T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TREN GECİKMELERİNİN TAHMİNİ VE DAKİKLİK ANALİZİ İÇİN MARKOV ZİNCİRLERİ MODELİ

Mehmet Şirin ARTAN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Programı

Danışman

Prof. Dr. İsmail ŞAHİN

Ocak, 2021

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TREN GECİKMELERİNİN TAHMİNİ VE DAKİKLİK ANALİZİ İÇİN MARKOV ZİNCİRLERİ MODELİ

Mehmet Şirin ARTAN tarafından hazırlanan tez çalışması 29.01.2021 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 _____

Prof. Dr. Zübeyde ÖZTÜRK, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanım Prof. Dr. İsmail ŞAHİN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Tren Gecikmelerinin Tahmini ve Dakiklik Analizi İçin Markov Zincirleri Modeli 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.

Mehmet Şirin ARTAN

İmza

Aileme

TEŞEKKÜR

Akıl almak için tez ve diğer konularda kapısını her çaldığımda kıymetli zamanını bana ayıran, beni dinleyen ve bana yol gösteren sayın tez danışmanım Prof.Dr. İsmail ŞAHİN'e üzerimdeki emeğinden ve bana göstermiş olduğu sabırdan dolayı sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Büyük bir istekle çalışmaya başladığım yüksek lisans eğitimi sürecinde yaşadığım birtakım talihsizlikler, motivasyonumun düşmesine sebebiyet vermiş olsa da kendimi toparlayıp geri geldiğimde hocamın desteğini yanımda buldum. Kendisinin teşvik etmesiyle beraber tren gecikmelerinin modellenmesi konusunda yoğun bir mesaiye başladık. Hocamın, konu ile ilgili çalışmalarını benimle paylaşmasıyla başlayan bu süreç, sonraki aylarda Arifiye - Çukurhisar (tek hatlı) ve Haydarpaşa - Gebze (çift hatlı) demiryolu hatları için yaptığımız sayısal uygulamalar ile devam etti. Bu aşamada elde ettiğimiz sonuçlardan da yararlanarak ilk yayınımızı yaptık. Diğer yandan tez için çalışırken bireysel araştırmalarımla beraber hocamın önerdiği kaynaklardan da oldukça faydalandım. Böylece hocama teze yönelik öneriler sunmaya başlayabildim. Kendisi yaptığım önerileri büyük bir dikkatle dinlemekle kalmayıp düzeltti, düzeltmemi sağladı ya da katkıda bulundu. Uygulamasını yaptığımda, bulguları büyük bir heyecan hissederek hocamla paylaştım. Görüşmelerimiz neticesinde daha büyük hacimli verilerle çalışmaya devam etmenin daha doğru olacağına ve açık erişimi olan Hollanda demiryolu verilerinden faydalanmaya karar verdik. Öncelikle Hollanda demiryolu ağının 5 istasyondan oluşan Leiden Centraal - Haarlem hat kesimini çalışmaya başladık. Hattı ve verileri tanımak için önceki denemeleri geliştirerek bu hat için tekrarladık. Bu aşamada elde ettiğimiz sonuçlardan yararlanarak hazırladığımız metin, Finlandiya'da düzenlenen Travision2020 uluslararası genç araştırmacılar yarışmasının demiryolu ulaşımı dalında yedincilik derecesi aldı. Tezin devamında yapacağımız çalışmalarda tren gecikmelerinde ağ etkisini de gözlemlemek istediğimiz için Hollanda demiryolu ağının 26 istasyondan oluşan bir parçasında çalışmaya başladık. Tren gecikmelerinin sonraki seyahatlere aktarılmasını modellemek ve terminal sürelerinin yeterliliğini değerlendirmek üzerine hazırladığımız bir diğer yayınımız

için çalışmalarımıza devam etmekteyiz. Bu zorlu çalışmanın somut bir ürünü olan bu tezi faydalı olmasını umarak sizlerle paylaşmaktayız.

Bu bağlamda iyi dileklerini benden esirgemeyen sevgili aileme, üzerimdeki emeklerinden dolayı başta tez danışmanım Prof.Dr. İsmail ŞAHİN olmak üzere Doç.Dr. Halit ÖZEN, Doç.Dr. Mustafa GÜRSOY, Dr.Öğr.Üyesi Mustafa Sinan YARDIM, Dr.Öğr.Üyesi Güzin AKYILDIZ ALÇURA, Prof.Dr. Müberra ESER AYDEMİR, Doç.Dr. Cem AYDEMİR ve diğer tüm hocalarıma, çalışma arkadaşlarım Arş.Gör Berna AKSOY, Arş.Gör.Dr. Onur ŞAHİN, Arş.Gör. Abdullah MALTAŞ, Arş.Gör.Dr. Betül DEĞER, Arş.Gör. Abdulsamet SARAÇOĞLU, Arş.Gör. Sümeyye Şeyma KUŞAKÇI GÜNDOĞAR'a teşekkür ederim. Ayrıca bu tezi hazırlarken programlama konusunda bana büyük yardımı dokunan değerli dostum Arş.Gör. Sadullah GÖNCÜ'ye, zor zamanımda elinden gelen çabayı fazlasıyla gösteren değerli dostum Murat Cihan KÜÇÜK'e, Sayın Ersay ŞEH'e, her zaman yanımda olduklarını hissettiren sevgili dostlarım Samet DOĞAN, Melih ERDEM, Aykut ÇİMENER, Harun ÇİMENER, Fahrettin ÖZGÜN, Umut KARADAĞ, Yunus Emre YILMAZ, Uğurcan BAYRAM, Arş.Gör. Egecan Emre HÜNER ve diğer tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Mehmet Şirin ARTAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ viii

KISALTMA LİSTESİ xii

ŞEKİL LİSTESİ xiii

TABLO LİSTESİ xvi

ÖZET xviii

ABSTRACT xx

1 GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti ... 5
1.2 Tezin Amacı ... 8
1.3 Hipotez ... 10

2 MARKOV ZİNCİRLERİ 11

2.1 Markov Zincirleri için Markovyen Özellik Testi ... 16
2.2 Markov Zincirleri için Homojenlik Testi ... 17
2.3 Markov Zincirleri için Durağanlık Testi ... 18

3 İNCELENEN AĞ PARÇASI VE KULLANILAN VERİLER 20

3.1 İncelenen Demiryolu Ağı ... 20
3.2 Kullanılan Veriler ... 23

4 MARKOV ZİNCİRLERİNİN TREN HAREKETLERİNE UYARLANMASI 25

4.1 Markov Matrisinin Oluşturulması ... 26
4.2 Markovyen Özellik Testinin Uygulanması ... 33
4.3 Homojenlik Testinin Geçiş Süreci Türü, Tren Türü ve Seyahat Yönü için Uygulanması ... 36
4.4 Zamanda Durağanlık Testinin Uygulanması ... 44
4.5 Konumda Durağanlık Testinin Uygulanması ... 48
4.6 Homojenlik Testinin Başlangıç İstasyonu için Uygulanması ... 53

5 GECİKME VE DAKİKLİK ANALİZİ **55**

5.1 Ağ Parçasının Geneli için Gecikme ve Dakiklik Analizi 55

5.2 Ağ Parçası Geneli için Kararlı Durum Olasılıkları ve Ortalama İlk Geçiş Adım Sayısı Analizi 61

5.3 Ağ Genelinde Geçiş Süreci Bazında Gecikme ve Dakiklik Analizi 66

5.4 Ağ Genelinde Tren Türü Bazında Gecikme ve Dakiklik Analizi..... 69

5.5 İstasyon Bazında Gecikme ve Dakiklik Analizi..... 71

5.6 Kesim Bazında Gecikme ve Dakiklik Analizi 74

5.7 Tren Hareketlerinin Ortalama Gecikmeleri 76

6 GECİKMELER İÇİN DAĞILIM TAHMİNİ **82**

6.1 Tekil Trenlerin Gecikme Durumlarına İlişkin Olasılık Dağılımlarının Tahmin Modelleri..... 83

6.1.1 T Adım Geçiş Olasılıklarının Hesaplanması..... 83

6.1.2 Olasılık Dağılım Vektörlerinin Hesaplanması 88

6.1.3 Olasılık Dağılım Tahminleri için RMSE ve MAE ölçütlerinin hesaplanması 93

6.2 Tren Grubu Gecikme Dağılımları için Tahmin Modelleri 98

6.3 Markov Modellerinin Karşılaştırılması..... 101

7 GECİKME TAHMİNİ **106**

7.1 Gecikme Tahmini için Kullanılan Modellerinin Karşılaştırılması..... 114

8 SONUÇ VE ÖNERİLER **129**

KAYNAKÇA **139**

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **145**

SİMGE LİSTESİ

H_1	Alternatif hipotez
α	Anlamlılık düzeyi
e_j	Başlangıç durumu bilinen bir rastgele değişkenin T adım sonra j'nci durumda olma olasılığı
E_i	Başlangıç durumu i olan bir rastgele değişkenin T adım sonraki durumlarına ilişkin olasılık vektörü
t_i	Başlangıçta i durumunda olduğu gözlenen tren sayısı
Q_0	Başlangıç/mevcut durum vektörü
F_d	d gecikmesinin gerçekleşme sayısı, frekans
C	Dakiklik oranı
DK	Değişkenlik katsayısı
P^v	Durağanlık testi yapılacak olan v'nci geçiş olasılıkları matrisi
n_{ij}^v	Durağanlık testi yapılacak olan v'nci matris için i durumundan j durumuna geçişlerin sayısı
n_i^v	Durağanlık testi yapılacak olan v'nci matris için i durumundan tüm durumlara geçişlerin sayısı
$\chi^2_{v,ij}$	Durağanlık testi yapılacak olan v'nci matrisin ij değerinin ki-kare test istatistiği
V	Durağanlık testi yapılan matris sayısı
d	Gecikme değeri
S	Homojenlik testi yapılan örnek/matris sayısı
$T_{XX,YY,ZZ}$	Homojenlik testinde seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin ZZ süreçleri için tahmin değerleri matrisi
$\chi_{XX,YY,ZZ}$	Homojenlik testinde seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin ZZ süreçleri için ki-kare değerleri matrisi
P_s	Homojenlik testinde s'nci örnek için geçiş olasılıkları matrisi
n_{ij}^s	Homojenlik testinde s'nci örnek için i durumundan j durumuna geçişlerin sayısı
n_i^s	Homojenlik testinde s'nci örnek için i durumundan tüm durumlara geçişlerin sayısı

t_{ij}^{s}	Homojenlik testinde *s*'nci örnek matrisinin *ij* değeri için tahmin değeri
$\chi_{s,ij}^{2}$	Homojenlik testinde *s*'nci örnek matrisinin *ij* değerinin ki-kare test istatistiği
$\sum\chi^{2}$	Homojenlik veya durağanlık testinde Markov zincirleri için elde edilen toplam ki-kare test istatistiği
$\hat{p}_{ij}$	Homojenlik veya durağanlık testinde toplulaştırılmış geçiş olasılıkları matrisinin *ij* elemanı
t_{ij}	*i* durumundan *j* durumuna geçen tren sayısı
p_{ij}	*i* durumundan *j* durumuna geçiş olasılığı
n_{ij}	*i* durumundan *j* durumuna geçişlerin sayısı
z_{ij}	*i* durumundan *j* durumuna ortalama ilk geçiş adım sayısı
n_{i}	*i* durumundan tüm durumlara geçişlerin sayısı
S_{i}	*i*'nci istasyon
KN_{i}	*i*'nci kontrol noktası
π_{j}	*j* durumu için kararlı durum olasılığı
b_{j}	*j* gecikme durumu için temsili değer
d_{k}	*k* anındaki gecikme değeri
D_{k}	*k* anındaki gecikme durumu
π	Kararlı durum vektörü
χ^{2}	Ki-kare test istatistiği
$Ç_{1}$	Kümülatif olasılık dağılımında %25'e denk gelen değer
$Ç_{2}$	Kümülatif olasılık dağılımında %50'ye denk gelen değer
$Ç_{3}$	Kümülatif olasılık dağılımında %75'e denk gelen değer
K	*L* indis kümesinin eleman sayısı, rastgele değişkenin bulunabileceği durum sayısı
l	*L* indis kümesinin elemanı bir indis
$P(X_{l+1} \mid X_{l})$	*l* zamanından/konumundan $l+1$ zamanına/konumuna kadar durum değişim olasılığını temsil eden, rastgele değişken *X*'in bir fonksiyonu
$p_{\cdot j}$	Marjinal olasılık
${}^{\mathrm{M1}}P^{(T)}$	Model 1 ile hesaplanmış olan *T* adım geçiş olasılıkları matrisi
${}^{\mathrm{M2}}P^{(T)}$	Model 2 ile hesaplanmış olan *T* adım geçiş olasılıkları matrisi

${}^{M3}P^{(T)}$	Model 3 ile hesaplanmış olan T adım geçiş olasılıkları matrisi
g_{ort}	Olasılık dağılımının ağırlıklı ortalaması alınarak yapılan gecikme tahmini
g_{mdy}	Olasılık dağılımının medyan değeri alınarak yapılan gecikme tahmini
g_{mod}	Olasılık dağılımının mod değeri alınarak yapılan gecikme tahmini
g_{TRI}	Olasılık dağılımının üçlü ortalaması alınarak yapılan gecikme tahmini
$\bar{d}$	Ortalama gecikme
Z	Ortalama ilk geçiş adım sayıları matrisi
q_j	Rastgele değişkenin başlangıç durumu
$P^{v}_{XX,YY,ZZ}$	Sadece v periyodunda gerçekleşen seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin ZZ süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş olasılıkları matrisi
$N^{v}_{XX,YY,ZZ}$	Sadece v periyodunda gerçekleşen seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin ZZ süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş sayıları matrisi
f	Serbestlik derecesi
$\pi_{XX,YY,ZZ}$	Seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin ZZ süreçleri için kararlı durum vektörü
$P^{SS}_{XX,YY,ZZ}$	Seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin SS istasyonundaki/kontrol noktasındaki ZZ süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş olasılıkları matrisi
$N^{SS}_{XX,YY,ZZ}$	Seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin SS istasyonundaki/kontrol noktasındaki ZZ süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş sayıları matrisi
$P_{XX,YY,ZZ}$	Seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin ZZ süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş olasılıkları matrisi
$N_{XX,YY,ZZ}$	Seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin ZZ süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş sayıları matrisi
$P^{T}_{XX,YY,ZZ}$	Seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin ZZ süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan toplulaştırılmış geçiş olasılıkları matrisi
$N^{T}_{XX,YY,ZZ}$	Seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin ZZ süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan toplulaştırılmış geçiş sayıları matrisi

${}^{SS}P_{XX,YY,ZZ}$	Seyahatine SS istasyonunda başlayan seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin ZZ süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş olasılıkları matrisi
${}^{SS}N_{XX,YY,ZZ}$	Seyahatine SS istasyonunda başlayan seyahat yönü XX olan YY türü trenlerin ZZ süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş sayıları matrisi
H_0	Sıfır hipotezi
σ	Standart sapma
$P^{(T)}$	T adım geçiş olasılıkları matrisi
$N^{(T)}$	T adım geçiş sayıları matrisi
h	Tahmin hatası
n	Tahmin/örnek sayısı
P	Tek adım geçiş olasılıkları matrisi, Markov matrisi
TRI	Trimean, üçlü ortalama
${}_tP$	t'nci adıma ait tek adım geçiş olasılıkları matrisi
$P_{YY,ZZ}$	YY türü trenlerin ZZ süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri kullanılarak oluşturulan geçiş olasılıkları matrisi
P_{ZZ}	ZZ süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri kullanılarak oluşturulan geçiş olasılıkları matrisi
X_l	X rastgele değişkeninin l zamanındaki/konumundaki durumu

KISALTMA LİSTESİ

A	Varış
BS	Bekleme Süreci
D	Geçiş
Ddr,A	Dordrecht (Ddr) istasyonuna varış
Ddr,V	Ddr istasyonundan kalkış
Ddr,D	Ddr istasyonundan/kontrol noktasından geçiş
GD	Gözlem Değeri
IC	Şehirlerarası trenler
LM	Yolcusuz/boş seyir yapan trenler
M1	Model 1
M2	Model 2
M3	Model 3
MAE	Ortalama Mutlak Hata
MAPE	Mutlak Ortalama Yüzdesel Hata
Mdy	Olasılık dağılımının medyan değeri
MLR	Çoklu Doğrusal Regresyon
Mod	Olasılık dağılımının mod değeri
NS	Hollanda Demiryolları
Ort	Olasılık dağılımının ağırlıklı ortalaması
PERT	Proje Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği
RFR	Rassal Orman Regresyonu
RMSE	Hata Kareleri Ortalamalarının Karekökü
SPR	Kentiçi trenler
SS	Seyir Süreci
TD	Tahmin Değeri
Tri	Olasılık dağılımının üçlü ortalaması
V	Kalkış

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Trengraf biçiminde zaman çizelgesi (orer) örneği.....1

Şekil 1.2 Tablo biçiminde zaman çizelgesi (orer) örneği 2

Şekil 3.1 Hollanda demiryolu ağı (nieuws.ns.nl, 2019) 21

Şekil 3.2 İncelenen ağ parçası 22

Şekil 3.3 Konumlar ve seyahat yönleri 24

Şekil 4.1 Gecikme durumlarının değişiminin ve geçiş süreçlerinin mekanizması 28

Şekil 5.1 Ağ parçası genelinde gecikme dağılımı 55

Şekil 5.2 Başlangıç gecikme değerine göre gecikmenin değişim davranışı 59

Şekil 5.3 Lingo için kararlı durum olasılıkları ve ortalama ilk geçiş adım sayısı modeli (Winston, 2003).....62

Şekil 5.4 Gecikme durumları için gözlenen oranlar ve kararlı durum olasılıklarının benzerliği.....63

Şekil 5.5 Gecikmeler için gözlenen oranlar ve kararlı durum olasılıklarının benzerliği.....64

Şekil 5.6 Ortalama ilk geçiş adım sayıları.....65

Şekil 5.7 Gecikme durumunun değişmesi halinde eski gecikme durumuna dönüş için gerekli ortalama geçiş adım sayıları 66

Şekil 5.8 Kalkış gecikmelerinin dağılımı 68

Şekil 5.9 Varış/geçiş gecikmelerinin dağılımı 69

Şekil 5.10 Gv,A gecikme durumlarının dağılımı 72

Şekil 5.11 Gv,V gecikme durumlarının dağılımı 72

Şekil 5.12 Ağ parçasının şematik planı.....76

Şekil 5.13 Seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için ortalama gecikmenin değişimi 77

Şekil 5.14 Seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için ortalama gecikmenin değişimi 78

Şekil 5.15 Seyahat yönü 1 olan IC türü trenler için ortalama gecikmenin değişimi 79

Şekil 5.16 Seyahat yönü 2 olan IC türü trenler için ortalama gecikmenin değişimi 80

Şekil 5.17 2221 numaralı (seyahat yönü 2, IC türü) trenin 6 farklı gün için seyahati boyunca gecikmenin değişimi 81

Şekil 6.1 Seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için Dt,V - Sdm,V arasındaki geçişler (adımlar) 84

Şekil 6.2 Model 3 için aşamasız geçiş 87

Şekil 6.3 Dt,V gecikme durumu 1 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri 89

Şekil 6.4 Dt,V gecikme durumu 2 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri 90

Şekil 6.5 Dt,V gecikme durumu 3 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri 90

Şekil 6.6 Dt,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri 91

Şekil 6.7 Dt,V gecikme durumu 5 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri 91

Şekil 6.8 Dt,V gecikme durumu 6 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri 92

Şekil 6.9 Dt,V gecikme durumu 7 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri 92

Şekil 6.10 Dt,V gecikme durumu 8 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri 93

Şekil 6.11 Dt,V gecikme dağılımı bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Sdm,V gecikme dağılımı tahminleri.....99

Şekil 6.12 Tahmin edilen olasılıklar ve test verisinden gözlenen oranlar (Model 1) 103

Şekil 6.13 Tahmin edilen olasılıklar ve test verisinden gözlenen oranlar (Model 2) 104

Şekil 6.14 Tahmin edilen olasılıklar ve test verisinden gözlenen oranlar (Model 3) 105

Şekil 7.1 Model 2 tahminine göre Dt,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Sdm,V gecikme durumlarına ilişkin olasılık dağılımı 107

Şekil 7.2 Model 2 tahminine göre Dt,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Sdm,V gecikme durumlarına ilişkin kümülatif olasılık dağılımı 108

Şekil 7.3 Model 1 tahminine göre Ddr,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 2 olan SPR türündeki tekil trenlerin akım aşağıdaki gecikmeleri için yapılan tahminler.....111

Şekil 7.4 Model 2 tahminine göre Ddr,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 2 olan SPR türündeki tekil trenlerin akım aşağıdaki gecikmeleri için yapılan tahminler.....112

Şekil 7.5 Model 3 tahminine göre Ddr,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 2 olan SPR türündeki tekil trenlerin akım aşağıdaki gecikmeleri için yapılan tahminler.....113

Şekil 7.6 Model 1 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için RMSE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için).....115

Şekil 7.7 Model 2 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için RMSE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için).....116

Şekil 7.8 Model 3 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için RMSE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için).....117

Şekil 7.9 Ağırlıklı ortalama kullanılarak ve Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan modellerin akım aşağıdaki gecikme tahminleri için RMSE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için).....118

Şekil 7.10 Model 1 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için MAE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için).....120

Şekil 7.11 Model 2 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için MAE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için).....121

Şekil 7.12 Model 3 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için MAE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için).....122

Şekil 7.13 Medyan yöntemine göre modellerin Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için MAE (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için).....123

Şekil 7.14 Ağırlıklı ortalama ile yapılan tahminler için tahmin hatalarının dağılımı.....124

Şekil 7.15 Başlangıç gecikme durumuna göre Model 3'ün gecikme tahminleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için, ağırlıklı ortalama).....127

Şekil 7.16 Baz alınan an güncellendikçe gecikme tahminleri için RMSE ve MAE değerlerinin değişimi (seyahat yönü 1 olan IC türü trenler için, hedef an Rsd,A, Model 3, ağırlıklı ortalama).....128

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1 Geçiş sayıları 12

Tablo 3.1 İstasyonlar arasındaki mesafeler ve hat sayısı.....22

Tablo 4.1 Tren hareketlerine bağlı olarak geçiş süreci.....26

Tablo 4.2 Her bir gecikme değerinden her bir gecikme değerine gerçekleşen geçişlerin sayısı.....29

Tablo 4.3 Gecikmeler değerleri için geçiş olasılıkları.....30

Tablo 4.4 Gecikme durumları.....31

Tablo 4.5 Geçiş sayılarının toplulaştırılması.....32

Tablo 4.6 Hesaplanan *nijlnpijp·j* ki-kare değerleri 35

Tablo 4.7 Geçiş süreci türü, tren türü ve seyahat yönü için homojenlik testleri (α=%5 anlamlılık düzeyi ve f=56 serbestlik derecesi için) 43

Tablo 5.1 Gecikme durumları için temsili değerler.....56

Tablo 5.2 Gecikmeler değerleri için geçiş olasılıkları.....60

Tablo 6.1 Seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlere ait gözlenen frekanslar (test verileri).....89

Tablo 6.2 Dt,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri.....94

Tablo 6.2 Dt,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri (devamı).....95

Tablo 6.2 Dt,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri (devamı).....96

Tablo 6.3 Başlangıç (Ddr,V) gecikme durumunun biliniyor olması durumunda bir trenin hedef andaki gecikme durumuna ilişkin olasılık dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri 97

Tablo 6.4 Dt,V gecikme dağılımı bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki tren grubunun Sdm,V gecikme dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri 99

Tablo 6.5 Başlangıç gecikme dağılımının biliniyor olması durumunda tren grubunun hedef andaki gecikme dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri 100

Tablo 7.1 Dt,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki tekil trenlerin Sdm,V gecikmesi tahminleri için RMSE ve MAE değerleri 109

Tablo 7.2 Ddr,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 2 olan SPR türündeki tekil trenlerin akım aşağıdaki gecikmeleri için yapılan tahminler 110

Tablo 7.3 Ddr,V gecikme durumu baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için RMSE (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için)....114

Tablo 7.4 Ddr,V gecikme durumu baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için MAE (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için).....119

Tablo 7.5 Tahmin hatalarının uygunluğu bakımından dağılımların sıralaması 125

ÖZET

Tren Gecikmelerinin Tahmini ve Dakiklik Analizi İçin Markov Zincirleri Modeli

Mehmet Şirin ARTAN

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İsmail ŞAHİN

Planlı kentiçi ve şehirlerarası demiryollarında trenler, tarifeli kalkış ve varış zamanlarını içeren bir zaman çizelgesine (orere) göre işletilir. Çizelgeye bağlılık, demiryolu sistemi başta olmak üzere her ulaştırma türündeki en önemli performans ölçütlerinden biri olarak kabul edilir. Ancak trenler tahmin edilemeyen olaylarla karşılaştığında, hat kesimlerindeki seyir sürelerinde ve istasyonlardaki bekleme sürelerinde kaçınılmaz değişkenlikler meydana gelir ve böylece çizelgeden sapmalar (gecikmeler) ortaya çıkar. İyi yönetilmemesi durumunda gecikmeler, demiryolu hizmetlerinin verimliliğini düşürebilir, seyahat süresini uzatabilir, yolcuların aktarmalarını kaçırmasına neden olabilir ve hizmet kalitesini düşürebilir. Demiryolu işletiminde ortaya çıkan ana zorluklardan biri, trenlerin gecikmesi durumunda, bu gecikmelerin doğru tahmin edilmesidir. Ortaya çıkabilecek gecikmelerin yeri ve büyüklüğünün doğru tahmin edilmesi, tolerans sürelerinin etkili tahsisine, bu sürelerin tam olarak kullanılmasına ve demiryolu altyapısının daha iyi kullanılması ile kapasitenin boşa harcanmamasına yardımcı olabilir. Ayrıca bir demiryolu hattındaki trenlerin akım aşağı istasyonlardaki gecikmesinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, hizmet güvenirliğini arttırmaya ve yolcu memnuniyetini arttırmak için beklenen

gecikmeyi yolculara bildirmeye yardımcı olabilir. Bu tezde, trenlerin gecikme tahmini/analizi için Markov zinciri modeli tren hareketlerine uyarlanmıştır. Markovyen özellik testi sonucunda tren gecikmelerinin, Markov zincirleriyle modellenebilecek bir rastgele değişken olduğu görülmüştür. Homojenlik ve durağanlık kabulleri istatistiksel olarak test edilmiştir. Hipotez testleri sonucunda reddedilen homojenlik ve durağanlık kabullerinin, tahmin hatalarını arttırdığı öngörülmüştür. Homojen Markov zincirleri (M1), ağ genelinde gecikmeleri ve tolerans sürelerini oldukça pratik bir şekilde analiz edilebilmekte, ancak gecikme tahmini için yetersiz kalmaktadır. İstatistiksel olarak homojenliği reddedilen özellikleri heterojen kabul edilen Markov zincirleri (M2, M3) ise daha doğru gecikme tahminleri yapmak, istasyon/kesim düzeyinde gecikme analizleri yapmak ve istasyon/kesim düzeyinde tolerans sürelerini değerlendirmek için elverişli olmakla beraber uygulama bakımından daha zordur.

Anahtar Kelimeler: Markov zincirleri, tren gecikmelerinin tahmini, tolerans sürelerin değerlendirilmesi, homojenlik ve durağanlık, Markovyen stokastik modelleme

ABSTRACT

A Markov Chains Model for Train Delay Prediction and Punctuality Analysis

Mehmet Şirin ARTAN

Department of Civil Engineering

Master of Science Thesis

Advisor: Prof. Dr. İsmail ŞAHİN

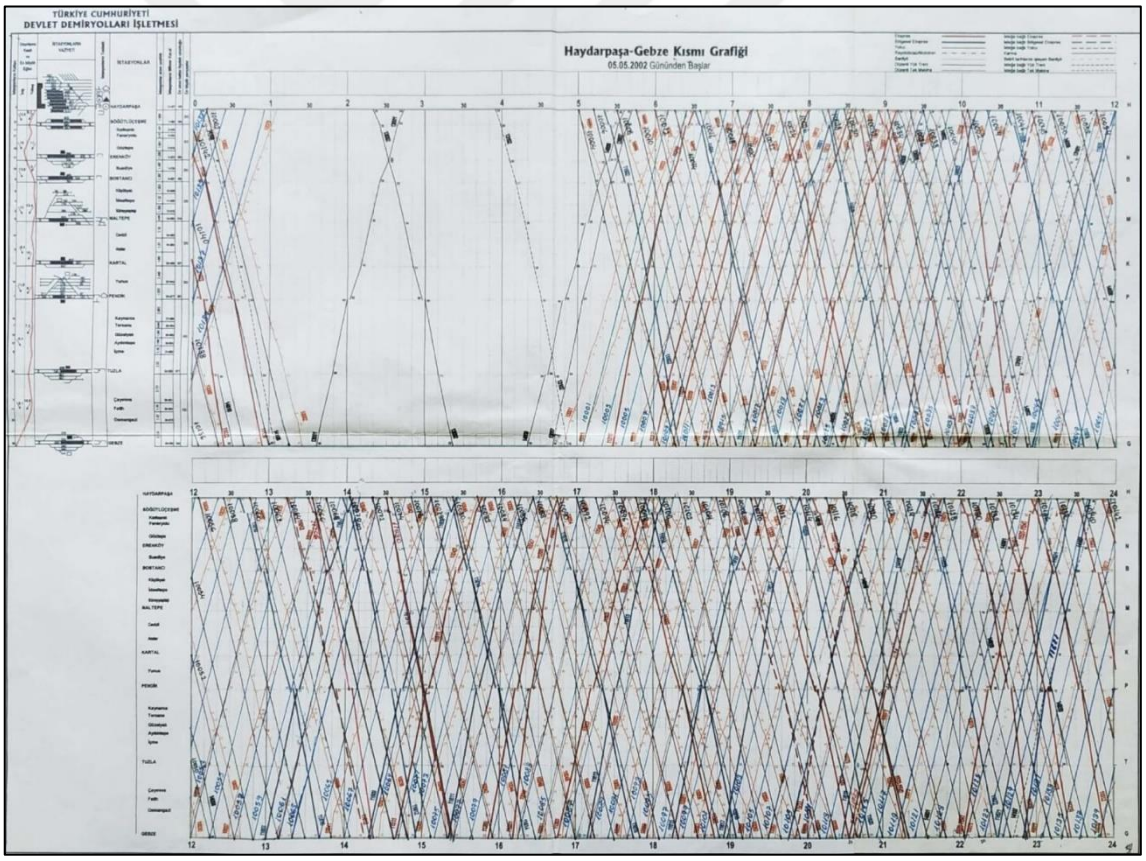
Trains operate with respect to timetables constituting planned arrival and departure times in scheduled urban and intercity railways. Timetable adherence is assumed to be one of the significant performance measures of transportation systems including railways. When trains encounter unexpected events, however, running times at the line sections between stations and waiting times at stations may vary, and hence deviations from schedules (i.e., delays) emerge. In case that delays are not managed well, effectiveness of the railway services can deteriorate, journey times can lengthen, passengers can miss their connecting trains, and service quality can deteriorate. One of the major difficulties encountered in railway operations is to predict train delays correctly. Prediction of location and magnitude of delays in a correct manner can help allocating time allowances efficiently and using them in full, utilizing the railway facilities efficiently, and preventing inefficient capacity consumption. Additionally, predicting delays at the downstream stations precisely allows to increase service reliability and to announce the expected delay in order to increase passenger satisfaction. In this thesis, Markov chain models are adopted to train movements to predict and analyze their delays. Markov property test indicates that train delays can be

modeled as random variables using Markov chains. Homogeneity and stationary tests have also been conducted. It is foreseen that implementing homogeneity and stationary assumptions which are rejected by hypothesis tests increase prediction errors. Homogeneous Markov chain model (M1) can be used to analyze delays and time allowances network wide in a practical manner, but it does not show sufficient performance in delay prediction. Heterogeneous Markov chain models (M2, M3), on the other hand, are appropriate to predict delays better, analyze delays at the station/section level, and evaluate time allowances at the station/section level, but their application is more difficult.

Keywords: Markov chains, prediction of train delays, evaluation of time allowances, homogeneity and stationarity, Markovian stochastic modelling

1
GİRİŞ

Planlı kentiçi ve şehirlerarası demiryollarında trenler, tarifeli kalkış ve varış zamanlarını içeren bir zaman çizelgesine (orere) göre işletilir. Trengraf (Şekil 1.1) veya tablo (Şekil 1.2) biçiminde olabilen orerler, uygulanabilir çizelgeler olarak taktik düzeyde sunulmak istenen tren hizmetlerinin zamansal ve mekânsal planlarını (yol-zaman diyagramlarını) içerirler. Planlanan her tren seyahatine ait bir tren çizgisi bulunmaktadır. Orerdeki bir tren çizgisi, demiryolu hat kesimlerindeki seyir süresi ve istasyonlardaki bekleme süresi dizisinden meydana gelmektedir (Jovanović vd., 2017).



Şekil 1.1 Trengraf biçiminde zaman çizelgesi (orer) örneği

İSTASYONLAR	Seyir Süresi	10063	10065	10067	10069	10071	10073	10075	10077	10079	10081	10083	10085	10087	10089	10091	10093
Gebze		14:10	14:30	14:50	15:15	15:38	16:00	16:20	16:40	17:00	17:15	17:30	17:45	18:05	18:22	18:40	19:00
Osmangazi	00:04	14:14	14:34	14:54	15:19	15:42	16:04	16:24	16:44	17:04	17:19	17:34	17:49	18:09	18:26	18:44	19:04
Fatih	00:02	14:16	14:36	14:56	15:21	15:44	16:06	16:26	16:46	17:06	17:21	17:36	17:51	18:11	18:28	18:46	19:06
Çayırova	00:02					15:46			16:48								
Tuzla	00:04	14:22	14:42	15:02	15:27	15:50	16:18	16:32	16:52	17:12	17:27	17:42	17:57	18:17	18:34	18:52	19:12
İçme	00:03	14:25	14:45	15:05	15:30	15:53	16:21	16:35	16:55	17:15	17:30	17:45	18:00	18:20	18:37	18:55	19:15
Aydıntepe	00:02	14:27	14:47	15:07	15:32	15:55	16:23	16:37	16:57	17:17	17:32	17:47	18:02	18:22	18:39	18:57	19:17
Güzelyalı	00:02	14:29	14:49	15:09	15:34	15:57	16:25	16:39	16:59	17:19	17:34	17:49	18:04	18:24	18:41	18:59	19:19
Tersane	00:02	14:31	14:51	15:11	15:36	15:59	16:27	16:41	17:01	17:21	17:36	17:51	18:06	18:26	18:43	19:01	19:21
Kaynarca	00:02	14:33	14:53	15:13	15:38	16:01	16:29	16:43	17:03	17:23	17:38	17:53	18:08	18:28	18:45	19:03	19:23
Pendik	00:03	14:36	14:56	15:16	15:41	16:04	16:32	16:46	17:06	17:26	17:41	17:56	18:11	18:31	18:48	19:06	19:26
Yunus	00:03	14:39	14:59	15:19	15:44	16:07	16:35	16:49	17:09	17:29	17:44	17:59	18:14	18:34	18:51	19:09	19:29
Kartal	00:03	14:42	15:02	15:22	15:47	16:10	16:38	16:52	17:12	17:32	17:47	18:02	18:17	18:37	18:54	19:12	19:32
Atalar	00:03	14:45	15:05	15:25	15:50	16:13	16:41	16:55	17:15	17:35	17:50	18:05	18:20	18:40	18:57	19:15	19:35
Cevizli	00:02	14:47	15:07	15:27	15:52	16:15	16:43	16:57	17:17	17:37	17:52	18:07	18:22	18:42	18:59	19:17	19:37
Maltepe	00:03	14:50	15:10	15:30	15:55	16:18	16:46	17:00	17:20	17:40	17:55	18:10	18:25	18:45	19:02	19:20	19:40
Süreyyaplajı	00:02	14:52	15:12	15:32	15:57	16:20	16:48	17:02	17:22	17:42	17:57	18:12	18:27	18:47	19:04	19:22	19:42
İdealtepe	00:02	14:54	15:14	15:34	15:59	16:22	16:50	17:04	17:24	17:44	17:59	18:14	18:29	18:49	19:06	19:24	19:44
Küçükyalı	00:02	14:56	15:16	15:36	16:01	16:24	16:52	17:06	17:26	17:46	18:01	18:16	18:31	18:51	19:08	19:26	19:46
Bostancı	00:02	14:58	15:18	15:38	16:03	16:26	16:54	17:08	17:28	17:48	18:03	18:18	18:33	18:53	19:10	19:28	19:48
Suadiye	00:02	15:00	15:20	15:40	16:05	16:28	16:56	17:10	17:30	17:50	18:05	18:20	18:35	18:55	19:12	19:30	19:50
Erenköy	00:03	15:03	15:23	15:43	16:08	16:31	16:59	17:13	17:33	17:53	18:08	18:23	18:38	18:58	19:15	19:33	19:53
Göztepe	00:02	15:05	15:25	15:45	16:10	16:33	17:01	17:15	17:35	17:55	18:10	18:25	18:40	19:00	19:17	19:35	19:55
Feneryolu	00:03	15:08	15:28	15:48	16:13	16:36	17:04	17:18	17:38	17:58	18:13	18:28	18:43	19:03	19:20	19:38	19:58
Kızıltoprak	00:02	15:10	15:30	15:50	16:15	16:38	17:06	17:20	17:40	18:00	18:15	18:30	18:45	19:05	19:22	19:40	20:00
Söğütlüçeşme	00:02	15:12	15:32	15:52	16:17	16:40	17:08	17:22	17:42	18:02	18:17	18:32	18:47	19:07	19:24	19:42	20:02
Haydarpaşa	00:03	15:15	15:35	15:55	16:20	16:43	17:11	17:25	17:45	18:05	18:20	18:35	18:50	19:10	19:27	19:45	20:05

NOT: 11001 TREN TUZLA'DA 10073 TRENİN ÖNÜNE GEÇER.10073 TREN TUZLA'DA 6 DK. BEKLER.

Şekil 1.2 Tablo biçiminde zaman çizelgesi (orer) örneği

Çizelgeye bağlılık (dakiklik), demiryolu sistemi başta olmak üzere her ulaştırma türündeki en önemli performans ölçütlerinden biri olarak kabul edilir (Harris vd., 2013; Lindfeldt, 2010). Dakiklik, planlanan varış zamanından sapması (gecikmesi) belli bir eşiği aşmayan trenlerin yüzdesi olarak tanımlanır. Tren işleten şirketler tarafından tren işletimi performansını ve gecikme yönetimi kararlarının etkinliğini değerlendirmek için kullanılan ana kriterlerden biri olan dakiklik, aynı zamanda, yolcuları demiryolu ile seyahat etmeye teşvik eden hizmet kalitesi algısı için önemli bir ölçüttür (Huang vd., 2019).

Tren hizmetlerinin dakikliği, son yıllarda, hareketliliğin artması, raylı sistemlerin kapasiteleri ve diğer ulaştırma türleriyle rekabet etmesi nedenleriyle büyük önem kazanmıştır (J. Yuan ve Hansen, 2002). Demiryolu ağlarında, gelişmiş iletişim, izleme ve kontrol tesislerine rağmen, tren hareketleri, tren hizmetlerini bozabilecek birçok içsel ve dışsal etkiye maruz kalırlar. Tren hareketleri, tren tarifesi, işletme kısıtlamaları ve çeşitli bozulmalar/arızalar gibi birçok faktörden etkilenen dinamik bir süreçtir. Bu bozulmalar ve arızalar genellikle kötü hava koşulları, tesis veya işletme aksaklıkları gibi öngörülemeyen olaylardan veya diğer

trenlerin neden olabileceği durumlardan kaynaklanır (Huang vd., 2019). Trenler tahmin edilemeyen olumsuzluklarla karşılaştığında, hat bölümlerindeki seyir sürelerinde ve istasyondaki bekleme sürelerinde kaçınılmaz değişkenlikler meydana gelir ve böylece çizelgeden sapmalar (gecikmeler) ortaya çıkar.

Gecikme, bir etkinliğin gerçekleşme zamanı ile planlanan zamanı arasındaki pozitif farktır. Demiryolu sistemlerinde bu etkinlik kalkış, varış veya geçiş hareketidir. Birincil gecikme, çeşitli bozulmalardan kaynaklanan, yani diğer trenlerin neden olmadığı gecikmelerdir. İkincil gecikme, diğer trenlerden kaynaklanan gecikmelerdir. Demiryolu sistemlerindeki karşılıklı bağımlılıklar nedeniyle, gecikmelerin önemli bir kısmında ikincil gecikmelerin etkisi görülmektedir.

Bir istasyonda/kesimde gecikmiş olan bir tren, akım aşağı istasyonlarda geç gelmeye ve geç kalkmaya devam edebilir (Wen vd., 2017). Yoğun şekilde kullanılan ağlarda, tek bir trenin gecikmesi, aynı altyapıyı paylaşan ve/veya yolcu transferi, vagon veya mürettebat bağlantısına sahip olan diğer trenlere kolayca aktarılabilir (gecikme yayılımı) (Goverde, 2010; Kecman vd., 2013). İyi yönetilmemesi durumunda, herhangi bir gecikme, demiryolu hizmetlerinin performansını düşürebilir, seyahat süresini uzatabilir, yolcuların aktarmalarını kaçırmasına neden olabilir ve hizmet kalitesini düşürebilir (Huang vd., 2019).

Zaman çizelgesinin tasarım aşamasında bu olumsuz etkileri azaltmanın ve dakiklik performansını arttırmanın bir yolu, zaman çizelgesinin gecikmeleri karşılayabilme özelliğini (sağlamlığını) iyileştirmektir (Wen vd., 2017). Bir trenin çizelgeden sapmasını (kısmen) azaltmak ve gecikmenin diğer trenlere yayılmasını sınırlandırmak için orer tasarlanırken tren hareketlerine tolerans süreleri eklenir. Tolerans süreleri, çizelgedeki planlanan seyir süresi (planlanan bekleme süresi) ile gereken minimum seyir süresi (minimum bekleme süresi) arasındaki farktır (Wen vd., 2017). Tolerans süreleri, her bir istasyonda, istasyonda bekleme süresine ve her bir kesimde seyir süresine ek dakikalar olarak tahsis edilir. Başlıca işlevleri, güvenilir tren işletimi sağlamak, gecikme yayılımını önlemek ve tren işletimindeki aksaklıklar nedeniyle kaybedilen zamanın geri kazanılmasını

sağlayarak orere uyumu maksimize etmektir (Abril vd., 2008). Genel olarak tren hizmetlerinin dakikliği, tolerans sürelerinin boyutuyla birlikte artar. Öte yandan bu sürelerin büyüklüğünün artması, seyahat sürelerinde artışa ve kapasite tüketimine neden olur (Jovanović vd., 2017; Rudolph ve Radtke, 2006).

Tolerans süreleri sadece trenin orerden saptığı durumlarda kullanılabilir. Tam olarak kullanılmayan tolerans süreleri sonraki istasyon ve kesimler için biriktirilemez, yani kullanımı belirli bir istasyon ve kesim ile sınırlıdır (Yang vd., 2019). Minimum kapasite kaybı ile tren hizmetlerinin dakikliğini istenen seviyede tutmak için, tolerans süreleri doğru yerde doğru büyüklükte tahsis edilmelidir. Farklı kesimlerdeki (istasyonlardaki) işletim koşullarının farklılıkları nedeniyle, tolerans sürelerin optimum değerlerini bulmak zordur (Huang vd., 2019). Ortaya çıkabilecek gecikmelerin yeri ve büyüklüğünün doğru tahmin edilmesi, tolerans sürelerinin etkili tahsisine, bu sürelerin tam olarak kullanılmasına ve kapasitenin boşa harcanmamasına yardımcı olabilecektir.

Planlanmış seyir ve bekleme süreleri genellikle küçük değişkenlikleri telafi etmek için belirli tolerans süreleri içerse bile, daha ciddi aksaklıklar, planlanmış sürelerin aşılmasına neden olur (J. Yuan ve Hansen, 2002). Sonuç olarak, gecikmeler meydana gelmeye devam edebilir. Gecikme yönetimi ve trenlerin düzenlenmesi sırasında sevk görevlileri (dispeçerler), bir trenin başka bir gecikmiş treni beklemesi gerekip gerekmediğine karar vermelidir. Trenlerin varış, kalkış ve geçiş zamanlarının veya gecikmelerinin tahminlerinin, oldukça karmaşık olan bu karar süreçlerinde yardımcı olarak değerlendirilmesi faydalı olabilmektedir (Berger vd., 2011). Ayrıca, trenlerin akım aşağı istasyonlardaki gecikmesinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, hizmet güvenirliğini arttırmaya ve yolcu memnuniyetini arttırmak için beklenen gecikmeyi yolculara bildirmeye yardımcı olabilmektedir (Wen vd., 2017).

1.1 Literatür Özeti

Günümüzde, tren hareketlerinin zamanının ve/veya tren gecikmelerinin tahmini, araştırmacılar için popüler bir problem haline gelmiştir. Bu konuyu ele alan kaynakların bazıları gözden geçirilmiştir. Gerçek zamanlı tren planlaması ve trafik yönetimindeki modeller ve algoritmalar için kapsamlı literatür incelemeleri bulunmaktadır. (Cacchiani vd., 2014; Corman ve Meng, 2015). Bu incelemeler, tren gecikme tahmini ve yayılımı, zaman çizelgesindeki tolerans sürelerinin tahsisi ve zaman çizelgesi sağlamlığı gibi çeşitli gerçek demiryolu operasyon problemlerini kapsamaktadır.

Sunulan tahmin modelleri, deterministik ve stokastik olarak sınıflandırılabilir. Deterministik modeller, gelecekteki tren hareketleri hakkında tam bilgi sahibi olunduğunu kabul etmektedir. Öte yandan, stokastik modeller, tren hareketlerinin belirsizliğini modellemek için her bir tren hareketini bir olasılık dağılımı ile ilişkilendirmektedir.

Deterministik tahmin modelleri, tren trafiğini çoğunlukla düğüm (olay) ve bağlantı (süreç) grafikleri ile temsil edilen bir dinamik sistem olarak modellemektedir. Dikkate alınan olaylar, istasyon olaylarını (varış/kalkış/geçiş) ve modelleme seviyesine bağlı olarak sinyal geçişi olaylarını içerir. Teorik hesaplarda kullanılan tahmin yaklaşımlarının çoğunluğunu, seyir ve/veya bekleme sürelerinin tahminleri oluşturmaktadır. İstasyonlar arasındaki kesim seyir süreleri, genellikle demiryolu taşıtlarının ve altyapının dinamik özelliklerine bağlı olan genel hareket denklemi kullanılarak hesaplanır. İstasyonda bekleme süreleri sabit değerler olarak kabul edilir. Bu tür deterministik tahmin modellerinin bir örneği İsviçre trafik kontrol sisteminde uygulanmıştır (Dolder vd., 2009). Kullanılan model ile her bir trenin konumu güncellendikten sonra, algoritma ile kritik yollar hesaplanarak grafikteki tüm olay zamanlarının tahminleri üretilir. Başka bir örnek (Fukurami ve Yamamoto, 2001), Japonya'da yüksek hızlı tren ağında bir tahmin sistemi için uygulanmıştır.

Deterministik tahmin modelleri ile geçmiş veriler kullanılarak istatistiksel analiz ve veri madenciliği teknikleri uygulanarak da tren hareketlerine ilişkin tahminler

yapılabilir. Bu tür bir çalışma, seyir ve bekleme sürelerini başlangıç gecikmesi ve zirve saat gibi faktörlere bağlı olarak tahmin etmek için uygulanmıştır (Kecman, 2014). Bir başka örnekte, gerçek zamanlı tren gecikmelerinin belirlenmesi ve kesimlerdeki seyir sürelerinin tahmini üzerinde çalışılmıştır (Hansen vd., 2010). Yazarlar, akım aşağıda bir sonraki istasyona kadar olan seyir süresinin önerilen teknik kullanarak yüksek hassasiyetle tahmin edilebileceğini bildirmektedir. Gorman (2009) tarafından karşılaşma, geçiş, öne geçme gibi faktörlerin fonksiyonu biçiminde bir ekonometrik model geliştirilmiş ve %4,6 mutlak ortalama yüzdesel hata (MAPE) ile nispeten iyi sonuçlar almıştır. Birincil ve ikincil gecikmelerin yayılımı, (Müller-Hannemann ve Schnee, 2009) tarafından deterministik olarak incelenmiştir. Goverde (2010), periyodik çizelgeler için deterministik gecikme yayılım algoritması sunmuştur. Seyir halindeki tren hareketlerinin gerçekleşme zamanının tahmini için geçmiş verilere dayalı modelin sunulduğu bir çalışmada Kecman ve Goverde (2013), istasyonlar arasındaki seyir süresinin gerçekleşen çatışmanın süresine bağlı olduğu gösterilmiştir. Sunulan model, bir çatışmanın meydana geleceğini öngörmekte ve çatışmanın süresine bağlı olarak trenin seyir süresini tahmin etmektedir. Marković vd. (2015), tren varış gecikmelerini analiz etmek için makine öğrenme tekniklerini araştırmışlardır. Oneto vd. (2017, 2018), makine öğrenme teknikleri kullanarak dinamik bir tren gecikme tahmin sistemi geliştirmiştir. Yazarlar, modellerinin gecikmeleri mevcut yaklaşımlardan daha iyi tahmin edebileceğini bildirmektedir. Murali vd. (2010), tarifeli olmayan tek ve çift hatlı demiryollarında yük trenleri için bir gecikme tahmin tekniği geliştirmiştir. Yazarlar gecikme tahmini için bir simülasyon modeli ve regresyon tekniği kullanmışlardır. Ayrıca bazı ağ karmaşıklıklarının üstesinden gelmek için basitleştirici toplulaştırma tekniği sunmuşlardır. Yaklaşımın geçerliliği gözlemlenen ve tahmin edilen gecikmelerin karşılaştırılmasıyla gösterilmiştir. Wen vd. (2017) tarafından yapılan çalışmada çoklu doğrusal regresyon (multiple linear regression, MLR) ve rassal orman regresyonu (random forest regression, RFR) yöntemleri kullanılarak yüksek hızlı trenler için veriye dayalı gecikme telafisi için tahmin modeli geliştirilmiştir. RFR modeli ile, tahmin doğruluğu açısından MLR'den daha iyi sonuçlar elde edilmekle

birlikte, her iki modelin de iyi performans gösterdiği belirtilmiştir. Değerlendirme sonuçları, tahmin toleransı 3 dakika olduğunda, RFR modelinin tahmin doğruluğunun %90,9'a ulaşabileceğini, bu değerin ise MLR modelinde %84,4 olduğunu göstermektedir. Deterministik yaklaşımlar ile, daha gelişmiş olan veri tabanlı modeller, açıklayıcı değişkenler kullanarak seyir süresi değişiminin büyük ölçüde açıklanabilmesine rağmen, özellikle bekleme sürelerinin değişimi hâlâ tam olarak çözülememiştir.

