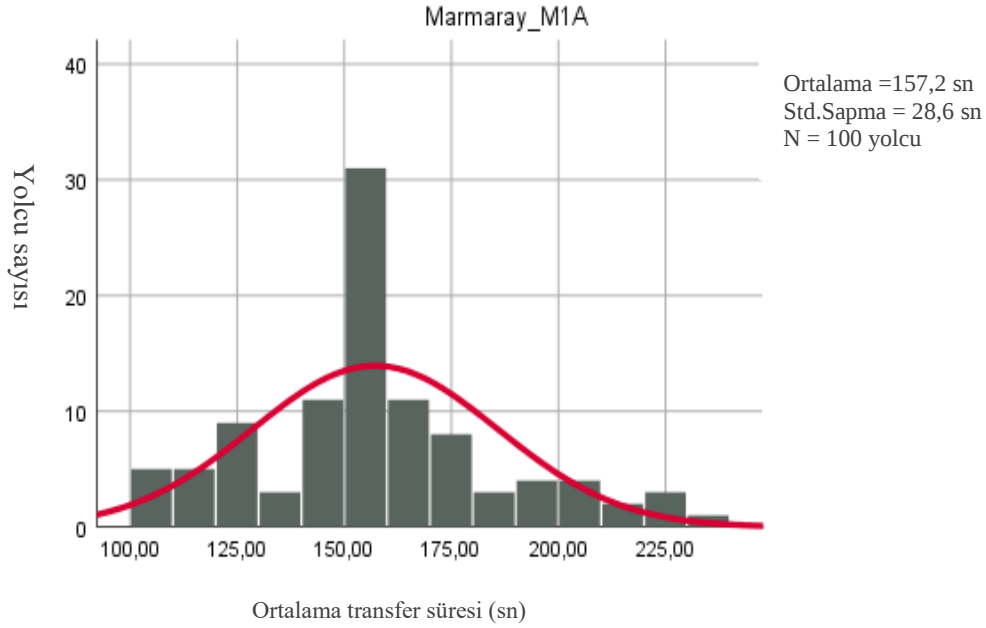
Kent içi raylı sistem sefer çizelgesinin senkronizasyonu için geliştirilen modelde kullanılan yolcuların transfer sürelerinin tespiti için yapılan ölçümlerde, daha makul sonuçlar elde edebilmek adına bazı varsayımlar ve kabuller yapılmıştır. Bu varsayımlar ve kabuller aşağıdaki gibidir:

- Yolcuların transfer istasyonlarında beklemeden, yürüyerek aktarma yapacakları perona gideceği kabul edilmiştir. Bu yüzden transfer esnasında bekleyen yolcular değerlendirmeye alınmamıştır.
- Transfer olunacak trenlerin kapasitesinin, transfer olmak için peronda bekleyen yolcu talebini karşılayacağı kabul edilmiştir.
- Yolcuların perona ilk gelen trene aktarma yapacağı, bir sonraki treni beklemek istemeyecekleri kabul edilmiştir.
- Yolcuların yaklaşık %2'lik bir kısmının yürüyen merdiven kullanmadan, normal merdiven ya da asansör kullandığı tespit edildiğinden, bu yolcular değerlendirmeye alınmamıştır.
- Yürüyen merdivenlerin sürekli çalıştığı kabul edilmiştir.

4.4.2 Sonuçlar

Yolcuların aktarma süreleri kent içi raylı sistem sefer çizelgelerinin senkronizasyonu için geliştirilen modelde kullanılan önemli parametrelerden biridir. Bu nedenle, yolcuların aktarma sürelerini tespit etmek için Yenikapı, Ayrılıkçeşmesi ve Üsküdar istasyonlarında gözlemler yapılmıştır. Marmaray, Yenikapı'da M2 metrosu ve M1 hafif metrosu ile entegredir. Yenikapı'da Marmaray-M1A, Marmaray-M1B, Marmaray-M2 ve M2-M1A ile M2-M1B hatları arasındaki transfer olan yolcular için Çizelge 4.6'da belirtilen zaman dilimlerinde ve sayıda Ocak-Haziran 2022 tarihleri arasında 52 gözlem yapılmıştır. Bu gözlemler neticesinde elde edilen istatistiki bilgiler ve grafikler aşağıda paylaşılmıştır.

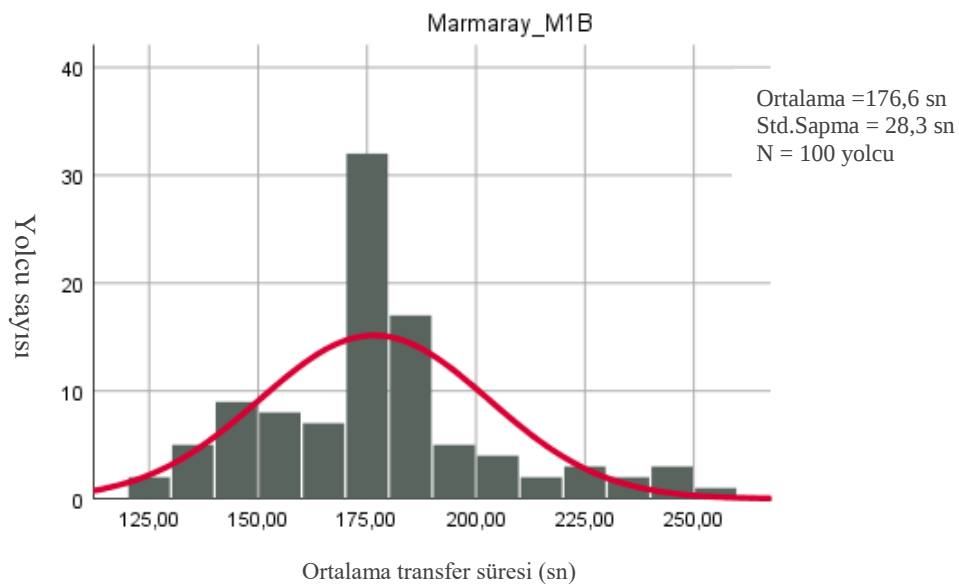
Şekil 4.8’de Marmaray-M1A hatları arasında transfer olan yolcuların transfer sürelerinin değişimi normal dağılım grafiği ile gösterilmiştir.



Şekil 4.8 : Marmaray – M1A arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.

Buna göre ortalama transfer süresi 157,2 saniye, standart sapma ise 28,6 saniyedir. En düşük transfer süresi 100, en yüksek transfer süresi ise 230 saniye olarak ölçülmüştür.

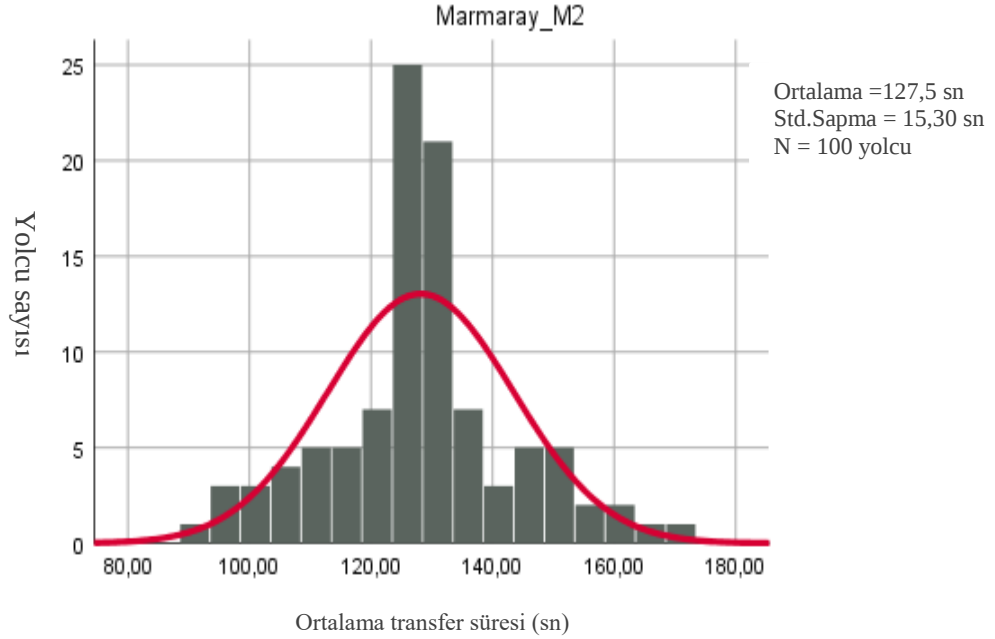
Şekil 4.9’de Marmaray-M1B hafif metro hattı arasında transfer olan yolcuların transfer sürelerinin değişimi normal dağılım grafiği ile gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : Marmaray - M1B arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.

Buna göre ortalama transfer süresi 176,6 saniye, standart sapma ise 28,3 saniyedir. En düşük transfer süresi 119, en yüksek transfer süresi ise 250 saniye olarak ölçülmüştür.

Yenikapı’da Marmaray’ın entegre olduğu metro hattı ise M2 hattıdır. Şekil 4.10’da Marmaray-M2 metro hattı arasında transfer olan yolcuların transfer sürelerinin değişimi normal dağılım grafiği ile gösterilmiştir.

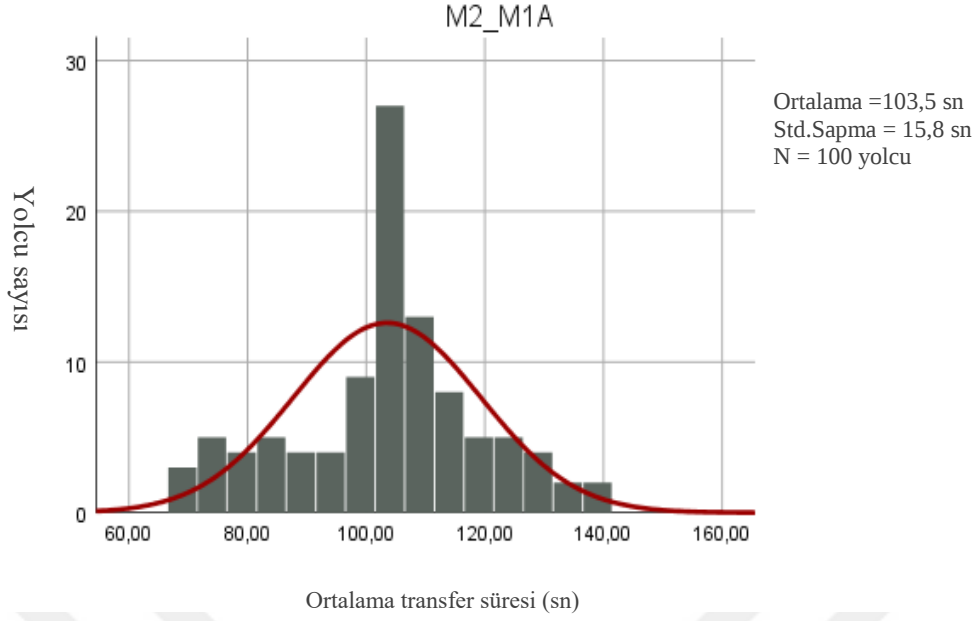


Şekil 4.10 : Marmaray – M2 arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.

Buna göre ortalama transfer süresi 127,5 saniye, standart sapma ise 15,3 saniyedir. En düşük transfer süresi 91, en yüksek transfer süresi ise 170 saniyedir.

Yenikapı’da Marmaray’ın haricinde, M2 metro hattı ile M1A ve M1B hafif metrolarının da entegrasyonu vardır. Her iki hattın işletimi Metro İstanbul’a ait olduğu için sefer çizelgeleri genelde senkronize olsa da, son tren senkronizasyonu çalışmaya dahil edildiği için bu transfer süreçleri ile ilgili ölçümler yapılmış ve grafikleri aşağıda verilmiştir.

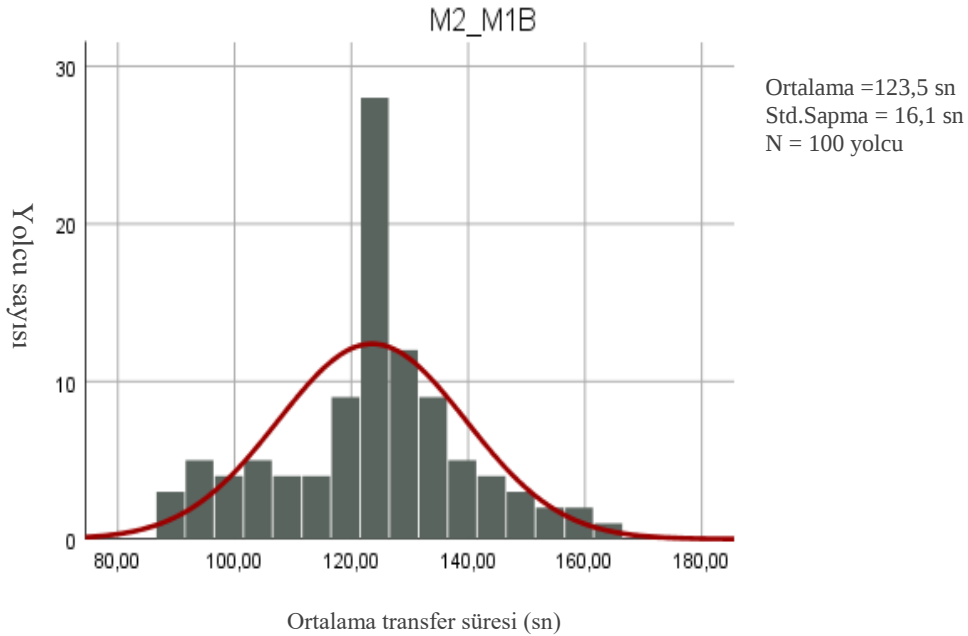
Şekil 4.11’de M2-M1A hatları arasında transfer olan yolcuların transfer sürelerinin değişimi normal dağılım grafiği ile gösterilmiştir.



Şekil 4.11 : M2 – M1A arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.

Buna göre ortalama transfer süresi 103,5 saniye, standart sapma ise 15,8 saniyedir. En düşük transfer süresi 69, en yüksek transfer süresi ise 141 saniye olarak ölçülmüştür.

Şekil 4.12’de ise, M2-M1B hatları arasında transfer olan yolcuların transfer sürelerinin değişimi normal dağılım grafiği ile gösterilmiştir.

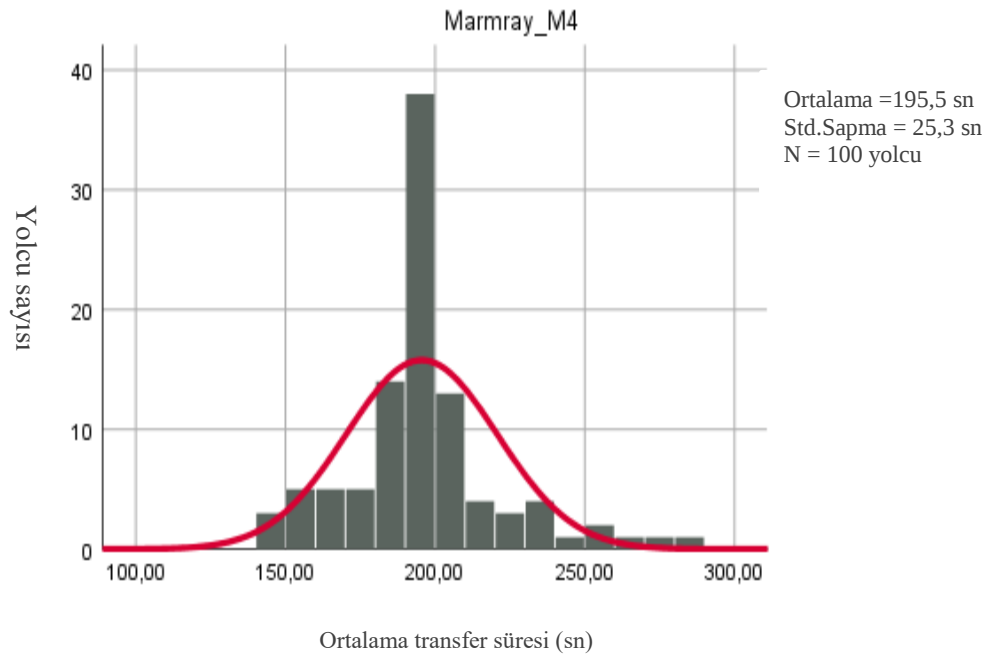


Şekil 4.12 : M2 – M1B arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.

Buna göre ortalama transfer süresi 123,5 saniye, standart sapma ise 16,1 saniyedir. En düşük transfer süresi 89, en yüksek transfer süresi ise 166 saniye olarak ölçülmüştür.

