T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLU HAT KAPASİTESİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİ: MALATYA NARLI ÖRNEĞİ

Serhan URHAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Programı

Danışman

Prof. Dr. İsmail ŞAHİN

Ocak, 2024

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

DEMİRYOLU HAT KAPASİTESİ HESAPLAMA YÖNTEMLERİ: MALATYA NARLI ÖRNEĞİ

Serhan URHAN tarafından hazırlanan tez çalışması 22.01.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İsmail ŞAHİN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İsmail ŞAHİN, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Dr. Öğr. Üye. Mustafa Sinan YARDIM, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. H. Onur TEZCAN, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. İsmail ŞAHİN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Demiryolu Hat Kapasitesi Hesaplama Yöntemleri: Malatya-Narlı Örneği başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Serhan URHAN

İmza

TEŞEKKÜR

Öncelikle tez çalışma sürecimin başından sonuna kadar bilgisi, tecrübesi ve değerli rehberliği ile önümü açan, bu yolda bana gerçek bir öğrenme deneyimi yaşatan saygıdeğer hocam Prof. Dr. İsmail ŞAHİN'e teşekkür etmek isterim.

Bu yorucu süreçte destekleriyle hep yanımda olan anneme, babama ve kardeşlerim Seyfettin URHAN ile Alihan URHAN'a minnettarım.

Ayrıca tez sürecim boyunca bana destek veren değerli meslektaşlarım Ahmet Mustafa BOZKIR ve Fatma Esra TORAMAN'a da teşekkürlerimi sunarım.

Serhan URHAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ v
KISALTMA LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ iix
ÖZET x
ABSTRACT xi
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 2
1.3 Hipotez 2
2 DEMİRYOLLARINDA HAT KAPASİTESİ 3
2.1 Demiryolu Planlaması 3
2.2 Kapasite Kavramı 8
2.3 Kapasite Türleri 15
2.4 Kapasite Parametreleri 17
2.5 Kapasite Tahmin Yöntemleri 23
2.6 Kapasite Hesaplama 35
2.7 Kapasite Geliştirme Yöntemleri 36
3 HAT KAPASİTESİ ANALİZİ İÇİN YÖNTEMLER 37
3.1 UIC 405R Analitik Yöntemi 37
3.2 CUI (Kapasite Kullanım İndeksi) Yöntemi 40
3.3 UIC Kod 406 Sıkıştırma Yöntemi 41
3.4 Streele Bağıntısı (Schwanhäußer Yöntemi) 48
3.5 Endonezya Yöntemi 49
4 UIC 406 YÖNTEMİYLE MALATYA NARLI DEMİRYOLU HATTININ KAPASİTE ANALİZİ 60
5 SONUÇ VE ÖNERİLER 75
KAYNAKÇA 81
EK-A 85
EK-B 89
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 95

SİMGE LİSTESİ

a	Ara blok kesimlerinin sayısı
p_g	Aynı ardışık sıralı trenlerin art arda meydana gelme olasılığı
z_g	Aynı ardışık sıralı trenler için belirleyici ortalama en küçük izleme süresi
t_r	Bakım nedeniyle ek süre
A_i	Bir hat kesimine özgü sabit
t_p	Bir yol kesimindeki seyahat süresi
μ	Blok kesimini kullanan en büyük tren sayısı
lb	Blok kesiminin uzunluğu
nb	Blok kesimlerinin sayısı
w_1, w_2	Dolaylı altyapı kullanım süreleri
tzu	Ek süre (dak/tren)
tr	Ek süre marjı (dak/tren)
A'	En küçük altyapı işgali (sıkıştırılmış toplam işgal süresi)
$\underline{z}_v$	Farklı ardışık sıralı trenler için belirleyici ortalama en küçük izleme süresi
p_{ve}	Girişteki gecikme olasılığı
$\underline{t}_{ve}$	Girişteki ortalama gecikme
β	Güzergâha özgü bir sabit
S	Her tren çizgisi için hat kesiminin kullanım süresi
K	Hesaplanan hat kesimindeki kapasite
$h_{1/2}$, $h_{2/3}$, $h_{3/4}$	Heterojenlik süreleri
t_{A-B}	İstasyon giriş sinyalini görüş noktasından istasyona kadarki seyahat süresi
B_b	İşgal başlangıcı
B_e	İşgal sonu
N	İşletilen tren sayısı
t_{zu}	Hattaki ara blokların sayısına dayalı ek süre
$V_{L,R,M}$	Her tren sınıfı için dikkate alınan çalışma hızı
a	Hızlanma ivmesi
t_a ve t_d	Hızlanma ve yavaşlama süresi
P	Kapasite (kullanılan T'ye göre günlük, saatlik vb.)
tfm	Ortalama en küçük izleme süresi (dak/tren)

$\bar{z}$	Ortalama en küçük izleme süresi (dak/tren)
$\underline{z}$	Ortalama en küçük izleme süresi (dak/tren)
H	Ortalama izleme süresi
Lq	Ortalama kuyruk uzunluğu
$\underline{t}_p$	Ortalama tampon süresi
ni	Öncül i model treninin sayısı
nj	Öncül j model treninin sayısı
fij	Öncül model tren i ile artçıl model tren j arasındaki en küçük izleme süresi
nij	Öncül model tren i ile artçıl model tren j arasındaki izleme sayıları
T	Referans süresi (günlük kapasite için genellikle 24 saat veya 1440 dakika)
$t_{\vee L,R,M}$	Sabit rejim hızı ile seyahat süresi
t_p	Sinyal servis/açma süresi
t*s*	Sinyal servis/açma süresi
C	Sinyal ve blok ayarlama süresi
L	Şehirlerarası tren
C_{it}	*t* zaman diliminde *i* kesimindeki kapasite kullanım indeksi
D_{it}	*t* zaman periyodunda hattın i kesimi üzerindeki tepkisel gecikmesi
η	Tek hatlı demiryolu için bakım süresi
Ψ	Tek yön kullanım oranı
$t_{fm\ L,R,M}$	Toplam seyahat süresi
N	Toplam tren sayısı
L	Tren dizisinin uzunluğu
ρ	UIC 406'ya göre altyapı işgali için önerilen değer (oran)
λ	Varan trenlerin sayısı
d	Yavaşlama ivmesi
R	Yerel/bölgesel tren
M	Yük treni
Fij	Zaman çizelgesinde öncül tren i ve artıçıl tren j'nin görüntülenme sayısı

KISALTMA LİSTESİ

CRRD	Tıkanıklıkla İlgili Tepkisel Gecikme
CTC	Centralized Traffic Control
CUI	Kapasite Kullanım İndeksi
DTİ	Demiryolu Tren İşletmecisi
EC	European Commission
GAPEKA	Grafik Perjalanan Kereta Api
IM	Infrastructure Managers
MOM	Manufacturing Operation Management
RTC	Real Time Calculation
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları
UIC	Union Internationale des Chemins de fer

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Demiryolu planlama süreçleri 4
Şekil 2.2 Avrupa'da demiryolu taşımacılığı için idealleştirilmiş planlama süreci .. 5
Şekil 2.3 Demiryolu kapasitesi dengesi 10
Şekil 2.4 Hızlı trenin yavaş trene yetişmesiyle oluşan çatışma 11
Şekil 2.5 Heterojen (a) ve homojen (b) zaman çizelgesi 12
Şekil 2.6 Dakiklik ve kapasite kullanımı 14
Şekil 2.7 Pratik kapasite ile istenen güvenilirlik seviyesi arasındaki ilişki 16
Şekil 2.8 Ortalama gecikmeye göre doygunluk seviyesi 23
Şekil 3.1 Heterojen tren işletimi: Farklı tren dizileri (yavaş ve hızlı) 38
Şekil 3.2 CUI'ye göre kapasite kullanım hesaplaması yöntemi 40
Şekil 3.3 Bir zaman çizelgesi içindeki zaman paylaşımları 46
Şekil 3.4 Sıkıştırmadan sonraki zaman paylaşımları 46
Şekil 3.5 Endonezya Yöntemine göre çift hat uygulanacak hattın yeri 51
Şekil 3.6 GAPEKA 2017'ye göre Endonezya yönteminde demiryolu kapasitesi . 57
Şekil 3.7 GAPEKA2017'ye göre UIC 405 yönteminde demiryolu kapasitesi 57
Şekil 3.8 GAPEKA 2019'a göre Endonezya yönteminde demiryolu kapasitesi ... 58
Şekil 3.9 GAPEKA 2019'a göre UIC 405 yönteminde demiryolu kapasitesi 58
Şekil 4.1 Malatya-Narlı hattı orer grafiği 60
Şekil 4.2 Otomatik blok sistemde bir trenin işgal yolu ve işgal süresi 63
Şekil 4.3 Öncül tren 63610 ile artçıl tren 63602 arasındaki izleme durumu 64
Şekil 4.4 Öncül tren 43403 ile artçıl tren 53521 arasındaki izleme durumu 65
Şekil 4.5 Öncül tren 63610 ile artçıl tren 43403 arasındaki izleme durumu 65
Şekil A.1-2-3-4 Trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları 85
Şekil B.1-2-3 Kapıdere-Kumlu yönünde işletilen trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları 89
Şekil B.4-5-6 Kumlu-Kapıdere yönünde işletilen trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları 92

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Demiryolu trafiği planlama evrelerinin uzunluğu 5
Tablo 2.2 Analitik yöntemler üzerine yazılmış bazı araştırmalar 27
Tablo 2.3 Optimizasyon yöntemi üzerine yazılmış bazı araştırmalar 29
Tablo 2.4 Simülasyon yöntemleri üzerine yazılmış bazı araştırmalar 32
Tablo 2.5 Yöntemlerin karşılaştırılması 35
Tablo 3.1 Farklı kapasite görünümleri 43
Tablo 3.2 Veri türleri ve işlev 52
Tablo 4.1 Malatya-Narlı hattı her iki yöndeki seyir süreleri toplamları 61
Tablo 4.2 Fiili tren hareketlerine göre model trenlerin seçilmesi 62
Tablo 4.3 Fiili sürelere göre model trenler 62
Tablo 4.4 En küçük izleme süreleri matrisi 66
Tablo 4.5 Hatların verimli kullanım oranları 68
Tablo 4.6 Hatların ek süre oranları 69
Tablo 4.7 Kapıdere-Kumlu yönünde en küçük izleme süreleri matrisi 71
Tablo 4.8 Kumlu-Kapıdere yönünde en küçük izleme süreleri matrisi 71

ÖZET

Demiryolu Hat Kapasitesi Hesaplama Yöntemleri: Malatya Narlı Örneği

Serhan URHAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İsmail ŞAHİN

Bu tez çalışmasında demiryolu hat kapasitesi üzerine yazılan makaleler çeşitli yönleriyle ele alınmıştır. İlk iki bölümde demiryollarında hat kapasitesine giriş yapılmıştır. Hat kapasitesini incelemek için öncelikle demiryolu planlamasındaki süreçler hakkında bilgi verilmiştir. Analizin en önemli bileşimi olan kapasite kavramı üzerinde durulmuş bu kavramın demiryolu ulaşımında neyi ifade ettiği anlatılmıştır. Kapasite türleri ve kapasiteyi etkileyen parametrelere değinilmiştir. Kapasite tahmin yöntemleri ve bu yöntemleri kullanan birçok çalışma anlatılmıştır. Daha sonra hat güzergâhındaki darboğazları aşabilmek için birçok kapasite geliştirme önerisi verilmiştir.

Üçüncü bölümde hat kapasitesinin analizi için kullanılan yöntemler detaylı şekilde incelenmiştir. Bu yöntemlerde kullanılan parametreler ve bu parametrelerin değişkenliği ile kullanılan yöntemlerin verimliliği ele alınmıştır. Dördüncü bölümde UIC 405 ve 406 yöntemleri kullanılarak TCDD'nin Malatya Narlı hattının kapasitesi hesaplanmıştır. Son bölümde kapasitenin verimli kullanımı ve iyileştirilmesine ilişkin çeşitli öneriler sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Demiryolu hat kapasitesi, darboğazlar, izleme süreleri, tampon süre, hat kapasitesi kullanım oranı

ABSTRACT

Railway Line Capacity Calculation Methods: An Example for Malatya Narlı Railway Line

Serhan URHAN

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İsmail ŞAHİN

In this thesis, articles on railway track capacity have been examined from various perspectives. The first two sections provide an introduction to railway track capacity. Information about the processes in railway planning has been given to examine track capacity. The concept of capacity, which is the most crucial component of the analysis, has been emphasized, explaining what this concept signifies in railway transportation. The types of capacity and parameters influencing capacity have been addressed. Various studies utilizing capacity estimation methods have been discussed. Subsequently, numerous capacity improvement proposals have been presented to overcome bottlenecks in the track route.

The third section meticulously explores the methods used for the analysis of track capacity. The variability of parameters used in these methods and the efficiency of the employed techniques have been discussed. In the fourth section, the capacity of TCDD's Malatya Narlı line has been calculated using UIC 405 and 406 methods. The final section provides various recommendations for the efficient utilization and enhancement of the capacity.

Keywords: Railway track capacity, bottlenecks, headways, buffer time, line capacity utilization rate

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Demiryolu hat kapasitesi etkili ve hesaplanabilir birçok parametre ile ortaya konmaktadır. Kapasite birçok araştırmacı tarafından farklı şekilde tanımlanmaktadır. Bunun sebebi ise kapasiteyi etkileyen farklı birçok parametrenin varlığıdır.

Şahin (1987), bir demiryolu hattının kapasitesini, belirli kalite şartlarının karşılanması halinde, belirli işletme ve teknik koşullar altında, belirli bir süre içerisinde bir güzergâhın her bir hattında seyredebilen tren sayısı olarak tanımlamaktadır. Bu tanımlama bize kapasitenin, belli şartların ve koşulların sağlanması sonucunda ortaya çıkabilecek matematiksel bir fonksiyon olduğunu göstermektedir.

Kapasitenin var olmasını sağlayan parametreler tren sayısı, stabilite, ulaşılan yüksek ortalama hız ve tren sisteminin heterojenliğidir. Bu bileşimlerin dengeli bir karışımı UIC 406 broşüründe demiryolu kapasitesi dengesi olarak adlandırılmaktadır (UIC 406, 2004). Kapasite hakkındaki detaylı bilgilere "Kapasite Kavramı" başlığı altında değinilecektir.

Kapasiteyi oluşturan parametreler ise altyapı, trafik ve işletim parametreleridir. Altyapı parametreleri için blok ve sinyal süreleri, hat sayıları ve uzunlukları, istasyonlar arası aralıklar önemli rol oynamaktadır. Trafik parametrelerinde tren türlerinin karışımı yani demiryolu kapasite dengesinde bahsettiğimiz heterojenlik, tren hızları ve tren öncelikleri ön plana çıkmaktadır. İşletim parametrelerinde ise hat kesintileri ve bunu meydana getiren sebepler, tren durma süresi, referans süre ve en büyük yolculuk süreleri önemlidir. Bu kavramlara ve onları meydana getiren bileşimlerine ilgili bölümlerde değinilecektir.

Özetle tez çalışmasında, demiryolu hattının kapasitesini matematiksel olarak hesaplayabileceğimiz kabulünden yola çıkarak oluşturulmuş bazı yöntemleri ve bu yöntemleri meydana getiren kavramları inceleyeceğiz.

1.1 Tezin Amacı

Demiryolları hat kapasitesi analizini toplu olarak veren bir kaynak bulunmamaktadır. Bu tez çalışmasında hat kapasitesi analizinde kullanılan yöntemler, bu yöntemlerin hangi parametreleri içerdiği, bu parametrelerin verimliliği (kapasite kullanımını) nasıl etkilediği araştırılmış, ayrıca bu yöntemler karşılaştırılmıştır.

1.2 Hipotez

Bu tezin varsayımı matematiksel yöntemlere dayanmaktadır. Demiryolu hat kapasitesinin analizi için etkili ve tanımlanabilen parametrelere ihtiyaç vardır. Bu parametreler hat kapasitesi analizinin verimli analizi için bir yol haritası çizmektedir.

2. Bölüm'de yer alan Kapasite Tahmin Yöntemleri başlığıyla detaylı olarak anlatılan; analitik, optimizasyon ve simülasyon (benzetim) yöntemleriyle yapılmış çalışmalar hat kapasitesi analizleri yapılırken kullanılan farklı değişkenleri içermektedir. Bu değişkenlerin birbiri ile olan ilişkileri ve bunların matematiksel ifadeleri ile hat kapasitesi hesaplanabilmektedir.

Özet olarak, demiryolu hat kapasitesini etkileyen parametreler tanımlanmış ve bu parametreler arasındaki matematiksel ilişkilerin hat kapasitesini hesaplamada kullanılabileceği kabul edilmiştir. Gerçek bir demiryolu hattından elde edilen verilerden yararlanılarak, ortaya konulan yöntemlerden biri ile hat kapasitesi hesaplanmış ve değerlendirilmiştir.

2
DEMİRYOLLARINDA HAT KAPASİTESİ

Evrensel taşımacılığın gelişmekte olduğu bu dönemlerde, gerek yük gerekse yolcu taşımacılığına talep gün geçtikçe artmaktadır. Bu talebin zamanla karşılanamayacak derecelere gelmesini engellemek için kapasite açısından yeterli bir demiryolu ağı gerekmektedir.

Demiryolu ağındaki bir hat, terminal istasyonunda başlayıp terminal istasyonunda biten, birkaç ara istasyonu birbirine bağlayan ve belirli bir tren türü tarafından işletilen bir güzergâhı ifade etmektedir (Lusby, Larsen ve Ehrgott 2009).

Demiryolu kapasitesinin temelde iki boyutu vardır (Schlechte, 2011):

- Fiziksel altyapı unsurlarından oluşan bir mekân boyutu ve
- Fiziksel altyapı üzerindeki tren hareketlerini, yani işgal veya blok sürelerini ifade eden bir zaman boyutu.

Demiryolu taşımacılığı için hayati öneme sahip olan kapasite kavramını detaylı bir şekilde incelemek demiryolu planlamasının olmazsa olmazı durumundadır.

2.1 Demiryolu Planlaması

Demiryolu planlaması, sürdürülebilir bir ulaşım sistemi oluşturmayı ve toplu taşıma seçeneklerini geliştirmeyi amaçlar. Aynı zamanda trafik sıkışıklığını azaltma, hava kirliliği ve sera gazı salımlarını düşürme gibi avantajlara da sahiptir. Bu nedenle, demiryolu planlaması, birçok ülke ve şehirde ulaşım altyapısının önemli bir bileşeni olarak kabul edilmektedir.

Demiryolu planlaması, demiryolu ulaşım sistemlerinin tasarımı, inşası, işletilmesi ve yönetilmesi süreçlerini kapsayan stratejik bir planlama sürecidir. Bu planlama süreci, demiryolu ağlarının geliştirilmesi ve optimize edilmesini amaçlar.

Demiryolu planlama süreci; hizmet maliyetini en aza indirmek için, mevcut talebi karşılamaya yönelik farklı türdeki trenlere ait sefer ve kaynak kullanım planlarının hazırlanmasını kapsamaktadır.

Sefer planları hizmet vermesi planlanan yolcu ve yük trenlerinin izleyecekleri güzergâhlar boyunca uğrayacakları istasyonları, istasyonlara varış ve kalkış zamanlarını ifade etmektedir. Trenlerin izledikleri güzergâhlar "itenerer" olarak adlandırılmaktadır (Şahin, 2015).

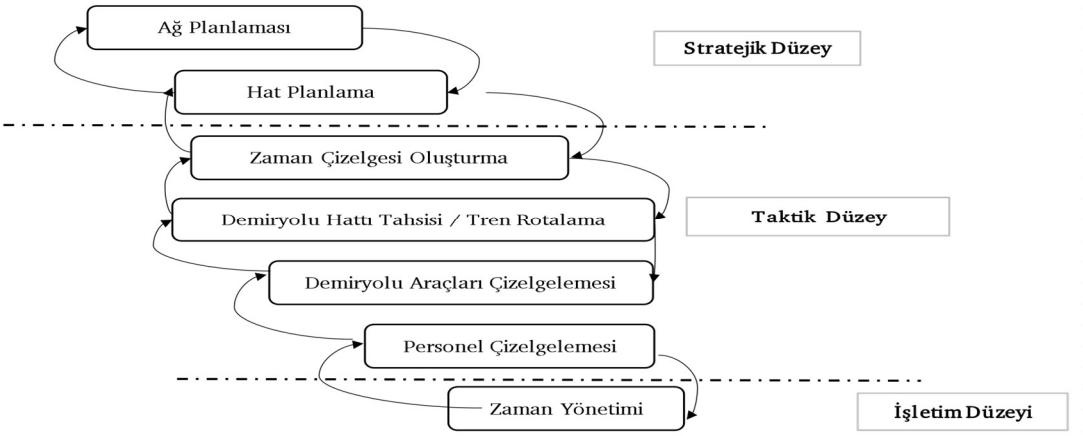
Trenlerin sefer planlarına ise "orer" denilmektedir. Bu kelime bize Fransızca'da "horaire" olarak kullanılan kelimeden geçmiştir ve çizelge anlamı da taşımaktadır.

Demiryolu planlama süreci genel olarak "tren planlaması" şeklinde ifade edilmektedir (Şahin, 2015).

Demiryolu ulaşımının planlaması aşağıdaki gibi oluşmaktadır.

- Demiryolu ağı tasarımı; yük ve yolcu hizmetlerinin ağ tasarımı
- Hat planlaması
- Zaman çizelgesi
- Demiryolu taşıtları planlanması
- Personel planlaması

Demiryolu işletmeleri, operasyonlarını planlarken tipik olarak hiyerarşik bir karar verme yaklaşımı benimsemektedirler (Şekil 2.1 ve Şekil 2.2).



Şekil 2.1 Demiryolu planlama süreçleri (Lusby vd., 2009)

Şekil 2.1'de gösterilen süreç içerisinde belirli bir planlama seviyesinde iken önceki kararları değiştirmek ve hatta sonraki seviyeleri göz önünde bulundurmak gerekebilir (Lusby vd., 2009).

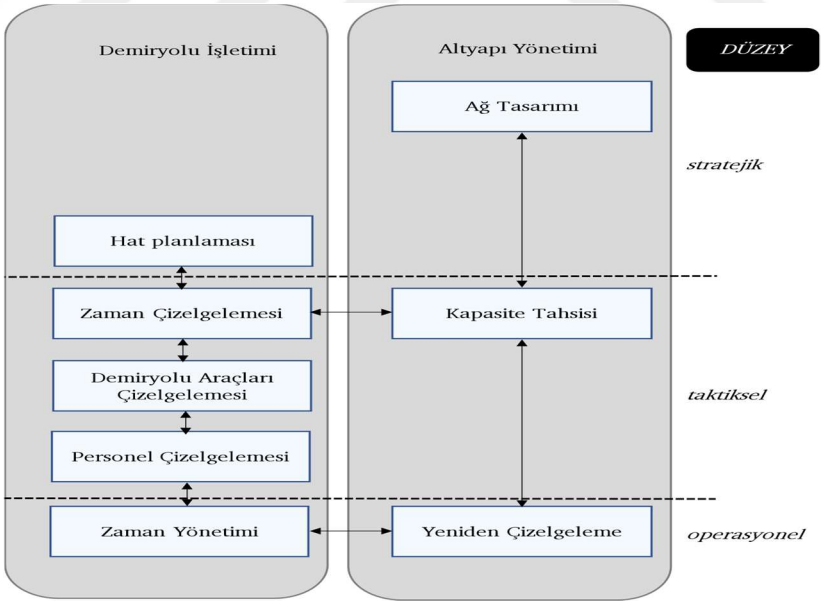
Demiryollarının planlama evrelerinin süreleri de farklılık göstermektedir (bkz. Tablo 2.1).

Tablo 2.1 Demiryolu trafiği planlama evrelerinin uzunluğu (Schlechte, 2011)

Düzey	**Süre**
Stratejik Planlama	5-15 yıl
Taktik Planlama	1-5 yıl
İşletim Planlaması	24 sa-1 yıl

İdealize edilmiş sıralı planlama sürecindeki her adım kendi içinde zorluklar içerir. Her adım alt problemlere bölünmeli ve basitleştirilmelidir. Şekil 2.2'de, Avrupa'daki dikey ayrılmanın olduğu demiryolu endüstrisi durumundaki yeni süreç gösterilmektedir.

Taktik panlama sürecinde ele alınan yol (kapasite) tahsisinin ana uygulaması, talep edilen bir zaman çizelgesinin operasyonel olarak uygulanabilir olup olmadığını belirlemektir (Schlechte, 2011).



Şekil 2.2 Avrupa'da demiryolu taşımacılığı için idealleştirilmiş planlama süreci (Schlechte, 2011)

Şekil 2.2'den de anlaşılacağı gibi kapasite tahsisi tüm planlama süreçleriyle iç içe bir aşamadır. Ağ planlaması, zaman çizelgesinin oluşturulması ve zaman

yönetimine dair yeniden çizelgeleme durumlarında kapasite tahsisine dikkat edilmeli ve tasarım buna göre yapılmalıdır.

Stratejik Planlama

Genel bir tanım olarak stratejik planlama; amaçlara ulaşmak için uygulanabilir bir felsefe ve misyonun belirlenmesi, amaçların saptanması ve stratejinin seçilmesine ilişkin kararların verilmesidir. Bu planlama süreci amaçları uygulayabilmek için bir çerçeve sunmakta ve diğer alt planlama süreçlerine de temel oluşturabilmektedir.

Stratejik seviyedeki sorunlar, uzun zaman dilimleriyle ortaya çıkar. Bu planlama dönemi 10 yıla kadar sürebilmekte hatta bazı durumlarda 15 yıla kadar uzamaktadır.

Demiryolu ulaşımında stratejik planlama, aşağıdaki gibi örnek unsurları içerebilir:

- Yeni hatlar inşa edilmesi, mevcut hatların yüksek hızlı demiryolu hattına dönüştürülmesi veya lojistik merkezlerin kurulması,
- Yoğun hatlar üzerindeki trafiği azaltmak için alternatif güzergâhlar geliştirmek,
- Enerji verimliliği önlemleri almak, elektrifikasyonu artırmak veya yenilenebilir enerji kaynaklarına geçiş yapmak,
- Belirli bir hızlı tren projesi için finansman seçeneklerini ve maliyet tahminlerini belirlemek.

Taktik Planlama

Demiryolu ulaşımında taktik planlama, stratejik planlamanın daha kısa vadeli ve uygulama odaklı bir aşamasını temsil eder. Bu planlama, stratejik hedefleri gerçekleştirmek ve günlük işleyişi düzenlemek amacıyla alınan somut ve operasyonel kararları içerir.

Taktik planlama, stratejik hedeflere ulaşmak için günlük operasyonların nasıl yönetileceğini belirler. Bu planlama, demiryolu sistemini verimli ve güvenli bir şekilde işletmek ve kullanmak için daha kısa (orta) vadeli kararlar almayı içerir. Stratejik ve taktik planlama, demiryolu ulaşımının başarılı bir şekilde yönetilmesi için birbirini tamamlayan iki önemli aşamadır.

Demiryolu ulaşımında taktik planlama için şu örnekler verilebilir:

- Bir iş gününde yoğun bir şehir hattında daha fazla tren seferi düzenlemek,
- Bir trenin fren sistemi veya motorunun bakımı için hangi gün ve saatte atölyeye alınacağına karar vermek,
- Hangi yüklerin hangi trenlerle taşınacağını, hangi istasyonlarda durulacağını ve yükün teslim edileceği rotayı belirlemek,
- Bir rayın çökmesi veya bir tren kazası durumunda, acil müdahale planları gibi kısa vadeli kararlar.

İşletim Planlaması

Demiryolu ulaşımında işletim planlaması, günlük operasyonların, tren seferlerinin, bakım çalışmalarının ve diğer işletme faaliyetlerinin ayrıntılı bir şekilde düzenlenmesi ve yönetilmesini içeren bir süreçtir. Bu planlama, günlük veya kısa vadeli bir zaman çerçevesinde gerçekleştirilir ve demiryolu operatörlerinin tüm işleyişi sorunsuz bir şekilde sürdürebilmesini hedefler.

İşletim planlaması, stratejik ve taktik planlama ile uyum içinde çalışarak demiryolu operasyonlarını günlük olarak düzenler ve optimize eder. Bu sayede demiryolu sistemleri güvenli, verimli ve yolcular veya yük taşımacılığı için güvenilir hizmet sunabilir.

Gerçek yaşamdaki beklenmedik durumlar, ulaştırma sistemlerinin kaçınılmaz bir özelliğidir. Bu tür durumlar, planlanmış çizelgelerin yeniden ele alınarak bazı değişiklikler yapılmasını gerektirmektedir. Yeniden çizelgeleme olarak ifade edilen bu planlama evresinde, gerçek zamanlı/anlık olarak, talepteki son dakika değişiklikleri, tren arıza ve gecikme durumları, hat ve tesis arızaları gibi sorunlar ele alınır. Tren teşkili ve vagon dağıtımı kararları da bu aşamada verilmektedir (Şahin, 2015).

Demiryolu taşımacılığında hizmetlerin kesintiye uğraması ve gecikme yönetimi oldukça zordur. Çünkü yerel kararlar tüm zaman çizelgesi sistemi üzerinde büyük bir etkiye sahiptir (Schlechte, 2012). Demiryolu sisteminin genel başarımı (performansı) üzerinde etkili olduğu için, işletim planlamasındaki kararlar dikkatlice alınmalıdır.

Demiryolu ulaşımında işletim planlaması örnekleri şunları içerebilir:

- Yüksek talep dönemlerinde, ekstra vagonlar veya yolcu kapasitesi sağlamak için planlamalar,
- İstasyonlarda yolcuların sorunsuz bir şekilde inip binebilmelerini sağlamak için düzenlemeler,
- Yoğun kar yağışı veya hava muhalefeti durumunda tren seferlerini geciktirmek veya iptal etmek,
- Önemli bir spor etkinliği sonrası beklenen yüksek yolcu trafiği için ekstra istasyon görevlileri tahsis etmek.

2.2 Kapasite Kavramı

Demiryollarında kapasite, bir demiryolu hattının veya altyapısının belirli bir zaman diliminde taşıyabileceği en fazla yolcu veya yük miktarını ifade eder. Kapasite, bir demiryolu hattının veya istasyonun, belirli bir dönemde, genellikle saatlik veya günlük olarak ne kadar talebi karşılayabileceğini belirler. Bu, demiryolu altyapısının verimli bir şekilde kullanılmasını, taşımacılığın sorunsuz bir şekilde işlemesini ve aşırı kalabalık ve gecikmelerin önlenebilmesini amaçlar.

Kapasite hesaplamaları, demiryolu altyapısının fiziksel özellikleri ile tren trafiği, istasyon kapasiteleri, hız sınırlamaları ve diğer faktörleri içerir. Bu hesaplamalar, demiryolu altyapısının belirli bir dönemde ne kadar yolcu veya yük taşıyabileceğini belirlemek için kullanılır.