Büker ve Seybold (2012), gecikmeyi rastgele değişken olarak ele alarak, mezoskopik graf tabanlı modele stokastik bakış açısını dahil etmiştir. Gecikmeleri uygun dağılım fonksiyonları ile tarif etmiş ve gecikme yayılımını hesaplamak için analitik yöntemler kullanmışlardır. Bir başka çalışmada (Hagstrom, 1988), tren hareketleri projelerdeki faaliyetler gibi ele alınarak PERT ile olay ağları kurulmuştur. Her faaliyetin süresinin ilişkili bir olasılık dağılımına sahip olduğu kabul edilmiştir. Çalışmada proje tamamlanma süresinin genel dağılımı ile ilgilenilmiştir.

Literatürdeki stokastik modeller genel olarak zaman çizelgesi sağlamlığını (robustness), kararlılığını ve esnekliğini analiz etmek amacıyla geliştirilmiştir (Goverde, 2013). Medeossi vd. (2011), her bir tren için işgal sürelerinin stokastik olarak belirlenmesi sürecinde, genel hareket denklemi parametrelerini kalibre etmek için tren olay verileriyle birlikte blok işgal süresi verilerini kullanmıştır. Yuan ve Hansen (2007), karmaşık istasyon alanları için ayrıntılı bir analitik stokastik gecikme yayılım modeli kullanılmıştır. İlk olarak, kalkış ve varış yapan trenlerin ayrı ayrı ikincil gecikmelerini belirlemek için analitik formüller verilmiştir. Varış ve kalkış zamanlarının koşullu olasılık dağılımları, rasgele değişkenlerin toplamının dağılımı kullanılarak hesaplanmıştır. Berger vd. (2011), gecikme tahmininde stokastik graf tabanlı çevrimiçi uygulamalar için uygun bir model oluşturmuştur. Seyir süreleri rastgele değişkenler olarak modellenmiştir. Yazarlar, her tren tipi için kalkış saatine bağlı olarak, seyir süreleri için çeşitli olasılık dağılımları önermiştir. Corman ve Kecman (2018), Bayes ağlarını kullanarak gerçek zamanlı tren gecikme tahmini için stokastik bir model önermektedir. Modelin temel bileşenleri, istasyonlardaki tren gecikme

dağılımlarıdır ve yeni veri bulundukça, ilgili dağılım güncellenmektedir. Trenlerin sırası değiştirilirse tahmin modelinin de güncellenmesi gerekmektedir. Şahin (2019), homojen Markov zincirlerine dayanan bir tren gecikme tahmin modeli geliştirmiştir. Bir başka çalışmada (Kecman vd., 2015), tren gecikmelerinin belirsizliğini modellemek için, zamanda durağan olmayan Markov stokastik süreci kullanılmıştır. Model, Pekin ve Şangay arasındaki yüksek hızlı tren için uygulanmıştır. Daha fazla veri elde edildikçe ilgili olasılık dağılımı belirli periyotlarla değiştirilmektedir. Yazarlar, böylece %71 oranında daha iyi tahminler yapıldığını bildirmektedir. Yuan ve Hansen (2002), Hollanda'da The Hague HS (Den Haag HS) istasyonunda trenlerin kalkış zamanlarındaki dakiklik seviyesini tahmin etmek için stokastik bir gecikme yayılma modeli sunulmuştur. Sonuçta trenlerin %87'den fazlasının The Hague HS'e 3 dakikadan daha az bir gecikmeyle ulaştığı ve dakiklik düzeyinin iyi olduğu gösterilmiştir. Varış gecikmelerinin ve istasyonda fazladan bekleme sürelerinin dağılımına dayanarak geç varış durumunda kalkış gecikmeleri tahmin edilmiştir. Khadilkar (2017) tarafından yapılan çalışmada, önerilen veriye dayalı stokastik gecikme yayılma modeliyle elde edilen birincil ve ikincil gecikme tahminleri, çizelge sağlamlığını değerlendirmek için kullanılmıştır. Literatürde, stokastik modelleme yöntemlerini kullanarak gecikme yayılımı konusunda bir çok çalışma (Carey ve Kwieciński, 1994, 1995; Meester ve Muns, 2007) mevcuttur.

OpenTrack (Nash ve Huerlimann, 2004) veya RailSys (Siefer ve Radtke, 2006) gibi mikroskobik simülasyon araçları, seyir süreleri, bekleme süreleri ve gecikmeler için doğru tahmin sonuçları verebilmektedirler. Ancak, altyapı ve tren dinamiğinin modellenmesinin yüksek düzeyde ayrıntı içermesi nedeniyle bu modeller, büyük ölçekli ve yoğun olarak kullanılan (ağ kullanımı yüksek) ağlar için uygun değildir.

1.2 Tezin Amacı

Gecikme analizi, tren hizmetlerinin dakiklik düzeyini belirlemek ve mevcut tolerans sürelerinin verimliliğini değerlendirmek için kullanılabilir. Bunun için

tren işletimlerinin geçmiş verilerine dayanarak, tren gecikmelerinin değişim davranışı gerçek verilerden kesim (istasyon) düzeyinde incelenmelidir.

Trenler, yaklaşık olarak tahmin edilebilir olasılıklarla tahmin edilemeyen aksaklıklarla karşılaşabilir ve böylece gecikebilirler (Huang vd., 2019). Demiryolu işletiminde ortaya çıkan ana zorluklardan biri, trenlerin gecikmesi durumunda, bu gecikmelerin doğru tahmin edilmesidir. Tren hareketlerinin gerçekleşeceği zamanları ve gecikmeleri tahmin etmenin zorluğu, kesimde seyir ve istasyonlarda bekleme sürelerinin belirsizliği ve öngörülememesinden kaynaklanmaktadır (Berger vd., 2011). Ortaya çıkabilecek geciktirmelerin yeri ve büyüklüğünün doğru tahmin edilmesi, tolerans sürelerinin etkili tahsisine, bu sürelerin tam olarak kullanılmasına ve demiryolu altyapısının daha iyi kullanılması ile kapasitenin boşa harcanmamasına yardımcı olabilir. Ayrıca bir demiryolu hattındaki trenlerin akım aşağı istasyonlardaki gecikmesinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, hizmet güvenirliğini arttırmaya ve yolcu memnuniyetini arttırmak için beklenen gecikmeyi yolculara bildirmeye yardımcı olabilir (Wen vd., 2017). Bu sebeplerle demiryolu işletiminde, trenlerin gecikmesi durumunda, bu gecikmelerin, seyahatin devamında büyüklüğünün nasıl değişeceğinin ve telafi edilmesinin ne kadar süreceğinin doğru tahmin edilmesi önemlidir. Ancak gecikme tahmini, tren hareketlerini bozan etkilerin getirdiği belirsizlikler sebebiyle zordur. Uygulamada trafik kontrol merkezlerinde sadece son ölçülen tren gecikmeleri bilinmektedir ve dispeçerler, genellikle yeterli bilgisayar desteği olmadan sadece tecrübe ile tren hareketlerinin zamanlarını tahmin etmelidir. Bazı demiryolları, gecikmeleri tahmin etmek için zaman çizelgesinin mevcut gecikme (başlangıç gecikmesi) kadar ötelenmesini kullanır (Kecman ve Goverde, 2013). Yani, genellikle uygulamada gecikme tahmini, mevcut gecikmelerin sabit kalacağı kabulü ile gerçekleştirilir. Bu uygulamalar, bazı trenlerin tolerans sürelerini kullanarak gecikmeyi (kısmen) telafi edebileceğini ve bazı trenlerin ise çeşitli aksaklıklar sebebiyle (daha fazla) gecikebileceğini ihmal eder. Bu durum, trenlerin gecikme tahmini/analizi için pratik ve güvenilir modelleme ihtiyacını işaret eder. Bu tezin amacı bu ihtiyacı karşılayacak bir alternatif model/yöntem geliştirmektir.

1.3 Hipotez

Bu tez kapsamında, çeşitli belirsizliklerden kaynaklanan rastgelelik sebebiyle tren hareketlerinin temsili için stokastik modelleme yaklaşımlarının uygun olduğu savunulmaktadır. Bu bağlamda kullanılan Markov zincirlerinin, işletilen trenlerin ağ, hat, yön ve tren bazında gecikme ve dakiklik analizi için, aynı zamanda mevcut tolerans sürelerinin verimliliğini değerlendirmek için çok yönlü bir analiz ve tahmin yöntemi olduğu düşünülmektedir. Gerçekleşecek tren gecikmelerinin tahmininde, mevcut gecikmenin değişmeden kalması yaklaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak gerçekte birçok durum bunun tersi biçimde gözlemlenebilmektedir. Markov zincirlerinin aynı zamanda tren gecikmelerinin daha doğru tahmini için kullanılabilecek bir modelleme aracı olduğu öngörülmektedir. Gerçekleşecek tren gecikmelerine yönelik iyi bir tahmin hem yolcuları bilgilendirmek için kullanılabilecek hem de demiryolu işletiminin performansının artmasına fayda sağlayacaktır. Elde edilecek analiz ve tahmin sonuçları, (yeniden) çizelgeleme sürecinde tolerans sürelerinin (yeniden) tahsisi için hem öncelik verilmesi gereken yerler hem de tolerans süresinin büyüklüğü konusunda bir kılavuz işlevi görebilecektir.

Bazı temel kavramların açıklandığı, literatür özeti, tezin amacı ve hipotezin yer aldığı birinci bölümün ardından tez, matematiksel modelin açıklandığı Markov Zincirleri bölümü ile devam edecektir. Bunu, incelenen demiryolu ağının ve kullanılan verilerin tanıtıldığı üçüncü bölüm takip edecektir. Dördüncü bölüm, Markov zincirleri modelinin tren hareketlerine uyarlanmasını ve bunun için homojenlik ve durağanlık kabullerinin istatistiksel olarak test edilmesini içerecektir. Beşinci bölüm, dakiklik ve gecikmenin değişim davranışı gibi analizleri kapsayacak olup bunu, gecikmelerin tahmini için olasılık dağılımların belirlendiği altıncı bölüm ve bu dağılımların gecikme değerine dönüştürüldüğü yedinci bölüm takip edecektir. Sonuçlar ve öneriler bölümü ile tez tamamlanacaktır.

2
MARKOV ZİNCİRLERİ

Matematiksel modeller genel olarak olasılıksal veya deterministik olarak sınıflandırılabilir. Olasılıksal modellerin daha uygun olduğu durumlar için çoğu zaman bir rastgele değişkenler topluluğu göz önüne alınır. Bir parametre (zaman, mekân, ölçüm, gözlem vb.) ile indekslenen rastgele değişken toplulukları (2.1) stokastik (rastgele) süreçler olarak bilinir (Bhat ve Miller, 2002).

$$X_l : \quad l \in L \tag{2.1}$$

Burada l, L indis kümesine ait bir indistir. X_l, rastgele değişkenin l zamanındaki/konumundaki/ölçümündeki durumudur. Rastgele değişkenin bulunabileceği durumların tanımlandığı uzay (durum uzayı), sürekli (reel sayılı, sayılamaz) veya kesikli (tam sayılı, sonlu veya sayılabilir) değerlerden oluşabilir. Buna göre, ilgili stokastik süreç, sürekli- durumlu stokastik süreç veya kesikli-durumlu stokastik süreç olarak isimlendirilir. Benzer şekilde indis kümesi L de sürekli veya kesikli olabilir. Buna göre indisin zaman olması durumda süreç sürekli-zamanlı veya kesikli-zamanlı stokastik süreç olarak isimlendirilir (Çelik 2013).

Markov süreci, Markovyen özelliğe sahip (hafızasız) stokastik süreçlere denir. Markovyen özellik, rastgele değişkenin gelecekteki durumlarına ilişkin olasılıkların, yalnızca hâlihazırdaki (mevcut) durumuna bağlı olma durumudur. İndis kümesinin kesikli olması durumunda Markov süreci, Markov zinciri olarak adlandırılır. Markov zincirleri için Markovyen özellik (2.2):

$$P(X_{l+1} \mid X_l, X_{l-1}, \ldots, X_1, X_0) = P(X_{l+1} \mid X_l) \tag{2.2}$$

Burada P, l zamanından/konumundan $l+1$ zamanına/konumuna kadar durum değişim olasılığını temsil eden, rastgele değişken X 'in bir fonksiyonudur. X_0, X_1, …, X_{l-1} önceki durumlar ve X_l mevcut durumdur.

L indis kümesinin eleman sayısı (durum sayısı) "K" olmak üzere i durumundan j durumuna geçişlerin sayısı (n_{ij}) olduğunda, i durumundan tüm durumlara geçişlerin sayısı n_i (2.3) (Tablo 2.1):

$$n_i = \sum_{j=1}^{K} n_{ij} \tag{2.3}$$

Tablo 2.1 Geçiş sayıları

i \ j	1	2	3	...	K	$\sum_{j=1}^{K} n_{ij}$
1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	...	n_{1K}	n_1
2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	...	n_{2K}	n_2
3	n_{31}	n_{32}	n_{33}	...	n_{3K}	n_3
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
K	n_{K1}	n_{K2}	n_{K3}		n_{KK}	n_K
						n

Bu durumda, maksimum olabilirlik çıkarımına (maximum likelihood estimation) göre i'den j'ye geçiş olasılığı p_{ij} (2.4):

$$p_{ij} = n_{ij}/n_i \tag{2.4}$$

Markov zinciri için (tek adım) geçiş olasılıkları matrisi (2.5), durum sayısı kadar satır ve sütundan oluşan bir kare matristir. Bu matrisin (i,j) elemanı, p_{ij}, geçiş olasılığını temsil etmektedir.

$$P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1K} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2K} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{K1} & p_{K2} & \cdots & p_{KK} \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

Geçiş olasılıkları matrisi, stokastik bir matris olduğu için, matrisin her bir satırında, elemanların toplamı 1'e eşittir (2.6).

$$p_{ij} = \sum_{j=1} p_{ij} = 1 \tag{2.6}$$

Birden fazla adım (geçiş) için geçiş olasılıkları matrisi $P^{(T)}$, (her adıma ait) geçiş olasılıkları matrislerinin sırasıyla çarpımından bulunabilir (2.7).

$$P^{(T)} = {}_1P \times {}_2P \times {}_3P \times \ldots \times {}_tP \tag{2.7}$$

Burada $P^{(T)}$, T adım geçiş olasılıkları matrisi; ${}_tP$, t'nci adıma ait geçiş olasılıkları matrisidir ($t=1, 2, \ldots, T$).

Eğer i durumundan j durumuna geçiş olasılığı p_{ij}, tüm adımlarda eşit kabul edilirse (homojenlik kabulü) (2.8), T adım için geçiş matrisi, tek adım için geçiş olasılıkları matrisinin adım sayısı kadar kuvveti alınarak bulunabilir (2.9):

$$P(X_{l+1} = j \mid X_l = i) = p_{ij} \tag{2.8}$$

$$P^{(T)} = P^T \tag{2.9}$$

Başlangıçtaki durumu (q_j) bilinen bir rastgele değişkenin başlangıç/mevcut durum vektörü, Q_0 (2.10):

$$Q_0 = [q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_K] \tag{2.10}$$

Başlangıç/mevcut durum vektörünün elemanları toplamı 1'e eşittir (2.11).

$$\sum_{j=1}^{K} q_j = 1 \tag{2.11}$$

Süreç içindeki herhangi bir anda mevcut (başlangıç) durumu i olan bir rastgele değişkenin T adım sonraki durumlarına ilişkin (koşullu) olasılıklar (e_j) (2.12), başlangıç/mevcut durum vektörü ile T adım geçiş olasılıkları matrisinin çarpımından elde edilebilir ve bir vektör şeklinde gösterilir (2.13):

$$E_i = Q_0 \times P^{(T)} \tag{2.12}$$

$$E_i = [e_1 \quad e_2 \quad \dots \quad e_K] \tag{2.13}$$

Koşullu olasılık vektörünün (E) elemanları toplamı 1'e eşittir (2.14).

$$\sum_{j=1}^{K} e_j = 1 \tag{2.14}$$

Geçiş olasılıkları matrisinde her bir durumdan tüm durumlara bir veya daha fazla adımda geçişinin mümkün olduğu (geçiş olasılıkları matrisi ergodik olan) homojen Markov zincirlerinde adım sayısı (T) çok büyük değerlere ulaştığında her bir duruma geçiş olasılığı durağanlaşmakta, matrisin aynı sütununda bulunan olasılıklar birbirlerine yakınsamakta, her satır birbirinin aynısı olmakta yani başlangıç durumunun önemi kalmamaktadır (2.15).

$$\lim_{T \to \infty} P^{(T)} = \begin{bmatrix} \pi_1 & \pi_2 & \dots & \pi_K \\ \pi_1 & \pi_2 & \dots & \pi_K \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \pi_1 & \pi_2 & \dots & \pi_K \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

Buna kararlı durum olasılıkları (π_j) denir ve bir vektör şeklinde gösterilir (2.16).

$$\pi = [\pi_1 \quad \pi_2 \quad \dots \quad \pi_K] \tag{2.16}$$

Kararlı durum olasılıklarının toplamı 1'e eşittir (2.17).

$$\sum_{j=1}^{K} \pi_j = 1 \tag{2.17}$$

Kararlı durum vektörü ile geçiş olasılıkları matrisinin çarpımı yine kararlı durum olasılıklarına eşit olmaktadır (2.18).

$$\pi = \pi . P \tag{2.18}$$

(2.18) eşitliğinden K adet K bilinmeyenli doğrusal denklem takımı elde edilir ve bu denklem sistemi çözülerek kararlı durum olasılıkları hesaplanır. Elde edilen

denklemler birbirlerine bağımlı olduğu (ve bu denklem takımının sonsuz sayıda çözümü bulunduğu) için çözümü kolaylaştırmak için bu denklemlerden birinin yerine (2.17) eşitliği kullanılır. Böylece, denklem takımı için tekil bir sonuç olan, kararlı durum olasılıkları elde edilir.

Ergodik bir Markov zinciri için z_{ij}, hâlihazırda i durumunda iken j durumuna geçmek için beklenen adım sayısı olmak üzere, z_{ij}, i durumundan j durumuna ortalama ilk geçiş adım sayısı olarak adlandırılır (Winston, 2003). Hâlihazırda i durumunda olunduğuna göre p_{ij} olasılığıyla bir adım sonra j durumuna geçilecektir. Bir adım sonra j dışındaki herhangi bir duruma ($u \neq j$) geçiş olasılığı p_{iu} olacaktır ve j durumuna geçiş için ortalama z_{uj} adım daha gerekli olacaktır (2.19).

$$z_{ij} = p_{ij} \cdot (1) + \sum_{u \neq j}^{K} p_{iu} \cdot (1 + z_{uj}) \tag{2.19}$$

Markov matrisinin her satırının toplamı 1'e eşit olduğuna göre (2.20):

$$p_{ij} + \sum_{u \neq j}^{K} p_{iu} = 1 \tag{2.20}$$

(2.19) eşitliğinde 2. terim parantez içine dağıtılır ve (2.20) eşitliği yerine yazılırsa (2.21):

$$z_{ij} = p_{ij} + \sum_{u \neq j}^{K} p_{iu} + \sum_{u \neq j}^{K} p_{iu} \cdot z_{uj} = 1 + \sum_{u \neq j}^{K} p_{iu} \cdot z_{uj} \tag{2.21}$$

(2.21)'deki gibi oluşturulan doğrusal denklemler çözüldüğünde tüm ortalama ilk geçiş adım sayıları hesaplanabilir. Köşegende yer alan elemanlar, denklem takımının çözümünü kolaylaştırmak için, (2.22) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanabilir.

$$z_{ii} = \frac{1}{\pi_i} \tag{2.22}$$

2.1 Markov Zincirleri için Markovyen Özellik Testi

Genel olarak, bir olgunun eğilimine ilişkin tahmin yapılırken hem geçmiş hem de şimdiki durumları dikkate alınmaktadır. Buna örnek olarak, aynı torbanın içinde sayıları bilinen mavi ve kırmızı top bulunması durumunda, çekilecek topun rengine ilişkin olasılıkların, sadece son çekilen topun rengine değil daha önce çekilen tüm topların da rengine bağlı olması verilebilir. Mavi veya kırmızı lambası yanan ve belirli aralıklarla (örneğin 1 dakika aralıklarla) zar atıp, zarın üst yüzündeki sayı dörtten büyük ise ışığın rengini değiştiren bir cihaz düşünüldüğünde ise, bu cihazın lamba renginin değişimi markovyen bir süreçtir. Çünkü, bu cihazın 5. dakikada mavi ışık yaktığı biliniyor ise, 6. dakikada kırmızı ışık yakma ihtimali (%33) daha önceki dakikalarda hangi ışığı yaktığına bağlı değil, ancak 5. dakikada yaktığı ışığın rengine bağlıdır. Yani, bazı stokastik süreçler Markovyen özelliğe sahip olduğunda, gelecekteki durum, sadece mevcut durum ile tahmin edilebilir. Dolayısıyla, tahmin sürecinde Markovyen özellik kabulü ile, geçmiş verilerin dikkate alınmasının ortaya çıkardığı bazı zorluklardan kaçınılabilir (Zhang vd., 2010). Ancak bu kabulde bulunmadan önce stokastik sürecin Markovyen özelliğe sahip olup olmadığı test edilmelidir.

Sıfır hipotezi "H_0=rastgele değişken Markovyen özelliğe sahip değildir." ve alternatif hipotez "H_1=rastgele değişken Markovyen özelliğe sahiptir." olmak üzere ve geçiş sayıları matrisinin j sütununun toplamının matrisin tüm sütunlarının ve satırlarının toplamına oranı, marjinal olasılık (2.23) olarak adlandırılırsa, ilgili istatistik (2.24), sınır dağılım olarak ki-kare dağılımına tabidir (Zhang vd., 2010).

$$p_{\cdot j} = \left(\sum_{i=1}^{K} n_{ij}\right) \Big/ \left(\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{K} n_{ij}\right) \tag{2.23}$$

$$\chi^2 = 2\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{K} n_{ij} \left| ln \frac{p_{ij}}{p_{\cdot j}} \right| \tag{2.24}$$

Durum sayısı K olmak üzere, serbestlik derecesi (2.25), *f:*

$$f=(K\text{-}1)^2 \tag{2.25}$$

Eğer ki-kare test istatistiği, kritik değerden (ki-kare tablo değerinden) büyük ise ilgili rastgele değişken (gecikme) Markovyen özelliğe sahiptir. Aksi durumda ilgili rastgele değişken (gecikme), Markovyen özelliğe sahip değildir ve Markov zincirleri ile modellenemez (Zhang vd., 2010).

2.2 Markov Zincirleri için Homojenlik Testi

S adet bağımsız örnek için geçiş olasılıkları matrislerinin benzer (homojen) mi yoksa anlamlı derecede farklı mı olduğu, hipotez testi ile araştırılabilmektedir (Bhat ve Miller, 2002). Buna göre *S* adet geçiş olasılıkları matrisinin homojen olmasına ilişkin sıfır hipotezi (2.26) ve alternatif hipotez (2.27):

$$H_0 : P_1=P_2=\ldots=P_S \qquad s=1,\ 2,\ \ldots,\ S \tag{2.26}$$

$$H_1 :\ P_1\neq P_2\neq\ldots\neq P_S \qquad s=1,\ 2,\ \ldots,\ S \tag{2.27}$$

Burada P_s; *s*'nci örnek için geçiş olasılıkları matrisidir.

Sıfır hipotezi (2.26), toplulaştırılmış geçiş olasılıkları matrisinin diğer tüm geçiş olasılıkları matrislerini temsil ettiği anlamına gelmektedir. Buna göre toplulaştırılmış geçiş olasılıkları matrisinin *ij* elemanı (2.28):

$$\hat{p}_{ij}=\left(\sum_{s=1}^{S} n_{ij}^{s}\right)\Big/\left(\sum_{s=1}^{S} n_{i}^{s}\right) \tag{2.28}$$

Burada n_{ij}^{s}, *s*'nci örnek için *i* durumundan *j* durumuna geçişlerin sayısı ve n_i^s, *s*'nci örnek için *i* durumundan tüm durumlara geçişlerin sayısı.

Ki-kare testi yapılarak sıfır hipotezi sınanabilir. Ki-kare test istatistiği (2.29), χ^2:

$$\chi^2=\frac{(GD\text{-}TD)^2}{TD} \tag{2.29}$$

Burada *GD*, gözlem değeri ve *TD*, tahmin değeridir.

Markov zincirlerinde *s*'nci örnek matrisinin *ij* değerinin ki-kare test istatistiği (2.30), $\chi^2_{s,ij}$:

$$\chi^2_{s,ij} = \frac{\left(n^s_{ij} - n^s_i \cdot \hat{p}_{ij}\right)^2}{n^s_i \cdot \hat{p}_{ij}} \tag{2.30}$$

Markov zincirleri için toplam ki-kare test istatistiği (2.31), $\sum\chi^2$:

$$\sum \chi^2 = \sum_{s=1}^{S}\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{K}\left[\chi^2_{s,ij}\right] = \sum_{s=1}^{S}\sum_{i=1}^{K}\sum_{j=1}^{K}\left[\frac{\left(n^s_{ij} - n^s_i \cdot \hat{p}_{ij}\right)^2}{n^s_i \cdot \hat{p}_{ij}}\right] \tag{2.31}$$

Örnek sayısı *S*, durum sayısı *K* olmak üzere, serbestlik derecesi (2.32), *f:*

$$f = (S\text{-}1)\cdot K \cdot (K\text{-}1) \tag{2.32}$$

Eğer ki-kare test istatistiği, kritik değerden (ki-kare tablo değerinden) küçük ise sıfır hipotezi kabul edilir. Aksi durumda sıfır hipotezi reddedilir.

2.3 Markov Zincirleri için Durağanlık Testi

Markov zincirlerinde tek adım geçiş olasılıkları matrisinin her gözlem periyodunda sabit olup olmadığı, hipotez testi ile araştırılabilmektedir (Bhat ve Miller, 2002). Buna göre geçiş olasılıklarının sabit olmasına ilişkin sıfır hipotezi (2.33) ve alternatif hipotez (2.34):

$$H_0 : P^v = P \qquad v = 1, 2, \ldots, V \tag{2.33}$$

$$H_1 : P^v \neq P \qquad v = 1, 2, \ldots, V \tag{2.34}$$

Burada P^v; *v*'nci periyot için geçiş olasılıkları matrisidir.

Sıfır hipotezi (2.33), toplulaştırılmış geçiş olasılıkları matrisinin diğer tüm geçiş olasılıkları matrislerini temsil ettiği anlamına gelmektedir. Buna göre toplulaştırılmış geçiş olasılıkları matrisinin *ij* elemanı (2.35):

$$\hat{p}_{ij} = \left(\sum_{v=1}^{V} n_{ij}^{v} \right) \Big/ \left(\sum_{v=1}^{V} n_{i}^{v} \right) \tag{2.35}$$

Burada n_{ij}^{v}, v'nci periyot için i durumundan j durumuna geçişlerin sayısı ve n_{i}^{v}, v'nci periyot için i durumundan tüm durumlara geçişlerin sayısı.

v'nci periyot matris hücreleri için ilgili istatistik (2.36), H_0 altında ki-kare dağılımına tabidir (Bhat ve Miller, 2002).

$$\chi^2_{v,ij} = 2 \cdot n_{ij}^{v} \cdot ln \frac{n_{ij}^{v}}{n_{i}^{v} \cdot \hat{p}_{ij}} \tag{2.36}$$

Toplam ki-kare test istatistiği (2.37), $\sum \chi^2$:

$$\sum \chi^2 = \sum_{v=1}^{V} \sum_{i=1}^{K} \sum_{j=1}^{K} \left[\chi^2_{v,ij} \right] = 2 \cdot \sum_{v=1}^{V} \sum_{i=1}^{K} \sum_{j=1}^{K} \left[n_{ij}^{v} \cdot ln \frac{n_{ij}^{v}}{n_{i}^{v} \cdot \hat{p}_{ij}} \right] \tag{2.37}$$

Periyot sayısı V, durum sayısı K olmak üzere, serbestlik derecesi (2.38), f:

$$f = (V\text{-}1) \cdot K \cdot (K\text{-}1) \tag{2.38}$$

Eğer ki-kare test istatistiği, kritik değerden (ki-kare tablo değerinden) küçük ise sıfır hipotezi kabul edilir. Aksi durumda sıfır hipotezi reddedilir.

3
İNCELENEN AĞ PARÇASI VE KULLANILAN VERİLER

3.1 İncelenen Demiryolu Ağı

Hollanda'da demiryolu ulaşımı, her gün milyonlarca yolcunun kullandığı çok önemli bir ulaşım şeklidir. Bir kamu şirketi olan Hollanda Demiryolları (NS), Hollanda'daki en büyük yolcu treni operatörüdür ve günde yaklaşık 6.000 tren işletmektedir (*RAS Problem Solving Competition*, 2018). Hollanda demiryolu ağı (Şekil 3.1), ağ kullanımı (kilometre başına yapılan yıllık tren-kilometre değeri) oldukça yüksek olan, dünyanın en işlek demiryolu ağlarından biridir (Vromans, 2005). Ağ kullanımı yüksek olması genel olarak daha düşük bir dakikliğe yol açar. Çünkü bu tür ağlar bozulmalara karşı oldukça duyarlıdır ve bu ağlarda yüksek bir gecikme yayılma olasılığı vardır (Vromans, 2005). Buna rağmen, Hollanda Demiryolları'nın verilerine göre, Hollanda'nın tüm hatlarında trenlerin %87'den fazlası dakiktir (J. Yuan ve Hansen, 2002). 3 dakikadan daha küçük gecikmeler genellikle Hollanda Demiryolları tarafından gecikme olarak kabul edilmez (Vromans, 2005; J. Yuan ve Hansen, 2002).

Hollanda demiryolu ağının bu tezde ele alınacak olan parçası (Şekil 3.2), 112,2 km uzunluğundadır. 26 tanesi istasyon ve 19 tanesi kontrol noktası olmak üzere toplamda 45 düğüm noktası (konum) ve bu düğüm noktalarını birleştiren 45 bağlantıdan (kesim) oluşmaktadır. Bu ağ parçasında elektrikli trenler işletilmekte olup 2 hatlı ve 4 hatlı kesimlerden meydana gelmektedir. İstasyon isimleri ve kısaltmaları, istasyonlar arasındaki mesafeler, istasyonlar arasındaki paralel hat sayısı Tablo 3.1'de gösterilmiştir.



Şekil 3.1 Hollanda demiryolu ağı (nieuws.ns.nl, 2019)



Şekil 3.2 İncelenen ağ parçası

Tablo 3.1 İstasyonlar arasındaki mesafeler ve hat sayısı

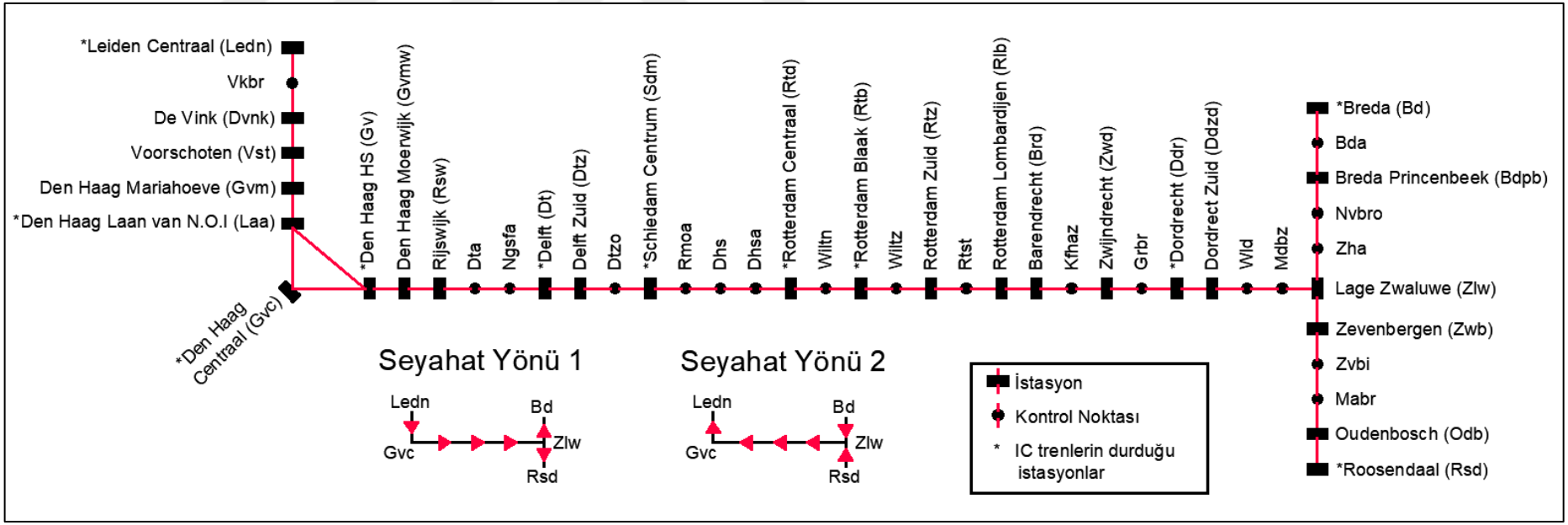
Buradan		Buraya		Mesafe (km)	Hat Sayısı
İstasyon Adı	Kısaltması	İstasyon Adı	Kısaltması		
Leiden Centraal	Ledn	De Vink	Dvnk	2,8	4
De Vink	Dvnk	Voorschoten	Vst	2,7	4
Voorschoten	Vst	Den Haag Mariahoeve	Gvm	5,9	4
Den Haag Mariahoeve	Gvm	Den Haag Laan van NOI	Laa	2,4	4
Den Haag Laan van NOI	Laa	Den Haag Centraal	Gvc	1,8	2
Den Haag Centraal	Gvc	Den Haag HS	Gv	1,3	2
Den Haag Laan van NOI	Laa	Den Haag HS	Gv	1,9	4
Den Haag HS	Gv	Den Haag Moerwijk	Gvmw	2,1	4
Den Haag Moerwijk	Gvmw	Rijswijk	Rsw	1,7	4
Rijswijk	Rsw	Delft	Dt	4,4	2
Delft	Dt	Delft Zuid	Dtz	1,9	2
Delft Zuid	Dtz	Schiedam Centrum	Sdm	8,4	2
Schiedam Centrum	Sdm	Rotterdam Centraal	Rtd	3,4	4
Rotterdam Centraal	Rtd	Rotterdam Blaak	Rtb	2	4
Rotterdam Blaak	Rtb	Rotterdam Zuid	Rtz	2,4	4
Rotterdam Zuid	Rtz	Rotterdam Lombardijen	Rlb	2,8	4
Rotterdam Lombardijen	Rlb	Barendrecht	Brd	3,1	4
Barendrecht	Brd	Zwijndrecht	Zwd	7,6	4
Zwijndrecht	Zwd	Dordrecht	Ddr	2,1	4
Dordrecht	Ddr	Dordrecht Zuid	Ddzd	2,5	2
Dordrecht Zuid	Ddzd	Lage Zwaluwe	Zlw	12	2
Lage Zwaluwe	Zlw	Breda Prinsenbeek	Bdpb	10	2
Breda Prinsenbeek	Bdpb	Breda	Bd	4,2	2
Lage Zwaluwe	Zlw	Zevenbergen	Zvb	7,5	2
Zevenbergen	Zvb	Oudenbosch	Odb	8,1	2
Oudenbosch	Odb	Roosendaal	Rsd	7,2	2

3.2 Kullanılan Veriler

Güvenilir ve kaliteli veriler, analiz ve tahminlerin isabetli olması bakımından sorunsuz ve dakik işletim için çok önemlidir. 4 Eylül 2017-8 Aralık 2017 tarihlerine ait Hollanda demiryolu ağının tamamı için gecikmeye ilişkin gerçek zamanlı veriler, Informs'un düzenlediği RAS 2018'in (*RAS Problem Solving Competition*, 2018) internet sayfasından elde edilmiştir. Yarışmalar için sağlanan veriler ve ilgili problemler, herkesin bilimsel yayınlarında ve araştırma çalışmalarında kullanabilmesi için açık erişime sunulmuştur (*RAS Problem Solving Competition*, 2017).

Bu veriler içinden incelenen ağ parçasına ait veriler ayrılmıştır. Bu veriler tarih, tren numarası, tren türü, konum, tren hareketi türü, gerçekleşme zamanı ve planlanan zaman gibi bilgileri içermektedir. Var olan bu bilgilere ek olarak her veriye ilgili tren seyahatinin bir önceki tren hareketine, bir sonraki tren hareketine, ilk tren hareketine ve son tren hareketine ait konum ve gecikme bilgileri Microsoft Excel yardımıyla işlenmiştir. Daha sonra 66 hafta içi güne ait bu verilerden, rastgele 47 güne ait olanlar (yaklaşık %70, 738894 adet) çalışma verisi, diğer 19 güne ait veriler (yaklaşık %30, 305438 adet) test verisi olarak seçilmiştir.

Veri içinde yer alan bilgilerden tren türü, şehirlerarası trenler (IC), her istasyonda duran kentiçi trenler (SPR) ve sayıca çok az olduğu için bu çalışmada dikkate alınmayan boş seyir yapan trenler (LM) olmak üzere 3 tip olabilmektedir. Tren hareketi türü, ilgili konuma varış (A), bu konumdan kalkış (V) veya bu konumdan ekspres geçiş (D) olmak üzere 3 türdür. Veriler, 26 istasyon ve bu istasyonlar arasında bulunan 19 adet kontrol noktası olmak üzere toplam 45 konum (Şekil 3.3) içermektedir. Trenler, seyahat yönü 1 ve seyahat yönü 2 olmak üzere iki yönde seyahat edebilmektedir (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Konumlar ve seyahat yönleri

4
MARKOV ZİNCİRLERİNİN TREN HAREKETLERİNE UYARLANMASI

Bir demiryolu hattındaki tren işletimleri, tren tarifesi, işletme kısıtlamaları ve çeşitli bozulmalar (demiryolu sistemi veya çevresi içindeki hatalar, arızalar veya koşullardaki değişim) gibi birçok faktörden etkilenen dinamik bir süreçtir. Diğer bir deyişle trenlerin istasyonlardaki gerçek varış ve kalkış zamanlarında, çizelge zamanlarına göre sapmalara (gecikmelere) sebep olabilecek bir dizi içsel ve dışsal etkiler bulunur. Bu durum tren hareketlerine, tren trafiğine ve genel olarak tüm demiryolu sistemine ilişkin belirsizliklere yol açar (Şahin, 2017). Tren hareketlerinin tahmininde, doğal olarak, bu etkilere bağlı belirsizlikler dikkate alınmalıdır. Tren varış, kalkış ve geçiş zamanlarının belirsiz bir süreç olarak görülmesi, stokastik modelleme yaklaşımlarının benimsendiği bir bakış açısını gerektirmektedir.

Çoğu zaman tren trafiğiyle ilgili veriler, sadece tren hareketlerinin zamanlarını kayıtlarını içerir. Bu nedenle, gecikme tahmini için ayrıntılı modeller oluşturmak için yeterli bilgi mevcut olmayabilmektedir. Bu durum, deterministik bir yaklaşım yerine tren hareketlerinin belirsizliğini modelleyen stokastik yaklaşımın uygun olacağı fikrini haklı çıkarmaktadır.

Bu tezde, stokastik süreçlere sahip sistemler için yaygın olarak kullanılan bir analiz ve modelleme aracı olan (kesikli) Markov zincirleri kullanılmıştır. Böylece ardışık tren hareketleri boyunca gecikmenin değişimi, her bir tren hareketi için gecikmelere ilişkin olasılık dağılımları üzerinden gösterilebilmiştir. Her tren seferi, bağımsız bir stokastik süreç olarak kabul edilmiştir. Ancak, aynı altyapıyı kullanan, yolcu, personel veya taşıt bağlantıları bulunan trenlerin birbiriyle olan bağımlılıkları Markov matrislerinde gömülü olarak bulunmaktadır.

4.1 Markov Matrisinin Oluşturulması

Herhangi bir konumdaki (istasyondaki/kontrol noktasındaki) bir tren hareketine ilişkin gecikme, (ilgili trenin ilgili tren hareketine ait verideki) gerçekleşme zamanı ve planlanan zaman farkından bulunur. Herhangi bir konumda bir tren hareketi (varış/kalkış/geçiş) gerçekleştiğinde, tren bir sonraki hareketini sahip olduğu gecikme değerine eşit, bu gecikmeden daha küçük veya bundan daha büyük bir gecikme değeriyle gerçekleştirebilir (Olgay vd., 2019; Şahin, 2017). Trenlerin seyahatleri boyunca gecikme durumlarının değişiminin ve geçiş süreçlerinin mekanizması, bir yönde, farklı türler (IC ve SPR), farklı konumlar (kontrol noktası, istasyon) ve farklı tren hareketleri (A, V ve D) için Şekil 4.1'de temsilen gösterilmiştir. Trenler kontrol noktalarında duruş kalkış yapmaksızın geçmektedir. SPR türü trenler tüm istasyonlarda duruş kalkış yapmaktadır. IC türü trenler sadece belli istasyonlarda durmaktadır.

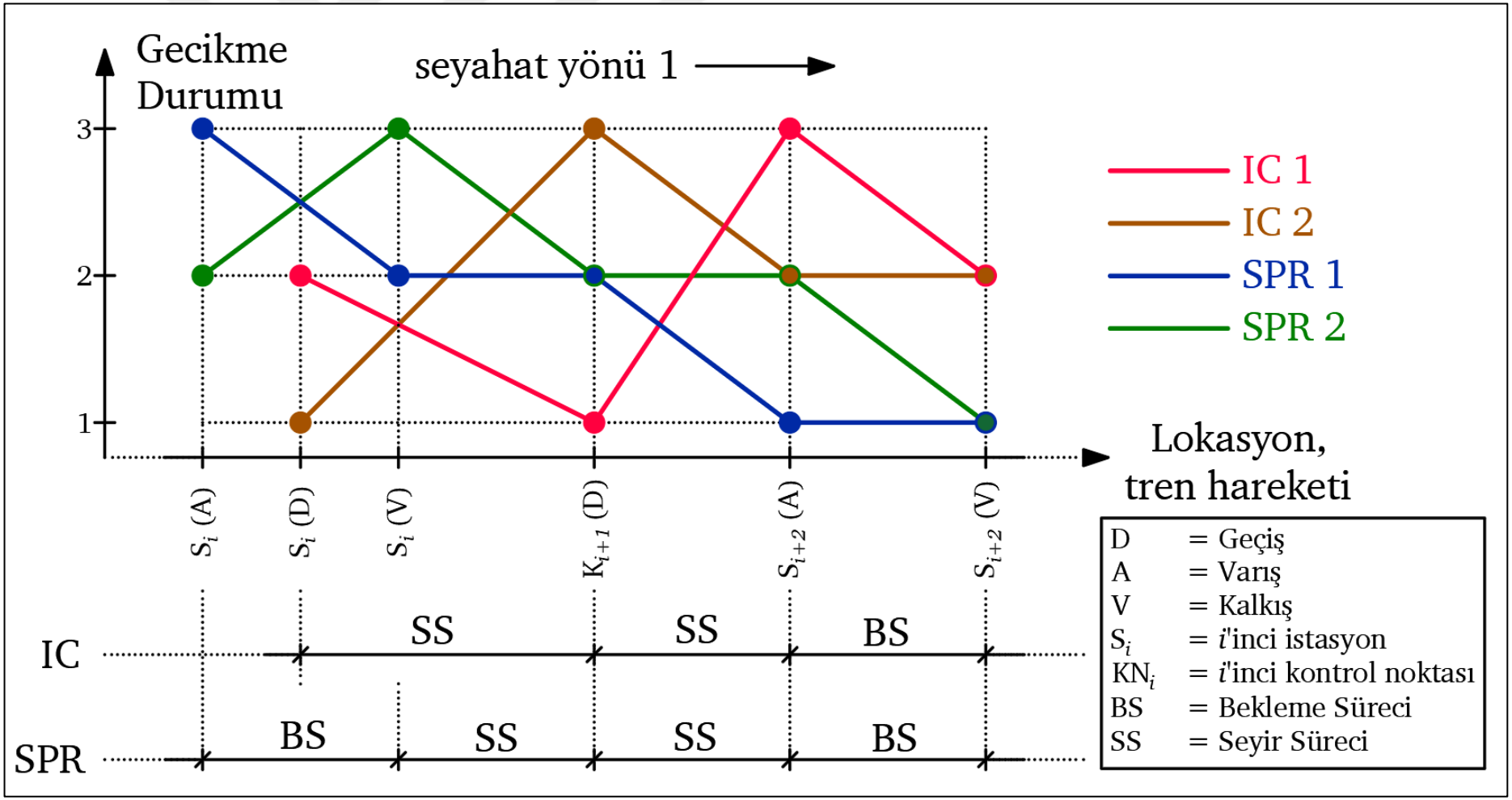
Bir tren seyahatindeki iki ardışık veriye ait gecikme değeri/durumu çifti (gecikme çifti) bir geçişi temsil eder. Bu geçiş (süreci), gecikme çiftini oluşturan verilerdeki tren hareketlerine (varış: A, kalkış: V ve ekspres geçiş: D) bağlı olarak seyir süreci (SS) veya bekleme süreci (BS) olabilir (Tablo 4.1).

Tablo 4.1 Tren hareketlerine bağlı olarak geçiş süreci

İlk Veri	İkinci Veri	Geçiş Süreci
Tren Hareketi		
A	V	BS
V	A	SS
V	D	SS
D	A	SS
D	D	SS

738894 adet eğitme verisinden elde edilen 710305 adet gecikme çifti (geçiş), önceki ve sonraki gecikme değerlerine göre gruplandırılıp her bir gecikme değerinden her bir gecikme değerine geçişlerin sayıları belirlenmiştir (Tablo 4.2). Daha sonra (2.3) ve (2.4) eşitlikleri yardımıyla her bir gecikme değerinden her bir gecikme değerine geçişin olasılığı belirlenerek geçiş olasılıkları belirlenmiştir

(Tablo 4.3). Örneğin önceki gecikmesi -4 dakika olan bir trenin sonraki gecikmesinin 0 dakika olma olasılığı, 11/33=0,3333 olarak bulunur.