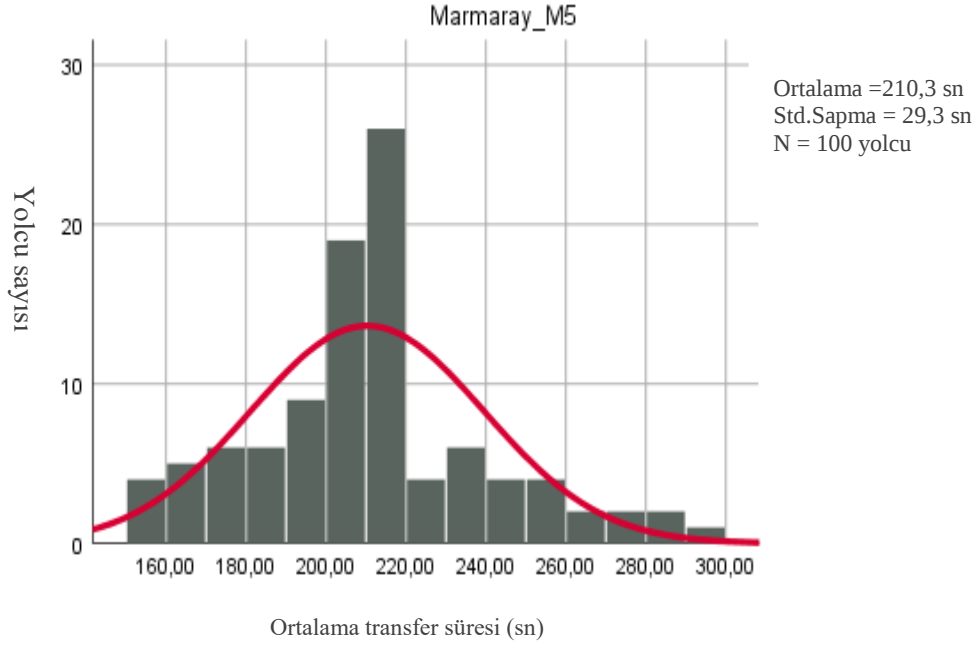
2023 Haziran ayında Ayrılıkçeşmesi ve Üsküdar'da Marmaray-M4 ve Marmaray-M5 hatları arasında transfer olan yolcuların transfer süreleri ile ilgili bilgi edinebilmek adına on gözlem yapılmıştır. Gözlemlerden elde edilen yolcuların aktarma sürelerinin normal dağılım grafikleri Şekil 4.13 ve Şekil 4.14'de verilmiştir.

Şekil 4.13'de Marmaray-M4 metro hattı arasında transfer olan yolcuların transfer sürelerinin değişimi normal dağılım grafiği ile gösterilmiştir. Buna göre ortalama transfer süresi 195,5 saniye, standart sapma ise 25,3 saniyedir. En düşük transfer süresi 140, en yüksek transfer süresi ise 280 saniye olarak ölçülmüştür. Transfer mesafesi Yenikapı İstasyonu'na göre daha fazla olduğu için en yüksek ve en düşük süreler arasındaki fark da daha fazla bulunmuştur.



Şekil 4.13 : Marmaray – M4 arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.

Şekil 4.14'de Marmaray-M5 metro hattı arasında transfer olan yolcuların transfer sürelerinin değişimi normal dağılım grafiği ile gösterilmiştir. Buna göre ortalama transfer süresi 210,3 saniye, standart sapma ise 29,3 saniyedir. En düşük transfer süresi 152, en yüksek transfer süresi ise 295 saniye olarak ölçülmüştür.



Şekil 4.14 : Marmaray – M5 arası transfer olan yolcuların transfer süreleri dağılımı.

Yukarıda detaylarını verdiğimiz örnek hatlar arasındaki transfer süresi bilgileri Çizelge 4.11’de özetlenmiştir.

Çizelge 4.11 : Örnek hatlar arasındaki transfer süreleri.

Transfer istasyonu	Transfer yönü	Transfer süresi (sn)			Standart sapma (sn)
		En küçük	Ortalama	En büyük	
Yenikapı	Marmaray↔M1A	100	157,2	230	28,6
	Marmaray↔M1B	119	176,6	250	28,3
	Marmaray↔M2	91	127,5	170	15,3
	M2↔M1A	69	103,5	141	15,8
	M2↔M1B	89	123,5	166	16,1
Ayrılıkçeşmesi	Marmaray↔M4	140	195,5	280	25,3
Üsküdar	Marmaray↔M5	152	210,3	295	29,3

5. SEFER ÇİZELGELERİNİN SENKRONİZASYONU MODELİNİN UYGULANMASI

Bu bölümde, kent içi raylı sistem sefer çizelgerinin senkronizasyonu için geliştirilen modelin, İstanbul kent içi raylı sisteminde uygulanmasının detayları ve sonuçları yer almaktadır. Giriş bölümünde de bahsedildiği gibi, geliştirilen model günlük sefer çizelgelerinin yanında, günün ilk ve son saati için de ayrı ayrı uygulanmıştır. Bu nedenle çalışma üç bölümde verilmektedir.

5.1 Günün İlk Saatinde Gerçek Transfer Süreleriyle Sefer Çizelgelerinin Senkronizasyonu

Bu bölümde, günün ilk saati için incelenen örnek hatlarda önce mevcut sefer çizelgelerine göre transfer olan yolcuların bekleme süreleri verilmiştir. Sonra GA ve BT ile geliştirilen senkronizasyon modelleriyle yapılan sefer çizelgelerine göre oluşan durum ortaya konularak yolcuların bekleme sürelerindeki değişim gösterilmiştir. Yolcuların transfer süreleri olarak Bölüm 4’de verilen gerçek değerler kullanılmıştır.

5.1.1 Mevcut sefer çizelgesine göre günün ilk saatinde transfer bilgileri

Çizelge 5.1’de günün ilk seferleri için, Yenikapı istasyonunda 21, Ayrılıkçeşme istasyonunda 7 ve Üsküdar istasyonunda 5 olmak üzere toplam 33 transfere ait bilgiler verilmiştir. Trenlerin varış ve kalkış zamanları Marmaray ve Metro İstanbul’dan alınmıştır. Transfer yolcu sayısı ise, hem Metro İstanbul’dan hem de yerinde yapılan ölçümlerden elde edilen ortalama değerlerdir. Yolcuların bekleme süresi, yolcuların transfer sürelerindeki dağılıma göre hesaplanmıştır. Çizelge 5.1’de günün ilk saatlerinde, transfer olan 450 yolcunun toplam bekleme süresi 2135 dakika olmuştur. Yolcu başına düşen bekleme süreleri ise 10 saniye ile 450 saniye arasında değişmektedir.

Çizelgelerde (*) ile gösterilen satırlarda, yolcuların bir kısmı ilk trene aktarma yapabilirken, geri kalanı bir sonraki trene aktarma yapabilmektedir. Buradaki yolcuların ortalama bekleme süreleri bu durum göz önünde bulundurularak hesaplanmıştır.

Çizelge 5.1 : Günün ilk saatinde transfer yolcuların bekleme süreleri.

Transfer İstasyonu	Transfer Yönü	Varış Zamanı	Kalkış Zamanı	Transfer Yolcu Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (sn/yolcu)	Toplam Bekleme Süresi (dk.)
Yenikapı	Marmaray-M1A*	06:06:00	06:08:00	2	10	-
	Marmaray-M1A	06:06:00	06:16:00	13	305	66
	Marmaray-M1A	06:15:00	06:24:00	15	375	94
	Marmaray-M1A	06:00:00	06:08:00	10	315	53
	Marmaray-M1A	06:08:00	06:16:00	15	315	79
	M1A-Marmaray	06:29:00	06:36:00	10	255	43
	M1A-Marmaray	06:29:00	06:38:00	15	375	94
	Marmaray-M1B	06:06:00	06:12:00	10	175	29
	Marmaray-M1B	06:15:00	06:20:00	10	115	19
	Marmaray-M1B	06:00:00	06:04:00	10	55	9
	Marmaray-M1B	06:08:00	06:12:00	10	55	9
	M1B-Marmaray	06:23:00	06:29:00	15	175	44
	M1B-Marmaray	06:23:00	06:30:00	15	235	59
	Marmaray-M2	06:06:00	06:12:00	20	230	77
	Marmaray-M2	06:15:00	06:20:00	20	170	57
	Marmaray-M2	06:00:00	06:04:00	15	110	28
	Marmaray-M2	06:08:00	06:12:00	15	110	28
	M2-Marmaray	06:29:00	06:36:00	10	290	48
	M2-Marmaray	06:36:00	06:44:00	10	350	58
	M2-Marmaray	06:29:00	06:38:00	10	410	68
	M2-Marmaray	06:36:00	06:45:00	10	410	68
Ayrılıkçeşmesi	Marmaray-M4	06:10:00	06:19:00	10	330	55
	Marmaray-M4	06:17:00	06:28:00	10	450	75
	Marmaray-M4	06:11:00	06:19:00	40	270	180
	Marmaray-M4	06:19:00	06:28:00	30	330	165
	M4-Marmaray	06:38:00	06:48:00	30	390	195
	M4-Marmaray*	06:38:00	06:41:00	2	20	1
	M4-Marmaray	06:38:00	06:49:00	8	430	57
	Marmaray-M5	05:59:00	06:09:00	10	376	63
Üsküdar	Marmaray-M5	06:07:00	06:18:00	10	436	73
	M5-Marmaray	06:35:00	06:45:00	30	376	188
	M5-Marmaray	06:35:00	06:44:00	10	316	53

5.1.2 Senkronize sefer çizelgesine göre günün ilk saatinde transfer bilgileri

Günün ilk saati için geliştirilen sefer çizelgelerinin senkronizasyonu modelinin amacı Denklem 5.1’de ifade edildiği gibi, transfer olan yolcuların bekleme sürelerini düşürmektir.

$$W = \min \sum_{s_i \in S} \sum_{l_i \in L} N_{s,l_i-l_j} \times t_{s,l_i-l_j}^w \quad (5.1)$$

Denklem 5.1’de;

W = s transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına transfer olan yolcuların toplam bekleme süresi

s = transfer istasyonu

l = kent içi raylı sistem hattı

N_{s,l_i-l_j} = s transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına transfer olan yolcu sayısı

$t_{s,l_i-l_j}^w$ = s transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına transfer olan yolcunun bekleme süresidir.

$$t_{s,l_i-l_j}^w = t_{s,l_j}^d - t_{s,l_i}^a - t_{s,l_i-l_j}^{tr} \quad (5.2)$$

Denklem 5.2’de;

t_{s,l_j}^d = l_j hattındaki trenin s transfer istasyonundan kalkış zamanı

t_{s,l_i}^a = l_i hattındaki trenin s transfer istasyonuna varış zamanı

$t_{s,l_i-l_j}^{tr}$ = s transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına transfer olan yolcunun transfer süresidir.

$$t_{s,l_i}^d = t_{s_0,l_i}^d + \sum_{s_i \in S} t_{s_i,l_i}^r + \sum_{s_i \in S} t_{s(s-1),l_i}^{dw} + t_{s,l_i}^{dw} \quad (5.3)$$

$$t_{s,l_2}^a = t_{s_0,l_2}^d + \sum_{s_i \in S} t_{s(s-1),l_2}^r + \sum_{s_i \in S} t_{s(s-1),l_2}^{dw} \quad (5.4)$$

Denklem 5.3 ve 5.4’de;

t_{s_0,l_i}^d = l_i hattındaki trenin s_0 istasyonundan kalkış zamanı

t_{s,l_i}^r = l_i hattındaki trenin s istasyonuna kadar hareket süresi

$t_{s(s-1),li}^{dw} = l_i$ hattındaki trenin transfer istasyonundan bir önceki istasyona kadarki, istasyonlardaki bekleme süreleri

$t_{sli}^{dw} = l_i$ hattındaki trenin s transfer istasyonundaki bekleme süresi

GA ile oluşturulan modelde, öncelikle trenlerin kalkış ve varış zamanları arasındaki maksimum ve minimum farklar arasında olacak şekilde başlangıç popülasyonu oluşturulur. Başlangıç popülasyonunda, Çizelge 5.1'deki trenlerin hareket saatlerine göre oluşturulan Şekil 5.1'deki kromozom vektörü kullanılmıştır.

$$\begin{bmatrix} t_{s,l1}^{d1} - t_{s,l2}^{a1} & t_{s,l1}^{d2} - t_{s,l2}^{a2} & \dots & t_{s,l1}^{dd} - t_{s,l2}^{ad} \\ t_{s,l1}^{d1} - t_{s,l3}^{a1} & t_{s,l1}^{d2} - t_{s,l3}^{a2} & \dots & t_{s,l1}^{dd} - t_{s,l3}^{ad} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{s,l1}^{d1} - t_{s,ln}^{a1} & t_{s,l1}^{d2} - t_{s,ln}^{a2} & \dots & t_{s,l1}^{dd} - t_{s,ln}^{ad} \end{bmatrix}$$

Şekil 5.1 : GA günün ilk saati kromozom vektörü.

İncelenen transfer istasyonunda herhangi bir saatte hareket eden tren sayısı gen sayısını oluşturmaktadır. Transfer yolcuları dikkate alındığından kesişen hatların sayısı da Şekil 5.1'deki vektörün sütun sayısını oluşturmaktadır.

Algoritmanın popülasyon büyüklüğü 50, çaprazlama olasılığı 0,95 ve mutasyon olasılığı 0,01'dir. Çizelge 5.2'de gösterildiği gibi iterasyon sayısı ise 50'dir.

Çizelge 5.2 : GA modelinde kullanılan parametrelerin bilgileri

Parametre	Açıklama	Değer
PN	Popülasyon büyüklüğü	50
p_{cross}	Çaprazlama olasılığı	0.95
$p_{mutasyon}$	Mutasyon olasılığı	0.01
NI	İterasyon sayısı	50

GA ile kurulan senkronizasyon modeli, Intel Core i5 2.5 GHz ve 8 GB RAM'e sahip dizüstü bilgisayarda Matlab R2020a programında kodlanıp, çözülmüştür.

Çizelge 5.3, ilk tren tarifelerini senkronize etmek için GA ile yapılan optimizasyon sonucunda oluşan ilk tren sefer çizelgeleri ve yolcuların transfer bilgilerini göstermektedir.

Çizelge 5.3 : GA kullanılarak günün ilk saati için oluşturulan sefer çizelgesi ve yolcuların bekleme süreleri.

Transfer İstasyonu	Transfer Yönü	Varış Zamanı	Kalkış Zamanı	Transfer Yolcu Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (sn/yolcu)	Toplam Bekleme Süresi (dk.)
Yenikapı	Marmaray-M1A	06:06:00	06:10:10	15	135	34
	Marmaray-M1A	06:15:00	06:20:10	15	195	49
	Marmaray-M1A	06:00:00	06:05:10	10	195	33
	Marmaray-M1A*	06:07:00	06:10:10	13	45	10
	Marmaray-M1A	06:07:00	06:15:10	2	280	9
	M1A-Marmaray	06:30:00	06:36:00	10	195	33
	M1A-Marmaray	06:30:00	06:37:00	15	255	64
	Marmaray-M1B	06:06:00	06:11:10	10	65	11
	Marmaray-M1B	06:15:00*	06:17:50	3	25	1
	Marmaray-M1B	06:15:00	06:24:30	7	360	42
	Marmaray-M1B	06:00:00	06:04:40	10	95	16
	Marmaray-M1B	06:07:00	06:11:10	10	65	11
	M1B-Marmaray	06:23:30	06:29:00	15	145	36
	M1B-Marmaray	06:23:30	06:30:00	15	205	51
	Marmaray-M2	06:06:00	06:11:30	20	200	67
	Marmaray-M2	06:15:00	06:19:15	20	125	42
	Marmaray-M2	06:00:00	06:03:45	15	95	24
	Marmaray-M2	06:08:00	06:11:30	15	80	20
	M2-Marmaray	06:30:00	06:36:00	10	230	38
	M2-Marmaray	06:36:00	06:44:00	10	350	58
Ayrılıkçeşmesi	M2-Marmaray	06:30:00	06:37:00	10	290	48
	M2-Marmaray	06:36:00	06:45:00	10	410	68
	Marmaray-M4	06:10:00	06:17:30	10	240	40
	Marmaray-M4	06:17:00	06:25:00	10	270	45
	Marmaray-M4	06:11:00	06:17:30	40	180	135
	Marmaray-M4	06:19:00	06:25:00	30	150	75
Üsküdar	M4-Marmaray	06:35:00	06:40:00	30	90	45
	M4-Marmaray	06:35:00	06:41:00	10	150	25
	Marmaray-M5	05:59:00	06:08:00	10	316	53
	Marmaray-M5	06:07:00	06:13:00	10	136	23
	M5-Marmaray	06:33:10	06:38:00	30	66	33
	M5-Marmaray	06:33:10	06:38:00	10	66	11

Çizelge 5.3'deki trenlerin hareket saatleri, ilk trenlere aktarma yapan yolcuların bekleme sürelerini en aza indirmek için Çizelge 5.1'de listelenen tren hareket saatlerinin GA ile geliştirilen model kullanılarak optimize edilmesiyle elde edilmiştir. Çizelge 5.3'deki trenlerin varış ve kalkış saatlerine dayanarak, yolcuların ortalama bekleme süreleri transfer edilen yolcu sayısı ile çarpılmış ve yolcular için toplam bekleme süreleri hesaplanmıştır. Çizelge 5.1'e göre toplam aktarma sayısı 33'den 32'ye düşmüştür. Yolcu başına düşen ortalama süreler ise 25 ile 410 saniye arasında değişmektedir. Transfer olan 450 yolcunun toplam bekleme süresi ise 1250 dakika olmuştur.

BT algoritması ile oluşturulan modelde, Çizelge 5.4'de gösterildiği gibi, algoritmanın sıcaklığı 1000 derecede başlamakta ve 1 dereceye kadar soğutulmaktadır. Algoritmada, soğutma katsayısı 0,9 ve iterasyon sayısı 100 olarak alınmıştır. BT ile geliştirilen senkronizasyon modeli, Intel Core i5 2.5 GHz ve 8 GB RAM'e sahip dizüstü bilgisayarda Matlab R2020a programında kodlanmış ve çözülmüştür.

Çizelge 5.4 : BT modelinde kullanılan parametrelerin bilgileri.

Parametre	Açıklama	Değer
PN	Popülasyon büyüklüğü	33
C_c	Soğutma katsayısı	0.90
T	Başlangıç sıcaklığı	1000
T_{end}	Bitiş sıcaklığı	1
NI	İterasyon sayısı	100

Çizelge 5.5, ilk tren tarifelerini senkronize etmek için BT ile yapılan optimizasyon sonucunda oluşan ilk tren sefer çizelgeleri ve transfer olan yolcuların ortalama bekleme süreleri ile toplam bekleme sürelerini göstermektedir. Çizelge 5.5'deki trenlerin hareket saatleri, ilk trenlere aktarma yapan yolcuların bekleme sürelerini en aza indirmek için, Çizelge 5.1'de listelenen tren hareket saatlerinin BT ile geliştirdiğimiz model kullanılarak optimize edilmesiyle elde edilmiştir. Çizelge 5.5'deki trenlerin varış ve kalkış saatlerine dayanarak, yolcuların ortalama bekleme süreleri transfer edilen yolcu sayısı ile çarpılmış ve yolcular için toplam bekleme süreleri hesaplanmıştır. Çizelge 5.5'e göre toplam aktarma sayısı 33'den 36'ya çıkmıştır. Yolcu başına düşen ortalama süreler ise 20 ile 460 saniye arasında değişmektedir. Transfer olan 450 yolcunun toplam bekleme süresi ise 1882 dakika olmuştur.