Demiryolu kapasitesi, aşağıdaki faktörler tarafından etkilenebilir:

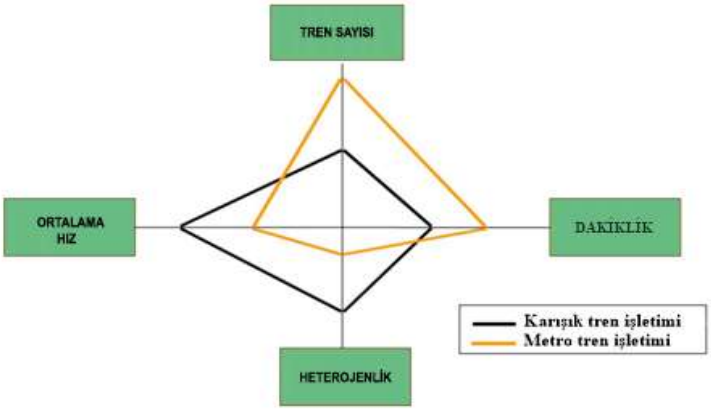
1. Altyapının Fiziksel Özellikleri: Demiryolu hattının fiziksel özellikleri, rayların sayısı, hatların uzunluğu, tüneller, köprüler, dönemeçler ve benzeri unsurlar kapasiteyi belirler. Düz, elektrikli hatlar genellikle daha fazla kapasiteye sahiptir.
2. Tren Trafiği: Demiryolu hattının üzerinden geçen veya istasyonlarda duran tren sayısı ve türü kapasiteyi etkiler. Yoğun tren trafiği, hattın daha fazla kapasiteye ihtiyaç duymasına neden olabilir.

3. İstasyonlar ve Duraklar: İstasyonlar ve duraklar, yolcu ve yüklerin trenlere aktarılmasını sağlar. İstasyonların kapasitesi, trenlerin ne kadar hızlı yüklediği veya boşalttığıyla ilişkilidir.
4. Hız Sınırlamaları: Belirli bir hatta uygulanan hız sınırlamaları, trenlerin hangi hızda seyahat edebileceğini etkiler. Daha yüksek hız sınırlamaları, daha fazla kapasite sağlayabilir.
5. Sinyalizasyon ve Güvenlik Sistemleri: Sinyalizasyon sistemleri ve güvenlik önlemleri, demiryolu trafiğinin verimli bir şekilde yönetilmesine yardımcı olur ve kapasiteyi etkileyebilir.

Literatürde demiryolu hat kapasitesiyle ilgili birçok tanım mevcuttur:

- AB Yönetmeliği 2001/14/EC, mevcut demiryolu altyapısı kapasitesini bir demiryolu sisteminde tren çizgisi taleplerini planlama potansiyeli olarak tanımlamaktadır (Klabes, 2010).
- Kapasite, belirli bir süre boyunca ve sabit bir hizmet seviyesi ile eş zamanlı olarak altyapının belirli bir kesimi kullanılarak çalıştırılabilen en büyük tren sayısı olarak tanımlanabilir (Rotoli, Cawood ve Soria, 2016).
- Bir demiryolu hattının kapasitesi, belirli kalite şartlarının karşılanması halinde, belirli işletme ve teknik koşullar altında, belirli bir süre içerisinde bir güzergâhın her bir hattında seyredebilen tren sayısı olarak tanımlanabilmektedir (Şahin, 1987).
- Bir demiryolu hattının kapasitesi, referans zamanında hat üzerinde çalışabilecek tarifeli tren sayısı olarak tanımlanır (Kontaksi ve Ricci, 2010).

Literatürdeki tanımların bu denli çeşitli olması, demiryollarında kapasite kavramının kolaylıkla tanımlanamamasından kaynaklanmaktadır. Bunun ana sebebi, ölçülebilen birçok parametrenin olmasıdır. Şekil 2.3'te görülen parametreler (tren sayısı, durağanlık/dakiklik, heterojenlik ve ortalama hız) birbirlerine bağlıdır ve bu durum demiryolu kapasite dengesi olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2.3 Demiryolu kapasitesi dengesi (UIC, 2004)

Şekil 2.3; tren sayısı, durağanlık/dakiklik, ulaşılan yüksek ortalama hız ve tren kompozisyonunun heterojenliğinin dengeli bir karışımı olduğunu göstermektedir. Örneğin, tüm istasyonlara hizmet veren hızlı trenler ile daha yavaş trenlerinin bir karışımı ile yüksek bir heterojenlik elde edilerek aynı anda yüksek bir ortalama hız da elde etmek mümkündür. Fakat bununla birlikte, bu durum tüm trenlerin aynı hızda çalışmasına oranla, yüksek stabilite (dakiklik) içerisinde çok sayıda trenin çalıştırılmasını mümkün kılmamaktadır.

Daha fazla tren çalıştırmak isteniyorsa, daha az heterojenlik sağlamak ve daha düşük bir ortalama hıza sahip olmak gerekir.

Tren Sayısı

Kapasite, saatteki tren sayısı olarak ölçülürse, bir kesitteki kapasite şu şekilde hesaplanabilir:

Bağıntı 2.1: $K = q_{max} \cdot n$ (2.1)

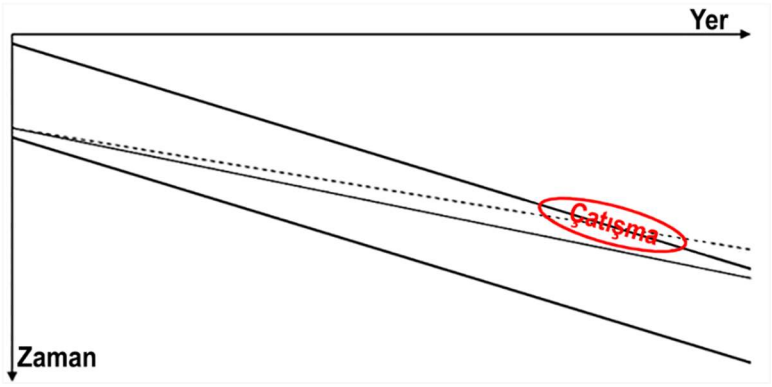
(Kaas, 1998)

Burada: K, kapasitedir.

q_{max}, en fazla trafik yoğunluğudur [tren/saat].

n, tren yollarının sayısıdır.

Bir saatte çok sayıda tren çalıştırırken, tüm istasyonlarda görece hızlı olan trenleri buluşturmak her zaman mümkün değildir. Bunun nedeni, Şekil 2.4'te görüldüğü gibi hızlı trenlerin daha yavaş trenleri yakalayarak çatışmalara sebebiyet vermesidir.



Şekil 2.4 Hızlı trenin yavaş trene yetişmesiyle oluşan çatışma (Landex, Kaas ve Hansen, 2006)

Demiryolu hat kapasitesinde tren sayısının önemi büyüktür çünkü bu, demiryolu taşımacılığının verimli bir şekilde işlemesi ve trafiğin yönetilmesi açısından kritiktir.

İyi bir tren sayısı yönetimi, yoğunluğun azaltılmasına ve gecikmelerin önlenmesine yardımcı olabilir. Daha fazla tren sayısı, demiryolu hattının taşıma kapasitesini artırır. Bu, daha fazla yolcu veya yükün taşınabilmesini sağlar ve operasyonların daha verimli bir şekilde yürütülmesini mümkün kılar. Aynı zamanda demiryolu hatlarında fazla tren yoğunluğu, güvenlikle ilgili riskleri artırabilir. Fazla tren sayısı, kazaların ve çatışmaların önlenmesi açısından önemli bir sorun teşkil edebilir.

Heterojenlik

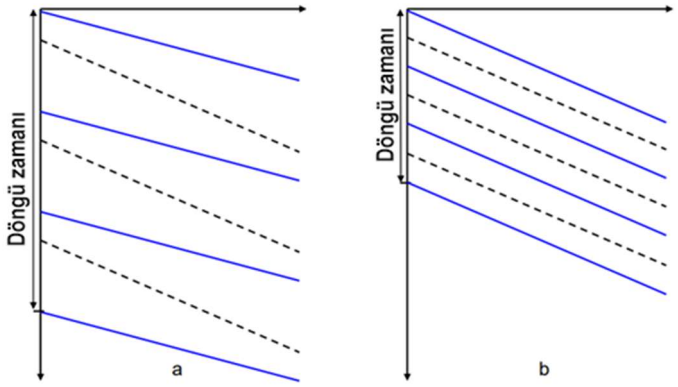
Demiryolu hat kapasitesindeki heterojenliğin önemi, farklı tren türleri ve hızlarıyla çalışan trenlerin aynı hatlar üzerinde nasıl bir arada çalışabileceğini ve demiryolu altyapısının çeşitli ihtiyaçlara nasıl uygun hale getirilebileceğini ifade eder. Heterojenlik, demiryolu altyapısının çok daha esnek ve verimli bir şekilde kullanılmasına olanak tanır.

Heterojen kapasite yönetimi, farklı tren türlerinin farklı hızlarda çalışabilmesini mümkün kılar. Hızlı trenler için özel hız sınırlamaları belirlenebilirken, yük trenleri daha yavaş hızlarda çalışabilir.

Farklı hızlardaki trenlerin varlığıyla beraber hat boyunca hızlı olan trenin yavaş treni yakalamasının gözlendiği ağda homojenlikten bahsetmek mümkün

olmayacaktır. Çünkü hattın homojen olması durumunda tüm trenler aynı hızla çalışır ve aynı durma hızına sahiptir.

Buradaki önemli fark heterojen bir hatta homojen olana göre çok fazla trenin çalıştırılamayacak olmasıdır. Şekil 2.5'te heterojen ve homojen zaman çizelgeleri örneklendirilmiştir.



Şekil 2.5 Heterojen (a) ve homojen (b) zaman çizelgesi (Landex vd., 2006)

Farklı tren türlerinin hatta bulunma yüzdesi, trenlerin birbirlerinden farklı hızlara sahip olması, trenlerin güç/ton oranları ve tren öncelikleri gibi durumlardan etkilenen heterojenlik, homojen trafiğe oranla ek gecikmelere neden olur. Araştırmacılar bu özelliklerin etkilerini daha iyi anlayabilmek amacıyla çeşitli trafik ve tren konfigürasyonlarının yer aldığı simülasyonları uygulamıştır.

Dingler, Lai ve Barkan (2009), heterojenliğin kapasiteye etkisini yaptıkları bir çalışma ile incelemişlerdir. Bu çalışmada, bir trenin kalkış saatinin, o tren için planlanan saatten 10 dakika önce veya 10 dakika sonra olacak şekilde 20 dakikalık bir periyotta rastgele dağıtıldığı 10 simülasyonluk bir dizi oluşturulmuştur. Homojen trafikte, gecikmeler tamamen tren karşılaşmalarından kaynaklanmaktadır. Heterojen trafikteki geciklemelerin kaynakları ise şöyledir:

- Daha yavaş bir tren sebebiyle oluşan gecikmeler
- Daha yüksek öncelikli trenler sebebiyle oluşan gecikmeler
- Trenlerin birbirlerini geçmeleri esnasında oluşan gecikmeler

Ortalama Hız

Ortalama hızın demiryolu hat kapasitesi üzerindeki etkisi büyüktür. Daha yüksek bir ortalama hız, taşımacılığın verimliliğini ve rekabet gücünü artırır ayrıca taşıma sürelerini de kısaltır. Bu da demiryolu taşımacılığının daha etkin ve sürdürülebilir bir seçenek haline gelmesine katkı sağlar. Ortalama hızın demiryolu hat kapasitesine etkileri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

1- Daha yüksek bir ortalama hız, trenlerin belirli bir zaman diliminde daha fazla aralık kat etmesini sağlar. Bu, aynı hat üzerinde yolcu/yük taşıma kapasitesini ve demiryolu taşımacılığının verimliliğini artırır.

2- Daha yüksek hızlar, yolcuların seyahat sürelerini kısaltır ve taşıma hızını artırır. Bu, yolcu ve müşteri memnuniyetini artırır ve demiryolu taşımacılığını daha cazip hale getirir.

3- Diğer taşıma yöntemleriyle rekabet etmek için daha hızlı bir hizmet sunma kabiliyeti, demiryolu taşımacılığının rekabet gücünü artırır. Hızlı ve güvenilir bir hizmet, taşımacılık pazarında avantaj sağlayabilir.

4- Daha hızlı trenler, enerji verimliliği açısından daha iyi bir seçenek olabilir. Daha kısa seyahat süreleri, enerji tüketimini azaltabilir ve sürdürülebilir taşımacılığı destekleyebilir.

5- Ortalama hız, taşıma sürelerini ve lojistik planlamayı da etkiler. Daha hızlı trenler, ürünlerin ve yüklerin daha hızlı bir şekilde sevk edilmesini mümkün kılar.

Çizelgeye Uygunluk (Dakiklik)

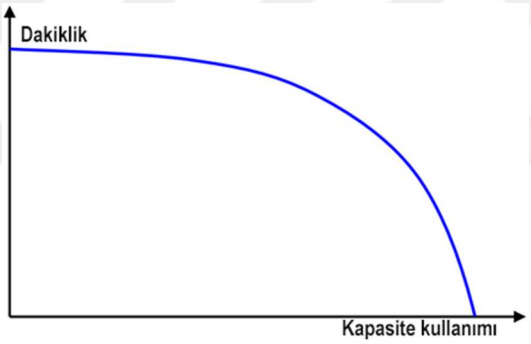
Demiryolu hat kapasitesinde dakiklik veya çizelgeye uygunluk, demiryolu operasyonlarının güvenilirliği ve verimliliği açısından büyük öneme sahiptir. Trenlerin belirli bir zaman diliminde düzenli aralıklarla çalışması, hat kapasitesini optimize eder, gecikmeleri ve iptalleri azaltır.

Dakiklik, trenlerin birbirlerine uygun bir aralıkta hareket etmelerini mümkün kılar. Bu, trenlerin güvenli bir şekilde çalışmasını ve çatışmaların önlenmesini sağlar.

Aynı zamanda dakiklik, yolcuların ve yük sahiplerinin memnuniyetini artırır. Müşteriler, trenlerin belirli saatlerde ve düzenli olarak çalıştığı bir hizmeti tercih ederler.

Demiryolu kapasitesini tartışırken, demiryolu sisteminin istikrarına da bakmak önemlidir. Bununla birlikte, trenlerin dakikliği istikrardan kaynaklanmaktadır. Henüz uygulamaya konmamış planlanmış bir zaman çizelgesinin istikrarını veya dakikliğini değerlendirmek zordur.

Zaman çizelgesindeki veya altyapıdaki küçük değişikliklerin dakikliği nasıl etkileyeceğini, ancak deneyimli planlamacıların deneyimlerini kullanarak tahmin etmek mümkündür. Altyapı ve/veya zaman çizelgesindeki daha büyük değişiklik durumlarında dakikliğinin tahmin edilmesi gerekiyorsa, RailSys gibi simülasyon araçlarının kullanılması gerekir. Gelecekteki dakikliği tahmin etmek zor olsa da, Şekil 2.6'da da görüldüğü gibi genel bir kural olarak, kapasite kullanımı arttığında dakikliğin düşeceği söylenebilir (Landex vd., 2006).



Şekil 2.6 Dakiklik ve kapasite kullanımı (Landex vd., 2006)

Bir demiryolu hattında daha yüksek kapasite kullanımı elde etmek mümkün olsa da, dakikliğin belirli bir sınırın altına düşmemesi gerekmektedir. Çünkü böyle bir anda artık kapasitenin tamamen tüketildiği durum ortaya çıkacaktır. İncelenen demiryolu hattı için sefer tarifesinin değiştirilmesi dakikliği arttırabilir, böylece kapasitenin tamamen tüketilmesi durumundaki dakiklik seviyesinin altına düşmeden daha yüksek kapasite kullanımına sahip olunabilir.

2.3 Kapasite Türleri

Teorik (Fiziksel) Kapasite

Teorik kapasite, belirli bir referans süresinde, kesintisiz çalışma durumunda belirli bir hat kesiminde çalışabilecek en büyük tren sayısını temsil eder. Bu sayı, tüm tren sınıfları ve işletim programları (örneğin, orer) için geçerlidir (Kontaxi ve Ricci, 2010).

Bir diğer tanıma göre, ampirik (deneysel) bir bağıntı kullanılarak matematiksel olarak hesaplanan, sürekli ve belirli bir zaman aralığında bir güzergâh üzerinden geçebilecek trenlerin sayısıdır (Rotoli vd., 2016).

Teorik kapasite, hat kapasitesi için bir üst sınırdır. Çoğunlukla, trafiğin homojen, tüm trenlerin aynı olduğunu ve trenlerin herhangi bir kesinti olmaksızın gün boyunca eşit aralıklarla yerleştirildiğini varsayar. Gerçekte meydana gelen trafik ve işletimdeki değişikliklerin etkilerini görmezden gelmektedir.

Teorik Kapasite ampirik bir bağıntı kullanılarak hesaplanır. Matematiksel olarak hesaplanabilecek tren sayısını fiilen çalıştırmak mümkün değildir (Abril vd., 2008).

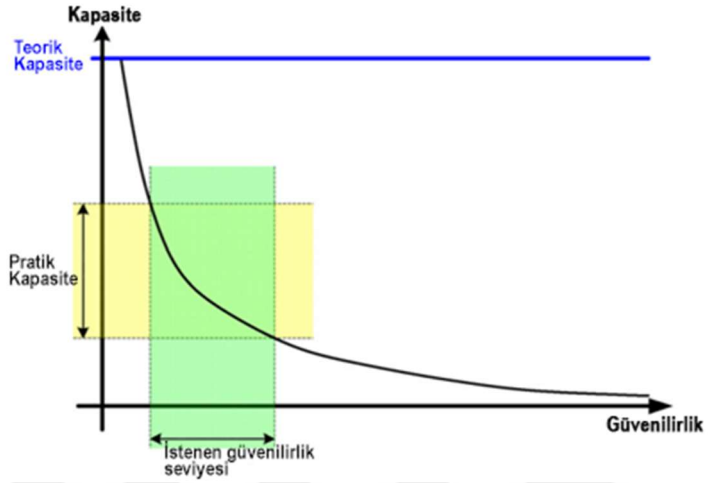
Unutulmamalıdır ki teorik kapasite hesaplamaları, gerçek dünya koşullarının değişkenliği nedeniyle ideal durumları temsil eder. Pratikte, hava koşulları, bakım gereksinimleri, trafik yoğunluğu ve diğer beklenmeyen faktörler teorik kapasitenin altında veya üstünde sonuçlar doğurabilir.

Pratik Kapasite

Demiryolu ulaşımında pratik kapasite, gerçek dünya koşullarını dikkate alarak, bir demiryolu hattının veya trenin ne kadar yolcu veya yük taşıma kapasitesine sahip olduğunu ifade eder. Pratik kapasite, teorik kapasite ile aynı temel prensiplere dayanır, ancak gerçek dünya koşullarını ve değişkenlerini hesaba katar. Bu hesaplamalar, operasyonel kararlar alırken demiryolu şirketlerinin performansını optimize etmelerine yardımcı olur.

Pratik kapasite, demiryolunun gerçek işletimi ve şebekeyle etkileşimi göz önüne alınarak hesaplanan fiili kapasite kesimini ifade eder (Kontaxi ve Ricci, 2010).

Teorik kapasite üst teorik sınırı temsil ediyorsa, pratik kapasite daha gerçekçi bir ölçüyü temsil eder. Böylece, pratik kapasite, Şekil 2.7'de gösterildiği gibi, beklenen işletim kalitesi ve sistem güvenilirliği düzeyi ile ilgili daha gerçekçi varsayımlar altında hesaplanır. Normal işletim koşullarında kalıcı olarak sağlanabilen kapasitedir ve genellikle teorik kapasitenin yaklaşık %60-75'idir (Abril vd., 2008).



Şekil 2.7 Pratik kapasite ile istenen güvenilirlik seviyesi arasındaki ilişki (Abril vd., 2008)

Kullanılan Kapasite

Demiryolu ulaşımında kullanılan kapasite, demiryolu işletmecileri tarafından günlük işleyiş, planlama ve karar verme süreçlerinde temel bir gösterge olarak kullanılır. Kullanılan kapasite, bir demiryolu sisteminin veya trenin mevcut kapasiteyi ne ölçüde kullanabildiğini yansıtır.

Kullanılan kapasite, belirli bir raylı sistem tarafından belirli işletim koşulları altında taahhüt edilen fiili kapasiteyi ifade eden bir zaman çizelgesi (orer) ile ifade edilir (Kontaxi ve Ricci, 2010).

Ağ üzerinden gerçekleşen gerçek trafik hacmidir. Hatta gerçekleşen gerçek trafiği ve işlemleri yansıtır. Genellikle pratik kapasiteden daha düşüktür (Abril vd., 2008).

Kullanılabilir Kapasite

Kullanılabilir kapasite, bir demiryolu sisteminin veya trenin, mevcut altyapı ve operasyonel sınırlamalar dikkate alındığında kullanabileceği kapasiteyi yansıtır.

Bu, demiryolu işletmecileri ve planlamacıları tarafından günlük işleyiş, kapasite yönetimi ve planlama süreçlerinde temel bir gösterge olarak kullanılır.

Kapasitenin hala mevcut olan kısmı yani bir zaman çizelgesinde ve/veya mevcut işletim düzeninde yeni talepleri karşılamak için kullanılabilir kesimidir (Kontaxi ve Ricci, 2010).

Kullanılabilir kapasite, pratik kapasite ile kullanılan kapasite arasındaki farkı temsil eder ve aynı zamanda güzergâhta işlenebilecek ek trafik hacmini belirtir. Yeni trenlerin eklenmesine izin veriyorsa, faydalı bir kapasitedir; aksi halde kapasite kaybına sebep olur (Abril vd., 2008).

2.4 Kapasite Parametreleri

Demiryolu ulaşımının kapasite parametreleri, demiryolu hatları ve trenlerin kapasitesini etkileyen çeşitli faktörleri içerir. Bu parametreler, demiryolu sistemi ve hattının verimli bir şekilde çalışabilmesi ve kapasitesinin optimize edilebilmesi için dikkate alınır. Kapasite parametrelerini altyapı, trafik ve işletim parametreleri olarak gruplandırabiliriz.

Altyapı/Üstyapı Parametreleri

Demiryolu ulaşımındaki altyapı parametreleri, demiryolu hatlarının fiziksel özelliklerini ve altyapısını ifade eder. Bu parametreler, demiryolu hatlarının tasarımı, inşası ve sürdürülebilir işleyişi açısından önemlidir.

- **Blok ve Sinyalizasyon Sistemi**

Sinyaller, tren makinistinin görüş aralığını artırarak trenlerin daha yüksek hızlara ulaşmasına katkı sağlar. Sinyalizasyonun rolü, trenleri güvenli bir aralıkta tutmaktır. Sabit ve hareketli blok sinyal sistemi olmak üzere iki tür blok sinyalizasyon sistemi vardır.

Sabit bir blok sinyalizasyon sisteminde, her bir trenin konumu sadece işgal ettiği blok kesimi/kesimleri tarafından bilinir. Trenler arasındaki takip aralığı, her blok kesiminin aynı anda en fazla bir tren tarafından işgal edilmesi kısıtlaması getirilerek sağlanır. Blok uzunlukları, tren hızları ve tren uzunlukları bu nedenle önemli parametrelerdir.

Modern bir teknoloji olan hareketli blok sinyalizasyon sisteminde, her bir trenin konumu sürekli olarak bilinmekte ve böylece birbirine bağlı hareket eden trenler arası aralıkların daha iyi düzenlenmesi sağlanmaktadır. Bu, hat sinyalleri ve kontrol merkezleri arasında verimli bir iletişim sistemi gerektirir.

- **Hat Sayısı**

Tek hatlı demiryollarında dikkate alınan kesim, iki komşu istasyon veya kavşak arasındaki en yüksek seyahat süresinin geçirildiği yerdir. Çift hatlı demiryollarında benzer bir yaklaşım izlenebilir, her iki yöndeki trenler ile çatışma (kesişme) olmayan en büyük seyahat süresine sahip ilgili kesimlerin ayrı ayrı dikkate alınmasına dikkat edilmelidir. Bu nedenle geliştirilen yöntemlerdeki ilk temel ayrım tek/çift hat sayısından kaynaklanmaktadır (Kontaxi ve Ricci, 2010).

Hat sayısının artırılmasının birçok avatajı bulunmaktadır. Hat sayısının artışı ile daha fazla trenin aynı anda çalışmasına olanak sağlanır. Bu da yolcu ve yük taşıma kapasitesinin artışı anlamına gelmektedir.

Yine hat sayısının artırılması trenlerin daha sık ve daha düzenli seyahat etmesine olanak tanır. Bu da yolcu ve yükler için daha hızlı ve güvenilir bir taşıma seçeneğidir.

Hat sayısının artırılması ile daha güvenli bir işletim sağlanabilir. Trenler arasında daha fazla aralık ve güvenlik alanı sağlanması ile kaza ve çarpışmaların önlenmesi, bakım ve onarım için gereken zamanın sağlanması gibi sorunların önüne geçilmiş olunur.

Ayrıca hat sayısının artırılması ile işletim maliyetlerinin daha verimli hale gelmesi ve enerji tüketiminin de en aza indirilmesi sağlanır.

Elbette ikinci bir hat eklemek her zaman sorunları ortadan kaldırmayabilir çünkü hattaki asıl darboğazlar istasyonlardır. Geçiş istasyonlarındaki yardımcı (yan) hatlar, trenlerin geçiş ve sollama (öne geçme) yapmasına izin verdiği için mevcut tek hattın kapasitesini de artırır (Abril vd., 2008).

- **Hattın Uzunluğu**

Hat kesiminin başlangıç ve bitiş sınırları arasındaki aralığı göstermektedir.

Hattın kesiminin uzunluğu arttıkça, trenlerin geçiş süresi de artar. Bu da, daha fazla karşılaşma ve öne geçme, daha uzun geçiş süresi ve daha fazla değişkenin kapasiteyi etkilemesi anlamına gelir. Bunların hepsi kapasiteyi sınırlar (Krueger, 1999).

Genel olarak, istasyonlar arasındaki hat kesimleri kısaldıkça; istasyonda geçiş ve sollama işlemlerine izin vermek için daha fazla yardımcı yol bulunduğundan, trafik akışı potansiyel olarak artabilir ve daha iyi yönetilebilir.

- **Ağ Etkileri**

Demiryolu ulaşımında ağ etkileri, demiryolu hatlarının, istasyonlarının ve trenlerin birbiriyle etkileşimini ve demiryolu ağının genel performansını anlatan bir kavramdır.

İyi planlanmış ve yönetilen bir demiryolu ağı, toplumun genel hareketliliğini artırabilir ve ulaşımın etkin bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlar.

Bir hattın, kesişen ve örtüşen hatlar nedeniyle tüm ağın tamamen bağımsız bir kesimi olarak kabul edilememesi sebebiyle, bir hattın kapasitesi, bu hatlar arasındaki ilişkiler göz önüne alınmadan belirlenemez.

- **Üstyapının Durumu**

Üstyapının durumu için rayların, bağlantı elemanlarının ve balastın durumunu hatta izin verilen hızların yanı sıra hatta kullanılabilecek ekipmanın (lokomotif ve vagonların) ağırlığını ve türünü belirlemek gerekir. Bunlar kapasite üzerinde önemli bir etkiye sahiptirler.

Demiryolu (tren) işletmecileri ve altyapı sahipleri, düzenli bakım, modernizasyon ve iyileştirme çalışmaları yoluyla üst yapının kapasiteyi artırmasını sağlamak için çaba gösterirler. Bu tür yatırımlar, demiryolu taşımacılığının daha etkili ve rekabetçi olmasını sağlar.

- **İstasyonlar Arası Aralık**

Geçiş olanağına ya da yan hatlara sahip olan iki istasyon arasındaki aralık, birincil öneme sahip bir parametredir. Aslında, bu kesimdeki bloğu karakterize eder ve

sonuç olarak hattın tümünü etkiler. Blok/istasyon kesiminin uzunluğu, bir hat boyunca hareket edebilen teorik tren sayısını tanımlar (Kontaxi ve Ricci, 2010).

İstasyonlar arası aralığın artırılması, hattın daha fazla treni aynı anda taşımasına ve daha fazla yolcu veya yükü kabul etmesine olanak tanır. Daha uzun istasyonlar arası aralıklar, trenlerin arasındaki güvenli aralığı artırabilir, bu da daha yüksek hızlarda ve daha fazla treni destekler.

- **Teorik Hız ve Proje Hızı**

Teorik hız, bir demiryolu hattının tasarımında veya belirli işletme koşullarında bir trenin ideal olarak ulaşabileceği en büyük hızdır. Hat geometrisi, sinyalizasyon sistemleri, ray durumu, tünel ve köprü geçişleri gibi fiziksel ve teknik faktörlere dayalı olarak hesaplanır.

Proje hızı ise, bir demiryolu projesinin planlandığı veya inşa edildiği hızdır. Bu hız, demiryolu hattının yapım ve işletme aşamalarında hedeflenen en büyük hızı belirtir. Proje hızı, demiryolu hattının tasarımında ve maliyet tahminlerinde kullanılır.

Bir başka tanıma göre teorik hız, demiryolu araçlarının ideal koşullarda hareket edebildiği, altyapı yöneticisi tarafından öngörülen hızdır. Proje hızı, bir hattın geometrik özelliklerine ve bakım durumuna göre, bir hat kesimi boyunca seyahat edebildiği hızdır (Kontaxi ve Ricci, 2010).

Her iki kavram da demiryolu taşımacılığının planlanması ve tasarımı sırasında önemlidir. Teorik hız, hattın nasıl tasarlandığını ve ne tür işletme koşullarının kabul edildiğini yansıtırken, proje hızı ise demiryolu hattının maliyetlerini ve işletme gereksinimlerini belirler. Hem teorik hız hem de proje hızı, yolcu ve yük taşımacılığı için güvenli ve etkili bir demiryolu ağının oluşturulmasına yardımcı olur.

Trafik Parametreleri

Demiryolu ulaşımında trafik parametreleri, demiryolu hatları ve trenlerin günlük işleyişi ve performansını değerlendirmek için kullanılan önemli ölçüm ve değerlendirme faktörlerini ifade eder. Bu parametreler, demiryolu operasyonlarının verimliliğini ve güvenliğini optimize etmek için dikkate alınır.

- **Farklı Tren Türlerinin Karışımı**

Demiryolu kapasitesi büyük ölçüde farklı tren türlerinin karışımına da bağlıdır. İdeal durum, tüm trenlerin aynı veya benzer hıza sahip olmasıdır. Farklı hızlardaki trenlerin karışımı arttıkça, trenlerin sollama (durmadan geçiş) ve öne geçme ihtiyaçları ortaya çıkar. Bu durum trafik akışını azaltır. Bu azalma kapasiteyi olumsuz etkilemektedir.

- **Ortalama Hız**

Kapasiteyi etkileyen önemli bir parametre de ortalama tren hızıdır. Daha yüksek hızlar hem gecikmeyi hem de geçiş (seyir) süresini azaltır. Bunun nedeni, daha hızlı trenlerin belirli bir aralığı katetmek için daha az zaman harcaması, rayı daha az süre işgal etmesidir.

- **Trafikte Zirve Faktörü**

Kısa bir zaman çerçevesi içinde gerçekleşen trafikteki yoğunlaşma, genellikle kümelenme veya tepe noktası olarak adlandırılır. Trafikteki bu zirve faktörü, ağın bu kesiminin, güvenilir bir şekilde sürdürebileceğinden daha yüksek trafik seviyelerine neden olabileceğinden, kapasite üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Krueger, 1999).

- **Ara Sinyal Aralığı**

Ara sinyaller, birbirlerini takip eden trenler arasındaki gerekli takip aralığını azaltarak kapasiteyi artırır ve trenlerin demetlenmesine izin verir.

Bu, daha büyük trafik hacimlerinin taşınmasında, aksaklıkların giderilmesinde, sollamalarda ve ikili karşılaşma durumlarında gecikmelerin azaltılmasında fayda sağlayarak kapasiteye etki etmektedir (Krueger, 1999).