Şekil 4.1 Gecikme durumlarının değişiminin ve geçiş süreçlerinin mekanizması

Tablo 4.2 Her bir gecikme değerinden her bir gecikme değerine gerçekleşen geçişlerin sayısı

d	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-5	2	2	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4	4	12	2	0	1	11	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
-3	0	33	208	79	12	46	3	10	3	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	0	4	237	901	372	399	23	7	6	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
-1	0	1	37	1042	6695	7185	206	63	26	14	8	1	6	1	0	1	0	0	0	0	0
0	0	2	3	402	10995	375921	43020	2409	649	261	116	71	36	17	17	9	12	8	4	5	3
1	0	0	1	1	34	42723	79279	12945	926	193	70	36	20	14	11	2	5	6	2	1	0
2	0	0	0	0	1	2995	12480	29834	5789	448	110	41	15	15	4	4	3	3	2	1	1
3	0	0	0	0	0	295	1156	6031	15348	3000	259	65	24	10	4	1	3	3	1	1	2
4	0	0	0	0	0	73	77	568	3195	8393	1802	166	55	20	6	4	2	1	0	1	1
5	0	0	0	0	0	35	11	47	322	1920	5031	1067	102	36	22	6	6	2	2	1	1
6	0	0	0	0	0	15	13	9	29	203	1184	3141	665	84	27	14	4	4	1	0	0
7	0	0	0	0	0	6	6	6	4	27	106	763	2112	520	83	19	1	5	2	0	3
8	0	0	0	0	0	4	1	3	5	3	20	63	631	1647	433	61	21	7	0	3	0
9	0	0	0	0	0	8	0	0	3	3	3	14	63	505	1319	378	52	12	6	2	1
10	0	0	0	0	0	4	2	1	0	1	1	1	7	51	429	1140	281	29	9	7	4
11	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	2	2	6	38	314	1011	227	38	15	6
12	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	1	0	1	4	7	35	230	651	193	29	13
13	0	0	0	0	0	2	2	1	1	1	1	0	0	4	0	6	32	174	569	158	26
14	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	2	0	0	3	25	165	500	131
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	3	13	133	388

Tablo 4.3 Gecikmeler değerleri için geçiş olasılıkları

d	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-5	0,2500	0,2500	0,0000	0,1250	0,0000	0,2500	0,1250	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
-4	0,1212	0,3636	0,0606	0,0000	0,0303	0,3333	0,0000	0,0000	0,0000	0,0606	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0303	0,0000	0,0000
-3	0,0000	0,0827	0,5213	0,1980	0,0301	0,1153	0,0075	0,0251	0,0075	0,0075	0,0025	0,0000	0,0025	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
-2	0,0000	0,0020	0,1214	0,4616	0,1906	0,2044	0,0118	0,0036	0,0031	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
-1	0,0000	0,0001	0,0024	0,0682	0,4380	0,4700	0,0135	0,0041	0,0017	0,0009	0,0005	0,0001	0,0004	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009	0,0253	0,8663	0,0991	0,0056	0,0015	0,0006	0,0003	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,3135	0,5818	0,0950	0,0068	0,0014	0,0005	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0579	0,2412	0,5765	0,1119	0,0087	0,0021	0,0008	0,0003	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0113	0,0441	0,2302	0,5857	0,1145	0,0099	0,0025	0,0009	0,0004	0,0002	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0051	0,0054	0,0395	0,2224	0,5843	0,1255	0,0116	0,0038	0,0014	0,0004	0,0003	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0041	0,0013	0,0055	0,0374	0,2230	0,5843	0,1239	0,0118	0,0042	0,0026	0,0007	0,0007	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0028	0,0024	0,0017	0,0054	0,0376	0,2195	0,5824	0,1233	0,0156	0,0050	0,0026	0,0007	0,0007	0,0002	0,0000	0,0000
7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0016	0,0016	0,0016	0,0011	0,0074	0,0289	0,2083	0,5766	0,1420	0,0227	0,0052	0,0003	0,0014	0,0005	0,0000	0,0008
8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0014	0,0003	0,0010	0,0017	0,0010	0,0069	0,0217	0,2174	0,5675	0,1492	0,0210	0,0072	0,0024	0,0000	0,0010	0,0000
9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0034	0,0000	0,0000	0,0013	0,0013	0,0013	0,0059	0,0266	0,2132	0,5568	0,1596	0,0220	0,0051	0,0025	0,0008	0,0004
10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0020	0,0010	0,0005	0,0000	0,0005	0,0005	0,0005	0,0036	0,0259	0,2181	0,5796	0,1429	0,0147	0,0046	0,0036	0,0020
11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0006	0,0012	0,0012	0,0036	0,0229	0,1889	0,6083	0,1366	0,0229	0,0090	0,0036
12	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0017	0,0017	0,0000	0,0000	0,0009	0,0009	0,0000	0,0009	0,0034	0,0060	0,0299	0,1967	0,5569	0,1651	0,0248	0,0111
13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0020	0,0020	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0000	0,0000	0,0041	0,0000	0,0061	0,0328	0,1781	0,5824	0,1617	0,0266
14	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0024	0,0036	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0024	0,0000	0,0000	0,0036	0,0301	0,1986	0,6017	0,1576
15	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0018	0,0000	0,0018	0,0000	0,0037	0,0055	0,0240	0,2458	0,7172

Tablo 4.2'de ağ parçasına ait tüm geçişler bulunmasına rağmen bazı gecikme değerlerinin gözlem sayısı oldukça azdır. Daha özel matrisler oluşturulmak istendiğinde olasılıkları doğru belirlemeye yetecek gözlem sayısı elde edebilmek ve işlem kolaylığı saylamak için gecikme değerleri gruplandırılarak gecikme durumları belirlenmiştir (Tablo 4.4). Bu durumda gecikme durumu sayısı $K=8$ olur.

Tablo 4.4 Gecikme durumları

Gecikme Durumları	Gecikme Değerleri (dak)
1	≤-1
2	0
3	1
4	2
5	3
6	4
7	5
8	≥6

Buna göre bir durumdan diğer duruma geçişlerin sayısı, ilgili gecikme değerlerine ait değerlerin toplanmasıyla elde edilir. Bu işlemin yapılacağı değerler Tablo 4.5'te çizgilerle ayrılarak gösterilmiştir.

Tablo 4.5 Geçiş sayılarının toplulaştırılması

d	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-5	2	2	0	1	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-4	4	12	2	0	1	11	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
-3	0	33	208	79	12	46	3	10	3	3	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
-2	0	4	237	901	372	399	23	7	6	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
-1	0	1	37	1042	6695	7185	206	63	26	14	8	1	6	1	0	1	0	0	0	0	0
0	0	2	3	402	10995	375921	43020	2409	649	261	116	71	36	17	17	9	12	8	4	5	3
1	0	0	1	1	34	42723	79279	12945	926	193	70	36	20	14	11	2	5	6	2	1	0
2	0	0	0	0	1	2995	12480	29834	5789	448	110	41	15	15	4	4	3	3	2	1	1
3	0	0	0	0	0	295	1156	6031	15348	3000	259	65	24	10	4	1	3	3	1	1	2
4	0	0	0	0	0	73	77	568	3195	8393	1802	166	55	20	6	4	2	1	0	1	1
5	0	0	0	0	0	35	11	47	322	1920	5031	1067	102	36	22	6	6	2	2	1	1
6	0	0	0	0	0	15	13	9	29	203	1184	3141	665	84	27	14	4	4	1	0	0
7	0	0	0	0	0	6	6	6	4	27	106	763	2112	520	83	19	1	5	2	0	3
8	0	0	0	0	0	4	1	3	5	3	20	63	631	1647	433	61	21	7	0	3	0
9	0	0	0	0	0	8	0	0	3	3	3	14	63	505	1319	378	52	12	6	2	1
10	0	0	0	0	0	4	2	1	0	1	1	1	7	51	429	1140	281	29	9	7	4
11	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	1	2	2	6	38	314	1011	227	38	15	6
12	0	0	0	0	0	2	2	0	0	1	1	0	1	4	7	35	230	651	193	29	13
13	0	0	0	0	0	2	2	1	1	1	1	0	0	4	0	6	32	174	569	158	26
14	0	0	0	0	0	0	2	3	0	0	0	0	0	2	0	0	3	25	165	500	131
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	2	3	13	133	388

Buna göre tüm (710305 adet) gecikme çiftleri kullanılarak elde edilen geçiş sayıları matrisi (4.4):

$$N = \begin{bmatrix} 9645 & 7643 & 233 & 80 & 35 & 20 & 9 & 13 \\ 11402 & 375921 & 43020 & 2409 & 649 & 261 & 116 & 182 \\ 36 & 42723 & 79279 & 12945 & 926 & 193 & 70 & 97 \\ 1 & 2995 & 12480 & 29834 & 5789 & 448 & 110 & 89 \\ 0 & 295 & 1156 & 6031 & 15348 & 3000 & 259 & 114 \\ 0 & 73 & 77 & 568 & 3195 & 8393 & 1802 & 256 \\ 0 & 35 & 11 & 47 & 322 & 1920 & 5031 & 1245 \\ 0 & 43 & 28 & 23 & 42 & 239 & 1317 & 19782 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Ağ parçasına ait tüm (710305 adet) gecikme çiftleri kullanılarak elde edilen geçiş olasılıkları matrisi (4.5):

$$P = \begin{bmatrix} 0,5456 & 0,4324 & 0,0132 & 0,0045 & 0,0020 & 0,0011 & 0,0005 & 0,0007 \\ 0,0263 & 0,8663 & 0,0991 & 0,0055 & 0,0015 & 0,0006 & 0,0003 & 0,0004 \\ 0,0003 & 0,3135 & 0,5818 & 0,0950 & 0,0068 & 0,0014 & 0,0005 & 0,0007 \\ 0,0000 & 0,0579 & 0,2412 & 0,5765 & 0,1119 & 0,0087 & 0,0021 & 0,0017 \\ 0,0000 & 0,0113 & 0,0441 & 0,2302 & 0,5857 & 0,1145 & 0,0099 & 0,0043 \\ 0,0000 & 0,0051 & 0,0054 & 0,0395 & 0,2224 & 0,5843 & 0,1255 & 0,0178 \\ 0,0000 & 0,0041 & 0,0013 & 0,0054 & 0,0374 & 0,2230 & 0,5842 & 0,1446 \\ 0,0000 & 0,0020 & 0,0013 & 0,0011 & 0,0020 & 0,0111 & 0,0613 & 0,9212 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

4.2 Markovyen Özellik Testinin Uygulanması

Trenler için gerçekleşmesi beklenen gecikme, sadece son gözlenen gecikme değerine bağlı olacaktır. Bir başka deyişle, trenler için bir sonraki gecikme, önceki gecikmelere değil ama sadece mevcut gecikme değerine bağlı olacaktır. Bu yaklaşım ile bir trenin önceki gecikmelerinin ve gecikme değişimlerinin, gelecekteki gecikmelerini tahmin etmek için kullanılmadığı yani gecikme değişiminin Markovyen özelliğe sahip "hafızasız" (4.6) bir stokastik süreç olduğu kabul edilir.

$$P(d_{l+1}=D_{l+1} \mid d_l=D_l, d_{l-1}=D_{l-1}, \ldots, d_1=D_1, d_0=D_0)$$

$$= P(d_{l+1}=D_{l+1} \mid d_l=D_l) \tag{4.6}$$

Burada l, ilgili konumdaki ilgili tren hareketinin (Bk. Bölüm 3.2) gerçekleşme zamanıdır. d_0, d_1, …, d_{l-1} önceki gecikmeler ve d_l mevcut gecikme değeridir. D_0, D_1, …, D_{l-1} önceki gecikme durumları ve D_l mevcut gecikme durumudur. P, l anında gecikmesi d_l olan bir trenin bir sonraki $l+1$ anında gecikmesinin d_{l+1} olma olasılığını temsil eden, gecikmenin bir fonksiyondur.

Bir olgunun eğilimine ilişkin tahmin yapılırken Markov zincirlerinin kullanılabilmesi için ilgili rastgele değişkenin Markovyen özelliğe sahip olması gerekmektedir. Bu nedenle Markovyen özellik kabulünün istatistiksel olarak test edilmesi gerekmektedir. Buna göre, sıfır hipotezi "H_0=tren gecikmeleri Markovyen özelliğe sahip değildir" ve alternatif hipotez "H_1=tren gecikmeleri Markovyen özelliğe sahiptir".

Bu durumda marjinal olasılık vektörü (4.7):

$$p_{\cdot j} = \begin{bmatrix} 0{,}0297 & 0{,}6050 & 0{,}1919 & 0{,}0731 & 0{,}0370 & 0{,}0204 & 0{,}0123 & 0{,}0306 \end{bmatrix} \tag{4.7}$$

Örneğin $p_{\cdot 2}$'nin (4.4) eşitliğindeki değerler kullanılarak nasıl hesaplanacağı (4.8) eşitliğinde gösterilmiştir.

$$\begin{aligned} p_{\cdot 2} &= \left(\sum_{i=1}^{8} n_{i2}\right) \Big/ \left(\sum_{i=1}^{8}\sum_{j=1}^{8} n_{ij}\right) \\ &= \frac{7643 + 375921 + 42723 + 2995 + 295 + 73 + 35 + 43}{710305} = \frac{429728}{710305} \\ &= 0{,}6050 \end{aligned} \tag{4.8}$$

Gecikme durumları için hesaplanan $n_{ij}\left|ln\frac{p_{ij}}{p_{\cdot j}}\right|$ ki-kare değerleri Tablo 4.6'da verilmiştir.

Tablo 4.6 Hesaplanan $n_{ij}\left|ln\frac{p_{ij}}{p_{\cdot j}}\right|$ ki-kare değerleri

Gecikme Durumları	$n_{i1}\left\|ln\frac{p_{i1}}{p_{\cdot 1}}\right\|$	$n_{i2}\left\|ln\frac{p_{i2}}{p_{\cdot 2}}\right\|$	$n_{i3}\left\|ln\frac{p_{i3}}{p_{\cdot 3}}\right\|$	$n_{i4}\left\|ln\frac{p_{i4}}{p_{\cdot 4}}\right\|$	$n_{i5}\left\|ln\frac{p_{i5}}{p_{\cdot 5}}\right\|$	$n_{i6}\left\|ln\frac{p_{i6}}{p_{\cdot 6}}\right\|$	$n_{i7}\left\|ln\frac{p_{i7}}{p_{\cdot 7}}\right\|$	$n_{i8}\left\|ln\frac{p_{i8}}{p_{\cdot 8}}\right\|$	Toplam
Durum 1	28079,48	2567,96	623,99	222,59	102,51	57,82	28,64	48,49	**31731,48**
Durum 2	1390,86	134943,86	28407,56	6210,59	2082,89	919,46	443,86	781,13	**175180,19**
Durum 3	169,98	28084,03	87943,87	3388,25	1570,14	514,61	222,12	365,00	**122257,99**
Durum 4	7,34	7028,85	2854,60	61606,15	6399,80	383,47	192,81	256,38	**78729,40**
Durum 5	0,00	1175,31	1699,27	6915,76	42375,96	5178,24	55,95	222,60	**57623,09**
Durum 6	0,00	348,90	275,48	349,15	5727,87	28167,02	4189,53	138,88	**39196,84**
Durum 7	0,00	175,10	55,13	121,96	3,11	4593,84	19436,47	1930,86	**26316,48**
Durum 8	0,00	245,57	139,76	97,14	123,52	144,55	2119,42	67312,68	**70182,63**
Toplam	**29647,65**	**174569,58**	**121999,66**	**78911,59**	**58385,79**	**39959,01**	**26688,81**	**71056,02**	**601218,10**

%5 anlamlılık düzeyinde (α=0,05) serbestlik derecesi (f) 49 için kritik değer 66,34 olarak hesaplanır. Bu hesap Microsoft Excel ile "=KİKARE.TERS.SAĞK(α;f)" formülü kullanılarak yapılmıştır. 66,34<2×601218,10 olduğundan tren gecikmelerinin Markovyen özelliğe sahip olduğu söylenebilir. Buna göre, tren gecikmeleri Markov zincirleri ile modellenebilir.

4.3 Homojenlik Testinin Geçiş Süreci Türü, Tren Türü ve Seyahat Yönü için Uygulanması

(4.6)'da olduğu gibi ağ parçasına ait tüm gecikme çiftleri kullanılarak geçiş olasılıkları matrisi elde edilebilir. Bununla beraber gecikme çiftleri, tren türüne ve/veya seyahat yönüne ve/veya geçiş sürecinin türüne göre gruplara ayrılıp kullanılarak her birine ait homojen olmayan (heterojen) geçiş olasılığı matrisleri elde edilebilir. Yine her istasyon ve her kesim için de gruplandırma yapılarak istasyon/kesim bazında geçiş olasılıkları matrisleri elde edilebilir. Hatta tren bazında matrisler oluşturulabilir. Geçiş olasılıkları matrisleri içerdikleri gecikme çiftlerine göre ağ bazında, hat bazında, yön bazında, tren türü bazında, istasyon/kesim bazında ve tren bazında gecikme ve dakiklik analizi yapabilmeye olanak sağlayacaktır. Ancak bu matrislerin ayrıştırılması, kalibrasyon için gerekli olan (istatistiksel olarak anlamlı) veri sayısının sağlanamama riskini ortaya çıkarmaktadır. Bunların toplulaştırılmaları (homojenlik kabulleri) ise gecikme tahminlerinin başarısı üzerinde olumsuz etki yaratabilmektedir. Bu sebeple homojenlik kabullerin istatistiksel olarak test edilmesi gerekmektedir.

Homojenlik testi yapılacak matrislerin yalnızca bir özelliği (testi edilecek özelliği) farklı olmalıdır. Örneğin geçiş olasılıkları matrislerinin geçiş süreçlerinin türüne (seyir ve bekleme) bağlı olup olmadığını araştırmak için, aynı yönde seyahat eden aynı tür trenlerin seyir ve bekleme süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulmuş geçiş olasılıkları matrisleri ayrı ayrı oluşturulup homojenlik testi yapılabilir. Benzer şekilde geçiş olasılıkları matrislerinin tren türüne bağlı olup olmadığı test edilecekse, matrislerin temsil ettiği seyahat yönü ve geçiş süreci aynı olmalıdır.

Örneğin, geçiş süreci türü için homojenlik testi yapılırken, iki tür geçiş süreci (bekleme ve seyir süreçleri) olduğu için örnek sayısı ikidir ($S=2$). Seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin bekleme süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş sayıları matrisi (4.9):

$$N_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 2 & 528 & 35 & 5 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 11730 & 1548 & 83 & 31 & 12 & 3 & 16 \\ 1 & 854 & 2504 & 403 & 26 & 6 & 2 & 7 \\ 0 & 113 & 228 & 869 & 189 & 15 & 2 & 5 \\ 0 & 0 & 54 & 142 & 413 & 110 & 8 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 28 & 74 & 236 & 65 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 55 & 135 & 40 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 8 & 33 & 943 \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin bekleme süreçlerine ait 21605 adet gecikme çifti kullanılarak oluşturulan geçiş olasılıkları matrisi (4.10):

$$P_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0,0035 & 0,9167 & 0,0607 & 0,0087 & 0,0017 & 0,0017 & 0,0035 & 0,0035 \\ 0,0002 & 0,8737 & 0,1153 & 0,0062 & 0,0023 & 0,0009 & 0,0002 & 0,0012 \\ 0,0003 & 0,2246 & 0,6584 & 0,1060 & 0,0068 & 0,0016 & 0,0005 & 0,0018 \\ 0,0000 & 0,0795 & 0,1605 & 0,6115 & 0,1330 & 0,0106 & 0,0014 & 0,0035 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0736 & 0,1935 & 0,5627 & 0,1498 & 0,0109 & 0,0095 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0681 & 0,1800 & 0,5742 & 0,1582 & 0,0195 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0800 & 0,2200 & 0,5400 & 0,1600 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0010 & 0,0081 & 0,0335 & 0,9574 \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

Seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin seyir süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş sayıları matrisi (4.11):

$$N_{1,IC,SS} = \begin{bmatrix} 4564 & 1207 & 41 & 23 & 13 & 9 & 2 & 4 \\ 3051 & 71941 & 7822 & 402 & 115 & 47 & 21 & 32 \\ 1 & 9170 & 13998 & 2251 & 177 & 44 & 21 & 24 \\ 0 & 151 & 2937 & 5502 & 1066 & 102 & 30 & 21 \\ 0 & 0 & 90 & 1427 & 2815 & 554 & 51 & 29 \\ 0 & 0 & 1 & 40 & 793 & 1578 & 373 & 64 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 29 & 488 & 1005 & 273 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 18 & 333 & 6281 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin seyir süreçlerine ait 141031 adet gecikme çifti kullanılarak oluşturulan geçiş olasılıkları matrisi (4.12):

$$P_{1,IC,SS} = \begin{bmatrix} 0{,}7785 & 0{,}2059 & 0{,}0070 & 0{,}0039 & 0{,}0022 & 0{,}0015 & 0{,}0003 & 0{,}0007 \\ 0{,}0366 & 0{,}8623 & 0{,}0937 & 0{,}0048 & 0{,}0014 & 0{,}0006 & 0{,}0002 & 0{,}0004 \\ 0{,}0000 & 0{,}3570 & 0{,}5450 & 0{,}0877 & 0{,}0069 & 0{,}0017 & 0{,}0008 & 0{,}0009 \\ 0{,}0000 & 0{,}0154 & 0{,}2994 & 0{,}5609 & 0{,}1087 & 0{,}0104 & 0{,}0031 & 0{,}0021 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0181 & 0{,}2873 & 0{,}5669 & 0{,}1116 & 0{,}0103 & 0{,}0058 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0004 & 0{,}0140 & 0{,}2783 & 0{,}5539 & 0{,}1309 & 0{,}0225 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0161 & 0{,}2719 & 0{,}5599 & 0{,}1521 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0027 & 0{,}0502 & 0{,}9471 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

İki matrisin (4.10) (4.12) birbiriyle benzer olup olmadığını test etmek için kurulan sıfır hipotezi (4.13) ve alternatif hipotez (4.14):

$$H_0 : P_{1,IC,BS} = P_{1,IC,SS} \quad (4.13)$$

$$H_1 : P_{1,IC,BS} \neq P_{1,IC,SS} \quad (4.14)$$

Toplulaştırılmış geçiş sayıları matrisi (4.15):

$$N_{1,IC,T} = \begin{bmatrix} 4566 & 1735 & 76 & 28 & 14 & 10 & 4 & 6 \\ 3053 & 83671 & 9370 & 485 & 146 & 59 & 24 & 48 \\ 2 & 10024 & 16502 & 2654 & 203 & 50 & 23 & 31 \\ 0 & 264 & 3165 & 6371 & 1255 & 117 & 32 & 26 \\ 0 & 0 & 144 & 1569 & 3228 & 664 & 59 & 36 \\ 0 & 0 & 1 & 68 & 867 & 1814 & 438 & 72 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 49 & 543 & 1140 & 313 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 26 & 366 & 7224 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

162636 adet gecikme çifti kullanılarak oluşturulan toplulaştırılmış geçiş olasılıkları matrisi (4.16):

$$P_{1,IC,T} = \begin{bmatrix} 0,7091 & 0,2695 & 0,0118 & 0,0043 & 0,0022 & 0,0016 & 0,0006 & 0,0009 \\ 0,0315 & 0,8639 & 0,0967 & 0,0050 & 0,0015 & 0,0006 & 0,0003 & 0,0005 \\ 0,0001 & 0,3399 & 0,5596 & 0,0900 & 0,0069 & 0,0017 & 0,0008 & 0,0010 \\ 0,0000 & 0,0235 & 0,2818 & 0,5673 & 0,1119 & 0,0104 & 0,0028 & 0,0023 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0253 & 0,2753 & 0,5663 & 0,1165 & 0,0103 & 0,0063 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0003 & 0,0209 & 0,2659 & 0,5564 & 0,1344 & 0,0221 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0240 & 0,2655 & 0,5575 & 0,1530 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0001 & 0,0034 & 0,0481 & 0,9484 \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Geçiş sayıları matrisleri için tahmin değerleri, birinci örnek için ($s=1$ için, $P_{1,IC,BS}$ için) (4.18)'de ve ikinci örnek için ($s=2$ için, $P_{1,IC,SS}$ için) (4.19)'da gösterilmiştir. Örneğin, birinci örnek için birinci satır birinci sütundaki tahmin değeri (t_{11}^1), (4.9)'daki ilk satır değerleri ve (4.16)'daki birinci satır birinci sütun değeri kullanılarak şöyle hesaplanır (4.17):

$$t_{11}^1 = n_1^1 \cdot \hat{p}_{11} = \sum_{j=1}^{K} n_{1j}^1 \cdot \hat{p}_{11} \quad (4.17)$$

$$= (2+528+35+5+1+1+2+2) \cdot 0,7091 = 408,45$$

$$T_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 408,45 & 155,20 & 6,80 & 2,50 & 1,25 & 0,89 & 0,36 & 0,54 \\ 423,17 & 11597,46 & 1298,76 & 67,22 & 20,24 & 8,18 & 3,33 & 6,65 \\ 0,26 & 1292,73 & 2128,15 & 342,27 & 26,18 & 6,45 & 2,97 & 4,00 \\ 0,00 & 33,41 & 400,49 & 806,16 & 158,80 & 14,80 & 4,05 & 3,29 \\ 0,00 & 0,00 & 18,54 & 202,04 & 415,68 & 85,50 & 7,60 & 4,64 \\ 0,00 & 0,00 & 0,13 & 8,57 & 109,31 & 228,70 & 55,22 & 9,08 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 5,99 & 66,38 & 139,36 & 38,26 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,13 & 3,36 & 47,33 & 934,18 \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

$$T_{1,IC,SS} = \begin{bmatrix} 4157,55 & 1579,80 & 69,20 & 25,50 & 12,75 & 9,11 & 3,64 & 5,46 \\ 2629,83 & 72073,54 & 8071,24 & 417,78 & 125,76 & 50,82 & 20,67 & 41,35 \\ 1,74 & 8731,27 & 14373,85 & 2311,73 & 176,82 & 43,55 & 20,03 & 27,00 \\ 0,00 & 230,59 & 2764,51 & 5564,84 & 1096,20 & 102,20 & 27,95 & 22,71 \\ 0,00 & 0,00 & 125,46 & 1366,96 & 2812,32 & 578,50 & 51,40 & 31,36 \\ 0,00 & 0,00 & 0,87 & 59,43 & 757,69 & 1585,30 & 382,78 & 62,92 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 43,01 & 476,62 & 1000,64 & 274,74 \\ 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,00 & 0,87 & 22,64 & 318,67 & 6289,82 \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Matris hücreleri için ki-kare test istatistiği değerleri, birinci örnek için ($s=1$ için, $P_{1,IC,BS}$ için) (4.21)'de ve ikinci örnek için ($s=2$ için, $P_{2,IC,SS}$ için) (4.22)'de gösterilmiştir. Örneğin, (2.21)'de birinci satır birinci sütundaki ki-kare değeri, (4.9)'daki birinci satır birinci sütun değeri (gözlem değeri) ve (4.18)'deki birinci satır birinci sütun değeri (tahmin değeri) kullanılarak şöyle hesaplanır (4.20):

$$\chi^2_{1,11} = \frac{(2\text{-}408{,}45)^2}{408{,}45} = 404{,}46 \tag{4.20}$$

$$\chi_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 404{,}46 & 895{,}44 & 116{,}98 & 2{,}49 & 0{,}05 & 0{,}01 & 7{,}54 & 3{,}99 \\ 419{,}18 & 1{,}51 & 47{,}83 & 3{,}70 & 5{,}72 & 1{,}79 & 0{,}03 & 13{,}13 \\ 2{,}13 & 148{,}90 & 66{,}38 & 10{,}78 & 0{,}00 & 0{,}03 & 0{,}31 & 2{,}25 \\ - & 189{,}65 & 74{,}29 & 4{,}90 & 5{,}74 & 0{,}00 & 1{,}04 & 0{,}89 \\ - & - & 67{,}80 & 17{,}84 & 0{,}02 & 7{,}02 & 0{,}02 & 1{,}21 \\ - & - & 0{,}13 & 44{,}02 & 11{,}40 & 0{,}23 & 1{,}73 & 0{,}13 \\ - & - & - & - & 32{,}77 & 1{,}95 & 0{,}14 & 0{,}08 \\ - & - & - & - & 5{,}86 & 6{,}40 & 4{,}34 & 0{,}08 \end{bmatrix} \tag{4.21}$$

$$\chi_{1,IC,SS} = \begin{bmatrix} 39{,}736 & 87{,}971 & 11{,}493 & 0{,}244 & 0{,}005 & 0{,}001 & 0{,}740 & 0{,}392 \\ 67{,}451 & 0{,}244 & 7{,}697 & 0{,}596 & 0{,}921 & 0{,}287 & 0{,}005 & 2{,}113 \\ 0{,}316 & 22{,}045 & 9{,}828 & 1{,}595 & 0{,}000 & 0{,}005 & 0{,}047 & 0{,}334 \\ - & 27{,}474 & 10{,}762 & 0{,}710 & 0{,}832 & 0{,}000 & 0{,}150 & 0{,}129 \\ - & - & 10{,}021 & 2{,}637 & 0{,}003 & 1{,}037 & 0{,}003 & 0{,}178 \\ - & - & 0{,}018 & 6{,}351 & 1{,}645 & 0{,}034 & 0{,}250 & 0{,}018 \\ - & - & - & - & 4{,}563 & 0{,}272 & 0{,}019 & 0{,}011 \\ - & - & - & - & 0{,}871 & 0{,}950 & 0{,}644 & 0{,}012 \end{bmatrix} \tag{4.22}$$

Matrisler için toplam ki-kare test istatistiği, (2.28)'deki gibi, (4.21) ve (4.22)'deki değerlerin toplamı şeklinde hesaplanır (4.23):

$$\sum \chi^2 = \sum_{s=1}^{2} \sum_{i=1}^{8} \sum_{j=1}^{8} \left[\chi^2_{s,ij}\right] = 2957{,}98 \tag{4.23}$$

Örnek sayısı 2, gecikme durumu sayısı 8 olduğuna göre, serbestlik derecesi, (2.29) eşitliği yardımıyla hesaplanır (4.24):

$$f = (S-1)\cdot K\cdot(K-1) = (2-1)\cdot 8\cdot(8-1) = 56 \tag{4.24}$$

%5 anlamlılık düzeyinde ($\alpha=0{,}05$) serbestlik derecesi (f) 56 için kritik değer 74,47 olarak hesaplanır. Bu hesap Microsoft Excel ile "=KİKARE.TERS.SAĞK(α;f)"

formülü kullanılarak yapılmıştır. 74,47<2957,98 olduğundan sıfır hipotezi reddedilir. Yani bu iki matris birbirinden anlamlı derecede farklıdır.

İki matrisin (4.10 ve 4.12) birbiriyle benzer olup olmadığı ayrıca bu matrislerin kararlı durum vektörlerinin (4.26 ve 4.28) karşılaştırmasıyla kolayca gösterilebilir. Seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin bekleme süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulmuş geçiş olasılıkları matrisinin bininci kuvveti (4.25):

$$(P_{1,IC,BS})^{1000} = \begin{bmatrix} 0,0001 & 0,4102 & 0,1961 & 0,0962 & 0,0576 & 0,0424 & 0,0289 & 0,1685 \\ 0,0001 & 0,4102 & 0,1961 & 0,0962 & 0,0576 & 0,0424 & 0,0289 & 0,1685 \\ 0,0001 & 0,4102 & 0,1961 & 0,0962 & 0,0576 & 0,0424 & 0,0289 & 0,1685 \\ 0,0001 & 0,4102 & 0,1961 & 0,0962 & 0,0576 & 0,0424 & 0,0289 & 0,1685 \\ 0,0001 & 0,4102 & 0,1961 & 0,0962 & 0,0576 & 0,0424 & 0,0289 & 0,1685 \\ 0,0001 & 0,4102 & 0,1961 & 0,0962 & 0,0576 & 0,0424 & 0,0289 & 0,1685 \\ 0,0001 & 0,4102 & 0,1961 & 0,0962 & 0,0576 & 0,0424 & 0,0289 & 0,1685 \\ 0,0001 & 0,4102 & 0,1961 & 0,0962 & 0,0576 & 0,0424 & 0,0289 & 0,1685 \end{bmatrix} \quad (4.25)$$

Buna göre, Seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin bekleme süreçlerine ait kararlı durum olasılıkları vektörü (4.26):

$$\pi_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0,0001 & 0,4102 & 0,1961 & 0,0962 & 0,0576 & 0,0424 & 0,0289 & 0,1685 \end{bmatrix} \quad (4.26)$$

Seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin seyir süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulmuş geçiş olasılıkları matrisinin bininci kuvveti (4.27):

$$(P_{1,IC,SS})^{1000} = \begin{bmatrix} 0,0901 & 0,5455 & 0,1558 & 0,0617 & 0,0353 & 0,0226 & 0,0168 & 0,0722 \\ 0,0901 & 0,5455 & 0,1558 & 0,0617 & 0,0353 & 0,0226 & 0,0168 & 0,0722 \\ 0,0901 & 0,5455 & 0,1558 & 0,0617 & 0,0353 & 0,0226 & 0,0168 & 0,0722 \\ 0,0901 & 0,5455 & 0,1558 & 0,0617 & 0,0353 & 0,0226 & 0,0168 & 0,0722 \\ 0,0901 & 0,5455 & 0,1558 & 0,0617 & 0,0353 & 0,0226 & 0,0168 & 0,0722 \\ 0,0901 & 0,5455 & 0,1558 & 0,0617 & 0,0353 & 0,0226 & 0,0168 & 0,0722 \\ 0,0901 & 0,5455 & 0,1558 & 0,0617 & 0,0353 & 0,0226 & 0,0168 & 0,0722 \\ 0,0901 & 0,5455 & 0,1558 & 0,0617 & 0,0353 & 0,0226 & 0,0168 & 0,0722 \end{bmatrix} \quad (4.27)$$

Buna göre, Seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin seyir süreçlerine ait kararlı durum olasılıkları vektörü (4.28):

$$\pi_{1,IC,SS} = [\,0{,}0901 \;\; 0{,}5455 \;\; 0{,}1558 \;\; 0{,}0617 \;\; 0{,}0353 \;\; 0{,}0226 \;\; 0{,}0168 \;\; 0{,}0722\,] \quad (4.28)$$

Kararlı durum olasılıkları karşılaştırıldığında (4.26 ve 4.28) geçiş süreçlerinin türüne göre anlamlı derecede farklı olduğu görülmektedir (özellikle durum 2 ve durum 8 olasılıkları oldukça farklıdır).

Yukarıdaki homojenlik testi ile benzer şekilde farklı tren türü – seyahat yönü seçenekleri için de homojenlik testleri yapılmıştır (Test 2, Test 3 ve Test 4). Geçiş sürecinin türü için yapılan bu test ile birlikte, tren türü ve seyahat yönü için de homojenlik test edilmiş, sonuçlar Tablo 4.7'de özetlenmiştir. Test 1, Test 2, Test 3 ve Test 4 sonucunda sıfır hipotezi reddedilmiştir. Yani geçiş olasılıkları matrislerinin geçiş süreçlerinin türüne göre farklı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, gecikme tahmini yapılırken seyir ve bekleme süreçleri için homojenlik kabulü yapılması durumunda hata miktarı artacaktır. Test 5, Test 6, Test 7 ve Test 8 sonucunda sıfır hipotezi reddedilmiştir. Yani geçiş olasılıkları matrislerinin trenlerin türüne göre farklı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, gecikme tahmini yapılırken IC ve SPR türü trenler için homojenlik kabulü yapılması hata miktarını arttıracaktır. Test 9, Test 10, Test 11 ve Test 12 sonucunda sıfır hipotezi reddedilmiştir. Yani geçiş olasılıkları matrislerinin trenlerin seyahat yönüne göre farklı olduğu sonucuna varılmıştır. Bu nedenle, gecikme tahmini yapılırken farklı yönler için homojenlik kabulü yapılması durumunda hata miktarı artacaktır. Bu durumda verilerin seyahat yönüne, tren türüne ve geçiş süreçlerinin türüne göre gruplandırılması gerekmektedir.

Tablo 4.7 Geçiş süreci türü, tren türü ve seyahat yönü için homojenlik testleri (α=%5 anlamlılık düzeyi ve f=56 serbestlik derecesi için)

Test Numarası	Sıfır Hipotezi Alternatif Hipotez	$\sum \chi^2$	Kritik Değer	Sonuç
1	$H_0 : P_{1,IC,BS} = P_{1,IC,SS}$ $H_1 : P_{1,IC,BS} \neq P_{1,IC,SS}$	2957,98	74,47	H_0 reddedilir.
2	$H_0 : P_{1,SPR,BS} = P_{1,SPR,SS}$ $H_1 : P_{1,SPR,BS} \neq P_{1,SPR,SS}$	10457,14	74,47	H_0 reddedilir.
3	$H_0 : P_{2,IC,BS} = P_{2,IC,SS}$ $H_1 : P_{2,IC,BS} \neq P_{2,IC,SS}$	5503,44	74,47	H_0 reddedilir.
4	$H_0 : P_{2,SPR,BS} = P_{2,SPR,SS}$ $H_1 : P_{2,SPR,BS} \neq P_{2,SPR,SS}$	7280,74	74,47	H_0 reddedilir.
5	$H_0 : P_{1,IC,SS} = P_{1,SPR,SS}$ $H_1 : P_{1,IC,SS} \neq P_{1,SPR,SS}$	1260,61	74,47	H_0 reddedilir.
6	$H_0 : P_{1,IC,BS} = P_{1,SPR,BS}$ $H_1 : P_{1,IC,BS} \neq P_{1,SPR,BS}$	2062,82	74,47	H_0 reddedilir.
7	$H_0 : P_{2,IC,SS} = P_{2,SPR,SS}$ $H_1 : P_{2,IC,SS} \neq P_{2,SPR,SS}$	2774,79	74,47	H_0 reddedilir.
8	$H_0 : P_{2,IC,BS} = P_{2,SPR,BS}$ $H_1 : P_{2,IC,BS} \neq P_{2,SPR,BS}$	2574,30	74,47	H_0 reddedilir.
9	$H_0 : P_{1,IC,SS} = P_{2,IC,SS}$ $H_1 : P_{1,IC,SS} \neq P_{2,IC,SS}$	607,75	74,47	H_0 reddedilir.
10	$H_0 : P_{1,IC,BS} = P_{2,IC,BS}$ $H_1 : P_{1,IC,BS} \neq P_{2,IC,BS}$	593,25	74,47	H_0 reddedilir.
11	$H_0 : P_{1,SPR,SS} = P_{2,SPR,SS}$ $H_1 : P_{1,SPR,SS} \neq P_{2,SPR,SS}$	2535,22	74,47	H_0 reddedilir.
12	$H_0 : P_{1,SPR,BS} = P_{2,SPR,BS}$ $H_1 : P_{1,SPR,BS} \neq P_{2,SPR,BS}$	597,30	74,47	H_0 reddedilir.

4.4 Zamanda Durağanlık Testinin Uygulanması

Geçiş olasılıklarının farklı zaman periyotlarında sabit olup olmadığı da test edilmelidir. Bunun için konum sabit tutup zamanda durağanlık testi yapılacaktır. Seyir süreçleri için geçiş olasılıklarının haftanın günlerine göre sabit olup olmadığını test etmek için örneğin, seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Dhs-Rmoa kontrol noktaları arasındaki kesim seyir süreci için durağanlık testi yapılmıştır.

Buna göre seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Dhs-Rmoa kontrol noktaları arasındaki kesim seyir süreçlerine ait toplulaştırılmış (haftanın beş günündeki toplam) geçiş sayıları matrisi (4.29):

$$N^{T}{}_{1,SPR,SS} = \begin{bmatrix} 58 & 21 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2350 & 24 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 356 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 149 & 7 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 80 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 46 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 45 \end{bmatrix} \quad (4.29)$$

Seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Dhs-Rmoa kontrol noktaları arasındaki kesim seyir süreçlerine ait toplulaştırılmış geçiş olasılıkları matrisi (4.30):

$$P^{T}{}_{1,SPR,SS} = \begin{bmatrix} 0,7342 & 0,2658 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,9899 & 0,0101 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,9596 & 0,0404 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,9551 & 0,0449 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,9639 & 0,0361 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 1,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,9524 & 0,0476 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} \quad (4.30)$$

Seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Dhs-Rmoa kontrol noktaları arasındaki kesim seyir süreci için 5 hafta içi gün söz konusudur. "v=pazartesi (Pz), salı (Sl), çarşamba (Çr), perşembe (Pr), cuma (Cm)". Pazartesi için geçiş sayıları matrisi (4.31):

$$N^{Pz}{}_{1,SPR,SS} = \begin{bmatrix} 13 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 510 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 62 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 25 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9 \end{bmatrix} \quad (4.31)$$

Salı için geçiş sayıları matrisi (4.32):

$$N^{Sl}{}_{1,SPR,SS} = \begin{bmatrix} 7 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 366 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 42 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 14 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 7 \end{bmatrix} \quad (4.32)$$

Çarşamba için geçiş sayıları matrisi (4.33):

$$N^{Çr}{}_{1,SPR,SS} = \begin{bmatrix} 13 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 409 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 81 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 41 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 17 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 14 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5 \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Perşembe için geçiş sayıları matrisi (4.34):

$$N^{Pr}{}_{1,SPR,SS} = \begin{bmatrix} 11 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 477 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 77 & 5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 29 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 13 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 12 \end{bmatrix} \quad (4.34)$$

Cuma için geçiş sayıları matrisi (4.35):

$$N^{Cm}{}_{1,SPR,SS} = \begin{bmatrix} 12 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 495 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 83 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 38 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 16 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

Matrislerin toplulaştırılmış matris (4.29) ile benzer olup olmadığını test etmek için kurulan sıfır hipotezi (4.36) ve alternatif hipotez (4.37):

$$H_0 : P^{v}_{1,SPR,SS} = P^{T}_{1,SPR,SS} \quad (4.36)$$

$$H_1 : P^{v}_{1,SPR,SS} \neq P^{T}_{1,SPR,SS} \quad (4.37)$$

Örneğin pazartesi günü için geçiş sayıları matrisinin (4.31) birinci satır birinci sütun değeri için ki-kare test istatistiği (4.38):

$$\chi^2_{Pz,11} = 2 \cdot n^{Pz}_{11} \cdot ln \frac{n^{Pz}_{11}}{n^{Pz}_{1} \cdot \hat{p}_{11}}$$

$$= 2 \cdot 13 \cdot ln \frac{13}{(13+5+0+0+0+0+0+0) \cdot 0{,}7342} = -0{,}2134 \quad (4.38)$$

Toplam ki-kare test istatistiği değeri (4.39):

$$\sum \chi^2 = \sum_{v=1}^{5} \sum_{i=1}^{8} \sum_{j=1}^{8} \left[\chi^2_{v,ij} \right] = 4{,}46 \quad (4.39)$$

Periyot (gün) sayısı 5, gecikme durumu sayısı 8 olduğuna göre, serbestlik derecesi (4.40):

$$f = (V\text{-}1) \cdot K \cdot (K\text{-}1) = (5\text{-}1) \cdot 8 \cdot (8\text{-}1) = 224 \quad (4.40)$$

%5 anlamlılık düzeyinde (α=0,05) serbestlik derecesi (f) 224 için kritik değer 379,75 olarak hesaplanır. Bu hesap Microsoft Excel ile

“=KİKARE.TERS.SAĞK(α;f)” formülü kullanılarak yapılmıştır. 4,46<259,91 olduğundan sıfır hipotezi kabul edilir. Yani rastgele seçilen seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Dhs-Rmoa kontrol noktaları arasındaki kesim seyir süreçleri örneğinde olduğu gibi geçiş olasılıkları haftanın günleri için durağandır. Gecikme tahmini yapılırken seyir süreçleri için geçiş olasılıkları matrislerinin haftanın günleri için ayrı ayrı oluşturulmasına gerek yoktur. Gecikme tahmini yapılırken haftanın günleri için durağanlık kabulü tahmin hatalarında anlamlı derecede bir artışa sebep olmayacaktır.

Benzer şekilde seyir süreçleri için geçiş olasılıklarının günün saatlerine göre sabit olup olmadığını test etmek için aynı kesim için durağanlık testi yapılmıştır. Günün saatleri 10 periyotta incelenmiştir.

v=05:00-07:00 (1), 07:00-09:00 (2), 09:00-11:00 (3), 11:00-13:00 (4), 13:00-15:00 (5), 15:00-17:00 (6), 17:00-19:00 (7), 19:00-21:00 (8), 21:00-23:00 (9), 23:00-01:00 (10). 01:00-05:00 saatleri arasında Dhs-Rmoa kontrol noktaları arasındaki kesimde seyahat yönü 1 olan SPR türü tren verisi bulunmamaktadır.

Matrislerin toplulaştırılmış matris (4.29) ile benzer olup olmadığını test etmek için kurulan sıfır hipotezi (4.41) ve alternatif hipotez (4.42):

$$H_0 : P^{v}_{1,SPR,SS} = P^{T}_{1,SPR,SS} \tag{4.41}$$

$$H_1 : P^{v}_{1,SPR,SS} \neq P^{T}_{1,SPR,SS} \tag{4.42}$$

Toplam ki-kare test istatistiği değeri (4.43):

$$\sum \chi^2 = \sum_{v=1}^{10} \sum_{i=1}^{8} \sum_{j=1}^{8} \left[\chi^2_{v,ij} \right] = 32,73 \tag{4.43}$$

Periyot sayısı 10, gecikme durumu sayısı 8 olduğuna göre, serbestlik derecesi (4.44):

$$f = (V\text{-}1) \cdot K \cdot (K\text{-}1) = (10\text{-}1) \cdot 8 \cdot (8\text{-}1) = 504 \tag{4.44}$$

%5 anlamlılık düzeyinde (α=0,05) serbestlik derecesi (f) 504 için kritik değer 557,33 olarak hesaplanır. Bu hesap Microsoft Excel ile "=KİKARE.TERS.SAĞK(α;f)" formülü kullanılarak yapılmıştır. 32,73<557,33 olduğundan sıfır hipotezi kabul edilir. Yani rastgele seçilen seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Dhs-Rmoa kontrol noktaları arasındaki kesim seyir süreçleri örneğinde olduğu gibi geçiş olasılıkları günün saatleri için durağandır. Gecikme tahmini yapılırken seyir süreçleri için geçiş olasılıkları matrislerinin günün saatleri için ya da zirve ve zirve dışı saatler için ayrı ayrı oluşturulmasına gerek yoktur. Sonuç olarak gecikme tahmini yapılırken zamanda durağanlık kabulü tahmin hatalarında anlamlı derecede bir artışa sebep olmayacaktır.

4.5 Konumda Durağanlık Testinin Uygulanması

Trenler için geçiş olasılıklarının, geçiş süreçlerinin türüne göre farklı olduğu, Test 1, Test 2, Test 3 ve Test 4 ile gösterilmiştir (Bk. Bölüm 4.2). Ancak her geçiş süreci türü için tek adım geçiş olasılıkları matrisinin tüm istasyonlarda ya da tüm kesimlerde sabit olup olmadığı, yani konumda durağanlık araştırılmalıdır. Tüm istasyonlarda bekleme süreçleri için geçiş olasılıklarının sabit olup olmadığını test etmek için örneğin seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin bekleme süreçlerine ait verilerden oluşturulmuş matris için durağanlık testi yapılmıştır. Zamanda durağanlık kabulünün anlamlı derecede hatalı olmadığı gözlendiğine göre (Bk. Bölüm 4.3) konumda durağanlık testi sırasında zamanı sabit tutmaya gerek yoktur. Buna göre seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin bekleme süreçlerine ait toplulaştırılmış geçiş sayıları matrisi (4.45):

$$N^{T}{}_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 2 & 528 & 35 & 5 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 2 & 11730 & 1548 & 83 & 31 & 12 & 3 & 16 \\ 1 & 854 & 2504 & 403 & 26 & 6 & 2 & 7 \\ 0 & 113 & 228 & 869 & 189 & 15 & 2 & 5 \\ 0 & 0 & 54 & 142 & 413 & 110 & 8 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 28 & 74 & 236 & 65 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 55 & 135 & 40 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 8 & 33 & 943 \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

Seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin bekleme süreçlerine ait toplulaştırılmış geçiş olasılıkları matrisi (4.46):

$$P^{T}{}_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0{,}0035 & 0{,}9167 & 0{,}0607 & 0{,}0087 & 0{,}0017 & 0{,}0017 & 0{,}0035 & 0{,}0035 \\ 0{,}0002 & 0{,}8737 & 0{,}1153 & 0{,}0062 & 0{,}0023 & 0{,}0009 & 0{,}0002 & 0{,}0012 \\ 0{,}0003 & 0{,}2246 & 0{,}6584 & 0{,}1060 & 0{,}0068 & 0{,}0016 & 0{,}0005 & 0{,}0018 \\ 0{,}0000 & 0{,}0795 & 0{,}1605 & 0{,}6115 & 0{,}1330 & 0{,}0106 & 0{,}0014 & 0{,}0035 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0736 & 0{,}1935 & 0{,}5627 & 0{,}1498 & 0{,}0109 & 0{,}0095 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0681 & 0{,}1800 & 0{,}5742 & 0{,}1582 & 0{,}0195 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0800 & 0{,}2200 & 0{,}5400 & 0{,}1600 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0010 & 0{,}0081 & 0{,}0335 & 0{,}9574 \end{bmatrix} \quad (4.46)$$

Seyahat yönü 1 olan IC türü trenler için 7 farklı istasyonda bekleme süreci söz konusudur. Bunlar seyahat yönü 1 için sırasıyla Den Haag Laan van NOI (Laa, v=1), Den Haag HS (Gv, v=2), Delft (Dt, v=3), Schiedam Centrum (Sdm, v=4), Rotterdam Centraal (Rtd, v=5), Rotterdam Blaak (Rtb, v=6) ve Dordrecht (Ddr, v=7) istasyonlarıdır. Laa istasyonu için geçiş sayıları matrisi (4.47):

$$N^{1}{}_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1944 & 386 & 10 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 25 & 388 & 74 & 6 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 143 & 43 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 7 & 64 & 27 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 42 & 18 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22 & 5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 137 \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

Gv istasyonu için geçiş sayıları matrisi (4.48):

$$N^{2}{}_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0 & 92 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2273 & 48 & 12 & 3 & 1 & 1 & 2 \\ 0 & 376 & 84 & 12 & 1 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 8 & 128 & 44 & 4 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2 & 59 & 20 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 33 & 12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 29 & 8 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 13 & 115 \end{bmatrix} \quad (4.48)$$

Dt istasyonu için geçiş sayıları matrisi (4.49):

$$N^{3}{}_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1151 & 518 & 6 & 3 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 18 & 906 & 117 & 3 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 4 & 224 & 50 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 93 & 33 & 4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 42 & 13 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 33 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 158 \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Sdm istasyonu için geçiş sayıları matrisi (4.50):

$$N^{4}{}_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1560 & 256 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 24 & 656 & 97 & 2 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 6 & 227 & 28 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 112 & 21 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 65 & 16 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 37 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 156 \end{bmatrix} \quad (4.50)$$

Rtd istasyonu için geçiş sayıları matrisi (4.51):

$$N^{5}{}_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0 & 106 & 3 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1812 & 99 & 22 & 10 & 2 & 2 & 7 \\ 0 & 378 & 63 & 21 & 9 & 2 & 0 & 4 \\ 0 & 105 & 64 & 30 & 17 & 7 & 1 & 2 \\ 0 & 0 & 52 & 49 & 13 & 3 & 1 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 24 & 31 & 9 & 6 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 18 & 18 & 3 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 7 & 13 & 129 \end{bmatrix} \quad (4.51)$$

Rtb istasyonu için geçiş sayıları matrisi (4.52):

$$N^{6}{}_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2236 & 119 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 24 & 307 & 36 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 11 & 140 & 30 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 12 & 86 & 8 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 52 & 5 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 21 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 166 \end{bmatrix} \quad (4.52)$$

Ddr istasyonu için geçiş sayıları matrisi (4.53):

$$N^{7}{}_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0 & 327 & 28 & 4 & 1 & 0 & 2 & 2 \\ 0 & 754 & 122 & 30 & 11 & 9 & 0 & 6 \\ 0 & 9 & 100 & 46 & 4 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 6 & 61 & 17 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5 & 25 & 16 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 14 & 7 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 11 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 82 \end{bmatrix} \quad (4.53)$$

Matrislerin toplulaştırılmış matris (4.45) ile benzer olup olmadığını test etmek için kurulan sıfır hipotezi (4.54) ve alternatif hipotez (4.55):

$$H_0 : P^{v}_{1,IC,BS} = P^{T}_{1,IC,BS} \qquad v = 1, 2, 3, \ldots, 7 \quad (4.54)$$

$$H_1 : P^{v}_{1,IC,BS} \neq P^{T}_{1,IC,BS} \qquad v = 1, 2, 3, \ldots, 7 \quad (4.55)$$

Örneğin Gv istasyonu için geçiş sayıları matrisinin (4.48) ikinci satır ikinci sütun değeri için ki-kare test istatistiği (4.56):

$$\chi^2_{2,22} = 2 \cdot n^2_{22} \cdot ln \frac{n^2_{22}}{n^2_2 \cdot \hat{p}_{22}}$$

$$= 2 \cdot 2273 \cdot ln \frac{2273}{(0+2273+48+12+3+1+1+2) \cdot 0{,}8737} = 481{,}73 \quad (4.56)$$

Toplam ki-kare test istatistiği değeri (4.57):

$$\sum \chi^2 = \sum_{v=1}^{7} \sum_{i=1}^{8} \sum_{j=1}^{8} \left[\chi^2_{v,ij} \right] = 2889{,}03 \tag{4.57}$$

İstasyon sayısı 7, gecikme durumu sayısı 8 olduğuna göre, serbestlik derecesi (4.58):

$$f = (V\text{-}1) \cdot K \cdot (K\text{-}1) = (7\text{-}1) \cdot 8 \cdot (8\text{-}1) = 336 \tag{4.58}$$

%5 anlamlılık düzeyinde ($\alpha = 0{,}05$) serbestlik derecesi (f) 336 için kritik değer 379,75 olarak hesaplanır. Bu hesap Microsoft Excel ile "=KİKARE.TERS.SAĞK(α;f)" formülü kullanılarak yapılmıştır. 379,75<2889,03 olduğundan sıfır hipotezi reddedilir. Yani seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin bekleme süreçlerine ait geçişler için geçiş olasılıkları durağan değildir.