Çizelge 5.5 : BT kullanılarak günün ilk saati için oluşturulan sefer çizelgesi ve yolcuların bekleme süreleri.

Transfer İstasyonu	Transfer Yönü	Varış Zamanı	Kalkış Zamanı	Transfer Yolcu Sayısı	Ortalama Bekleme Süresi (sn/yolcu)	Toplam Bekleme Süresi (dk.)
Yenikapı	Marmaray-M1A*	06:06:00	06:08:40	10	30	5
	Marmaray-M1A	06:06:00	06:16:40	5	445	37
	Marmaray-M1A	06:15:00	06:24:40	15	415	104
	Marmaray-M1A	06:00:00	06:08:40	10	355	59
	Marmaray-M1A	06:08:00	06:16:40	15	355	89
	M1A-Marmaray	06:29:40	06:36:00	10	215	36
	M1A-Marmaray	06:29:40	06:38:00	15	335	84
	Marmaray-M1B	06:06:00	06:11:10	10	135	23
	Marmaray-M1B*	06:15:00	06:17:40	2	20	1
	Marmaray-M1B	06:15:00	06:24:10	8	345	46
	Marmaray-M1B	06:00:00	06:04:40	10	95	16
	Marmaray-M1B*	06:08:00	06:11:10	8	35	5
	Marmaray-M1B	06:08:00	06:17:40	2	360	12
	M1B-Marmaray	06:23:30	06:29:00	15	145	36
	M1B-Marmaray	06:23:30	06:30:00	15	205	51
	Marmaray-M2	06:06:00	06:10:30	20	140	47
	Marmaray-M2	06:15:00	06:17:50	20	40	13
	Marmaray-M2	06:00:00	06:03:10	15	60	15
	Marmaray-M2*	06:08:00	06:10:30	14	30	7
	Marmaray-M2	06:08:00	06:17:50	1	430	7
	M2-Marmaray	06:29:40	06:36:00	10	250	42
	M2-Marmaray	06:36:40	06:44:00	10	310	52
	M2-Marmaray	06:29:40	06:38:00	10	370	62
	M2-Marmaray	06:36:40	06:45:00	10	370	62
Ayrılıkçeşmesi	Marmaray-M4	06:10:00	06:19:00	10	330	55
	Marmaray-M4	06:17:00	06:27:00	10	390	65
	Marmaray-M4	06:11:00	06:19:00	40	270	180
	Marmaray-M4	06:19:00	06:27:00	30	270	135
	M4-Marmaray*	06:37:00	06:40:00	6	20	2
	M4-Marmaray	06:37:00	06:48:00	24	430	172
	M4-Marmaray	06:37:00	06:41:00	9	50	8
	M4-Marmaray	06:37:00	06:49:00	1	460	8
Üsküdar	Marmaray-M5	05:59:00	06:07:30	10	286	48
	Marmaray-M5	06:07:00	06:17:10	10	386	64
	M5-Marmaray	06:35:10	06:45:00	30	366	183
	M5-Marmaray	06:35:10	06:44:00	10	306	51

Çizelge 5.6 : Algoritmaların karşılaştırılması.

Transfer olan yolcu sayısı	Yolcu başına düşen ortalama bekleme süresi (sn/yolcu)			Yolcuların toplam bekleme süresi (dk.)		
	Orjinal	GA	BT	Orjinal	GA	BT
450	268	178	252	2134	1250	1882

Algoritmaların etkisini görebilmek için Çizelge 5.6 oluşturulmuştur. Buna göre, en iyi sonuç GA ile yapılan model ile elde edilmiştir. Yolcu başına düşen ortalama bekleme süresi, GA ile %33, BT ile %6 oranında düşmüştür. Transfer olan 450 yolcunun toplam bekleme süresi ise GA ile %41, BT ile %12 oranında düşmüştür.

Yolcuların transfer sürelerinin dağılımı hesaba katılmadan, literatürdeki diğer çalışmalar gibi ortalama transfer sürelerine göre yapılması halinde Çizelge 5.7'deki farklılıklar oluşmaktadır [47, 53, 54].

Çizelge 5.7 : Algoritmaların transfer sürelerine göre karşılaştırılması.

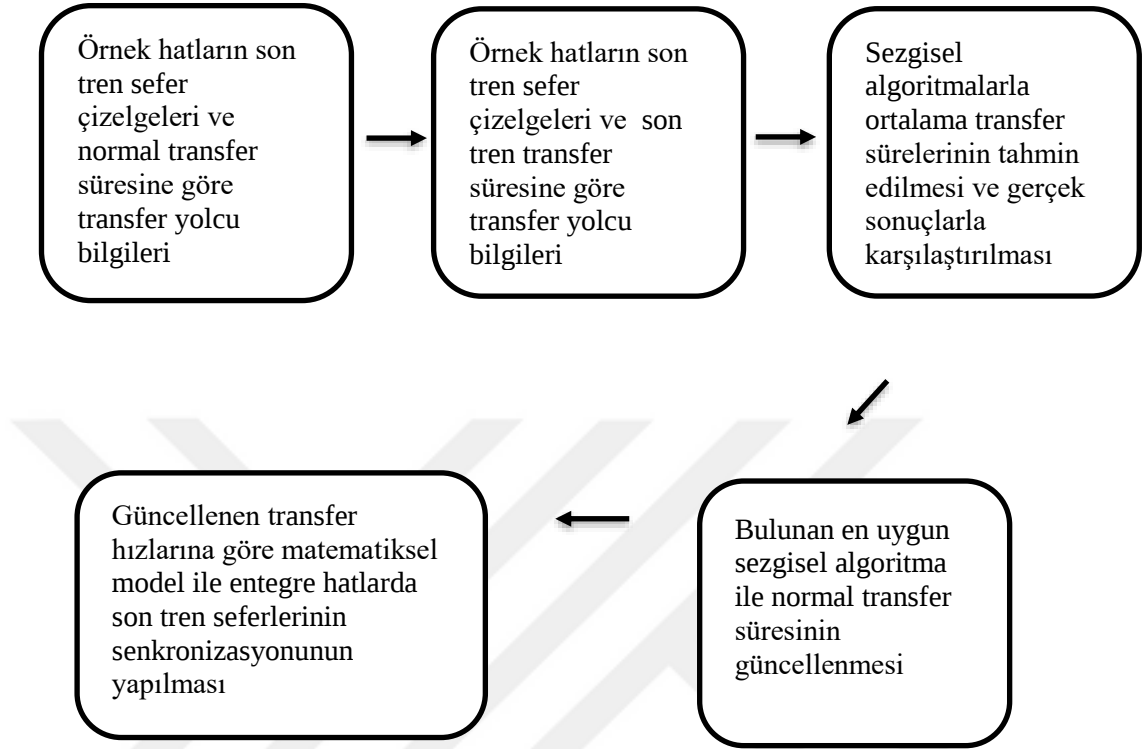
Transfer süresi	Yolcu başına düşen ortalama bekleme süresi (sn/yolcu)			Yolcuların toplam bekleme süresi (dk.)		
	Orjinal	GA	BT	Orjinal	GA	BT
Gerçek	268	178	252	2134	1250	1882
Ortalama	295	192	257	2235	1326	2015

GA ile geliştirilen modelde yolcuların transfer sürelerinin dağılımlarının dikkate alınmaması halinde, yolcu başına düşen ortalama bekleme süresi 14 saniye, yolcuların toplam bekleme süresi ise 76 dakika artmaktadır.

5.2 Günün Son Seferlerinde Gerçek Transfer Süreleriyle Sefer Çizelgelerinin Senkronizasyonu

Günün son seferleri, yolcuların toplu taşımadaki son şansları olması ihtimali ile günün diğer vakitlerine göre nispeten daha önemli olabilmektedir. Bu yüzden amacımız, hem bütün yolcuların transfer olmasını sağlayacak hem de bekleme sürelerini düşürecek daha senkronize sefer çizelgeleri oluşturmaktır. Ayrıca, günün son seferine yetişme psikolojisi ile daha hızlı hareket eden yolcuların transfer süreçleri incelenmiş ve yolcuların transfer hızlarındaki değişimi en iyi tahmin eden algoritmayı bularak, bu konuda literatüre katkı sağlanmıştır. Çalışmanın bu kısmında, öncelikle mevcut durum ortaya konulmuş, daha sonra yolcuların transfer süreçlerine en uygun sezgisel

algoritma bulunmuştur. Son olarak güncellenen transfer hızları ile sefer çizelgeleri düzenlenmiştir. Bu aşamaya ait akış şeması Şekil 5.2’de sunulmuştur.



Şekil 5.2 : Son tren sefer çizelgelerinin düzenlmesine ait akış şeması.

5.2.1 Mevcut sefer çizelgesine göre son tren transfer bilgileri

Çizelge 5.8’de günün son seferleri için, Yenikapı istasyonunda 19, Ayrılıkçeşme istasyonunda 6 ve Üsküdar istasyonunda 7 olmak üzere toplam 32 transfere ait bilgiler verilmiştir. Trenlerin varış ve kalkış zamanları Marmaray ve Metro İstanbul’dan alınmıştır. Transfer yolcu sayısı ise hem Metro İstanbul’dan hem de yerinde yapılan ölçümlerden elde edilen ortalama değerlerdir. Transfer olmak isteyen yolcu sütunun yanında başarılı bir şekilde aktarma yapmak istediği trene binebilen yolcuların sayısı verilmiştir. Son sütunda ise, transfer olan yolcuların, yolcu başına düşen ortalama süreleri saniye cinsinden verilmiştir. Buna göre, transfer olmak isteyen 1250 yolcunun 772 tanesi transfer olabilmekte, 488 yolcu ise son trene aktarma yapamamaktadırlar. Transfer olan 772 yolcunun, ortalama bekleme süreleri ise, 196 saniye olmuştur. Çizelge 5.8 yolcuların ortalama transfer sürelerine göre düzenlenmiştir. Bir başka ifadeyle, son trene yetişmek için daha hızlı hareket eden yolcuların bu durumu ihmal edilmiştir.

Çizelge 5.8 : Örnek hatların son sefer bilgileri ve normal hızlara göre yolcuların transfer durumu.

Transfer İstasyonu	Transfer Yönü	Varış Zamanı	Kalkış Zamanı	Transfer Olmak İsteyen Yolcu Sayısı	Transfer Olabilen Yolcu Sayısı	Transfer Yolcuların Ortalama Bekleme Süresi (sn.)
Yenikapı	Marmaray-M1A	00:06:00	00:00:00	40	0	-
	Marmaray-M1A	23:51:00	00:00:00	50	50	383
	Marmaray-M1A	23:30:00	23:41:00	50	50	443
	M1A-Marmaray	00:05:00	00:06:00	48	0	-
	M1A-Marmaray	23:26:00	23:30:00	56	56	83
	Marmaray-M1B	00:06:00	23:55:00	40	0	-
	Marmaray-M1B	23:51:00	23:55:00	50	42	63
	Marmaray-M1B	23:30:00	23:36:00	50	50	123
	M1B-Marmaray	23:59:00	00:06:00	48	48	363
	M1B-Marmaray	23:27:00	23:30:00	56	29	3
	Marmaray-M2	00:06:00	00:00:00	30	0	-
	Marmaray-M2	23:51:00	00:00:00	40	40	413
	Marmaray-M2	23:30:00	23:40:00	50	50	473
	M2-Marmaray	23:59:00	00:06:00	36	36	293
	M2-Marmaray	23:26:00	23:30:00	40	40	113
	M2-M1A	23:59:00	00:00:00	48	0	-
	M1A-M2	23:56:00	00:00:00	40	40	137
	M2-M1B	23:53:00	23:55:00	48	15	15
	M1B-M2	23:57:00	00:00:00	40	40	56
Ayrılkçeşmesi	Marmaray-M4	23:55:00	00:01:00	10	10	150
	Marmaray-M4	23:49:00	23:52:00	30	6	20
	M4-Marmaray	00:37:00	23:55:00	40	0	-
	M4-Marmaray	23:53:00	23:55:00	10	0	-
	M4-Marmaray	00:37:00	23:41:00	30	0	-
Üsküdar	M4-Marmaray	23:35:00	23:41:00	20	20	150
	Marmaray-M5	23:59:00	23:59:00	40	0	-
	Marmaray-M5	23:50:00	23:59:00	40	40	316
	Marmaray-M5	23:37:00	23:42:00	50	50	76
	M5-Marmaray	23:58:00	23:59:00	30	0	-
	M5-Marmaray	23:49:00	23:59:00	30	30	376
	M5-Marmaray	23:58:00	23:37:00	30	0	-
	M5-Marmaray	23:32:00	23:37:00	30	30	76
Toplam				1250	772	

5.2.2 Son tren transfer süresi

Ocak-Haziran 2022 tarihleri arasında yapılan 52 gözlem neticesinde, yolcuların normal zamanlarda ve son tren zamanlarında transfer süreleri ölçümü yapılmış ve Çizelge 5.9'daki değerler elde edilmiştir. Elde edilen iki transfer süreleri karşılaştırıldığında, son trene transfer olmak isteyen yolcuların genelde daha hızlı oldukları ve ortalama transfer sürelerinin daha az olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca yolcuların trene yetişebilmek adına birbirlerinden etkilenecek sürü psikolojisi ile hareket ettikleri gözlemlenmiştir. Her transfer istasyonunda bu ölçümü yapmamak ve normal transfer sürelerinden son tren transfer süresini hızlı bir şekilde elde edebilmek amacıyla, transfer süreleri arasındaki farkı en iyi hangi algoritma ile bulacağımızı tespit etmek için, sezgisel algoritmalarından PSO, Yusufçuk ve BT algoritmaları kullanılmıştır.

Çizelge 5.9 : Yolcuların transfer süreleri.

Transfer istasyonu	Transfer yönü	Transfer süresi (sn)		
		Normal	Son tren	Değişim oranı
Yenikapı	Marmaray↔M1A	157,2	100	33%
	Marmaray↔M1B	176,6	119	35%
	Marmaray↔M2	127,5	91	29%
	M2↔M1A	103,5	69	33%
	M2↔M1B	123,5	89	28%
Ayrılıkçeşmesi	Marmaray↔M4	195,5	140	29%
Üsküdar	Marmaray↔M5	210,3	152	28%

5.2.2.1 Parçacık sürüsü optimizasyonu algoritması ile transfer süresinin tahmini

Transfer süresinin tahmin edilmesi için oluşturulan parçacık sürüsü algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 1: Her yolcu bir parçacığı, vagonlardaki yolcular ise parçacık sürüsünü temsil eder. Denklem 5.5'de belirtilen parçacığın ilk hızları, yolcuların normal zamanlarda ölçülen transfer hızlarıdır.

$$V_{ij} = w * V_{ij} + c_1 * rand_1 * (P_{ij} - X_{ij}) + c_2 * rand_2 * (G_{ij} - X_{ij}) \quad (5.5)$$

Denklem 5.5'de;

V_{ij} = Parçacığın ilk hızı

w = Atalet ağırlık değeri

$rand_1, rand_2$ = Rastgele oluşturulmuş sayılar

c_1, c_2 = Öğrenme katsayıları

X_{ij} = Parçacığın ilk konumu

P_{ij} = Yerel en iyi konumu

G_{ij} = Sürünün en iyi konumunu

ifade eder.

Adım 2: Sürüdeki bütün parçacıkların uygunluk değeri, Denklem 5.10 ile hesaplanır.

c_1, c_2 öğrenme katsayıları 1 ve $rand_1, rand_2$ değişken katsayılar ise 0-1 arasında alınmıştır.

Adım 3: Daha sonra, her jenerasyondaki tüm parçacıklar önceki jenerasyonun en iyisi ile karşılaştırılır, daha iyi ise, yer değiştirilir.

Adım 4: En iyi yerel değerler kendi aralarında karşılaştırılır ve en iyisi küresel en iyi değer olarak atanır.

Adım 5: Hız ve pozisyon değerleri güncellenir.

5.2.2.2 Yusufçuk algoritması ile transfer süresinin tahmini

Transfer süresinin tahmin edilmesi için oluşturulan yusufçuk algoritmasının adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 1: Transfer yolcular sürüdeki bireyleri oluşturur. Yolcuların ilk hızları yapılan ölçümlerle belirlenen hızlardır.

Adım 2: Yolcuların hızları Denklem 5.6 ve 5.7 ile güncellenir.

$$\nabla X_{t+1} = (sS_i + aA_i + cC_i + fF_i + eE_i) + w\nabla X_t \quad (5.6)$$

$$X_{t+1} = X_t + \nabla X_{t+1} \quad (5.7)$$

Burada;

∇X : Hız

X : Pozisyonu

ifade etmektedir.

Denklem 5.11'deki s , a ve c değerleri ayrışma, hizalama ve kaynaşma katsayılarını, f , e , ve w değerleri sırasıyla besin faktörü, düşman faktörü ve atalet katsayısını temsil etmektedir. Denklem 5.12'deki t değeri ise iterasyon sayısını temsil etmektedir. Denklem 5.11'deki değerler, $s=0.5$, $a=0.2$, $c=0.3$, $f=0.5$, $e=0.5$ ve $w=0.1$ olarak kullanılmıştır.