- **Tren Öncelikleri**

Trenlerin öncelikleri, hangi trenlerin gecikme yaşayacağına karar vermek için kullanılır. Yüksek öncelikli trenlere, düşük öncelikli trenlere göre ayrıcalık sağlanması, tren gecikmelerinin artmasına yol açmaktadır. Gecikmelerin artması ise hatta kullanılan kapasitenin düşmesine sebep olmaktadır.

- **Hemzemin Geçitler**

Hemzemin geçitlerin durumları ve trafiğe kapatılma süreleri, tren trafiğini etkiler. Daha fazla hemzemin geçit tren trafiğini yavaşlatabilir. Bu da kapasiteye olumsuz etki eder.

İşletim Parametreleri

- **Hat Kesintileri**

Bir yolu hizmet dışı bırakan planlı olaylar (bakım çalışmaları, ticari duraklamalar vb.) veya planlanmamış olaylar (tren arızaları, rayların kırılması vb.) olabilir. Bu, bir hattın kapasitesini büyük ölçüde etkiler çünkü gün içerisinde trenleri hareket ettirmek için kullanılan saat sayısını doğrudan azaltır.

Hat kesintileri genellikle trenler üzerindeki etkileri en aza indirecek şekilde planlanan bakım çalışmaları nedeniyle meydana gelir. Bu durum aynı zamanda kırık ray, sinyaller, kazalar, ekipman sorunları gibi tesis ve tren arızalarına da bağlanabilir (Abril vd., 2008).

- **Tren Durma Süresi**

Bu parametre, trenlerin işletim sırasında durduğu süreyi hesaplar. Bu, bir trenin hat kesimlerini geçmek için harcadığı süreyi doğrudan artıran bir gecikmeyi içerir.

Durma süresinin artması hat geçişlerini uzatacağından hat kapasitesini azaltan bir etkiye sahiptir.

- **En Büyük Yolculuk Süresi Eşiği**

Bu parametre, kabul edilebilir yolculuk süresinin üst sınırını temsil eder. Tren duruşlarının sayısını ve/veya uzunluğunu kısıtladığı için kapasiteyi etkiler (Abril vd. 2008).

- **Referans Süre**

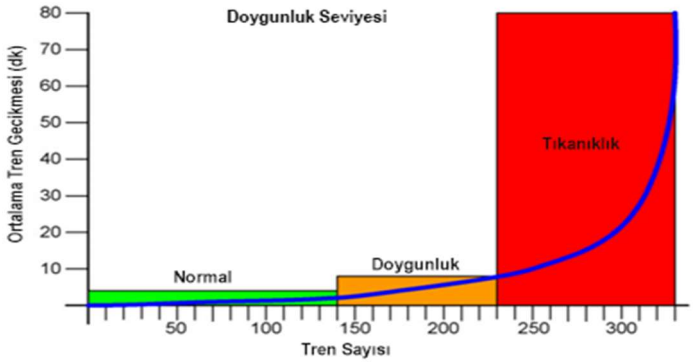
İstenen hat kapasitesinin hesaplanması için referans alınan zaman aralığı olarak tanımlanmaktadır. Geleneksel olarak, bu ya bir saate ya da tüm çalışma gününe ayarlanır.

- **Hizmet kalitesi, güvenilirlik veya sağlamlık**

Tren işletimleri mükemmel olmadığından ve belirli hatlarda işletim sırasında tren yönetiminde rastgele küçük sapmalar ve arızalar meydana geldiğinden, doğru bir zaman çizelgesi oluşturmak için bazı tampon sürelerin dikkate alınması gerekir.

Bu tampon süreler göz önüne alındığında, hizmet güvenilirliği ile en büyük fiziksel kapasite arasında bir denge bulmak, ekonomik olarak en uygun kapasite seviyesini belirlemede kritiktir.

Şekil 2.8, tren sayısı doygunluk seviyesini aştığında ortalama gecikmelerin nasıl katlanarak arttığını ve ağ güvenilirliğinin nasıl azaldığını göstermektedir. Bu nedenle, tren sayısını doygunluk seviyesinin üzerine çıkarmak karlı değildir (Abril vd., 2008).



Şekil 2.8 Ortalama gecikmeye göre doygunluk seviyesi (Abril vd., 2008)

2.5 Kapasite Tahmin Yöntemleri

Demiryolu ulaşımında kapasite tahmin yöntemleri, güvenilir tahminler yaparak verimliliği artırmak, hizmet kalitesini iyileştirmek ve altyapı yatırımlarını doğru bir şekilde yönlendirmek için önemlidir. Bu yöntemler, demiryolu kesimindeki profesyonellerin karar alma süreçlerine rehberlik eder.

Kapasiteyi geliştirmenin iki genel yolu vardır: İlki yeni altyapı inşa etmek veya mevcut altyapıyı iyileştirmek için yatırım yapmak, ikincisi ise altyapıyı daha verimli kullanmak ve işletim faaliyetlerini iyileştirmektir (Lai ve Barkan, 2011). Elbette her iki durum için de kapasite analiziyle ortaya çıkacak maliyet ve faydalar doğru şekilde analiz edilmelidir.

Literatürde kapasite analizi yöntemlerinde kullanılan modeller farklılaşmaktadır. Lai ve Barkan (2009), bu modelleri analitik, simülasyon ve parametrik olmak üzere üç sınıfa ayırmıştır.

Pouryousef vd. (2015), kapasite analizi için analitik, simülasyon ve kombine olmak üzere üç yöntem önermiştir. Sameni ve Moradi (2022), bu yöntemleri beş grupta incelemiştir: Bunlar analitik, optimizasyon, simülasyon, parametrik ve grafik yöntemlerdir.

Bu tezde, yöntemler analitik, optimizasyon ve simülasyon başlıkları altında sınıflandırılmıştır.

Analitik Yöntemler

Analitik yöntem, veri analitiği ve matematiksel modellemeyi kullanarak, gelecekteki tren hizmetlerinin kapasitesini tahmin etmek için kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yöntem, demiryolu işletmecilerinin tren hizmetlerini daha iyi planlamalarına ve altyapılarını daha etkili bir şekilde yönetmelerine yardımcı olur.

Analitik yöntemler, demiryolu ağının darboğazlarını belirlemek için etkili bir başlangıç noktası olabilir. Ancak, analiz sonrası elde edilen sonuçlar yöntemlere göre farklılık gösterebilir ve kullanılan parametreler tren kombinasyonlarına son derece duyarlıdır (Abril vd., 2008).

Demiryolu hattındaki kapasite kullanımını ortaya çıkarmak için öncelikle basit bazı bağıntılar kullanılmıştır. Daha sonra ortaya çıkarılan geliştirilmiş yöntemler, genelde zaman çizelgesine bağlıdır ve daha fazla ayrıntı içerir.

Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC), kapasite kullanımını analiz etme ve değerlendirme yöntemi olarak 1983 yılında UIC 405 broşürünü yayınlamıştır (UIC, 1983). UIC yöntemi, İngiltere'de kullanılan zaman çizelgesi sıkıştırmasına odaklanan basit bağıntılar temelinde geliştirilmiştir (Gibson, Cooper ve Ball, 2002).

Bu yöntemin bazı temel zayıflıkları vardır: Bunlardan ilki ve en önemlisi zaman çizelgesi sıkıştırmasının nasıl yapıldığına çok duyarlı olmasıdır. Bir diğeri ise yöntemin, istasyon ve düğüm noktaları için yeterince etkili olamamasıdır.

İlk kez 2004'te sunulan UIC 406, kapasite kullanımını incelemek için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, demiryolu ağı farklı kesimlere ayrılır. Daha

sonra, her bir kesim için zaman çizelgesi sıkıştırılarak kapasite kullanım oranı hesaplanmaktadır (UIC, 2004). Bu yöntemin, düğüm noktalarında kapasite kullanımını hesaplama yeteneği gibi iyileştirmelere sahip yeni bir sürümü 2013 yılında yayınlanmıştır (UIC, 2013).

Tablo 2.2'de özet olarak verilen analitik yöntem kullanılan bazı önemli araştırmalardan ilkinde Burdett ve Kozan (2006), trenin uzunluğu ve ağırlığı, hareket yönü, hızlanma, yavaşlama, durma biçimleri, sinyallerin konumu, blokların uzunluğu gibi çeşitli faktörlerin kapasite kullanımını nasıl etkilediğini tartışmaktadır. Landex vd. (2008), Danimarka demiryolu ağında UIC 406 yöntemini kullanarak, hatları sıkıştırmadan önce farklı kesimlere ayırmak için ayrıntılı önerilerde bulunmuştur. Aynı zamanda, Landex (2009), Danimarka'da bulunan çift hatlı demiryollarını analiz etmek için UIC 406'nın eski sürümünü kullanmaktadır.

Lai ve Barkan (2009), "numaralandırma, maliyet ve kapasite, etki analizi" olmak üzere üç bileşenden oluşan RCET1 adlı karar destek sistemi geliştirmiştir. Numaralandırma bileşeni, veri girişi olarak hat özelliklerini, mevcut kaynakları ve gelecekteki talebi kullanır. Maliyet ve kapasite bileşeni, maliyet ve kapasite faydalarını her bir alternatif için hesaplar. Etki analizi bileşeni ise yatırımın ekonomik açıdan uygun olup olmadığını belirler. Demiryollarının stratejik seviyede tümüyle fayda sağlayacak bir karar destek sistemi olarak çalışabilmesi için Lai ve Barkan (2011), çalışmalarını daha da geliştirmişlerdir. Bu kapsamda üç araç ortaya konulmuştur: 1- İlgili maliyet ve kapasite faydaları ile olası geliştirme senaryolarını bulan "alternatif üreteç", 2- Şebekenin hangi kesimlerinin kapasite iyileştirmeye ihtiyacı olduğunu belirleyen "yatırım seçim modeli" 3- Yatırım ve gecikme maliyetleri arasındaki dengeyi kuran "etki analizi bileşeni". Bu araçlar birlikte veya ayrı olarak kullanılabilirler.

Sameni, Preston ve Armstrong (2010), İngiltere'de kapasite kullanımını iyileştirmek için bazı önerilerde bulunmuştur. Operasyonel verim, hizmet kalitesi ve "mikro ve makro kapasite kullanımı" gibi ölçütler dikkate alınan yöntemde, ayrıca UIC 406 ve CUI (Kapasite İndeksi) yöntemleri karşılaştırılmıştır. Araştırmalarında inceledikleri veri analizlerine göre, CUI yöntemi UIC 406 yöntemine göre %1,6 daha yüksek kapasite sonuçları vermektedir.

Rotoli ve Ricci (2014), Napoli Centrale – Salerno hattında CUI, UIC 405 ve UIC 406 yöntemlerini uygulayarak bir karşılaştırma yapmıştır. Araştırmacılar; yöntemlerin doğal farklılıklardan kaynaklanan küçük değişikliklerle, birbirlerine oldukça yakın sonuçlar verdiklerini gözlemlemişlerdir.

Rotoli, Malavasi ve Ricci (2016), karmaşık ağlardaki kapasite analizi için analitik bir yaklaşım benimsemişlerdir. Bu yöntem, stratejik planlamayı değerlendirmenin yanı sıra operasyonel kapasiteyi de inceleyebilen bütünleşik bir yaklaşımdır. Yöntem, araştırmacılar tarafından esnek şekilde uygulanmakla beraber, hatlar ve istasyonlar hakkında ayrıntılı bilgiler içermese de çok önemli analizler sağlayabilmektedir.

Jensen vd. (2017), demiryolu altyapısının işgalini hesaplamak için gerçek zaman çizelgesine ihtiyaç duymadan UIC 406 yöntemine dayanan stratejik bir çerçeve sunmaktadır. Bu amaçla, kullanılan kapasiteyi hesaplamak için farklı tren kombinasyonları oluşturulur ve her bir gecikmenin simülasyonu rastgele yapılır. Bu çalışmada, UIC 406 ve CUI yöntemlerinin birbirlerine göre avantajları ve dezavantajları tartışılmıştır. Trenin çalışma süresi ve blokaj süresi dikkate alınarak tüm ağdaki kapasiteyi hesaplayabilen yeni bir cebirsel yaklaşım önerilmiştir.

Jamili (2018), tek hatlı demiryollarında pratik kapasiteyi hesaplamak için UIC 406 yönteminin zayıf yönlerini belirleyerek, zaman çizelgesini sıkıştırmak amacıyla, hedeflenen güvenilirlik seviyesini elde etmek için gerekli en küçük tampon süresine dayalı yeni bir yöntem önermiştir.

Rais vd. (2020), mevcut ve gelecekte öngörülen kapasite kullanım düzeyini değerlendirmek amacıyla analitik bir yöntem sunarak, kapasite analizine katkıda bulunmuşlardır. Yöntem, Malezya'da toplam 22 hat olmak üzere dört bölgede uygulanmıştır. Araştırmacılar, çalışmalarında farklı etmenleri göz önünde bulundurmuşlardır. Bu etmenler: tampon süre, kontrol ve sinyalizasyon sistemleri, işletme verimliliği, ilerleme süreleri ve tren hızlarıdır.

Tablo 2.2 analitik yöntemler, ana katkıları ve araştırmanın yapıldığı ülkeler ile ilgili olarak demiryolu kapasitesi üzerine yapılmış başlıca araştırmaları özetlemektedir (Sameni ve Moradi, 2022).

Tablo 2.2 Analitik yöntemler üzerine yazılmış bazı araştırmalar

Yazarlar	**Araştırmanın Konusu**	**Zaman Çizelgesi Sıkıştırması**	**Literatüre Katkısı**	**Araştırmanın Yapıldığı Ülke**
Burdett ve Kozan (2006)	Mevcut kapasitenin analizi	+	Kapasitenin parametrelere bağlı analizi	Kuzey Amerika ve Avustralya
Landex (2009)	Mevcut yöntemlerin iyileştirilmesi	+	Tek parça hatlar için UIC406 yöntemini uygulama	Danimarka
Lai ve Barkan (2009)	Maliyet ve kapasite analizi	+	RCET1 adlı karar destek sistemi kullanılarak maliyet ve kapasite faydalarını her bir alternatif için hesaplanır.	Kuzey Amerika
Khadem Sameni vd. (2010)	Analitik kapasite kullanımını iyileştirmek	+	Kapasite analizi için UIC 406 ve CUI (Kapasite İndeksi) yöntemleri karşılaştırılmıştır.	İngiltere
Khadem Sameni vd. (2011b)	Analitik kapasite yöntemlerinin karşılaştırılması	+	UIC406 ve CUI'nin karşılaştırılması kapasite kullanımını analiz etmek ve iyileştirmek için bir DMAIC döngüsü önerilir	Danimarka ve İngiltere
Rotoli ve Ricci (2014)	Analitik kapasite yöntemlerinin karşılaştırılması	+	CUI, UIC 405 ve UIC 406 yöntemlerini uygulayarak bir karşılaştırma yapmıştır.	İtalya
Rotoli vd. (2016a)	Mevcut yöntemlerin iyileştirilmesi	+	Hat ve istasyon bilgilerinin doğruluğu mevcut değilse kullanışlıdır	İtalya
Jensen vd. (2017)	Mevcut yöntemlerin iyileştirilmesi	+	Zaman çizelgesinden bağımsız olarak kapasite kullanımının hesaplanması için stratejik bir çerçeve önermek	Danimarka
Jamili, (2018)	Mevcut yöntemlerin iyileştirilmesi	+	Tampon süreye ve istenen güvenilirliğe dayalı olarak pratik kapasitenin belirlenmesi	İran
Rais vd. (2020)	Kapasiteyi hesaplamak için yeni bir yöntem önermek	-	Mevcut ve gelecekteki kapasite kullanımının analizi	Malezya

Optimizasyon Yöntemleri

Optimizasyon yöntemi, matematiksel modelleme, veri analitiği ve simülasyon gibi araçları kullanarak demiryolu altyapısının ve hizmetlerin verimli bir şekilde kullanılmasını hedefler. Bu, demiryolu taşımacılığının sürdürülebilirliğini artırır ve işletmelerin daha rekabetçi olmasına yardımcı olur.

Demiryolu kapasitesinin karmaşık yapısı nedeniyle, genellikle matematiksel modelleme, kapasiteyi doğrudan modellendirip optimize etmek için uygun değildir. Bu sebeple, optimizasyon yöntemleri; tren çizelgeleme, yeniden çizelgeleme, tren rotalama ve hat tahsisi gibi alt problemler için daha çok tercih edilmektedir (Sameni, 2012).

Optimizasyon modelleri, kapasite tahsisi için analitik yöntemlere oranla daha etkili sonuçlar elde etmek amacıyla stratejik düzeyde kullanılır. Bu yöntemler, optimize edilmiş bir zaman çizelgesine dayanarak kapasiteyi değerlendirmeye çalışır. Genellikle zaman çizelgeleri belirlenirken matematiksel programlara yöntemleri kullanılır. Bunun yanı sıra tamsayılı programlama ve numaralandırma algoritmaları da kullanılabilir. Bu yöntem ile herhangi bir zaman çizelgesindeki tren sayısının maksimize edilmesi hedeflenir (Abril vd., 2008).

Bu yöntemi kullanan başlıca çalışmalardan ilkinde, Burdett ve Kozan (2006), darboğazın tek ve çift hatlı demiryolları için kullanılabilen mutlak kapasite üzerindeki rolüne vurgu yapmıştır. Ağdan geçen tren sayısını en büyüklemek için modelde kullanılan başlıca parametreler; tren türleri, trenlerin uzunlukları, tampon süresi, seyir süreleri, sinyalizasyondur.

Mussone ve Calvo (2013), ağ trafiğindeki anormallikleri hesaba katan bir optimizasyon modeli benimsemişlerdir. Modellerinin bir zaman çizelgesine ihtiyacı yoktur ve hatlar, istasyonlar ve düğümler için kapasite değerlendirilebilir. Bu model; karmaşık bağlantılar için, UIC 406 yönteminden daha etkin ve güçlü bir performans sergilemektedir.

Jensen (2015), tren kombinasyonu, ağ ve vagon özelliklerine bağlı olan kapasiteyi analiz etmek amacıyla çift aşamalı bir optimizasyon modeli uygulamıştır. İlk aşamada, önceden tanımlanmış tren kombinasyonuna göre en büyük tren sayısı

bulunur. İkinci aşamada, trenler göreli ağırlıklarına göre sisteme dahil edilir. Araştırmanın matematiksel modeli, özgün bir yaklaşımla çözümlenir.

Tablo 2.3, optimizasyon yöntemini çeşitli ülkelerde uygulayan başlıca araştırmaları özetlemektedir (Sameni ve Moradi, 2022).

Tablo 2.3 Optimizasyon yöntemi üzerine yazılmış bazı araştırmalar

Yazarlar	**Başlık**	**Model Tipi**	**Literatüre Katkısı**	**Araştırmanın Yapıldığı Ülke**
Burdett ve Kozan (2006)	Mutlak kapasitenin hesaplanması	Tamsayılı programlama	Tek ve çift hatlı ağlardaki darboğazlara göre modelleme.	Kuzey Amerika ve Avustralya
Mussone ve Calvo (2013)	Ağdaki genel kapasite kullanımının hesaplanması	Doğrusal programlama	Tren tarifesinden bağımsız darboğazları belirlemek.	İsviçre
Jensen (2015)	En büyük kapasite kullanımına ulaşmak için yeni trenlerin eklenmesi ve önceliklendirilmesi	Doğrusal programlama	Kapasite analizi ve yeni tren ekleme olmak üzere iki aşamalıdır.	Danimarka
Guo vd. (2016)	İstasyonlarda kapasite kullanımının hesaplanması	Tamsayılı programlama	Yüksek hızlı tren istasyonları	Çin
Wu ve Zhang (2019)	İstasyonlarda kapasite kullanımının hesaplanması için yeni yöntem	Çok amaçlı	Çok amaçlı bir optimizasyon modeli benimsenir. Ana amaç, hat kullanım maliyetini en aza indirmektir. İkinci amaç, daha az katılımla daha kısa rotayı seçmek.	Çin

Büyük tren istasyonlarında kapasite değerlendirmesi, karmaşık yerleşimleri sebebiyle bloklara oranla daha zorlu bir süreçtir. İstasyonlar, demiryolu ağ sisteminde yer alan önemli darboğazlardır. Guo vd. (2016), istasyon kapasitesini değerlendirmek için bir tamsayılı programlama modeli oluşturmuşlardır. Bu model, "tren seti kullanım kısıtlamalarını" dikkate alarak doymuş bir zaman çizelgesinde tren sayısını en büyüklemeye odaklanmaktadır.

Wu ve Zhang (2019), tasarladıkları optimizasyon modeli ile istasyonların geliş ve gidiş darboğazlarındaki kapasite kullanımını değerlendirmektedir. Bu model, iki amaç fonksiyonunu barındırmaktadır: Hat işgal sürelerini en küçüklemek ve en kısa yolu en az işgal ile bulmak.

Simülasyon Yöntemleri

Demiryolu ulaşımında kapasite tahmin yöntemlerinden biri de simülasyon yöntemidir. Bu yöntem, demiryolu altyapısının ve hizmetlerinin gelecekteki performansını değerlendirmek ve tahmin etmek için bilgisayar tabanlı simülasyonları kullanır. Simülasyon yöntemi ayrıca farklı senaryoları incelemek ve karar vericilere altyapı iyileştirmeleri veya tren hizmetleri planlaması için fikirler sunmak amacıyla kullanılır.

Simülasyon, bir sistemin bilgisayar ile gerçek dünyadaki performansını taklit etmektir. Kabul edilebilir ve güvenilir bir sonuca varabilmek adına süreç, birçok defa tekrar edilerek ilerletilir. Simülasyon için gereken veriler, analitik yöntemlere benzer olmakla birlikte, genellikle daha ayrıntılıdır (Pouryousef ve Lautala, 2015).

Simülasyon yöntemleri iki şekilde kullanılır:

1- Zaman çizelgesini diğer araçlar ve hedeflerle birlikte optimize etme veya yeniden programlama
2- Kapasite analizi için doğrudan veya dolaylı olarak bir demiryolu yazılım paketinin kullanılması.

Günümüzde simülasyon süreci, karmaşık hesaplamaları ve olasılıksal modelleri daha hızlı ve daha verimli bir şekilde işlemek için bilgisayar araçlarını kullanmaktadır. Simülasyon yaklaşımları, AweSim, Minitab ve Arena gibi genel simülasyon araçlarından yararlanılarak işletilmektedir. Bununla beraber; RTC, MultiRail (ABD), RAILSIM (ABD), OpenTrack (İsviçre), SIMONE (Hollanda), RailSys (Almanya), DEMIURGE (Fransa), RAILCAP (Belçika) ve CMS (İngiltere) gibi birkaç yaygın yazılım aracı da, özel olarak demiryolu taşımacılığı için tasarlanmış ticari demiryolu simülasyon yazılımlarıdır (Pouryousef vd., 2015).

Abril vd., (2008), tren hızı, istasyonlar, heterojenlik, sinyaller arasındaki aralıklar ve zaman çizelgesinin varlığını dikkate alarak kapasiteyi analiz edebilen MOM adlı

otomatik bir araç geliştirmiştir. Model, doymuş ağ sistemine tren dahil etmek amacıyla bir karar destek sistemi olarak kullanılabilir. MOM, bir zaman çizelgesini sıkıştırır ve doymuş bir zaman çizelgesi bularak en büyük kapasite kullanımına ulaşmaya çalışır. Ayrıca, UIC 406 yöntemine dayalı olarak birkaç başka analitik ve pratik değerlendirme yapılabilmektedir.

Dingler, Lai ve Barkan (2009), çeşitli tren türlerinin etkilerini değerlendirmek amacıyla gerçek zamanlı hesaplama yazılımını (RTC) kullanmış ve bu yazılımın hızlı ve esnek sonuçlar üretebildiğini gözlemlemişlerdir. Bu çalışmada Dingler vd. (2014), trenlerin heterojenliğinden kaynaklanan gecikmeleri dikkate alarak, gecikmeleri azaltabilecek ve güvenilirliği artırabilecek operasyonel stratejiler önermektedir.

Dicembre ve Ricci (2011), yüksek trafik yoğunluğuna sahip hatlar üzerinde yaptıkları çalışmada, özellikle şehir içi demiryolu sistemleri için kapasite kullanımı, blok uzunluğu, hizmet türleri ve zaman çizelgesi arasındaki etkileşimleri incelemiştir. Uygulanabilir bir zaman çizelgesini OpenTrack yazılımı kullanarak oluşturmuşlardır.

Goverde, Corman ve D'Ariano (2013), trafik düzensizlikleri altında kapasite kullanımını değerlendirmek için UIC 406 yöntemini kullanmışlardır. Bu çalışmada Monte Carlo simülasyonu ve üç sezgisel, bir dal ve bağ algoritması kullanılmıştır.

Lai, Huang ve Chu (2014), kapasite analizinde kullandıkları parametrelerin kapasiteye etkilerini, regresyon ve sinir ağı yöntemlerini kullanarak nicelleştirmiştir. Çalışmada dikkate alınan 5 parametreyi değerlendirmek için RTC kullanılır ve 243 farklı senaryonun her biri 30 kez tekrarlanır. Çalışmadan elde ettikleri sonuçlar, sinir ağının regresyona göre daha olumlu bir performans sergilediğini ortaya koymuştur.

Navarro vd. (2018), şehir içi demiryolu ağındaki kapasite kullanımının genellikle istasyonlardaki bekleme sürelerine bağlı olduğunu söylemişlerdir. Çalışmalarında, bu belirsizlik durumlarını bulanık sayılar olarak modellemiş ve “bulanık en büyük kapasite” ile “bulanık doluluk zaman oranı” olmak üzere iki yeni kavram önermişlerdir. Gerekli simülasyonlar için OpenTrack yazılımı kullanılmıştır.

Tablo 2.4, simülasyonu kullanan başlıca araştırmaları, bunların ana katkılarını ve ilgili yazılımları özetlemektedir (Sameni ve Moradi, 2022).

Tablo 2.4 Simülasyon yöntemleri üzerine yazılmış bazı araştırmalar

Yazarlar	**Başlık**	**Yazılım**	**Literatüre Katkısı**	**Araştırmanın Yapıldığı Ülke**
Abril vd. (2008)	Artan kapasite kullanımı	MOM	Kapasite kullanımını hesaplamak ve analiz etmek için temel kavram ve yöntemlerin gözden geçirilmesi ve kapasite kullanımını analiz etmek için otomatik bir araç sunmak	İspanya
Dingler vd. (2009)	Artan kapasite kullanımı	RTC	Trenlerin heterojenliğinin hatların kapasite kullanımı üzerindeki etkisinin analizi	Kuzey Amerika
Dicembre ve Ricci (2011)	Mevcut kapasitenin iyileştirilmesi	OPENTRACK	Özellikle şehir içi demiryolu sistemleri için kapasite kullanımı, blok uzunluğu, hizmet türleri ve zaman çizelgesi arasındaki etkileşimleri incelemiştir.	İtalya
Goverde vd. (2013)	Mevcut kapasitenin iyileştirilmesi	ROMA	Düzensizlik (çizelgeden sapma) durumunda kapasite analizi için Monte Carlo simülasyonunu kullanma	Hollanda
Dingler vd. (2014)	Mevcut kapasitenin iyileştirilmesi	RTC	Trenlerin heterojenliğinden kaynaklanan gecikmeleri dikkate alarak, gecikmeleri azaltabilecek ve güvenilirliği artırabilecek operasyonel stratejiler önermektedir.	Kuzey Amerika
Lai vd. (2014)	Kapasite kullanımını hesaplamak için yeni yöntem	RTC	Kapasite kullanımını etkileyen faktörlerin regresyon ve sinir ağı ile belirlenmesi; regresyon ve sinir ağı ile kapasite kullanımının hesaplanması	Kuzey Amerika
Navarro vd. (2018)	Mevcut kapasitenin iyileştirilmesi	OPENTRACK	Şehir içi demiryolu ağındaki kapasite kullanımının genellikle istasyonlardaki bekleme sürelerine bağlı olduğunu açıklamaktadır.	İspanya

Yöntemlerin Karşılaştırılması

Analitik yöntemlerin temel ilkeleri matematiksel ve istatistiksel modellemeye dayanır. Geçmiş verileri kullanarak gelecekteki kapasite taleplerini tahmin eder.

Bu yöntemin avantajları hızlı ve düşük maliyetli olması, basit ve hızlı sonuçlar üretmesi ve mevcut verilerin analiziyle güçlü bir temele dayanmasıdır. Gelecekte beklenmeyen olayları ve değişkenleri hesaba katması ve tek bir tahmin senaryosu oluşturması ise dezavantajlı olduğu noktalardır.

Optimizasyon yöntemleri, demiryolu hizmetlerinin ve altyapının en iyi şekilde kullanılması için matematiksel modelleri kullanır. İşletme hedeflerini optimize etmeye odaklanır.

Optimizasyon yönteminin avantajları olarak şunları sayabiliriz:

1- Kapasite kullanımını en büyük yapma potansiyeli vardır.
2- Mevcut altyapı ve hizmetleri daha verimli hale getirir.
3- Farklı senaryoları inceleyerek karar vericilere alternatifler sunar.

Diğer taraftan yöntemin kurulması ve çözülmesi daha fazla zaman alır. Ayrıca, bu yöntemler için gerekli olan veriler, analitik yöntemlere oranla daha detaylıdır. Bu sınıfa dahil olan çalışmaların çoğu, modelleme sürecinde tamsayılı programlama, doğrusal programlama ve çok amaçlı optimizasyon kullanmış ve çözüm elde etmek için kesin yöntemler veya metasezgisel algoritmaları tercih etmiştir.

Simülasyon yöntemlerinde, en yüksek düzeyde veriye ihtiyaç duyulur ve bu yöntemlerle yüksek hassasiyetle sonuçlar elde edilir. Bu alandaki araştırmalarda birçok yazılım paketinden faydalanılabilir. Bunlardan bazıları RailSys, RTC, OpenTrack ve RailTrack'tir. Bunun yanı sıra bazı genel simülasyon yöntemleri de (örneğin; Monte Carlo) kullanılmaktadır.

Simülasyon yönteminin sunduğu avantajlar şöyledir:

1- Gerçek dünyada nasıl çalışacağına dair detaylı ve uygulanabilir bilgi sağlar.
2- Farklı senaryoların modellenmesine olanak tanır.
3- Beklenmeyen olayları ve değişkenleri içerebilir.

Bu yönteme ait dezavantajlı durumlar yüksek hesaplama gücü ve kaynak gerektirmesi ile modellemenin karmaşıklığı zaman ve kaynak maliyetini artırmasıdır.

Kapasite analizi için analitik, optimizasyon ve simülasyon olmak üzere üç farklı yaklaşıma dair yapılan bazı çalışmalar, önceki bölümlerde ele alınmış ve tartışılmıştır. Bu yaklaşımların her birinin kendi avantajları ve dezavantajları sıralanmıştır. Herbiri, ayrıca, çeşitli karmaşıklık seviyelerine sahiptirler ve farklı verilere ihtiyaç duyarlar.

Bu nedenle, hangi yöntemin kullanılacağı, belirli bir demiryolu operasyonunun gereksinimlerine, kaynaklara ve hedeflere bağlı olacaktır.

Tablo 2.5'te analitik, optimizasyon ve simülasyon yöntemlerinin karşılaştırmaları verilmiştir (Sameni ve Moradi, 2022).