Benzer şekilde geçiş olasılıklarının konuma (ilgili istasyon ya da kesime) göre benzer (homojen) olup olmadığı araştırılabilir. Örneğin seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin (tüm istasyonlardaki) bekleme süreçlerine ait verilerden oluşturulmuş matris için homojenlik testi yapılacak olursa toplam ki-kare test istatistiği değeri (4.59):

$$\sum \chi^2 = \sum_{v=1}^{7} \sum_{i=1}^{8} \sum_{j=1}^{8} \left[\chi^2_{v,ij} \right] = 6599{,}62 \tag{4.59}$$

%5 anlamlılık düzeyinde ($\alpha = 0{,}05$) serbestlik derecesi (f) 336 için kritik değer 379,75 olarak hesaplanır. Bu hesap Microsoft Excel ile "=KİKARE.TERS.SAĞK(α;f)" formülü kullanılarak yapılmıştır. 379,75<6599,62 olduğundan sıfır hipotezi reddedilir. Yani bu yedi matris birbirinden anlamlı derecede farklıdır. Gecikme tahmini yapılırken geçiş olasılıkları matrisleri her istasyon ve her kesim için ayrı ayrı oluşturulmalıdır. Gecikme tahmini yapılırken durağanlık kabulü tahmin hatalarının artmasına sebep olacaktır.

4.6 Homojenlik Testinin Başlangıç İstasyonu için Uygulanması

Geçiş olasılıkları matrisleri her tren türü, her seyahat yönü ve her istasyon/kesim için ayrı ayrı oluşturulacak olsa da başlangıç istasyonlarının farklı olması sebebiyle trenler, aynı konuma ulaşana kadar farklı sayılarda seyir/bekleme süreci gerçekleştirebilmektedir. Örneğin, seyahat yönü 2 olan IC türü trenler, Sdm istasyonuna varana kadar, seferlerine Ddr istasyonundan başlamış olmaları durumunda 15 seyir ve 2 bekleme süreci, Vlissingen (incelenen ağ parçasının dışında) istasyonundan başlamaları durumunda ise 37 seyir ve 12 bekleme süreci geçirmektedir. Geçiş olasılıkları matrislerinin seyahat başlangıç istasyonuna bağlı olup olmadığını araştırmak için, örnek olarak Ddr ve Vlissingen (Vs) başlangıçlı IC türü trenlerin Sdm istasyonundaki bekleme süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulmuş geçiş olasılıkları matrisleri için homojenlik testi yapılmıştır.

Başlangıç istasyonu Ddr olan IC türü trenlerin Sdm istasyonunda bekleme süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş sayıları matrisi (4.60):

$$ {}^{Ddr}N_{2,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1051 & 38 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 11 & 133 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 66 & 9 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 40 & 4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 14 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 11 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 17 \end{bmatrix} \quad (4.60) $$

Başlangıç istasyonu Vlissingen olan IC türü trenlerin Sdm istasyonunda bekleme süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan geçiş sayıları matrisi (4.61):

$$ {}^{Vs}N_{2,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1004 & 51 & 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 10 & 156 & 25 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3 & 82 & 17 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3 & 53 & 9 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 28 & 8 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 13 & 6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 66 \end{bmatrix} \quad (4.61) $$

İki matrisin (4.60) (4.61) birbiriyle benzer olup olmadığını test etmek için kurulan sıfır hipotezi (4.62) ve alternatif hipotez (4.63):

$$H_0 : {}^{Ddr}P_{2,IC,BS} = {}^{Vs}P_{2,IC,BS} \tag{4.62}$$

$$H_1 : {}^{Ddr}P_{2,IC,BS} \neq {}^{Vs}P_{2,IC,BS} \tag{4.63}$$

Seyahat yönü 2 olan IC türü trenlerin Sdm istasyonunda bekleme süreçlerine ait gecikme çiftlerinden oluşturulan (toplulaştırılmış) geçiş sayıları matrisi (4.64):

$$N^{T}{}_{2,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2055 & 89 & 3 & 3 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 21 & 289 & 35 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 6 & 148 & 26 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & 93 & 13 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 42 & 11 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 24 & 7 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 83 \end{bmatrix} \tag{4.64}$$

Toplam ki-kare test istatistiği (4.65):

$$\sum \chi^2 = 17{,}42 \tag{4.65}$$

Örnek sayısı 2, gecikme durumu sayısı 8 olduğuna göre, serbestlik derecesi (4.66):

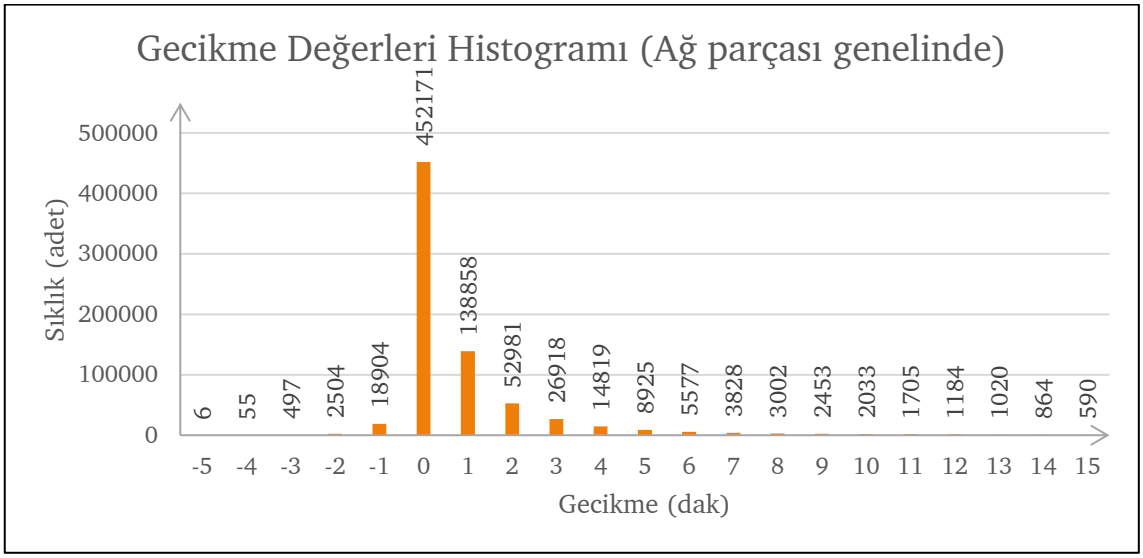
$$f=(S\text{-}1)\cdot K\cdot(K\text{-}1)=(2\text{-}1)\cdot 8\cdot(8\text{-}1)=56 \tag{4.66}$$

%5 anlamlılık düzeyinde (α=0,05) serbestlik derecesi (f) 56 için kritik değer 74,47 olarak hesaplanır. Bu hesap Microsoft Excel ile "=KİKARE.TERS.SAĞK(α;f)" formülü kullanılarak yapılmıştır. 17,42<74,47 olduğundan sıfır hipotezi kabul edilir. Yani bu iki matris arasında anlamlı derecede fark yoktur. Bu örnekten görüldüğü üzere geçiş olasılıkları matrisleri başlangıç istasyonundan bağımsız olarak homojendir. Gecikme tahmini yapılırken geçiş olasılıkları matrislerinin başlangıç istasyonu bazında oluşturulması tahmin hatalarında anlamlı derecede bir artışa sebep olmayacaktır.

5
GECİKME VE DAKİKLİK ANALİZİ

5.1 Ağ Parçasının Geneli için Gecikme ve Dakiklik Analizi

Gecikme analizi, geçmiş verilerine dayanarak tren hizmetlerinin dakiklik düzeyini belirlemek ve mevcut tolerans sürelerinin verimliliğini değerlendirmek için kullanılabilir. Ağ parçası genelinde, tüm eğitme verilerinden ortaya çıkan gecikmelerin dağılım grafiği Şekil 5.1'de gösterilmiştir. -5 dakikadan küçük gecikmeler -5 dakika ve 15 dakikadan büyük gecikmeler 15 dakika olarak kabul edilmiştir. Tren hareketlerinin %61,20'si gecikmesiz, %35,83'ü gecikmeli ve %2,97'si erken gerçekleşmiştir. Gecikmelerin %82,63'ü görece küçük (3 dakika veya daha küçük) değerler olduğundan dakik kabul edilebilir. 3 dakikadan daha küçük gecikmeler, Hollanda Demiryolları tarafından genellikle zamanında kabul edilmektedir (Vromans, 2005; J. Yuan ve Hansen, 2002). 3 dakika toleransla ağ parçası genelinde dakiklik %93,77'dir (5.1).



Şekil 5.1 Ağ parçası genelinde gecikme dağılımı

$$C = \frac{100 \cdot \sum_{d=-3}^{3} F_d}{\sum_d F_d} = \%93{,}77 \tag{5.1}$$

Burada d, gecikme değeri ve F_d, ilgili gecikme değerinin gerçekleşme sayısıdır (frekans). Buna göre ortalama gecikme, $\bar{d}$ (5.2):

$$\bar{d} = \frac{\sum_d F_d \cdot d}{\sum_d F_d} = 0{,}81 \text{ dak} \tag{5.2}$$

Standart sapma, σ (5.3):

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_d F_d \cdot (d - \bar{d})^2}{(\sum_d F_d) - 1}} = 1{,}85 \text{ dak} \tag{5.3}$$

Değişkenlik katsayısı, DK (5.4):

$$DK = \frac{100 \cdot \sigma}{\bar{d}} = \%229 \tag{5.4}$$

Şekil 5.1'deki frekanslar kullanılarak gecikme durumları için ağırlıklı ortalama değerleri (temsili değer) hesaplanmıştır (Tablo 5.1).

Tablo 5.1 Gecikme durumları için temsili değerler

Gecikme Durumları	Gecikme Değerleri (dak)	Temsili Değer b_j (dak)
1	≤-1	-1.17
2	0	0
3	1	1
4	2	2
5	3	3
6	4	4
7	5	5
8	≥6	8.71

Markov geçiş olasılıkları matrislerinde ij elemanı i durumundan j durumuna geçiş olasılığını temsil ettiğinden, köşegendeki elemanlar başlangıç gecikme durumlarının korunma olasılıklarını, köşegenin sağında yer alan elemanlar

gecikmelerin büyüme olasılıklarını ve köşegenin solunda yer alan elemanlar gecikmelerin azalma olasılıklarını göstermektedir. Birinci satır, başlangıç gecikme durumunun negatif olma (erken varış/kalkış/geçiş) durumlarını temsil ettiği için, bu satırda köşegenin sağında ikinci sütunda yer alan olasılık değeri, erken gerçekleşen tren hareketlerinin planlanan zamanlara doğru değişim olasılığını ifade etmektedir. İkinci satır gecikme değerinin sıfır olduğu durumu temsil ettiğinden hem köşegenin sağındaki hem solundaki olasılıklar çizelgeden sapmaları ifade etmektedir. Buna göre, Markov matrislerinin değerlendirilmesi için gecikmenin değişim davranışı 4 grupta incelenmiştir:

1. Negatif gecikme (erken varış/kalkış/geçiş) durumunda gecikmenin değişim davranışı (matrislerin birinci satırı)
2. Sıfır gecikme (gecikmesiz olma) durumunda gecikmenin değişim davranışı (matrislerin ikinci satırı)
3. Görece küçük (1 ila 5 dakika arası) gecikmeli olma durumunda gecikmenin değişim davranışı (matrislerin üçüncü, dördüncü, beşinci, altıncı ve yedinci satırları)
4. Görece büyük (6 dakika ve üzeri) gecikmeli olma durumunda gecikmenin değişim davranışı (matrislerin sekizinci satırı).

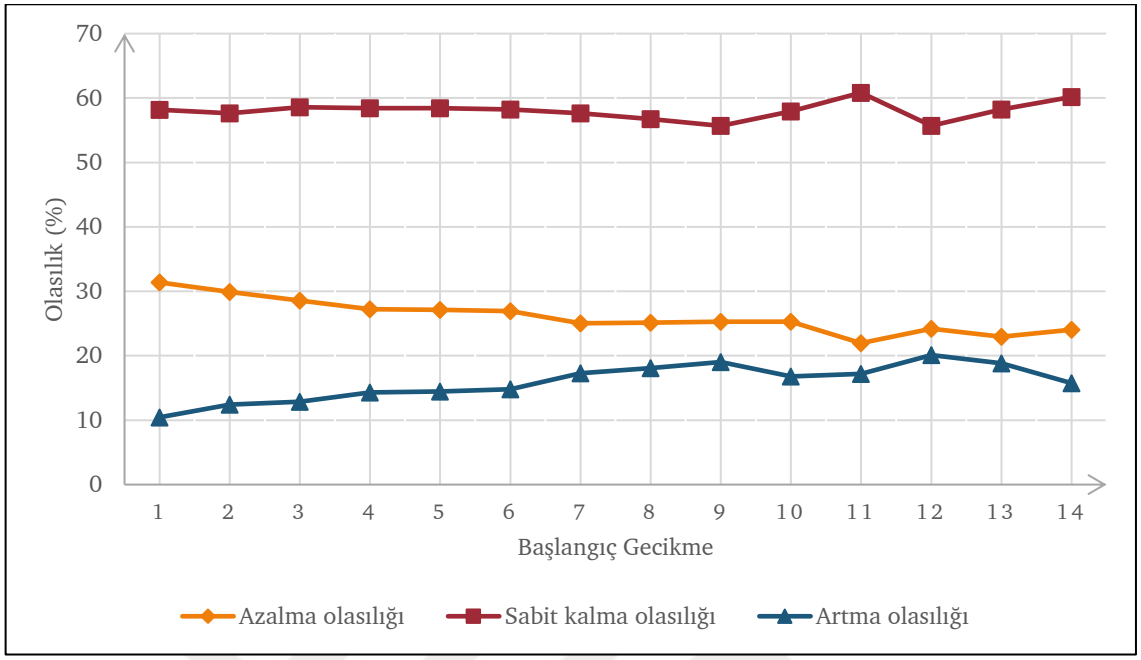
Böylece, birinci inceleme sürücülerin orer zamanlarını bekleyip beklemediklerini, ikinci inceleme gecikmelerin oluşumunu engellemesi bakımından mevcut tolerans sürelerin yeterliliğini, üçüncü inceleme görece küçük gecikmelerin telafisi bakımından mevcut tolerans sürelerin yeterliliğini ve dördüncü inceleme görece büyük gecikmelerin telafisi bakımından mevcut tolerans sürelerin yeterliliğini değerlendirmek için kullanılmıştır.

$$P = \begin{bmatrix} 0{,}5456 & 0{,}4324 & 0{,}0132 & 0{,}0045 & 0{,}0020 & 0{,}0011 & 0{,}0005 & 0{,}0007 \\ 0{,}0263 & 0{,}8663 & 0{,}0991 & 0{,}0055 & 0{,}0015 & 0{,}0006 & 0{,}0003 & 0{,}0004 \\ 0{,}0003 & 0{,}3135 & 0{,}5818 & 0{,}0950 & 0{,}0068 & 0{,}0014 & 0{,}0005 & 0{,}0007 \\ 0{,}0000 & 0{,}0579 & 0{,}2412 & 0{,}5765 & 0{,}1119 & 0{,}0087 & 0{,}0021 & 0{,}0017 \\ 0{,}0000 & 0{,}0113 & 0{,}0441 & 0{,}2302 & 0{,}5857 & 0{,}1145 & 0{,}0099 & 0{,}0043 \\ 0{,}0000 & 0{,}0051 & 0{,}0054 & 0{,}0395 & 0{,}2224 & 0{,}5843 & 0{,}1255 & 0{,}0178 \\ 0{,}0000 & 0{,}0041 & 0{,}0013 & 0{,}0054 & 0{,}0374 & 0{,}2230 & 0{,}5842 & 0{,}1446 \\ 0{,}0000 & 0{,}0020 & 0{,}0013 & 0{,}0011 & 0{,}0020 & 0{,}0111 & 0{,}0613 & 0{,}9212 \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Tüm gecikme çiftleri (710305 adet) kullanılarak elde edilen (tek adım) geçiş olasılıkları matrisinde (5.5) negatif gecikmeli trenlerin (birinci satır) bir geçiş sonra %55,56'sı yine negatif gecikmeye sahipken %43,24'ünün çizelgeye uyum sağladığı görülmektedir. Gecikmesiz olan trenlerin (ikinci satır) %86,63'ü yine gecikmesiz olarak kalmakta ve sadece %13,37'si çizelgeden sapmaktadır. Gecikmesiz trenlerin çizelgeden sapma ihtimallerinin küçük olması, kullanılan tolerans sürelerinin gecikme oluşumunu engelleme işlevinin yüksek olduğunu göstermektedir. 5 dakika ya da daha az gecikmiş olan trenlerin (üçüncü, dördüncü, beşinci, altıncı ve yedinci satır) gecikmelerinin sabit kalma olasılıkları benzerlik göstermekle birlikte bu satırlarda köşegenin solundaki değerlerin köşegenin sağındaki değerlerden büyük olması, ortaya çıkan küçük gecikmelerin artmaktan çok azalma eğiliminde olduklarını göstermektedir. Bu ağ genelinde kullanılan tolerans sürelerin, bir adımda bile küçük gecikmeleri kısmen telafi edebilmek için yeterli olduğu anlamına gelmektedir. Gecikmesi 5 dakikadan büyük olan trenlerin (sekizinci satır) %92,12'sinin yine görece büyük gecikme değerine sahip olarak kaldığı gözlemlenmektedir. Yani büyük gecikmelerin tolere edilme ihtimali oldukça azalmıştır. Bu da kullanılan tolerans sürelerin, görece büyük gecikmelerin büyük bir kısmını telafi edemediği anlamına gelmektedir.

Üçüncü, dördüncü, beşinci, altıncı ve yedinci satırlarda başlangıç gecikmesi büyüdükçe gecikmelerin azalma olasılıkları küçülmekte ve gecikmelerin artma olasılıkları büyümektedir. Yani gecikmeler büyüdükçe seyahatin devamında bu gecikmelerin, akım aşağıdaki istasyon(lar)a büyüyerek aktarılma ihtimali de genel

olarak artmaktadır. Bu durum gecikme durumları dakika hassasiyetinde olan geçiş olasılıkları matrisinde (Tablo 5.2) daha detaylı görülebilmektedir (Şekil 5.2).



Şekil 5.2 Başlangıç gecikme değerine göre gecikmenin değişim davranışı

Tablo 5.2 Gecikmeler değerleri için geçiş olasılıkları

d	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
-5	0,2500	0,2500	0,0000	0,1250	0,0000	0,2500	0,1250	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
-4	0,1212	0,3636	0,0606	0,0000	0,0303	0,3333	0,0000	0,0000	0,0000	0,0606	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0303	0,0000	0,0000
-3	0,0000	0,0827	0,5213	0,1980	0,0301	0,1153	0,0075	0,0251	0,0075	0,0075	0,0025	0,0000	0,0025	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
-2	0,0000	0,0020	0,1214	0,4616	0,1906	0,2044	0,0118	0,0036	0,0031	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005	0,0005	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
-1	0,0000	0,0001	0,0024	0,0682	0,4380	0,4700	0,0135	0,0041	0,0017	0,0009	0,0005	0,0001	0,0004	0,0001	0,0000	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0009	0,0253	0,8663	0,0991	0,0056	0,0015	0,0006	0,0003	0,0002	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
1	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0002	0,3135	0,5818	0,0950	0,0068	0,0014	0,0005	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0579	0,2412	0,5765	0,1119	0,0087	0,0021	0,0008	0,0003	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0000
3	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0113	0,0441	0,2302	0,5857	0,1145	0,0099	0,0025	0,0009	0,0004	0,0002	0,0000	0,0001	0,0001	0,0000	0,0000	0,0001
4	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0051	0,0054	0,0395	0,2224	0,5843	0,1255	0,0116	0,0038	0,0014	0,0004	0,0003	0,0001	0,0001	0,0000	0,0001	0,0001
5	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0041	0,0013	0,0055	0,0374	0,2230	0,5843	0,1239	0,0118	0,0042	0,0026	0,0007	0,0007	0,0002	0,0002	0,0001	0,0001
6	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0028	0,0024	0,0017	0,0054	0,0376	0,2195	0,5824	0,1233	0,0156	0,0050	0,0026	0,0007	0,0007	0,0002	0,0000	0,0000
7	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0016	0,0016	0,0016	0,0011	0,0074	0,0289	0,2083	0,5766	0,1420	0,0227	0,0052	0,0003	0,0014	0,0005	0,0000	0,0008
8	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0014	0,0003	0,0010	0,0017	0,0010	0,0069	0,0217	0,2174	0,5675	0,1492	0,0210	0,0072	0,0024	0,0000	0,0010	0,0000
9	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0034	0,0000	0,0000	0,0013	0,0013	0,0013	0,0059	0,0266	0,2132	0,5568	0,1596	0,0220	0,0051	0,0025	0,0008	0,0004
10	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0020	0,0010	0,0005	0,0000	0,0005	0,0005	0,0005	0,0036	0,0259	0,2181	0,5796	0,1429	0,0147	0,0046	0,0036	0,0020
11	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0012	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0006	0,0012	0,0012	0,0036	0,0229	0,1889	0,6083	0,1366	0,0229	0,0090	0,0036
12	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0017	0,0017	0,0000	0,0000	0,0009	0,0009	0,0000	0,0009	0,0034	0,0060	0,0299	0,1967	0,5569	0,1651	0,0248	0,0111
13	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0020	0,0020	0,0010	0,0010	0,0010	0,0010	0,0000	0,0000	0,0041	0,0000	0,0061	0,0328	0,1781	0,5824	0,1617	0,0266
14	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0024	0,0036	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0024	0,0000	0,0000	0,0036	0,0301	0,1986	0,6017	0,1576
15	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0018	0,0000	0,0018	0,0000	0,0037	0,0055	0,0240	0,2458	0,7172

Ağ genelinde T adım için geçiş olasılıkları matrisi incelenerek T adım sonra gecikmelerin ortalama değişimi incelenebilir. Örnek olarak $T=10$ adım için ortalama geçiş olasılıkları matrisi, (2.9)'da olduğu gibi tek adım geçiş olasılıkları matrisinin (5.5) onuncu kuvveti alınarak bulunabilir (5.6):

$$P^{(10)} = \begin{bmatrix} 0{,}0416 & 0{,}6634 & 0{,}1920 & 0{,}0595 & 0{,}0229 & 0{,}0094 & 0{,}0043 & 0{,}0069 \\ 0{,}0390 & 0{,}6546 & 0{,}1955 & 0{,}0638 & 0{,}0254 & 0{,}0104 & 0{,}0045 & 0{,}0068 \\ 0{,}0352 & 0{,}6164 & 0{,}1996 & 0{,}0774 & 0{,}0366 & 0{,}0167 & 0{,}0075 & 0{,}0106 \\ 0{,}0275 & 0{,}5221 & 0{,}2005 & 0{,}1058 & 0{,}0654 & 0{,}0359 & 0{,}0177 & 0{,}0251 \\ 0{,}0187 & 0{,}3932 & 0{,}1858 & 0{,}1322 & 0{,}1030 & 0{,}0678 & 0{,}0378 & 0{,}0615 \\ 0{,}0110 & 0{,}2584 & 0{,}1491 & 0{,}1358 & 0{,}1293 & 0{,}1028 & 0{,}0682 & 0{,}1454 \\ 0{,}0060 & 0{,}1521 & 0{,}1010 & 0{,}1094 & 0{,}1226 & 0{,}1177 & 0{,}0971 & 0{,}2941 \\ 0{,}0020 & 0{,}0542 & 0{,}0381 & 0{,}0496 & 0{,}0729 & 0{,}0999 & 0{,}1217 & 0{,}5616 \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

10 adım (geçiş) için geçiş olasılıkları matrisinde (5.6) ikinci sütunda görüldüğü üzere başlangıç gecikmeleri büyüdükçe trenlerin 10 adım sonra gecikmelerini tamamen telafi etmiş olma olasılıkları azalmaktadır. Sekizinci (son) sütunda görüldüğü üzere trenlerin başlangıç gecikmesi büyüdükçe, 10 adım sonra 5 dakikadan daha büyük gecikmelerin ortaya çıkma ihtimali de artmaktadır. Başlangıç gecikme değeri sıfır olan trenlerin 10 adım sonra, 3 dakika toleransla dakik olma ihtimali ortalama %97,83 iken; bu değer, başlangıç gecikme değeri bir dakika olanlarda %96,52, iki dakika olanlarda %92,13, üç dakika olanlarda %83,29, dört dakika olanlarda %68,36, beş dakika olanlarda %49,11, beş dakikadan büyük olanlarda %21,68'dir. Bu durum, 10 adımda beş dakikaya kadar gecikmeli olan trenlerin yaklaşık yarısının dakik olabildiğini göstermektedir.

5.2 Ağ Parçası Geneli için Kararlı Durum Olasılıkları ve Ortalama İlk Geçiş Adım Sayısı Analizi

Ağ parçası genelinde geçiş olasılıkları matrisinin (5.5) kararlı durum olasılıkları ve ortalama ilk geçiş adım sayılarının belirlenmesi için Bölüm 2'de gösterildiği gibi lineer denklem sistemlerinin çözülmesi gerekir. (Winston, 2003), kitabında Lingo programı ile bu denklemlerin çözümü için bir model sunmuştur. Bu model, homojen Markov geçiş olasılıkları matrisine (5.5) göre düzenlenmiş (Şekil 5.3) ve

denklem takımı çözülmüştür. Böylece kararlı durum olasılıkları ve ortalama ilk geçiş adım sayıları hesaplanmıştır.

```
MODEL:
 1]
 2]SETS:
 3]STATE/1. .8/:PI;
 4]SXS(STATE,STATE):TPROB,MFP;
 5]ENDSETS
 6]DATA:
 7]TPROB = 0.5456,      0.4324,     0.0132,     0.0045,     0.0020,     0.0011,     0.0005,     0.0007,
 8]0.0263,  0.8663,     0.0991,     0.0055,     0.0015,     0.0006,     0.0003,     0.0004,
 9]0.0003,  0.3135,     0.5818,     0.0950,     0.0068,     0.0014,     0.0005,     0.0007,
10]0.0000,  0.0579,     0.2412,     0.5765,     0.1119,     0.0087,     0.0021,     0.0017,
11]0.0000,  0.0113,     0.0441,     0.2302,     0.5857,     0.1145,     0.0099,     0.0043,
12]0.0000,  0.0051,     0.0054,     0.0395,     0.2224,     0.5843,     0.1255,     0.0178,
13]0.0000,  0.0041,     0.0013,     0.0054,     0.0374,     0.2230,     0.5842,     0.1446,
14]0.0000,  0.0020,     0.0013,     0.0011,     0.0020,     0.0111,     0.0613,     0.9212;
15]ENDDATA
16]@FOR(STATE(J)|J #LT# @SIZE(STATE):
17]PI(J) = @SUM(SXS(I,J): PI(I) * TPROB(I,J)););18
18]@SUM(STATE:PI) = 1;
19]@FOR(SXS(I,J):MFP(I,J)=
20]1+@SUM(STATE(K)|K#NE#J:TPROB(I,K)*MFP(K,J)););
21]END
```

Şekil 5.3 Lingo için kararlı durum olasılıkları ve ortalama ilk geçiş adım sayısı modeli (Winston, 2003)

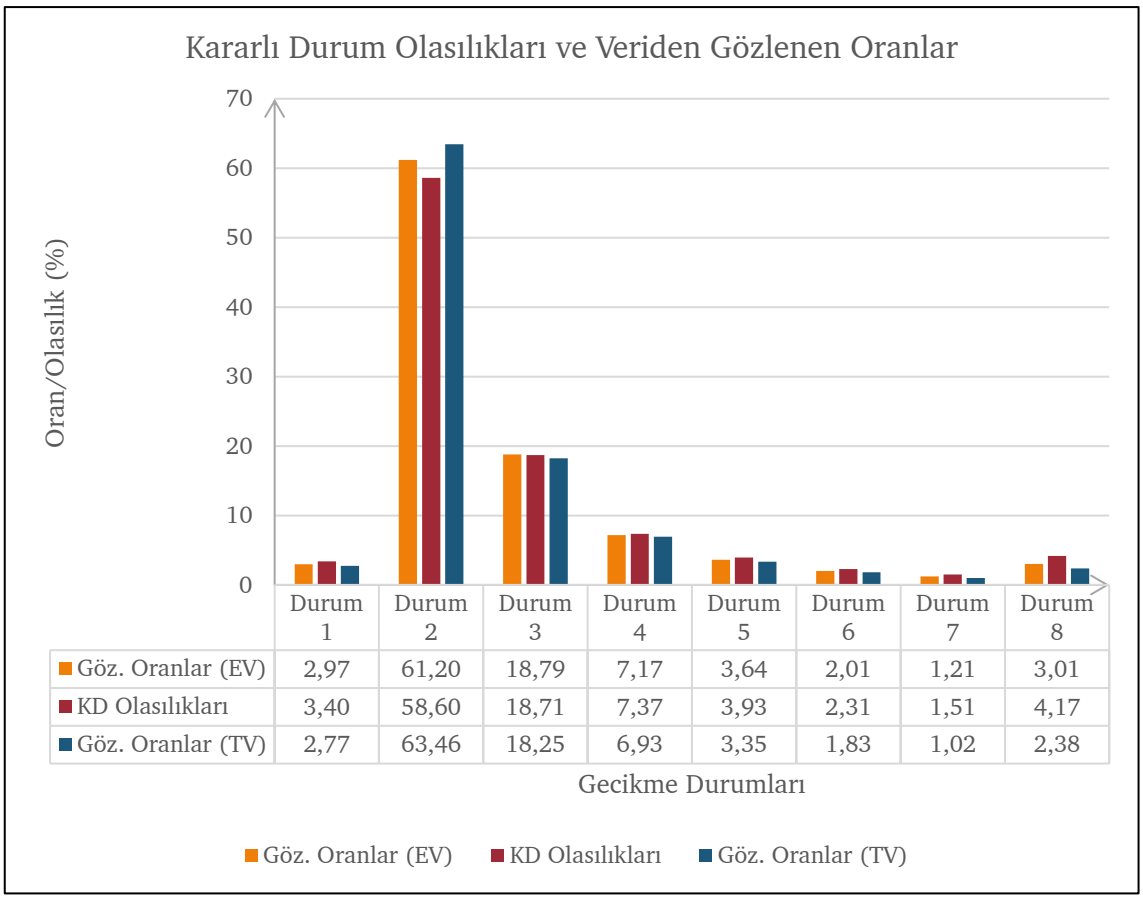
Buna göre kararlı durum vektörü (5.7):

$$\pi = [\,0{,}0340 \;\; 0{,}5860 \;\; 0{,}1871 \;\; 0{,}0737 \;\; 0{,}0393 \;\; 0{,}0231 \;\; 0{,}0151 \;\; 0{,}0417\,] \qquad (5.7)$$

Tüm gecikme çiftleri kullanılarak elde edilen kararlı durum olasılıkları vektörü (5.7) başlangıç gecikmelerinden bağımsız olmak üzere seyahati boyunca tren gecikmelerinin eğilimine ilişkin bazı bilgiler barındırmaktadır. Kararlı durum olasılıklarına göre uzun vadede tren hareketlerinin %3,40'ının erken, %58,60'ının orer ile tam uyumlu, %38'inin gecikmeli ($\pi_3+\pi_4+\ldots+\pi_8$) gerçekleşeceği öngörülmektedir. Geciken trenlerin %79'u ($(\pi_3+\pi_4+\pi_5)/(\pi_3+\pi_4+\ldots+\pi_8)$) görece küçük değerler olduğundan dakik kabul edilebilir. Bu durumda, 3 dakika toleransla ağ parçası genelinde dakiklik %92,01 ($\pi_1+\pi_2+\ldots+\pi_5$) olacaktır. Gecikme durumlarının olasılıklarına göre ağırlıklı ortalaması alınarak belirlenen beklenen gecikmenin bir dakikadan küçük (5.8) olması, tolerans sürelerinin etkinliğinin ve çizelge sağlamlığının bir başka göstergesidir.

$$\bar{d} = \sum_{j=1}^{8} \pi_j \cdot b_j = 0{,}94 \text{ dak} \qquad (5.8)$$

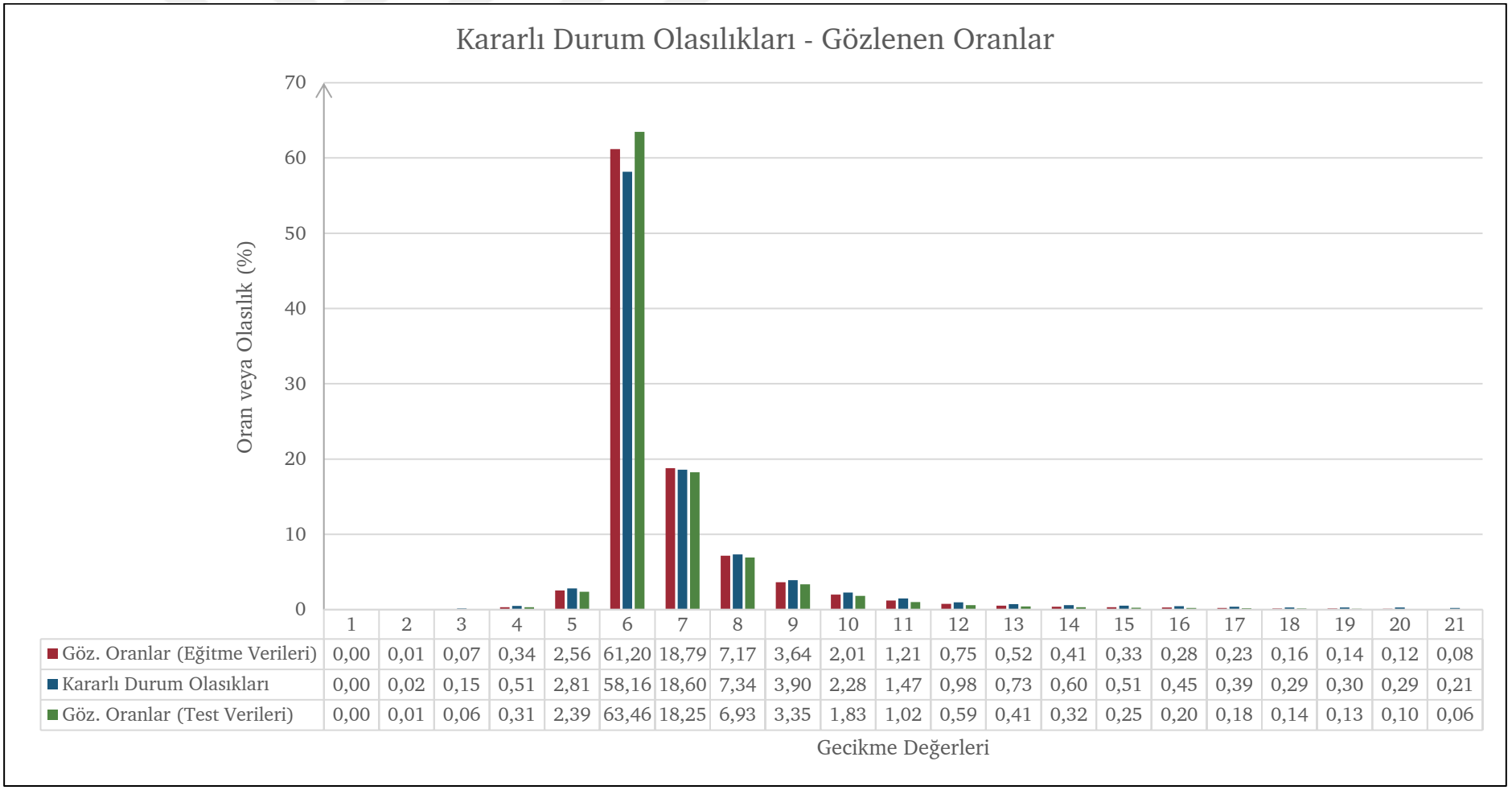
Kararlı durum olasılıkları, test verilerindeki ve eğitme verilerindeki olasılıklarla beraber her bir gecikme durumu için gösterilmiştir (Şekil 5.4). Şekilden açıkça görülmektedir ki, homojen Markov zincirleri ile elde edilen kararlı durum olasılıkları, gözlenen bağıl frekansları ile büyük oranda benzerlik göstermektedir. Bu sonuç, kararlı durum olasılıklarının uzun vadede gecikme durumlarının dağılımını tahmin etmek ve çizelge sağlamlığını değerlendirmek için kullanılabileceğini göstermektedir.



Şekil 5.4 Gecikme durumları için gözlenen oranlar ve kararlı durum olasılıklarının benzerliği

Burada, EV; eğitme verilerinden gözlenen oranlar ve TV; test verilerinden gözlenen oranlardır.

Tablo 5.2'deki birleştirilmemiş olan geçiş olasılıkları matrisi ile karalı durum olasılıkları hesaplanıp Şekil 5.1'de gözlenen gecikme değerleri ile karşılaştırılmıştır (Şekil 5.5).



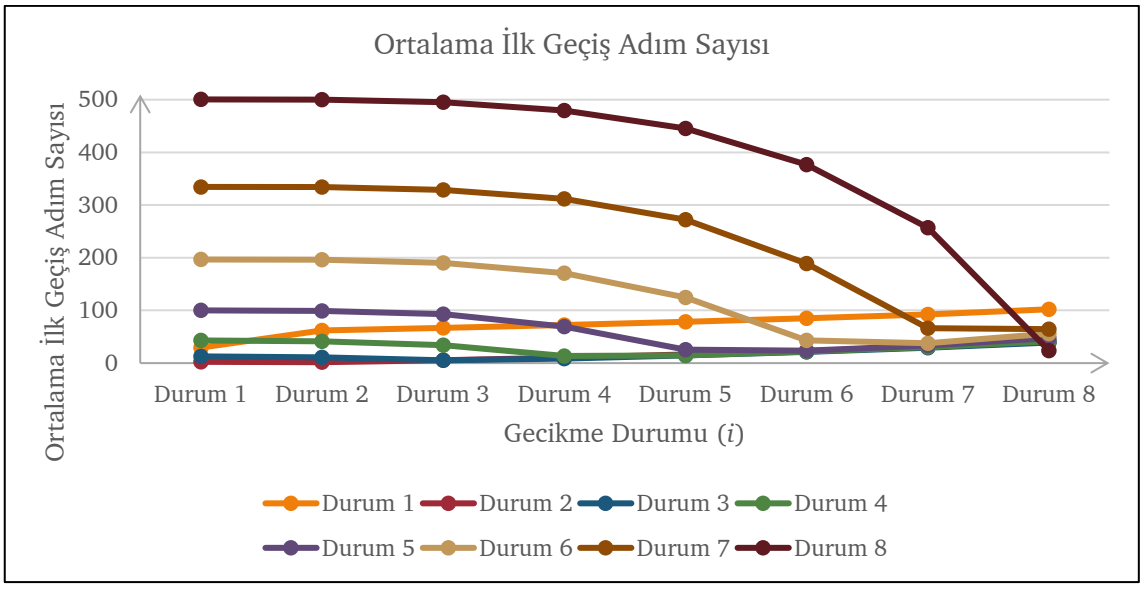
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Göz. Oranlar (Eğitme Verileri)	0,00	0,01	0,07	0,34	2,56	61,20	18,79	7,17	3,64	2,01	1,21	0,75	0,52	0,41	0,33	0,28	0,23	0,16	0,14	0,12	0,08
Kararlı Durum Olasıkları	0,00	0,02	0,15	0,51	2,81	58,16	18,60	7,34	3,90	2,28	1,47	0,98	0,73	0,60	0,51	0,45	0,39	0,29	0,30	0,29	0,21
Göz. Oranlar (Test Verileri)	0,00	0,01	0,06	0,31	2,39	63,46	18,25	6,93	3,35	1,83	1,02	0,59	0,41	0,32	0,25	0,20	0,18	0,14	0,13	0,10	0,06

Şekil 5.5 Gecikmeler için gözlenen oranlar ve kararlı durum olasılıklarının benzerliği

Ağ genelinde ortalama ilk geçiş adım sayıları Şekil 5.6'da ve (5.9) eşitliğinde gösterilmiştir.

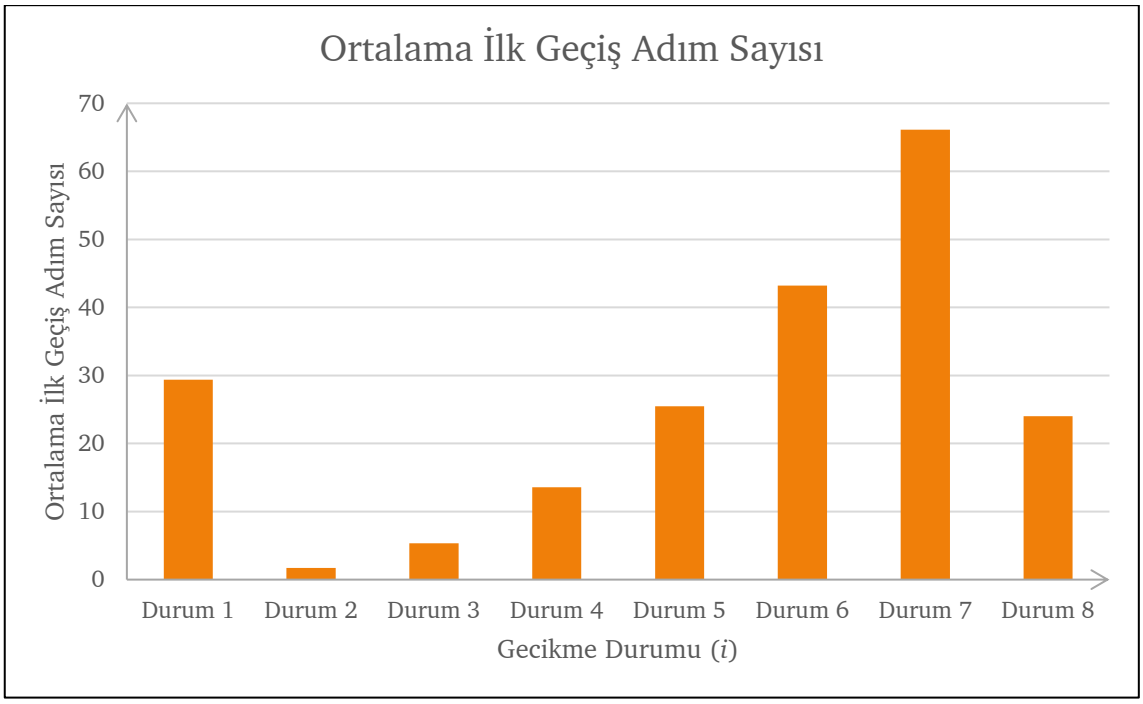
$$Z = \begin{bmatrix} \mathbf{29,38} & 2,68 & 12,74 & 43,01 & 100,04 & 196,63 & 334,38 & 500,48 \\ 61,98 & \mathbf{1,71} & 10,77 & 41,62 & 99,09 & 196,02 & 333,95 & 500,20 \\ 67,12 & 5,20 & \mathbf{5,35} & 34,04 & 92,75 & 190,47 & 328,90 & 495,50 \\ 72,34 & 10,41 & 8,38 & \mathbf{13,56} & 69,57 & 170,95 & 311,47 & 479,69 \\ 78,20 & 16,26 & 14,39 & 14,43 & \mathbf{25,47} & 124,50 & 272,48 & 445,55 \\ 84,99 & 23,05 & 21,46 & 22,05 & 23,62 & \mathbf{43,20} & 188,91 & 376,56 \\ 92,30 & 30,36 & 28,99 & 30,48 & 33,67 & 37,72 & \mathbf{66,12} & 257,15 \\ 102,14 & 40,20 & 39,02 & 41,49 & 47,23 & 55,70 & 64,47 & \mathbf{24,01} \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

(5.9)'da köşegenin solundaki değerlerin sağındaki değerlere göre çok daha küçük olması, gecikme telafi edilmesi için gereken ortalama sürenin, gecikmenin eşit miktarda büyümesi için gereken ortalama süreye kıyasla daha kısa olduğunu göstermektedir. Örneğin gecikmesiz bir trenin 3 dakika gecikmeli hale gelmesi için ortalama z_{25}=99,09 geçiş gerekli iken, 3 dakika gecikmeli bir trenin gecikmesinin tamamını telafi edebilmesi için ortalama z_{52}=16,26 geçiş gereklidir. Gecikme büyüdükçe (ikinci satırdan sekizinci satıra), gecikmenin telafi edilebilmesi için gerekli olan ortalama geçiş sayısı artmaktadır (ikinci sütun). Şekil 5.6'da ise özellikle görece küçük gecikmelerin büyümesi için gerekli ortalama adım sayısı oldukça büyüktür.



Şekil 5.6 Ortalama ilk geçiş adım sayıları

(5.9)'da köşegen değerleri (matristeki kalınlaştırılmış elemanlar), gecikme durumunun değişmesi halinde gecikmenin tekrar eski durumuna dönmesi için gerekli olan ortalama adım sayısını göstermektedir. Şekil 5.7'de görüldüğü gibi görece küçük gecikmelerin kararlılığı daha yüksektir. Örneğin gecikme durumu 2 (gecikme değeri sıfır dakika), olan trenlerin orerden sapmaları durumunda ortaya çıkan gecikmelerini telafi edebilmeleri için gerekli ortalama adım sayısı 1,71'dir. Bu değerin küçük olması ortaya çıkabilecek gecikmelerin çok hızlı bir şekilde telafi edilebildiğini, bu bakımdan tolerans sürelerin yeterli olduğunu göstermekte ve çizelgenin sağlamlığını ifade etmektedir.