5.2.2.3 Benzetimli tavlama algoritması ile transfer süresinin tahmini

Son tren transfer süresinin tahmin edilmesinde kullanılan bir diğer sezgisel algoritma ise BT algoritmasıdır. Son trene transfer olan yolcuların hızları popülasyonu oluşturur. Başlama sıcaklığını 1000 derecen başlatarak, 0,9 soğutma katsayısı ile 1 dereceye kadar düşürerek, yolcuların hızları güncellenmiştir.

5.2.2.4 Sonuçların karşılaştırılması

Son trene transfer olan yolcuların transfer sürelerini, normal zamandaki transfer sürelerini kullanarak tahmin etmek amacıyla geliştirdiğimiz algoritmalar, dizüstü bilgisayarda Matlab programında kodlanıp, çözülmüştür. Algoritmaların 50 iterasyon sonrası elde ettiği tahmini transfer süresi değerleri Çizelge 5.10'da görülmektedir.

Çizelge 5.10 : Son tren yolcuların transfer süreleri.

Transfer istasyonu	Transfer yönü	Yolcuların ortalama transfer süresi (sn)	Son tren yolcuların ortalama transfer süresi (sn)	Tahmin edilen son tren yolcuların ortalama transfer süreleri (sn)		
				PSO	BT	Yusufçuk
Yenikapı	Marmaray↔M1A	157,2	100	104,1	121,5	128,8
	Marmaray↔M1B	176,6	119	120	142,4	143,7
	Marmaray↔M2	127,5	91	93,2	103,6	102,7
	M2↔M1A	103,5	69	68,1	81,4	76,4
	M2↔M1B	123,5	89	90	93,4	101,3
Ayrılıkçeşmesi	Marmaray↔M4	195,5	140	141,5	162,6	161,3
Üsküdar	Marmaray↔M5	210,3	152	149,7	173	170,5

Buna göre, PSO ile geliştirilen model sonucu elde edilen değerler, son tren yolcularının gerçek transfer sürelerine oldukça yakın olmuştur. Bu yüzden, son tren sefer çizelgeleri PSO ile tahmin edilen transfer sürelerini kullanarak senkronize edilmiştir.

Genellikle yolcuların transfer süreleri arasında daha fazla fark olmasına rağmen, son trene yetişmek isteyen yolcular daha hızlı hareket ettikleri ve birbirlerine benzemeye çalıştıkları için, transfer süreleri arasındaki farklar daha azdır. Bu durum, Çizelge 5.11'de görülmektedir.

Çizelge 5.11 : Ortalama ve en yüksek transfer sürelerinin karşılaştırılmalı gösterimi.

Transfer istasyonu	Transfer yönü	Ortalama transfer süresi (sn.)	En yüksek transfer süresi (sn.)	Son tren tahmin edilen ortalama transfer süresi (sn.)	Son tren tahmin edilen en yüksek transfer süresi (sn.)
Yenikapı	Marmaray↔M1A	157,6	238	104,1	158
	Marmaray↔M1B	176,5	259	120	175
	Marmaray↔M2	127,4	174	93,2	136
	M2↔M1A	103,5	150	68,1	110
	M2↔M1B	123,6	170	90	130
Ayrılıkçeşmesi	Marmaray↔M4	195,5	280	141,5	200
Üsküdar	Marmaray↔M5	210,3	295	149,7	210

Normal zamanlarda ortalama ve maksimum transfer süreleri arasındaki fark 46-85 saniye arasındayken; son tren için bu süre 40-60 saniyedir.

5.2.3 Son tren sefer çizelgelerinin senkronizasyonu

Başarılı transfer yolcularının sayısını artırmak için, PSO algoritması ile elde edilen transfer zamanını kullanarak, transfer olmak isteyen bütün yolcuların transfer olmasını sağlayacak şekilde, yolcuların bekleme süresinin en az olacağı son tren zaman çizelgesi oluşturulmuştur. Son tren başarılı transfer sayısını artırmak için kullanılan amaç fonksiyonu Denklem 5.8’de gösterilmiştir.

$$N = \max \sum_{s_i \in S} \sum_{l_i \in L} N_{s,l_i-l_j} \times \beta_{s,l_i-l_j} \quad (5.8)$$

$$\beta_{l_i-l_j,s} = \begin{cases} 1, & t^w \geq 0 \\ 0, & t^w < 0 \end{cases} \quad (5.9)$$

Denklem 5.8’de;

N_{s,l_i-l_j} = s transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına başarılı bir şekilde transfer olan yolcu sayısı

Denklem 5.9’daki katsayı son tren senkronizasyonunda, son trene transfer olacak yolcuların transfer durumlarını belirlemek için oluşturulmuş bir ifadedir.

β_{s,l_i-l_j} = s transfer istasyonunda l_i hattından l_j hattına transfer olan yolcuların bekleme süresi 0’dan büyükse yolcuların başarılı bir şekilde transfer olduğu, aksi durumda yolcuların son trene transfer olamadığı kabul edilir.

Bu amaçla, son trene transfer olmak isteyen bütün yolcular transfer olacak şekilde, normal zamanlardaki ve PSO ile tahmin edilen son tren zamanındaki transfer sürelerine göre Çizelge 5.12 ve 5.13 oluşturulmuştur.

Çizelge 5.12 : Örnek hatlarda normal transfer hızlarına göre yolcuların son trene transfer durumları.

Transfer İstasyonu	Transfer Yönü	Varış Zamanı	Kalkış Zamanı	Transfer Olmak İsteyen Yolcu Sayısı	Transfer Olabilen Yolcu Sayısı	Transfer Yolcuların Ortalama Bekleme Süresi (sn.)
Yenikapı	Marmaray-M1A	00:06:00	00:10:00	40	40	136
	Marmaray-M1A	23:51:00	23:55:00	50	50	136
	Marmaray-M1A	23:30:00	23:34:00	50	50	136
	M1A-Marmaray	00:05:00	00:09:00	48	48	136
	M1A-Marmaray	23:26:00	23:30:00	56	56	136
	Marmaray-M1B	00:06:00	00:10:20	40	40	140
	Marmaray-M1B	23:51:00	23:55:20	50	50	140
	Marmaray-M1B	23:30:00	23:34:20	50	50	140
	M1B-Marmaray	23:59:00	00:03:20	48	48	140
	M1B-Marmaray	23:27:00	23:31:20	56	56	140
	Marmaray-M2	00:06:00	00:08:55	30	30	82
	Marmaray-M2	23:51:00	23:53:55	40	40	82
	Marmaray-M2	23:30:00	23:32:55	50	50	82
	M2-Marmaray	23:59:00	00:01:55	36	36	82
	M2-Marmaray	23:26:00	23:28:55	40	40	82
	M2-M1A	23:59:00	00:01:30	48	48	82
	M1A-M2	23:56:00	23:58:30	40	40	82
	M2-M1B	23:53:00	23:55:50	48	48	80
	M1B-M2	23:57:00	23:59:50	40	40	80
Ayrılıkçeşmesi	Marmaray-M4	23:55:00	23:59:40	10	10	138
	Marmaray-M4	23:49:00	23:53:40	30	30	138
	M4-Marmaray	00:37:00	00:41:40	40	40	138
	M4-Marmaray	23:53:00	23:57:40	10	10	138
	M4-Marmaray	00:37:00	00:41:40	30	30	138
	M4-Marmaray	23:35:00	23:39:40	20	20	138
Üsküdar	Marmaray-M5	23:59:00	00:53:55	40	40	145
	Marmaray-M5	23:50:00	23:54:55	40	40	145
	Marmaray-M5	23:37:00	23:42:00	50	50	150
	M5-Marmaray	23:58:00	00:02:55	30	30	145
	M5-Marmaray	23:49:00	23:53:55	30	30	145
	M5-Marmaray	23:58:00	00:02:55	30	30	145
	M5-Marmaray	23:32:00	23:37:00	30	30	150
Ortalama						124

Yolcuların normal zamanlardaki maksimum transfer sürelerine göre oluşturulan Çizelge 5.12'ye göre, son trene transfer olmak isteyen 1250 kişinin tamamının transfer olması halinde, yolcuların ortalama bekleme süreleri 124 saniye olmuştur.

Çizelge 5.13 : Örnek hatlarda son tren transfer hızlarına göre yolcuların son trene transfer durumları.

Transfer İstasyonu	Transfer Yönü	Varış Zamanı	Kalkış Zamanı	Transfer Olmak İsteyen Yolcu Sayısı	Transfer Olabilen Yolcu Sayısı	Transfer Yolcuların Ortalama Bekleme Süresi (sn.)
Yenikapı	Marmaray-M1A	00:06:00	00:08:40	40	40	56
	Marmaray-M1A	23:51:00	23:53:40	50	50	56
	Marmaray-M1A	23:30:00	23:32:40	50	50	56
	M1A-Marmaray	00:05:00	00:07:40	48	48	56
	M1A-Marmaray	23:26:00	23:28:40	56	56	56
	Marmaray-M1B	00:06:00	00:08:55	40	40	55
	Marmaray-M1B	23:51:00	23:53:55	50	50	55
	Marmaray-M1B	23:30:00	23:32:55	50	50	55
	M1B-Marmaray	23:59:00	00:01:55	48	48	55
	M1B-Marmaray	23:27:00	23:29:55	56	56	55
	Marmaray-M2	00:06:00	00:08:20	30	30	37
	Marmaray-M2	23:51:00	23:53:20	40	40	37
	Marmaray-M2	23:30:00	23:32:20	50	50	37
	M2-Marmaray	23:59:00	00:01:20	36	36	37
	M2-Marmaray	23:26:00	23:28:20	40	40	37
	M2-M1A	23:59:00	00:00:50	48	48	42
	M1A-M2	23:56:00	23:57:50	40	40	42
	M2-M1B	23:53:00	23:55:10	48	48	40
	M1B-M2	23:57:00	23:59:10	40	40	40
Ayrılıkçeşmesi	Marmaray-M4	23:55:00	23:58:20	10	10	60
	Marmaray-M4	23:49:00	23:52:20	30	30	60
	M4-Marmaray	00:37:00	00:40:20	40	40	60
	M4-Marmaray	23:53:00	23:56:20	10	10	60
	M4-Marmaray	00:37:00	00:40:20	30	30	60
	M4-Marmaray	23:35:00	23:38:20	20	20	60
Üsküdar	Marmaray-M5	23:59:00	00:52:30	40	40	60
	Marmaray-M5	23:50:00	23:53:30	40	40	60
	Marmaray-M5	23:37:00	23:40:30	50	50	60
	M5-Marmaray	23:58:00	00:01:30	30	30	60
	M5-Marmaray	23:49:00	23:52:30	30	30	60
	M5-Marmaray	23:58:00	00:01:30	30	30	60
	M5-Marmaray	23:32:00	23:35:30	30	30	60
	Ortalama					53

Yolcuların son tren zamanındaki maksimum transfer sürelerine göre oluşturulan Çizelge 5.13'e göre ise, son trene transfer olmak isteyen 1250 kişinin tamamının transfer olması halinde, yolcuların ortalama bekleme süreleri 53 saniye olmuştur. Literatürdeki çalışmalarda ihmal edilen bu farklılık ile, yolcu başına ortalama 51 saniye daha az beklenilmesini sağlayacak şekilde sefer çizelgesi oluşturulabilmektedir.

Çizelge 5.14'de örnek hatlardaki son tren transferi ile ilgili mevcut durum, normal transfer süresine göre sefer çizelgelerinin senkronize edilmesi ve tahmin edilen son tren transfer süresine göre sefer çizelgelerinin senkronize edilmesi halinde transfer sayılarındaki ve transfer olan yolcuların ortalama bekleme sürelerindeki gelişim gösterilmiştir.

Çizelge 5.14 : Örnek hatlarda son tren transfer hızlarına göre yolcuların son trene transfer durumları.

Transfer istasyonu		Başarılı transfer sayısı	Transfer olan yolcuların ortalama bekleme süreleri (sn.)
Yenikapı Ayrılıkçeşmesi Üsküdar	Mevcut durum	772	196
	Normal transfer süresi	1250	124
	Tahmin edilen son tren transfer süresi	1250	53
	Gelişme	%38	%73

Çizelge 5.14'e göre, PSO ile tahmin edilen son tren transfer süresine göre yapılan sefer çizelgelerinin düzenlenmesi ile, başarılı transfer sayısı %38 artmış ve transfer olan yolcuların ortalama bekleme süreleri ise %73 azalmıştır.

5.3 Günlük Sefer Çizelgesi Senkronizasyonu

Günlük sefer çizelgesi senkronizasyonu çalışmasında oluşturulan modelin amacı transfer olan yolcuların bekleme sürelerini düşürmektir. Amaç fonksiyonu ve karar değişkenleri Bölüm 5.1'de günün ilk saati için yapılan kısımda belirtilmiştir. Literatürdeki diğer çalışmaları ve tez kapsamında günün ilk saati için geliştirilen sefer çizelgelerinin senkronizasyonu modeli düşünüldüğünde, sezgisel algoritmalar arasında GA ile geliştirilen model ile başarılı sonuçların elde edildiği görülmektedir. Bu yüzden örnek hatlarımız arasında günlük sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda, sezgisel algoritmalarından GA kullanılmıştır. GA ile ilgili detaylar, Bölüm 5.1'de

verilmiştir. Bu bölümde, günlük sefer çizelgelerinin senkronizasyonu için GA ile geliştirilen modelin adımları verilmiştir.

Adım 1: Transfer istasyonuna gelen trenlerin kalkış ve varış zamanları arasındaki fark kromozomların genlerini oluşturur. Kromozom vektörü aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\begin{bmatrix} t_{s,l1}^{d1} - t_{s,l2}^{a1} & t_{s,l1}^{d2} - t_{s,l2}^{a2} & \dots & t_{s,l1}^{dd} - t_{s,l2}^{ad} \\ t_{s,l1}^{d1} - t_{s,l3}^{a1} & t_{s,l1}^{d2} - t_{s,l3}^{a2} & \dots & t_{s,l1}^{dd} - t_{s,l3}^{ad} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ t_{s,l1}^{d1} - t_{s,ln}^{a1} & t_{s,l1}^{d2} - t_{s,ln}^{a2} & \dots & t_{s,l1}^{dd} - t_{s,ln}^{ad} \end{bmatrix}$$

Şekil 5.3 : GA günlük sefer çizelgesi kromozom vektörü.

İncelenen transfer istasyonunda herhangi bir saatte hareket eden tren sayısı gen sayısını oluşturmaktadır. Transfer yolcuları düşünüldüğünden kesişen hatların sayısı da Şekil 5.3’deki vektörün sütun sayısını oluşturmaktadır.

Adım 2: Transfer olan yolcuların toplam bekleme süresini minimize edecek amaç fonksiyonu oluşturulur.

Adım 3: Yeni popülasyonu oluşturmak için mevcut popülasyondan çaprazlanacak ve mutasyona uğrayacak bireyler seçilir. Bireylerin seçiminde rulet tekerliği yöntemine göre yapılmıştır.

Adım 4: Çaprazlama olasılığı $p_{\text{cross}} = 0.95$ olarak alınarak, yeni bireyler üretilir. Bireyler arasındaki benzerlik çaprazlama ile değiştirilemiyorsa mutasyon işlemi gerçekleştirilir.

Adım 5: Mutasyon olasılığını $p_{\text{mutasyon}} = 0.01$ olarak alınarak, toplulukta aynı bireylerin bulunması engellenmeye çalışılır.

Adım 6: En iyi bireyler ile ara popülasyon oluşturulur. Eğer, kriter karşılanırsa algoritma sonlandırılır.

Adım 7: Sonlandırma kriteri karşılanana kadar hesaplamalar Adım 1’den itibaren tekrar başlanır. Optimizasyon sonucu oluşan sefer çizelgesi ile orijinal sefer çizelgesi arasındaki farkı daha iyi anlayabilmek adına, aşağıdaki çizelgeler oluşturulmuştur.

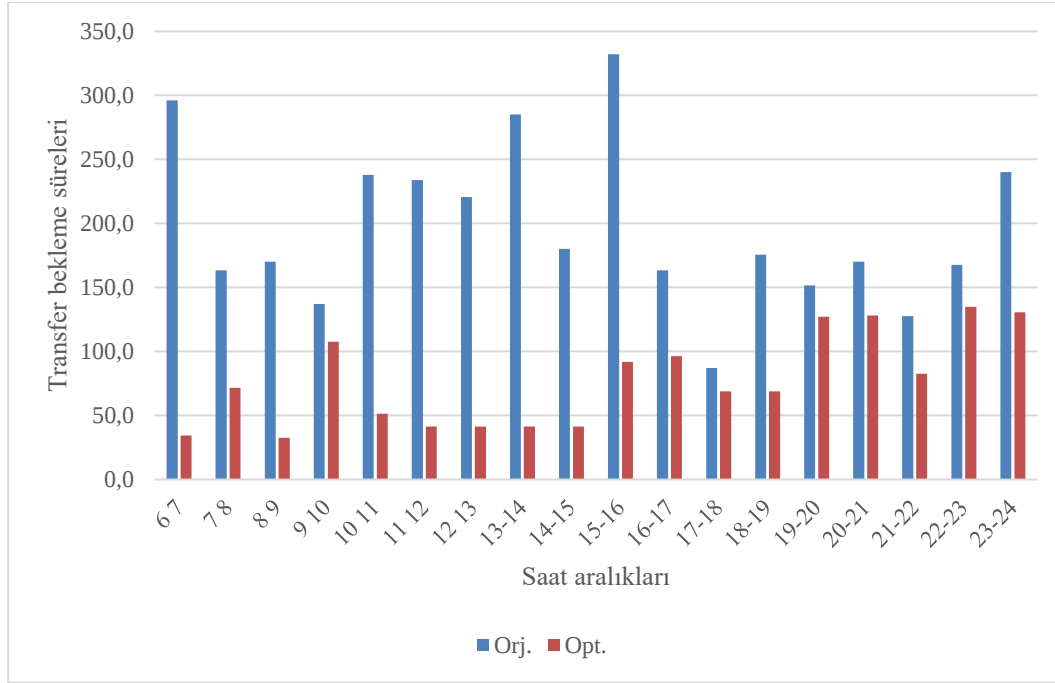
Çizelgelerin daha sade ve anlaşılabilir olması için mevcut ve optimize edilmiş sefer çizelgeleri saat 06:00 ile 01:00 arasında her saat için karşılaştırılmalı olarak verilmiştir. “Orj.” ifadesi hatların mevcut sefer çizelgesini, “Opt.” ifadesi ise GA ile geliştirilen senkronizasyon modelinin sonucunda elde edilen sefer çizelgesini temsil eder.