Tablo 2.5 Yöntemlerin karşılaştırılması

	Analitik	**Optimizasyon**	**Simülasyon**
Amaç	Zaman çizelgesini sıkıştırarak kullanılan demiryolu kapasitesinin büyük resmini çizmek	Kapasite kullanımının alt problemlerini optimize etme	Kapasiteyi değerlendirmek ve farklı senaryoları karşılaştırmak
Özellikler	Deterministik parametrik ve parametrik olmayan	Deterministik parametrik ve parametrik olmayan	Deterministik olmayan ve parametrik
Yapılan çalışma sayısı	Orta	Yüksek	Yüksek
Çözüm süresi	Düşük	Yüksek (Değişken sayısına ve kısıtlamalara bağlıdır)	Yüksek (Varlık sayısına, ağın yaygınlığına, senaryo sayısına ve çalıştırma sayısına bağlıdır)
Ayrıntıların derinliği ve genişliği	Düşük (zaman çizelgesi verileri gereklidir)	Yüksek (altyapı, zaman çizelgesi, taşıtlar hakkında ayrıntılı veriler gereklidir)	Yüksek (altyapı, zaman çizelgesi, taşıtlar hakkında ayrıntılı veriler gereklidir)
Planlama düzeyi	Stratejik	Taktik ve operasyonel	Taktik ve operasyonel
Güçlü Yönler	Basitlik, düşük maliyet, hızlı sonuç	Kesin ve optimum çözümler	Farklı senaryoların performansının karşılaştırılmasına imkan sağlar
Zayıf Yönler	Ayrıntıların olmaması nedeniyle sınırlı içgörü/anlayış sağlama	Zaman alması, yüksek maliyetler oluşturması, ayrıntılı veriler ve kodlama bilgisi gerektirmesi	Simülasyon yazılımı maliyetleri, ayrıntılı veriler gerektirmesi, zaman alması
Ne zaman kullanılır/ kullanılmaz	Ayrıntılı bilgi mevcut değilse Üst düzey/stratejik kararların alınması gerekiyorsa Sınırlı süre mevcutsa	Detaylı bilgi mevcutsa Operasyonel planlama için karar vermek gerekiyorsa Kesin ve optimum çözüme ihtiyacınız varsa	Demiryolu ağı, matematiksel olarak modellenemeyecek kadar karmaşıksa Yeni inşa edilen hatların performansı tahmin edilmek istenirse

2.6 Kapasite Hesaplama

Demiryolu hattının kapasitesi tren taleplerinin karşılanması açısından oldukça önemlidir. Demiryolu hat kapasitesinin hesaplanmasında UIC 405-406 broşürlerinden faydalanıldığı gibi birçok farklı bağıntı ve yöntem de çalışmalarda

kullanılmıştır. 3.bölümde bu çalışmaların hangi parametreler üzerine yapıldığı derlenmiştir.

2.7 Kapasite Geliştirme Önerileri

Hat güzergâhlarındaki darboğazları aşabilmek adına birçok kapasite geliştirme önerisi sunulabilir. Elbette burada önem verilen öncelik daha az maliyetli olması konusudur. Sunulan önerilerin her biri kendi içerisinde değerlendirilmeli ve tüm olasılıklar hesaba katılmalıdır. Yapılan değerlendirmeler sonucunda verimlilik esasına göre en doğru yöntem uygulanılmalıdır. Kapasiteyi zorlayan darboğazlara yönelik ortaya atılabilecek bazı kapasite geliştirme önerileri aşağıdaki gibidir:

- İstasyon uzunluğunun artırılması
- Hatta lokomotif çekeri için kısıt oluşturacak yerlerde eğimin azaltılması
- Hatta elektrifikasyon ve sinyalizasyon altyapısının kurulması
- Sinyalli olan yerlerde takip aralığının azaltılması
- Sayding alanlarının yapılması
- Hat sayısının artırılması
- İşletimdeki trenlerin hızlarının artırılması

3
HAT KAPASİTESİ ANALİZİ İÇİN YÖNTEMLER

3.1 UIC 405R Analitik Yöntemi

Bu bölüm, Uluslararası Demiryolları Birliği (UIC) tarafından 405R Kod'uyla (1996) yayımlanan kitapçığın ilk baskısında önerilen analitik yöntemi açıklamaktadır. Yöntem, bir hattın kapasitesinin kapsamlı bir tahminini sunmaktadır.

Bu yöntem 2004 yılında standart bir kapasite ölçüsü olan sıkıştırma yöntemi (UIC Kod 406) ile değiştirilmiştir.

Yaklaşımın temelinde kapasite için aşağıdaki bağıntı kullanılmaktadır (3.1):

$$P = \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{t}fm+\mathrm{t}r+\mathrm{t}zu} \text{ (tren/referans süresi)} \quad (3.1)$$

Burada;

P : Kapasite (günlük, saatlik vb.) göstergesidir.

T : Referans süredir. Genel olarak aksi belirtilmedikçe kapasite bir gün olarak (1440 dak) alınır.

t*fm* : Ortalama en küçük tren izleme süresidir (dak/tren) (izleme süresi, trenler arasındaki ayrım/boşluk süresi olarak tanımlanabilir, yani aynı blok kesimi üzerinde ve aynı yönde birbirini izleyen iki tren arasındaki zamansal aralık olarak ifade edilebilir).

tr : Ek süre marjı (dak/tren). Zincirleme/ardışık gecikmeleri azaltmak ve kabul edilebilir bir hizmet kalitesi elde etmek için seyir sürelerine eklenen bir çalışma süresi olarak tanımlanan bir süre artışıdır.

tzu : Hat üzerindeki ara blok kesimlerinin sayısına (a) dayalı ve *tzu*=0.25*a bağıntısı ile hesaplanan ekstra bir süredir (dak/tren).

Bir blok kesimi, sinyallerle korunan bir hat kesimi olarak tanımlanabilir. Yani her hat, sabit bloklu bir tren kontrol ve sinyalizasyon sisteminde güvenlik nedeniyle, aynı anda yalnızca bir tren tarafından işgal edilebilen ve bu nedenle sinyallerle korunan blok kesimlerinden oluşur.

Her hat için ortalama en küçük izleme süresi aşağıdaki bağıntıyla hesaplanmaktadır (3.2):

$$\mathrm{t}fm = \frac{\sum(nij * fij)}{\sum \mathrm{nij}} \ (dak/tren) \qquad (3.2)$$

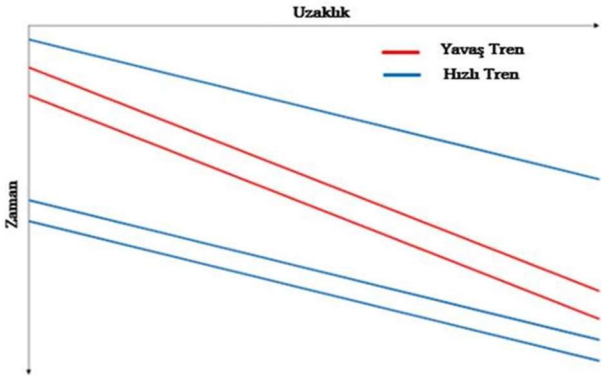
Burada;

nij: Öncül model tren i ile artçıl model tren j arasındaki izleme durumlarının sayısı

fij: Öncül model tren i ile artçıl model tren j arasındaki en küçük izleme süresi

Model tren; seyir yönü, tren türü, seyir hızı (süresi), uzunluğu gibi özellikler bakımından temsil ettiği tren grubuna ortalama olarak en yakın olan trendir.

Bağıntı 3.2, her olası tren dizisinin seyahat süresi (hız) sınıflarına göre gruplandırılmasını gerektirir. Örneğin, hat üzerinde izin verilen farklı hızlara sahip yalnızca iki tür tren (hızlı ve yavaş) olduğu düşünüldüğünde (Şekil 3.1), hattaki en küçük izleme süreleri, trenlerin dört olası ardışık sırasına göre farklı olacaktır: hızlı-yavaş, yavaş-hızlı, hızlı-hızlı ve yavaş-yavaş. Bu duruma heterojen tren işletimi adı verilmektedir.



Şekil 3.1 Heterojen tren işletimi: Farklı tren dizileri (yavaş ve hızlı) (Rotoli vd., 2016)

fij, Fij frekansının toplam ardışık izleme sayısına oranı (toplam tren sayısı/N-1) olarak hesaplanır (3.3):

$$fij = \frac{\text{Fij}}{\text{N}-1} \ (dak/tren) \tag{3.3}$$

Burada;

Fij: Zaman çizelgesinde (orerde) öncül model tren i ve artçı model tren j'nin görünme sayısı

N: Toplam tren sayısı

Yukarıda belirtilen ek süre tr, kuyruk teorisi yaklaşımı ile hesaplanmaktadır. En çok kullanılan yaklaşım, hat kesimine varışların bir Poisson süreci olarak modellendiği, hizmet (geçiş) sürelerinin üstel bir dağılıma sahip olduğu ve açıkça, tüm sistemin bir FIFO (ilk giren, ilk çıkar) M/M/1 kuyruk sistemi temellidir. Özellikle blok kesiminin girişindeki kuyruk uzunluğu, bir kesinti (gecikme) ile karşılaşan trenlerin sayısına eşit olup trafik yoğunluğuna Ψ (tek yön yol kullanım oranı) bağlıdır. Varan trenlerin sayısı ($\lambda = 1 / (tfm + tr)$, yani beklenen varış zamanının tersi) ve kesimi kullanan en büyük tren sayısı ($\mu = 1/ta$, yani beklenen hizmet süresinin tersi) (3.4) :

$$\Psi = \rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\text{tfm}}{(\text{tfm} + \text{tr})} \tag{3.4}$$

UIC tarafından yürütülen kapsamlı bir test çalışması, Ψ için aşağıdaki eşik değerler belirlenmiştir (Rotoli vd., 2016):

• 0.60 (kuyrukta bekleyen 1.5 trene karşılık gelir) sınırsız bir süre için geçerlidir (sistemin normal çalışması), dolayısıyla $tr \geq 0.67 * tf$ koşulu vardır.

• 0,75 (kuyrukta bekleyen 3,1 kullanıcıya karşılık gelir) kısa bir süre (en yoğun saatler) için geçerlidir, dolayısıyla $tr \geq 0.33 * tfm$ koşulu vardır.

Bir M/M/1 sistemi varsayıldığında, ortalama kuyruk uzunluğu (ortalama gecikmeli tren sayısı) şuna eşittir (3.5):

$$\text{Lq} = \frac{\rho}{(\rho - 1)} \tag{3.5}$$

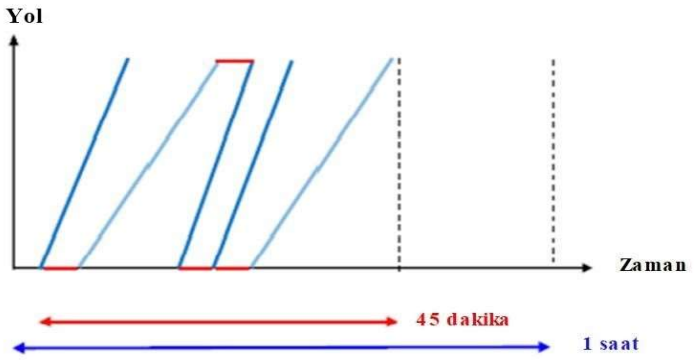
Ortalama bekleme süresi (tren başına ortalama gecikme) şu şekilde değerlendirilebilir (3.6):

$$\text{w} = \frac{\rho}{\mu - \lambda} = (\text{t}fm + \text{tr}) \frac{\rho 2}{(1 - \rho)} \tag{3.6}$$

Yukarıdaki yaklaşım basit bağıntılara dayanmaktadır ve genellikle mevcut olan tren sayısı, referans süresi vb. değerlere ek olarak büyük miktarda veri gerektirmemektedir.

3.2 CUI (Kapasite Kullanım İndeksi) Yöntemi

CUI yöntemi, İngiltere'de Network Rail tarafından en küçük aralığa dayalı kapasite analizi için kullanılır ve UIC 406 yöntemine oranla daha az ayrıntılıdır; ana fikir, bir tren grafiğini (çizelge/orer) trenlerin çalışmasına izin verecek şekilde sıkıştırmaktır (Rotoli ve Ricci, 2014). Analiz edilen hatlar için planlanan zaman çizelgeleri mevcut olduğunda, bu yaklaşım kapasite hesaplama sorununa etkili bir çözüm sağlamaktadır. Şekil 3.2 planlanan zaman çizelgesinin, trenler arasında en küçük izleme sürelerini bırakarak sıkıştırılmış halini göstermektedir.



Şekil 3.2 CUI'ye göre kapasite kullanım hesaplaması yöntemi (Rotoli vd., 2016)

Grafikteki mavi çizgiler trenlerin hareketini temsil etmektedir. Kırmızı çizgiler ise trenler arasında bırakılması gereken en küçük izleme süreleridir. Trenler, aralarında en küçük izleme aralığı kalacak şekilde sıkıştırılmıştır.

Kapasite kullanımı, sıkıştırılmış zaman çizelgesini çalıştırmak için geçen sürenin gerçek zaman çizelgesini çalıştırmak için geçen süreye oranı olarak değerlendirilmektedir (örneğin, Şekil 3.2, CUI = 45/60 = %75). Bu yöntem, zaman çizelgesinin sıkıştırılma şekline duyarlı bir kapasite tahmini sağlamaktadır. CUI ile tren başına Tıkanıklıkla İlişkili Tepkisel Gecikme (CRRD) arasında bir ilişki olduğu gösterilmiştir (Rotoli ve Ricci, 2014).

Gözlemlenen gerçek verilerle bir uyum testine dayalı olarak yöntem, CUI ve CRRD'yi birbiriyle ilişkili olarak üstel bir fonksiyon şeklinde tanımlamaktadır (Bağıntı 3.7):

$$D_{it} = A_i \times e^{(\beta * C_{it})} \tag{3.7}$$

Burada ;

D_{it} : t zaman periyodu içinde kesim i yolu üzerindeki tepkisel gecikme

A_i : Bir hat kesimine özgü sabit

β: Güzergâha özgü bir sabit

C_{it} : t zaman diliminde i kesimindeki kapasite kullanım indeksi

A_i ve β değerleri hesaplanmıştır ve İngiltere ağı için düzenli olarak güncellenmektedir. Belirli bir araştırmaya dayalı olarak diğer ağlara genelleştirilebilirler.

Yukarıda açıklanan UIC Kod 405R ve CUI adlı iki yönteme bakıldığında; kapasite kullanım göstergesi, art arda gelen iki istasyon arasındaki işgal süresine göre zaman çizelgesi sıkıştırılarak hesaplanmaktadır. UIC 406 yöntemi ise, hat boyunca her blok kesimi dikkate alınarak hesaplanır. Altyapı ve sinyalizasyon sistemleri hakkında daha detaylı bilgi gerektirir.

3.3 UIC Kod 406 Sıkıştırma Yöntemi

Nitelik ve nicelik açısından artan taleplerle birlikte artan trafik hacmi, mevcut demiryolu altyapı kapasitesi konusunda benzersiz, uyumlu ve genel olarak geçerli bir anlayışın geliştirilmesini gerektirmektedir.

UIC'nin 2004 yılında yayınlamış olduğu broşürde sunulan yöntem, Altyapı Yöneticilerinin (Infrastructure Managers, IM'ler), trafik kalitesi (pazar ihtiyaçları veya şirket gereksinimleri), zaman çizelgesi kalitesi (zaman çizelgesi derleyicilerinin gereksinimleri) veya altyapının etkin ve ekonomik kullanımı (IM gereksinimleri) gibi farklı kriterlere dayalı hatlar/düğümler veya koridorlar için uluslararası bir bakış açısıyla; ortak tanımları, kriterleri ve yöntemleri izleyerek kapasite hesaplamalarını gerçekleştirmesini sağlar.

Demiryolu altyapı kapasitesi, kullanım biçimine bağlı olarak değişir. Bu sebeple, önerilen yöntem, belirli bir altyapı üzerinde tren işletimi için önceden oluşturulmuş mevcut bir zaman çizelgesinin incelenmesine dayanmaktadır. Pazar ihtiyaçlarını yansıtan sefer tarifesi, tren güzergahlarının belirlenmiş bir zaman aralığında sıkıştırılması yöntemiyle bir hat kesimi içinde analiz edilecektir.

Sıkıştırma sırasında, dikkate alınan sadece tarifeli trenler değildir: tren çizgileriyle ilgili olmasa bile, diğer işgal süreleri de dahil edilmelidir. Sıkıştırma işleminin sonucu, sözde (pseudo) altyapı işgalidir.

Kapasite tüketimi, zaman çizelgesi stabilizasyonu ve gerektiğinde bakım gereklilikleri için tampon sürelerin eklendiği altyapı kullanımı ile ölçülecektir. Belirlenen altyapı işgali, tipik bir değerin üzerindeyse, altyapı sıkışık olarak değerlendirilecektir. Eğer bu tipik değere ulaşılamıyorsa, artan kapasite kullanılabilir hale gelir. Bu artık kapasitenin ek tren seferleri/hatları için nasıl kullanılabileceği, her bir durum için pazar ihtiyaçlarına göre belirlenecektir.

Sıkıştırma yönteminin farklı hatlara uygulanması, ek yollar eklemenin her zaman mümkün olduğunu, ancak zaman çizelgesine özgü kararlılık gereksinimleri nedeniyle belirli bir seviyede durması gerektiğini göstermiştir.

Altyapı işgal süresinin standart büyüklüğünü değerlendirmek zor bir görevdir. Bu büyüklük, gerekli tampon sürelerinin genel ve geçerli bir şekilde belirlenmesini gerektiren birçok faktöre bağlıdır. Böyle bir yöntem şimdiye kadar ortaya konulamamıştır. Ancak, sonuçların karşılaştırılabilmesi açısından, bu burada sunulan yaklaşım bir ilk olarak kabul edilebilir (UIC, 2013).

3.3.1 Kapasitenin Farklı Görünümleri

Gereksinimlerdeki farklılıklar nedeniyle kapasite, pazarın araştırmalarında, altyapı planlamasında, zaman çizelgesinde ve operasyonlarda (işletim süreçlerinde) farklı olarak ele alınır. Bunlar Tablo 3.1'de özetlenmiştir.

Pazar açısından kapasite talepleri tatmin edici zirve değerlere yönelikken, altyapı planlaması ortalama olarak altyapının karlı kullanımını öne çıkaran bir kapasite tanımına yöneliktir.

Zaman çizelgesi planlaması açısından bakıldığında kapasite konuları, belirli bir altyapı ile tren seferleri için mevcut talepleri bir araya getirir. Öte yandan, operasyonel açıdan bakıldığında, kapasitenin durumu her zaman değişkendir ve mevcut altyapıya, gecikmelere, sapmalara ve ek trenlerin sayısına bağlıdır.

Her biri kendi özel arka planlarına sahip olan bu farklı durumlar, tüm bu parametrelerin her bakış açısından farklı bir kapasite gereksinimi sonucuna yol açtığı gerçeğiyle örtüşmektedir.

Tablo 3.1 Farklı kapasite görünümleri (UIC, 2013)

Müşteri İhtiyacı (Pazar)	**Altyapı Planlaması**	**Zaman çizelgesi Planlaması**	**Operasyonlar**
Beklenen tren çizgi/sefer sayısı (zirve)	Beklenen tren çizgi/sefer sayısı (ortalama)	Talep edilen tren çizgi/sefer sayısı	Gerçek tren sayısı
Beklenen trafik ve hız karışımı (zirve)	Beklenen trafik ve hız karışımı (ortalama)	İstenilen trafik ve hız karışımı	Gerçek trafik ve hız karışımı
Beklenen altyapı kalitesi	Beklenen altyapı koşulları	Mevcut altyapı koşulları	Gerçek altyapı koşulları
Beklenen en küçük yolculuk süreleri	Beklenen aksamalar ve bakım için ek süre	Aksamalar ve bakım için gereken ek süre	Operasyonel aksamalardan ve yol çalışmalarından meydana gelen gecikmeler
		İstasyonlardaki bağlantı hizmetleri	Kaçırılan bağlantıların neden olduğu gecikmeler

3.3.2 Kapasite Tüketiminin Hesaplanması

Yaklaşım

Kapasite incelemesi için gerekli olan temel koşul, belirli bir altyapı üzerinde tren işletimi için önceden oluşturulmuş mevcut zaman çizelgesi (gerçek bir operasyonel çalışma) olmasıdır. Pazar ihtiyaçlarını ifade eden bu zaman çizelgesi, kapasite

tüketimi açısından analiz edilmelidir. Yalnızca tarifeli trenlerin ve/veya çalışma olasılığı yüksek olan trenlerin analize dahil edilmesi gerekir.

Kapasite tüketimi, tarifeli tren güzergâhlarının önceden tanımlanmış zaman çizelgesindeki bir hat kesimi içinde sıkıştırılması yoluyla analiz edilecektir. Sıkıştırmanın komşu hat kesimleri üzerindeki etkileri göz ardı edilir. Bu durum kabul edilebilir çünkü analiz, hattın belirlenen sınırları içerisinde gerçekleştirilmelidir ve bu analizden komşu hat kesimlerindeki zaman çizelgesi fizibilitesine dair herhangi bir sonuç çıkarılamaz.

Kapasite incelemesi sonucunda bir miktar kapasite boşluğu olduğu ortaya çıkarsa, bu kullanılmayan kapasite ek tren çizgileri atanarak doldurulmak istenebilir.

Bu, ek tren yollarının türü ve konumu ile ilgili durum, olası pazar ihtiyaçlarına bağlıdır. Kalan kapasitenin varlığı, otomatik olarak bir zaman çizelgesine ek tren çizgileri ekleme olasılığı anlamına gelmez.

Uygun Alanlar

Kapasite tüketiminin hesaplanması için sıkıştırma yöntemi, tek bir hat kesiminde uygulanmalıdır. Bir hat veya tüm güzergâhın kapasite ve darboğazlarını değerlendirmek amacıyla, her bir hat kesiminin kapasite tüketimi hesaplanacaktır.

Bir hat kesimindeki en yüksek kapasite tüketimi değeri, tüm hat veya güzergâh boyunca meydana gelen kapasite tüketimini belirleyecektir. Bir koridor boyunca kapasiteyi değerlendirmek için, koridor boyunca olası her güzergâh için bir analiz yapılacaktır.

Uygun Zaman Aralıkları

Günün saatine, hafta içi günlere ve mevsimlere göre kapasite tüketimi değişiklik gösterir. Sıkıştırmanın temelinde, en az iki saatlik bir yoğun zaman dilimi boyunca temsili bir gün bulunur (örneğin; perşembe). Burada dikkate alınması gereken faktörler:

- Yıllık zaman çizelgesinin bir parçası olan ve kullanıcılar tarafından talep edilen tüm yollar
- Müşteri talebi olmadan Altyapı Yöneticisi (IM) tarafından önceden planlanmış tüm güzergahlar (örneğin; Yük Otoyolları)

- Düğüm noktalarındaki manevra hareketleri ve kuyruklanma hatları
- Vagonların yol işgali (Araçların, ticari olarak ihtiyaç duyulandan daha uzun süre yolda kalma durumu)

Genel olarak zaman pencereleri, analizin amacına göre belirlenir. Tavsiye edilen zaman aralıkları:

- Yoğun saatler (en az bir saat)
- Günlük toplam 24 saat (hafta içi temsili bir günün belirlenmesi). Ancak bakım çalışmaları gibi nedenlerle tam 24 saatin hiçbir zaman kullanılamayacağı da unutulmamalıdır.

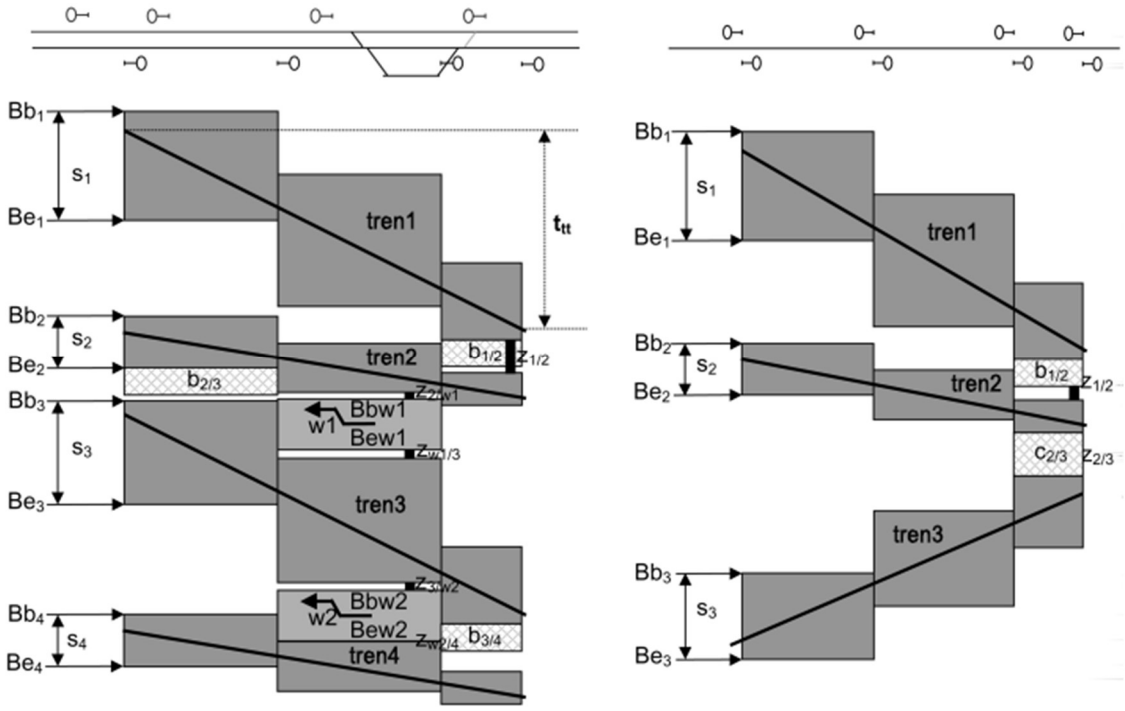
Sıkıştırma

Tek hatlı demiryollarında hat güzergâhlarının özellikleri ve altyapı kullanım süresinin ölçüleceği blok kesiminin sınırları ihlal edilmeden alanın ve zaman aralıklarının sıkıştırılması işlemi yapılır.

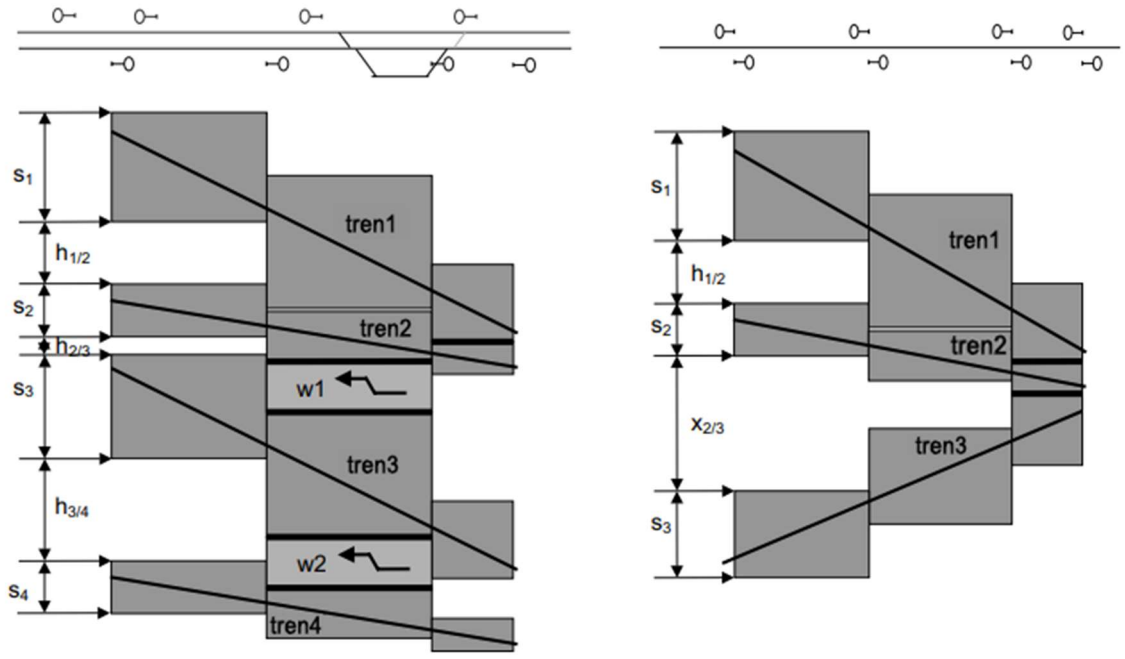
Tek hatlı demiryollarında ölçüm noktaları geçiş istasyonlarına kurulmalıdır. Sıkıştırma amacıyla tüm tren çizgileri, herhangi bir tampon süre kullanmadan zaman çizelgesi sırasına göre en küçük izleme süreleri dikkate alınarak sıkıştırılır. Bu sıkıştırma; uygun araçlar ile grafik analizi yapılarak veya analitik hesaplamayla gerçekleştirilir.

Sıkıştırma işlemi sırasında tarifedeki seyir, verilen sollamalar, geçişler veya demiryolu işletmeleri tarafından talep edilen durma süreleri değiştirilemez.

Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'te aynı yönlü ve zıt yönlü trenler için sıkıştırılma işlemi sonrasında zaman paylaşımının nasıl gerçekleştiği gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Bir zaman çizelgesi içindeki zaman paylaşımları (UIC, 2013)



Şekil 3.4 Sıkıştırmadan sonraki zaman paylaşımları (UIC, 2013)

Burada;

w_1, w_2 beyaz bloklar veya dolaylı altyapı kullanım süreleridir.

$h_{1/2}$, $h_{2/3}$, $h_{3/4}$ heterojenlik süreleridir.

s, her tren çizgisi için hat kesiminin kullanım süresidir.

B_b, işgal başlangıcıdır.

B_e, işgal sonudur.

Yolculuk Süreleri

Tipik Yolculuk Süresi

Tipik yolculuk süresi aşağıdakilerden oluşacaktır:

• Hat ve vagon özelliklerine göre hesaplanan, ek zamanların dahil edilmediği temel bir süre,

• Güzergâhın türüne (yolcu veya yük trenleri için) bağlı olarak atanan ve tren yolculuğu sırasındaki daha küçük ölçekli düzensizlikleri (daha küçük ölçekli gecikmeler, durma sürelerinin aşılması, vb.) telafi etmek için kullanılan bir süredir.

Bu ek süreler, bakım çalışmalarından kaynaklanan normal hız düşüşlerini karşılamak amacıyla da kullanılmaktadır. Bu ek sürelerin miktarı, yolculuk süresinin yaklaşık %5'ini temsil etmektedir (UIC, 2013).

Tarife Yolculuk Süresi

Tarife yolculuk süresi aşağıdakilerin toplamı olarak hesaplanır:

• Tipik yolculuk süresi,

• Piyasa taleplerinden kaynaklanan ek süreler (örneğin, gece trenlerinin uzayan seyahat süreleri),

• Zaman çizelgesindeki inşaat kısıtlamalarından kaynaklanan ek süreler.

Blok Kesiminin Kullanım Süresi (İşgal Süresi)

Sıkıştırmaya dayalı yöntem, tüm hat kesiminde veya hat kesiminin bir kısmında yalnızca tarifeli tren çizgilerini kapsamaz. Tren çizgileriyle ilgili olmasa bile işgal süreleri dahil edilmelidir. İşgal süresine dahil olan bu sürelere dolaylı işgal süreleri denir.

Dolaylı işgal süreleri, düğümdeki bir hattın işgal edildiği ve tren yollarının bu sebeble kullanılamadığı zamanlardır. Bu dolaylı işgal süreleri tren tarifesine bağlı

(ilave vagonların sabitlenmesi, lokomotif değişimleri vb.) veya tren tarifesi ile bağlantısız (diğer hat kesimlerinden tren geçişi vb.) olabilir.