Şekil 5.7 Gecikme durumunun değişmesi halinde eski gecikme durumuna dönüş için gerekli ortalama geçiş adım sayıları

5.3 Ağ Genelinde Geçiş Süreci Bazında Gecikme ve Dakiklik Analizi

Tolerans süreleri istasyonlarda bekleme süresine ek olarak tampon süre ve kesim seyir sürelerine ek olarak seyir süresi takviyesi olmak üzere iki türdedir. Mevcut seyir süresi takviyesi ve tampon sürelerin ayrı ayrı değerlendirilmesi için seyir süreçleri ve bekleme süreçlerine ait geçiş olasılıkları ayrı ayrı incelenmelidir. Seyir

süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri (532863 adet) kullanılarak elde edilen (tek adım) geçiş olasılıkları matrisi (5.10):

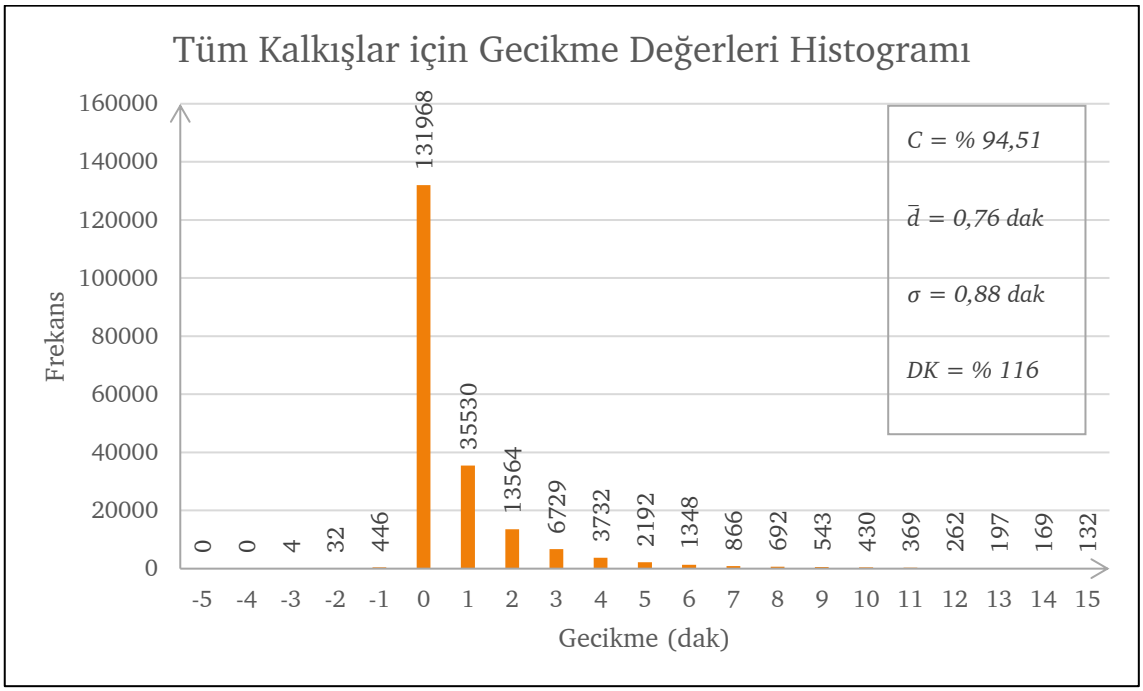
$$P_{SS} = \begin{bmatrix} 0,7066 & 0,2815 & 0,0065 & 0,0025 & 0,0014 & 0,0009 & 0,0002 & 0,0004 \\ 0,0347 & 0,8449 & 0,1124 & 0,0058 & 0,0012 & 0,0005 & 0,0002 & 0,0003 \\ 0,0003 & 0,3503 & 0,5327 & 0,1065 & 0,0077 & 0,0014 & 0,0005 & 0,0006 \\ 0,0000 & 0,0543 & 0,2712 & 0,5350 & 0,1257 & 0,0099 & 0,0023 & 0,0016 \\ 0,0000 & 0,0014 & 0,0451 & 0,2549 & 0,5560 & 0,1271 & 0,0113 & 0,0042 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0008 & 0,0403 & 0,2498 & 0,5535 & 0,1364 & 0,0192 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0005 & 0,0346 & 0,2483 & 0,5614 & 0,1552 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0002 & 0,0095 & 0,0646 & 0,9257 \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Bekleme süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri (177442 adet) kullanılarak elde edilen (tek adım) geçiş olasılıkları matrisi (5.11):

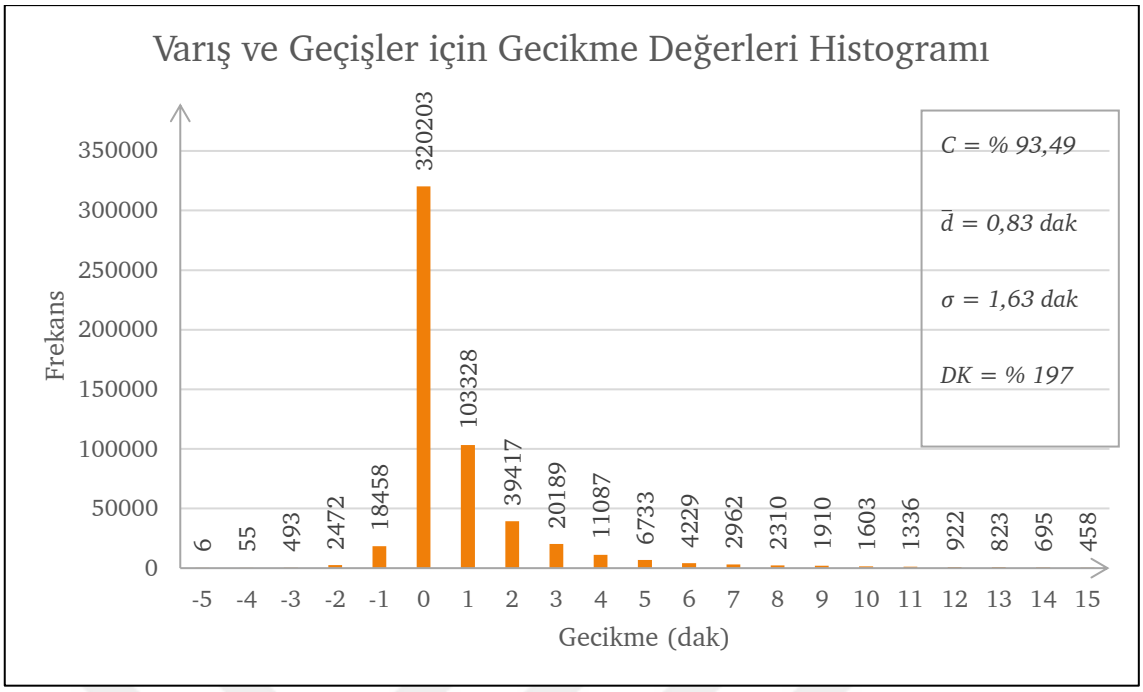
$$P_{BS} = \begin{bmatrix} 0,0766 & 0,8716 & 0,0325 & 0,0104 & 0,0038 & 0,0018 & 0,0015 & 0,0018 \\ 0,0011 & 0,9300 & 0,0595 & 0,0049 & 0,0023 & 0,0009 & 0,0004 & 0,0008 \\ 0,0001 & 0,2037 & 0,7282 & 0,0608 & 0,0042 & 0,0016 & 0,0004 & 0,0010 \\ 0,0001 & 0,0687 & 0,1508 & 0,7015 & 0,0701 & 0,0050 & 0,0017 & 0,0021 \\ 0,0000 & 0,0405 & 0,0412 & 0,1571 & 0,6736 & 0,0773 & 0,0056 & 0,0047 \\ 0,0000 & 0,0205 & 0,0191 & 0,0371 & 0,1392 & 0,6779 & 0,0923 & 0,0138 \\ 0,0000 & 0,0164 & 0,0051 & 0,0206 & 0,0458 & 0,1464 & 0,6534 & 0,1123 \\ 0,0000 & 0,0091 & 0,0059 & 0,0049 & 0,0081 & 0,0170 & 0,0496 & 0,9054 \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Buna göre ağ parçası genelinde, gecikmesiz bir trenin bir adım sonra yine gecikmesiz olma ihtimali bekleme süreci için %93'ken seyir süreci için bu değer %84,49'dur. Yani ağ genelinde kullanılan seyir süresi takviyesi ve tampon süreleri, gecikme oluşumunun engellenmesi bakımından işlevsel olmakla birlikte tampon sürelerin yeterliliği daha fazladır. Küçük gecikmelere sahip trenler için gecikmenin sabit kalma ihtimali, bekleme süreçleri için daha yüksektir. İki tür süreç için de ilgili satırlarda köşegenin solundaki değerlerin köşegenin sağındaki değerlerden büyük olması, her iki geçiş süreci türü için de ortaya çıkan gecikmelerin azalma eğiliminde olduklarını göstermektedir. Bu, ağ genelinde kullanılan hem tampon sürelerin hem de seyir süresi takviyelerinin bir adımda bile gecikmeleri kısmen telafi edebilmek için yeterli olduğu anlamına gelmektedir. Her iki tolerans süresi de görece büyük gecikmelerin büyük bir kısmını telafi edememektedir. Negatif

gecikmeli trenlerin sadece %28,15'i bir seyir sonra çizelgeye uyum sağlarken, bu değerin bir istasyonda bekleme süreci için %87,16'ya kadar çıktığı görülmektedir. Bu durum, son tren hareketi erken gerçekleşmiş trenlerde, sürücülerin büyük bir kısmının erken varışı/geçişi engellemek için yavaşlamadıklarını ancak erken varmış olsalar bile istasyondan kalkmak için planlanan zamanları bekledikleri anlamına gelmektedir. Erken kalkışların tüm kalkışlar (Şekil 5.8) içindeki oranı (%0,24), erken varış ve geçişlerin tüm varış ve geçişler (Şekil 5.9) içindeki oranına (%3,98) göre çok daha küçük olması bu bulguyu desteklemektedir.



Şekil 5.8 Kalkış gecikmelerinin dağılımı



Şekil 5.9 Varış/geçiş gecikmelerinin dağılımı

Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'a göre kalkışların %66,25'i, varış/geçişlerin ise %59,33'ü gecikmesiz; kalkışların %33,51'ü, varış/geçişlerin ise %36,69'u gecikmeli; kalkışların %0,24'ü, varış/geçişlerin ise %3,98'i erken gerçekleşmiştir. 3 dakika toleransla kalkışların %94,16'sı dakiktir. Varış/geçiş için bu değer %93,5'dir. Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'daki dakiklik, ortalama gecikme, standart sapma ve değişkenlik katsayısı sırasıyla (5.1), (5.2), (5.3) ve (5.4) eşitlikleri kullanılarak elde edilmiştir.

5.4 Ağ Genelinde Tren Türü Bazında Gecikme ve Dakiklik Analizi

Ağ genelinde tren türü bazında geçiş olasılıkları, bekleme süreçleri ve seyir süreçleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Şehirlerarası trenler (IC) için bekleme süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri (46654 adet) kullanılarak elde edilen (tek adım) geçiş olasılıkları matrisi (5.12):

$$P_{IC,BS} = \begin{bmatrix} 0,0056 & 0,9337 & 0,0455 & 0,0073 & 0,0028 & 0,0011 & 0,0023 & 0,0017 \\ 0,0003 & 0,8910 & 0,0973 & 0,0062 & 0,0025 & 0,0008 & 0,0004 & 0,0015 \\ 0,0005 & 0,2697 & 0,6107 & 0,1064 & 0,0079 & 0,0023 & 0,0005 & 0,0020 \\ 0,0003 & 0,1435 & 0,1717 & 0,5504 & 0,1197 & 0,0099 & 0,0018 & 0,0027 \\ 0,0000 & 0,0809 & 0,0784 & 0,1806 & 0,5236 & 0,1183 & 0,0104 & 0,0078 \\ 0,0000 & 0,0354 & 0,0457 & 0,0680 & 0,1659 & 0,5200 & 0,1482 & 0,0168 \\ 0,0000 & 0,0293 & 0,0112 & 0,0474 & 0,0697 & 0,1729 & 0,5091 & 0,1604 \\ 0,0000 & 0,0040 & 0,0061 & 0,0061 & 0,0137 & 0,0228 & 0,0502 & 0,8971 \end{bmatrix} \quad (5.12)$$

Kentiçi trenler (SPR) için bekleme süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri (130788 adet) kullanılarak elde edilen (tek adım) geçiş olasılıkları matrisi (5.13):

$$P_{SPR,BS} = \begin{bmatrix} 0,1227 & 0,8313 & 0,0241 & 0,0124 & 0,0044 & 0,0022 & 0,0011 & 0,0018 \\ 0,0014 & 0,9437 & 0,0463 & 0,0045 & 0,0022 & 0,0009 & 0,0004 & 0,0006 \\ 0,0000 & 0,1844 & 0,7625 & 0,0475 & 0,0031 & 0,0014 & 0,0004 & 0,0007 \\ 0,0000 & 0,0427 & 0,1436 & 0,7541 & 0,0528 & 0,0032 & 0,0017 & 0,0019 \\ 0,0000 & 0,0239 & 0,0260 & 0,1474 & 0,7352 & 0,0605 & 0,0036 & 0,0034 \\ 0,0000 & 0,0141 & 0,0076 & 0,0238 & 0,1277 & 0,7462 & 0,0681 & 0,0125 \\ 0,0000 & 0,0099 & 0,0021 & 0,0070 & 0,0338 & 0,1330 & 0,7262 & 0,0880 \\ 0,0000 & 0,0128 & 0,0058 & 0,0040 & 0,0040 & 0,0128 & 0,0492 & 0,9114 \end{bmatrix} \quad (5.13)$$

Buna göre bekleme süreçleri genelinde, her iki tren türü için de tampon süreler görece büyük gecikmelerin büyük bir kısmını telafi edememektedir. Gecikmesiz bir trenin bir bekleme süreci sonra yine gecikmesiz olma ihtimali IC türü trenler için %89,10'ken SPR türü trenler için bu değer %94,37'dir. Yani gecikme oluşumunun engellenmesi bakımından SPR türü trenler için kullanılan tampon sürelerin yeterliliği daha fazladır. Gecikmenin sabit kalma ihtimali SPR türü trenler için daha yüksektir. Küçük gecikmeler söz konusu olduğunda, iki tren türü için de ilgili satırlarda köşegenin solundaki değerlerin köşegenin sağındaki değerlerden büyük olması ortaya çıkan gecikmelerin azalma eğiliminde olduklarını göstermektedir.

Şehirlerarası trenler (IC) için seyir süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri (282753 adet) kullanılarak elde edilen (tek adım) geçiş olasılıkları matrisi (5.14):

$$P_{IC,SS} = \begin{bmatrix} 0,7265 & 0,2594 & 0,0076 & 0,0033 & 0,0017 & 0,0009 & 0,0002 & 0,0004 \\ 0,0356 & 0,8572 & 0,1006 & 0,0045 & 0,0011 & 0,0005 & 0,0002 & 0,0003 \\ 0,0000 & 0,3397 & 0,5635 & 0,0877 & 0,0065 & 0,0013 & 0,0007 & 0,0006 \\ 0,0000 & 0,0163 & 0,2738 & 0,5787 & 0,1158 & 0,0103 & 0,0030 & 0,0021 \\ 0,0000 & 0,0004 & 0,0170 & 0,2606 & 0,5931 & 0,1118 & 0,0118 & 0,0053 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0002 & 0,0148 & 0,2542 & 0,5864 & 0,1247 & 0,0197 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0171 & 0,2456 & 0,5893 & 0,1480 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0038 & 0,0579 & 0,9383 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

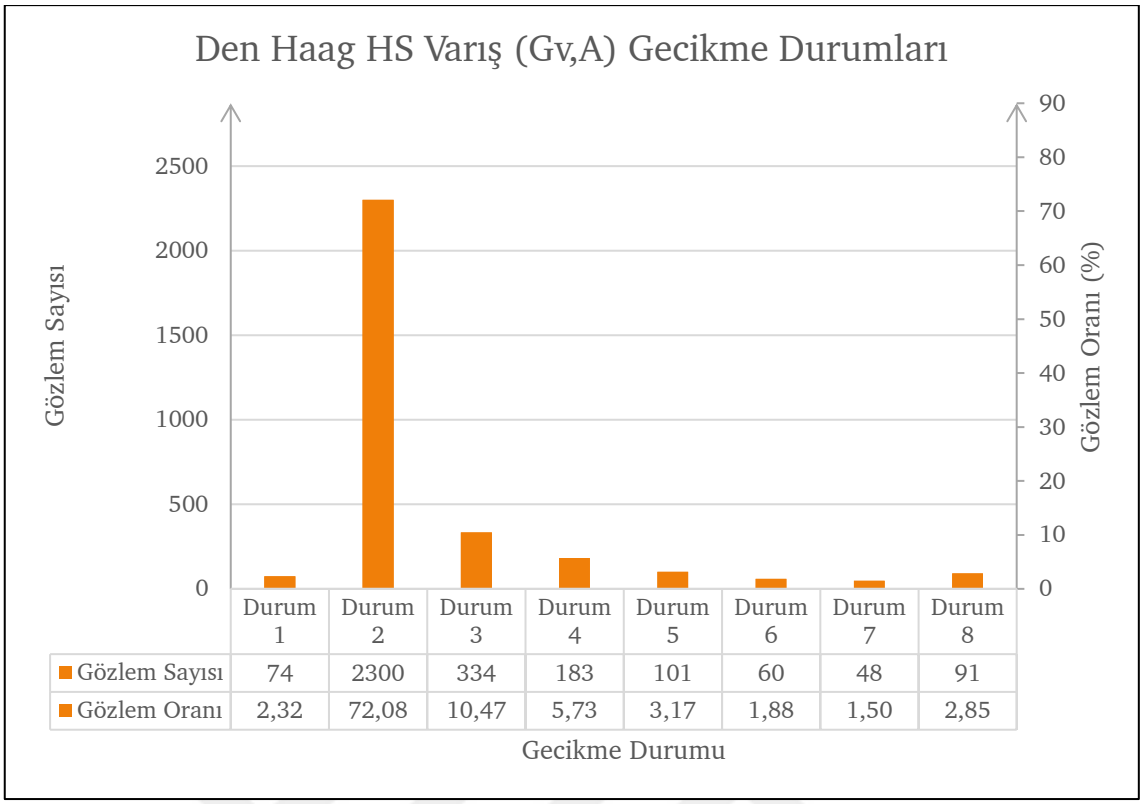
Kentiçi trenler (SPR) için seyir süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri (250110 adet) kullanılarak elde edilen (tek adım) geçiş olasılıkları matrisi (5.15):

$$P_{SPR,SS} = \begin{bmatrix} 0,6501 & 0,3446 & 0,0035 & 0,0003 & 0,0003 & 0,0009 & 0,0000 & 0,0003 \\ 0,0337 & 0,8318 & 0,1250 & 0,0072 & 0,0013 & 0,0005 & 0,0002 & 0,0003 \\ 0,0006 & 0,3622 & 0,4986 & 0,1272 & 0,0090 & 0,0014 & 0,0004 & 0,0006 \\ 0,0000 & 0,0928 & 0,2685 & 0,4906 & 0,1359 & 0,0095 & 0,0016 & 0,0011 \\ 0,0000 & 0,0025 & 0,0765 & 0,2485 & 0,5146 & 0,1441 & 0,0108 & 0,0030 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0016 & 0,0709 & 0,2445 & 0,5141 & 0,1504 & 0,0185 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0011 & 0,0593 & 0,2521 & 0,5220 & 0,1655 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0007 & 0,0217 & 0,0791 & 0,8985 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

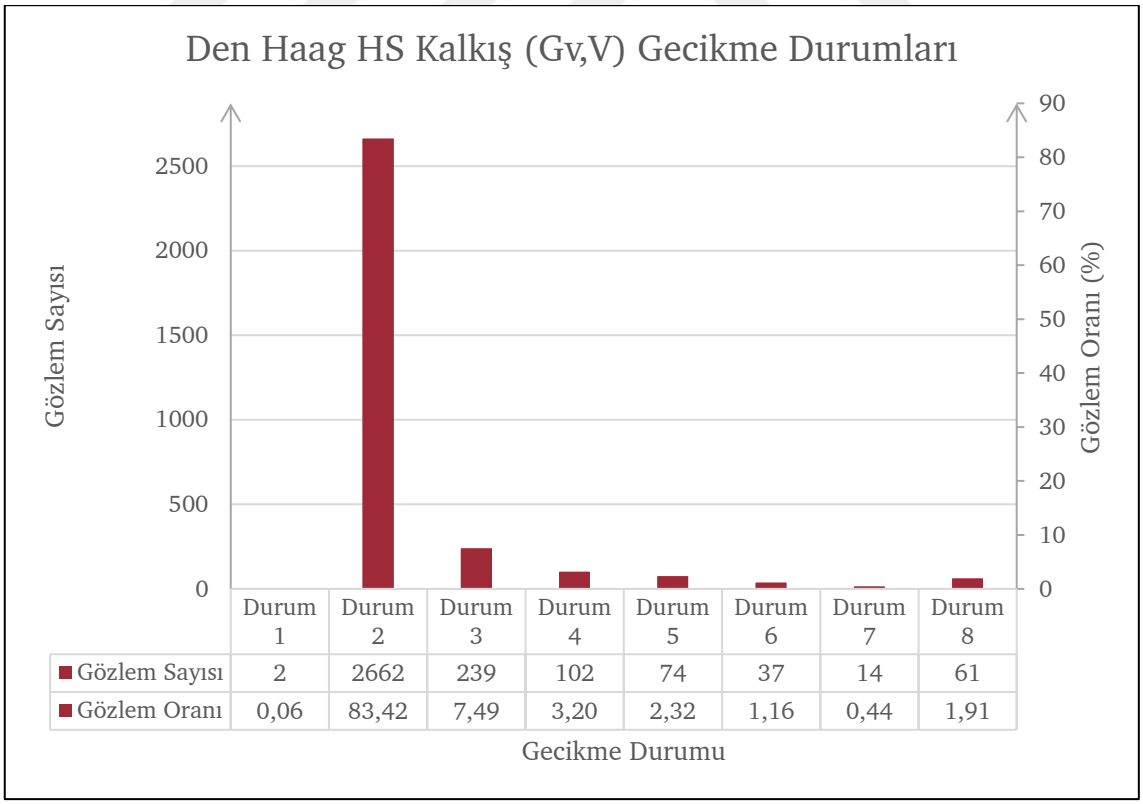
Buna göre seyir süreçleri genelinde, gecikmesiz bir trenin bir seyir sonra yine gecikmesiz olma ihtimali IC türü trenler için %85,72'ken SPR türü trenler için bu değer %83,18'dir. Yani gecikme oluşumunun engellenmesi bakımından kullanılan seyir süresi takviyesinin yeterliliği iki tren türü için yakın seviyededir. Her iki tren türü için kullanılan seyir süresi takviyeleri, mevcut gecikmeleri, birbiriyle benzer şekilde etkilemektedir.

5.5 İstasyon Bazında Gecikme ve Dakiklik Analizi

İstasyon bazında bekleme sürecini değerlendirmek için yapılacak olan analizde seyahat yönü 2 olan SPR türü trenlerin Den Haag HS (Gv) istasyonundaki tren hareketleri (örnek olarak) ele alınmıştır. Trenlerin Den Haag HS istasyonuna varış gecikmeleri için gözlem sayıları/oranları Şekil 5.10'da ve kalkış gecikmeleri için gözlem sayıları/oranları Şekil 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.10 Gv,A gecikme durumlarının dağılımı



Şekil 5.11 Gv,V gecikme durumlarının dağılımı

Seyahat yönü 2 olan kentiçi trenlerin (SPR) Gv istasyonundaki bekleme süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri (3191 adet) kullanılarak elde edilen geçiş olasılıkları matrisi (5.16):

$$P^{Gv}_{2,SPR,BS} = \begin{bmatrix} 0,0000 & 0,9054 & 0,0135 & 0,0270 & 0,0135 & 0,0000 & 0,0135 & 0,0270 \\ 0,0009 & 0,9278 & 0,0452 & 0,0157 & 0,0074 & 0,0022 & 0,0000 & 0,0009 \\ 0,0000 & 0,9012 & 0,0749 & 0,0120 & 0,0090 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0030 \\ 0,0000 & 0,7596 & 0,1913 & 0,0219 & 0,0164 & 0,0055 & 0,0055 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,2079 & 0,6238 & 0,0792 & 0,0693 & 0,0099 & 0,0099 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,1833 & 0,6833 & 0,1000 & 0,0333 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,1458 & 0,6875 & 0,1042 & 0,0208 & 0,0417 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0440 & 0,2527 & 0,1099 & 0,5934 \end{bmatrix} \quad (5.16)$$

Buna göre Gv istasyonuna gecikmesiz varan seyahat yönü 2 olan bir SPR türü trenin istasyondan kalkarken yine gecikmesiz olma ihtimali %92,78'dir. Yani seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için orerde, Gv istasyonunda minimum bekleme süresine eklenen tampon süre, gecikme oluşumunun engellenmesi bakımından işlevsel ve yeterlidir. Satırlarda köşegenin solundaki değerlerin köşegenin sağındaki değerlerden oldukça büyük olması (birinci ve ikinci satır hariç) küçük başlangıç gecikmelerinin azalma eğiliminde olduklarını göstermektedir. Küçük gecikmelere sahip trenlerde, gecikmelerinin büyük kısmı bu bekleme sürecinde telafi edilebilmektedir. Bu, istasyonda kullanılan tampon sürenin, küçük gecikmelerin büyük bir kısmını telafi edebilmek için yeterli olduğu anlamına gelmektedir. Son satırda, görece büyük gecikmelerin kısmen azaldığı ama %60'ına yakınının hâlâ büyük gecikme olarak kaldığı görülmektedir. Negatif gecikmeli trenlerin %90,54'ü çizelgeye uyum sağlamıştır. Gecikme telafisi bakımından yeterli tampon süre olan bir istasyonda bile erken varan trenlerin erken kalkmıyor olmaları, sürücülerin kalkış için orerdeki zamanı beklediklerini göstermektedir.

Bir başka örnek olan seyahat yönü 1 olan şehirlerarası trenlerin (IC) Dt istasyonundaki bekleme süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri (3404 adet) kullanılarak elde edilen geçiş olasılıkları matrisi (5.17):

$$P^{Dt}{}_{1,IC,BS} = \begin{bmatrix} 0,5000 & 0,5000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,6855 & 0,3085 & 0,0036 & 0,0018 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0006 \\ 0,0010 & 0,0172 & 0,8662 & 0,1119 & 0,0029 & 0,0000 & 0,0010 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0143 & 0,8029 & 0,1792 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0036 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0368 & 0,6838 & 0,2426 & 0,0294 & 0,0074 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0508 & 0,7119 & 0,2203 & 0,0169 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,7674 & 0,2326 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} \quad (5.17)$$

Dt istasyonuna gecikmesiz varan seyahat yönü 1 olan bir IC türü trenin istasyondan kalkarken yine gecikmesiz olma ihtimali %68,55'tir. Yani %30'dan fazla bir ihtimalle gecikme oluşmaktadır. Kullanılan tampon süre, gecikme oluşumunun engellenmesi bakımından yetersizdir. Satırlarda köşegenin solundaki değerlerin köşegenin sağındaki değerlerden oldukça küçük olması, gecikmelerin bu istasyonda büyüme eğiliminde olduğunu göstermektedir. Bu, istasyonda kullanılan tampon sürenin gecikmeleri telafi etmek bakımından yetersiz olduğu anlamına gelmektedir.

5.6 Kesim Bazında Gecikme ve Dakiklik Analizi

Kesim bazında seyir sürecini değerlendirmek için yapılacak olan analizde seyahat yönü 2 olan SPR türü trenleri için ardışık olan Sdm-Dtzo ve Dtzo-Dtz kesimleri (örnek olarak) ele alınmıştır. Seyahat yönü 2 olan kentiçi trenlerin (SPR) Sdm istasyonu ve Dtzo kontrol noktası arasındaki seyir süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri (3204 adet) kullanılarak elde edilen geçiş olasılıkları matrisi (5.18):

$$P^{Sdm\text{-}Dtzo}{}_{2,SPR,SS} = \begin{bmatrix} 1,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,5238 & 0,4679 & 0,0048 & 0,0012 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0024 \\ 0,0037 & 0,9784 & 0,0060 & 0,0074 & 0,0015 & 0,0007 & 0,0007 & 0,0015 \\ 0,0000 & 0,8322 & 0,1519 & 0,0113 & 0,0000 & 0,0023 & 0,0000 & 0,0023 \\ 0,0000 & 0,0173 & 0,7792 & 0,1905 & 0,0087 & 0,0000 & 0,0043 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0155 & 0,7597 & 0,2016 & 0,0078 & 0,0000 & 0,0155 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,7471 & 0,2069 & 0,0345 & 0,0115 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0152 & 0,3409 & 0,1742 & 0,4697 \end{bmatrix} \quad (5.18)$$

Seyahat yönü 2 olan kentiçi trenlerin (SPR) Dtzo kontrol noktası ve Dtz istasyonu arasındaki seyir süreçlerine ait tüm gecikme çiftleri (3204 adet) kullanılarak elde edilen geçiş olasılıkları matrisi (5.19):

$$P^{Dtzo\text{-}Dtz}{}_{2,SPR,SS} = \begin{bmatrix} 0,0022 & 0,9978 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,6441 & 0,3242 & 0,0317 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0115 & 0,8429 & 0,1456 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,9051 & 0,0886 & 0,0063 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,8438 & 0,1563 & 0,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,8939 & 0,1061 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 1,0000 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 1,0000 \end{bmatrix} \quad (5.19)$$

Sdm-Dtzo kesiminde trenlerin gecikmelerinin azaldığı ve Dtzo-Dtz kesiminde gecikmelerin arttığı, (5.18) ve (5.19) eşitliklerinde açık bir şekilde görülmektedir. (5.18)'de ikinci satırda köşegenin solundaki değerin büyük olması bu kesimde seyir süresi takviyesi bolluğunu göstermektedir. (5.19)'da gerek gecikme oluşumu ihtimalinin büyüklüğü (2. Satır) gerek başlangıç gecikmelerinin büyüme ihtimalinin yüksek oluşu bakımından ilgili kesimde seyir süresi takviyesinin yetersiz olduğu görülmektedir.

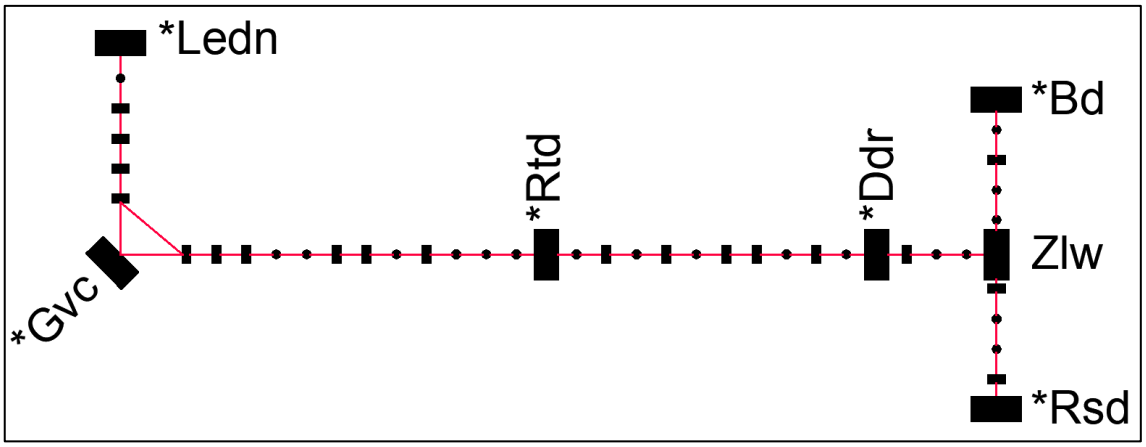
Sdm,V ve Dtz,A gecikmeleri eşleştirilip gecikme çifti (3204 adet) haline getirilip iki seyir boyunca gecikmelerin geçiş olasılıkları matrisi hesaplanmıştır (5.20). Trenler, bu iki seyir süreci sonunda gecikmelerini azaltmaktadırlar. Yani iki seyir süreci için kullanılan toplam seyir süresi takviyesi gecikme oluşumunu engelleyecek ve başlangıç gecikmelerini kısmen telafi edebilecek yeterliliktedir.

$$P^{Sdm\text{-}Dtz}{}_{2,SPR,SS} = \begin{bmatrix} 0,0000 & 1,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\ 0,0012 & 0,9798 & 0,0095 & 0,0024 & 0,0048 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0024 \\ 0,0000 & 0,7126 & 0,2651 & 0,0097 & 0,0074 & 0,0030 & 0,0007 & 0,0015 \\ 0,0000 & 0,0068 & 0,6923 & 0,2805 & 0,0090 & 0,0045 & 0,0023 & 0,0045 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0302 & 0,6293 & 0,3103 & 0,0129 & 0,0086 & 0,0086 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0078 & 0,7054 & 0,2248 & 0,0465 & 0,0155 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,6395 & 0,2907 & 0,0698 \\ 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0152 & 0,3030 & 0,6818 \end{bmatrix} \quad (5.20)$$

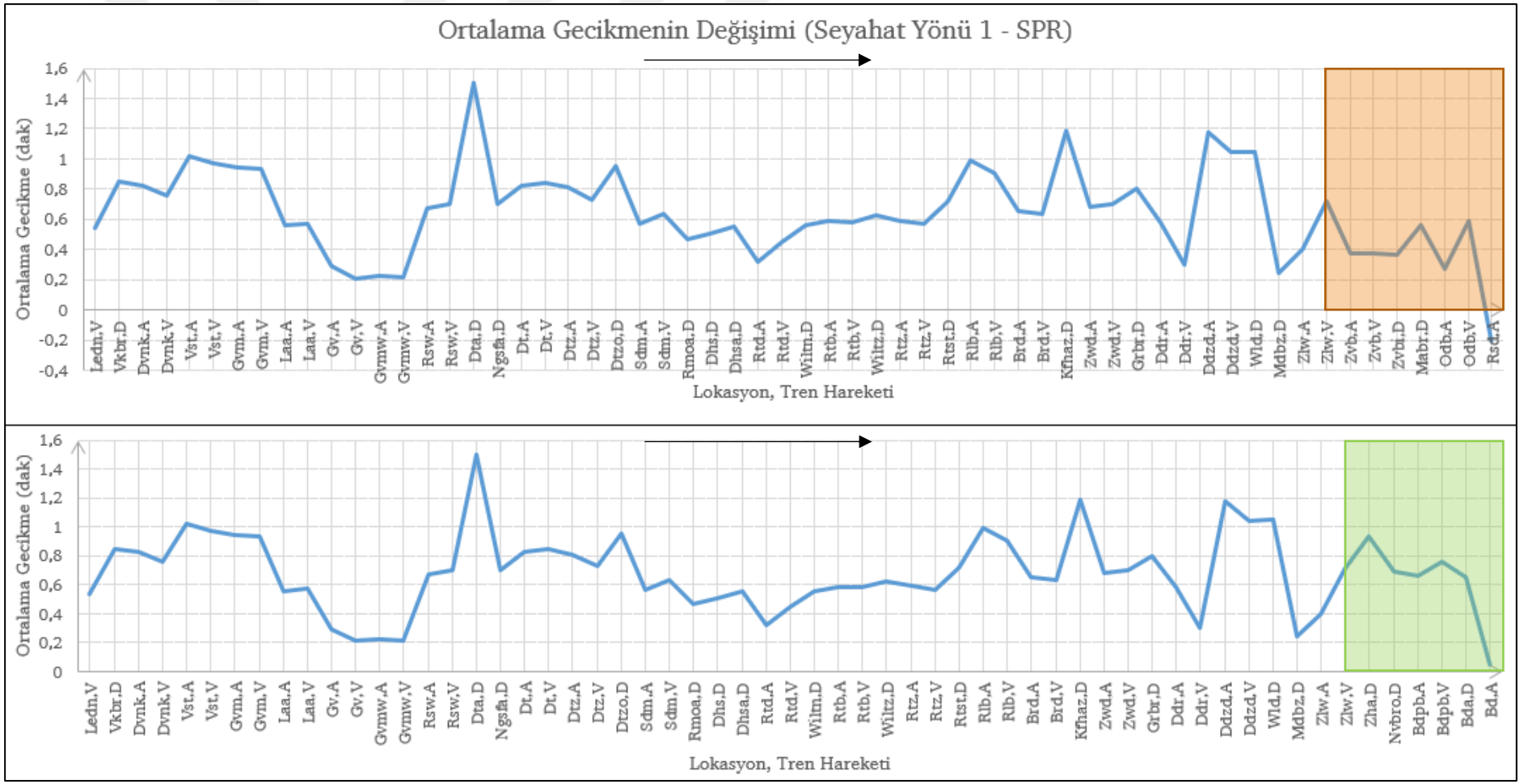
5.7 Tren Hareketlerinin Ortalama Gecikmeleri

Ağ parçasının şematik planı Şekil 5.12'de verilmiştir. Ele alınan ağ parçası için her tren hareketinin ortalama gecikmesi, eğitme verilerinden hesaplanmıştır. Seyahat yönü ve tren türüne göre ayrılan grafikler Şekil 5.13, Şekil 5.14, Şekil 5.15 ve Şekil 5.16'da verilmiştir. Şekillerde ağ parçasının dallanma bölgeleri renklendirilmiştir. Ortalama gecikme değişimleri grafiklerden gözlenebilmektedir. Böylece kesimlerde seyir sürelerinin ve istasyonlarda bekleme sürelerinin içinde bulunan tolerans sürelerine yönelik bir öngörüde bulunulabilir. Örneğin bir önceki başlıkta Markov matrisleri ile incelenen ve ardışık kesimler olan Sdm-Dtzo ve Dtzo-Dtz kesimleri için seyahat yönü 2 olan SPR türü trenlerinin gecikme değişimleri incelenmişti. Sonuçta, Sdm-Dtzo kesiminde gecikmelerin azaldığı ve Dtzo-Dtz kesiminde gecikmelerin arttığı ve iki seyrin sonunda gecikmelerin toplamda azaldığı gözlemlenmişti. Seyahat yönü 2 olan SPR türü trenlerin ortalama gecikmelerinin bulunduğu Şekil 5.14'te Sdm-Dtzo ve Dtzo-Dtz kesimlerindeki (oklarla gösterilen) ortalama gecikme değişimi bu sonuçları doğrulamaktadır.

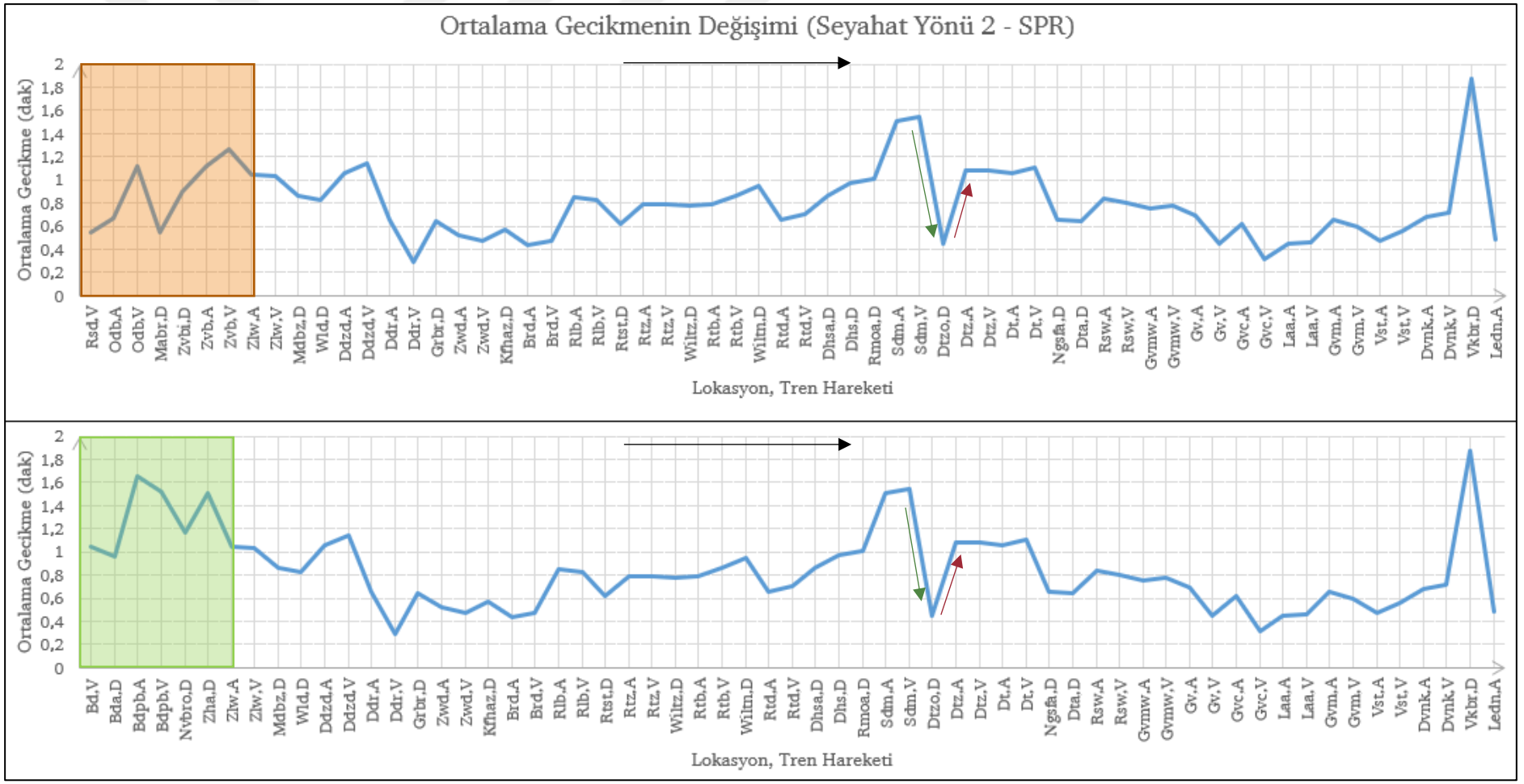
Tekil trenlerin gecikme değişimine örnek olarak, 2221 numaralı (seyahat yönü 2, IC türü) trenin 6 farklı gündeki seyahati boyunca gecikmelerin nasıl değiştiği Şekil 5.17'de gösterilmiştir.



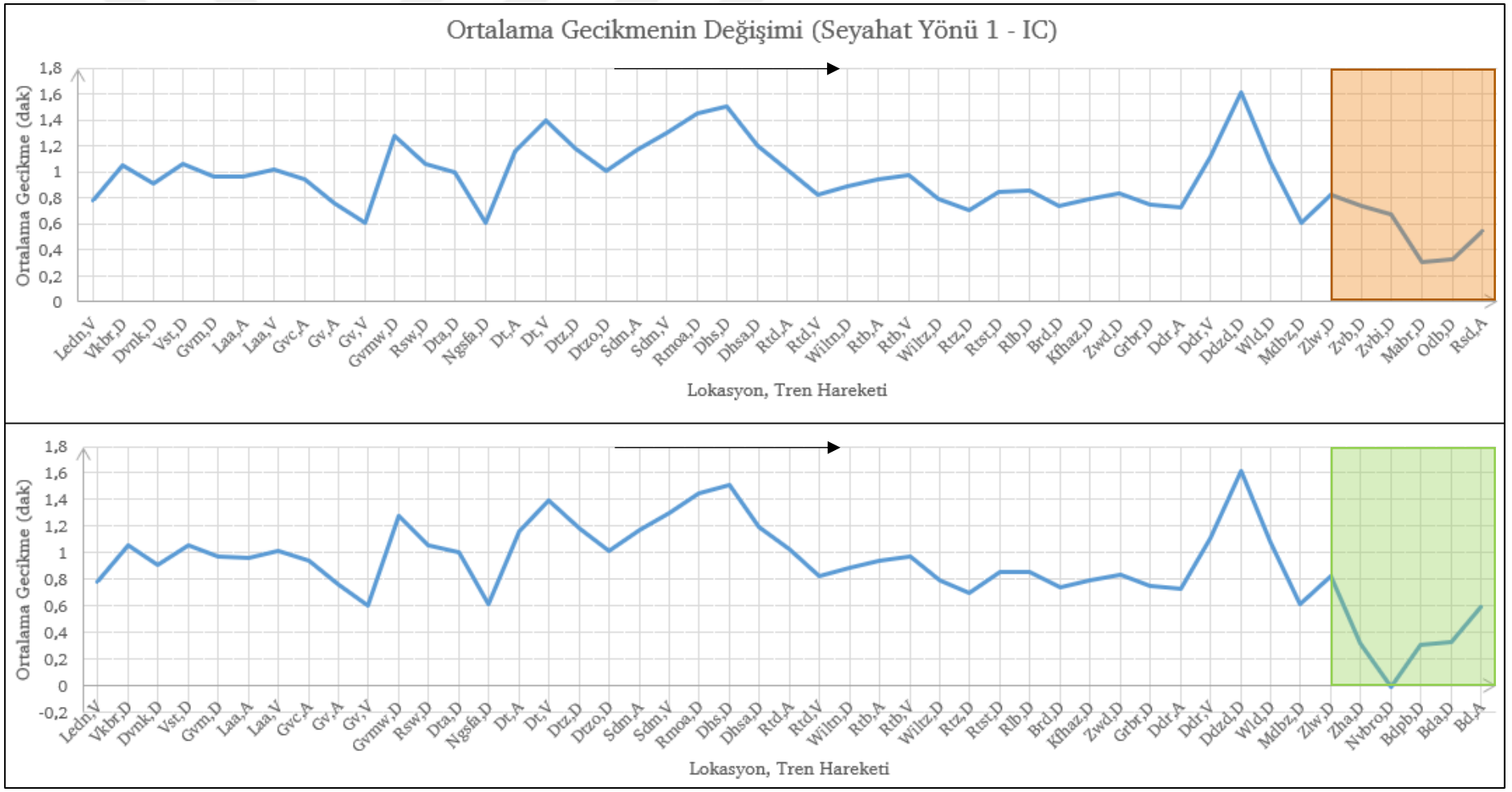
Şekil 5.12 Ağ parçasının şematik planı



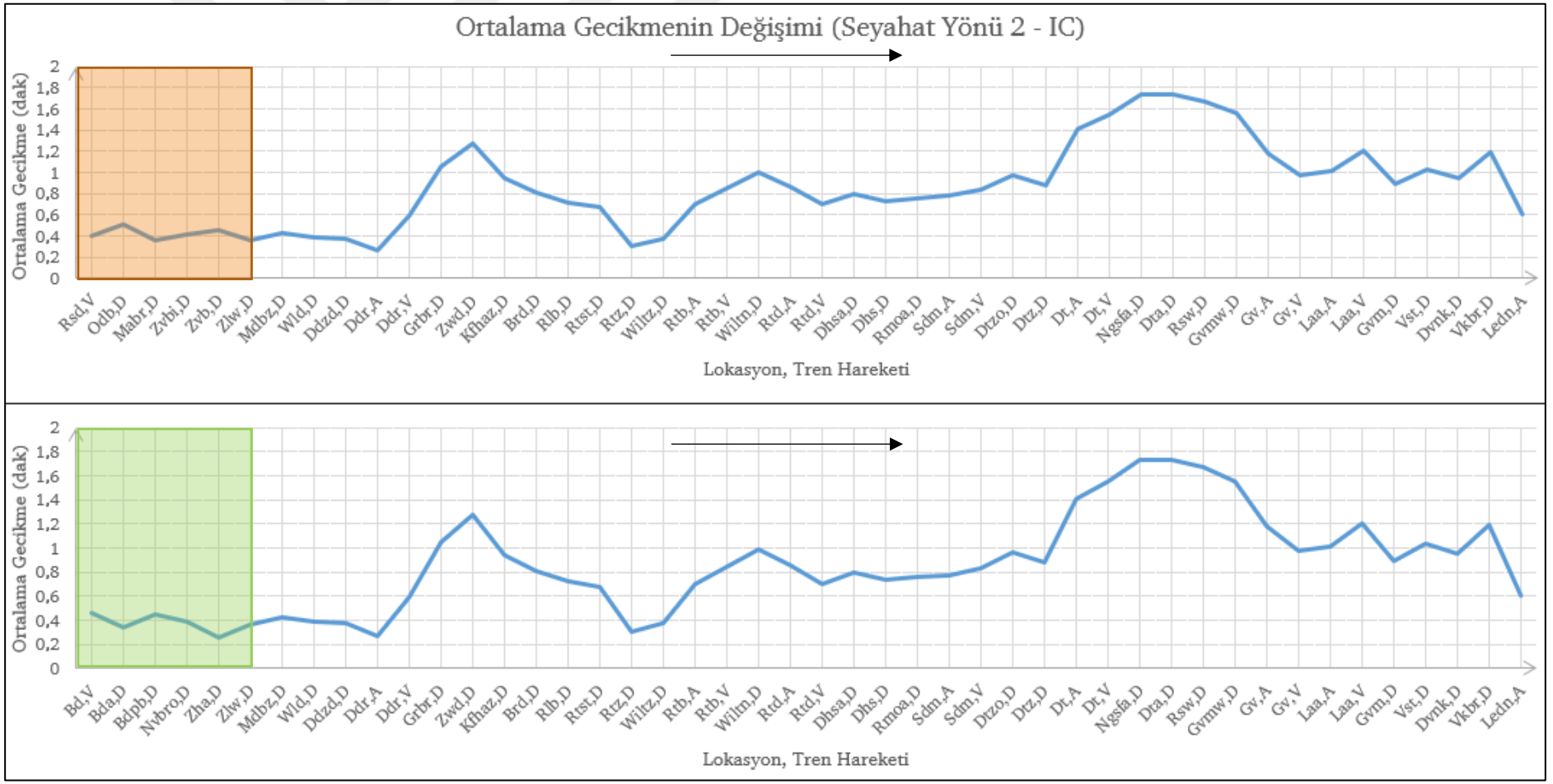
Şekil 5.13 Seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için ortalama gecikmenin değişimi



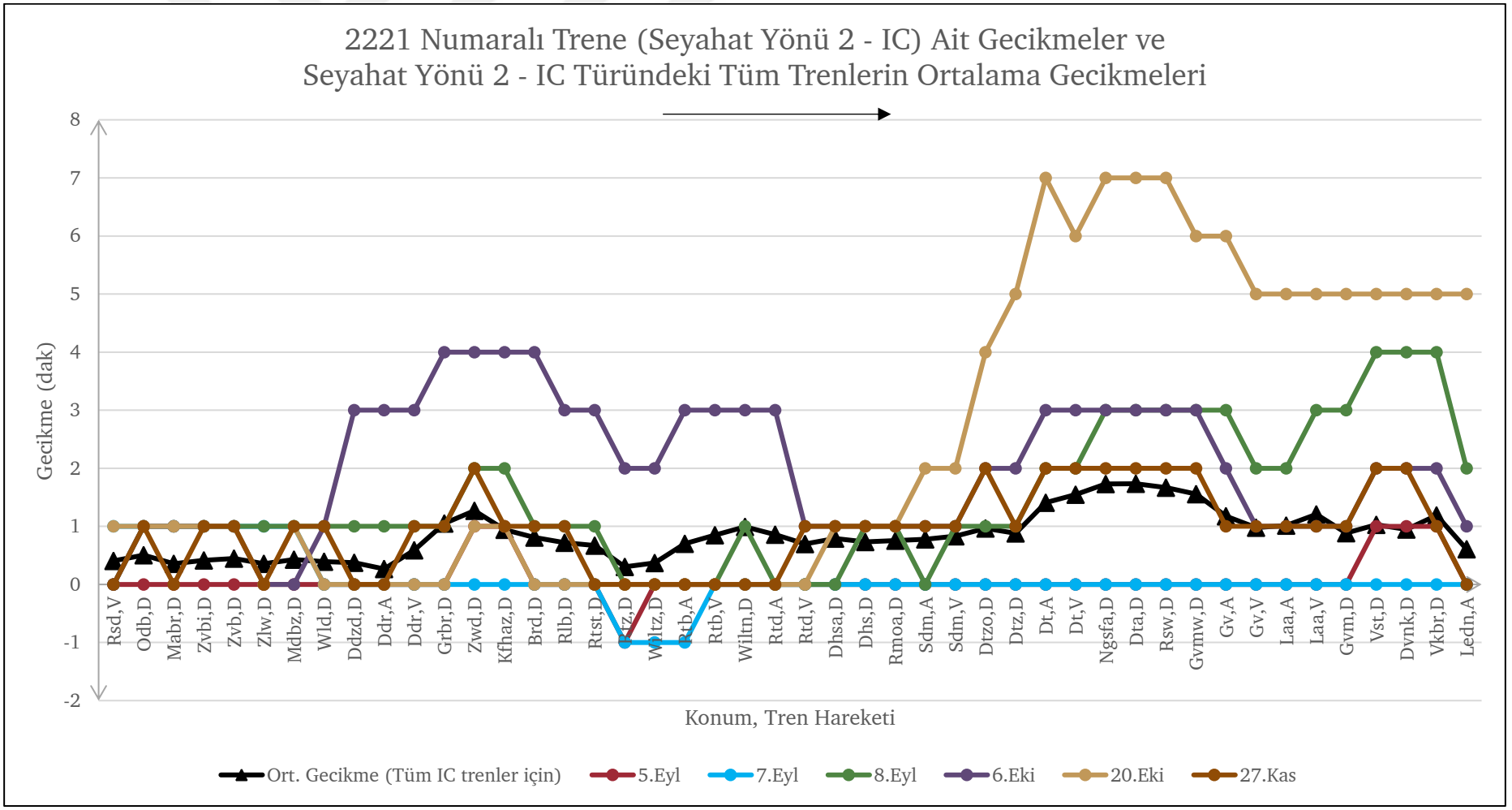
Şekil 5.14 Seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için ortalama gecikmenin değişimi



Şekil 5.15 Seyahat yönü 1 olan IC türü trenler için ortalama gecikmenin değişimi



Şekil 5.16 Seyahat yönü 2 olan IC türü trenler için ortalama gecikmenin değişimi



Şekil 5.17 2221 numaralı (seyahat yönü 2, IC türü) trenin 6 farklı gün için seyahati boyunca gecikmenin değişimi

6
GECİKME DURUMLARI OLASILIKLARININ TAHMİNİ

Bir olayın gelecekteki durumuyla ilgili belirsizlik olması halinde, bu olayın gelecekteki durumu, genellikle bir olasılık dağılımı ile temsil edilir. Tren gecikmelerinin stokastik yapısı gereği, gecikmelerin tahmininden önce, tren gecikmelerinin olasılık dağılımlarına yönelik tahminler yapılmıştır. Tekil trenlerin akım aşağıdaki ilgili gecikme durumlarına ilişkin olasılık dağılımı tahmini, gecikme tahminleri için bir ara işlem niteliğinde olmaktadır. Önceki bölümlerde gösterildiği gibi farklı ölçeklerde geçiş olasılıkları matrisleri oluşturmak mümkündür. Bu nedenle Markov Zincirleri kullanılarak gecikme durumuna ilişkin olasılık dağılımı tahminleri için de farklı modeller kullanılabilmektedir. Homojenlik ve durağanlık kabullerinin tahmin hatalarını arttıracağı Bölüm 4'te yapılan testlerde öngörülmüştür. Ancak bu kabuller, daha büyük tahmin hatalarına rağmen, sağladıkları kolaylık sebebiyle bazı durumlarda tercih edilebilirler.