Çizelge 5.15 : M1A mevcut ve güncellenen sefer çizelgesi.

Saat		1. Sefer	2. Sefer	3. Sefer	4. Sefer	5. Sefer	6. Sefer	7. Sefer	8. Sefer	9. Sefer	10. Sefer	11. Sefer
6-7	Orj.	00:00	08:00	16:00	24:00	32:00	40:00	48:00	56:00			
	Opt.	03:30	10:50	18:25	25:35	32:50	40:20	48:55	55:10			
7-8	Orj.	03:00	11:00	19:00	27:00	35:00	41:00	43:00	51:00	57:00	59:00	
	Opt.	06:00	11:20	20:45	26:00	36:50	41:00	42:45	48:50	56:45	59:45	
8-9	Orj.	07:00	13:00	15:00	23:00	31:00	39:00	47:00	55:00			
	Opt.	04:45	11:00	19:55	26:20	33:55	41:05	49:45	56:15			
9-10	Orj.	02:00	10:00	18:00	26:00	34:00	42:00	50:00	58:00			
	Opt.	04:35	11:55	19:30	26:40	32:55	41:25	50:00	56:15			
10-11	Orj.	06:00	14:00	22:00	30:00	38:00	46:00	54:00				
	Opt.	02:55	10:50	18:15	24:50	33:00	40:40	48:10	55:25			
11-12	Orj.	01:00	09:00	17:00	25:00	33:00	41:00	49:00	57:00			
	Opt.	03:05	11:35	18:25	25:35	32:55	40:25	48:05	55:25			
12-13	Orj.	05:00	13:00	21:00	29:00	37:00	44:00	52:00				
	Opt.	03:05	11:35	18:25	25:35	32:55	40:25	48:05	55:25			
13-14	Orj.	00:00	08:00	16:00	24:00	32:00	40:00	48:00	56:00			
	Opt.	03:05	11:35	18:25	25:35	32:55	40:25	48:05	55:25			
14-15	Orj.	04:00	12:00	20:00	28:00	36:00	44:00	52:00	59:00			
	Opt.	03:05	11:35	18:25	25:35	32:55	40:25	48:05	55:25			
15-16	Orj.	07:00	15:00	23:00	31:00	39:00	47:00	55:00				
	Opt.	04:00	11:55	19:20	25:55	34:05	41:45	49:15	56:00			
16-17	Orj.	03:00	11:00	19:00	27:00	35:00	43:00	51:00	59:00			
	Opt.	04:10	12:40	19:30	26:40	34:00	41:30	49:10	56:30			
17-18	Orj.	04:00	10:00	16:00	21:00	27:00	33:00	39:00	45:00	51:00	56:00	
	Opt.	06:00	11:20	20:45	26:00	36:50	41:00	44:00	49:00	56:45	59:45	
18-19	Orj.	02:00	08:00	14:00	20:00	26:00	31:00	37:00	43:00	49:00	55:00	
	Opt.	06:00	11:20	20:45	26:00	36:50	41:00	44:00	49:00	56:45		
19-20	Orj.	01:00	06:00	12:00	18:00	24:00	30:00	36:00	41:00	47:00	53:00	59:00
	Opt.	00:00	04:30	11:25	19:50	26:05	29:10	34:55	41:10	49:10	56:15	59:55
20-21	Orj.	05:00	11:00	16:00	22:00	29:00	37:00	45:00	53:00			
	Opt.	04:10	12:40	19:30	26:40	34:00	41:30	49:10	56:30			
21-22	Orj.	01:00	09:00	17:00	25:00	33:00	40:00	48:00	56:00			
	Opt.	03:05	11:35	18:25	25:35	32:55	40:25	48:05	55:25			
22-23	Orj.	04:00	12:00	23:00	33:00	42:00	52:00					
	Opt.	03:10	11:45	23:35	33:05	43:25	52:50					
23-24	Orj.	02:00	12:00	21:00	31:00	41:00	50:00	59:00				
	Opt.	02:20	11:15	17:40	25:15	32:35	41:05	47:35	54:20			
00-01	Opt.	02:50	10:00									

Çizelge 5.15’de M1A Yenikapı – Atatürk Havalimanı hafif metro hattına ait mevcut ve optimize edilmiş sefer çizelgeleri bulunmaktadır.

Saat 06:00 ile 01:00 arasındaki seferlerin, tablonun ilk sütununda belirtilen saat aralıklarına göre kalkış saatleri verilmiştir. Şekil 5.4’de M1A – Marmaray hatları arasında transfer olan yolcuların mevcut ve optimizasyon sonucu oluşan ortalama transfer bekleme süreleri, saat aralıklarına göre karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.4 : M1A-Marmaray transfer yolcularının ortalama bekleme süreleri.

Mevcut sefer çizelgesine göre, iki örnek hat arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 87 ile 332 saniye arasında değişmektedir. 332 saniye ile yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en fazla olduğu saat 15:00-16:00 aralığı, 87 saniye ile en az olduğu zaman dilimi ise 17:00-18:00 saatleri arasındadır. Yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 196 saniyedir.

GA ile optimize edilen sefer çizelgesine göre ise, iki örnek hat arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 32 ile 134 saniye arasında değişmektedir. Sabah 08:00 – 09:00 saatleri arası yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en az olduğu zaman dilimi iken, 22:00-23:00 saatleri arası ise yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en fazla olduğu zamanlar olmuştur. Senkronizasyon sonucu, yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 77 saniyeye düşmektedir.

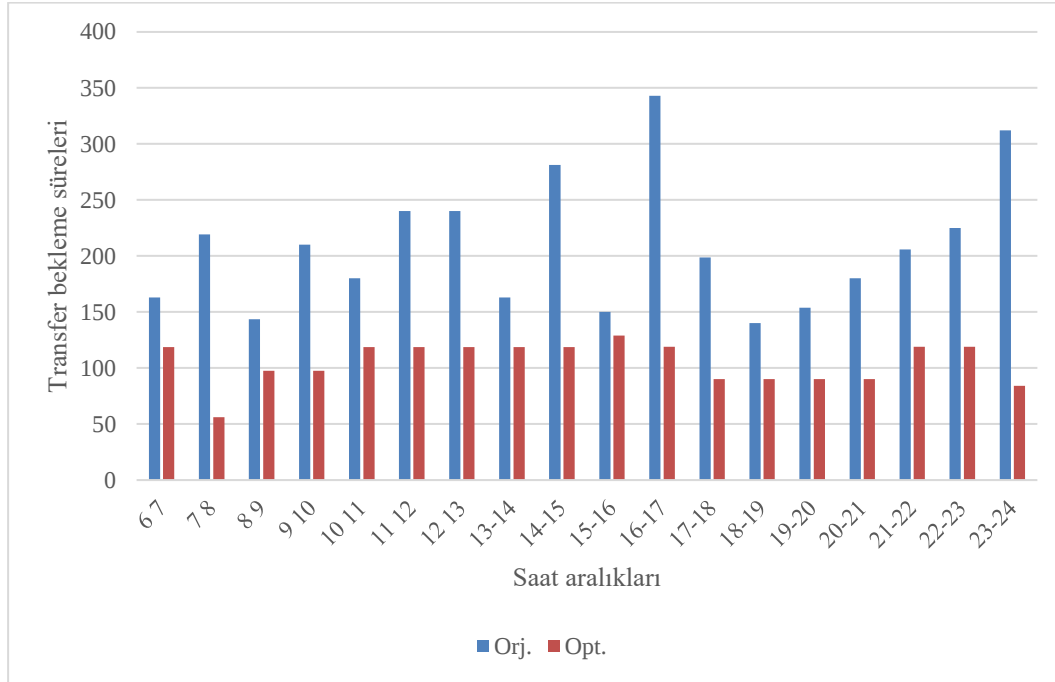
Çizelge 5.16’de M1B Yenikapı – Kirazlı hafif metro hattına ait mevcut ve optimize edilmiş sefer çizelgeleri bulunmaktadır.

Çizelge 5.16 : M1B mevcut ve güncellenen sefer çizelgesi.

Saat		1. Sefer	2. Sefer	3. Sefer	4. Sefer	5. Sefer	6. Sefer	7. Sefer	8. Sefer	9. Sefer	10. Sefer	11. Sefer
6-7	Orj.	04:00	12:00	20:00	28:00	36:00	44:00	52:00				
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	35:15	42:30	50:10	58:40			
7-8	Orj.	00:00	07:00	15:00	23:00	24:00	31:00	33:00	39:00	47:00	49:00	55:00
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	31:00	34:15	41:20	47:00	50:30	56:15	
8-9	Orj.	03:00	05:00	11:00	19:00	27:00	35:00	43:00	51:00	59:00		
	Opt.	04:55	12:50	19:30	26:30	34:15	41:20	50:30	56:15	59:00		
9-10	Orj.	06:00	14:00	22:00	30:00	38:00	46:00	54:00				
	Opt.	04:55	12:50	19:30	26:30	34:15	41:20	50:30	56:15			
10-11	Orj.	02:00	10:00	18:00	26:00	34:00	42:00	50:00	58:00			
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	35:15	42:30	50:10	58:40			
11-12	Orj.	05:00	13:00	21:00	29:00	37:00	45:00	53:00				
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	35:15	42:30	50:10	58:40			
12-13	Orj.	01:00	09:00	17:00	25:00	33:00	41:00	49:00	57:00			
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	35:15	42:30	50:10	58:40			
13-14	Orj.	04:00	12:00	20:00	28:00	36:00	44:00	52:00				
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	35:15	42:30	50:10	58:40			
14-15	Orj.	00:00	08:00	16:00	24:00	32:00	40:00	48:00	56:00			
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	35:15	42:30	50:10	58:40			
15-16	Orj.	03:00	11:00	19:00	27:00	35:00	43:00	51:00	59:00			
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	35:15	42:30	50:10	58:40			
16-17	Orj.	07:00	15:00	23:00	31:00	39:00	47:00	55:00				
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	35:15	42:30	50:10	58:40			
17-18	Orj.	01:00	07:00	13:00	18:00	24:00	30:00	36:00	42:00	48:00	53:00	59:00
	Opt.	05:00	11:00	13:00	19:20	27:20	34:00	36:00	41:45	49:10	56:20	59:00
18-19	Orj.	05:00	11:00	17:00	23:00	28:00	34:00	40:00	46:00	52:00	58:00	
	Opt.	05:00	11:00	13:00	19:20	23:00	27:20	34:00	41:45	49:10	56:20	
19-20	Orj.	03:00	09:00	15:00	21:00	27:00	33:00	38:00	44:00	50:00	56:00	
	Opt.	05:00	11:00	15:00	19:20	27:20	34:00	38:00	41:45	49:10	56:20	
20-21	Orj.	02:00	08:00	13:00	19:00	25:00	33:00	41:00	49:00	57:00		
	Opt.	05:00	11:00	19:20	27:20	34:00	41:45	49:10	56:20			
21-22	Orj.	05:00	13:00	21:00	29:00	37:00	44:00	52:00				
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	35:15	42:30	50:10	58:40			
22-23	Orj.	00:00	08:00	18:00	28:00	37:00	47:00	57:00				
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	35:15	42:30	50:10	58:40			
23-24	Orj.	07:00	16:00	26:00	36:00	46:00	55:00					
	Opt.	04:20	12:20	19:30	26:00	35:15	42:30	50:10	58:00			
00-01	Opt.	03:30	10:30									

Saat 06:00 ile 01:00 arasındaki seferlerin, tablonun ilk sütununda belirtilen saat aralıklarına göre kalkış saatleri verilmiştir. Şekil 5.5’de M1B – Marmaray hatları

arasında transfer olan yolcuların mevcut ve optimizasyon sonucu oluşan ortalama transfer bekleme süreleri, saat aralıklarına göre karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.5 : M1B-Marmaray transfer yolcularının ortalama bekleme süreleri.

Mevcut sefer çizelgesine göre, iki örnek hat arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 140 ile 343 saniye arasında değişmektedir. 343 saniye ile yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en fazla olduğu saat 16:00-17:00 aralığı, 140 saniye ile en az olduğu zaman dilimi ise 18:00-19:00 saatleri arasındadır. Yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 208 saniyedir.

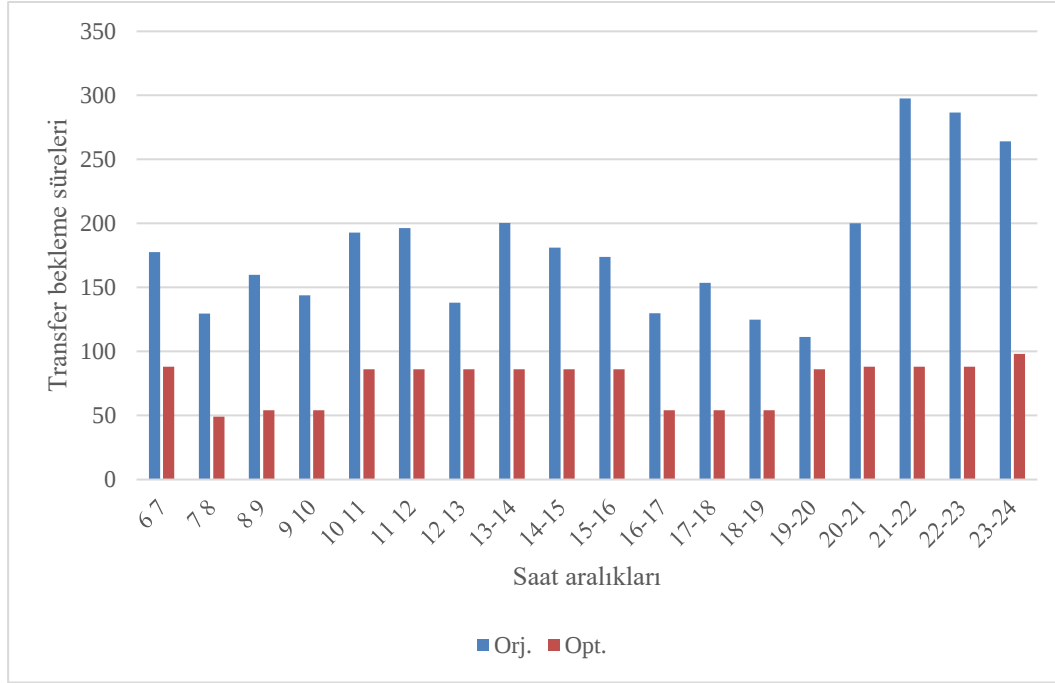
GA ile optimize edilen sefer çizelgesine göre ise, iki örnek hat arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 56 ile 129 saniye arasında değişmektedir. Sabah 07:00 – 08:00 saatleri arası yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en az olduğu zaman dilimi iken, 15:00-16:00 saatleri arası ise yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en fazla olduğu zamanlar olmuştur. Senkronizasyon sonucu, yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 105 saniyeye düşmektedir.

Çizelge 5.17’de M2 Yenikapı – Hacıosman metro hattına ait mevcut ve optimize edilmiş sefer çizelgeleri bulunmaktadır.

Çizelge 5.17 : M2 mevcut ve güncellenen sefer çizelgesi.