Tampon Süre

Tampon süreleri, sinyal sistemlerine bağlı olarak ortaya çıkan trenler arası en küçük süreye ek olarak tren çizgilerinin arasına konulan sürelerdir. Gecikmelerin bir trenden diğerine aktarılmasını azaltmaya yardımcı olurlar.

Geçiş Tampon Süresi

Tek hatlı yollarda, alternatif yönlerde çalışan iki tren arasına yerleştirilen tampon süreleri geçiş tampon süresi olarak adlandırılırlar.

Heterojenlik Süresi

Demiryollarında heterojenlik kavramı, demiryolu ağı, ekipmanları veya işletme yönetimi açısından farklılık gösteren veya çeşitlilik arz eden özellikleri ifade eder. Bu farklılıklar, demiryolu kesiminin farklı bileşenlerinde veya bileşenler arasında ortaya çıkabilir. Bu farklılıklar sebebiyle trenler arasında oluşacak süreye heterojenlik süresi denebilir.

Geçiş Süresi

Geçiş süresi; biri bir yönde, ikincisi diğer yönde giden iki tren çizgisi arasındaki süredir.

3.4 Streel Bağıntısı (Schwanhäußer Yöntemi)

Yeterli bir hizmet seviyesi (kalitesi) elde etmek için ortalama tampon süreyi tp hesaplamak için Bağıntı 3.8 kullanılabilir.

$$tp = \frac{z * (1 - \rho)}{\rho} = \frac{A' * (1 - \rho)}{N * \rho} \tag{3.8}$$

Burada:

ρ : UIC 406'ya göre altyapı işgali için önerilen değer (oran)

z: Ortalama en küçük izleme süresi

A': En küçük altyapı işgali (sıkıştırılmış toplam işgal süresi)

N: İşletilen tren sayısı

Yöntem hem girişteki gecikmelerinin hem de birincil gecikmelerin (hat kesiminin içinde üretilen) ikincil gecikmelere neden olduğunu göz önünde bulundurmaktadır. İkincil gecikmeler, bir trenden diğerine aktarılan gecikmelerdir. Schwanhäußer'e göre, hat kesimlerindeki ortalama ikincil gecikmeler (planlanmamış bekleme süreleri) aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilmektedir (Bağıntı 3.9):

$$ET_W = \left(p_{ve} - \frac{p_{ve}^2}{2}\right) \frac{\underline{t}_{ve}^2}{\underline{t}_p + \underline{t}_{ve}\left(1 - e^{-\underline{z}/\underline{t}_{ve}}\right)} \times$$

$$\left(p_g \left(1 - e^{-z_g/\underline{t}_{ve}}\right)^2 + (1 - p_g)\frac{z_v}{\underline{t}_{ve}}\left(1 - e^{-2z_v/\underline{t}_{ve}}\right) + \frac{\underline{z}}{\underline{t}_p}\left(1 - e^{-\underline{z}/\underline{t}_{ve}}\right)^2\right) \quad (3.9)$$

Burada;

$\underline{t}_p$: Ortalama tampon süresi

$\underline{z}$: Ortalama en küçük izleme süresi

z_g: Aynı ardışık sıralı trenler için belirleyici ortalama en küçük izleme süresi

$\underline{z}_v$: Farklı ardışık sıralı trenler için belirleyici ortalama en küçük izleme süresi

$\underline{t}_{ve}$: Girişteki ortalama gecikme

p_{ve}: Girişteki gecikme olasılığı

p_g: Aynı ardışık sıralı trenlerin art arda meydana gelme olasılığı

Tatmin edici bir işletim kalitesine ulaşmak için ortalama tampon süre, planlanmamış bekleme süresinin kabul edilebilir bir değeri varsayılarak tanımlanabilmektedir. Bağıntı (3.9) ortalama gecikme süresi ve seyir başlangıcındaki gecikme olasılığının p_{ve} tanımını (ölçümler veya varsayımlar yoluyla) gerektirmektedir.

3.5 Endonezya Yöntemi

Endonezya hükümeti, demiryolu operasyonlarının performansını iyileştirmek için Surabaya – Madiun rotasında çift hatlı bir demiryolu ağı inşa etmek istemiştir. Buna göre, bu rotada çift hat inşa edildikten sonra, maliyeti etkin bir şekilde kontrol edebilmek için mevcut demiryolu kapasitesinin analiz edilmesi gerekmektedir.

Günümüzde Endonezya, Endonezya yöntemini bir kapasite analiz yöntemi olarak kullanmakta ve bu yöntem sadece sabit blok kullanarak demiryolu kapasite analizi sağlamaktadır. Öte yandan, kullanılan analiz içerisinde UIC yöntemi gibi başka bir yöntemin de farklı değişkenleri vardır. Bu nedenle, bu çalışmada, demiryolu kapasite analizi Endonezya ve UIC kod 405 olmak üzere iki analitik yöntem kullanılmaktadır. Her iki yöntemin analiz sonucu, çift hatlı inşaat nedeniyle demiryolu kapasitesinde bir iyileşme olduğunu göstermektedir.

Endonezya Yöntemi kapasite hesaplamasında girdi olarak günlük toplam süre (1440 dakika), aralık ve çarpan faktörü olan 3 değişkeni kullanmaktadır. Demiryolu kapasite analizinde kullanılan diğer bir yöntem olan UIC Code 405 yöntemi ise, farklı değişkenlere sahip bir bağıntı sunmaktadır. UIC yönteminin kapasite hesabında girdi olarak referans süre, ortalama en küçük aralık, ara blok sayısı ve buna bağlı ek süre ile kullanımına göre farklılık gösteren bakım nedeniyle ek süre olmak üzere 5 değişken kullanmaktadır.

Demiryolu kapasite analizi, demiryolu kapasitesini daha etkin bir şekilde yönetebilmek için uygun maliyetli bir çözüm sunmaktadır. Bu analizin amacı, mevcut işletme koşullarını dahil ederek belirli altyapı ve zaman aralıklarında çalıştırılacak en büyük tren sayısını belirlemektir (Abril vd., 2008).

Demiryolu ağındaki bağlantıyı artırmak, yolcu ve yük hareketliliğinin akışını dengelemekten geçer. Bu üç şekilde yapılabilir: Yeni altyapı inşa ederek, mevcut altyapıyı kullanarak ve eski altyapıyı yeniden etkinleştirerek (Ravitharan vd., 2017). Hattın tek hattan çift hatta iyileştirilmesi gibi yeni bir altyapı projesi de kapasite artırımına yönelik çözümlerden biridir.

Widyastuti ve Budhi (2020), tarafından yapılan bir çalışmada, iki yöntem de uygulanmış olup bu yöntemler arasındaki kapasite analizi farkları ortaya konulmuştur.

2019 yılında Jombang-Madiun kesiminin faaliyete geçtiği Surabaya-Madiun kesimi çift hat olarak inşa edilmiştir (Endonezya Demiryolları, 2019). Çift hat devreye alındığında, kapasitenin nasıl etkileneceğini anlamak için bu durumu analiz etmek önemlidir.

Surabaya-Madiun demiryolu kesimi tek hattan çift hat haline getirilmek istenen bir hattır. Hat, 152,828 km uzunluğundadır ve ilk istasyondan son istasyona kadar toplamda 23 istasyon içermektedir (Tren Sefer Uygulaması (GAPEKA), 2017). Ayrıntılı konumları Şekil 3.5'te verilmektedir.



Şekil 3.5 Çift hat uygulanacak hattın yeri

Bu çalışmada kullanılan veriler ilgili kurumlardan elde edilen ikincil verilerdir

Bu araştırmada kullanılan veri seti, GAPEKA (Grafik Perjalanan Kereta Api), demiryolu sistemi, sinyalizasyon ve blok sistemi, sinyal servis süresi, vagon verileri ve tren hızını içermektedir. Veri kümesinin ayrıntıları Tablo 3.2'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2 Veri türleri ve işlev

Veri Tipleri	İşlevi
GAPEKA (Grafik Perjalanan Kereta Api) (Tren Sefer Uygulaması)	Çalışan trenlerin sayısını, tren kalkışını ve bir istasyona varış saatini belirlemek.
Sinyalizasyon ve Blok Sistemi	Demiryolu kapasite verisi işlemede ihtiyaç duyulan sinyalizasyon ve blok sistemi ve ayrıca konum bilgisi, UIC yönteminde blok kesimi uzunluğunu belirleyecektir.
Demiryolu Sistemi	Tek veya çift hatlı demiryolu sistemi kapasite analizinde önemli bir değişkendir.
Sinyal Servis Süresi	Tek ve çift hat ilerleme analizleri için kullanılan sinyal hizmet süresi.
Demiryolu Taşıtı Verileri	Tren tipi gücünü, direncini ve ayrıca hızlanmasını ve yavaşlamasını belirleyecektir. UIC yönteminde bu veriler kullanılır.
Seyir Süresi	Seyir süresi, çalışma hızını belirlemede kullanılır.
Tren Hızı	Kullanılan tren hızı, en büyük hız ve işletim hızıdır. En büyük hız, mevcut tren sefer uygulamasından (GAPEKA) elde edilir. İşletim hızı ise trenlerin belli bir kesimden geçerken uygulanan ortalama hızıdır.

Supriadi, Endonezya demiryolları tarafından kullanılan bağıntının demiryolu sistemlerine (tek hat ve çift hat) göre farklılık gösterdiğini belirtmiştir (Supriadi, 2008). Bu bir analitik yöntemdir ve matematiksel bağıntılar kullanılarak uygulanır (Bağıntı 3.10-12).

$$K = \frac{1440}{H} * \eta \tag{3.10}$$

$$K = \frac{1440}{1/2\,H} * \eta \tag{3.11}$$

$$H = t_{A-B} + t_p + C \tag{3.12}$$

Burada:

K : Hesaplanan hat kesimindeki kapasite

1440 : 24 saat için toplam süre (24x60 dakika)

H : Ortalama izleme süresi

η : Tek hatlı demiryolu için (bakım süresi ve tren seyahati işletme modeli nedeniyle zaman faktörünün düşülmesinden sonra) çarpan faktörü %60, çift hatlı demiryolu için ise %70'tir.

t_p : Bir yol kesimindeki seyahat süresi

$t_{A\text{-}B}$: İstasyon giriş sinyalini görüş noktasından istasyona kadar gerçekleşen seyahat süresi

C : Sinyal ve blok ayarlama süresi

Bağıntı (3.10), tek hatlı bir sistem için geçerli olan hesaplamadır.

Bağıntı (3.11), çift hatlı sistemlerde kullanılır.

Bağıntı (3.12), takip aralığının hesaplanmasını temsil eder. Bu hesaplama, demiryolu kapasitesi analizine geçilmeden önce gerçekleştirilen önemli bir adımdır. Bağıntı (3.12), Endonezya yönteminin takip aralığını hesaplamak için temel bağıntıdır; ancak, Endonezya yöntemiyle yapılan takip aralığı hesaplaması daha basitleştirilmiştir. Bu, belirli birkaç değişkenin değeri ile hat ve blok sistemine dayalı olarak bölünmüştür.

Bu yöntem sadece sabit blok sistemi için bağıntılar sunar. Örneğin, Surabaya-Madiun demiryolu kesiminde kullanılan sinyalizasyon sistemi kapalı otomatik blok sistemine sahip bir elektrik sinyal sistemidir (Widyastuti ve Budhi, 2020).

UIC 405 Yöntemi

UIC, bir broşürde sıralı olarak istasyonlar arasındaki demiryolu kapasitesini hesaplamak için önerilen analitik bir yöntem olan 405 numaralı kodda bir yöntem sunmuştur. Bu yöntem, işletimdeki trenlerin oranını hesaplayarak takip aralığını hesaplamak için kullanılır (Rotoli vd., 2016).

$$P = \frac{\mathrm{T}}{\mathrm{t}fm+\mathrm{t}r+\mathrm{t}zu} \text{ (tren/referans periyodu)}$$

Burada:

P : Kullanılan T'ye göre günlük, saatlik vb. kapasite değeri

T : Referans süre (günlük kapasite için genellikle 24 saat veya 1440 dakika)

t_{fm} : Ortalama en küçük izleme süresi

t_r : Bakım nedeniyle hesaplanan ek süre

- t_r = 0,67 x tfm, kullanım 0,6 ise (sistem normal saatlerde çalıştığında)
- t_r = 0,33 x tfm, kullanım 0,75 ise (sistem yoğun saatlerde çalıştığında)

t_{zu} : Hattaki ara blokların sayısına dayalı ve tzu =0,25 x a bağıntısı kullanılarak hesaplanan ek süre

a : Ara blok kesimlerinin sayısı

Her hat için ortalama en küçük izleme süresi, aynı sınıftaki ardışık iki tren arasındaki ortalama en küçük süre kullanılarak hesaplanır (Rotoli, Malavasi ve Ricci, 2016).

$$tfm = \frac{\alpha L * tfmL + \alpha R * tfmR + \alpha M * tfmM}{\alpha L + \alpha R + \alpha M} \quad (3.13)$$

Bu prosedür üç farklı tren tipini dikkate alır:

L = Şehirlerarası tren

R = Yerel/bölgesel tren

M = Yük treni

Yukarıdaki bağıntıda yer alan α_L, α_R, α_M faktörleri, toplam trenlerin her bir sınıfının yüzdesini temsil eder.

Aynı şekilde, Endonezya Yöntemi gibi, bu yöntem de demiryolu kapasitesini analiz etmek için takip aralığına gereksinim duyar. Rotoli, Malavasi ve Ricci (2016), tek hatlı bir sistemde trenler arasında bıraklılacak takip aralığının; seyahat, hızlanma, yavaşlama ve sinyal hizmet süresi ile ilişkili olduğunu ifade etmiştir. Öte yandan, çift hatlı bir sistemde takip aralığının blok ve tren uzunluğu, hız ve sinyal hizmet süresi tarafından etkileneceğini vurgulamıştır.

Tek hatlı sistemde ilerleme

Verilen bağıntıları kullanarak sabit rejim hızında süre, hızlanma ve yavaşlama süresi ve seyahat süreleri belirlenmektedir:

$$t\,\mathrm{v}_{L,R,M} = \frac{lb}{\mathrm{V}_{L,R,M}} \tag{3.14}$$

$$t\,\mathrm{a}_{L,R,M} = \frac{\mathrm{V}_{L,R,M}}{\mathrm{a}} \tag{3.15}$$

$$t\,\mathrm{d}_{L,R,M} = \frac{\mathrm{V}_{L,R,M}}{\mathrm{d}} \tag{3.16}$$

Burada:

$t_{\mathrm{v}\,L,R,M}$ = Sabit rejim hızı ile seyahat süresi

$\mathrm{V}_{L,R,M}$ = Her tren sınıfının rejim hızı

lb = Demiryolu hattının (kesiminin) uzunluğu

a = Hızlanma ivmesi

d = Yavaşlama ivmesi

Seyahat süresi, demiryolu hatttının (kesiminin) uzunluğunun her bir sınıfının ortalama tren işletim hızına bölünmesinin sonucudur. Bu nedenle, en küçük ortalama süre Bağıntı 3.17 kullanılarak hesaplanabilir (Rotoli, Malavasi ve Ricci, 2016):

$$t_{fm\,L,R,M} = t_{\mathrm{v}\,L,R,M} + \mathrm{t}_a + \mathrm{t}_d + \mathrm{t}_p \tag{3.17}$$

Burada:

t_a ve t_d = Hızlanma ve yavaşlama süresi (hızlanma ve yavaşlama değeri/ivmesi a ve d ile gösterilir.)

t_p = Sinyal servis/açma süresi

$t_{fm\,L,R,M}$ = Toplam seyahat süresi

Bu durumda, tek hatta, iki istasyon arasındaki demiryolu kesiminin, yolun yönüne bağlı olarak bir seferde yalnızca bir tren tarafından işgal edilebileceği varsayılmaktadır.

Çift hatlı sistemde kapasite

Çift hat için ortalama en küçük süre, Bağıntı 3.18 kullanılarak hesaplanır (Rotoli, Malavasi ve Ricci, 2016):

$$t_{fm\,L,R,M} = \frac{(lb1 + lb2 + \mathrm{L})}{(\mathrm{V}_{L,R,M})} + ts \tag{3.18}$$

Burada:

lb = Blok kesiminin uzunluğu

L = Tren dizisinin uzunluğu

$V_{L,R,M}$ = Her sınıf için dikkate alınan çalışma hızı

t*s* = Sinyal servis/açma süresi

Bu durumda, çift hatlı kapasiteyi hesaplamak için, demiryolunun üç görünüşlü bir otomatik blok sinyalizasyon sistemi ile donatıldığı varsayılmaktadır.

Ardışık olarak iki tren arasındaki en küçük aralık; izleyen treni fren aralığı kadar güvenilir bir aralıkta tutmak için işlev gören birinci bloğun uzunluğunun, görüş ile ek aralığı güvenilir kılmak için işlev gören ikinci bloğun uzunluğuna eklenmesiyle bulunur (Rotoli, Malavasi ve Ricci, 2016).

Çalışmanın sonuçları

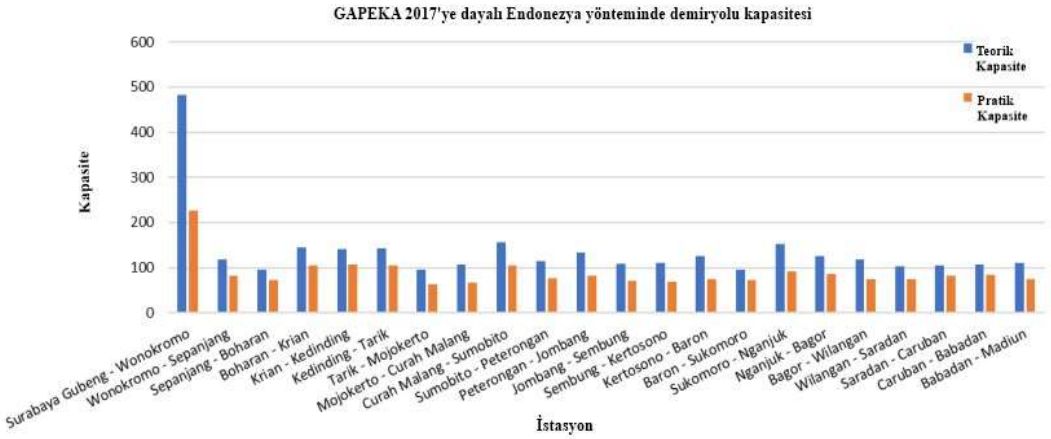
Bu çalışmada Surabaya-Madiun demiryolu kesiminde, Endonezya yöntemi ve UIC Kod 405 yönteminin demiryolu kapasite analizi uygulaması gerçekleştirilmiştir. Analiz mevcut koşullar altında iki varsayımla gerçekleştirilmiştir: GAPEKA 2017'yi yansıtan tam tek hat durumu ve GAPEKA 2019'u yansıtan çift hat durumu.

Surabaya-Madiun güzergâhında çalışan tren sayısı kesimlere göre farklıdır. Buna, Surabaya-Madiun güzergâhında yalnızca birkaç hatta çalışan yerel trenler neden olur.

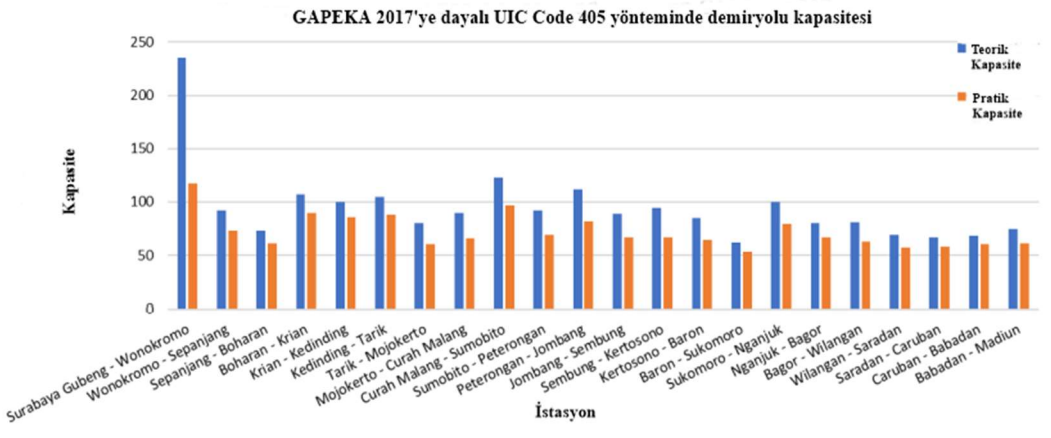
Bu çalışmada analiz edilen demiryolu kapasiteleri, teorik ve pratik kapasite olarak ele alınmıştır. Widyastuti ve Budhi'nin (2020) belirttiği gibi, Endonezya yöntemi ve UIC Code 405 yöntemi ile elde edilen demiryolu kapasite analizi sonuçları Şekil 3.6-Şekil 3.7'de gösterilmiştir.

Şekil 3.6 ve Şekil 3.7'de belirtildiği üzere, Endonezya ve UIC yönteminin en büyük teorik kapasitesi Surabaya Gubeng İstasyonu-Wonokromo İstasyonu kesiminde bulunmaktadır. GAPEKA 2017'ye dayalı ortalama teorik kapasite, Endonezya yöntemi için 136 tren/gün-yön ve UIC kodu 405 yöntemi için ise 95 tren/gün-yön olarak belirlenmiştir.

Pratik kapasiteye baktığımızda, Endonezya ve UIC yönteminin en büyük pratik kapasitesi yine Surabaya Gubeng İstasyonu-Wonokromo İstasyonu kesiminde bulunmaktadır. GAPEKA 2017'ye dayalı ortalama pratik kapasite, Endonezya yöntemi için 89 tren/gün-yön ve UIC kodu 405 yöntemi için 73 tren/gün-yön olarak belirlenmiştir (Widyastuti ve Budhi, 2020).



Şekil 3.6 GAPEKA 2017'ye dayalı Endonezya yönteminde demiryolu kapasitesi



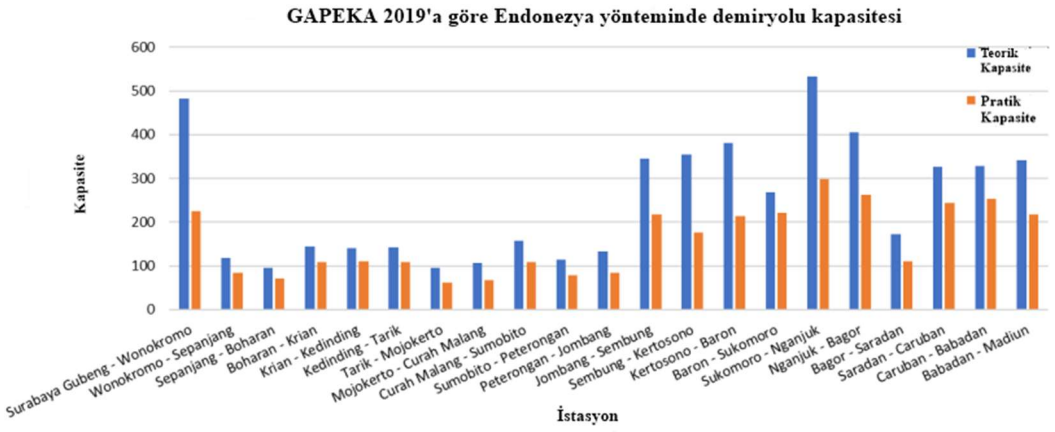
Şekil 3.7 GAPEKA 2017'ye dayalı UIC Code 405 yönteminde demiryolu kapasitesi

Mevcut demiryolu hattı çift hat haline getirildikten sonra; Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'a göre, Endonezya yönteminin ve UIC yönteminin en büyük teorik kapasitesi Sukomoro İstasyonu–Nganjuk İstasyonu güzergâhında yer almaktadır.

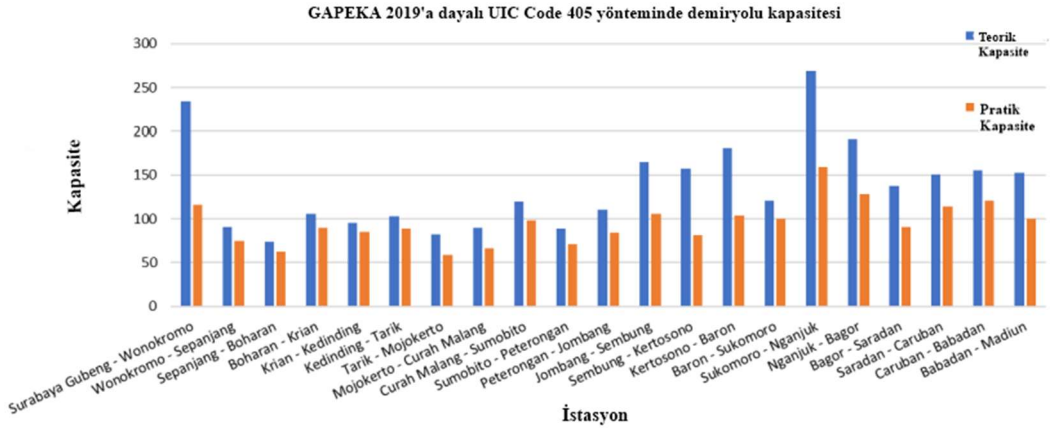
Hesaplanan ortalama teorik kapasite GAPEKA 2019 verilerinin sonuçlarına göre, Endonezya yöntemi için 247 tren/gün-yön ve UIC kodu 405 yöntemi için 137 tren/gün-yön çıkmıştır.

Sukomoro İstasyonu-Nganjuk İstasyonu kesiminde ise Endonezya yöntemi ve UIC yönteminin en büyük pratik kapasitesi gözlemlenmektedir. Hesaplanan ortalama pratik kapasiteye baktığımızda GAPEKA 2019 verilerine göre, Endonezya yöntemi için 159 tren/gün-yön ve UIC kodu 405 yöntemi için 96 tren/gün-yön değerleri ortaya çıkmaktadır.

Demiryolundaki kapasite artışı; çift hat işletimi, sinyalizasyon ve blok sisteminin değiştirilmesinden kaynaklanmaktadır (Widyastuti ve Budhi, 2020).



Şekil 3.8 GAPEKA 2019'a göre Endonezya yönteminde demiryolu kapasitesi



Şekil 3.9 GAPEKA 2019'a dayalı UIC Code 405 yönteminde demiryolu kapasitesi

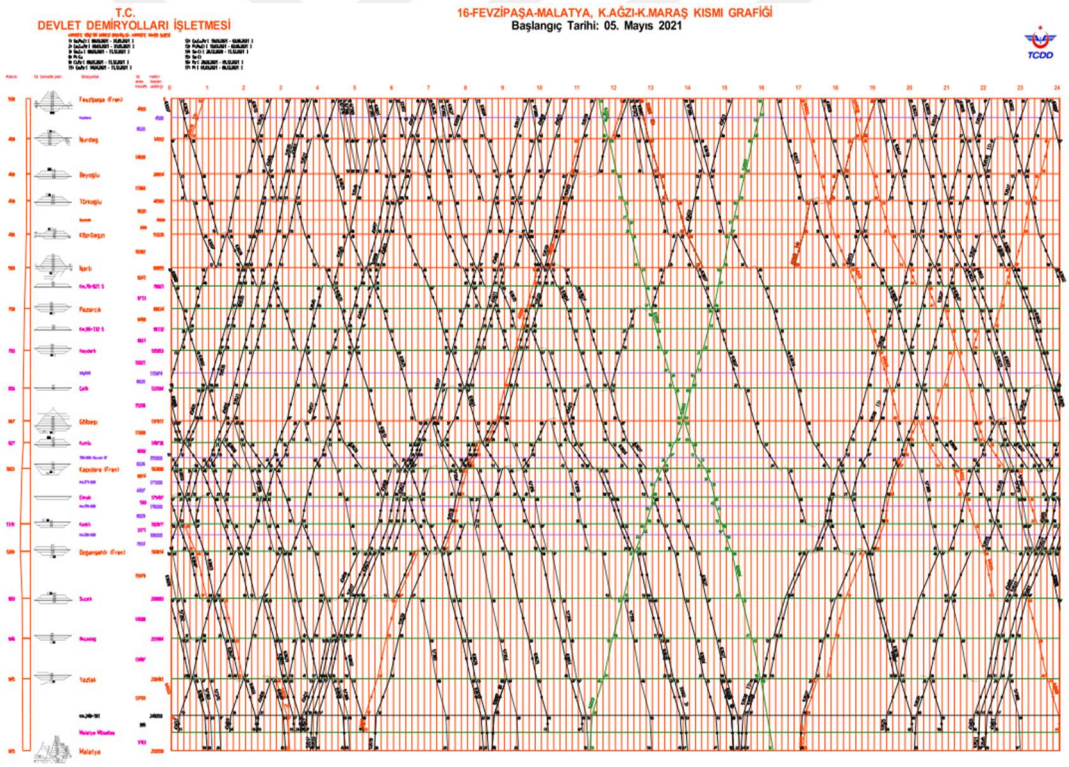
İncelenmiş bu çalışmadan da gördüğümüz üzere Endonezya yöntemi ve UIC yönteminin demiryolu kapasite değerleri farklı çıkmıştır. Bu durum her iki analiz için de Surabaya - Madiun güzergâhındaki çift hat inşaatının demiryolu kapasitesinde bir iyileşmeye sebep olduğunu göstermektedir. Kapasite değerlerinin farklı olması ise, yöntemlerin farklı yaklaşımından kaynaklanır.

Bu çalışmada kullanılan yöntem, UIC yönteminin mevcut koşullarla ilgili bir karşılaştırma yöntemi olabileceğini ve bu iki yöntemin sonuçlarını genellemek için daha fazla vaka çalışmasına ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

4
UIC 406 YÖNTEMİYLE MALATYA NARLI DEMİRYOLU HATTININ KAPASİTE ANALİZİ

TCDD'nin 5. Bölgesi'nde bulunan Malatya-Narlı hattı iki yönde işletilen 215,320 km uzunluğunda tek hatlı bir demiryoludur. Hatta TCDD'nin Demiryolu Tren İşletmecilerine (DTİ) tahsis ettiği yük trenleri ve TCDD Taşımacılık A.Ş'nin yük trenleri çalışmaktadır. Yolcu treni olarak ise sadece Fırat Ekspresi işletilmektedir. Hatta %95 oranında yük treni çalışmaktadır. Hesaplarda, Malatya yönünde 23 ve Narlı yönünde 34 tren (hattın orer grafiğinden okunarak) kullanılmıştır.

Malatya-Narlı hattının bir yıllık planlanan orer grafiği Şekil 4.1'de verilmektedir.



Şekil 4.1 Malatya-Narlı hattı orer grafiği

Hesap Kesiminin Belirlenmesi

Tek hatlı demiryollarında kapasite hesabı belirlenen hesap kesimine göre yapılmaktadır. En yüksek kapasite kullanımına sahip hat kesimi, hattın kapasite

kullanımını belirlediğinden, bu değerin demiryolu hattı için de ilgili değer olduğu varsayılabilir (UIC, 2013).

TCDD'den alınan 2021 Mayıs ayında gerçekleşen tren hareketlerine ait zamanlar kullanılarak, ilk olarak trenlerin seyir süreleri toplamının en uzun olduğu kesim "hesap kesimi" olarak belirlenmiştir. Buna göre 14,172 km uzunluğundaki Kapıdere-Kumlu istasyon aralığı hesap kesimi olarak belirlenmiştir (Tablo 4.1).