T adım geçiş olasılıkları matrisinin hesabı, yapılacak kabullere bağlı olarak 3 farklı biçimde ele alınmıştır. Böylece her bir Markov modeli ile tekil trenler için olasılık dağılımlarına ilişkin tahminler yapılmıştır. Daha sonra model hataları karşılaştırılarak modellerin tahmin başarısı değerlendirilmiştir. Model tahmin değeri, *TD* ve tahmin değerine karşılık gelen gözlem değeri, *GD* olmak üzere tekil tahmin hataları $h=TD-GD$ olarak tanımlanır. Ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error, MAE) ve hata kareleri ortalamalarının karekökü (Root Mean Square Error, RMSE) modellerin karşılaştırılması için sıkça kullanılan ölçütlerdir.

MAE, yönlerini dikkate almadan bir dizi tahmindeki hataların (h) ortalama büyüklüğünü ölçer. Tüm tekil farkların eşit ağırlığa sahip olduğu, tahmin ile gözlem arasındaki toplam mutlak farkların örnek sayısına (n) oranıdır (6.1):

$$\text{MAE} = \frac{\sum |h|}{n} \tag{6.1}$$

RMSE, hatanın ortalama büyüklüğünü de ölçen ikinci dereceden bir puanlama kuralıdır. Tahmin ve gözlem arasındaki farkların karelerinin ortalamasının kareköküdür (6.2):

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum h^2}{n}} \tag{6.2}$$

Hem MAE hem de RMSE, ilgili değişkenin biriminde (örneğin, gecikme için birimi dakika) ortalama model tahmin hatasını ifade eder. Her iki ölçüt de 0 ile ∞ arasında değişebilir ve hataların yönünü dikkate almazlar. Olumsuz yönelimli puanlardır, yani modellerin tahmin başarısı adına daha düşük değerler daha iyidir. Bu tezde modeller hem RMSE hem de MAE ölçütlerinden faydalanılarak karşılaştırılmıştır.

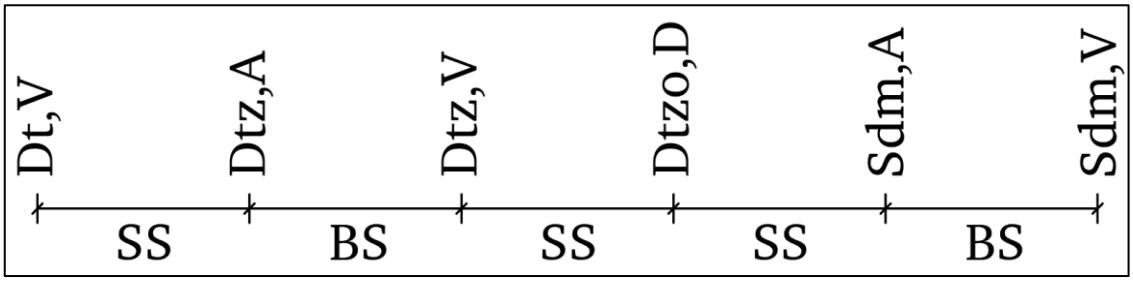
6.1 Tekil Trenlerin Gecikme Durumlarına İlişkin Olasılık Dağılımlarının Tahmin Modelleri

Belirli bir konumda (baz alınan anda) gecikmesi bilinen bir trenin akım aşağıda başka bir konumdaki (hedef andaki) gecikme durumuna ilişkin olasılık dağılımı, (2.12)'deki gibi, baz alınan andaki başlangıç durum vektörü ve T adım geçiş olasılıkları matrisinin çarpımı olan koşullu olasılıklar ile tahmin edilebilir.

6.1.1 T Adım Geçiş Olasılıklarının Hesaplanması

Yapılacak kabullere göre T adım geçiş olasılıklarının 3 model ile nasıl hesaplandığı, örnek olarak seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için Delft istasyonundan kalkış (Dt,V) ile Schiedam Centrum istasyonundan kalkış (Sdm,V) arası için gösterilmiştir. Dt,V gecikmesi bilinen bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahmin edilmiştir. Şekil 6.1'de görüldüğü gibi baz alınan

konum/an ile hedef konum/an arasında ikisi bekleme süreci (BS) üçü seyir süreci (SS) olmak üzere 5 geçiş (adım) söz konusudur.



Şekil 6.1 Seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için Dt,V - Sdm,V arasındaki geçişler (adımlar)

Birinci modelde (M1), geçiş sürecinin türü, seyahat yönü, tren türü için homojenlik kabulü ve konumda durağanlık kabulü yapılmıştır. Yani M1'de, tüm geçişler için (5.5) kullanılmıştır. M1 için T adım geçiş olasılıkları matrisi (2.9) eşitliğindeki gibi hesaplanmıştır. Buna göre, M1 ile, seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için Delft istasyonundan kalkış (Dt,V) ile Schiedam Centrum istasyonundan kalkış (Sdm,V) arası için T=5 adım geçiş olasılıkları matrisi (6.3)'deki gibi elde edilmiştir (6.4).

$$^{M1}P^{(5)} = P^5 \tag{6.3}$$

$$^{M1}P^{(5)} = \begin{bmatrix} 0{,}0835 & 0{,}7071 & 0{,}1559 & 0{,}0337 & 0{,}0105 & 0{,}0042 & 0{,}0020 & 0{,}0031 \\ 0{,}0421 & 0{,}7025 & 0{,}1867 & 0{,}0462 & 0{,}0135 & 0{,}0045 & 0{,}0018 & 0{,}0027 \\ 0{,}0278 & 0{,}5903 & 0{,}2322 & 0{,}0944 & 0{,}0356 & 0{,}0114 & 0{,}0039 & 0{,}0044 \\ 0{,}0140 & 0{,}3863 & 0{,}2446 & 0{,}1828 & 0{,}1048 & 0{,}0417 & 0{,}0142 & 0{,}0116 \\ 0{,}0058 & 0{,}2035 & 0{,}1868 & 0{,}2164 & 0{,}1954 & 0{,}1118 & 0{,}0457 & 0{,}0346 \\ 0{,}0022 & 0{,}0906 & 0{,}1036 & 0{,}1648 & 0{,}2173 & 0{,}1975 & 0{,}1132 & 0{,}1108 \\ 0{,}0010 & 0{,}0407 & 0{,}0464 & 0{,}0895 & 0{,}1548 & 0{,}1995 & 0{,}1685 & 0{,}2996 \\ 0{,}0004 & 0{,}0148 & 0{,}0108 & 0{,}0177 & 0{,}0378 & 0{,}0763 & 0{,}1253 & 0{,}7169 \end{bmatrix} \tag{6.4}$$

İkinci modelde (M2), geçiş olasılıkları için geçiş sürecinin türü, seyahat yönü, tren türü için homojenlik kabulü ve konumda durağanlık kabulü yapılmamıştır; yani, bu bileşenlerin heterojen oldukları, kendi geçiş olasılıkları matrislerine sahip oldukları kabul edilmiştir. M2'de ele alınan ağ parçasının her bir seyahat yönünde SPR türü trenler için 45 seyir, 22 bekleme süreci ve IC türü trenler için 45 seyir, 7

bekleme süreci olmak üzere ağ parçası için iki yönde kullanılabilecek 238 adet tek adım geçiş olasılıkları matrisi bulunmaktadır. Bunların bir kısmı Bölüm 5'te (5.15), (5.16), (5.17) ve (5.18) eşitliklerinde ve bir kısmı (6.6), (6.7), (6.8), (6.9) ve (6.10) eşitliklerinde gösterilmiştir. M2 için T adım geçiş olasılıkları matrisi, ilgili yön ve tren türüne ve ilgili konuma ait bekleme ve seyir süreci matrisleri sırasıyla çarpılarak hesaplanmıştır (6.5). Örneğin M2 için seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için Delft istasyonundan kalkış (Dt,V) ile Schiedam Centrum istasyonundan kalkış (Sdm,V) arası için tek adım geçiş olasılıkları matrisleri (6.6), (6.7), (6.8), (6.9) ve (6.10) eşitliklerinde verilmiştir.

$$
{}^{M2}P^{(5)} = {}_{Dt,Dtz}P_{1,SPR,SS} \times {}_{Dtz}P_{1,SPR,BS} \times {}_{Dtz,Dtzo}P_{1,SPR,SS} \times {}_{Dtzo,Sdm}P_{1,SPR,SS} \times {}_{Sdm}P_{1,SPR,BS} \tag{6.5}
$$

$$
{}_{Dt,Dtz}P_{1,SPR,SS} = \begin{bmatrix}
1,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,9791 & 0,0203 & 0,0006 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,1443 & 0,8330 & 0,0227 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0912 & 0,8759 & 0,0329 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,1693 & 0,7984 & 0,0323 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,1566 & 0,8434 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,1111 & 0,8333 & 0,0556 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0455 & 0,9545
\end{bmatrix} \tag{6.6}
$$

$$
{}_{Dtz}P_{1,SPR,BS} = \begin{bmatrix}
0,0000 & 1,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0006 & 0,9879 & 0,0110 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0005 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,2346 & 0,7465 & 0,0189 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,1809 & 0,7979 & 0,0177 & 0,0035 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,2314 & 0,7521 & 0,0165 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,1688 & 0,8312 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,2187 & 0,7500 & 0,0313 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0698 & 0,9302
\end{bmatrix} \tag{6.7}
$$

$$
{}_{Dtz,Dtzo}P_{1,SPR,SS} = \begin{bmatrix}
0,0000 & 1,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,7730 & 0,2270 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,7843 & 0,2157 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,7127 & 0,2873 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,7064 & 0,2936 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,7733 & 0,2267 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,8148 & 0,1852 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 1,0000
\end{bmatrix} \tag{6.8}
$$

$$
{}_{Dtzo,Sdm}P_{1,SPR,SS} = \begin{bmatrix}
0,0000 & 1,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0228 & 0,9583 & 0,0137 & 0,0026 & 0,0007 & 0,0013 & 0,0000 & 0,0006 \\
0,0000 & 0,7886 & 0,1959 & 0,0093 & 0,0031 & 0,0031 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0390 & 0,7448 & 0,1952 & 0,0060 & 0,0090 & 0,0060 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0714 & 0,7013 & 0,2078 & 0,0130 & 0,0000 & 0,0065 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0333 & 0,6889 & 0,2334 & 0,0222 & 0,0222 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0257 & 0,6923 & 0,2564 & 0,0256 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0222 & 0,1333 & 0,8445
\end{bmatrix} \tag{6.9}
$$

$$
{}_{Sdm}P_{1,SPR,BS} = \begin{bmatrix}
0,2286 & 0,7714 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0004 & 0,9595 & 0,0378 & 0,0018 & 0,0005 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0320 & 0,8614 & 0,1023 & 0,0043 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0476 & 0,8677 & 0,0794 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0053 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,8713 & 0,1188 & 0,0099 & 0,0000 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0169 & 0,8475 & 0,1017 & 0,0339 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,1000 & 0,8500 & 0,0500 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 1,0000
\end{bmatrix} \tag{6.10}
$$

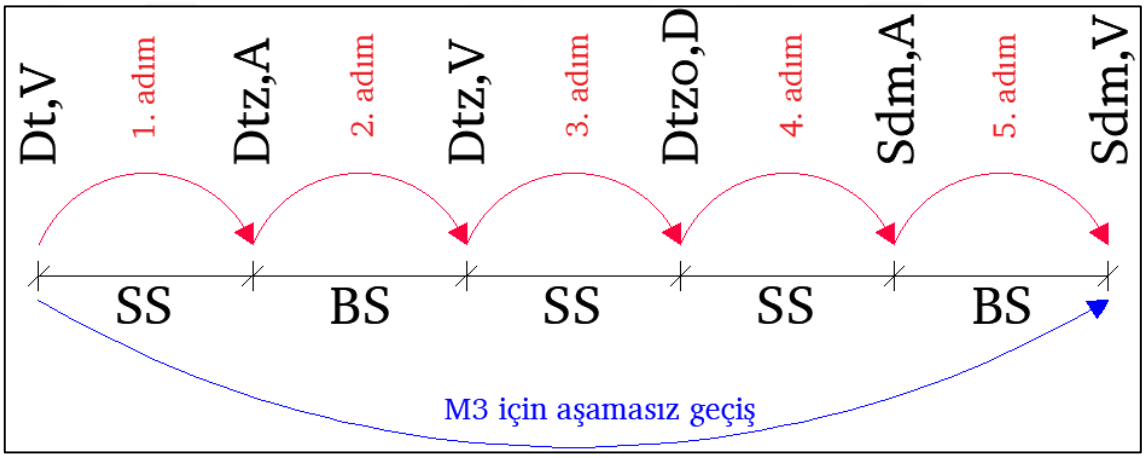
Bu durumda, M2 ile, seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için Delft istasyonundan kalkış (Dt,V) ile Schiedam Centrum istasyonundan kalkış (Sdm,V) arası için T=5 adım geçiş olasılıkları matrisi (6.11)'deki gibi elde edilmiştir.

$$
{}_{M2}P^{(5)} = \begin{bmatrix}
0,0044 & 0,8979 & 0,0824 & 0,0109 & 0,0021 & 0,0016 & 0,0002 & 0,0005 \\
0,0043 & 0,8893 & 0,0883 & 0,0129 & 0,0026 & 0,0018 & 0,0003 & 0,0005 \\
0,0016 & 0,6888 & 0,2308 & 0,0636 & 0,0094 & 0,0039 & 0,0013 & 0,0006 \\
0,0002 & 0,1892 & 0,4203 & 0,2847 & 0,0781 & 0,0184 & 0,0052 & 0,0039 \\
0,0000 & 0,0339 & 0,2077 & 0,3859 & 0,2575 & 0,0857 & 0,0162 & 0,0131 \\
0,0000 & 0,0020 & 0,0363 & 0,1438 & 0,4287 & 0,2802 & 0,0775 & 0,0315 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0016 & 0,0145 & 0,1550 & 0,4218 & 0,1991 & 0,2080 \\
0,0000 & 0,0000 & 0,0000 & 0,0002 & 0,0079 & 0,0833 & 0,1296 & 0,7790
\end{bmatrix} \tag{6.11}
$$

Üçüncü modelde (M3), seyahat yönü ve tren türü için homojenlik kabulü yapılmamıştır (yani, heterojenlik kabulü geçerlidir). Baz alınan an ve hedeflenen

konum için gecikme verileri eşleştirilip, oluşturulacak olan geçiş olasılıkları matrisi, *T* adım geçiş olasılıkları matrisi olarak kabul edilmiştir. Diğer bir deyişle M3 için *T* adım geçiş olasılıkları matrisi, tek adım geçiş olasılıkları matrisi oluşturur gibi oluşturulmuştur. Bu durumda her baz alınan an ve hedef an çifti için matris oluşturmak gerektiğinden incelenen ağ parçası için kullanılabilecek binlerce geçiş olasılıkları matrisi bulunmaktadır.

Örneğin seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için Delft istasyonundan kalkış (Dt,V) ile Schiedam Centrum istasyonundan kalkış (Sdm,V) arasında beş adım olmasına rağmen M3 ile bunun aşamasız bir geçiş olduğu kabul edilmiştir (Şekil 6.2).



Şekil 6.2 Model 3 için aşamasız geçiş

Örneğin M3 için seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için Delft istasyonundan kalkış (Dt,V) ile Schiedam Centrum istasyonundan kalkış (Sdm,V) arası için aşamasız geçiş sayıları matrisi (6.12):

$$N^{(5)} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 9 & 1661 & 37 & 8 & 4 & 3 & 0 & 1 \\ 0 & 529 & 304 & 33 & 4 & 6 & 1 & 1 \\ 0 & 5 & 150 & 102 & 11 & 2 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & 6 & 72 & 37 & 5 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 48 & 24 & 6 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 21 & 11 & 2 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 2 & 3 & 38 \end{bmatrix} \quad (6.12)$$

M3 için seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için Delft istasyonundan kalkış (Dt,V) ile Schiedam Centrum istasyonundan kalkış (Sdm,V) arası için aşamasız geçiş olasılıkları matrisi (6.13):

$$ {}^{M3}P^{(5)} = \begin{bmatrix} 0{,}0000 & 1{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 \\ 0{,}0052 & 0{,}9640 & 0{,}0215 & 0{,}0047 & 0{,}0023 & 0{,}0017 & 0{,}0000 & 0{,}0006 \\ 0{,}0000 & 0{,}6025 & 0{,}3463 & 0{,}0376 & 0{,}0046 & 0{,}0068 & 0{,}0011 & 0{,}0011 \\ 0{,}0000 & 0{,}0184 & 0{,}5515 & 0{,}3750 & 0{,}0404 & 0{,}0074 & 0{,}0000 & 0{,}0073 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0488 & 0{,}5854 & 0{,}3008 & 0{,}0406 & 0{,}0163 & 0{,}0081 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0122 & 0{,}5853 & 0{,}2927 & 0{,}0732 & 0{,}0366 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0556 & 0{,}5833 & 0{,}3056 & 0{,}0555 \\ 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0000 & 0{,}0465 & 0{,}0698 & 0{,}8837 \end{bmatrix} \quad (6.13) $$

6.1.2 Olasılık Dağılım Vektörlerinin Hesaplanması

Bir önceki alt başlıkta M1, M2 ve M3 modelleri kullanılarak $T=5$ adım geçiş olasılıkları matrislerinin nasıl hesaplanacağı gösterilmiştir. Olasılık dağılım vektörleri (koşullu olasılıklar), (2.12)'deki gibi, baz alınan andaki başlangıç durum vektörü ve T adım geçiş olasılıkları matrisinin çarpımı ile tahmin edilebilir. Örnek olarak başlangıç gecikme durumu bilinen (Durum 4) bir tren için başlangıç durum vektörü, (6.14) eşitliğindeki gibi olmaktadır:

$$ Q_0 = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0] \quad (6.14) $$

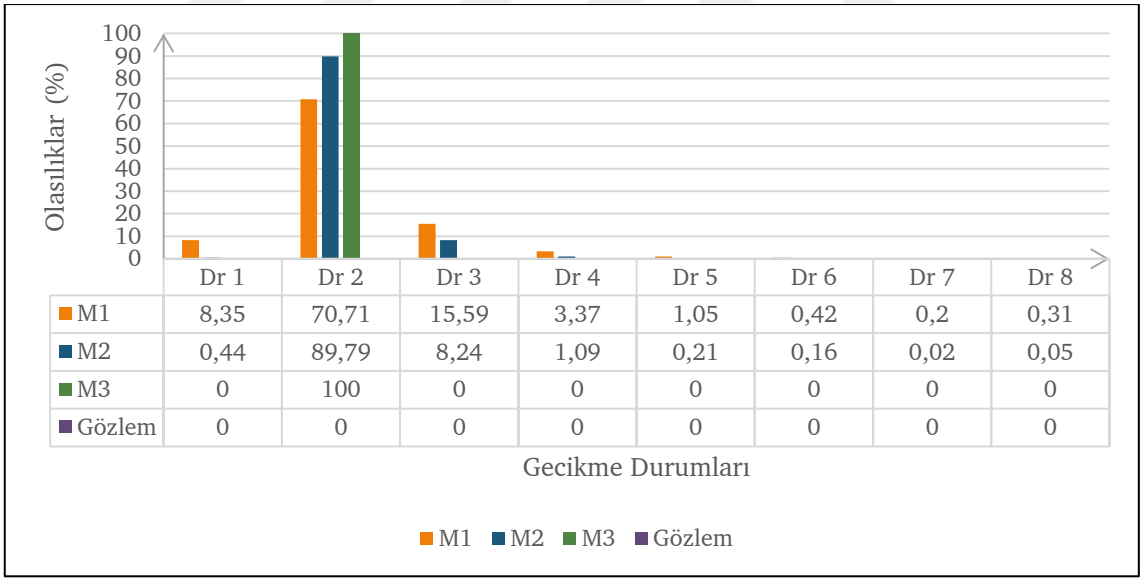
Tekil trenler için olasılık dağılım vektörlerinin nasıl hesaplandığı, örnek olarak seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için gösterilmiştir. Delft istasyonundan kalkış (Dt,V) gecikmesi baz alınarak Schiedam Centrum istasyonundan kalkış (Sdm,V) gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri yapılmıştır. Her bir Dt,V gecikme durumu için Sdm,V olasılık dağılım vektörü, başlangıç durum vektörü ile ilgili modele ait $T=5$ adım geçiş olasılıkları matrisinin (M1 için (6.4), M2 için (6.11) ve M3 için (6.13)) çarpımı ile tahmin edilmiştir. Böylece Dt,V anından Sdm,V anına kadar gecikmeye ilişkin geçiş olasılıkları üç modelle tahmin edilmiştir.

Tahminlerin karşılaştırılacağı test verilerindeki seyahat yönü 1 olan 2532 adet SPR türü trenin Dt,V ve Sdm,V gecikme durumları, Tablo 6.1'deki ilgili hücrelere işlenmiştir.

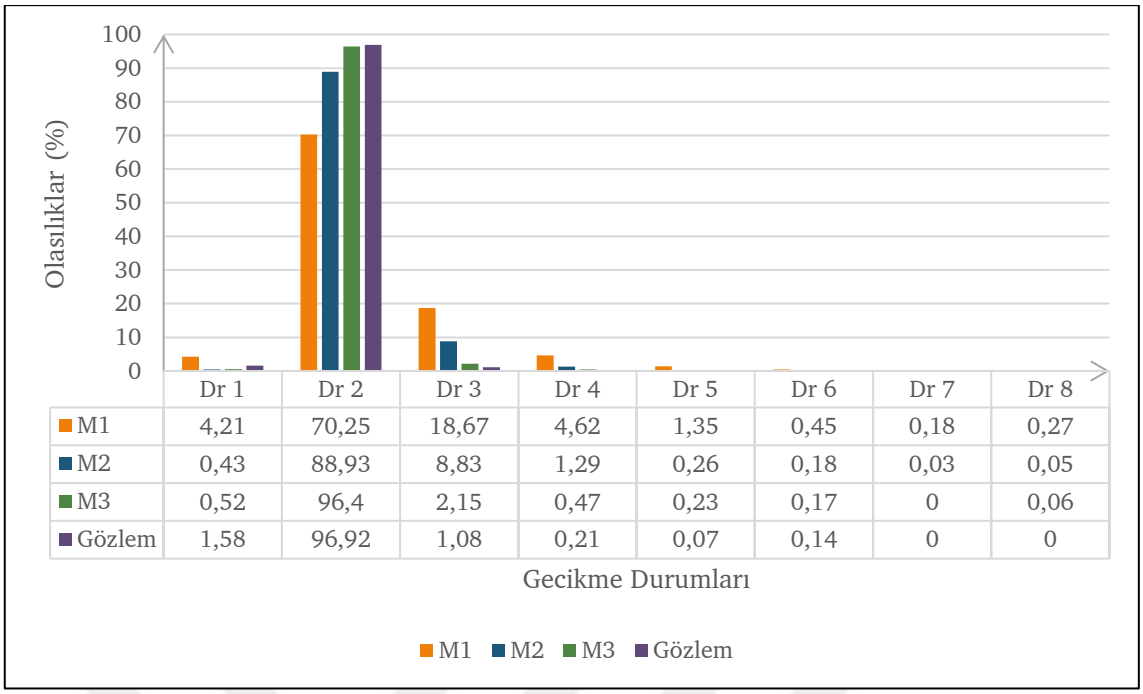
Tablo 6.1 Seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlere ait gözlenen frekanslar (test verileri)

		Tren Sayısı								
		Sdm Kalkış Gecikme Durumu								
		Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5	Durum 6	Durum 7	Durum 8	**Toplam**
Dt Kalkış Gecikme Durumu	Durum 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Durum 2	22	1351	15	3	1	2	0	0	1394
	Durum 3	0	431	259	13	5	0	0	0	708
	Durum 4	0	12	132	83	9	1	0	1	238
	Durum 5	0	0	9	38	35	6	0	0	88
	Durum 6	0	0	0	0	32	22	0	0	54
	Durum 7	0	0	0	0	4	10	10	0	24
	Durum 8	0	0	0	0	0	1	8	17	26
Toplam		22	1794	415	137	86	42	18	18	2532

Dt,V anından Sdm,V anına kadar her bir durumundan her bir duruma geçiş için tahmin edilen olasılıklar ve gözlenen oranlar Şekil 6.3, Şekil 6.4, Şekil 6.5, Şekil 6.6, Şekil 6.7, Şekil 6.8, Şekil 6.9 ve Şekil 10'da gösterilmiştir. Test verilerinde seyahat yönü 1 ve Dt,V gecikme durumu Dr 1 (Durum 1) olan SPR türü tren bulunmamaktadır (Tablo 6.1)

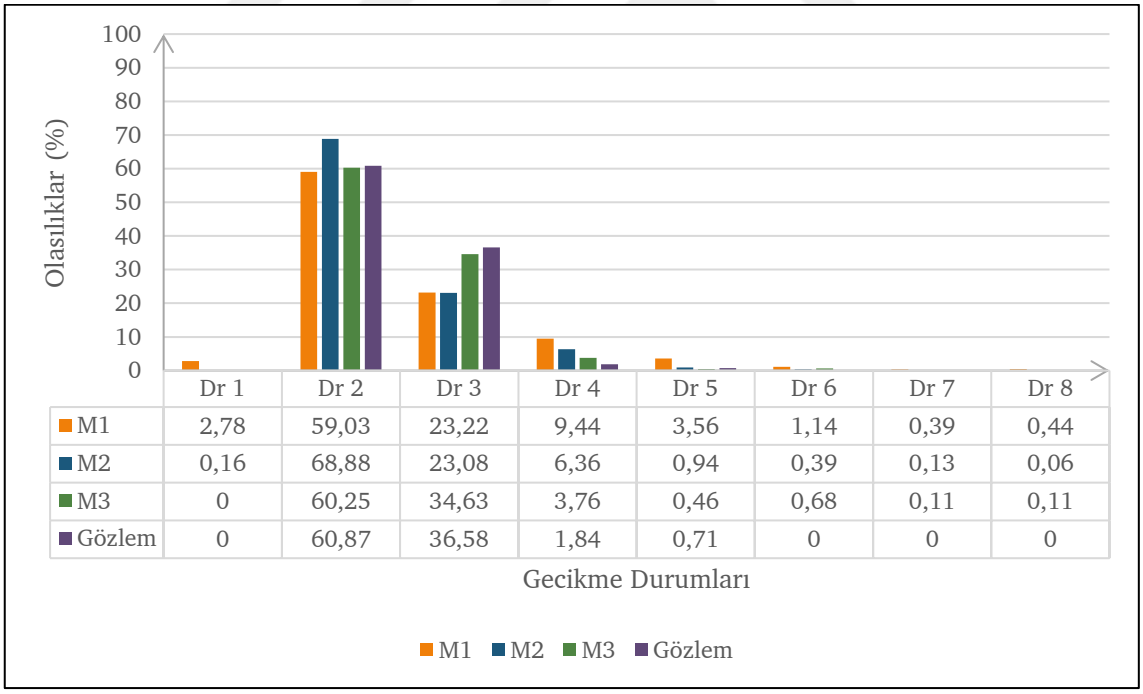


Şekil 6.3 Dt,V gecikme durumu 1 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri



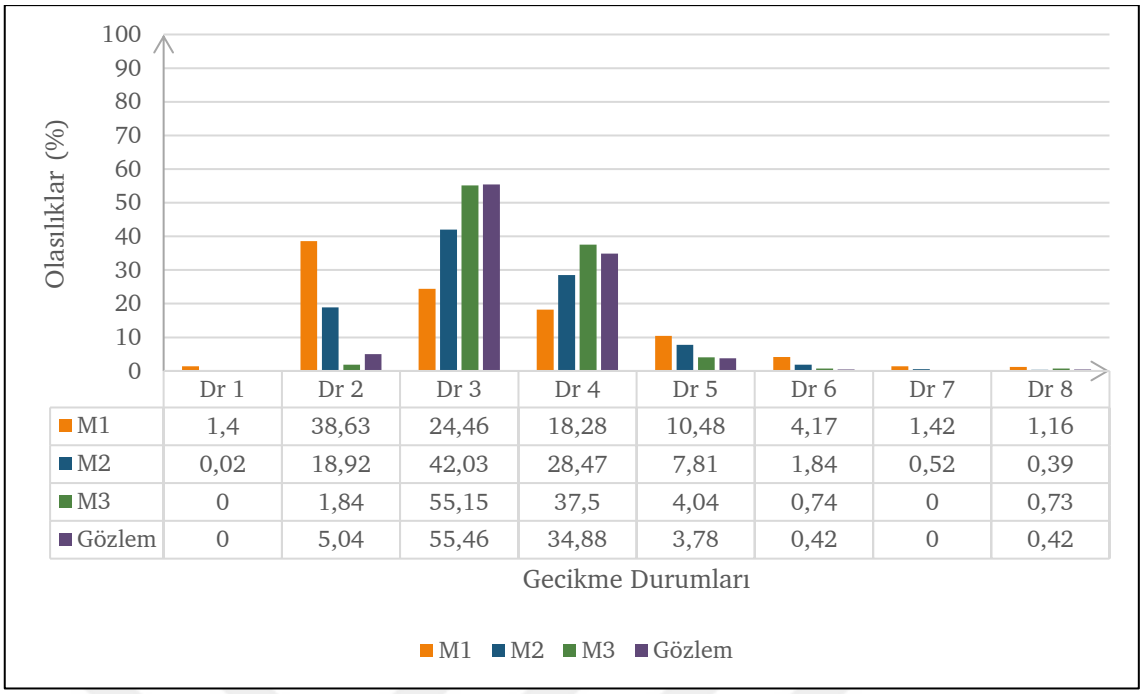
	Dr 1	Dr 2	Dr 3	Dr 4	Dr 5	Dr 6	Dr 7	Dr 8
M1	4,21	70,25	18,67	4,62	1,35	0,45	0,18	0,27
M2	0,43	88,93	8,83	1,29	0,26	0,18	0,03	0,05
M3	0,52	96,4	2,15	0,47	0,23	0,17	0	0,06
Gözlem	1,58	96,92	1,08	0,21	0,07	0,14	0	0

Şekil 6.4 Dt,V gecikme durumu 2 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri



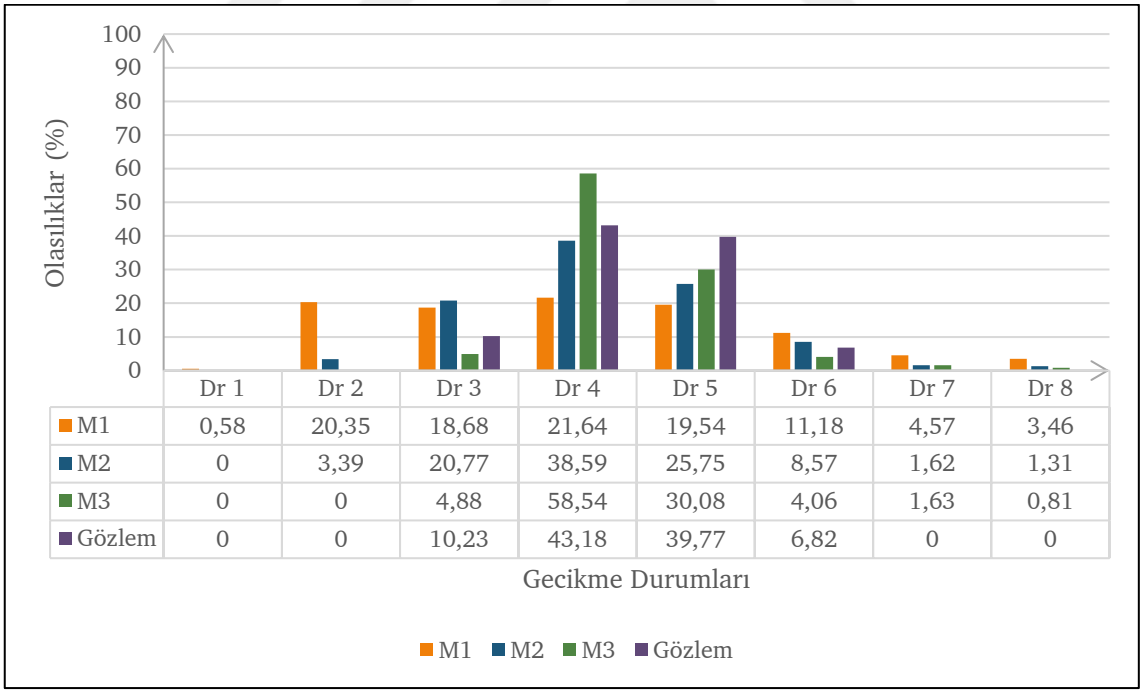
	Dr 1	Dr 2	Dr 3	Dr 4	Dr 5	Dr 6	Dr 7	Dr 8
M1	2,78	59,03	23,22	9,44	3,56	1,14	0,39	0,44
M2	0,16	68,88	23,08	6,36	0,94	0,39	0,13	0,06
M3	0	60,25	34,63	3,76	0,46	0,68	0,11	0,11
Gözlem	0	60,87	36,58	1,84	0,71	0	0	0

Şekil 6.5 Dt,V gecikme durumu 3 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri



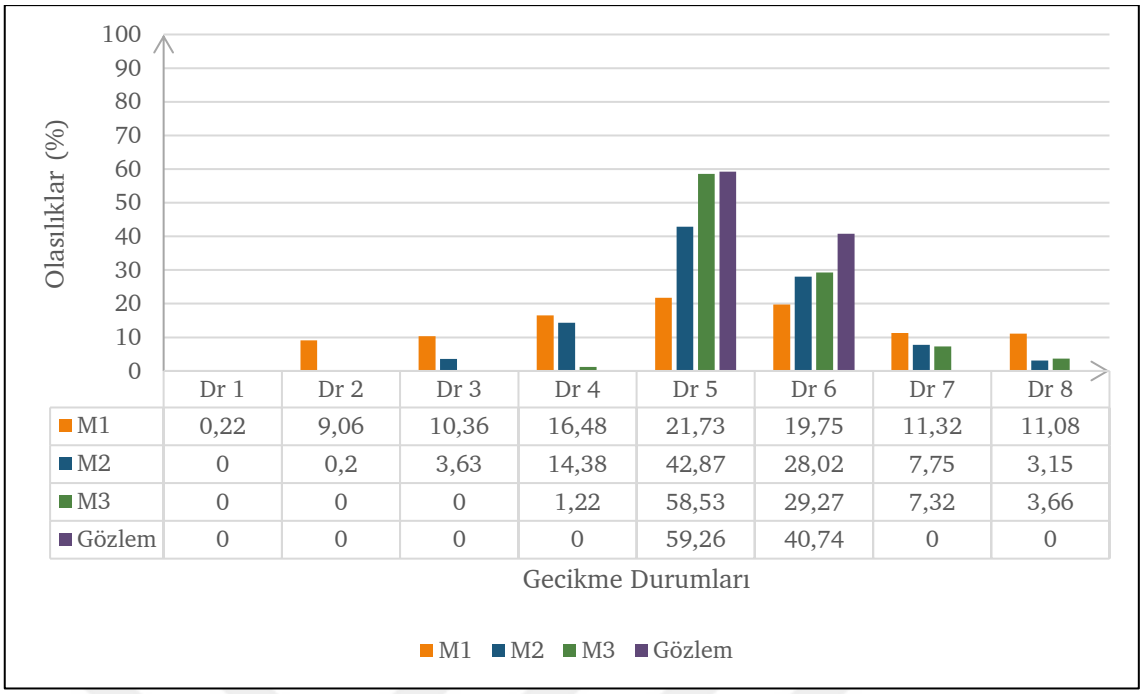
	Dr 1	Dr 2	Dr 3	Dr 4	Dr 5	Dr 6	Dr 7	Dr 8
M1	1,4	38,63	24,46	18,28	10,48	4,17	1,42	1,16
M2	0,02	18,92	42,03	28,47	7,81	1,84	0,52	0,39
M3	0	1,84	55,15	37,5	4,04	0,74	0	0,73
Gözlem	0	5,04	55,46	34,88	3,78	0,42	0	0,42

Şekil 6.6 Dt,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri



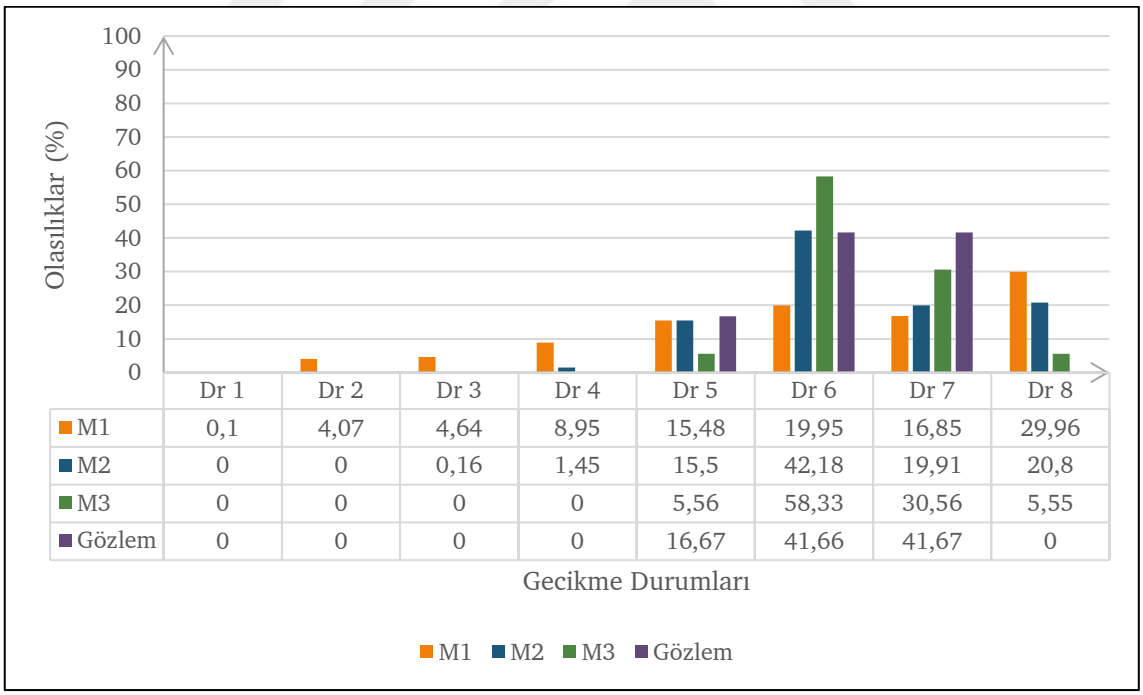
	Dr 1	Dr 2	Dr 3	Dr 4	Dr 5	Dr 6	Dr 7	Dr 8
M1	0,58	20,35	18,68	21,64	19,54	11,18	4,57	3,46
M2	0	3,39	20,77	38,59	25,75	8,57	1,62	1,31
M3	0	0	4,88	58,54	30,08	4,06	1,63	0,81
Gözlem	0	0	10,23	43,18	39,77	6,82	0	0

Şekil 6.7 Dt,V gecikme durumu 5 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri



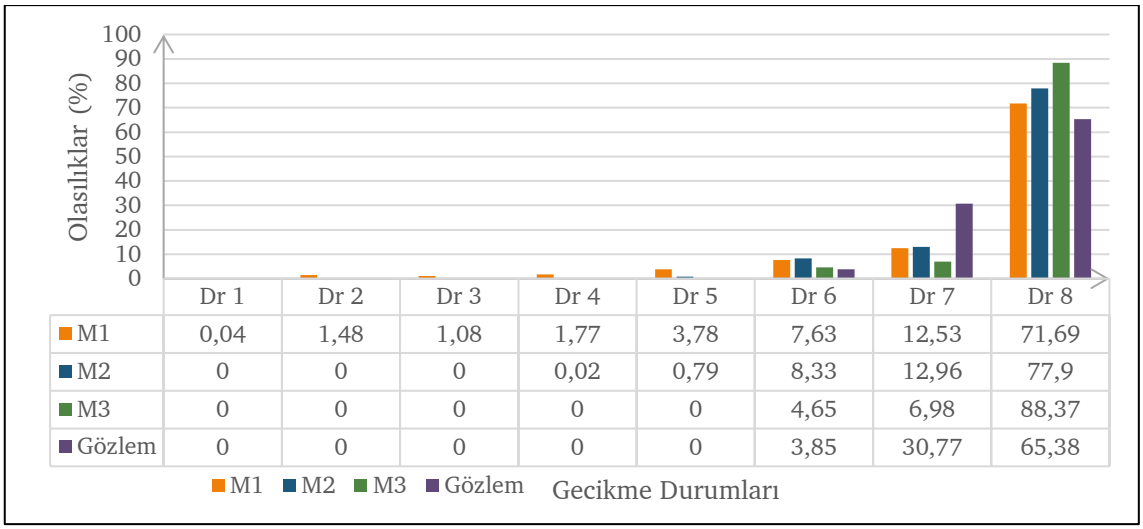
	Dr 1	Dr 2	Dr 3	Dr 4	Dr 5	Dr 6	Dr 7	Dr 8
M1	0,22	9,06	10,36	16,48	21,73	19,75	11,32	11,08
M2	0	0,2	3,63	14,38	42,87	28,02	7,75	3,15
M3	0	0	0	1,22	58,53	29,27	7,32	3,66
Gözlem	0	0	0	0	59,26	40,74	0	0

Şekil 6.8 Dt,V gecikme durumu 6 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri



	Dr 1	Dr 2	Dr 3	Dr 4	Dr 5	Dr 6	Dr 7	Dr 8
M1	0,1	4,07	4,64	8,95	15,48	19,95	16,85	29,96
M2	0	0	0,16	1,45	15,5	42,18	19,91	20,8
M3	0	0	0	0	5,56	58,33	30,56	5,55
Gözlem	0	0	0	0	16,67	41,66	41,67	0

Şekil 6.9 Dt,V gecikme durumu 7 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri



Şekil 6.10 Dt,V gecikme durumu 8 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri

6.1.3 Olasılık Dağılım Tahminleri için RMSE ve MAE ölçütlerinin hesaplanması

Bir önceki alt başlıkta Dt,V anından Sdm,V anına kadar her bir durumundan her bir duruma geçişin tahmin edilen ve gözlenen olasılıkları hesaplanmıştır. Modellerin karşılaştırılması için, her modelin her bir gecikme durumundan her bir gecikme durumuna geçiş için tahmin olasılıkları ile gözlem olasılıklarının karşılaştırılması gerekmektedir. Hata (h), tahmin olasılıkları ve gözlem olasılıkları arasındaki fark olmak üzere, Dt istasyonundan kalkan seyahat yönü 1 olan her bir SPR türü tren (2532 adet) için Sdm,V gecikme durumu (8 adet) olasılıkları tahmin edilmiştir. RMSE ve MAE hesabında, her tren için 8 gecikme durumunun olasılığı dikkate alınacağı için tahmin sayısı (n), gecikme durumu sayısı ve tren sayısının çarpımına eşittir (n=8*2532). Hesap detaylarını gösterebilmek için örnek olarak ele alınan Dt,V-Sdm,V arası için ve tek bir hedef an (Sdm,V) için olasılık dağılımı tahminlerinin hatalarına ilişkin RMSE ve MAE ölçütlerinin hesap detayı Tablo 6.2'de verilmiştir. Çok sayıda hedef an için bu tahminler yapılabilir ve böylece modeller karşılaştırılabilir. Bunun için seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler (tüm başlangıç gecikme durumları) için Dordrect istasyonunda kalkış (Ddr,V) anı baz alınarak tahminler yapılmıştır. Tahminlerin RMSE ve MAE değerleri Tablo 6.3'te gösterilmiştir.