Saat		1. Sefer	2. Sefer	3. Sefer	4. Sefer	5. Sefer	6. Sefer	7. Sefer	8. Sefer	9. Sefer	10. Sefer	11. Sefer	12. Sefer	13. Sefer
6-7	Orj.	04:00	12:00	20:00	27:00	35:00	43:00	50:00	58:00					
	Opt.	03:15	10:50	17:50	25:15	33:30	40:20	50:30	55:40					
7-8	Orj.	03:00	07:00	12:00	17:00	21:00	26:00	31:00	35:00	40:00	45:00	49:00	54:00	59:00
	Opt.	03:20	10:20	12:00	18:00	21:00	25:00	33:10	40:10	45:00	48:50	54:50	59:00	
8-9	Orj.	03:00	08:00	13:00	17:00	22:00	27:00	31:00	36:00	41:00	45:00	50:00	55:00	59:00
	Opt.	03:20	10:20	13:00	18:00	22:00	25:00	33:10	40:10	45:00	48:50	54:50	59:00	
9-10	Orj.	04:00	09:00	13:00	18:00	23:00	27:00	33:00	39:00	45:00	50:00	56:00		
	Opt.	03:20	10:20	13:00	18:20	23:00	25:00	27:00	34:00	40:00	48:00	55:20		
10-11	Orj.	02:00	08:00	14:00	19:00	25:00	31:00	37:00	43:00	48:00	54:00			
	Opt.	03:00	11:10	14:00	19:50	26:30	33:00	37:00	40:00	48:10	55:10			
11-12	Orj.	00:00	06:00	12:00	17:00	23:00	29:00	35:00	41:00	46:00	52:00	58:00		
	Opt.	03:00	11:10	17:00	19:50	26:30	33:00	40:00	48:10	52:00	55:10			
12-13	Orj.	04:00	10:00	15:00	21:00	27:00	33:00	39:00	44:00	50:00	56:00			
	Opt.	03:00	11:10	15:00	19:50	26:30	33:00	40:00	44:00	48:10	55:10			
13-14	Orj.	02:00	08:00	13:00	19:00	25:00	31:00	37:00	42:00	48:00	54:00			
	Opt.	03:00	08:00	11:10	19:50	26:30	33:00	40:00	48:10	55:10				
14-15	Orj.	00:00	06:00	11:00	17:00	23:00	29:00	35:00	40:00	46:00	52:00	58:00		
	Opt.	03:00	11:10	19:50	23:00	26:30	33:00	40:00	48:10	52:00	55:10			
15-16	Orj.	04:00	09:00	15:00	21:00	27:00	33:00	38:00	44:00	50:00	56:00			
	Opt.	03:00	11:10	19:50	26:30	33:00	40:00	44:00	48:10	55:10				
16-17	Orj.	00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00	24:00	27:00	31:00	35:00	39:00	43:00	47:00
	Opt.	03:20	10:20	16:00	18:00	25:00	31:00	33:10	40:10	43:00	48:50	51:00	54:50	59:00
17-18	Orj.	03:00	07:00	11:00	15:00	19:00	23:00	27:00	31:00	35:00	39:00	43:00	46:00	50:00
	Opt.	03:20	07:00	10:20	15:00	18:00	25:00	31:00	33:10	40:10	43:00	48:50	54:50	58:00
18-19	Orj.	02:00	06:00	10:00	14:00	18:00	22:00	26:00	30:00	34:00	38:00	42:00	46:00	50:00
	Opt.	03:20	10:20	14:00	18:00	22:00	25:00	30:00	33:10	40:10	46:00	48:50	54:50	58:00
19-20	Orj.	02:00	05:00	09:00	13:00	17:00	21:00	25:00	33:00	41:00	49:00	56:00		
	Opt.	03:00	09:00	11:10	19:50	26:30	33:00	40:00	48:10	55:10				
20-21	Orj.	04:00	12:00	20:00	27:00	35:00	43:00	51:00	58:00					
	Opt.	03:15	10:50	17:50	25:15	33:30	40:20	50:30	55:40					
21-22	Orj.	06:00	14:00	22:00	29:00	37:00	45:00	53:00						
	Opt.	03:15	10:50	17:50	25:15	33:30	40:20	50:30	55:40					
22-23	Orj.	00:00	08:00	16:00	24:00	33:00	42:00	51:00						
	Opt.	03:15	10:50	17:50	25:15	33:30	40:20	50:30	55:40					
23-24	Orj.	00:00	09:00	18:00	29:00	40:00	50:00	00:00						
	Opt.	03:15	10:50	17:50	25:15	33:30	40:20	50:30	55:40					

Saat 06:00 ile 24:00 arasındaki seferlerin, tablonun ilk sütununda belirtilen saat aralıklarına göre kalkış saatleri verilmiştir. Şekil 5.6’de M2 – Marmaray hatları arasında transfer olan yolcuların mevcut ve optimizasyon sonucu oluşan ortalama transfer bekleme süreleri, saat aralıklarına göre karşılaştırılmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.6 : M2-Marmaray transfer yolcularının ortalama bekleme süreleri.

Mevcut sefer çizelgesine göre, iki örnek hat arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 111 ile 298 saniye arasında değişmektedir. 298 saniye ile yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en fazla olduğu saat 21:00-22:00 aralığı, 111 saniye ile en az olduğu zaman dilimi ise 19:00-20:00 saatleri arasındadır. Yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 181 saniyedir.

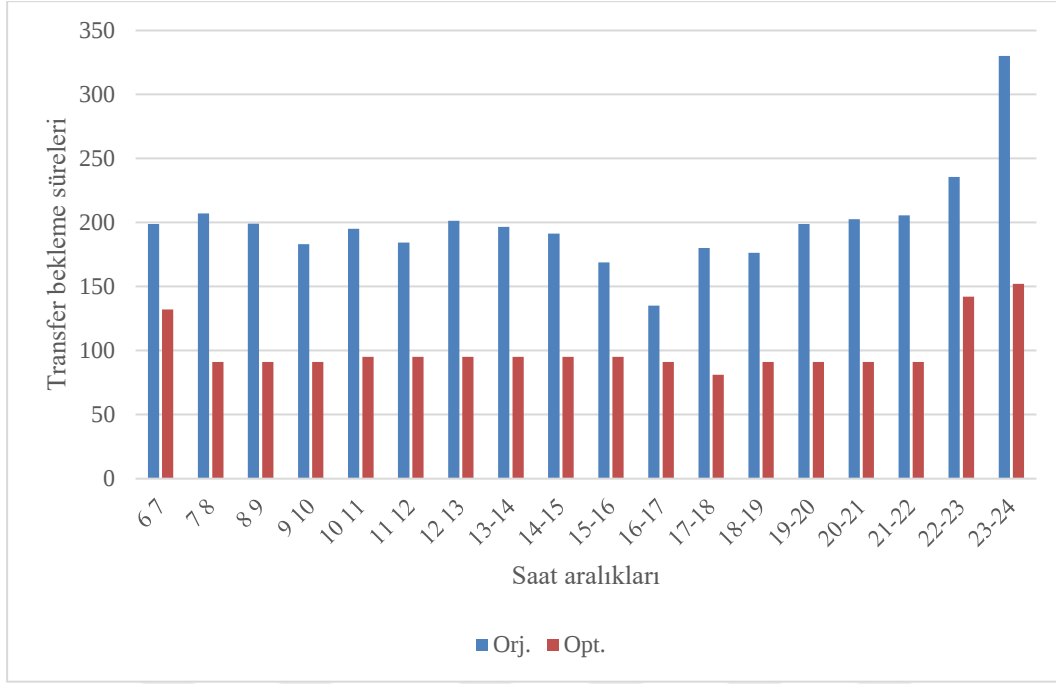
GA ile optimize edilen sefer çizelgesine göre ise, iki örnek hat arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 49 ile 98 saniye arasında değişmektedir. Sabah 07:00 – 08:00 saatleri arası yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en az olduğu zaman dilimi iken, 23:00-24:00 saatleri arası ise yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en fazla olduğu zamanlar olmuştur. Senkronizasyon sonucu, yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 76 saniyeye düşmektedir.

Çizelge 5.18’de M4 Kadıköy – Sabiha Gökçen Havalimanı metro hattına ait mevcut ve optimize edilmiş sefer çizelgeleri bulunmaktadır.

Çizelge 5.18 : M4 mevcut ve güncellenen sefer çizelgesi.

Saat		1. Sefer	2. Sefer	3. Sefer	4. Sefer	5. Sefer	6. Sefer	7. Sefer	8. Sefer	9. Sefer	10. Sefer	11. Sefer	12. Sefer	13. Sefer
6-7	Orj.	02:00	10:00	19:00	28:00	33:00	42:00	47:00	52:00	57:00				
	Opt.	02:20	12:20	19:50	27:50	35:10	43:00	48:10	57:30					
7-8	Orj.	02:00	07:00	11:00	16:00	21:00	26:00	31:00	35:00	40:00	45:00	50:00	55:00	
	Opt.	04:50	07:00	13:10	20:00	26:00	28:20	35:10	40:00	42:30	45:00	50:20	57:20	
8-9	Orj.	00:00	04:00	09:00	14:00	19:00	24:00	28:00	33:00	38:00	43:00	48:00	53:00	57:00
	Opt.	02:20	10:10	16:50	25:20	28:00	32:00	38:00	40:20	43:00	46:20	54:20	57:00	
9-10	Orj.	02:00	07:00	12:00	17:00	21:00	26:00	31:00	36:00	41:00	45:00	50:00	55:00	
	Opt.	01:50	07:00	10:10	17:00	21:00	25:20	32:10	36:00	39:30	45:00	47:20	54:20	
10-11	Orj.	00:00	06:00	12:00	18:00	23:00	29:00	35:00	41:00	47:00	53:00	59:00		
	Opt.	01:10	06:00	10:20	17:10	00:50	32:20	40:00	46:30	55:00	59:00			
11-12	Orj.	05:00	11:00	16:00	22:00	28:00	34:00	40:00	46:00	52:00	58:00			
	Opt.	01:10	05:00	10:20	17:10	00:50	32:20	40:00	46:30	55:00	58:00			
12-13	Orj.	04:00	09:00	15:00	21:00	27:00	33:00	39:00	45:00	51:00	56:00			
	Opt.	01:10	04:00	10:20	17:10	00:50	32:20	40:00	46:30	55:00				
13-14	Orj.	02:00	08:00	14:00	20:00	26:00	32:00	38:00	44:00	49:00	55:00			
	Opt.	01:10	08:00	10:20	17:10	00:50	32:20	40:00	46:30	55:00				
14-15	Orj.	01:00	07:00	13:00	19:00	25:00	31:00	36:00	42:00	48:00	54:00			
	Opt.	01:10	07:00	10:20	17:10	00:50	32:20	40:00	46:30	55:00				
15-16	Orj.	00:00	06:00	12:00	18:00	24:00	29:00	35:00	41:00	47:00	53:00	59:00		
	Opt.	01:10	06:00	10:20	17:10	00:50	32:20	40:00	46:30	55:00	59:00			
16-17	Orj.	04:00	09:00	13:00	18:00	23:00	28:00	33:00	37:00	42:00	47:00	52:00	57:00	
	Opt.	01:50	04:00	10:10	17:00	23:00	25:20	32:10	37:00	39:30	47:20	54:20	57:00	
17-18	Orj.	02:00	06:00	11:00	16:00	21:00	26:00	30:00	35:00	40:00	45:00	50:00	54:00	59:00
	Opt.	02:20	06:00	10:10	16:50	21:00	25:20	32:00	35:00	40:20	46:20	50:00	54:20	59:00
18-19	Orj.	04:00	09:00	14:00	19:00	23:00	28:00	33:00	38:00	43:00	47:00	52:00	57:00	
	Opt.	01:50	04:00	10:10	17:00	23:00	25:20	32:10	39:30	43:00	47:20	54:20	57:00	
19-20	Orj.	02:00	07:00	12:00	16:00	21:00	26:00	31:00	36:00	40:00	45:00	50:00	55:00	
	Opt.	01:50	07:00	10:10	17:00	21:00	25:20	32:10	36:00	39:30	45:00	47:20	54:20	
20-21	Orj.	00:00	05:00	09:00	14:00	19:00	24:00	29:00	33:00	38:00	43:00	48:00	53:00	58:00
	Opt.	01:50	05:00	10:10	17:00	19:00	25:20	29:00	32:10	39:30	43:00	47:20	54:20	58:00
21-22	Orj.	02:00	07:00	12:00	21:00	30:00	38:00	47:00	56:00					
	Opt.	01:50	07:00	10:10	16:50	24:50	32:10	40:00	45:10	54:30				
22-23	Orj.	05:00	14:00	23:0	31:00	40:00	49:00	58:00						
	Opt.	00:00	09:20	16:50	24:50	32:10	40:00	45:10	54:30					
23-24	Orj.	07:00	16:00	24:00	33:00	42:00	52:00							
	Opt.	00:00	09:20	16:50	24:50	32:10	40:00	45:10	54:30					

Saat 06:00 ile 24:00 arasındaki seferlerin, tablonun ilk sütununda belirtilen saat aralıklarına göre kalkış saatleri verilmiştir.



Şekil 5.7 : M4-Marmaray transfer yolcularının ortalama bekleme süreleri.

Ayrılıkçeşme istasyonunda entegre olan Marmaray ve M4 metro hatlarına arasında transfer olan yolcuların mevcut ve optimizasyon sonucu oluşan ortalama transfer bekleme sürelerine bakıldığında, Şekil 5.7’deki gibi grafik oluşmaktadır.

Mevcut sefer çizelgesine göre, iki örnek hat arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 135 ile 330 saniye arasında değişmektedir. 330 saniye ile yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en fazla olduğu saat 23:00-24:00 aralığı, 135 saniye ile en az olduğu zaman dilimi ise 16:00-17:00 saatleri arasındadır. Yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 199 saniyedir.

GA ile optimize edilen sefer çizelgesine göre ise, iki örnek hat arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 81 ile 152 saniye arasında değişmektedir. Sabah 17:00 – 18:00 saatleri arası yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en az olduğu zaman dilimi iken, 23:00-24:00 saatleri arası ise yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en fazla olduğu zamanlar olmuştur. Senkronizasyon sonucu, yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 100 saniyeye düşmektedir.

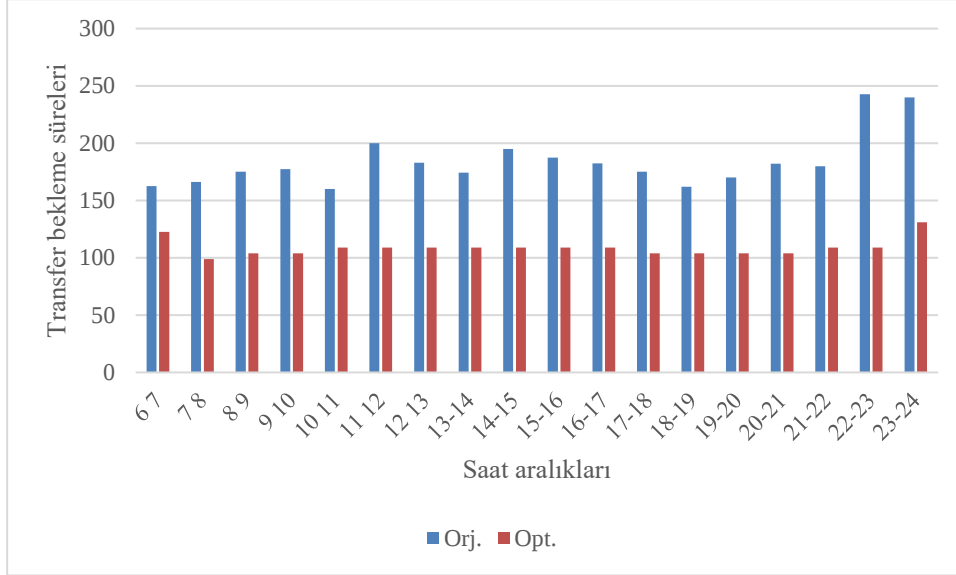
Çizelge 5.19’da M5 Üsküdar – Samandıra metro hattına ait mevcut ve optimize edilmiş sefer çizelgeleri bulunmaktadır.

Çizelge 5.19 : M5 mevcut ve güncellenen sefer çizelgesi.

Saat		1. Sefer	2. Sefer	3. Sefer	4. Sefer	5. Sefer	6. Sefer	7. Sefer	8. Sefer	9. Sefer	10. Sefer	11. Sefer	12. Sefer	13. Sefer
6-7	Orj.	00:00	08:00	17:00	25:00	29:00	33:00	37:00	41:00	45:00	49:00	53:00	57:00	
	Opt.	00:40	09:30	16:30	23:10	31:50	39:00	46:40	49:00	54:00	57:00			
7-8	Orj.	01:00	05:00	09:00	13:00	17:00	21:00	26:00	30:00	34:00	38:00	42:00	46:00	50:00
	Opt.	01:40	05:00	10:00	16:50	21:00	24:40	32:00	40:00	46:00	50:00	54:30	58:00	
8-9	Orj.	02:00	06:00	10:00	14:00	18:00	22:00	26:00	30:00	34:00	38:00	42:00	46:00	50:00
	Opt.	01:40	06:00	10:00	16:50	22:00	24:40	32:00	40:00	46:00	50:00	54:30	58:00	
9-10	Orj.	02:00	06:00	10:00	14:00	20:00	27:00	33:00	39:00	45:00	51:00	57:00		
	Opt.	01:40	06:00	10:00	16:50	20:00	24:40	32:00	40:00	46:00	51:00	54:30	57:00	
10-11	Orj.	03:00	09:00	15:00	21:00	27:00	33:00	39:00	45:00	51:00	58:00			
	Opt.	02:00	09:50	16:40	23:10	27:00	31:50	39:40	46:40	51:00	54:20	58:00		
11-12	Orj.	04:00	10:00	16:00	22:00	28:00	34:00	40:00	46:00	52:00	58:00			
	Opt.	02:00	09:50	16:40	23:10	28:00	31:50	39:40	46:40	54:20	58:00			
12-13	Orj.	04:00	10:00	16:00	22:00	29:00	35:00	41:00	47:00	53:00	59:00			
	Opt.	02:00	09:50	16:40	23:10	29:00	31:50	35:00	39:40	46:40	54:20	59:00		
13-14	Orj.	05:00	11:00	17:00	23:00	29:00	35:00	41:00	47:00	53:00				
	Opt.	02:00	09:50	16:40	23:10	29:00	31:50	35:00	39:40	46:40	54:20			
14-15	Orj.	00:00	06:00	12:00	18:00	24:00	30:00	36:00	42:00	48:00	54:00			
	Opt.	02:00	09:50	16:40	23:10	31:50	36:00	39:40	46:40					
15-16	Orj.	00:00	06:00	12:00	18:00	24:00	31:00	37:00	43:00	49:00	55:00			
	Opt.	02:00	09:50	16:40	23:10	31:50	39:40	43:00	46:40	49:00	54:20			
16-17	Orj.	01:00	07:00	13:00	19:00	23:00	28:00	32:00	36:00	40:00	45:00	49:00	53:00	57:00
	Opt.	02:00	09:50	16:40	23:10	28:00	31:50	36:00	39:40	46:40	49:00	54:20	57:00	
17-18	Orj.	02:00	06:00	10:00	14:00	19:00	23:00	27:00	31:00	36:00	40:00	44:00	48:00	53:00
	Opt.	01:40	06:00	10:00	16:50	19:00	24:40	32:00	36:00	40:00	46:00	48:00	54:30	57:00
18-19	Orj.	01:00	05:00	10:00	14:00	18:00	22:00	27:00	31:00	35:00	39:00	44:00	48:00	52:00
	Opt.	01:40	05:00	10:00	14:00	16:50	22:00	24:40	31:00	35:00	40:00	46:00	52:00	54:30
19-20	Orj.	01:00	05:00	09:00	13:00	18:00	22:00	26:00	30:00	35:00	39:00	43:00	47:00	52:00
	Opt.	01:40	05:00	10:00	13:00	16:50	22:00	24:40	31:00	35:00	40:00	46:00	52:00	54:30
20-21	Orj.	00:00	04:00	09:00	13:00	17:00	21:00	26:00	30:00	34:00	38:00	44:00	50:00	57:00
	Opt.	01:40	04:00	10:00	13:00	16:50	21:00	24:40	31:00	34:00	40:00	46:00	50:00	54:30
21-22	Orj.	03:00	09:00	15:00	21:00	27:00	33:00	39:00	45:00	51:00	57:00			
	Opt.	02:00	09:50	16:40	23:10	27:00	31:50	39:40	46:40	54:20	57:00			
22-23	Orj.	03:00	09:00	15:00	21:00	28:00	34:00	42:00	51:00	59:00				
	Opt.	02:00	09:50	16:40	23:10	28:00	31:50	39:40	46:40	54:20				
23-24	Orj.	08:00	16:00	25:00	33:00	42:00	50:00	59:00						
	Opt.	00:50	09:30	16:30	23:10	31:50	39:00	46:40	54:00	59:00				

Saat 06:00 ile 24:00 arasındaki seferlerin, tablonun ilk sütununda belirtilen saat aralıklarına göre kalkış saatleri verilmiştir.