Tablo 4.1 Malatya-Narlı hattı istasyonların her iki yöndeki seyir süreleri toplamları

İstasyonlar	**Seyir Süreleri (dak)**	**İstasyon Mesafeleri (km)**
Malatya-Malatya (Narlı BM)	431	4,203
Malatya (Narlı BM)-Yazlak	984	7,782
Yazlak-Akçadağ	803	13,382
Akçadağ-Suçatı	905	14,222
Suçatı-Doğanşehir	1120	14,952
Doğanşehir-Kadılı	886	10,990
Kadılı-Elmalı	204	7,498
Elmalı-Kapıdere	326	11,481
Kapıdere-Kumlu	**1175**	**14,172**
Kumlu- Gölbaşı	756	11,667
Gölbaşı-Çelik	666	15,445
Çelik-Haydarlı	824	16,672
Haydarlı-Aksu	504	9,828
Aksu-Pazarcık	430	9,575
Pazarcık-Dehliz	542	9,560
Dehliz-Narlı	469	7,567

En küçük izleme sürelerinin bulunması

Hat kapasitesi, hesap kesiminde işletilen trenlerden seçilen "model trenler" arasındaki en küçük izleme sürelerine göre hesaplanacaktır. Bu bölümde önce model trenler belirlenecek, ardından bunların arasındaki en küçük izleme süreleri hesaplanacaktır.

Tablo 4.2'de Malatya-Narlı güzergâhında işletilen trenlerden, seyir şartları bakımından birbirlerine benzeyenler gruplandırılarak gösterilmiştir.

Ortalama seyir süreleri dikkate alınarak seçilen model trenler de tabloda gösterilmiştir. Tablo 4.3'te seçilen model trenlerin seyir yönleri, hesap kesimindeki ortalama hızları ve uzunlukları listelenmiştir. Tren uzunlukları 400 m kabul edilmiştir.

Tablo 4.2 Fiili tren hareketlerine göre model trenlerin seçilmesi

					Model Tren		
Tren No	**Seyir Süreleri (dk)**	**Seyir Süreleri Toplamı (dk)**	**Tren Sayısı**	**Ortalama Seyir Süresi (dk)**	**NO**	**Seyir Süresi (dk)**	**Model Trenlerin Seyir Yönleri**
57354,57356,57360,57362, 57366,57368,57370,57358, 43403,53527,53529,53541, 43405,43409,43421,52003, 53545,54019	16,16,16,16,16,16, 16,17,17,17,17,17, 18,18,18,18,18,18	305	18	16,9	**43403**	**17**	Malatya-Narlı
43401,43417,43423,43433, 43435,44009,53517,53519, 53521,53525,53533,53535, 53539,53543,62004,64009	19,19,19,19,19,19, 19,19,19,19,19,19, 19,24,20,20	311	16	19,4	**53521**	**19**	Malatya-Narlı
33302,63601,63603,63604, 63607,63610,63619,63625, 63649,63665,64003,63623	27,27,27,27,27,27, 27,27,27,27,27,28	325	12	27,1	**63610**	**27**	Narlı-Malatya
13112,14038,63602,63605, 63608,63609,63627,63629, 63635,63647,63648	28,29,29,29,29,29, 29,29,29,29,29	318	11	28,9	**63602**	**29**	Narlı-Malatya

Tablo 4.3 Fiili sürelere göre model trenler

Model Tren No	**Ort. Hız (km/sa)**	**Uzunluğu (m)**	**Yönü**	**Kapıdere (km)**	**Kumlu (km)**
43403	50	400	Kapıdere→Kumlu	163,909	149,737
53521	45	400	Kapıdere→Kumlu	163,909	149,737
63610	31	400	Kumlu→Kapıdere	163,909	149,737
63602	29	400	Kumlu→Kapıdere	163,909	149,737

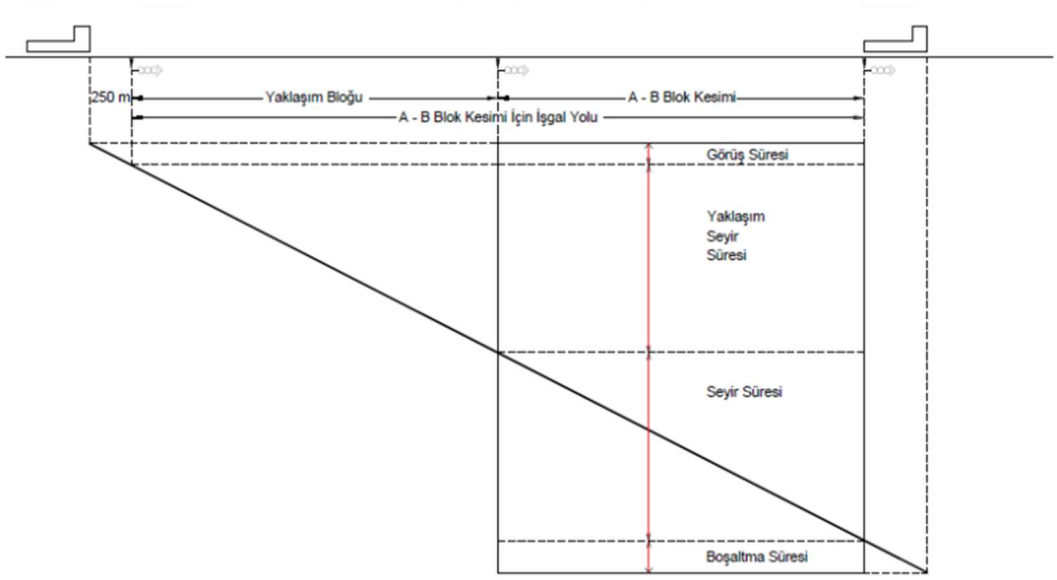
Model trenler belirlenirken bazı kurallar öngörülmüştür. Bunlar:

- Trenlerin seyir şekli ve tren uzunlukları birbirine benzer trenler seçilmiştir.
- Ortalama seyir süreleri birbirine göre %10'dan daha az farklı olan trenler aynı model tren grubuna dahil edilmiştir.

Seyir süreleri birbirine en yakın ve en çok tekrarlanan trenler ise model tren olarak seçilmiştir.

İşgal süreleri basamak analizi

Trafiğin idaresi, CTC (Centralized Traffic Control) sinyalizasyon sistemiyle sağlanan Malatya-Narlı güzergâh kesimindeki bütün sinyaller blok sinyal olarak çalışabilmektedir. Böylece, yoğun olarak işletilen hattaki yük trafiğinin akıcılığını sağlamak sistemin otomatik işletmeye alınmasıyla mümkün olabilmektedir. Buna göre, hesap kesimi olan Kapıdere-Kumlu istasyonları arasında işletilen model trenlerin blok giriş ve çıkış sinyallerindeki zamanlarına göre işgal süresi basamakları Şekil 4.2'deki gibi oluşturulmuştur.



Şekil 4.2 Otomatik blok sistemde bir trenin işgal yolu ve işgal süresi (Şahin, 1987)

Şekil 4.2'deki blok işgal süresi basamağında;

Görüş süresi: Yaklaşım bloğunun sinyalinin 250 metre gerisinden başlayıp bu sinyale kadar olan süredir.

Yaklaşım seyir süresi: İşgal merdiveni oluşturulacak trenin, işgal süresi basamağı oluşturulacak bloktan önceki bloktaki seyir süresi (Yaklaşım bloğu seyir süresi).

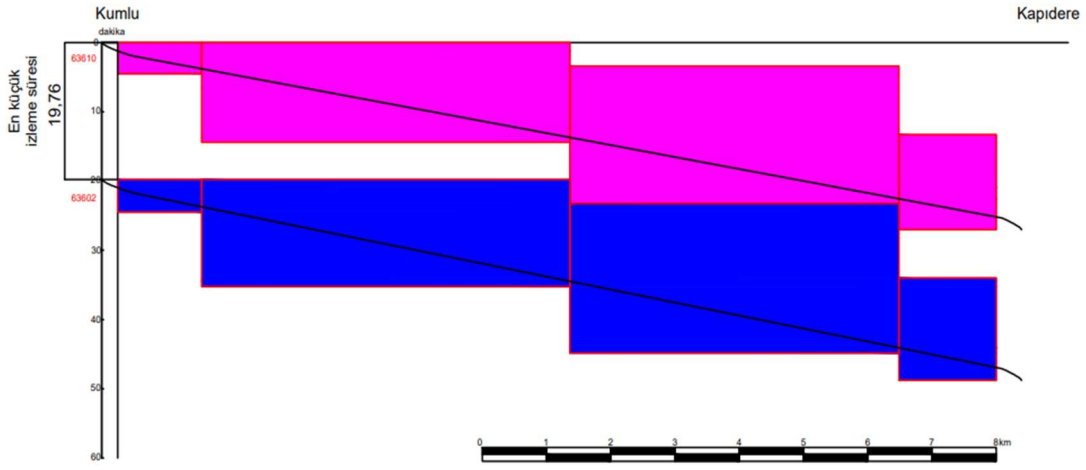
Seyir süresi: İşgal merdiveni oluşturulacak trenin, işgal süresi basamağı oluşturulacak bloktaki (A-B blok kesimi) seyir süresi.

Boşaltma süresi: İşgal merdiveni oluşturulacak trenin, uzunluğuna bağlı olarak, işgal süresi basamağı oluşturulacak bloğu terk etme süresi.

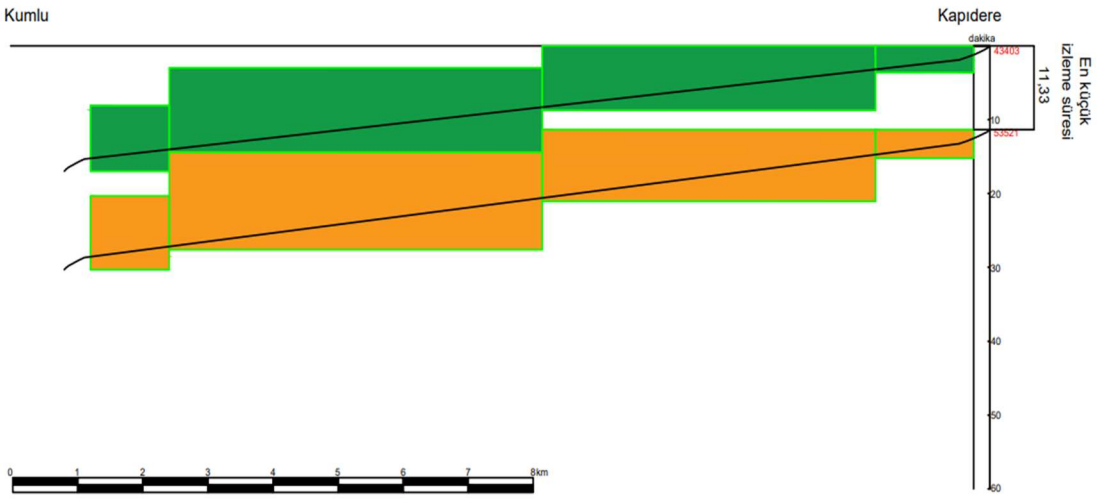
Böylece, model trenlerin tümü için işgal süresi basamaklarının alt ve üst sınır değerleri hesaplanarak, mevcut bütün izleme şekillerine ait işgal süresi basamakları, birbirine değinceye kadar kaydırılmıştır.

Her bir tren izleme durumu için en küçük izleme süreleri, önde giden trenin hattı ilk işgal süresi başlangıcından onu izleyen trenin hattı ilk işgal süresinin başlangıcına kadar olan zaman dilimi olarak alınmıştır.

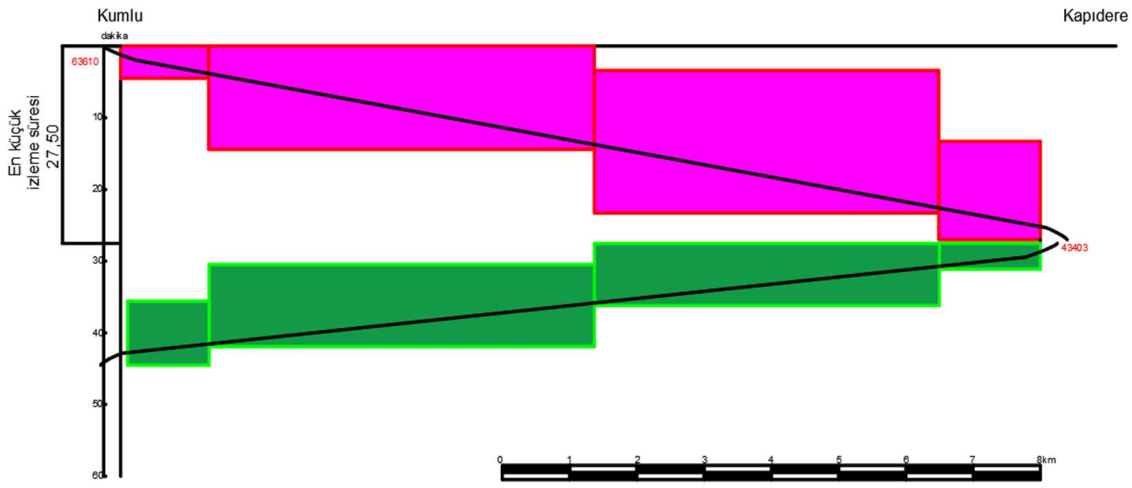
Malatya-Narlı güzergâhında (Kapıdere-Kumlu yönünde) hareket eden öncül ve artçıl trenler için işgal süresi basamaklarının ve en küçük izleme süresinin gösterimi Şekil 4.3, Şekil 4.4 ve Şekil 4.5'te örneklendirilmiştir.



Şekil 4.3 Öncül tren 63610 ile artçıl tren 63602 arasındaki izleme durumu



Şekil 4.4 Öncül tren 43403 ile artçıl tren 53521 arasındaki izleme durumu



Şekil 4.5 Öncül tren 63610 ile artçıl tren 43403 arasındaki izleme durumu

Ortalama En Küçük İzleme Süresi Hesabı

Tek hatlı demiryollarının kapasite hesabında ortalama en küçük izleme süresi $\bar{z}$, model trenler arasındaki tüm izleme durumlarını diğer bir ifadeyle tüm izleme kombinasyonlarını dikkate alarak orerden bağımsız bir yöntem olan ağırlıklı ortalama yöntemiyle hesaplanmıştır.

Hesap, model trenlerin sayıları ve tüm izleme durumları için geçerli en küçük izleme sürelerinden yararlanılarak aşağıdaki gibi yapılır (Tablo 4.4 ve Bağıntı 4.1).

En küçük izleme süreleri matrisinde öncül (i) ve artçıl (j) model tren sayıları her bir katar türü grubuna ait tren sayıları (ni) ve (nj) olarak yazılmıştır. Bu tren sayılarının

çarpımı (ağırlık katsayısı) matrisin (a) satırlarına işlenmiştir. En küçük izleme süreleri ise matrisin (b) satırlarına işlenmiştir (Tablo 4.4). Sonra tablodaki (a) ve (b) değerlerinin çarpımı (c) satırlarına yazılmıştır.

Sonuç olarak, trenler arasındaki ortalama en küçük izleme süresi Bağıntı 4.1'de 19,03 dakika/tren olarak hesaplanmıştır.

Tablo 4.4 En küçük izleme süreleri matrisi

				Artçıl Tren				
				63610 KU→KA	**63602 KU→KA**	**43403 KA→KU**	**53521 KA→KU**	
				12	**11**	**18**	**16**	
Öncül Tren	**63610 KU→KA**	**12**	a	144	132	216	192	684,00
			b	19,89	19,77	27,50	27,50	
			c	2864,16	2609,64	5940,00	5280,00	16693,80
	63602 KU→KA	**11**	a	132	121	198	176	627,00
			b	21,71	21,59	29,50	29,50	
			c	2865,72	2612,39	5841	5192	16511,11
	43403 KA→KU	**18**	a	216	198	324	288	1026,00
			b	17,50	17,50	11,48	11,33	
			c	3780	3465	3719,52	3263,04	14227,56
	53521 KA→KU	**16**	a	192	176	288	256	912,00
			b	19,50	19,50	13,35	13,19	
			c	3744,00	3432,00	3844,8	3376,64	14397,44

a= ni*nj

b= Zij

c= ni*nj*Zij

$$\bar{z} = \frac{\sum(c)}{\sum(a)} = \frac{\sum(ni*nj*Zij)}{\sum ni*nj} \ (dak/tren) \qquad (4.1)$$

Burada,

- $\bar{z}$: Ortalama en küçük izleme süresi (dakika/tren)
- ni : Öncül i model treninin sayısı
- nj : Artçıl j model treninin sayısı

- zij: Öncül i model treni ile artçıl j model treni arasındaki en küçük izleme süresi

$$\bar{z} = \frac{\sum(c)}{\sum(a)} = \frac{61829,91}{3249} = 19,03 \text{ dak/tren}$$

Kapasite Kullanımının Hesaplanması

Kapasite kullanım değerleri, işletmenin kabul edilebilir kalite sınır koşulları oluşturması ve kötüleşen işletim kalitesini arttırmak için tüm kesimde karar vermek amacıyla bir gösterge olarak kullanılabilir. Ayrıca, kapasite kullanım değerleri, mevcut kapasite kullanımını ve trenlerin öncelik sıralamasını yönetmek için bir temel oluşturmaktadır. Çoğu durumda, belirli bir altyapı üzerindeki olası tren çizgilerinin sayısı da bu durumu etkilemektedir. Kapasite kullanım değerinin %100'ün altında veya üzerinde olmasına bağlı olarak, bazı tren çizgilerinin (yani, hizmetlerinin) planlanan zaman çizelgesine eklenmesi veya çıkarılması gerekebilir (UIC, 2013).

UIC tarafından yayınlanan UIC Kod 406 belgesinde sunulan yöntemde; mevcut işletme koşullarında kapasitesi değerlendirilen hatta işletilen trenlerin işgal süreleri toplamının, dikkate alınan işletme süresine oranının, Tablo 4.5'te önerilen en büyük işgal oranları ile karşılaştırılması gerektiği belirtilmektedir. İşgal süresi oranın hesabı Bağıntı 4.2'de verilmektedir.

$$\text{İşgal süresi oranı (\%)} = \frac{\text{İşgal süresi}}{\text{İşletme süresi}} * 100 \qquad (4.2)$$

Kapıdere-Kumlu arasında (hesap kesimi), 24 saat (1440 dak) boyunca işletilen 57 adet trenin işgal süresi basamakları sıkıştırılmış ve en küçük işgal süresi 1033,78 dak. (≈17,23 saat) bulunmuştur (EK-A'da detaylı olarak gösterilmiştir). Tampon süre için kalan toplam süre 406,22 dak (≈ 6,77 saat) olarak hesaplanmıştır. Gecikme aktarımının kısmen veya tamamen önlenmesi amacıyla, trenler arasında bırakılabilecek ek süre 7,13 dakikadır. Buna göre işgal süresi oranı %72 olarak hesaplanmıştır (Bağıntı 4.2).

$$\text{İşgal süresi oranı (\%)} = \frac{1033,78}{1440} * 100 = \% 72$$

Tablo 4.5 Hatların verimli kullanım oranları (%) (UIC, 2013)

Hattın Türü	**Zirve boyunca**	**Gün boyunca**
Banliyö hattı	85	70
Yüksek hızlı tren hattı	75	60
Karma trafik hattı	75	60

Tablo 4.5'te hatların verimli kullanım oranları verilmiştir. Bu oranlar da dikkate alındığında şu şekilde bir çıkarım yapmam mümkün olacaktır. Hattın hesap kesiminin trenler tarafından işgal edilme oranı %72 seviyesindedir. Yani tampon süre kullanılmaksızın trenlerin yalnızca birbirlerini izledikleri en küçük izleme süreleri ile hesap yapıldığında, 1440 dakikalık (bir günlük) sürenin 1033,78 dakikası trenler tarafından kullanılmıştır. Geriye kalan 406,22 dakikalık süre çeşitli sebeplerden dolayı kaybedilmektedir. Bu nedenle, verim %72 seviyelerindedir.

Burada kaybedilen süre işletilen tren sayısına bölünerek trenlerin arasında bırakılacak tampon sürenin büyüklüğü tahmin edilmektedir.

Malatya - Narlı hattı yapısı gereği karma trafik hattı olarak adlandırılır. Bu durumda Tablo 4.5'te yer alan bilgilere göre hat için ideal verimlilik düzeyi gün boyunca %60 iken, zirve boyunca %75 olmaktadır.

Hat içerisinde kabul edilebilir bir hizmet kalitesine ulaşmak için işgal süresine eklenecek ek süre Bağıntı 4.3 ile hesaplanmaktadır (UIC, 2013).

$$\text{Ek süre oranı (\%)} = \left(\frac{100}{\text{İşgal Süresi Oranı}} - 1\right) * 100 \qquad (4.3)$$

Bağıntı 4.3 ile eklenebilecek ek süre oranı yaklaşık %39 olarak çıkmaktadır (UIC, 2013).

$$\text{Ek süre oranı (\%)} = \left(\frac{100}{72} - 1\right) * 100 \; = \; \%39$$

Kabul edilebilir bir hizmet kalitesine ulaşmak için işgal süresine eklenecek ek süre oranlarının tavsiye edilen değerleri ise aşağıdaki tabloda gösterilmektedir (Tablo 4.6).

Tablo 4.6 Hatların ek süre oranları (%) (UIC, 2013)

Hattın Türü	**Zirve boyunca**	**Gün boyunca**
Banliyö hattı	0,18	0,43
Yüksek hızlı tren hattı	0,33	0,67
Karma trafik hattı	0,33	0,67

Hatların ek süre oranları tablosunu dikkate aldığımızda karma trafik hat grubuna giren Malatya-Narlı hattı için gün boyu tavsiye edilen (en az) ek süre oranı %67 olarak görülmektedir (Tablo 4.6). Hesaplanan bu oranın (%39) önerilen referans orandan küçük çıktığı görülmektedir. Bu da, kalan ek sürenin beklenen hizmet kalitesi için yetersiz olduğu anlamına gelmektedir.

Gecikme aktarımının kısmen veya tamamen önlenmesi amacıyla, trenler arasında bırakılabilecek ek süre 7,13 dakika olarak hesaplanmıştı. UIC tarafından önerilen (en az) ek süre oranı %67 olarak dikkate alındığında, kullanılması gereken ek süre 12,75 dakika (=$0{,}67 * \bar{z}$=0,67*19,03) hesaplanır. Buna göre, önerilen hizmet kalitesini sağlamak için iki yönde işletilebilecek tren sayısı (hat kapasitesi) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P = \frac{T}{\bar{z} + ek\ süre} = \frac{1440}{19{,}03 + 12{,}75} = 45{,}31 \cong 45\ tren/gün$$

Hesaplanan hat kapasitesi 45 tren/gün, halen işletilen tren sayısı 57 tren/gün değerindedir. Buna göre, önerilen hizmet kalitesini sunabilmek için mevcut hat kapasitesi yetersizdir.

Kapasite kullanım değerleri, tanımlanan demiryolu hattı kesimlerinin altyapı ve işletim özelliklerini yansıtmaktadır. Demiryolu hattı boyunca en yüksek kapasite kullanım değerine sahip hat kesimi, bu demiryolu hattı için "darboğaz" kesimidir. Bu çalışmada Kapıdere - Kumlu istasyonları aralığı potansiyel darboğaz olarak belirlenmiştir.

Aynı zamanda kapasite kullanım değerleri, temel kapasite kavramını yansıtır ve bu nedenle darboğazları belirlemek için kullanılır. Buradan hareketle, kapasite

kullanımı (aynı zamanda doluluk oranı ile ek zaman oranı arasındaki tavsiye edilen oran) Bağıntı 4.4'e göre değerlendirilir (Černá vd., 2018).

$$\text{Kapasite Kullanım Oranı (\%)} = \frac{\text{İşgal Süresi} * (1 + \text{Ek süre oranı})}{\text{Hattın işletme süresi}} * 100 \qquad (4.4)$$

$$\text{Kapasite Kullanım Oranı (\%)} = \frac{1033{,}78 * (1 + 0{,}67)}{1440} * 100 \; = \; \% \, 120$$

Bu sonuç da hattın kapasitesinin üzerinde bir tren trafiği bulunduğunu göstermektedir.

Malatya-Narlı Demiryolunun Çift Hatlı Olması Durumunda Kapasite Hesabı

Malatya-Narlı demiryolunun mevcut tek hat ile işletilmesi durumunda kapasitesinin yetersiz kaldığı hesaplanmıştı. Bu kapasite sorununa karşı birçok iyileştirme yöntemi uygulanabilir. Bu iyileştirme yöntemlerinden sonuç kısmında bahsedilmiştir. Çift hat inşaatı da bu iyileştirme yöntemleri arasında önemli bir kapasite artışı sağlayabilecek seçeneklerdendir. Bu bölümde Malatya-Narlı demiryolu hattının çift hat olarak tasarlanması sonucunda ortaya çıkacak kapasite hesaplanmıştır.

Malatya-Narlı demiryolunun çift hat olması durumunda hesap kesimi olarak hattın tümü dikkate alınmalıdır. Çünkü trenler arası en küçük izleme süresini belirleyen kesim tek hatlı kapasite hesabında kabul ettiğimiz kesim olmayabilir. Bir başka deyişle; işgal basamaklarını birbirine yaklaştırdığımızdaki temas bizim hesap kesimi olarak kabul ettiğimiz yere denk gelmeyebilir. Fakat hesap kolaylığı bakımından çift hatlı işletim durumunda hesap kesimi, tek hatlı demiryolunda olduğu gibi Kapıdere-Kumlu kesimi olarak kabul edildi.

- **Ortalama en küçük izleme sürelerinin hesabı**

Hattın çift hat olarak işletilmesi durumunda hatlar birbirinden bağımsız olacağı için her bir hat için ayrı ayrı ortalama en küçük izleme süresi ($\bar{z}$) hesabı Tablo 4.7 ve Tablo 4.8'de ve izleyen satırlarda gösterilmiştir.

Tablo 4.7 Kapıdere-Kumlu yönünde en küçük izleme süreleri matrisi

				Artçıl Tren		
				43403 KA→KU	**53521 KA→KU**	
				18	**16**	
Öncül Tren	**43403 KA→KU**	**18**	a	324	288	612,00
			b	11,48	11,33	
			c	3719,52	3263,04	6982,56
	53521 KA→KU	**16**	a	288	256	544,00
			b	13,35	13,19	
			c	3844,8	3376,64	7221,44

$$\bar{z} = \frac{\sum(c)}{\sum(a)} = \frac{14204}{1156} = 12{,}29\ (dak/tren)$$

Tablo 4.8 Kumlu-Kapıdere yönünde en küçük izleme süreleri matrisi

				Artçıl Tren		
				63610 KU→KA	**63602 KU→KA**	
				12	**11**	
Öncül Tren	**63610 KU→KA**	**12**	a	144	132	276,00
			b	19,89	19,77	
			c	2864,16	2609,64	5473,80
	63602 KU→KA	**11**	a	132	121	253,00
			b	21,71	21,59	
			c	2865,72	2612,39	5478,11

$$\bar{z} = \frac{\sum(c)}{\sum(a)} = \frac{10951{,}91}{529} = 20{,}70\ (dak/tren)$$

Bağıntı 4.1 kullanılarak Kapıdere-Kumlu yönündeki ortalama en küçük izleme süresi 12,29 dak/tren bulunurken Kumlu-Kapıdere yönündeki ortalama en küçük izleme süresi 20,70 dak/tren bulunmaktadır. İki yön için ortalama en küçük izleme sürelerinin farklı çıkmasının sebebi iki yöndeki tren karışımının ve tren seyir sürelerinin farklı olmasıdır.

Kapasite Kullanımının Hesaplanması

- **Kapıdere-Kumlu yönü:**

Kapıdere-Kumlu yönünde, 24 saat (1440 dak) boyunca işletilen 34 adet trenin işgal süresi basamakları sıkıştırılmış ve toplam işgal süresi 404,43 dak. (≈ 6,74 saat) bulunmuştur (EK-B'de detaylı olarak gösterilmiştir). Tampon süre için kalan toplam süre 1035,57 dak (≈ 17,26 saat) olarak hesaplanmıştır. Gecikme aktarımının kısmen veya tamamen önlenmesi amacıyla, trenler arasında bırakılabilecek ek süre 30,46 dakikadır. Buna göre işgal süresi oranı %28 olarak hesaplanmıştır (Bağıntı 4.2).

$$\text{İşgal süresi oranı (\%)} = \frac{404{,}43}{1440} * 100 = \%28$$

Tablo 4.5'te hatların verimli kullanım oranları verilmişti. Bu oranlar da dikkate alındığında UIC tarafından karma hatlar için verilen referans oranın %60 olduğu görülmektedir. Malatya-Narlı hattının Kapıdere-Kumlu yönünde sınır oranları aşım problem yoktur. Hat içerisinde kabul edilebilir bir hizmet kalitesine ulaşmak için işgal süresine eklenecek ek süre Bağıntı 4.3 ile hesaplanmaktadır (UIC, 2013).

$$\text{Ek süre oranı (\%)} = \left(\frac{100}{28} - 1\right) * 100 = \%257$$

Hatların ek süre oranları tablosunu dikkate aldığımızda karma trafik hat grubuna giren Malatya-Narlı hattı için gün boyu tavsiye edilen ek süre oranı %67 olarak görülmektedir (Tablo 4.6).

Hesaplanan oranın (%257) önerilen referans orandan oldukça büyük çıktığı görülmektedir. Bu da, kalan ek sürenin beklenen hizmet kalitesi için yeterli olduğu anlamına gelmektedir.

Tüm bu bilgilerden hareketle, kapasite kullanımı, Bağıntı 4.4'e göre değerlendirilir (Černá vd., 2018).

$$\text{Kapasite Kullanım Oranı (\%)} = \frac{404{,}43 * (1+2{,}57)}{1440} * 100 = \%100$$

Gecikme aktarımının kısmen veya tamamen önlenmesi amacıyla, trenler arasında bırakılabilecek ek süre 30,46 dakika olarak hesaplanmıştı. UIC tarafından önerilen (en küçük) ek süre oranı %67 olarak dikkate alındığında, gerekli ek süre 8,23 dakika

(=0,67 $*$ $\bar{z}$=0,67*12,29) hesaplanır. Buna göre, önerilen hizmet kalitesini sağlamak için Kapıdere-Kumlu yönünde işletilebilecek tren sayısı (hat kapasitesi) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P = \frac{T}{\overline{z + ek\ süre}} = \frac{1440}{12{,}29 + 8{,}23} = 70{,}17 \cong 70\ tren/gün$$

Hesaplanan hat kapasitesi 70 tren/gün, halen bu yönde işletilen tren sayısı 34 tren/gün değerindedir. Buna göre, önerilen hizmet kalitesini sunabilmek için çift hat kapasitesi yeterlidir.

- **Kumlu-Kapıdere yönü:**

Kumlu-Kapıdere yönünde, 24 saat (1440 dak) boyunca işletilen 23 adet trenin işgal süresi basamakları sıkıştırılmış ve toplam işgal süresi 454,97 dak. (≈ 7,58 saat) bulunmuştur (EK-B'de detaylı olarak gösterilmiştir). Tampon süre için kalan toplam süre 985,03 dak (≈ 16,42 saat) olarak hesaplanmıştır. Gecikme aktarımının kısmen veya tamamen önlenmesi amacıyla, trenler arasında bırakılabilecek ek süre 42,83 dakikadır. Buna göre işgal süresi oranı %32 olarak hesaplanmıştır (Bağıntı 4.2).

$$\text{İşgal süresi oranı (\%)} = \frac{454{,}97}{1440} * 100 = \%32$$

Tablo 4.5'te hatların verimli kullanım oranları verilmişti. Bu oranlar da dikkate alındığında UIC tarafından karma hatlar için verilen referans oranın %60 olduğu görülmektedir. Malatya-Narlı hattının bu yönünde de sınır oranları aşım problem yoktur.