Tablo 6.2 Dt,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri

Gözlem					Tahminler			Hatalar			Hata Kareleri			Mutlak Hatalar		
Dt Kalkış		Sdm Kalkış			Dağılımlar (%)			$h=TD-GD$			t_i*h^2			$t_i*\|h\|$		
Gecikme Durumu	Tren Sayısı t_i	Gecikme Durumu	Tren Sayısı t_{ij}	Dağılım (%)	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Durum 1	0	Durum 1	0	-	8,35	0,44	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Durum 2	0	-	70,71	89,79	100,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Durum 3	0	-	15,59	8,24	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Durum 4	0	-	3,37	1,09	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Durum 5	0	-	1,05	0,21	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Durum 6	0	-	0,42	0,16	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Durum 7	0	-	0,20	0,02	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		Durum 8	0	-	0,31	0,05	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Durum 2	1394	Durum 1	22	1,58	4,21	0,43	0,52	2,63	-1,15	-1,06	9655,42	1837,77	1560,96	3668,74	1600,58	1475,12
		Durum 2	1351	96,92	70,25	88,93	96,40	-26,67	-7,99	-0,52	991191,11	88889,58	370,23	37171,50	11131,58	718,40
		Durum 3	15	1,08	18,67	8,83	2,15	17,59	7,75	1,07	431509,11	83812,71	1607,83	24525,98	10809,02	1497,10
		Durum 4	3	0,22	4,62	1,29	0,47	4,40	1,07	0,25	27046,66	1610,32	90,50	6140,28	1498,26	355,18
		Durum 5	1	0,07	1,35	0,26	0,23	1,28	0,19	0,16	2277,74	49,41	34,92	1781,90	262,44	220,62
		Durum 6	2	0,14	0,45	0,18	0,17	0,31	0,04	0,03	130,98	1,86	0,98	427,30	50,92	36,98
		Durum 7	0	0,00	0,18	0,03	0,00	0,18	0,03	0,00	45,17	1,25	0,00	250,92	41,82	0,00
		Durum 8	0	0,00	0,27	0,05	0,06	0,27	0,05	0,06	101,62	3,49	5,02	376,38	69,70	83,64
Durum 3	708	Durum 1	0	0,00	2,78	0,16	0,00	2,78	0,16	0,00	5471,71	18,12	0,00	1968,24	113,28	0,00
		Durum 2	431	60,88	59,03	68,88	60,25	-1,85	8,00	-0,63	2411,90	45360,65	277,19	1306,76	5667,04	443,00
		Durum 3	259	36,58	23,22	23,08	34,63	-13,36	-13,50	-1,95	126406,98	129069,72	2697,48	9460,24	9559,36	1381,96
		Durum 4	13	1,84	9,44	6,36	3,76	7,60	4,52	1,92	40935,43	14489,32	2620,43	5383,52	3202,88	1362,08
		Durum 5	5	0,71	3,56	0,94	0,46	2,85	0,23	-0,25	5766,02	38,70	42,92	2020,48	165,52	174,32
		Durum 6	0	0,00	1,14	0,39	0,68	1,14	0,39	0,68	920,12	107,69	327,38	807,12	276,12	481,44
		Durum 7	0	0,00	0,39	0,13	0,11	0,39	0,13	0,11	107,69	11,97	8,57	276,12	92,04	77,88
		Durum 8	0	0,00	0,44	0,06	0,11	0,44	0,06	0,11	137,07	2,55	8,57	311,52	42,48	77,88

Tablo 6.2 Dt,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri (devamı)

Gözlem					Tahminler			Hatalar			Hata Kareleri			Mutlak Hatalar		
Dt Kalkış		Sdm Kalkış			Dağılımlar (%)			$h=TD-GD$			t_i*h^2			$t_i*\|h\|$		
Gecikme Durumu	Tren Sayısı t_i	Gecikme Durumu	Tren Sayısı t_{ij}	Dağılım (%)	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Durum 4	238	Durum 1	0	0,00	1,40	0,02	0,00	1,40	0,02	0,00	466,48	0,10	0,00	333,20	4,76	0,00
		Durum 2	12	5,04	38,63	18,92	1,84	33,59	13,88	-3,20	268500,32	45838,42	2440,19	7993,94	3302,96	762,08
		Durum 3	132	55,46	24,46	42,03	55,15	-31,00	-13,43	-0,31	228750,24	42940,81	23,20	7378,52	3196,86	74,30
		Durum 4	83	34,87	18,28	28,47	37,50	-16,59	-6,40	2,63	65535,48	9760,52	1641,28	3949,36	1524,14	625,00
		Durum 5	9	3,78	10,48	7,81	4,04	6,70	4,03	0,26	10679,00	3862,43	15,90	1594,24	958,78	61,52
		Durum 6	1	0,42	4,17	1,84	0,74	3,75	1,42	0,32	3346,58	479,79	24,35	892,46	337,92	76,12
		Durum 7	0	0,00	1,42	0,52	0,00	1,42	0,52	0,00	479,90	64,36	0,00	337,96	123,76	0,00
		Durum 8	1	0,42	1,16	0,39	0,73	0,74	-0,03	0,31	130,27	0,22	22,85	176,08	7,18	73,74
Durum 5	88	Durum 1	0	0,00	0,58	0,00	0,00	0,58	0,00	0,00	29,60	0,00	0,00	51,04	0,00	0,00
		Durum 2	0	0,00	20,35	3,39	0,00	20,35	3,39	0,00	36442,78	1011,30	0,00	1790,80	298,32	0,00
		Durum 3	9	10,23	18,68	20,77	4,88	8,45	10,54	-5,35	6287,48	9781,12	2516,21	743,84	927,76	470,56
		Durum 4	38	43,18	21,64	38,59	58,54	-21,54	-4,59	15,36	40836,39	1855,46	20756,89	1895,68	404,08	1351,52
		Durum 5	35	39,77	19,54	25,75	30,08	-20,23	-14,02	-9,69	36023,97	17304,05	8267,51	1780,48	1234,00	852,96
		Durum 6	6	6,82	11,18	8,57	4,06	4,36	1,75	-2,76	1674,24	270,06	669,47	383,84	154,16	242,72
		Durum 7	0	0,00	4,57	1,62	1,63	4,57	1,62	1,63	1837,87	230,95	233,81	402,16	142,56	143,44
		Durum 8	0	0,00	3,46	1,31	0,81	3,46	1,31	0,81	1053,50	151,02	57,74	304,48	115,28	71,28
Durum 6	54	Durum 1	0	0,00	0,22	0,00	0,00	0,22	0,00	0,00	2,61	0,00	0,00	11,88	0,00	0,00
		Durum 2	0	0,00	9,06	0,20	0,00	9,06	0,20	0,00	4432,51	2,16	0,00	489,24	10,80	0,00
		Durum 3	0	0,00	10,36	3,63	0,00	10,36	3,63	0,00	5795,80	711,55	0,00	559,44	196,02	0,00
		Durum 4	0	0,00	16,48	14,38	1,22	16,48	14,38	1,22	14665,88	11166,36	80,37	889,92	776,52	65,88
		Durum 5	32	59,26	21,73	42,87	58,53	-37,53	-16,39	-0,73	76056,05	14504,82	28,72	2026,58	885,02	39,38
		Durum 6	22	40,74	19,75	28,02	29,27	-20,99	-12,72	-11,47	23793,00	8738,13	7105,21	1133,50	686,92	619,42
		Durum 7	0	0,00	11,32	7,75	7,32	11,32	7,75	7,32	6919,69	3243,38	2893,45	611,28	418,50	395,28
		Durum 8	0	0,00	11,08	3,15	3,66	11,08	3,15	3,66	6629,39	535,82	723,36	598,32	170,10	197,64

Tablo 6.2 Dt,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri (devamı)

Gözlem					Tahminler			Hatalar			Hata Kareleri			Mutlak Hatalar		
Dt Kalkış		Sdm Kalkış			Dağılımlar (%)			$h=TD-GD$			t_i*h^2			$t_i*\|h\|$		
Gecikme Durumu	Tren Sayısı t_i	Gecikme Durumu	Tren Sayısı t_{ij}	Dağılım (%)	M1 (%)	M2 (%)	M3 (%)	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Durum 7	24	Durum 1	0	0,00	0,10	0,00	0,00	0,10	0,00	0,00	0,24	0,00	0,00	2,40	0,00	0,00
		Durum 2	0	0,00	4,07	0,00	0,00	4,07	0,00	0,00	397,56	0,00	0,00	97,68	0,00	0,00
		Durum 3	0	0,00	4,64	0,16	0,00	4,64	0,16	0,00	516,71	0,61	0,00	111,36	3,84	0,00
		Durum 4	0	0,00	8,95	1,45	0,00	8,95	1,45	0,00	1922,46	50,46	0,00	214,80	34,80	0,00
		Durum 5	4	16,67	15,48	15,50	5,56	-1,19	-1,17	-11,11	33,80	32,67	2960,59	28,48	28,00	266,56
		Durum 6	10	41,67	19,95	42,18	58,33	-21,72	0,51	16,66	11318,73	6,32	6664,00	521,20	12,32	399,92
		Durum 7	10	41,67	16,85	19,91	30,56	-24,82	-21,76	-11,11	14780,81	11360,46	2960,59	595,60	522,16	266,56
		Durum 8	0	0,00	29,96	20,80	5,55	29,96	20,80	5,55	21542,44	10383,36	739,26	719,04	499,20	133,20
Durum 8	26	Durum 1	0	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	0,04	0,00	0,00	1,04	0,00	0,00
		Durum 2	0	0,00	1,48	0,00	0,00	1,48	0,00	0,00	56,95	0,00	0,00	38,48	0,00	0,00
		Durum 3	0	0,00	1,08	0,00	0,00	1,08	0,00	0,00	30,33	0,00	0,00	28,08	0,00	0,00
		Durum 4	0	0,00	1,77	0,02	0,00	1,77	0,02	0,00	81,46	0,01	0,00	46,02	0,52	0,00
		Durum 5	0	0,00	3,78	0,79	0,00	3,78	0,79	0,00	371,50	16,23	0,00	98,28	20,54	0,00
		Durum 6	1	3,85	7,63	8,33	4,65	3,78	4,48	0,80	372,25	522,73	16,80	98,38	116,58	20,90
		Durum 7	8	30,77	12,53	12,96	6,98	-18,24	-17,81	-23,79	8649,41	8246,39	14714,12	474,22	463,04	618,52
		Durum 8	17	65,38	71,69	77,90	88,37	6,31	12,52	22,99	1033,70	4072,51	13736,53	163,94	325,40	597,62
										Toplam:	2545592	572450	98945	135444	62486	16812
											RMSE			**MAE**		
											11,21	**5,32**	**2,21**	**6,69**	**3,08**	**0,83**

Tablo 6.3 Başlangıç (Ddr,V) gecikme durumunun biliniyor olması durumunda bir trenin hedef andaki gecikme durumuna ilişkin olasılık dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri

Hedef An	Tahmin Sayısı (n)	RMSE			MAE		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3
Ddr,V	-	-	-	-	-	-	-
Grbr,D	10512	11,89	1,67	1,67	6,20	0,67	0,67
Zwd,A	10512	6,79	3,81	2,14	2,62	1,05	0,90
Zwd,V	10472	5,10	2,82	2,10	2,52	0,80	0,72
Kfhaz,D	10472	6,07	2,60	2,14	3,07	1,24	1,03
Brd,A	10472	7,10	3,39	1,86	4,23	0,89	0,76
Brd,V	10472	6,50	3,11	1,77	3,76	0,93	0,94
Rlb,A	10464	10,90	2,98	1,81	6,22	1,00	0,65
Rlb,V	10464	8,91	2,79	1,82	5,11	1,12	0,72
Rtst,D	10472	5,94	3,65	2,21	3,27	1,92	1,21
Rtz,A	10472	5,35	4,01	2,95	2,60	2,26	1,67
Rtz,V	10472	4,97	3,59	2,88	2,38	2,07	1,59
Wiltz,D	10472	5,16	3,59	2,88	2,62	2,07	1,56
Rtb,A	10472	5,19	3,59	2,80	2,59	2,07	1,57
Rtb,V	10472	4,81	3,66	3,19	2,27	2,15	1,85
Wiltn,D	10472	4,74	3,42	3,17	2,14	2,01	1,89
Rtd,A	10472	5,97	2,90	2,48	3,65	1,67	1,39
Rtd,V	10048	5,74	2,22	2,31	3,59	1,20	1,12
Dhsa,D	10048	3,74	2,18	2,26	2,39	1,11	1,10
Dhs,D	10048	3,06	2,24	2,39	1,63	1,34	1,34
Rmoa,D	10048	3,49	2,42	2,39	1,80	1,39	1,31
Sdm,A	10040	14,49	2,66	2,79	9,09	1,60	1,61
Sdm,V	10040	14,83	2,34	2,48	9,34	1,16	1,28
Dtzo,D	10040	6,44	2,36	2,28	4,33	0,83	0,88
Dtz,A	10048	3,44	2,42	2,44	1,76	1,23	1,05
Dtz,V	10048	3,57	2,52	2,39	1,73	1,38	1,20
Dt,A	10048	3,12	2,24	2,37	1,49	1,13	1,12
Dt,V	10048	3,60	2,36	2,37	1,97	1,12	1,11
Ngsfa,D	10048	5,83	2,37	2,31	3,75	1,33	1,24
Dta,D	10048	5,56	2,38	2,35	3,72	1,20	1,16
Rsw,A	10048	4,74	2,02	1,87	2,92	1,06	0,91
Rsw,V	10048	5,65	2,25	2,16	3,54	1,38	1,26
Gvmw,A	10048	5,96	2,11	2,01	3,66	1,11	0,98
Gvmw,V	10048	5,96	2,12	2,25	3,82	1,22	1,18
Gv,A	10048	6,62	2,14	2,33	3,91	1,18	1,15
Gv,V	10024	9,76	1,85	1,71	6,21	0,90	0,83
Gvc,A	10032	7,86	1,83	1,71	5,01	0,80	0,73
Tüm tahminler	**368512**	**6,96**	**2,77**	**2,34**	**3,63**	**1,32**	**1,16**

6.2 Tren Grubu Gecikme Dağılımları için Tahmin Modelleri

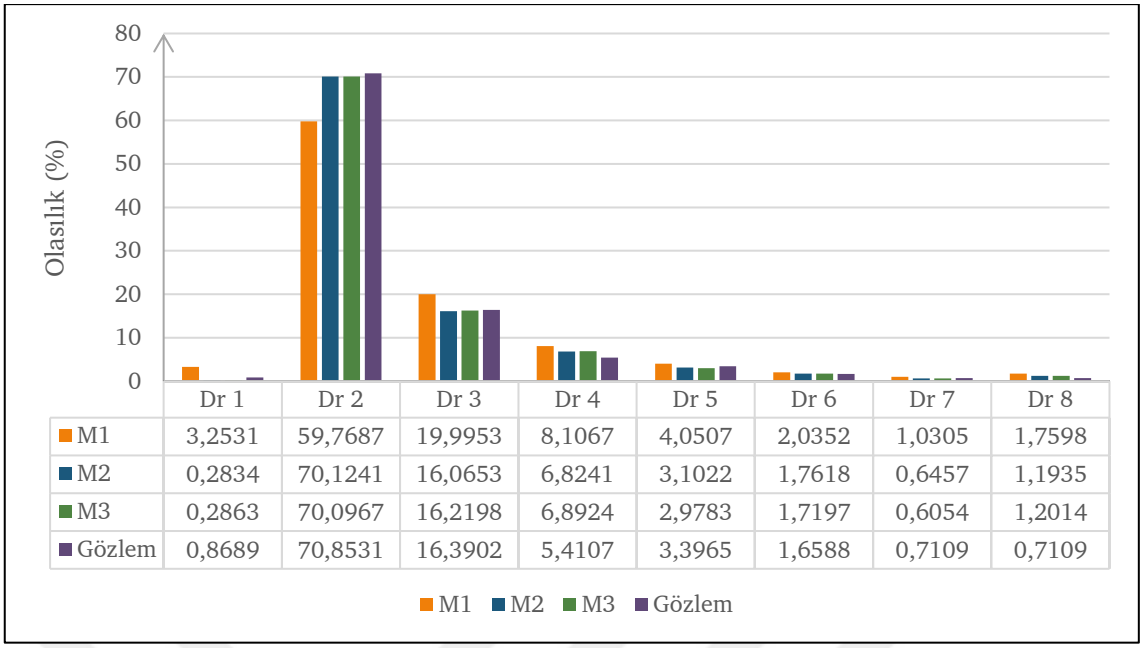
Yeniden çizelgeleme problemlerinde, başlangıç gecikme vektörü (gecikme dağılımı) bilinen bir tren grubunun akım aşağıdaki herhangi bir hedef andaki gecikme dağılımlarının tahmin edilebiliyor olması faydalı olabilmektedir. Bir tren grubunun baz alınan andaki gecikme dağılımı vektörü, 3 model ile oluşturulan T adım geçiş olasılıkları matrisleri ile çarpılarak ilgili tren grubunun hedef andaki gecikme dağılımları tahmin edilebilir. Yine bu tahminlere ait RMSE ve MAE ölçütleri hesaplanabilir.

Tren grubu için 3 model ile gecikme dağılımlarının nasıl hesaplanacağı, örnek olarak seyahat yönü 1 olan SPR türü trenler için Delft istasyonundan kalkış (Dt,V) ile Schiedam Centrum istasyonundan kalkış (Sdm,V) arası için gösterilmiştir (Şekil 6.1). Dt,V gecikme dağılımı bilinen ve seyahat yönü 1 olan 2532 adet SPR türü trenin (tren grubunun) Sdm,V gecikme dağılımı tahminleri, gecikme dağılım vektörü ve ilgili modele ait T=5 adım geçiş olasılıkları matrisinin (M1 için (6.4), M2 için (6.11) ve M3 için (6.13)) çarpımı ile tahmin edilmiştir. Böylece Sdm,V anında tren grubunun gecikme dağılımı üç modelle tahmin edilmiş olur. Örneğin Dt istasyonundan kalkan tren grubunun başlangıç durum vektörü (6.15):

$$Q_0 = \begin{bmatrix} 0{,}0000 & 0{,}5506 & 0{,}2796 & 0{,}0940 & 0{,}0347 & 0{,}0213 & 0{,}0095 & 0{,}0103 \end{bmatrix} \quad (6.15)$$

Dt,V gecikme dağılımı (6.15)'teki gibi ve seyahat yönü 1 olan 2532 adet SPR türü trenin (tren grubunun) Sdm,V gecikme dağılımı tahminleri (M1, M2 ve M3 modellerinden elde edilen) ve gözlenen olasılıklar Şekil 6.13'te gösterilmiştir.

Dt,V gecikme dağılımı bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türü tren grubunun Sdm,V gecikme dağılımı tahminleri için hesaplanan RMSE ve MAE değerleri Tablo 6.4'te gösterilmiştir. Burada her gecikme durumu için dağılım yüzdesi tahminleri ile gözlem yüzdeleri karşılaştırılıp tahmin hataları hesaplanmıştır. RMSE ve MAE hesabında tahmin sayısı, gecikme durumu sayısına eşittir (n=8). Model 1, Model 2 ve Model 3 için RMSE değeri sırasıyla 4,34, 0,64 ve 0,67; MAE değerleri sırasıyla 2,77, 0,50 ve 0,51 olarak hesaplanmıştır.



	Dr 1	Dr 2	Dr 3	Dr 4	Dr 5	Dr 6	Dr 7	Dr 8
M1	3,2531	59,7687	19,9953	8,1067	4,0507	2,0352	1,0305	1,7598
M2	0,2834	70,1241	16,0653	6,8241	3,1022	1,7618	0,6457	1,1935
M3	0,2863	70,0967	16,2198	6,8924	2,9783	1,7197	0,6054	1,2014
Gözlem	0,8689	70,8531	16,3902	5,4107	3,3965	1,6588	0,7109	0,7109

Şekil 6.11 Dt,V gecikme dağılımı bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Sdm,V gecikme dağılımı tahminleri

Hesap detaylarını gösterebilmek için örnek olarak ele alınan tek bir hedef an (Sdm,V) için gecikme dağılımı tahminlerinin hatalarına ilişkin RMSE ve MAE ölçütlerinin hesap detayı Tablo 6.4'te verilmiştir. Çok sayıda hedef an için bu tahminler yapılabilir ve böylece modeller karşılaştırılabilir. Örnek olarak seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için Dordrect istasyonunda kalkış (Ddr,V) anı baz alınarak tahminler yapılmıştır. Tahminlerin RMSE ve MAE değerleri Tablo 6.5'te gösterilmiştir.

Tablo 6.4 Dt,V gecikme dağılımı bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki tren grubunun Sdm,V gecikme dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri

	Sdm,V Gecikme Dağılımı (%)				**h^2**			**$\|h\|$**		
	M1	**M2**	**M3**	**Gözlem**	**M1**	**M2**	**M3**	**M1**	**M2**	**M3**
Dr 1	3,25	0,28	0,29	0,87	5,68	0,34	0,34	2,38	0,59	0,58
Dr 2	59,77	70,12	70,10	70,85	122,86	0,53	0,57	11,08	0,73	0,76
Dr 3	20,00	16,07	16,22	16,39	13,00	0,11	0,03	3,61	0,32	0,17
Dr 4	8,11	6,82	6,89	5,41	7,27	2,00	2,20	2,70	1,41	1,48
Dr 5	4,05	3,10	2,98	3,40	0,43	0,09	0,17	0,65	0,29	0,42
Dr 6	2,04	1,76	1,72	1,66	0,14	0,01	0,00	0,38	0,10	0,06
Dr 7	1,03	0,65	0,61	0,71	0,10	0,00	0,01	0,32	0,07	0,11
Dr 8	1,76	1,19	1,20	0,71	1,10	0,23	0,24	1,05	0,48	0,49
					RMSE			**MAE**		
					4,34	**0,64**	**0,67**	**2,77**	**0,50**	**0,51**

Tablo 6.5 Başlangıç gecikme dağılımının biliniyor olması durumunda tren grubunun hedef andaki gecikme dağılımı tahminleri için RMSE ve MAE değerleri

Hedef An	Tahmin Sayısı (n)	RMSE			MAE		
		M1	M2	M3	M1	M2	M3
Ddr.V	-	-	-	-	-	-	-
Grbr.D	8	9.26	0.85	0.85	5.31	0.49	0.49
Zwd.A	8	2.93	1.37	1.35	1.81	0.79	0.78
Zwd.V	8	1.98	0.69	0.65	1.32	0.46	0.44
Kfhaz.D	8	3.22	1.19	1.15	1.98	0.68	0.66
Brd.A	8	4.18	0.71	0.66	2.64	0.46	0.44
Brd.V	8	3.30	0.95	0.92	2.07	0.68	0.66
Rlb.A	8	9.63	0.66	0.66	5.59	0.50	0.50
Rlb.V	8	7.48	0.87	0.86	4.49	0.63	0.62
Rtst.D	8	2.66	1.47	1.48	1.66	0.95	0.96
Rtz.A	8	1.84	2.46	2.45	1.16	1.42	1.41
Rtz.V	8	1.73	2.27	2.27	1.18	1.34	1.34
Wiltz.D	8	1.92	2.14	2.16	1.28	1.29	1.33
Rtb.A	8	1.82	2.13	2.12	1.23	1.32	1.31
Rtb.V	8	1.63	2.59	2.57	1.24	1.70	1.68
Wiltn.D	8	2.20	2.55	2.55	1.71	1.54	1.55
Rtd.A	8	4.13	1.74	1.77	2.50	1.06	1.08
Rtd.V	8	5.01	1.35	1.30	3.24	0.94	0.91
Dhsa.D	8	2.73	1.21	1.18	2.00	0.82	0.79
Dhs.D	8	1.71	1.55	1.52	1.24	1.09	1.07
Rmoa.D	8	1.98	1.55	1.52	1.60	1.06	1.03
Sdm.A	8	14.23	1.48	1.45	8.99	1.17	1.14
Sdm.V	8	14.57	1.00	1.00	9.23	0.76	0.76
Dtzo.D	8	5.90	0.52	0.47	3.93	0.46	0.40
Dtz.A	8	1.88	1.05	0.99	1.57	0.76	0.72
Dtz.V	8	1.84	1.09	1.07	1.54	0.84	0.83
Dt.A	8	1.57	1.12	1.09	1.15	0.75	0.74
Dt.V	8	2.01	1.01	0.94	1.72	0.74	0.66
Ngsfa.D	8	5.07	1.00	0.94	3.29	0.88	0.79
Dta.D	8	4.77	0.89	0.89	3.23	0.74	0.67
Rsw.A	8	3.69	0.75	0.69	2.46	0.58	0.53
Rsw.V	8	4.82	1.16	1.07	3.11	0.91	0.85
Gvmw.A	8	5.29	0.84	0.74	3.24	0.65	0.60
Gvmw.V	8	5.33	1.05	0.97	3.35	0.83	0.77
Gv.A	8	6.14	0.99	0.92	3.55	0.80	0.75
Gv.V	8	9.53	0.79	0.74	6.05	0.63	0.58
Gvc.A	8	7.53	0.68	0.62	4.73	0.53	0.46
Tüm tahminler	**288**	**5.68**	**1.39**	**1.37**	**3.57**	**0.92**	**0.90**

6.3 Markov Modellerinin Karşılaştırılması

Modellerin, tekil trenlerin hedef andaki gecikme durumlarına ilişkin olasılık dağılımı tahminlerinin RMSE ve MAE değerleri Tablo 6.3'te gösterilmiştir. Sonuçlar, başlangıç gecikmesi bilinen bir trenin akım aşağıdaki tren hareketlerinin hangi olasılıkla hangi gecikmeyle gerçekleşeceğini tahmin etmek bakımından Model 3'ün en iyi sonuçları verdiğini göstermektedir. Model 2, Model 1'e göre oldukça başarılı ve Model 3'e göre kısmen daha başarısızdır.

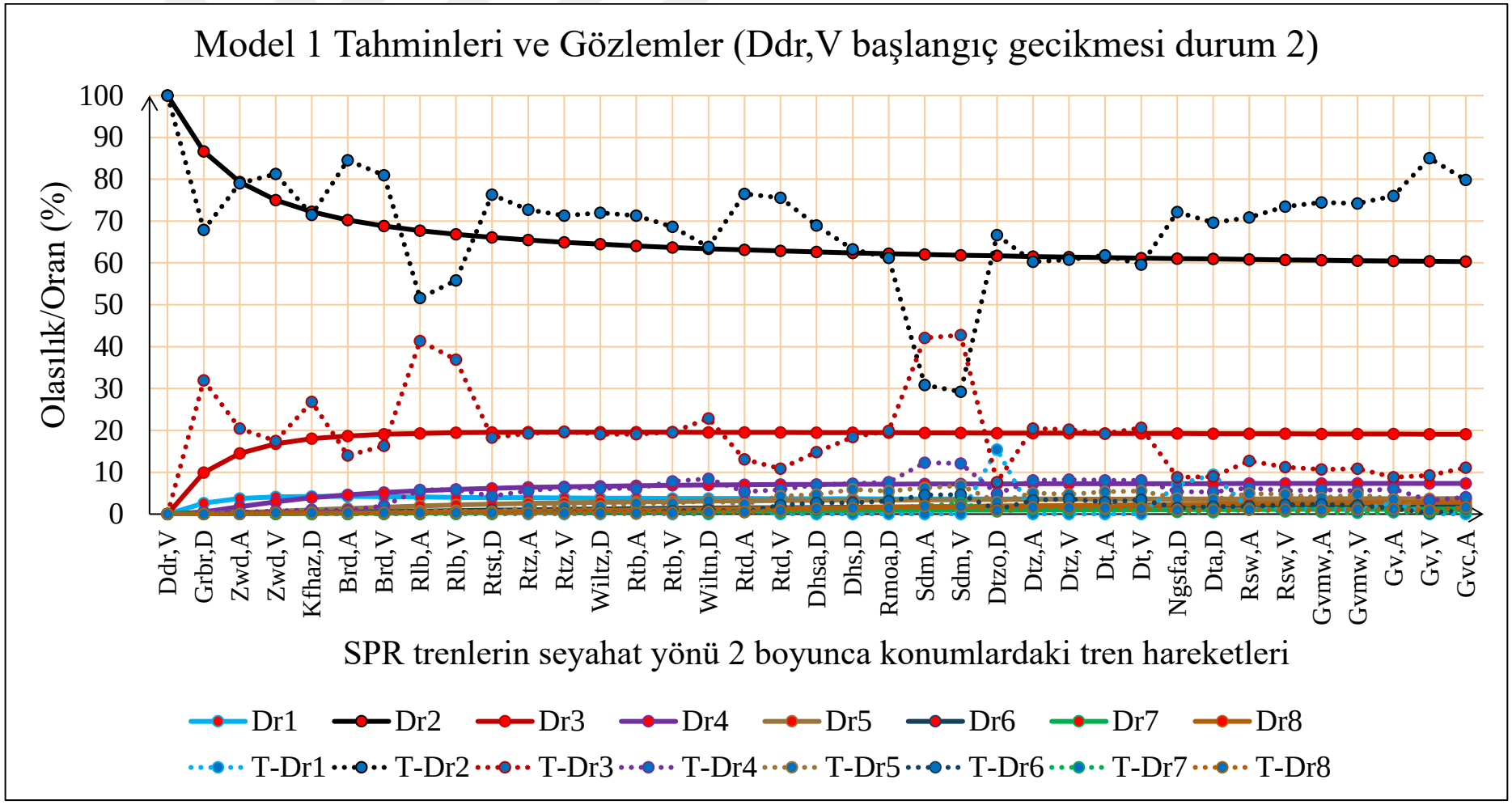
Modellerin tren grubu için hedef andaki gecikme dağılımı tahminlerinin RMSE ve MAE değerleri Tablo 6.5'te gösterilmiştir. Sonuçlar, başlangıç gecikme dağılımı bilinen bir tren grubunun akım aşağıda gecikme dağılımını tahmin etmek bakımından Model 2 ve Model 3'ün daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Model 1, Model 2 ve Model 3'e göre oldukça başarısızdır.

Tahmin edilen olasılıklar ve test verisinden gözlenen oranlar, örnek olarak Dordrecht kalkış (Ddr,V) gecikmesi durum 2 (zamanında) ve seyahat yönü 2 olan SPR trenlerin Ddr,V gecikmesi baz alınarak hedef istasyon Den Haag Centraal'a varışa (Gvc, A) kadar, Model 1, Model 2 ve Model 3 için sırasıyla Şekil 6.12, Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te gösterilmiştir. Bazı SPR trenlerin seyahatleri Rtd istasyonunda sonlanmaktadır. Bu trenler için yapılan tahminler de grafiklere dahildir.

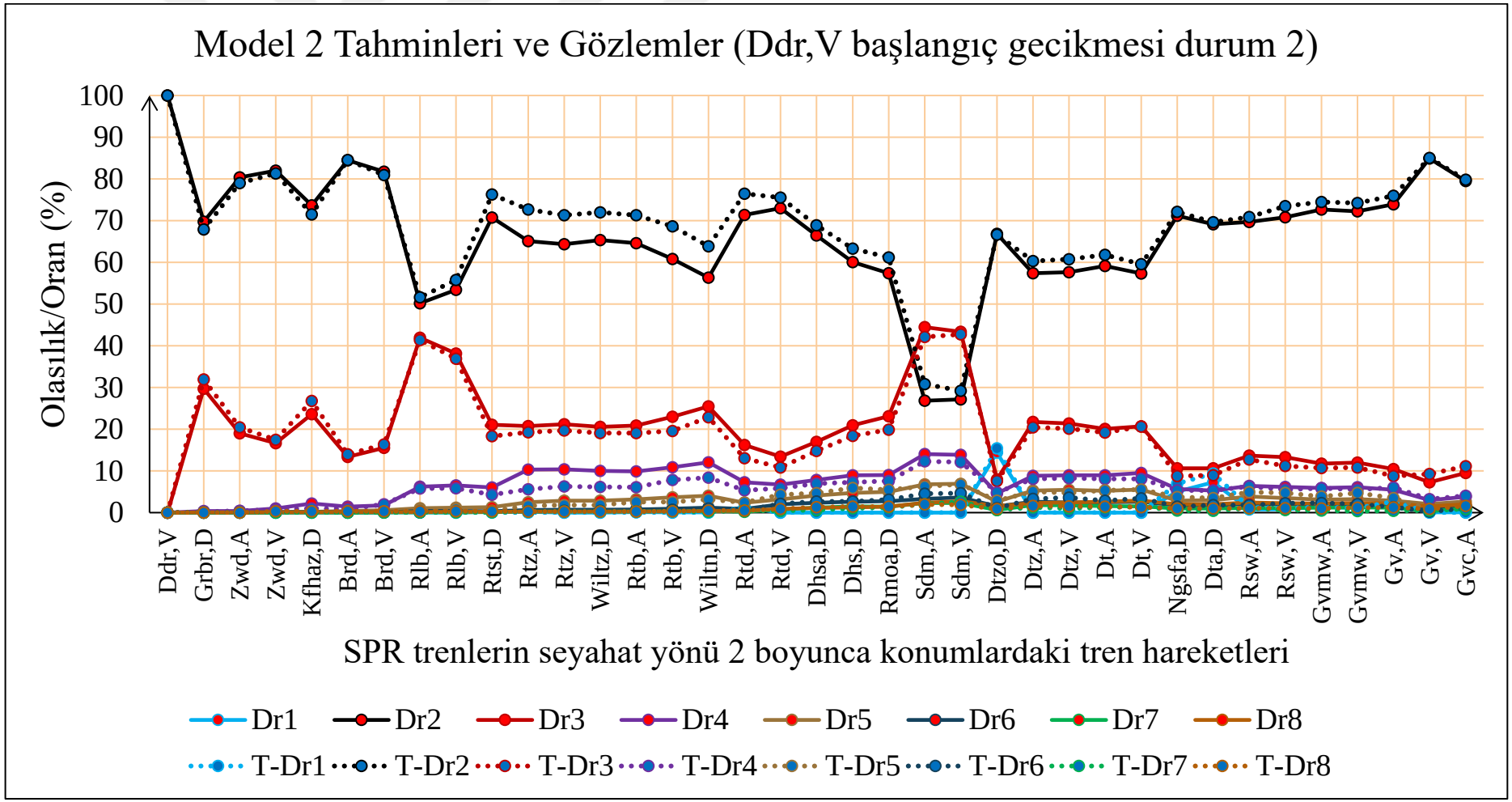
Şekil 6.12'den açıkça görülmektedir ki, homojen Markov zincirleri (M1) ile çeşitli tren hareketleri için gecikme durumlarının gözlenen oranlarına göre yapılan tahminler görece büyük sapmalar içermektedir. Model tahmin eğrileri, gözlenen oranların yumuşatılmış versiyonuymuş gibi gecikmenin genel trendini takip etmektedir. Buna rağmen model, konumda durağanlık kabulü nedeniyle yerel dalgalanmaları (ani gecikme değişimlerini) yakalayamamaktadır. Örneğin Model 1 tahmin hatalarının pik yaptığı Rmoa,D ve Dtz,A arasında, sıra dışı bir gecikme değişimi söz konusudur. Başlangıçta gecikmesiz olan bir trenin seyahatin devamında gecikmesiz (durum 2) olma olasılığı başlangıçta hızlıca düşüp hedef istasyona doğru %60 civarında sabitleşmeye başlamakta, kararlı durum olasılığına (π_2=0.5860) yakınsamaktadır. 1 dakika gecikmeli (durum 3) olma olasılığı

seyahat boyunca görülmekte olup %20 civarında sabitleşmeye başlamakta, kararlı durum olasılığına (π_3=0.1871) yakınsamaktadır. Geriye kalan %20 olasılık, diğer gecikme durumları arasında paylaşılmaktadır.

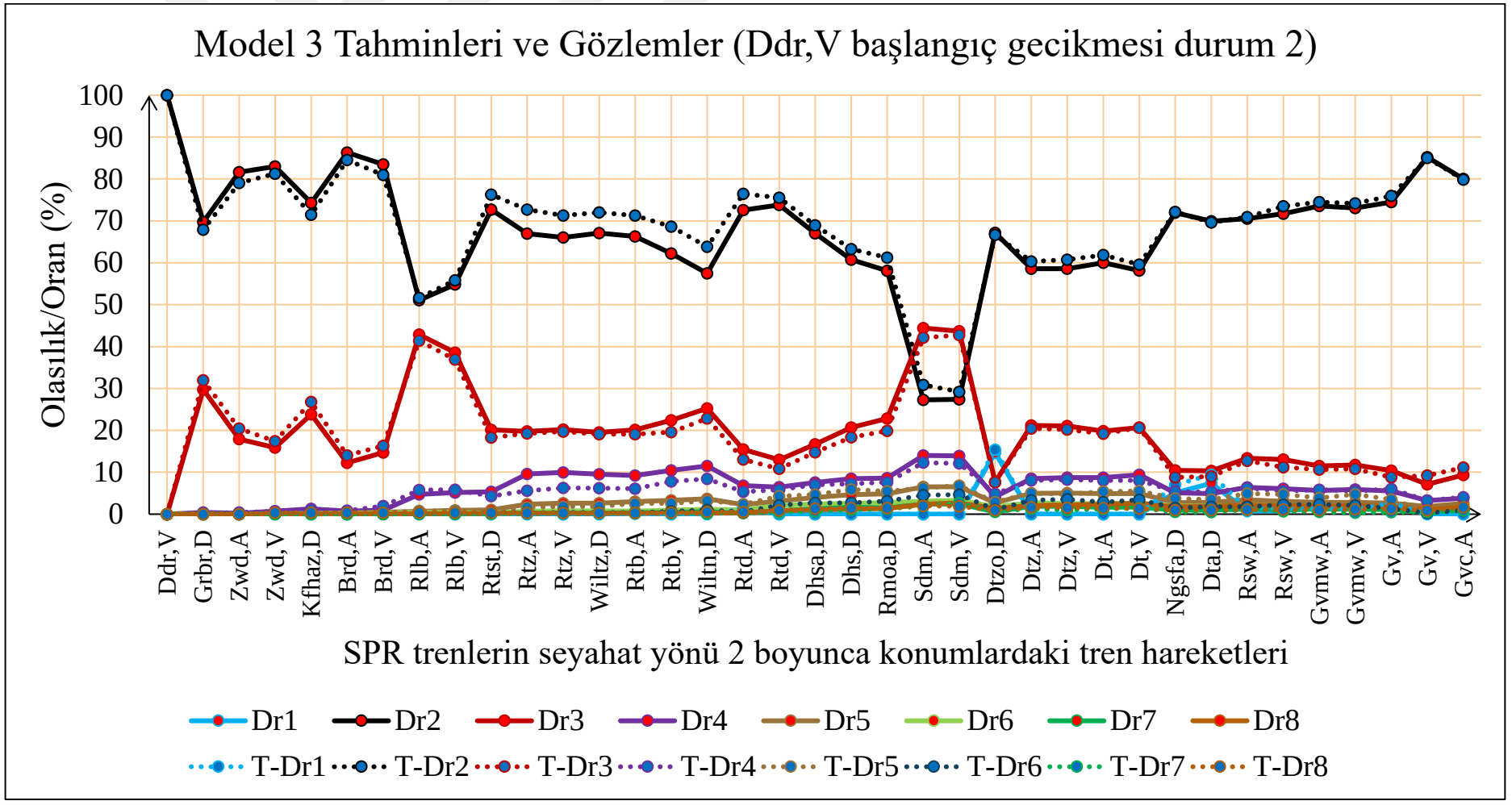
Homojen olmayan Markov zincirleri (Model 2 ve Model 3), Şekil 6.13 ve Şekil 6.14'te gösterildiği gibi, gözlem eğrilerinden nispeten küçük sapmalar yapmış ve gecikme oranlarını büyük bir başarıyla tahmin edebilmiştir. Markov matrislerinin eğitim veri seti kullanılarak geliştirildiği ve tahminlerin bu matrisler kullanılarak elde edildiği göz önünde bulundurulursa, seyahat boyunca her durum için tahmin edilen olasılıklar (eğitim veri setine dayalı) ve gözlemlenen oranlar (test veri setine dayalı) arasındaki göze çarpan uyum, homojen olmayan Markov zincirlerinin tahmin gücünü göstermektedir. Yerel dalgalanmalar, nispeten küçük sapmalarla başarıyla yakalanmıştır. Başlangıç istasyonundan uzaklaştıkça tahmin hataları herhangi bir artış eğilimi göstermemiştir. Dolayısıyla homojen olmayan Markov zincirlerinin kısa ve uzun vadeli davranışının başarısı dikkat çekicidir.



Şekil 6.12 Tahmin edilen olasılıklar ve test verisinden gözlenen oranlar (Model 1)



Şekil 6.13 Tahmin edilen olasılıklar ve test verisinden gözlenen oranlar (Model 2)



Şekil 6.14 Tahmin edilen olasılıklar ve test verisinden gözlenen oranlar (Model 3)

7
GECİKME TAHMİNİ

Başlangıç gecikmesi bilinen bir trenin akım aşağıdaki tren hareketlerinin hangi gecikmeyle gerçekleştireceğine yönelik yapılacak olan tahminlerde, Bölüm 6'da elde edilen, trenlerin gecikme durumuna ilişkin olasılık dağılımları kullanılacaktır. Bu olasılık dağılımları, başlangıç durum vektörü ve ilgili modelin T adım geçiş olasılıkları matrisinin çarpımından elde edilmişti (2.12). Örneğin, Dt,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı, Model 2 ile elde edilirken, Dt,V gecikme durumu 4 olduğu için başlangıç durum vektörü (6.14)'teki gibi ve Model 2 ile tahmin yapılacağından T=5 adım geçiş olasılıkları matrisi (6.11)'deki gibi olmaktır. Yani, bu trenin Sdm,V gecikmesine ilişkin olasılık dağılımı vektörü (7.1), başlangıç durum vektörü ile T=5 adım geçiş olasılıkları matrisinin çarpımı şeklinde bulunmuştur.

$$E_4 = \begin{bmatrix} 0{,}0002 & 0{,}1892 & 0{,}4203 & 0{,}2847 & 0{,}0781 & 0{,}0184 & 0{,}0052 & 0{,}0039 \end{bmatrix} \quad (7.1)$$

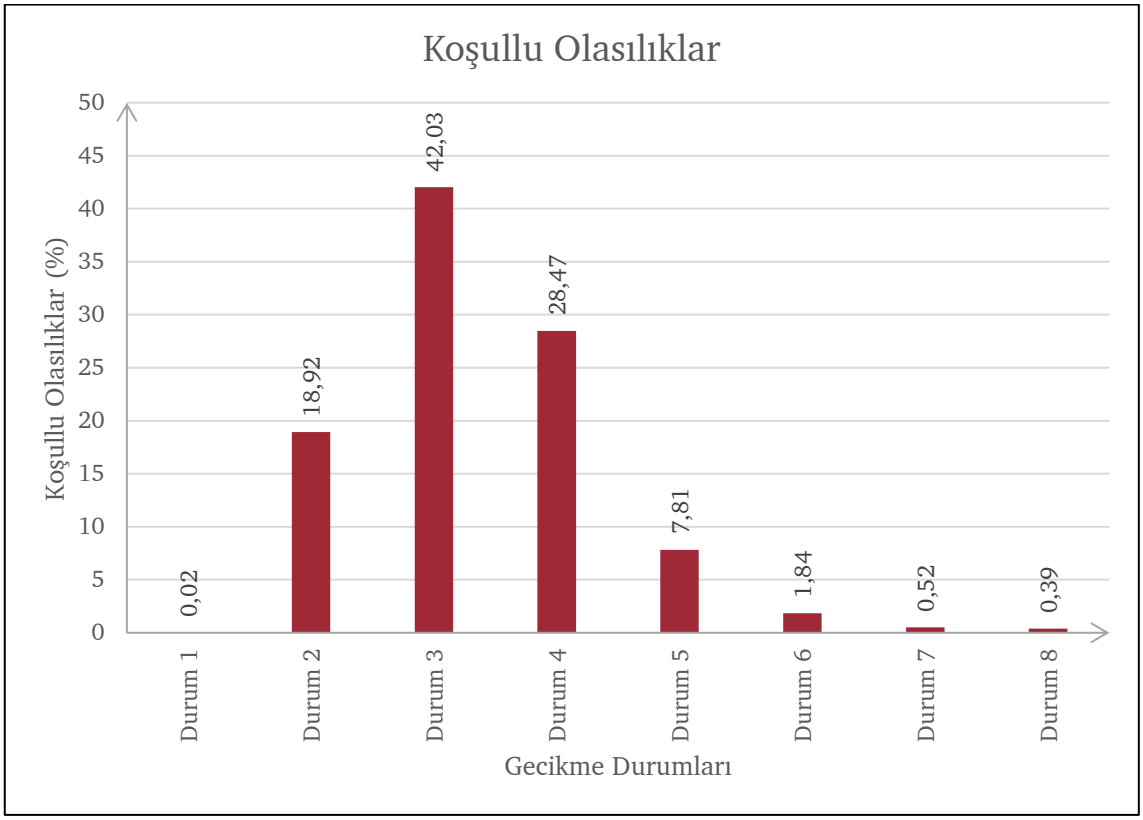
Gecikme tahmini için (7.1)'deki gibi bir olasılık dağılımı vektöründen, tahmini bir gecikme (g) değerinin elde edilmesi gerekmektedir. Bunun için ilgili olasılık dağılımın merkezi ölçüleri kullanılabilir. Buna göre gecikme tahmini için 4 merkezi ölçü kullanılmıştır. Bu merkezi ölçülerin ilki, ağırlıklı ortalama değeridir (matematiksel beklenti). Ağırlıklı ortalama ile belirlenen gecikme (g_{ort}), koşullu olasılık (e_j) ve ilgili gecikme durumuna ait temsili değerlerin (b_j) (Tablo 5.1) çarpımının, koşullu olasılıkların toplamına bölümü şeklinde hesaplanır (7.2). Koşullu olasılıkların toplamı 1'e eşit olduğundan (2.14) payda yazılmayabilir.

$$g_{ort} = \frac{\sum_{j=1}^{K} (b_j \cdot e_j)}{\sum_{j=1}^{K} e_j} = \sum_{j=1}^{K} (b_j \cdot e_j) \quad (7.2)$$

Örneğin, Model 2 tahminine göre Dt,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesinin ağırlıklı ortalama ile tahmini (7.3):

$$g_{ort} = -1{,}17 \cdot 0{,}002 + 0 \cdot 0{,}1892 + 1 \cdot 0{,}4203 + 2 \cdot 0{,}2847 + 3 \cdot 0{,}0781 + 4 \cdot 0{,}0184 + 5 \cdot 0{,}0052 + 8{,}71 \cdot 0{,}0039 = 1{,}36 \text{ dak} \quad (7.3)$$

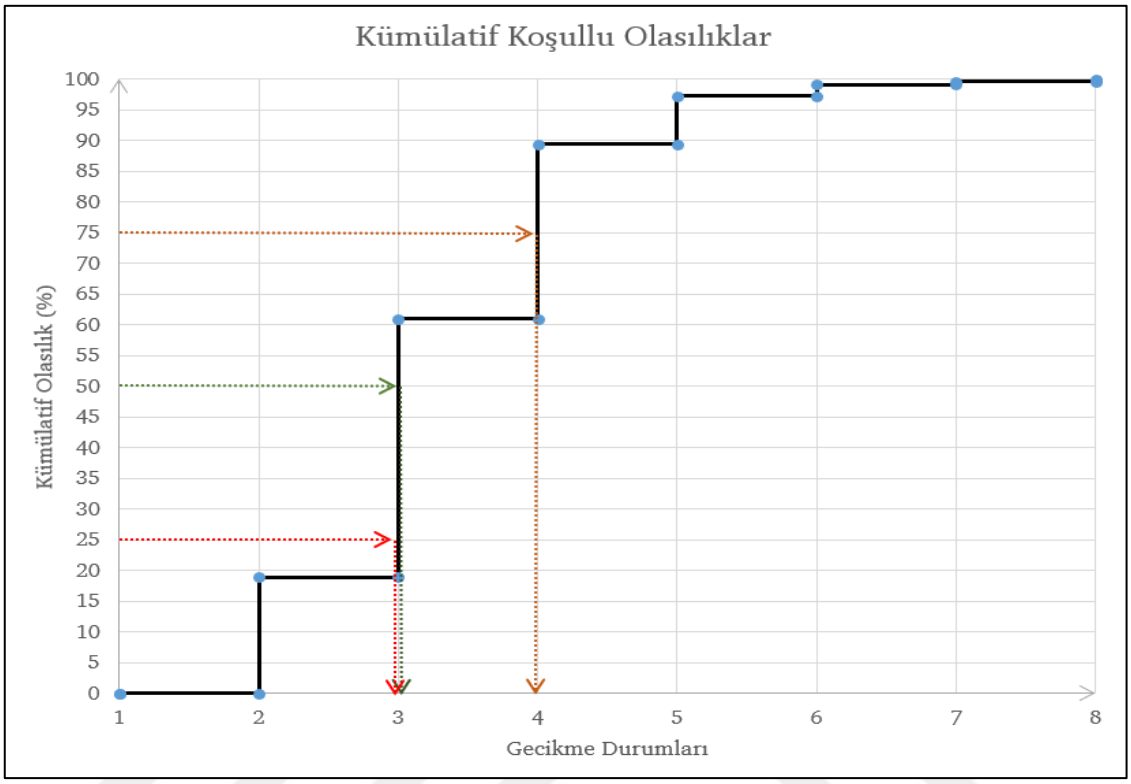
İkinci merkezi ölçü, olasılık dağılımının mod değeridir. Mod ile belirlenen gecikme (g_{mod}), koşullu olasılıklardan (e_j) değeri en büyük olan gecikme durumuna ait temsili değere karşılık gelmektedir. Örneğin, Model 2 tahminine göre Dt,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikmesi mod ile tahmin edilecek olsun. En büyük koşullu olasılık değeri, Durum 3'ün koşullu olasılığı olan 0,4203'tür (Şekil 7.1). Bu durumda Mod değeri, Durum 3'ün temsili değeri, yani 1 dakikadır.