Şekil 5.8’de M5 – Marmaray hatları arasında transfer olan yolcuların mevcut ve optimizasyon sonucu oluşan ortalama transfer bekleme süreleri, saat aralıklarına göre karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



Şekil 5.8 : M5-Marmaray transfer yolcularının ortalama bekleme süreleri.

Mevcut sefer çizelgesine göre, iki örnek hat arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 160 ile 243 saniye arasında değişmektedir. 243 saniye ile yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en fazla olduğu saat 22:00-23:00 aralığı, 160 saniye ile en az olduğu zaman dilimi ise 10:00-11:00 saatleri arasındadır. Yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 184 saniyedir.

GA ile optimize edilen sefer çizelgesine göre ise, iki örnek hat arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 99 ile 131 saniye arasında değişmektedir. Sabah 07:00 – 08:00 saatleri arası yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en az olduğu zaman dilimi iken, 23:00-24:00 saatleri arası ise yolcuların ortalama bekleme sürelerinin en fazla olduğu zamanlar olmuştur. Senkronizasyon sonucu, yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 109 saniyeye düşmektedir.

Çizelge 5.20’deki tablo ile geliştirilen model sonucu örnek hatlar arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme sürelerindeki değişim verilmiştir.

Çizelge 5.20 : Transfer yolcuların ortalama bekleme sürelerinin karşılaştırılması.

Transfer istasyonu	Transfer yönü	Yolcuların transfer için ortalama bekleme süreleri (sn.)		Değişim
		Mevcut	Optimizasyon	
Yenikapı	Marmaray↔M1A	197	77	%61
	Marmaray↔M1B	208	105	%50
	Marmaray↔M2	181	76	%58
Ayrılıkçeşmesi	Marmaray↔M4	199	100	%50
Üsküdar	Marmaray↔M5	184	108	%41

Buna göre yolcuların bekleme süreleri %41 ile %61 oranında azaldığı görülmektedir.



6. SONUÇ

Tez çalışmasında; kent içi raylı sistem ağlarında entegrasyonun artmasıyla birlikte oluşan, sefer çizelgelerinin senkronizasyonu konusunda araştırma yapılmıştır. Kent içi raylı sistem ağları arasında transfer olmak isteyen yolcuların transfer bekleme sürelerini azaltmak amacıyla, sefer çizelgeleri arasında senkronizasyonu artıracak modeller geliştirilmiştir. Sefer çizelgelerinin senkronizasyonu probleminin çözümüne; günlük sefer çizelgesinin yanında, günün ilk ve son seferleri özelinde de çalışma yapılmıştır. Sefer çizelgeleri arasında senkronizasyonu artıracak modeller sezgisel algoritmalar yardımıyla geliştirilmiştir. Geliştirilen modellerde; GA, BT, PSO ve Yusufçuk algoritmaları kullanılmıştır.

Giriş ve literatür bölümünde belirtildiği gibi sefer çizelgelerin senkronizasyonu ile ilgili yapılan çalışmaların büyük bir bölümünde yolcuların transfer süreleri sabit ve ortalama bir değer olarak alınmaktadır. Sefer çizelgelerinin senkronizasyonunda, transfer olacak yolcunun bekleme süresini etkileyecek karar değişkenlerinden bir tanesi de yolcunun transfer süresidir. Bu yüzden, transfer olan her yolcu için ortalama bir transfer süresi değeri olarak ve istasyon yoğunluğunu düşünmeden her zaman dilimi için aynı transfer süresini kabul ederek geliştirilen model ile bulunan sefer çizelgelerinin, pratikte istediği karşılığı alamayacağı görülmektedir. Bu kapsamda, geliştirilen sefer çizelgeleri modelini test etmek ve model için gerekli verileri toplamak için, Marmaray ve Marmaray ile entegre olan Metro İstanbul hatlarından, M1A Yenikapı – Atatürk Havalimanı ve M1B Yenikapı – Kirazlı hafif metro hatları ile M2 Yenikapı – Hacıosman, M4 Kadıköy – Sabiha Gökçen Havalimanı ve M5 Üsküdar - Samandıra metro hatları seçilmiştir.

Farklı işletmeler tarafından çalıştırılan Marmaray ve Metro İstanbul hatları, İstanbul toplu taşımalarının önemli aktarma merkezlerinden olan Yenikapı, Üsküdar ve Ayrılıkçeşme istasyonlarında birbiriyle entegre olmaktadır. Marmaray ile entegre olan metro hatları yolcu sayısının ve transfer yolcu sayısının en fazla olduğu hatların başında gelmektedir. Hatların sefer çizelgelerinin senkronizasyonuna baktığımızda ise; özellikle sefer aralıklarının fazla olduğu saatlerde, yolcuların transfer için bekleme

sürelerinin fazla olduğu ve günün ilk ve son saatlerinde hatların sefer çizelgeleri arasında uyum olmadığı tespit edilmiştir.

Yolcuların transfer süreçleri ile ilgili örnek hatlarda günün farklı zaman aralıklarında yapılan gözlemler neticesinde, Marmaray – M1A hatları arasında yolcuların transfer sürelerinin 100 ile 230 saniye arasında değiştiği ve ortalamasının 157 saniye olduğu, Marmaray- M1B hatları arasında ise bu değerlerin 119 ile 250 saniye arasında olduğu ve ortalama transfer süresinin 177 saniye olduğu tespit edilmiştir. Yenikapı İstasyonu’nda yapılan bir diğer transfer süresi ölçümünde ise, Marmaray – M2 hatları arasında transfer olan yolcuların ortalama 127 saniye ile transfer oldukları ve transfer sürelerinin 91 ile 170 saniye arasında değiştiği ölçülmüştür. Ayrılıkçeşmesi’nde, Marmaray – M4 arasında 140 ile 280 saniye arasında değişen transfer süresinin, ortalama 196 saniye, Üsküdar istasyonunda Marmaray – M5 hatları arasında ise, 152 ile 295 saniye arasında olan yolcuların transfer sürelerinin ortalama 210 saniye olduğu tespit edilmiştir.

Son trene yetişmek isteyen yolcuların normalden daha hızlı hareket ettikleri ve birbirlerinden etkilenerek sürü psikolojisi ile davrandıkları kanaati, yolcuların transfer gözlemlerinde elde edilen önemli tespitlerden olmuştur. Bu tespiti doğrulamak için yapılan ölçümlerde, son trene yetişmek isteyen yolcuların ortalama transfer sürelerinin normal zamanlardan daha düşük olduğu ölçülmüştür. Her transfer istasyonunda bu ölçümü yapmamak ve normal transfer sürelerinden son tren transfer süresini elde edebilmek amacıyla, yolcuların normal zamanlardaki ortalama transfer sürelerinden son tren transfer süreleri tahmin edilmeye çalışılmıştır. Bu tahmin sürecinin oluşmasında, yolcuların son trene yetişmek için sürü psikolojisi ile hareketleri ve birbirlerine benzemek istemeleri gözlemleri de etkili olmuştur. Son trene transfer olmak isteyen yolcuların transfer süreleri PSO, BT ve Yusufçuk algoritmaları ile normal zamanlardaki transfer sürelerinden tahmin edilmeye çalışılmıştır. Son trene transfer olmak isteyen her yolcu, algoritmadaki bir bireyi temsil etmiş ve her üç algoritma 50 kez çalıştırılarak, sonuçlar elde edilmiştir. Sonuçlara göre, %96 ile %99 arasında değişen yakınlık ile, en iyi tahminler PSO ile geliştirilen model ile elde edilmiştir.

Elde edilen transfer süreleri ile, günün ilk saati, son seferler ve günlük sefer çizelgeleri olmak üzere üç farklı çalışma yapılmıştır. Günün ilk saatlerinde transfer olan yolcuların bekleme sürelerini düşürmek amacıyla oluşturulan model, GA ve BT

algoritması kullanılarak geliştirilmiştir. Geliştirilen modeller, örnek hatlarımız üzerinde test edilmiştir. Günün ilk seferleri için, Yenikapı istasyonunda 21, Ayrılıkçeşme istasyonunda 7 ve Üsküdar istasyonunda 5 olmak üzere toplam 33 transferde, transfer olan 450 yolcunun toplam bekleme süresi 2134 dakika olarak tespit edilmiştir. GA ile geliştirilen model ile oluşan sefer çizelgesine göre, yolcuların toplam bekleme süreleri 1250 dakikaya, BT ile geliştirilen model ile ise 1882 dakikaya düşmüştür. Transfer olan 450 yolcunun toplam bekleme süresi ise GA ile %41, BT ile %12 oranında düşmüştür. Transfer olan yolcuların, ortalama bekleme süreleri normalde 268 saniye iken, GA ile geliştirilen model ile %33 azalarak 178 saniye ve BT ile geliştirilen model ile %6 azalarak 252 saniye olarak bulunmuştur.

Ayrıca, yolcuların transfer sürelerinin dağılımı hesaba katılmadan, literatürdeki diğer çalışmalardaki gibi ortalama transfer sürelerine göre yapılması halindeki sonuçlarda çalışmada paylaşılmıştır. GA ile geliştirilen modelde yolcuların transfer sürelerinin dağılımlarının dikkati alınmaması halinde, yolcu başına düşen ortalama bekleme süresi 14 saniye, yolcuların toplam bekleme süresi ise 76 dakika daha fazla olmaktadır.

Günün son seferlerini düşünerek, başarılı transfer yolcularının sayısını artırmak için, PSO algoritması ile elde edilen transfer zamanını kullanarak, transfer olmak isteyen bütün yolcuların transfer olmasını sağlayacak şekilde, yolcuların bekleme süresinin en az olacağı son tren zaman zaman çizelgesi düzenlemesi yapılmıştır. Yenikapı’da 19, Ayrılıkçeşmesi’nde 6 ve Üsküdar’da 7 sefer olmak üzere toplam 33 transferde 1250 son tren transfer yolcusunun 772 tanesi mevcut sefer çizelgelerine göre transfer olabilmektedir. Transfer olan bu yolcuların ortalama bekleme süreleri ise 196 saniye olarak bulunmuştur. 1250 yolcunun, PSO ile tahmin edilen son tren transfer süreleri kullanılarak, bütün yolcuların transfer olması halinde, transfer olan yolcuların ortalama bekleme süreleri 53 saniyeye düşmüştür. PSO ile tahmin edilen son tren transfer süresine göre yapılan sefer çizelgelerinin senkronizasyonu ile, başarılı transfer sayısı %38 artmış ve transfer olan yolcuların ortalama bekleme süreleri ise %73 azalmıştır. Ayrıca, tahmin edilen son tren transfer süreleri yerine ortalama transfer süreleri kullanılarak, bütün yolcuların transfer olacağı şekilde sefer çizelgeleri düzenlenmiş olsaydı, transfer olan yolcuların ortalama bekleme süreleri 124 saniye olacaktı. Bu sonuç da, sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmalarında, ortalama transfer süreleri yerine gerçek transfer verilerinin kullanılmasının önemini bir kez daha ortaya koymuştur.

Günün ilk saati ve son seferleri özelinde yapılan çalışmalardan sonra, kent içi raylı sistemlerin işletildiği 06:00-24:00 saatleri arasında örnek hatlar arasında transfer olan yolcuların bekleme sürelerini azaltmak amacıyla, oluşturulan model sezgisel algoritmalarından GA ile geliştirilerek sefer çizelgeleri düzenlenmiştir. Buna göre; Marmaray- M1A hatları arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 87 ile 332 saniye arasından, 32 ile 134 saniye arasına düşmüş, ortalama bekleme süreleri ise 196 saniyeden, 77 saniyeye düşmüştür. Marmaray – M1B hatları arasında ise; yolcuların ortalama bekleme süreleri 140 – 343 saniye aralığından, 56 – 129 saniye aralığına inmiştir. Yolcuların ortalama bekleme süreleri ise, 208 saniyeden 105 saniyeye düşmüştür. Yenikapı’da Marmaray’ın entegre olduğu metro hattı olan M2 hattı ile transfer süreçleri incelenildiğinde ise, mevcutta yolcuların ortalama bekleme süreleri 181 saniye iken, GA ile optimize edilen sefer çizelgesine göre bu süre 76 saniyeye düşmüştür. Minimum transfer bekleme süresi, 111’den 49 saniyeye, maksimum transfer bekleme süresi ise, 298 saniyeden 98 saniyeye inmiştir. Ayrılıkçeşme’de entegre olan Marmaray ve M4 metro hatları arasında transfer olan yolcuların mevcut ve optimizasyon sonucu oluşan ortalama transfer bekleme sürelerine bakıldığında, yolcuların bekleme süreleri 135 ile 330 saniye aralığından, 81 ile 152 saniye aralığına, ortalama bekleme süreleri ise, 199 saniyeden 100 saniyeye inmiştir. Marmaray ile M5 hatları arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 160 ile 243 saniye arasında değişmektedir. Yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 184 saniyedir. GA ile optimize edilen sefer çizelgesine göre ise, iki örnek hat arasında transfer olmak isteyen yolcuların ortalama bekleme süreleri 99 ile 131 saniye, yolcuların ortalama transfer bekleme süreleri ise 109 saniyeye düşmektedir.

Kent içi raylı sistemlerde gerçek aktarma süreleriyle sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmasıyla, sefer çizelgelerinin senkronizasyonu çalışmalarında gerçek transfer sürelerinin kullanılması ve günün değişen zamanlarına göre transfer süreçlerindeki değişimin, senkronizasyon çalışmasına yansıtılması gereklilikleri vurgulanmaya çalışılmıştır. Ayrıca, son tren transfer süresinin, normal zamanlardaki transfer sürelerinden farklı olduğunun tespit edilmesi ve son tren sefer çizelgelerinde kullanılan transfer sürelerinin sezgisel algoritmalar ile tahmin edilmesinin, bu konudaki çalışmalara katkı vereceği düşünülmektedir. Tez çalışması, kent içi raylı

sistemleri işleyen Metro İstanbul ve TCDD Taşımacılık A.Ş. gibi kurumlara ve bu konuda çalışma yapan kişilere katkı sağlayacaktır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, transfer süreci boyunca yolcu davranışlarının modellenmesi faydalı olabilir. Bu modelleme, transfer süreci ve tren tarifelerinin senkronizasyonun daha gerçekçi sonuçlar vermesini sağlayabilir. Yolcu davranışını ve bunun transferler üzerindeki etkisini anlamak, sefer çizelgelerinin daha verimli ve hassas bir şekilde optimize edilmesini sağlayabilir. Ayrıca kent içi raylı sistemler özelinde yapılan bu çalışma, otobüs, metrobüs gibi diğer toplu taşıma türlerinin tamamı dahil edilerek, bütün kent içi toplu taşıma ağına yönelik olarak yapılabilir.





KAYNAKLAR

- [1] **Fouracre, P., Dunkerley, C. & Gardner, G.** (2003). Mass rapid transit systems for cities in the developing world, *Transport Reviews*, 23 (3), 299-310.
- [2] **Li, S., Dessouky, M. M., Yang, L. & Gao, Z.** (2017). Joint optimal train regulation and passenger flow control strategy for high-frequency metro lines, *Transportation Research Part B*, 99, 113-137.
- [3] **Yüksel, T.** (2018). A Survey on Energy-Efficient Timetable Optimization Model Based on the Utilization of Regenerative Braking, *2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, IEEE*, (pp. 1-6), Turkey: Ankara, October 19-21.
- [4] **Mo, P., Yang, L., Wang, Y. & Qi, J.** (2019). A flexible metro train scheduling approach to minimize energy cost and passenger waiting time, *Computers & Industrial Engineering*, 132, 412-432.
- [5] **Wang, Y., Tang, T., Ning, Boom, B. T. J. v. d. & Schutter, B.D.** (2015). Passenger Demands-Oriented Train Scheduling for an Urban Rail Transit Network, *Transportation Research Part C*, 60, 1-23.
- [6] **Wang, Y.** (2014) *Optimal Trajectory Planning and Train Scheduling for Railway Systems*. (Doctoral thesis). Delft University of Technology, Delft.
- [7] **Goverde, R.M. & Hansen, I.A.** (2013). Performance Indicators for Railway Timetables, *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation Proceedings*, (pp. 1-6), China: Beijing, August 30 - September 01.
- [8] **Wu, J., Liu, M., Sun, H., Li, T., Gao, Z. & Wang, D.Z.** (2015) Equity-based timetable synchronization optimization in urban subway network, *Transportation Research Part C*, 51, 1-18.
- [9] **Wong, R. C., & Leung, J. M.** Timetable Synchronization for Mass Transit Railway, *Transportation Science*, cilt 42, no. 1, pp. 57-69, 2008.