Hat içerisinde kabul edilebilir bir hizmet kalitesine ulaşmak için işgal süresine eklenecek ek süre ise yine Bağıntı 4.3 ile hesaplanmaktadır (UIC, 2013).

$$\text{Ek süre oranı (\%)} = \left(\frac{100}{32} - 1\right) * 100 = \%212$$

Hatların ek süre oranları tablosunu dikkate aldığımızda karma trafik hat grubuna giren Malatya-Narlı hattı için gün boyu tavsiye edilen ek süre oranı %67 olarak görülmektedir (Tablo 4.6).

Hesaplanan oranın (%212) önerilen referans orandan oldukça büyük çıktığı görülmektedir. Bu da, kalan ek sürenin beklenen hizmet kalitesi için bu yönde de yeterli olduğu anlamına gelmektedir.

Tüm bu bilgilerden hareketle, kapasite kullanımı, Bağıntı 4.4'e göre değerlendirilir (Černá vd., 2018).

$$\text{Kapasite Kullanım Oranı (\%)} = \frac{454{,}97 * (1+2{,}12)}{1440} * 100 = \%98$$

Gecikme aktarımının kısmen veya tamamen önlenmesi amacıyla, trenler arasında bırakılabilecek ek süre 42,83 dakika olarak hesaplanmıştı. UIC tarafından önerilen (en küçük) ek süre oranı %67 olarak dikkate alındığında, gerekli ek süre 13,87 dakika ($=0{,}67 * \bar{z}$=0,67*20,70) hesaplanır. Buna göre, önerilen hizmet kalitesini sağlamak için Kumlu-Kapıdere yönünde işletilebilecek tren sayısı (hat kapasitesi) aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$P = \frac{T}{z + ek\ süre} = \frac{1440}{20{,}70 + 13{,}87} = 41{,}65 \cong 42\ tren/gün$$

Hesaplanan hat kapasitesi 42 tren/gün, halen bu yönde işletilen tren sayısı 23 tren/gün değerindedir. Buna göre, önerilen hizmet kalitesini sunabilmek için çift hat kapasitesi yeterlidir.

Sonuç olarak; Malatya-Narlı demiryolu çift hat olarak tasarlandığında tek hatta işletilen toplam tren sayısı iki yöne dağılır. Her yöndeki tren kendi hattında bağımsız olarak işletilir. Bu da toplam işgal süresinin de azalmasına sebep olur. Buna bağlı olarak gecikmeleri önlemek amacıyla kullanılabilecek ek süreler de arttırılabilmektedir. Yani her yönde incelenen hat, kendi içerisinde trafik bakımından rahatlamıştır. Buna göre, toplam işgal süreleri ve önerilen ek süreler dikkate alındığında, çift hatlı işletimdeki kapasite tek hatta göre yaklaşık iki kat artmıştır.

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Kabul edilebilir hizmet kalitesi, %100'e kadar olan kapasite kullanım değerleri ile temsil edilmektedir. %100'ün altındaki kapasite kullanım değerleri ise, kullanılabilir kapasiteyi temsil etmektedir ve tanımlanan demiryolu hat kesimi boyunca ek tren çizgileri/ yörüngeleri için potansiyel kapasiteyi göstermektedir (UIC, 2013).

%100'ün üzerindeki kapasite kullanım değerleri ise bir darboğazı temsil etmektedir. Bu durum daha düşük hizmet kalitesi anlamına geldiğinden bazı iyileştirme önlemlerine başvurulmalıdır (UIC, 2013).

Tablo 4.5 ve 4.6'da karma trafik koşullarında 1440 dakika için kapasite kullanım oranları ve ek süreler için önerilen sınırlar gösterilmiştir. Kapasite kullanım değeri %100 sınırının altında ise kapasitenin bir kısmının hala kullanılmadığı söylenebilir. Aksi takdirde, tavsiye edilen sınır değerler aşılırsa (örneğin, Tablo 4.5 ve 4.6), zaman çizelgesinin, hizmet kalitesinin ve hattın planlanan fizibilitesinin tehlike altında olma riski yüksektir (Černá vd., 2018).

Bu çalışma kapsamında, hat kapasitesini değerlendirmek için sıkıştırılmış bir zaman çizelgeleme modeli kurulmuş fiili işletimin durumu dikkate alınmıştır. Malatya-Narlı şehirlerarası demiryolu hattında yapılan bu örnek çalışma, kapasiteyi etkileyen ana faktörlerin belirlenmesine yardımcı olmuştur.

Bu çalışmanın sonuçlarına göre, Malatya-Narlı demiryolu hattının işgal oranı %72 iken işgal süre oranına eklenecek ek süre oranı ise %39 seviyesinde çıkmaktadır. Bu oranın, tavsiye edilen referans oranından (Tablo 4.6) düşük çıkması ek sürenin yetersiz olduğunu göstermektedir.

Ayrıca kapasite kullanım oranı Bağıntı 4.4 ile hesaplanmış ve sonuç %100 seviyesinin üzerinde çıkmıştır (%120). Bu da bizlere hatta beklenen hizmet kalitesi için kapasitenin yetersiz olduğu ve gecikme aktarımlarını sınırlayabilecek yeterli düzeyde ek süre kullanılmasının mümkün olmadığı sonuçlarını göstermektedir.

Malatya-Narlı demiryolu hattında ortaya çıkan bu olumsuz sonuçlar bize mevcut hatta bazı mühendislik yaklaşımları ile iyileştirilmeler yapılması gerektiğini işaret etmektedir.

Malatya-Narlı demiryolunun çift hat olarak düzenlenmesi halinde Kapıdere-Kumlu yönünde hesaplanan hat kapasitesi 70 tren/gün iken işletilen tren sayısı 34 tren/gün, Kumlu-Kapıdere yönünde ise hesaplanan hat kapasitesi 42 tren/gün ve işletilen tren sayısı 23 tren/gün olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre, Malatya-Narlı demiryolu hattının, her iki yönde de kapasite problemi ortadan kalkmıştır.

Bu bölümde hatta kapasiteyi olumlu etkileyecek ve hizmet kalitesini beklenen düzeye çekecek bazı iyileştirme önerileri sıralayacağız.

- **Çizelgeye uygun bir işletim**

Çizelgeye uygun bir işletim, demiryolu hat kapasitesi kullanımını artırabilir ve genel sistem verimliliğini optimize edebilir. Bu planlı işletimin kapasiteye faydalarını şu şekilde sıralayabiliriz:

Çizelgeye uygun bir işletim ile, trenlerin ve hatların daha etkili bir şekilde planlanması sağlanır. Bu, hat kapasitesinin en büyük düzeyde kullanılmasını mümkün kılar.

Çizelge planlaması, trenlerin istasyonlarda daha hızlı duraklamasına ve kalkmasına yardımcı olabilir. Bu, hat kapasitesini artırarak tren trafiğinin daha hızlı ve düzenli bir şekilde yönetilmesini sağlar.

İyi bir çizelge, trenler arasındaki bekleme sürelerini en aza indirir. Bu, trenlerin hızlı ve sürekli bir şekilde hareket etmelerine olanak tanır, bu da hat kapasitesini artırır.

Çizelgeye uygun bir işletme, hat kapanmaları, bakım çalışmaları veya acil durumlar gibi beklenmeyen durumlar için yedekleme planları yapmayı kolaylaştırır.

İyi bir çizelge planlaması, tren hareketlerini tahmin edilebilir kılar. Bu, yolcuların seyahat planlarını daha iyi yapmalarını ve tren trafiğinin daha düzenli bir şekilde yönetilmesini sağlar.

Bu avantajlar, çizelgeye uygun bir işletmenin demiryolu hat kapasitesini artırmak ve toplam verimliliği optimize etmek için sağlayabileceği genel faydalardan sadece

birkaçıdır. Ancak, çizelge yapısı gereği karmaşık ve uygulanması zor olduğundan dikkatlice planlanmalıdır.

- **Çift hat inşaatı**

Çift hat inşaatı, demiryolu hatlarının kapasitesini artırmak, hızlı ve daha sık tren seferlerini mümkün kılmak için etkili bir stratejidir. Mevcut topografyanın ve ekonomik koşulların da imkan vermesiyle beraber uygulanabilecek bu iyileştirme yöntemi diğer yöntemlere göre daha başarılı sonuçlar verebilir. Çift hat inşaatının hat kapasitesini olumlu yönde etkileyecek bazı özellikleri şunlardır:

Çift hat inşaatı, mevcut tek hatın kapasitesini iki katına çıkararak daha fazla trenin aynı hatta seyahat etmesine olanak tanır. Bu, genel hat kapasitesini artırır ve daha fazla yolcu veya yük taşınmasını mümkün kılar.

Çift hat, tren seferlerinin sıklığını ve frekansını artırabilir. Trenlerin daha sık sefer düzenlemesi, yolcuların daha esnek bir şekilde seyahat etmelerine olanak tanır.

Çift hat inşaası ile trenlerin daha yüksek hızlarda seyahat etmeleri sağlanır. Bu, toplam seyahat sürelerini azaltır ve demiryolu ulaşımını daha cazip hale getirir.

Çift hat, tren trafiğini daha etkili bir şekilde yönetmeyi sağlar, bu da trenlerin daha güvenli ve zamanında seyahat etmelerine olanak tanır.

Yine çift hat, trenler arasındaki çatışmaları azaltarak daha etkili bir işletmeyi mümkün kılar. Bu, hat kullanımını optimize eder ve beklemeleri minimize eder.

- **Sinyalizasyon ve Otomasyon**

Gelişmiş sinyalizasyon sistemleri ve otomatik tren kontrolü, trenlerin güvenli bir şekilde daha yakın aralıklarla seyahat etmelerine olanak tanır. Sinyalizasyon ve otomasyon iyileştirmeleri, demiryolu hat kapasitesini artırmak için bir dizi avantaj sunabilir. Bunlardan bazıları şöyledir:

Gelişmiş sinyalizasyon ve otomasyon, trenlerin güvenli bir şekilde daha yakın aralıklarla seyahat etmelerine olanak tanır. Bu, tren sıklığını artırabilir ve hat kapasitesini optimize edebilir.

Otomatik tren kontrolü ve gelişmiş sinyalizasyon, trenlerin daha güvenli ve hızlı bir şekilde seyahat etmelerini sağlar. Bu, toplam seyahat sürelerini azaltır ve demiryolu taşımacılığını daha çekici kılar.

Gelişmiş sinyalizasyon, trenlerin istasyonlarda daha hızlı duraklamasına ve kalkmasına olanak tanır. Bu, toplam seyahat sürelerini azaltır ve daha verimli bir hat kullanımını mümkün kılar.

Otomasyon, tren trafiğini daha iyi planlamayı ve koordine etmeyi sağlar. Bu, operasyonel esnekliği artırır ve acil durum sırasında daha etkili bir şekilde tepki verilmesine olanak tanır. Aynı zamanda otomasyon, insan müdahalesini azaltarak işletme maliyetlerinde tasarruf sağlar. Otomatik tren kontrol sistemleri, personel maliyetlerini düşürebilir.

Otomatik tren kontrol sistemleri, tren hızlarını optimize ederek enerji verimliliğini artırabilir. Trenler arasındaki daha düzenli ve optimize edilmiş aralıklar, enerji tüketimini azaltabilir.

- **Elektrikifasyon ve Modernizasyon**

Elektrifikasyon, elektrikli trenlere geçişi mümkün kılar. Elektrikli trenler genellikle daha yüksek hızlara ulaşabilir ve daha hızlı duraklama ve kalkışlar gerçekleştirebilir. Bu da toplam seyahat sürelerini azaltır ve hat kapasitesini artırır.

Elektrifikasyon, genellikle daha güçlü ve kapasiteli trenlere olanak tanır. Bu da daha fazla yolcu veya yük taşıma kapasitesine sahip trenlerin kullanılmasını mümkün kılar.

Elektrifikasyon iyileştirmeleri ile, demiryolu hatlarının bakım maliyeti düşürülebilir. Elektrikli trenler, dizel trenlere göre daha az bakım gerektirir, bu da uzun vadede maliyet tasarrufu sağlar.

Aynı zamanda elektrifikasyon, dizel trenlere oranla daha çevre dostu bir seçenektir. Elektrikli trenlerin işletilmesi, karbon salımlarını azaltabilir ve çevresel sürdürülebilirliği artırabilir.

Modernizasyon iyileştirmeleriyle ise, istasyon tasarımını geliştirerek tren duraklama ve kalkış sürelerini optimize edilebilir. Bu, hat kapasitesini artırabilir ve yolcu akışını hızlandırabilir.

Bunun yanı sıra modernizasyon çalışmaları, hat güvenliğini artırabilir ve performansı optimize edebilir. Güncellenmiş sinyalizasyon sistemleri ve hat altyapısı, daha güvenli ve verimli tren işletmeyi mümkün kılar.

Elektirifikasyon ve modernizasyon iyileştirmelerinin avantajları, demiryolu hat kapasitesini iyileştirmek için önemlidir. Ancak, bu tür iyileştirmeler genellikle önemli yatırımları gerektirir ve dikkatlice planlanmalıdır.

- **Tren hızlarının artırılması**

Tren hızlarının artırılması, yolcuların ve yüklerin daha kısa sürelerde hedefe ulaşmasını sağlar. Daha hızlı trenler, aynı hat üzerinde daha fazla trenin hareket etmesine olanak tanır. Bu, hat kapasitesinin artırılmasına katkıda bulunur ve daha fazla yolcu veya yük taşıma kapasitesi sağlar.

Daha hızlı trenler, hat kullanımını optimize eder. Trenler arasındaki aralığı artırarak ve trenlerin hızını artırarak, hat üzerinde daha etkili bir şekilde tren trafiği yönetilebilir.

- **Blok uzunluklarının azaltılması**

Demiryolu hat kapasitesini artırmak için blok uuzunluklarının azaltılması, trenler arasındaki güvenli aralığı minimize etmeyi ifade eder. Bu strateji, trenlerin daha yakın aralıklarla birbirini takip etmesine ve hat kapasitesinin artmasına olanak tanır.

Hat blok aralığının azaltılması, trenlerin daha yakın aralıklarla seyahat etmelerine izin verir. Bu da hat üzerinde daha fazla trenin aynı anda hareket etmesini ve daha yüksek tren sıklığını mümkün kılar.

Ancak, hat blok aralıklarının azaltılması, aynı zamanda güvenlik açısından dikkatle ele alınmalıdır. Trenler arasındaki güvenli aralığın korunması ve güvenli bir işletme sağlanması önemlidir. Güvenlik standartlarına ve düzenlemelere uyum sağlanmalıdır ve mühendislik açısından kapsamlı bir değerlendirme yapılmalıdır.

- **Sayding alanlarının varlığı**

Sayding alanları, demiryolu hat kapasitesini iyileştirmek ve tren işletmeciliğini daha etkili hale getirmek için önemli bir rol oynar. Sayding alanları, ana hat

üzerinde trenlerin beklemesi, diğer trenlere yol vermesi veya depolanması için kullanılan ek hatlardır.

Aynı zamanda sayding alanları, çift hat inşaatını desteklemek ve demiryolu hattını genişletmek için kullanılabilir. Bu, hat kapasitesini artırarak trenler arasındaki aralıkları optimize edebilir.

Elbette bu sayding alanlarının demiryolu şebekesinin yapısına ve hat konumlandırmasına uygun bir şekilde planlanması gerekir. İnşa edilen sayding, trenlerin sorunsuz bir şekilde geçişine izin vermelidir.

KAYNAKÇA

Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M., Tormos, P., & Lova , A. (2008). An Assessment of Railway Capacity. Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review, 55(5), 774-806.

Burdett, R.L., Kozan, E. (2006). Techniques for Absolute Capacity Determination in Railways. Transp. Res. Part B Methodol. 40, 616–632.

Dicembre, A., Ricci, S. (2011). Railway Traffic on High Density Urban Corridors: Capacity, Signalling and Timetable. Journal of Rail Transport Planning & Management 1, 59–68.

Dingler, M.H., Lai,Y.-C., Barkan, C.P.L. (2009). Impact of Train Type Heterogeneity on Single-Track Railway Capacity. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 2117, Transportation Research Board of the National Academies, Washington.

Dingler, M.H., Lai, Y.-C., Barkan, C.P.L. (2014). Effect of Train-Type Heterogeneity on Single-Track Heavy Haul Railway Line Capacity. Proc. Inst. Mech. Eng. - Part F J. Rail Rapid Transit 228, 845–856.

Gibson, S., Cooper, G., Ball, B. (2002). Developments in Transport Policy: The Evolution of Capacity Charges on The UK Rail Network. J. Transport Econ. Pol. 36, 341–354.

Goverde, R.M.P., Corman, F., D'ariano, A. (2013). Railway Line Capacity Consumption of Different Railway Signalling Systems Under Scheduled and Disturbed Conditions. Journal of Rail Transport Planning & Management 3, 78–94.

Guo, B., Zhou, L., Yue, Y., Tang, J. (2016). A Study on the Practical Carrying Capacity of Large High-Speed Railway Stations Considering Train Set Utilization. Math. Probl Eng. 2, 1–11.

Jamili, A. (2018). Computation of Practical Capacity in Single-Track Railway Lines Based on Computing The Minimum Buffer Times. Journal of Rail Transport Planning & Management 8, 91–102.

Jensen, L.W. (2015). An Optimisation Framework for Determination of Capacity in Railway Networks.

Jensen, L.W., Landex, A., Nielsen, O.A., Kroon, L.G., Schmidt, M. (2017). Strategic Assessment of Capacity Consumption in Railway Networks: Framework and Model. Transport. Res. C Emerg. Technol. 74, 126–149.

Kaas, A. H. (1998). Methods to Calculate Capacity of Railways, PhD. Thesis at Department of Planning, Technical University of Denmark.

Khadem Sameni, M., Preston, J., Armstrong, J. (2010). Railway Capacity Challenge: Measuring and Managing in Britain. Joint Rail Conference 571–578.

Khadem Sameni, M. (2012). Railway Track Capacity: Measuring and Managing.

Khadem Sameni, M., Moradi, A. (2022). Railway Capacity: A Review of Analysis Methods. https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2022.100357.

Kılıç, O., Beni, H.E. (2018). Demiryollarında Kapasite Geliştirme. Demiryolu Mühendisliği Dergisi.

https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/508869.

Klabes, S. G. (2010). Algorithmic Railway Capacity Allocation in a Competitive European Railway Market. Doktora Tezi. RheinischWestf˙alischen Technischen Hochschule Aachen.

http://publications.rwthaachen.de/record/51543/files/Klabes_Sebastian.pdf

Kontaxi, E., Ricci, S. (2010). International Scientific Conference. Theoretical and Practical Issues in Transport.

Krueger, H. (1999). Parametric Modelling in Rail Capacity Planing. In: Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference, pp. 1194– 2000.

Lai, Y.-C., Barkan, C.P.L. (2009). Enhanced Parametric Railway Capacity Evaluation Tool. Transport. Res. Rec. 2117, 33–40.

Lai, Y.-C., Barkan, C.P.L. (2011). Comprehensive Decision Support Framework for Strategic Railway Capacity Planning. J. Transport. Eng. 137, 738–749.

Lai, Y.-C., Huang, Y.-A., Chu, H.-Y. (2014). Estimation of Rail Capacity Using Regression and Neural Network. Neural Comput. Appl. 25, 2067–2077.

Landex, A., Kaas, A.H. & Hansen, S. (2006). Railway Operation, Technical Report at Centre for Traffic and Transport, Technical University of Denmark.

Landex, A., Schittenhelm, B., Kaas, A.H., Schneider-Tilli, J. (2008). Capacity Measurement with the UIC 406 Capacity Method, p. 55.

Landex, A. (2009). Evaluation of Railway Networks with Single Track Operation Using the UIC 406 Capacity Method. Network. Spatial Econ. 9, 7–23.

Lusby, R., Larsen, J., & Ehrgott , M. (2009). Railway Track Allocation: Models and Methods. Springer, 843-883. doi:10.1007/s00291-009-0189-0.

Mussone, L., Calvo, R.W. (2013). An Analytical Approach to Calculate the Capacity of a Railway System. Eur. J. Oper. Res. 228, 11–23.

Navarro, L.M., Fernandez-Cardador, A., Cucala, A.P. (2018). Fuzzy Maximum Capacity and Occupancy Time Rate Measurements in Urban Railway Lines. European Transport Research Review 10, 1–14.

Pouryousef, H., Lautala, P. (2015). Hybrid Simulation Approach for Improving Railway Capacity and Train Schedules. Journal of Rail Transport Planning & Management 5, 211–224.

Pouryousef, H., Lautala, P., White, T. (2015). Railroad Capacity Tools and Methodologies in the US and Europe. Journal of Modern Transportation 23, 30–42.

Rais, N.M., Jaafar, H.S., Samsudin, M.R.H., Rahman, H.A., Towel, R.M., Burhanuddin, S.N.Z.A. (2020). Measuring Railway Track Capacity and Utilization for Keratabi Tanah Melayu Berhad (ktmb). Advances in Transportation and Logistics Research 3, 908–916.

Ravitharan, R., Labrooy, A., Widyastuti, H., Chiu, K.W. (2017). “Rail Infrastructure in Port City - Surabaya, Indonesia,” in Procedia Engineering, vol. 188, pp. 486–492, doi: 10.1016/j.proeng.2017.04.512.

Rotoli, F., Ricci, S. (2014). Methodological Review for Capacity and Punctuality Assessment Procedures. International Journal of Railway Research 1, 31–47.

Rotoli, F., Ricci, S., Cawood, E., & Malavasi, G. (2015). "Capacity Versus Punctuality Assessment Procedures and Accessibility Measures for Rail Networks," Ing. Ferrov., vol. 12, no. January 2016, pp. 1011–1040.

Rotoli, F., Cawood, E., & Soria, A. (2016). Capacity Assessment of Railway Infrastructure. JRC Science Hub.

Rotoli, F., Malavasi, G., Ricci, S. (2016). "Complex Railway Systems: Capacity and Utilisation of Interconnected Networks," Eur. Transp. Res. Rev., vol. 8, no. 4, doi: 10.1007/s12544- 016-0216-6.

Schlechte, T. (2011). Railway Track Allocation-Simulation and Optimization. Berlin: ZIB.

Schlechte, T. (2012). Railway Track Allocation. Berlin: ZIB.

Supriadi, U. (2008). Kapasitas Lintas dan Permasalahannya. Bandung.

Şahin, İ. (2015). Demiryolu Planlaması ve İşletimi. INS5505 Yüksek Lisans Ders Notları. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.

Şahin, İ. (1987). Bir Demiryolu Güzergâhının Hat Kapasitesinin Deterministik Yöntemle Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi. http://yordam.ktp.yildiz.edu.tr/tezpdf/0010307.pdf

UIC Leaflet 405-1. (1983). Method to be Used for the Determination of the Capacity of Lines, International Union of Railways.

UIC. (2004). UIC Code 406. Capacity Brochure. International Union of Railways.

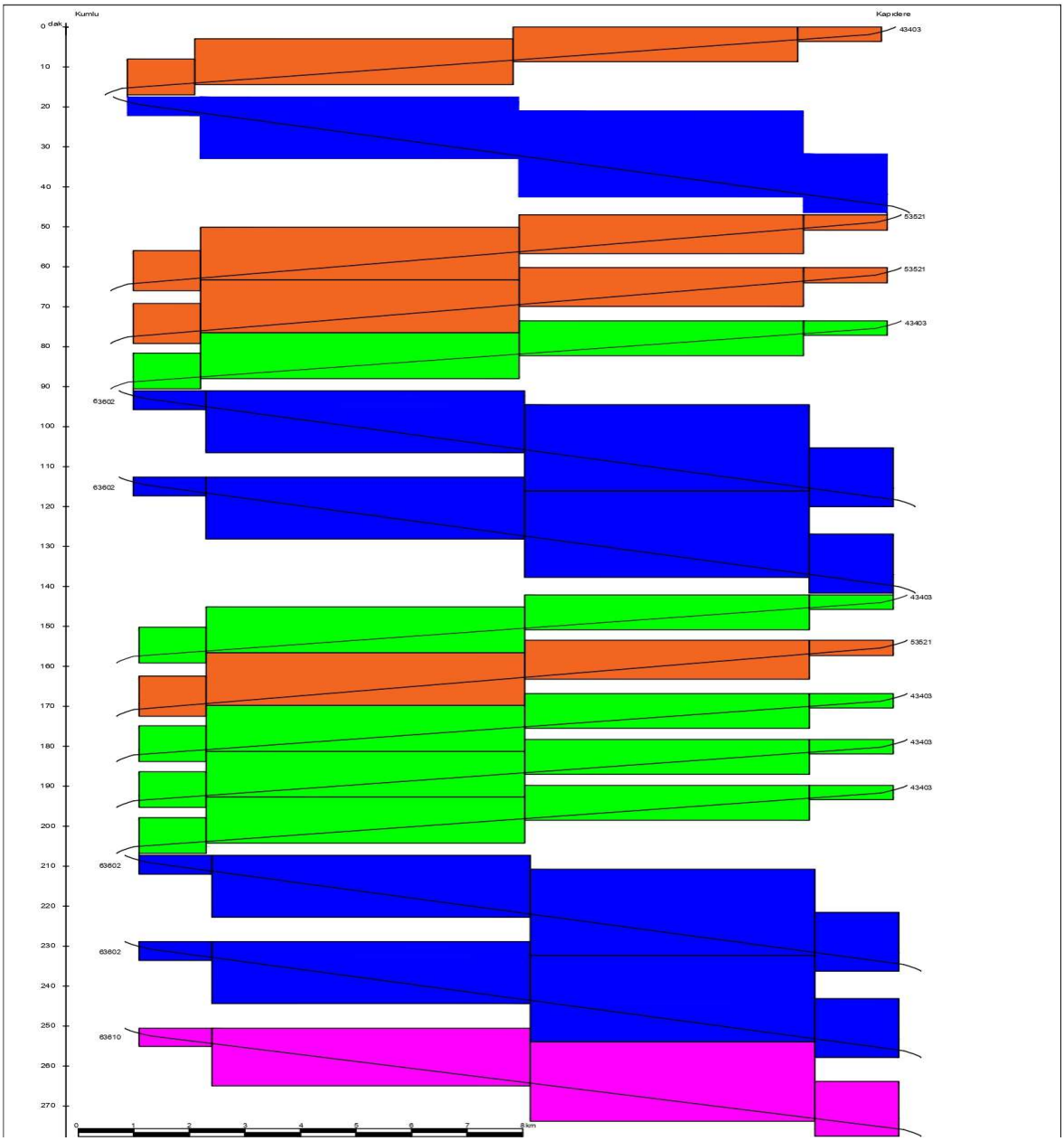
UIC. (2013). UIC Code 406. Capacity Brochure. International Union of Railways.

Widyastuti, H., Budhi, W.S. (2020). "Railway Capacity Analysis Using Indonesian Method and UIC Code 405 Method" 4th International Conference on Civil Engineering Research, doi:10.1088/1757-899X/930/1/012059.

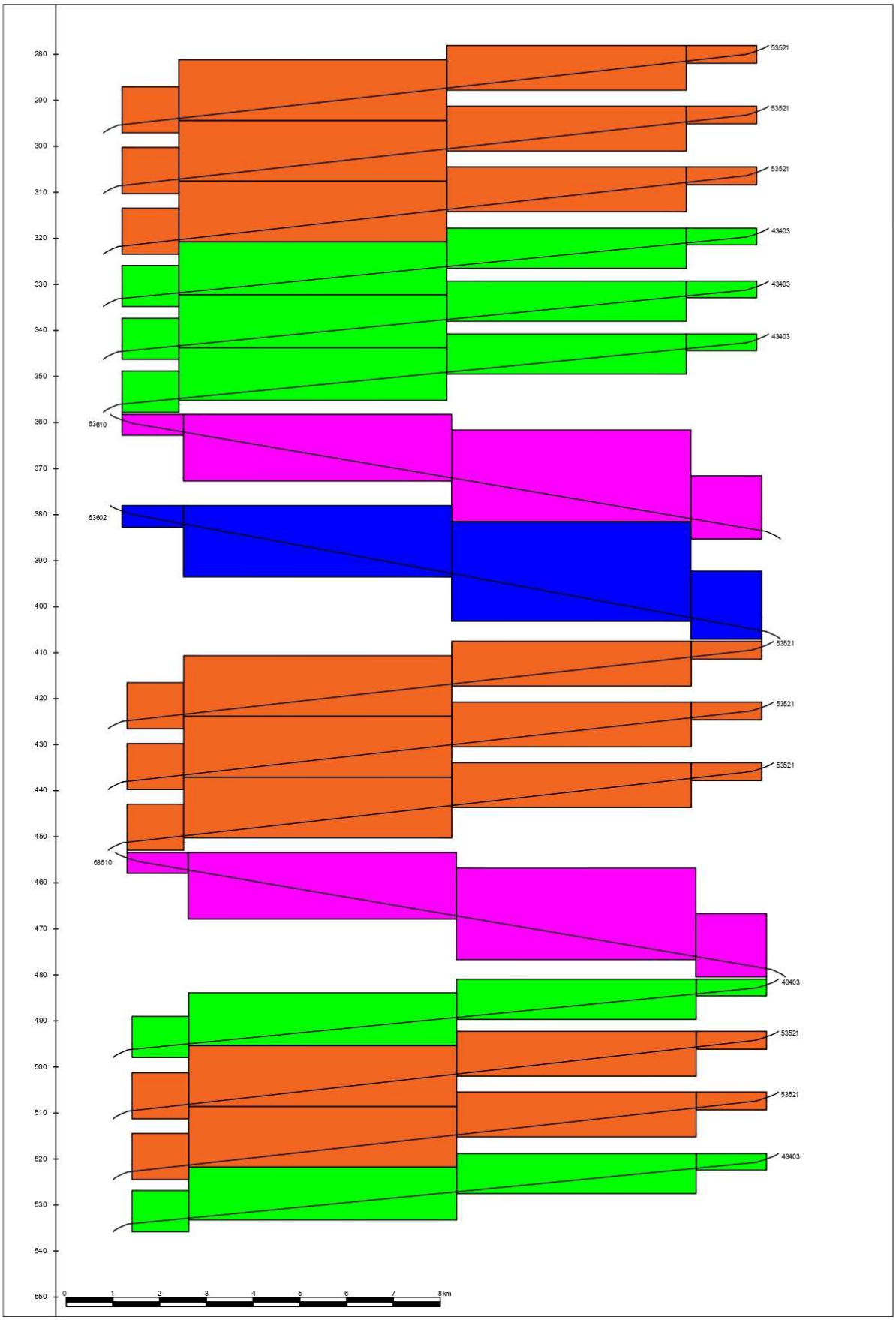
Wu, J., Zhang, C. (2019). Research on Calculation Method of Passing Capacity of High Speed Railway Station and Design of Simulation Process. Electrical Engineering and Computer Science (EECS) 1, 39–44.

A

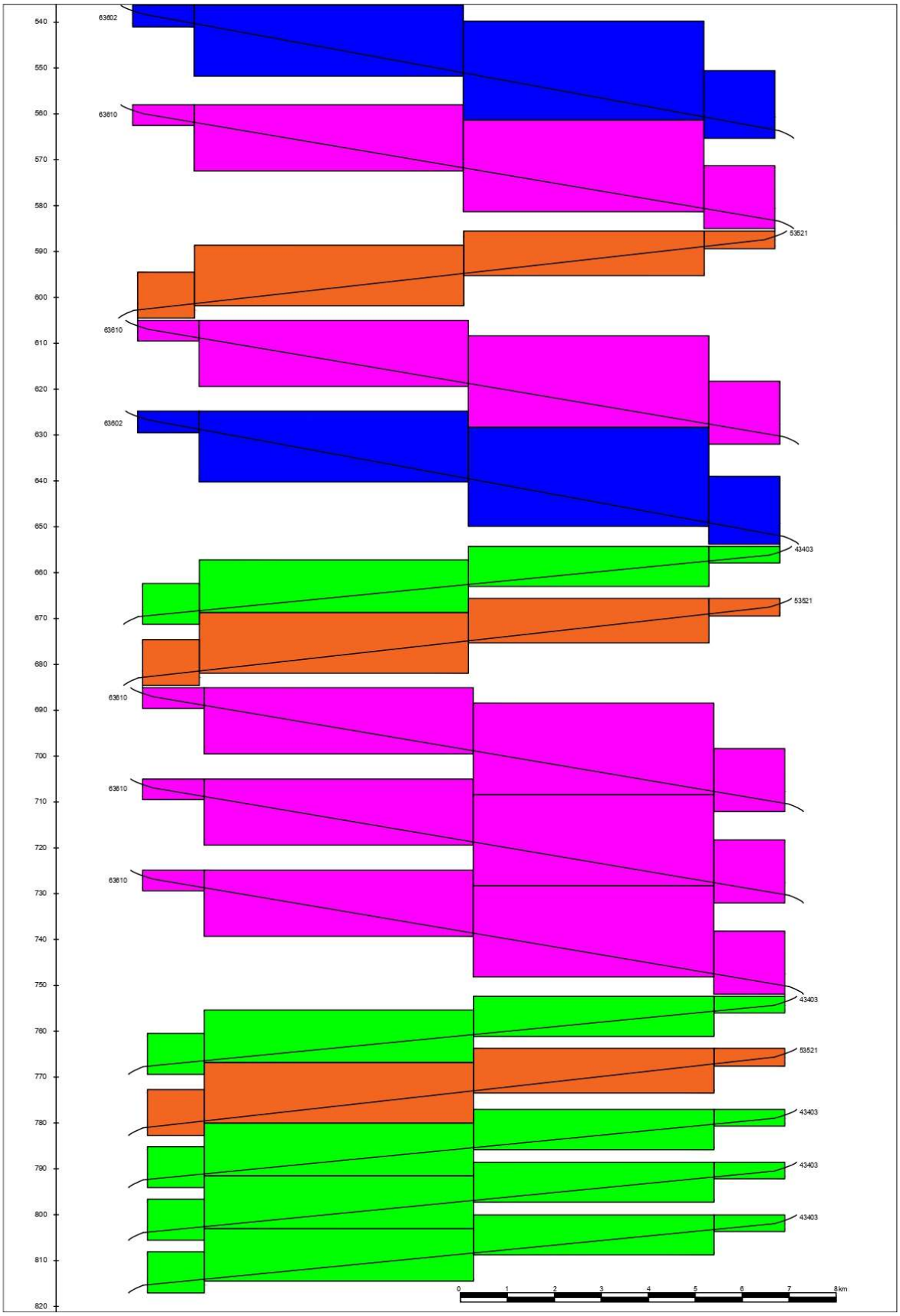
MALATYA NARLI ARASINDA İŞLETİLEN (MODEL) TRENLERİN TEK HATLI KUMLU VE KAPIDERE İSTASYONLARI ARASINDAKİ SIKIŞTIRILMIŞ İŞGAL SÜRESİ BASAMAKLARI



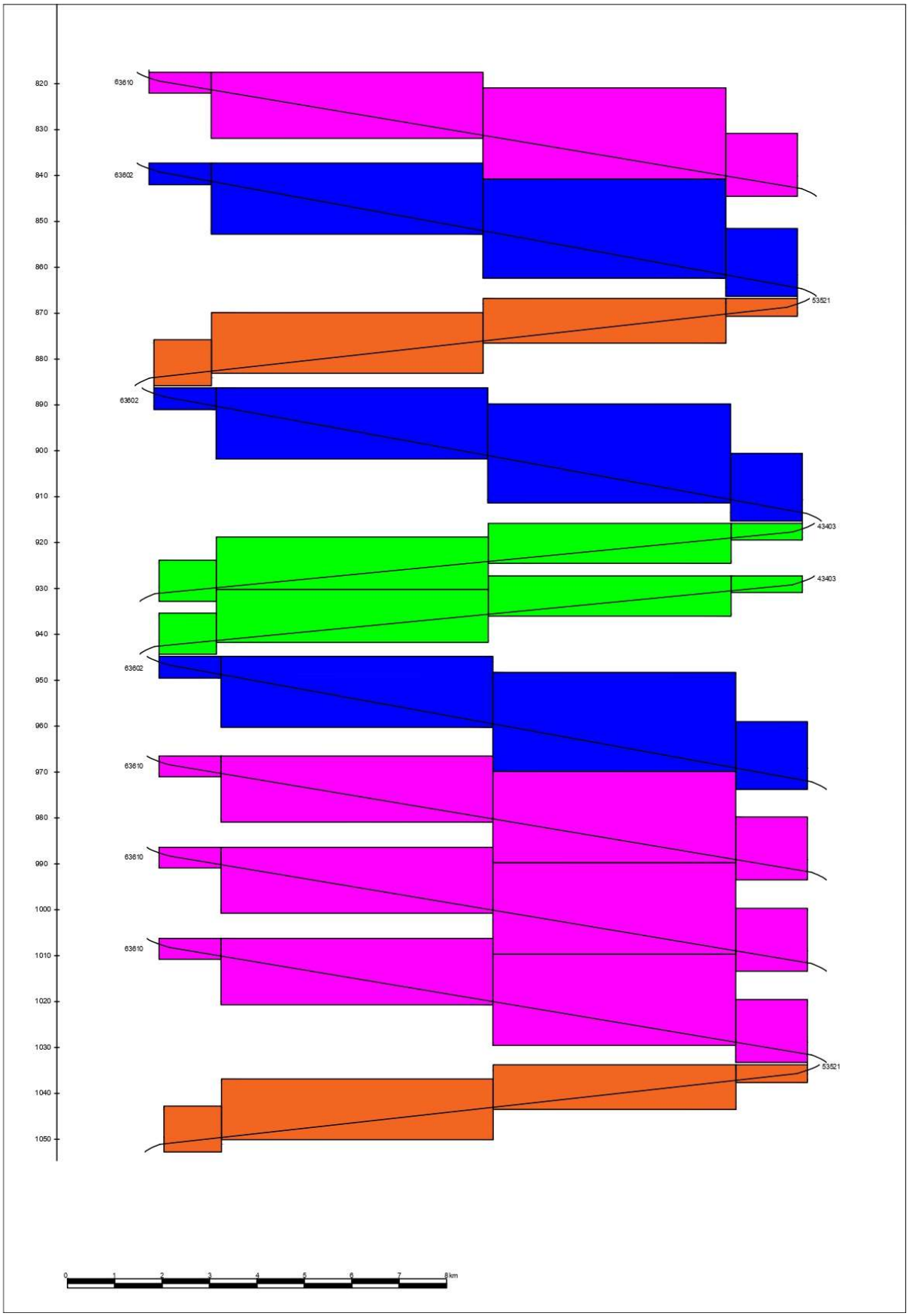
Şekil A.1 Trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları



Şekil A.2 Trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları (devamı)



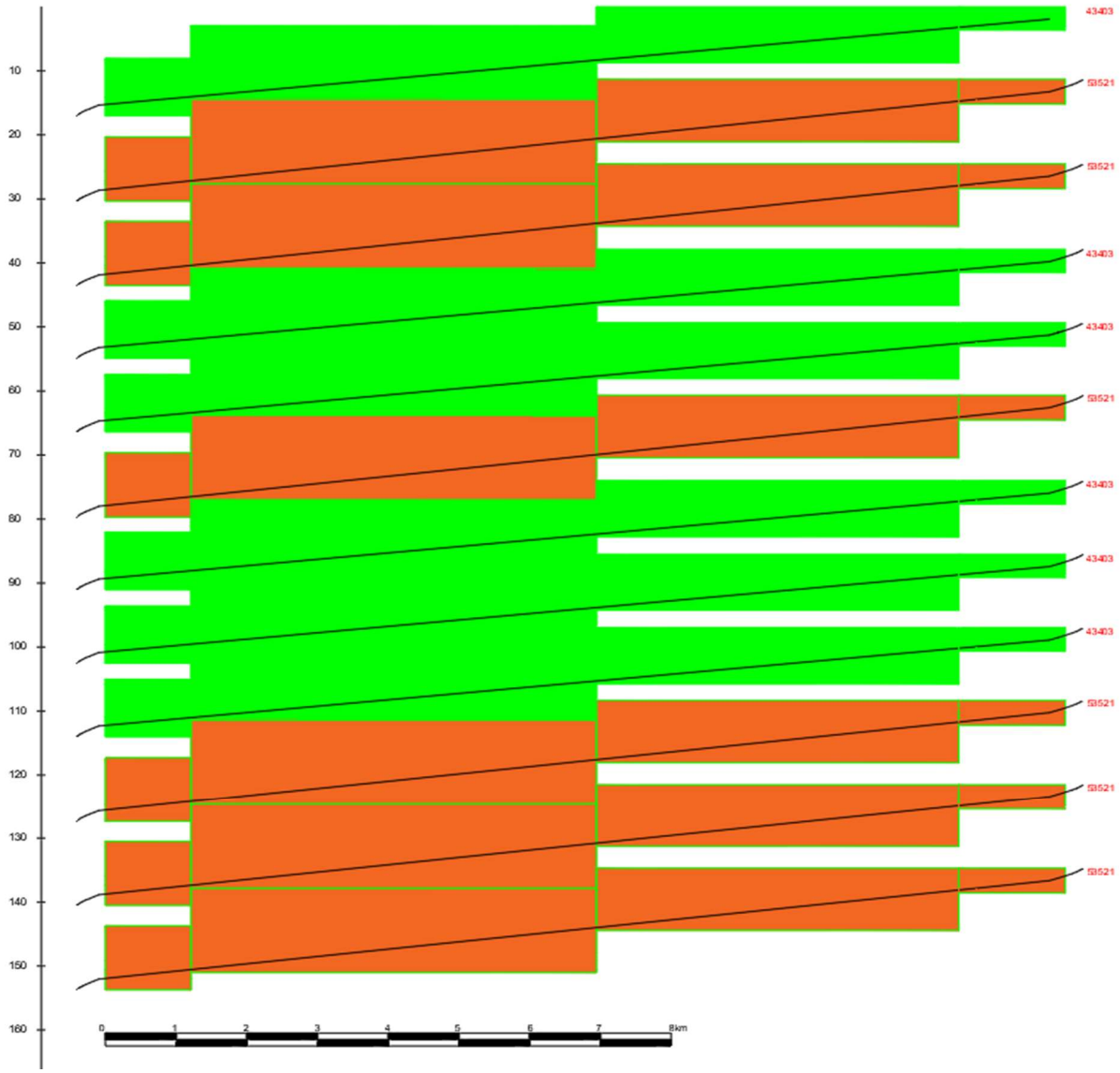
Şekil A.3 Trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları (devamı)



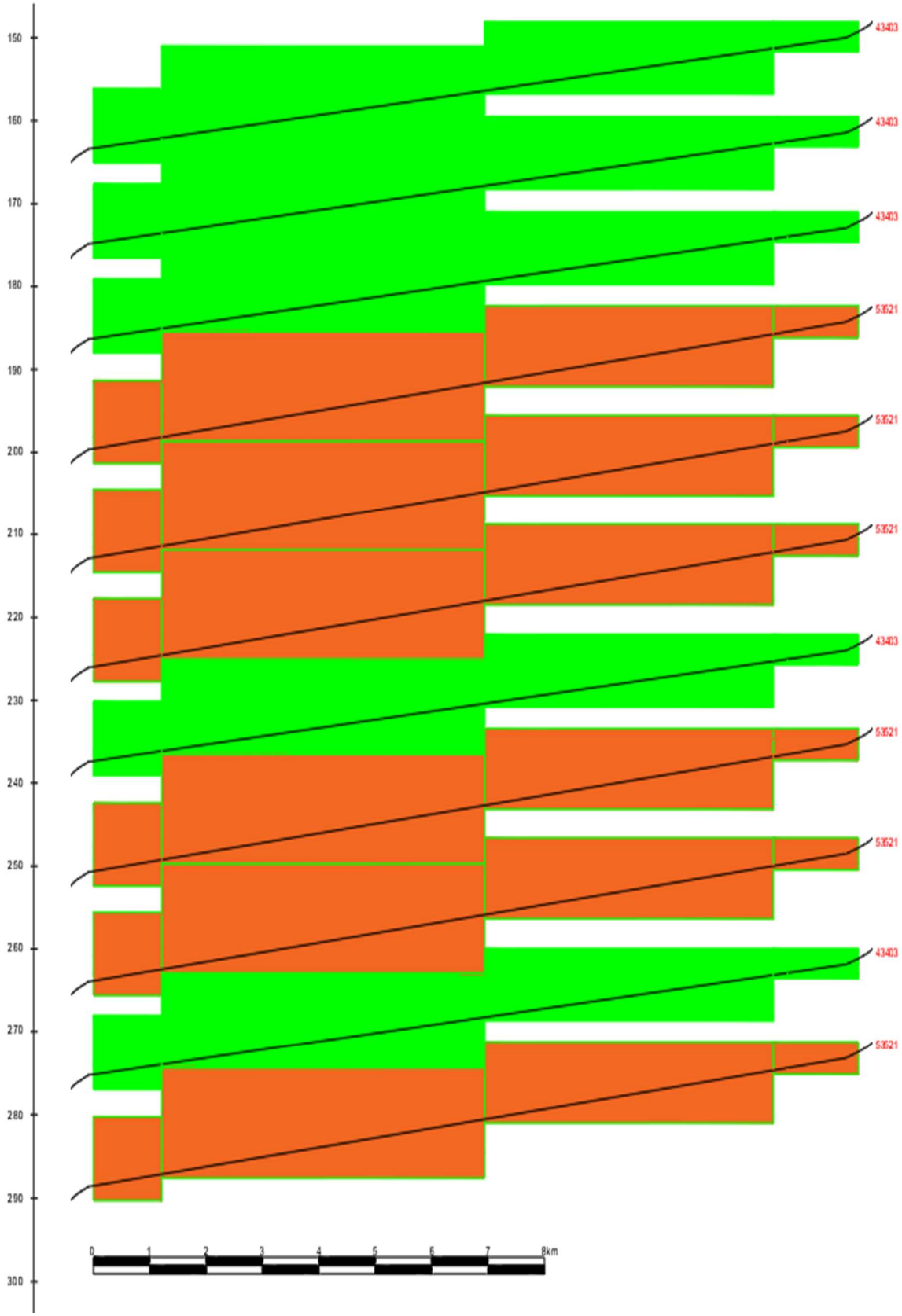
Şekil A.4 Trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları (devamı)

B

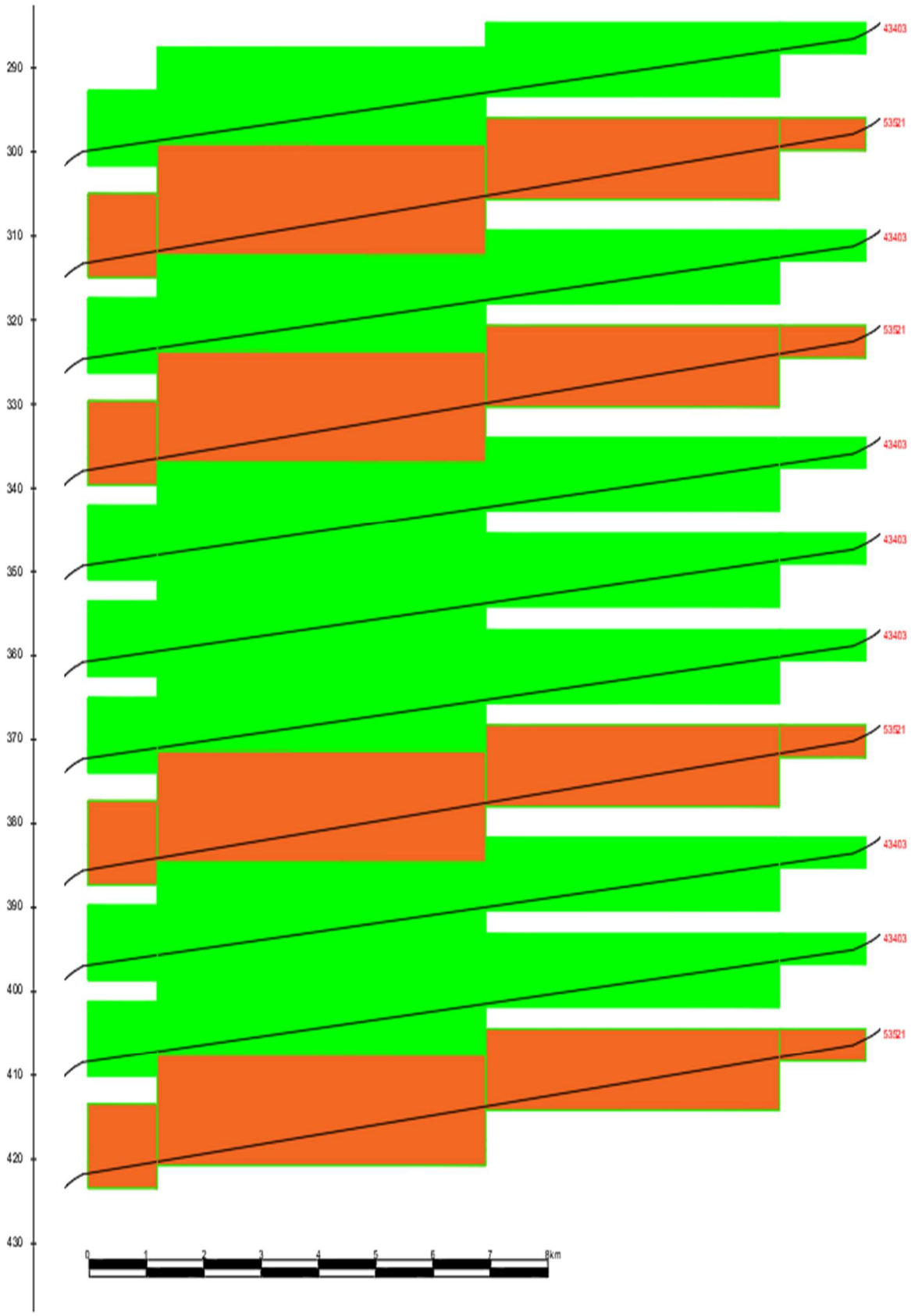
MALATYA NARLI ARASINDA İŞLETİLEN (MODEL) TRENLERİN ÇİFT HAT OLARAK DÜZENLENMESİ DURUMUNDA HER İKİ YÖNDE SIKIŞTIRILMIŞ İŞGAL SÜRESİ BASAMAKLARI



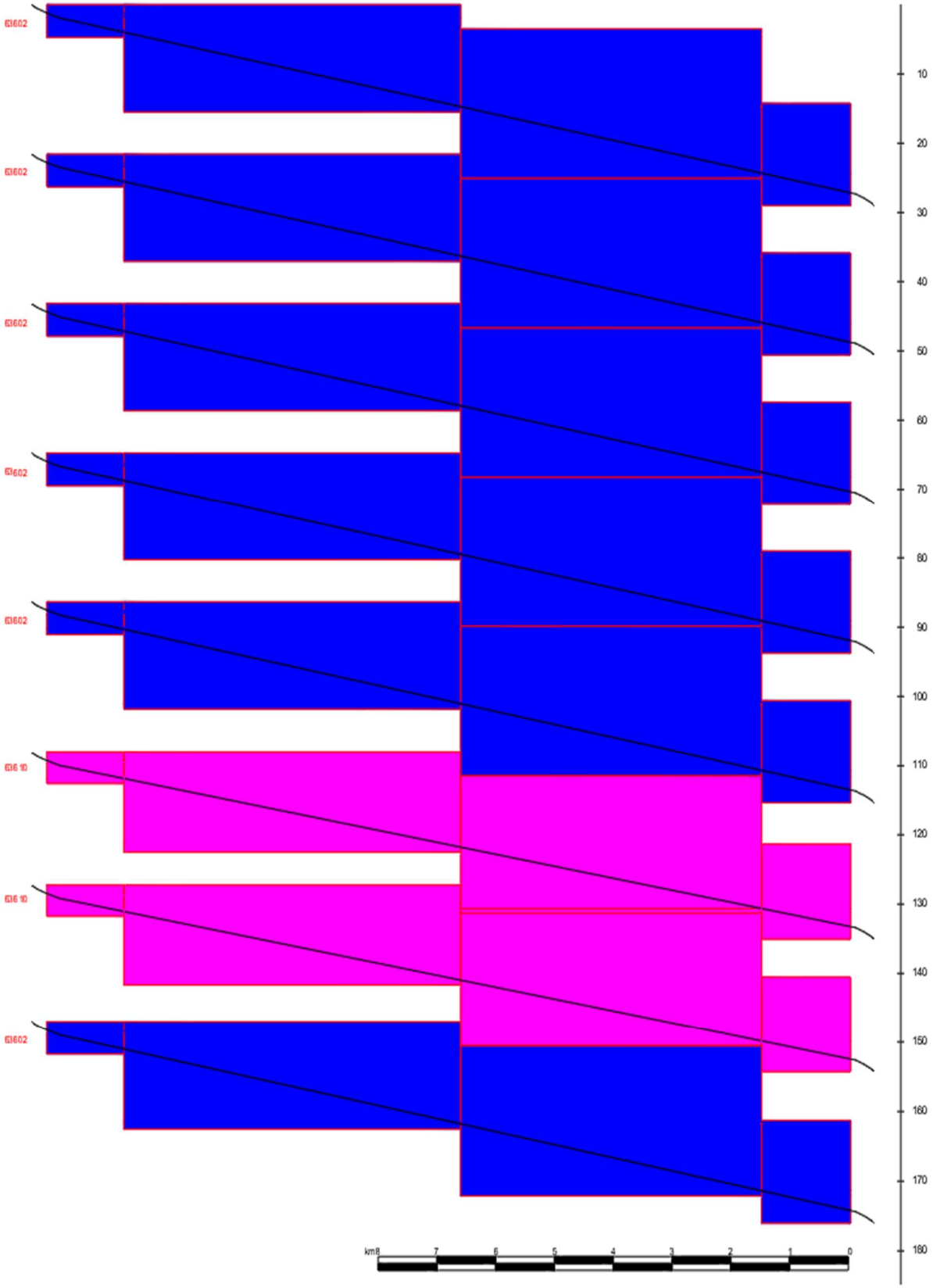
Şekil B.1 Kapıdere-Kumlu yönünde işletilen trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları



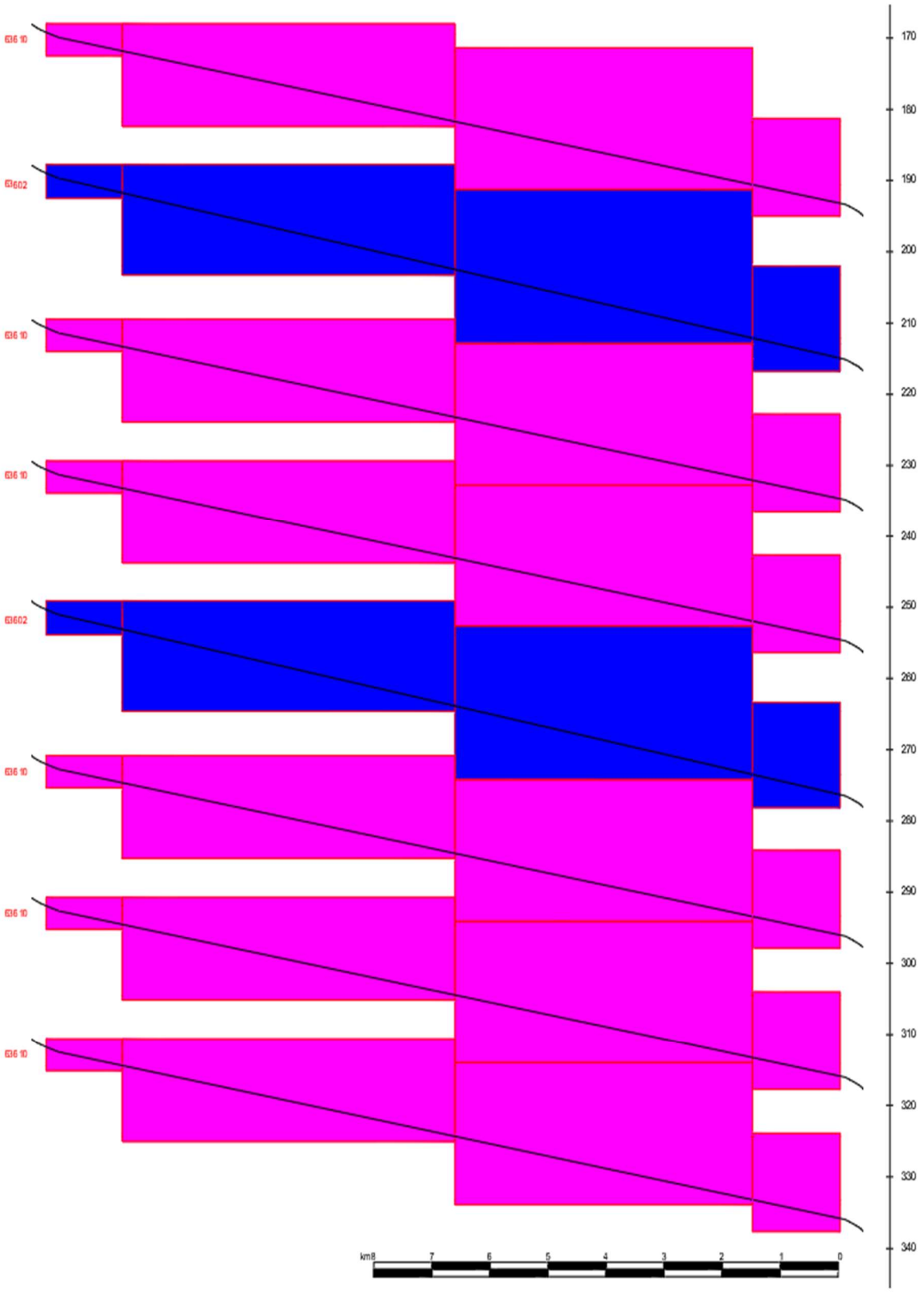
Şekil B.2 Kapıdere-Kumlu yönünde işletilen trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları (devamı)



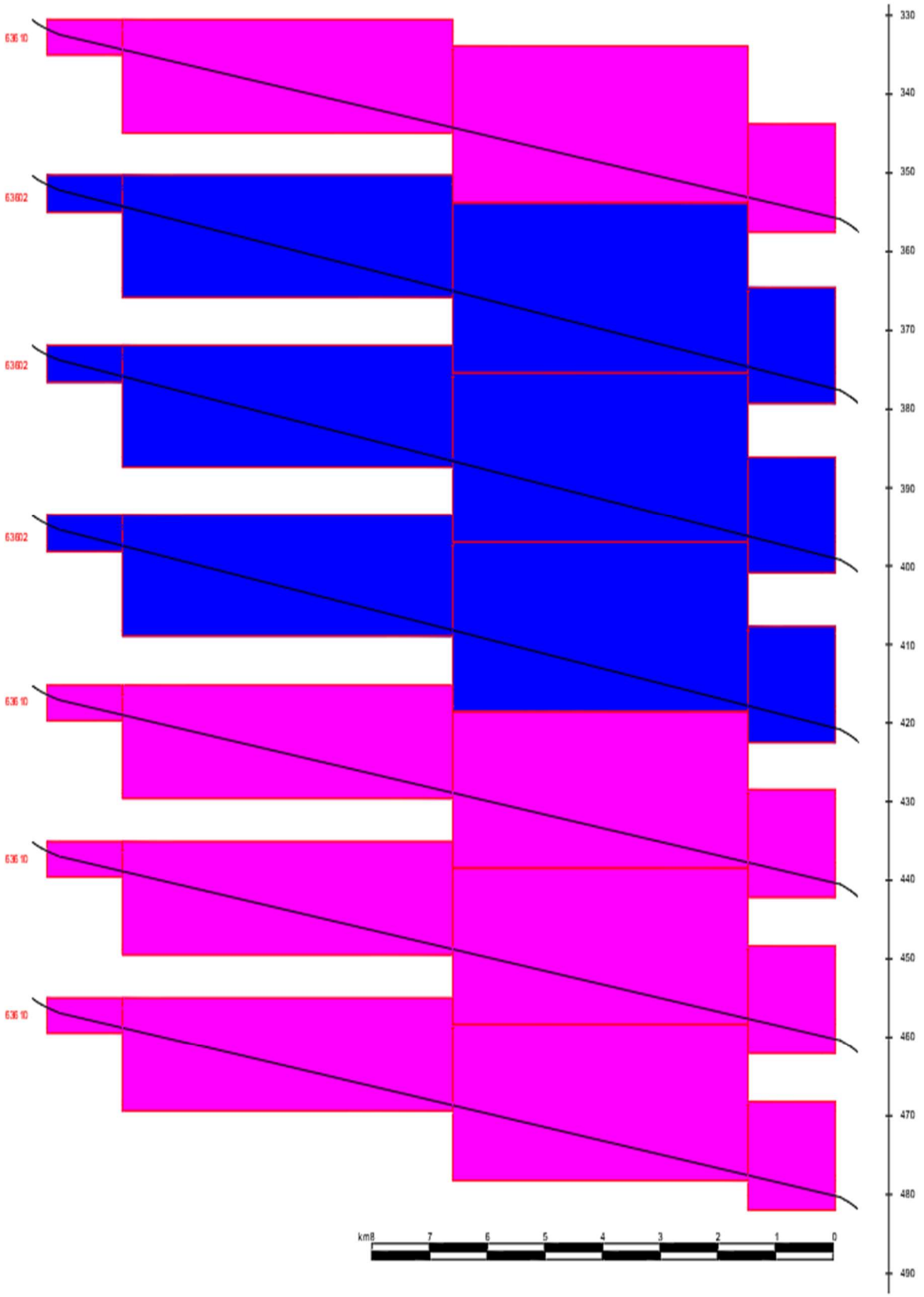
Şekil B.3 Kapıdere-Kumlu yönünde işletilen trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları (devamı)



Şekil B.4 Kumlu-Kapıdere yönünde işletilen trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları



Şekil B.5 Kumlu-Kapıdere yönünde işletilen trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları (devamı)



Şekil B.6 Kumlu-Kapıdere yönünde işletilen trenlerin sıkıştırılmış toplu işgal süresi basamakları (devamı)

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

Urhan, S. ve Şahin, İ. (2023). UIC 406 Yöntemiyle Demiryolu Hat Kapasitesi Hesabı: Malatya-Narlı Örneği. Raylı Sistemler Kongre ve Sergisi, Eskişehir, 2-4 Kasım, s. 163-167, Yayın no: E/MMO/746, ISBN: 978-605-01-1586-4.