- [10] **Oort, N. v.** (2011). *Service Reliability and Urban Public Transport Design*. (Doctoral thesis). Delft University of Technology, Delft.
- [11] **Susilo, Y. O. & Cats, O.** (2014). Exploring key determinants of travel satisfaction for multi-modal trips by different traveler groups, *Transportation Research Part A*, 67, 366-380.
- [12] **Raveau, S., Muñoz, J. C. & Grange, L. d.** (2011). A topological route choice model for metro, *Transportation Research Part A*, 45, 138-147.
- [13] **Garcia-Martinez, A., Cascajo, R., Jara-Diaz, S.R., Chowdhury, S. & Monzon, A.** (2018). Transfer penalties in multimodal public transport networks, *Transportation Research Part A*, 114, 52-66.
- [14] **Peeters, L. & Kroon, L.** (2011). A Cycle Based Optimization Model for the Cyclic Railway Timetabling Problem, *Computer Aided Scheduling of Public Transport*, 275-296.
- [15] **Shafia, M.A. & Jamili, A.** (2009). Measuring the train timetables robustness, *2nd International Conference on Recent Advances in Railway Engineering (ICRARE-2009)*, (pp. 1-6). Iran : Tehran, September 27-28.
- [16] **Chang, S.-C. & Chung, Y.-C.** (2005). From timetabling to train regulation a new train operation model, *Information and Software Technology*, 575-585.
- [17] **Kanai, S., Shiina, K., Harada, S. & Tomii, N.** (2011). An optimal delay management algorithm from passengers' viewpoints considering the whole railway network, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 25-37.
- [18] **Niu, H. & Zhou, X.** (2013). Optimizing urban rail timetable under time-dependent demand and oversaturated conditions, *Transportation Research Part C*, 36, 213-130.
- [19] **Sato, K., Tamura, K. & Tomii, N.** (2013). A MIP-based timetable rescheduling formulation and algorithm minimizing further inconvenience to passengers, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 3, 38-53.
- [20] **Andersson, E. V., Peterson, A. & Krasemann, J. T.** (2015). Improved Railway Timetable Robustness for Reduced Traffic Delays – a MILP Approach, *6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis*, (pp. 1-21), Japan : Tokyo, March 23-26.

- [21] **Khoshniyat, F. & Peterson, A.** (2015). Robustness Improvements in a Train Timetable with Travel Time Dependent Minimum Headways, *6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis*, (pp. 1-17), Japan : Tokyo, March 23-26.
- [22] **Sels, P., Dewilde, T., Cattrysse, D. & Vansteenwegen, P.** (2016). Reducing the passenger travel time in practice by the automated construction of a robust railway timetable, *Transportation Research Part B*, 84, 124-156.
- [23] **Wang, Y., Ning, B., Boom, T. v. d. & Schutter, B. D.** (2016). *Optimal Trajectory Planning and Train Scheduling for Urban Rail Transit Systems*. Springer.
- [24] **Besinovic, N.** (2017). *Integrated capacity assessment and timetabling models for dense railway networks*. (Doctoral thesis). Delft University of Technology, Delft.
- [25] **Toletti, A.** (2018). *Automated railway traffic rescheduling and customer information*. (Doctoral thesis). ETH Zurich, Zurich.
- [26] **Duan, H.** (2018). *Closer Running – Railway Capacity Analysis and Timetable Improvement*. (Doctoral thesis). University of Birmingham, Birmingham.
- [27] **Palmqvist, C. W.** (2019). *Delays and Timetabling for Passenger Trains*. (Doctoral thesis). Lund University, Lund.
- [28] **Dündar, S.** (2009). *Demiryolu Trafik Kontrolü Probleminin Genetik Algoritmalarla Çözümü*. (Doktora tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [29] **Yalçınkaya, Ö.** (2010). *A Feasible Timetable Generator Simulation Modelling Framework and Simulation Integrated Genetic and Hybrid Genetic Algorithms for Train Scheduling Problem*. (Doctoral thesis). Dokuz Eylül University, Graduate School of Natural and Applied Sciences, İzmir.
- [30] **Aydın, G.** (2015). *Planning of Train Movements in Single Track Railways*. (Doctoral thesis). Yıldız Technical University, Graduate School of Natural and Applied Sciences. İstanbul.
- [31] **Nachtigall, K. & S. Voget, S.** (1996). A Genetic Algorithm Approach to Periodic Railway Synchronization, *Computers Ops. Res.*, 453-463.

- [32] **Goverde, R. M.** (1998). *Synchronization Control of Scheduled Train Services to Minimize Passenger Waiting Times*. (Doctoral thesis). Delft University of Technology, Delft.
- [33] **Friedrich, M., Hofsäß, I. & Wekeck, S.** (2001). Timetable-based Transit Assignment Using Branch & Bound, *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1752(1), 100-107.
- [34] **Wong, R.C, Leung, J. M., Fung, K. W. & Leung, J. M. Y.** (2008). Timetable Synchronization for Mass Transit Railway, *Transportation Science*, 42(1), 57-69.
- [35] **Kang, L., Wu, J., Sun, H., Zhu, X. & Wang, B.** (2015). A practical model for last train rescheduling with train delay in urban railway transit networks, *Omega*, 50, 29-42.
- [36] **Kang, L. & Zhu, X.** (2016). A simulated annealing algorithm for first train transfer problem in urban railway networks, *Applied Mathematical Modelling*, 40, 419-435.
- [37] **X. Guo, X., Sun, H., Wu, J., Jin, J., Zhou, J. & Gao, Z.** (2016). Multiperiod-based timetable optimization for metro transit networks, *Transportation Research Part B*, 96, 46-67.
- [38] **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*, 118, 193-227.
- [39] **Tian, X. & Niu, H.** (2019). A bi-objective model with sequential search algorithm for optimizing network-wide train timetables, *Computers & Industrial Engineering*, 127, 1259-1272.
- [40] **Zhou, Y., Wang, Y., Yang, H. & Yan, X.** (2019). Last Train Scheduling for Maximizing Passenger Destination Reachability in Urban Rail Transit Networks, *Transportation Research Part B*, 129, 79-95.
- [41] **Abdolmaleki, M., Masoud, N. & Yin, Y.** (2020). Transit timetable synchronization for transfer time minimization, *Transportation Research Part B*, 131, 143-159.
- [42] **Huang, J., Zhang, T. & Wei, R.** (2021). Urban Railway Transit Timetable Optimisation Based on Passenger-and-Trains Matching – A Case Study of Beijing Metro Line, *Promet – Traffic&Transportation*, 33 (5), 671-687.

- [43] **Naeini, H.M., Shafahi, Y. & SafariTaherkhani, M.** (2022). Optimizing and Synchronizing Timetable in an Urban Subway Network with Stop-Skip Strategy, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 100301, 1-29.
- [44] **Yin, J., Wang, M., D'Ariano, A., Zhang, J. & Yang, L.** (2023). Synchronization of Train Timetables in an Urban Rail Network: A Bi-Objective Optimization Approach, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 174, 1-28.
- [45] **Sun, P., Zhang, C., Jin, B., Wang, Q. & Geng, H.** (2023). Timetable optimization for maximization of regenerative braking energy utilization in traction network of urban rail transit, *Computers & Industrial Engineering*, 183, 1-11.
- [46] **Zhou, W., Deng, L., Xie, M. & Yang, X.** (2013) Coordination Optimization of the First and Last Train's Departure Time on Urban Rail Transit Network, *Advances in Mechanical Engineering*, 2013,1-12.
- [47] **Kang, L., Zhu, X., Sun, H., Puchinger, J., Ruthmair, M. & Hu, B.** (2016). Modeling the first train timetabling problem with minimal missed trains and synchronization time differences in subway networks, *Transportation Research Part B*, 93, 17-36.
- [48] **Guo, X., Wu, J., Sun, H., Liu, R. & Gao, Z.** (2016). Timetable coordination of first trains in urban railway network: A case study of Beijing, *Applied Mathematical Modelling*, 40, 8048-8066.
- [49] **Li, X., Lu, L., Zheng, P. & Huang, Z.** (2019). Timetable Coordination of the First Trains for Subway Network With Maximum Passenger Perceived Transfer Quality, 7, 52042-52051.
- [50] **Guo, X., Wu, J., Zhou, J., Yang, X., Wu, D. & Gao, Z.** (2019). First-train timing synchronisation using multi-objective optimisation in urban transit networks, *International Journal of Production Research*, 57(11), 3522-3537.
- [51] **Li, X., Yamamoto, T., Yan, T., Lu, L. & Ye, X.** (2020). First Train Timetabling for Urban Rail Transit Networks with Maximum Passenger Transfer Satisfaction, *Sustainability*, 12(4166), 1-22.
- [52] **Kang, L., Li, H., Sun, H., Wu, J., Cao, Z. & Buhigiro, N.** (2021). First train timetabling and bus service bridging in intermodal bus-and-train transit networks, *Transportation Research Part B*, 149, 443-462.

- [53] **Chai, H., Tian, X. & Niu, H.** (2022). First-Train Timetable Synchronization in Metro Networks under Origin-Destination Demand Conditions, *Journal of Advanced Transportation*, 1-17.
- [54] **Chen, Y.-Z., Shi, C.-L., Claudel, C. G. & Hu, M.-B.** (2023). First train timetable synchronization with interval trains in subway networks, *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 11, 69-92.
- [55] **Yüksel, T. & Öztürk, Z.** (2024). Timetable Synchronisation for the First Trains in the Day According to Actual Transfer Times, *Promet – Traffic&Transportation*, 36(1), 69-82.
- [56] **C. Kou, C., He, S. & He, B.** (2014). Study on Connection Optimization of Last Train Departure Time on Urban Mass Transit Network, *Advanced Materials Research*, 1030-1032, 211-2214.
- [57] **Kang, L., Zhu, X., Wu, J., Sun, H., Siriya, S. & Kanokvate, T.** (2014). Departure Time Optimization of Last Trains in Subway Networks: Mean-Variance Model and GSA Algorithm, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 29, 1-12.
- [58] **Li, W., Xu, R., Luo, Q. & Jones, S.** (2016). Coordination of Last Train Transfers Using Automated Fare Collection (AFC) System Data, *Journal of Advanced Transportation*, 50, 2209-2225.
- [59] **Kang, L. & Zhu, X.** (2017). Strategic Timetable Scheduling for Last Trains in Urban Railway Transit Networks, *Applied Mathematical Modelling*, 45, 209-225.
- [60] **Yang, S., Yang, K., Gao, Z., Yang, L. & Shi, J.** (2017). Last-Train Timetabling under Transfer Demand Uncertainty: Mean-Variance Model and Heuristic Solution, *Journal of Advanced Transportation*, 1-13.
- [61] **Kang, L. & Meng, Q.** (2017). Two-phase decomposition method for the last train departure time choice in subway networks, *Transportation Research Part B*, 104, 568-582.
- [62] **Li, W., Xu, R., Luo, Q. & Jones, S.** (2019). Coordination of Last Train Transfers Using Potential Passenger Demand From Public Transfer Modes, *IEEE Access*, 7, 1-14.
- [63] **Chen, Y., Mao, B., Bai, Y., Ho, T. K. & Li, Z.** (2019). Timetable synchronization of last trains for urban rail networks with maximum accessibility, *Transportation Research Part C*, 99, 110-129.

- [64] **Chen, Y., Mao, B., Bai, Y., Ho, T. K. & Li, Z.** (2019). Optimal Coordination of Last Trains for Maximum Transfer Accessibility with Heterogeneous Walking Time, *Journal of Advanced Transportation*, 1-13.
- [65] **Li, W. & Luo, Q.** (2019). A data-driven estimation method for potential passenger demand of last trains in metro based on external traffic data, *Advances in Mechanical Engineering*, 11, 1-11.
- [66] **Yin, H., Wu, J., Sun, H., Kang, L. & Liu, R.** (2019). Optimizing Last Trains Timetable in the Urban Rail Network: Social Welfare and Synchronization,» *Transportmetrica B: Transport Dynamics*, 7 (1), 473-497.
- [67] **Nie, W., Li, H., Xiao, N., Yang, H., Jiang, Z. & Buhigiro, N.** (2021). Modeling and solving the last-shift period train scheduling problem in subway networks, *Physica A*, no. 569, pp. 1-14, 2021.
- [68] **Huang, K., Wu, J., Liao, F., Sun, H. & He, F.** (2021). Incorporating multimodal coordination into timetabling optimization of the last trains in an urban railway network, *Transportation Research Part C*, 124, 1-24.
- [69] **Wang, Y., Chen, J., Qin, Y. & Yang, X.** (2023). Timetable Rescheduling of Metro Network during the Last Train Period, *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 139, 1-10.
- [70] **Wang, Y., Zheng, C., Shen, J., Ma, J. & Chen, Z.** (2022). Last Train Delay Management in a Metro System: A Multi-Objective Rescheduling Optimization Model, *IEEE Access*, 10, 110821-110834.
- [71] **Ning, J., Peng, Q., Zhu, Y., Jiang, Y. & Nielsen, O. A.** (2022). A Bi-objective optimization model for the last train timetabling problem, *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 23, 1-19.
- [72] **Wang, C., Meng, X., Guo, M., Li, H. & Hou, Z.** (2022). An integrated energy-efficient and transfer-accessible model for the last train timetabling problem, *Physica A*, 588, 1-15, 2022.
- [73] **Zhang, S., Ma, C., Chen, Q., Sun, S. & Cheng, Y.** (2023). Last Train Rapid Synchronizing Approach for Maximum OD Accessibility with Passengers' Effective Travel Route, *J. Transp. Eng., Part A: Systems*, 149, 1-13.

- [74] **Wen, F., Bai, Y., Zhang, X., Chen, Y. & Li, N.** (2023). Last train timetable optimization for metro network to maximize the passenger accessibility over the end-of-service period, *Railway Sciences*, 2 (2), 273-288.
- [75] **Wang, F., Xu, R., Song, X. & Wang, P.** (2023). Collaborative optimization of last-train timetables for metro network to increase service time for passengers, *Computers and Operations Research*, 151, 1-21.
- [76] **Xu, W.** (2024). Last train timetabling with transfer accessibility in metro networks:integer linear programming model and schedule-based transfer network, *Measurement and Control*, 57(1), 30-39.
- [77] **Yüksel, T. & Öztürk, Z.** Optimization of the Transfer Speeds of Passengers Transferring Last Train with Particle Swarm Algorithm, *5nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, IEEE*, (pp. 1-4), Turkey: Ankara, October 21.
- [78] **Yang, Y. & Du, P.** (2020). Optimization of the Suburban Railway Train Operation Plan Based on the Zonal Mode, *Traffic Planning*, 1-12.
- [79] **Holland, J. H.** (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Michigan, The University of Michigan Press.
- [80] **Angeline, P. J.** (1995). Evolution Revolution:An Introduction to the Special Track on Genetic and Evolutionary Programming, *IEEE Expert Intelligent Systems and their Applications*, 10, 6-10.
- [81] **Goldberg, D. E. & Holland, J. H.** (1988). Genetic Algorithms and Machine Learning, *Machine Learning* 3, 95-99.
- [82] **Brooks, S. P. & Morgan, B. J. T.** (1995). Optimization using simulated annealing, *The Statistician*, 2, 241-257.
- [83] **Laarhoven, P. J. M. v. & Aarts, E. H. L.** (1987). *Simulated Annealing:Theory and Applications*. Amsterdam : Centre for Mathematics and Computer Science
- [84] **Kennedy, J. & Eberhart, R.** (1995). Particle Swarm Optimization, *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks, IEEE*, (pp. 1-4), Australia: Perth, November 27 - December 01.
- [85] **Mirjalili, S.** (2016). Dragonfly algorithm: A New Meta-Heuristic Optimization Technique for Solving Single-Objective, Discrete, and Multi-Objective Problems, *Neural Computing & Applications*, 27, 1053-1073.

- [86] **European Railway Agency**, (2020). *Introduction to ETCS Braking Curves*.
- [87] **Krstanoski, N.** (2014). Modelling Passenger Distribution on Metro Station Platform, *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 4, 456-465.
- [88] **Kim, H., Kwon, S., Wu, S. K. & Sohn, K.** (2014). Why do passengers choose a specific car of a metro train during the morning peak hours?, *Transportation Research Part A*, 61, 249-258.
- [89] **Hui, Z., Jie, X., Limin, J. & Yihan, S.** (2021). Research on walking efficiency of passengers around corner of subway station, *Pyhsica A*, 573, 1-24.
- [90] **Banerjee, A., Maurya, A. K. & Lämmel, G.** (2018). A review of pedestrian flow characteristics and level of service over different pedestrian facilities, *Collective Dynamics*, 3(17), 1-52.
- [91] **Fujiyama, T. & Tyler, N.** (2010). Predicting the walking speed of pedestrians on stairs,» *Transportation Planning and Technology*, 33(2), 1-52.
- [92] **Fujiyama, T. & Cao, B.** (2016). Lengths of time passengers spend at railway termini: An analysis using smart card data, *IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, (pp. 1-6), UK: Birmingham, August 23-25.
- [93] **Fujiyama, T. & Tyler, N.** (2004). An explicit study on walking speeds of pedestrians on stairs, *Centre for Transport Studies*, 1-10.



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Taha YÜKSEL

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2017, İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Mühendisliği Programı

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2010-2017 yılları arasında TCDD 1. Bölge Müdürlüğünde çalıştı.
- 2017 yılından itibaren İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümünde araştırma görevlisi olarak çalışıyor .

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yüksel, T., Öztürk, Z.** (2021). Optimization of the Transfer Speeds of Passengers Transferring Last Train with Particle Swarm Algorithm, *5nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, IEEE*, (pp. 1-4), Turkey: Ankara, 21 Ekim.
- **Yüksel T., Öztürk Z.** (2024). Timetable Synchronisation for the First Trains in the Day According to Actual Transfer Times, *Promet-Traffic&Transportation*, 36(1), 69-82.

DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yüksel T.** (2018). A survey on energy-efficient timetable optimization model based on the utilization of regenerative braking, *2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies, IEEE*, (pp. 1-6), Turkey: Ankara, 19 Ekim.