Şekil 7.1 Model 2 tahminine göre Dt,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Sdm,V gecikme durumlarına ilişkin olasılık dağılımı

Üçüncü merkezi ölçü, olasılık dağılımının medyan değeridir. Medyan ile belirlenen gecikme (g_{mdy}), kümülatif koşullu olasılık fonksiyonunun %50 olasılığa denk gelen gecikme durumuna ait temsili değere karşılık gelmektedir. Örneğin, Model 2 tahminine göre Dt,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 1 olan SPR

türündeki bir trenin Sdm,V gecikme durumuna ilişkin kümülatif olasılık fonksiyonu Şekil 7.2'de verilmiştir. Bu dağılımın medyan değeri, %50 olasılığa denk gelen Durum 3'ün temsili değeri, yani 1 dakikadır.



Şekil 7.2 Model 2 tahminine göre Dt,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 1 olan SPR türü trenlerin Sdm,V gecikme durumlarına ilişkin kümülatif olasılık dağılımı

Dördüncü merkezi ölçü, olasılık dağılımının üçlü ortalama (trimean, *TRI*) değeridir. Trimean ilk olarak (Tukey, 1997) tarafından tanımlanmıştır. Alt kuyruk değeri $Ç_1$ (kümülatif olasılık dağılımında %25'e denk gelen değer), Medyan $Ç_2$ (kümülatif olasılık dağılımında %50'ye denk gelen değer) ve üst kuyruk değeri $Ç_3$ (kümülatif olasılık dağılımında %75'e denk gelen değer) olmak üzere trimean değeri, *TRI* (7.4):

$$TRI = \frac{Ç_1 + 2 \cdot Ç_2 + Ç_3}{4} \qquad (7.4)$$

Trimean ile belirlenen gecikme (g_{TRI}), kümülatif koşullu olasılık fonksiyonunun ilgili olasılıklara denk gelen gecikme durumlarına ait temsili değerler kullanılarak

(7.4)'teki gibi hesaplanşıştır. Örneğin, Model 2 tahminine göre Dt,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki bir trenin Sdm,V gecikme durumuna ilişkin kümülatif olasılık fonksiyonu Şekil 7.2'de verilmiştir. $Ç_1$=1 dak, $Ç_2$=1 dak ve $Ç_3$=2 dak olduğuna göre g_{TRI}=1,25 dak olarak hesaplanır. Dt,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki tekil trenlerin Sdm,V gecikmesi için yapılan tüm tahminler ve bu tahminlerin her tren için test verilerinde gözlenen gecikmelerle karşılaştırılması sonucu elde edilen RMSE ve MAE değerleri Tablo 7.1'de gösterilmiştir.

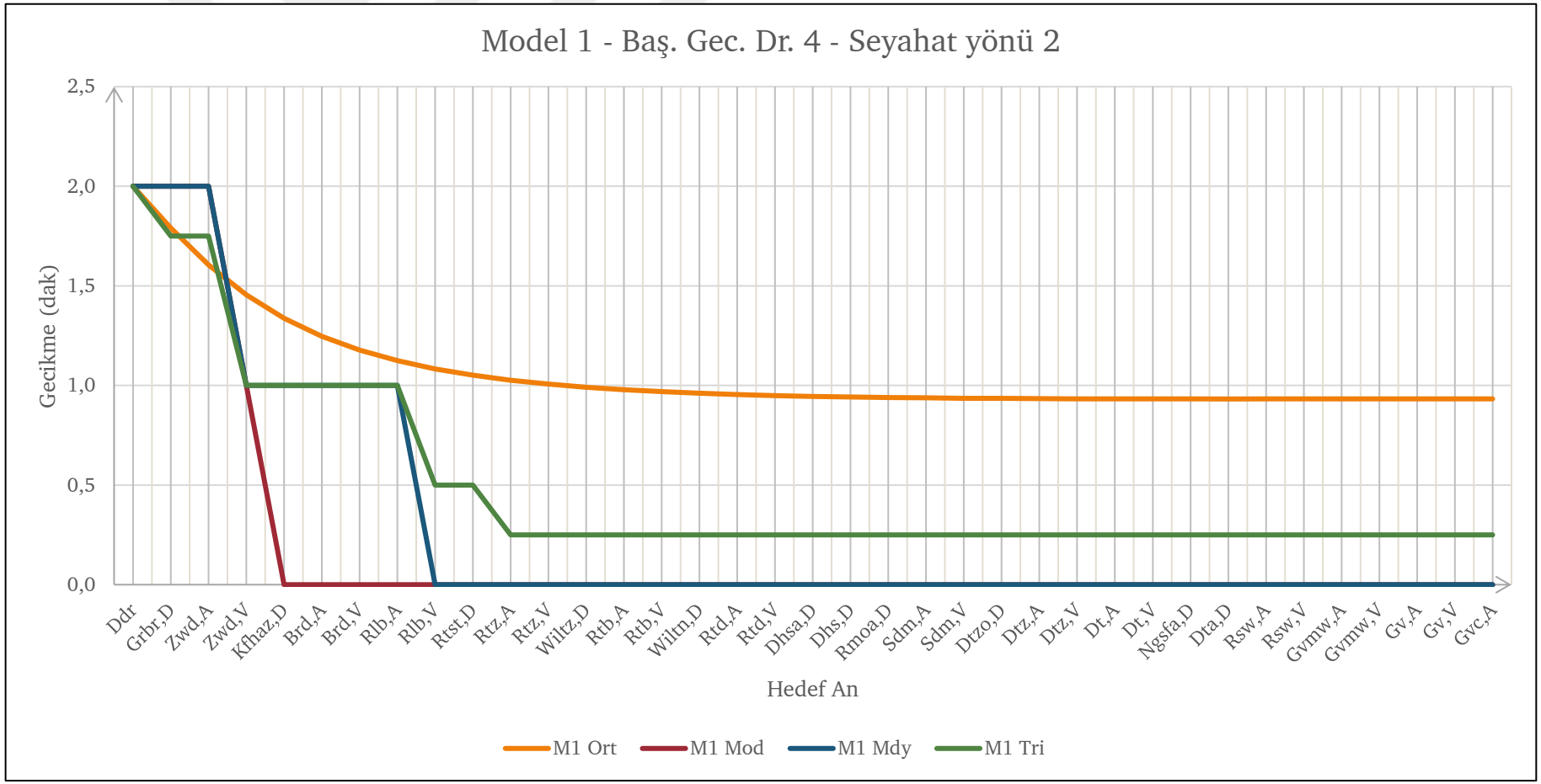
Tablo 7.1 Dt,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 1 olan SPR türündeki tekil trenlerin Sdm,V gecikmesi tahminleri için RMSE ve MAE değerleri

	Ağırlıklı Ortalama			*Mod*			*Medyan*			*Trimean*		
Başlangıç (Dt,V) Gecikmesi	**M1**	**M2**	**M3**	**M1**	**M2**	**M3**	**M1**	**M2**	**M3**	**M1**	**M2**	**M3**
	Sdm,V Gecikme Tahmini											
Durum 1	0,21	0,12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Durum 2	0,32	0,13	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,00	0,00
Durum 3	0,58	0,41	0,48	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,25
Durum 4	1,25	1,36	1,52	0,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,25	1,25
Durum 5	2,18	2,29	2,44	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,25	2,25
Durum 6	3,40	3,39	3,64	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,00	3,25	3,25
Durum 7	4,94	4,99	4,51	8,71	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00	4,93	4,25	4,25
Durum 8	7,34	7,79	8,23	8,71	8,71	8,71	8,71	8,71	8,71	7,78	8,71	8,71
	Sdm,V Tahmin Hataları											
Toplam h^2	975,2	828,7	808,8	4541,0	4541,0	4541,0	1916,5	1008,6	1008,6	4541,0	4541,0	4541,0
RMSE	**0,62**	**0,57**	**0,57**	**1,34**	**1,34**	**1,34**	**0,87**	**0,63**	**0,63**	**1,34**	**1,34**	**1,34**
Toplam $\|h\|$	1180,3	903,1	808,8	1391,0	1391,0	1391,0	951,1	644,1	644,1	1391,0	1391,0	1391,0
MAE	**0,47**	**0,36**	**0,32**	**0,55**	**0,55**	**0,55**	**0,38**	**0,25**	**0,25**	**0,55**	**0,55**	**0,55**

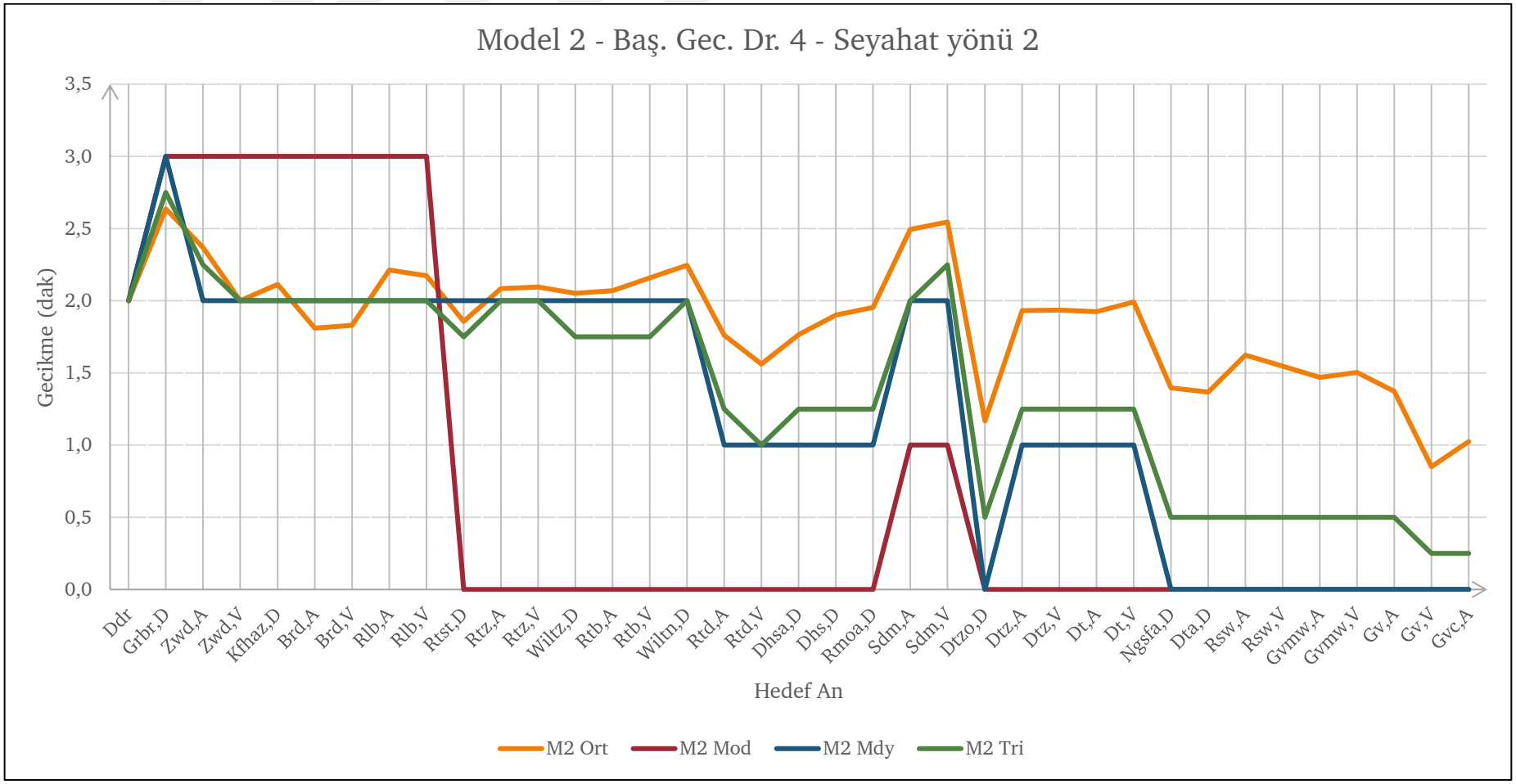
Örnek olarak, üç model ile elde edilen olasılık dağılımları ile dört merkezi ölçü kullanılarak bir hedef an (Sdm,V) için gecikme tahminleri gösterilmiştir. Çok sayıda hedef an için bu tahminler yapılabilir. Böylece modeller ve merkezi ölçüler karşılaştırılabilir. Bunun için Ddr,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 2 olan SPR türündeki tekil trenlerin akım aşağıdaki gecikmeleri her model - merkezi ölçü çifti kullanılarak ayrı ayrı tahmin edilmiştir. Yapılan tahminlerden örnek olarak sadece başlangıç durumu 4 için olanları, Tablo 7.2, Şekil 7.3, Şekil 7.4 ve Şekil 7.5'te gösterilmiştir. Daha sonra, bu (başlangıç durumu 4 için) ve diğer başlangıç durumları için yapılan tahminler test verilerinde gerçekleşen değerlerle karşılaştırılıp modeller ve merkezi ölçüler karşılaştırılmıştır.

Tablo 7.2 Ddr,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 2 olan SPR türündeki tekil trenlerin akım aşağıdaki gecikmeleri için yapılan tahminler

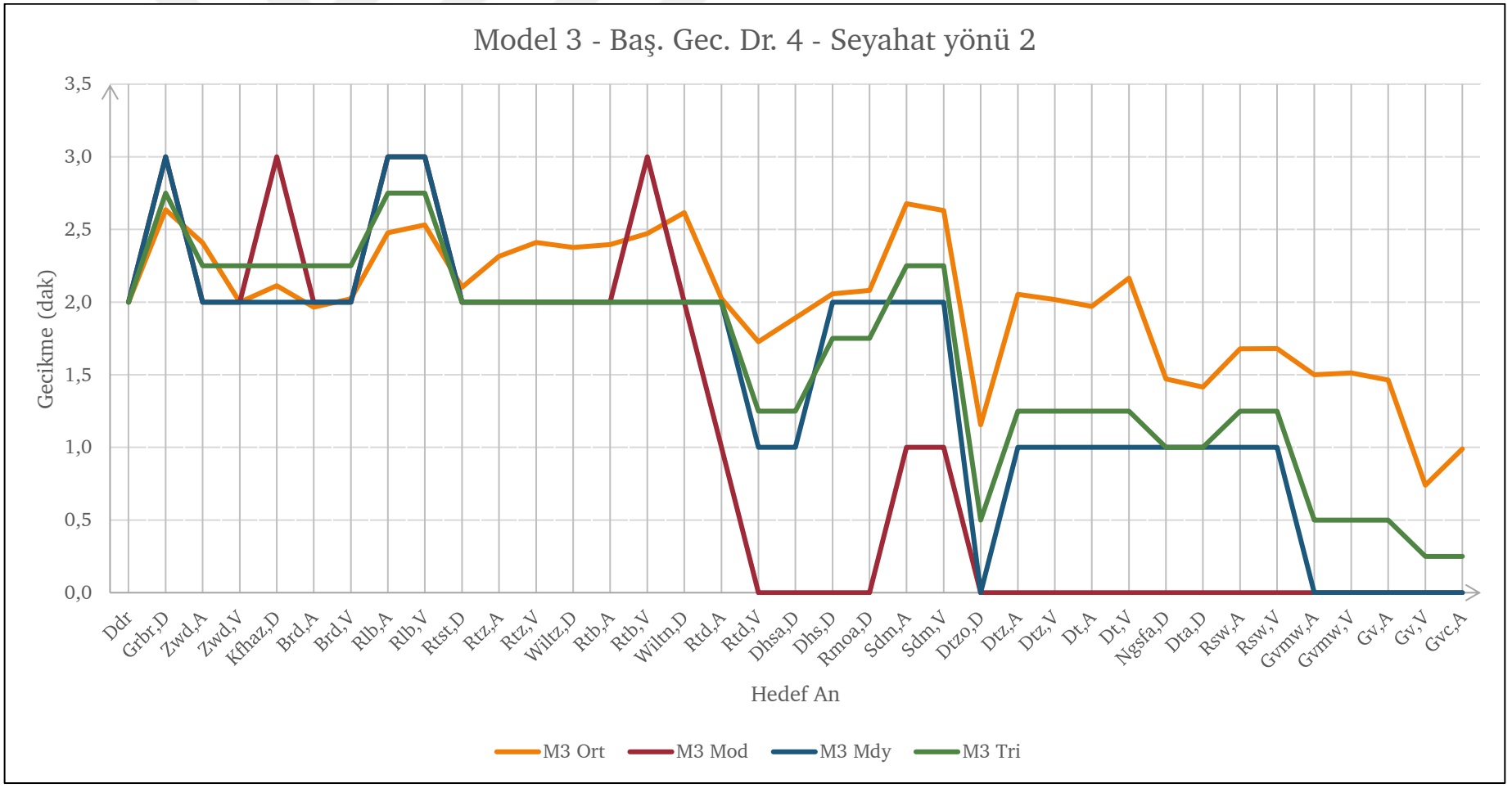
Hedef An	Ağırlıklı Ort.			Mod			Medyan			Trimean		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Grbr.D	1,79	2,64	2,64	2,00	3,00	3,00	2,00	3,00	3,00	1,75	2,75	2,75
Zwd.A	1,60	2,37	2,41	2,00	3,00	2,00	2,00	2,00	2,00	1,75	2,25	2,25
Zwd.V	1,45	2,00	2,00	1,00	3,00	2,00	1,00	2,00	2,00	1,00	2,00	2,25
Kfhaz.D	1,34	2,11	2,11	0,00	3,00	3,00	1,00	2,00	2,00	1,00	2,00	2,25
Brd.A	1,25	1,81	1,97	0,00	3,00	2,00	1,00	2,00	2,00	1,00	2,00	2,25
Brd.V	1,18	1,83	2,02	0,00	3,00	2,00	1,00	2,00	2,00	1,00	2,00	2,25
Rlb.A	1,12	2,21	2,48	0,00	3,00	3,00	1,00	2,00	3,00	1,00	2,00	2,75
Rlb.V	1,08	2,17	2,53	0,00	3,00	3,00	0,00	2,00	3,00	0,50	2,00	2,75
Rtst.D	1,05	1,86	2,10	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00	2,00	0,50	1,75	2,00
Rtz.A	1,03	2,08	2,32	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00	2,00	0,25	2,00	2,00
Rtz.V	1,01	2,10	2,41	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00	2,00	0,25	2,00	2,00
Wiltz.D	0,99	2,05	2,38	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00	2,00	0,25	1,75	2,00
Rtb.A	0,98	2,07	2,40	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00	2,00	0,25	1,75	2,00
Rtb.V	0,97	2,16	2,47	0,00	0,00	3,00	0,00	2,00	2,00	0,25	1,75	2,00
Wiltn.D	0,96	2,25	2,62	0,00	0,00	2,00	0,00	2,00	2,00	0,25	2,00	2,00
Rtd.A	0,95	1,76	2,02	0,00	0,00	1,00	0,00	1,00	2,00	0,25	1,25	2,00
Rtd.V	0,95	1,56	1,73	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,25	1,00	1,25
Dhsa.D	0,95	1,76	1,89	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,25	1,25	1,25
Dhs.D	0,94	1,90	2,06	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	0,25	1,25	1,75
Rmoa.D	0,94	1,95	2,08	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	2,00	0,25	1,25	1,75
Sdm.A	0,94	2,49	2,68	0,00	1,00	1,00	0,00	2,00	2,00	0,25	2,00	2,25
Sdm.V	0,94	2,55	2,63	0,00	1,00	1,00	0,00	2,00	2,00	0,25	2,25	2,25
Dtzo.D	0,93	1,17	1,16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,50	0,50
Dtz.A	0,93	1,93	2,05	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,25	1,25	1,25
Dtz.V	0,93	1,94	2,02	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,25	1,25	1,25
Dt.A	0,93	1,92	1,97	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,25	1,25	1,25
Dt.V	0,93	1,99	2,16	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	1,00	0,25	1,25	1,25
Ngsfa.D	0,93	1,40	1,47	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,25	0,50	1,00
Dta.D	0,93	1,37	1,42	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,25	0,50	1,00
Rsw.A	0,93	1,62	1,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,25	0,50	1,25
Rsw.V	0,93	1,55	1,68	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,00	0,25	0,50	1,25
Gvmw.A	0,93	1,47	1,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,50	0,50
Gvmw.V	0,93	1,50	1,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,50	0,50
Gv.A	0,93	1,37	1,46	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,50	0,50
Gv.V	0,93	0,85	0,74	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,25
Gvc.A	0,93	1,02	0,99	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,25	0,25	0,25



Şekil 7.3 Model 1 tahminine göre Ddr,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 2 olan SPR türündeki tekil trenlerin akım aşağıdaki gecikmeleri için yapılan tahminler



Şekil 7.4 Model 2 tahminine göre Ddr,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 2 olan SPR türündeki tekil trenlerin akım aşağıdaki gecikmeleri için yapılan tahminler



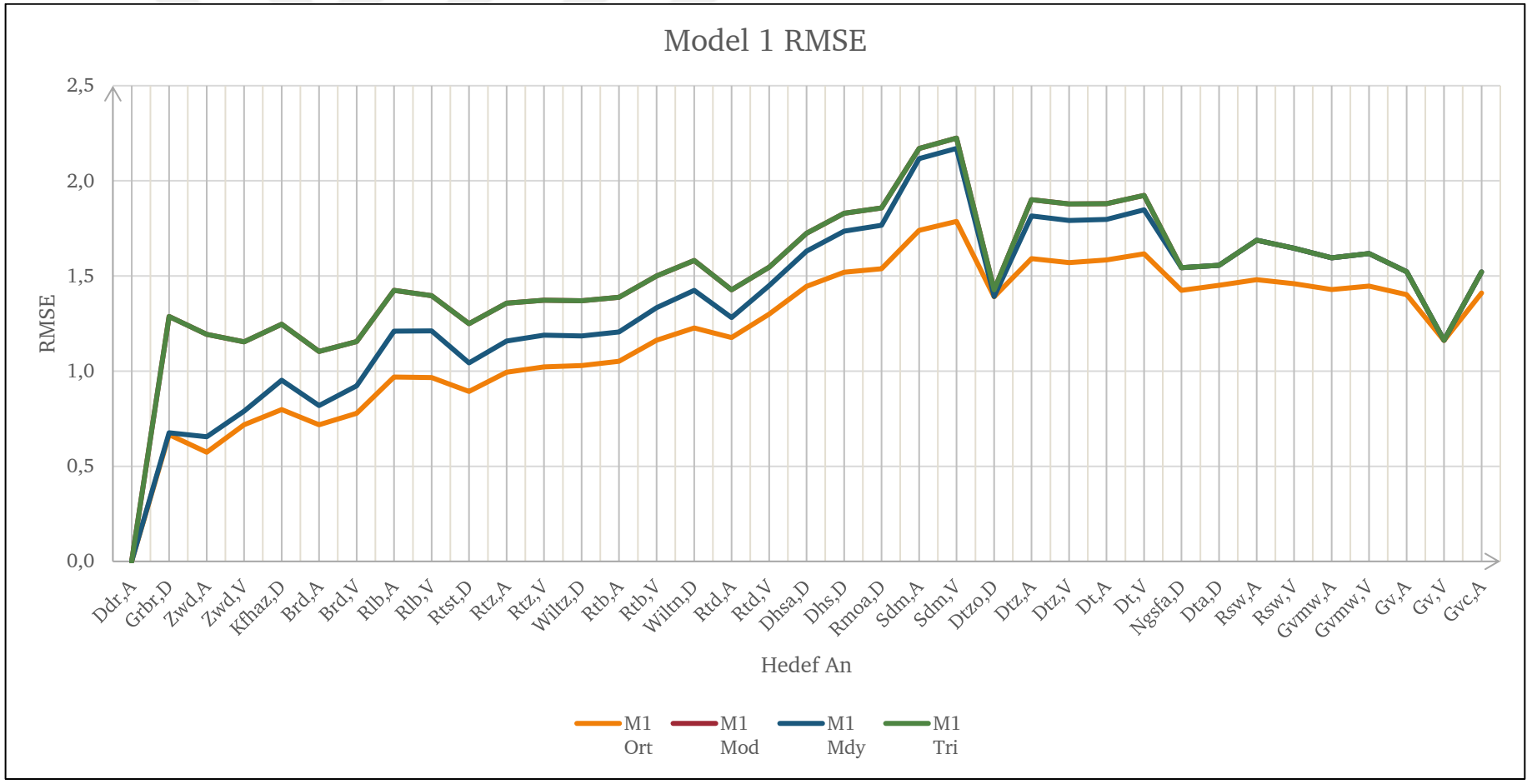
Şekil 7.5 Model 3 tahminine göre Ddr,V gecikme durumu 4 ve seyahat yönü 2 olan SPR türündeki tekil trenlerin akım aşağıdaki gecikmeleri için yapılan tahminler

7.1 Gecikme Tahmini için Kullanılan Modellerinin Karşılaştırılması

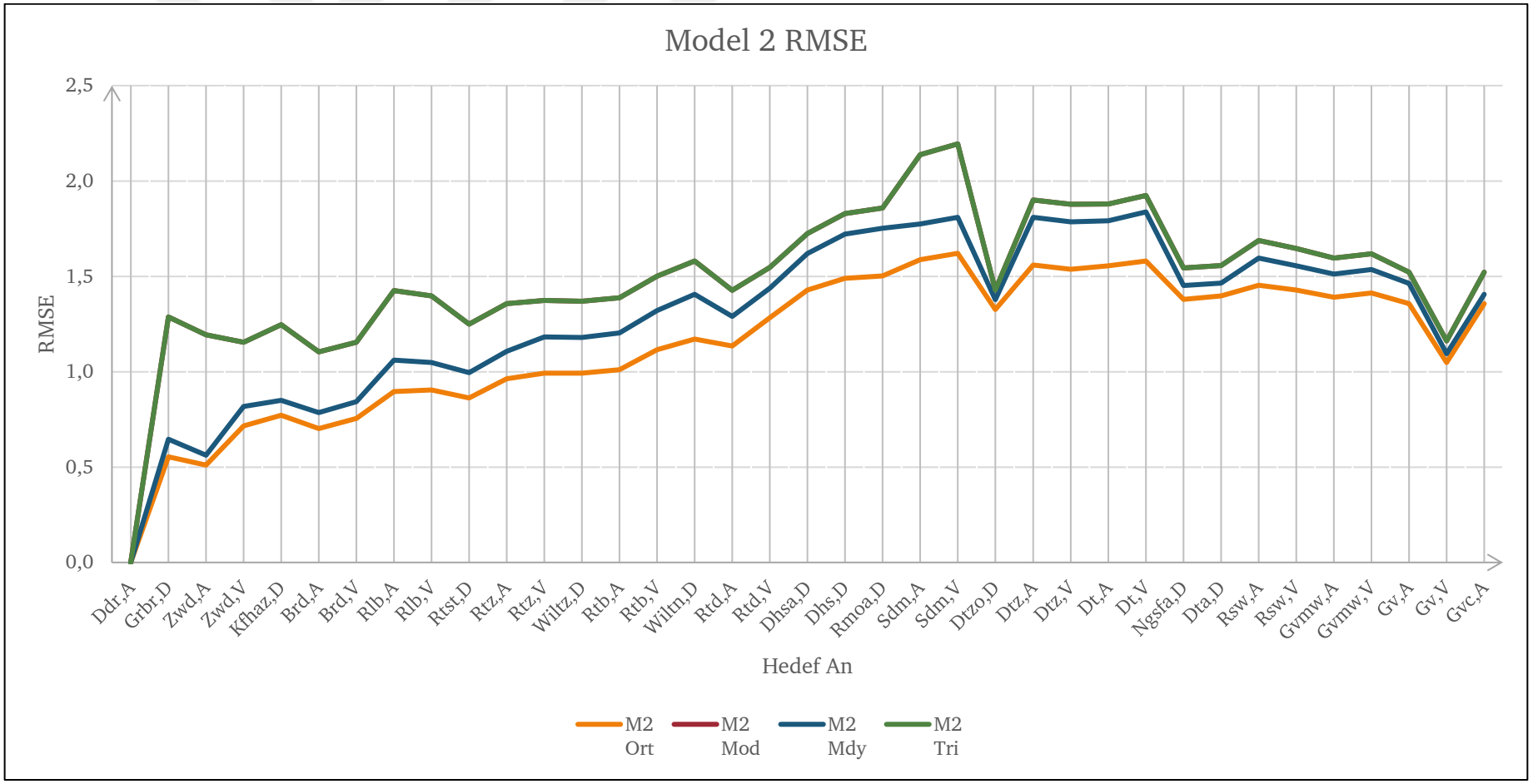
Ddr,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 2 olan SPR türündeki tekil trenlerin akım aşağıdaki gecikmeleri için yapılan tahminler, her tren için test verilerinde gözlenen gecikmeler ile karşılaştırılmış olup RMSE değerleri (Tablo 7.3) hesaplanmıştır.

Tablo 7.3 Ddr,V gecikme durumu baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için RMSE (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için)

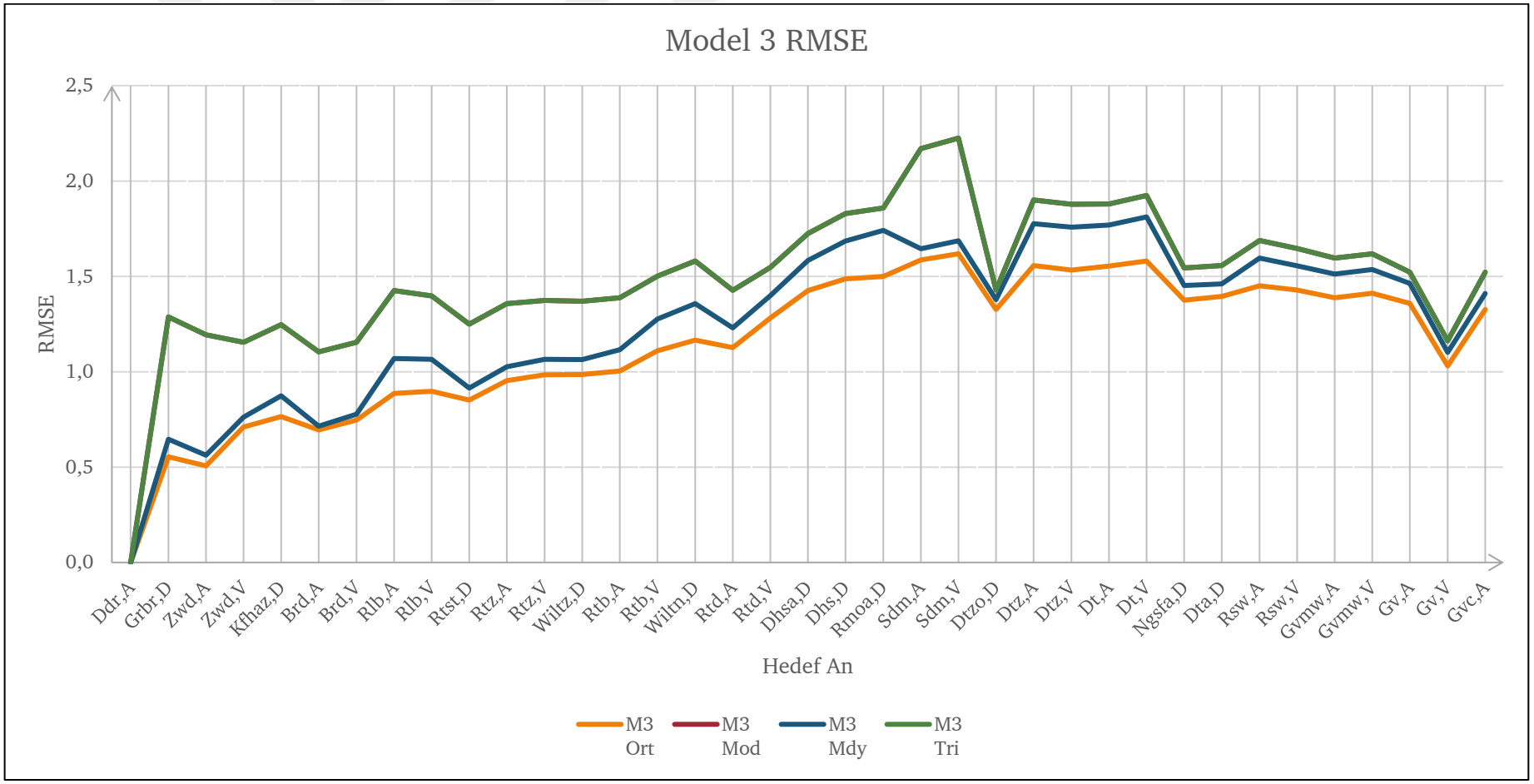
Hedef An	Ağırlıklı Ort.			Mod			Medyan			Trimean		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Grbr.D	0.67	0.55	0.55	1.29	1.29	1.29	0.68	0.65	0.65	1.29	1.29	1.29
Zwd.A	0.57	0.51	0.51	1.19	1.19	1.19	0.66	0.56	0.56	1.19	1.19	1.19
Zwd.V	0.72	0.72	0.71	1.15	1.15	1.15	0.79	0.82	0.76	1.15	1.15	1.15
Kfhaz.D	0.80	0.77	0.77	1.25	1.25	1.25	0.95	0.85	0.87	1.25	1.25	1.25
Brd.A	0.72	0.70	0.70	1.10	1.10	1.10	0.82	0.79	0.71	1.10	1.10	1.10
Brd.V	0.78	0.75	0.75	1.15	1.15	1.15	0.92	0.84	0.78	1.15	1.15	1.15
Rlb.A	0.97	0.90	0.89	1.42	1.42	1.42	1.21	1.06	1.07	1.42	1.42	1.42
Rlb.V	0.97	0.90	0.90	1.40	1.40	1.40	1.21	1.05	1.07	1.40	1.40	1.40
Rtst.D	0.89	0.86	0.85	1.25	1.25	1.25	1.04	0.99	0.91	1.25	1.25	1.25
Rtz.A	0.99	0.96	0.95	1.36	1.36	1.36	1.16	1.11	1.03	1.36	1.36	1.36
Rtz.V	1.02	0.99	0.98	1.37	1.37	1.37	1.19	1.18	1.06	1.37	1.37	1.37
Wiltz.D	1.03	0.99	0.98	1.37	1.37	1.37	1.18	1.18	1.06	1.37	1.37	1.37
Rtb.A	1.05	1.01	1.00	1.39	1.39	1.39	1.21	1.20	1.12	1.39	1.39	1.39
Rtb.V	1.16	1.12	1.11	1.50	1.50	1.50	1.33	1.32	1.28	1.50	1.50	1.50
Wiltn.D	1.23	1.17	1.17	1.58	1.58	1.58	1.42	1.41	1.36	1.58	1.58	1.58
Rtd.A	1.18	1.13	1.13	1.43	1.43	1.43	1.28	1.29	1.23	1.43	1.43	1.43
Rtd.V	1.30	1.28	1.28	1.55	1.55	1.55	1.45	1.44	1.40	1.55	1.55	1.55
Dhsa.D	1.45	1.43	1.42	1.72	1.72	1.72	1.63	1.62	1.58	1.72	1.72	1.72
Dhs.D	1.52	1.49	1.49	1.83	1.83	1.83	1.74	1.72	1.69	1.83	1.83	1.83
Rmoa.D	1.54	1.50	1.50	1.86	1.86	1.86	1.77	1.75	1.74	1.86	1.86	1.86
Sdm.A	1.74	1.59	1.59	2.17	2.14	2.17	2.12	1.77	1.64	2.17	2.14	2.17
Sdm.V	1.79	1.62	1.62	2.22	2.19	2.22	2.17	1.81	1.69	2.22	2.19	2.22
Dtzo.D	1.39	1.33	1.33	1.43	1.43	1.43	1.39	1.38	1.38	1.43	1.43	1.43
Dtz.A	1.59	1.56	1.56	1.90	1.90	1.90	1.82	1.81	1.78	1.90	1.90	1.90
Dtz.V	1.57	1.54	1.53	1.88	1.88	1.88	1.79	1.79	1.76	1.88	1.88	1.88
Dt.A	1.58	1.56	1.55	1.88	1.88	1.88	1.80	1.79	1.77	1.88	1.88	1.88
Dt.V	1.62	1.58	1.58	1.92	1.92	1.92	1.85	1.84	1.81	1.92	1.92	1.92
Ngsfa.D	1.42	1.38	1.38	1.54	1.54	1.54	1.54	1.45	1.45	1.54	1.54	1.54
Dta.D	1.45	1.40	1.40	1.56	1.56	1.56	1.56	1.47	1.46	1.56	1.56	1.56
Rsw.A	1.48	1.45	1.45	1.69	1.69	1.69	1.69	1.60	1.60	1.69	1.69	1.69
Rsw.V	1.46	1.43	1.43	1.65	1.65	1.65	1.65	1.56	1.56	1.65	1.65	1.65
Gvmw.A	1.43	1.39	1.39	1.60	1.60	1.60	1.60	1.51	1.51	1.60	1.60	1.60
Gvmw.V	1.45	1.41	1.41	1.62	1.62	1.62	1.62	1.54	1.54	1.62	1.62	1.62
Gv.A	1.40	1.36	1.36	1.52	1.52	1.52	1.52	1.46	1.46	1.52	1.52	1.52
Gv.V	1.16	1.05	1.03	1.16	1.16	1.16	1.16	1.09	1.10	1.16	1.16	1.16
Gvc.A	1.41	1.36	1.33	1.52	1.52	1.52	1.52	1.41	1.41	1.52	1.52	1.52
Toplu Hesap	**1.27**	**1.22**	**1.22**	**1.56**	**1.56**	**1.56**	**1.44**	**1.38**	**1.34**	**1.56**	**1.56**	**1.56**



Şekil 7.6 Model 1 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için RMSE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için)

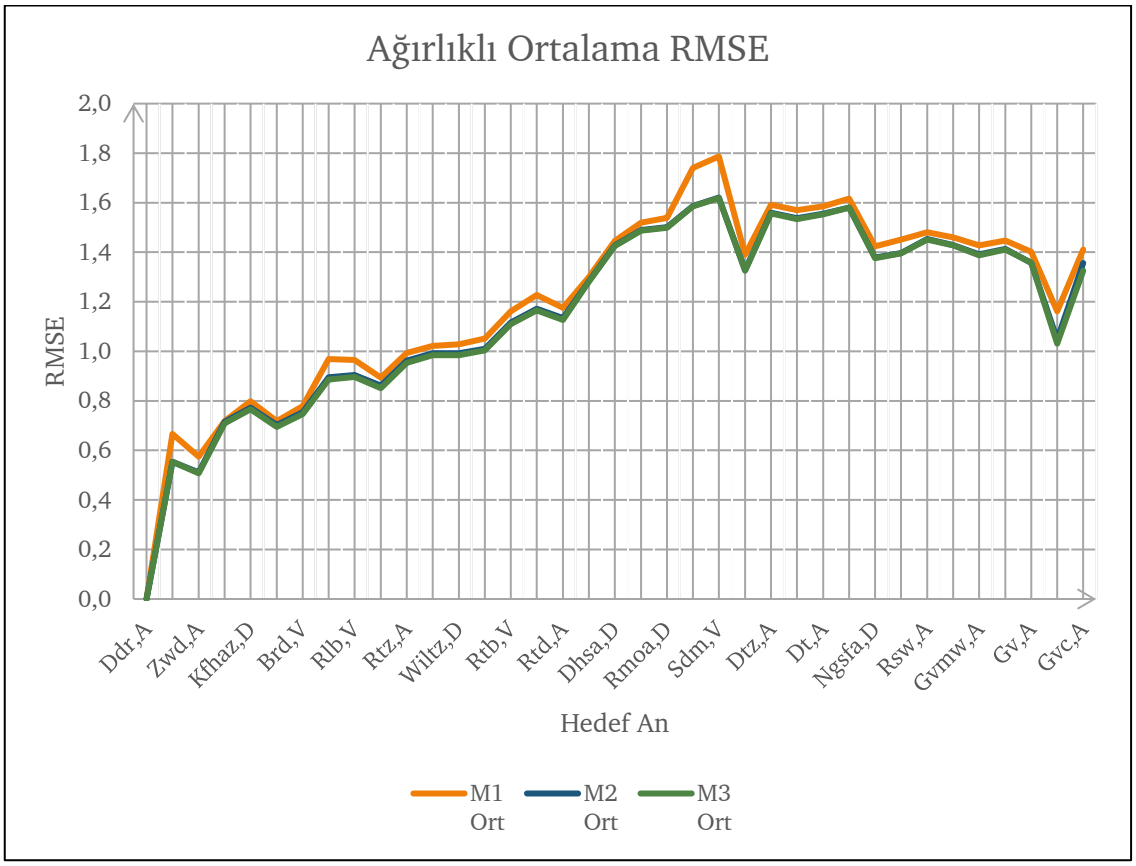


Şekil 7.7 Model 2 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için RMSE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için)



Şekil 7.8 Model 3 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için RMSE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için)

Her model için ağırlıklı ortalama, mod, medyan ve trimean merkezi ölçüleri ile yapılan tahminlerin RMSE değerleri karşılaştırıldığında, ağırlıklı ortalama ile yapılan tahminlerin en iyi sonucu verdiği görülmektedir (Şekil 7.6, Şekil 7.7 ve Şekil 7.8). Ağırlıklı ortalama ile yapılan tahminlerin RMSE değerleri karşılaştırıldığında, en iyi modelin Model 3 olduğu ve Model 2'nin de Model 3'e oldukça yakın sonuçlar verdiği görülmektedir (Şekil 7.9).

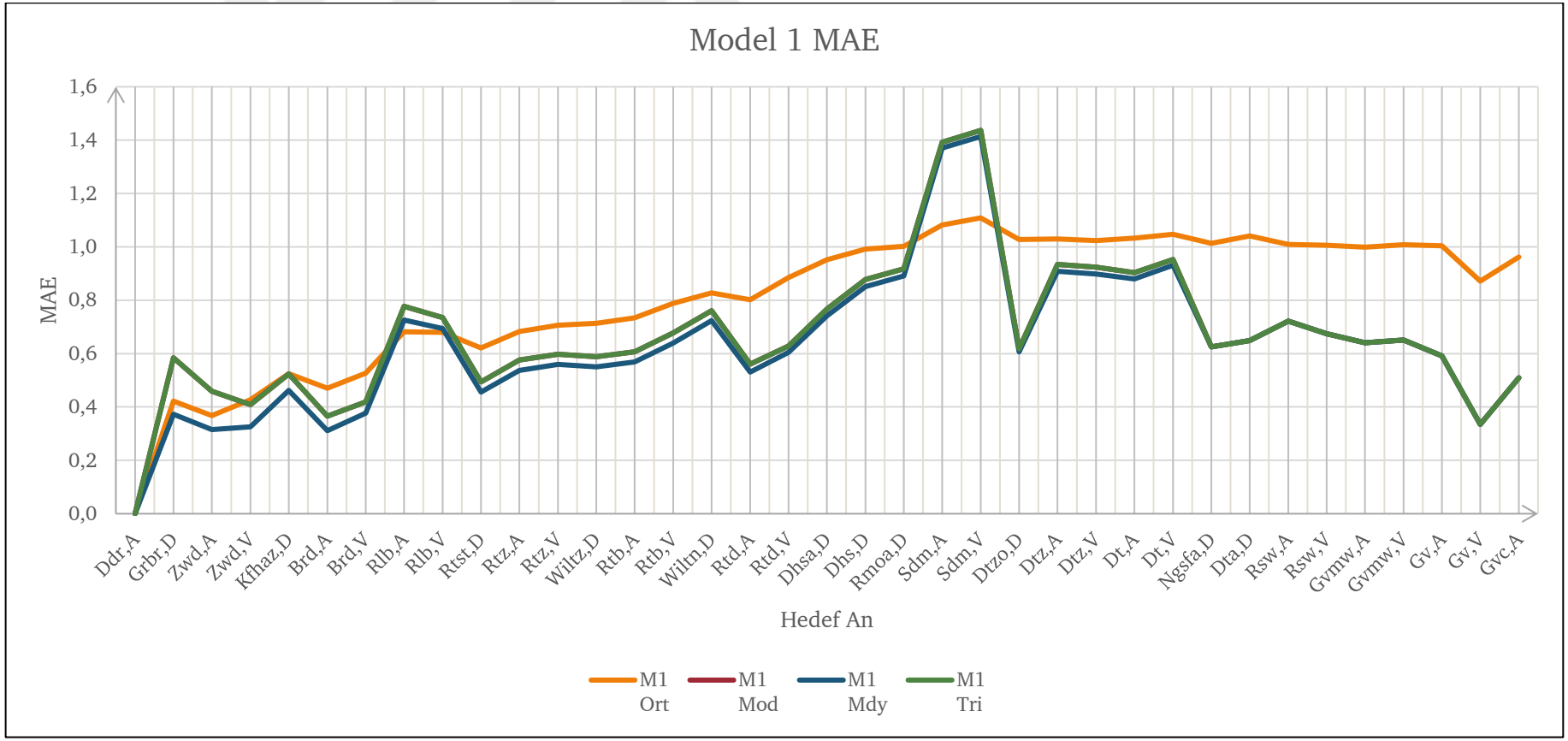


Şekil 7.9 Ağırlıklı ortalama kullanılarak ve Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan modellerin akım aşağıdaki gecikme tahminleri için RMSE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için)

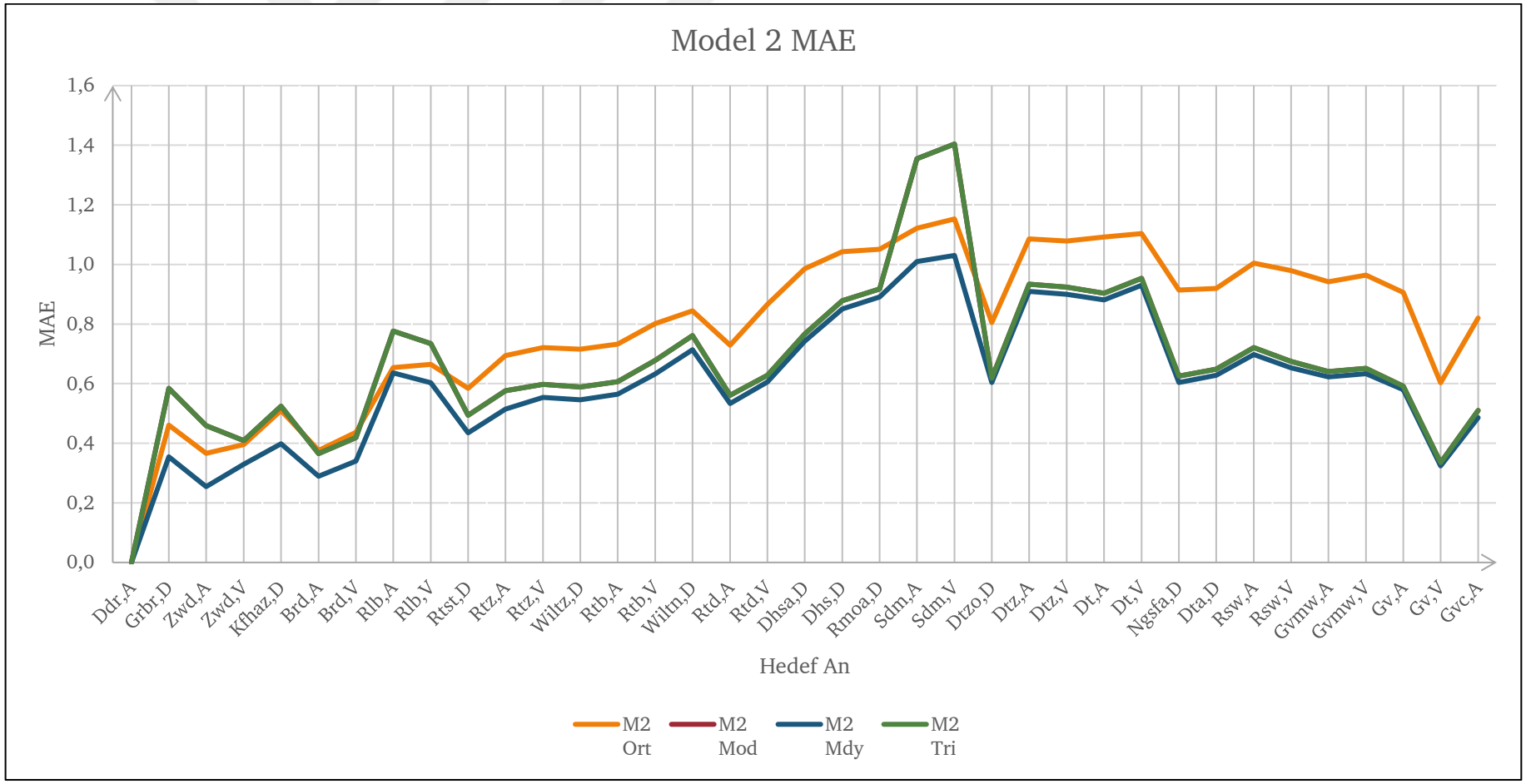
Ddr,V gecikme durumu bilinen ve seyahat yönü 2 olan SPR türündeki tekil trenlerin akım aşağıdaki gecikmeleri için yapılan tahminler, her tren için test verilerinde gözlenen gecikmeler ile karşılaştırılmış olup MAE değerleri (Tablo 7.4) hesaplanmıştır.

Tablo 7.4 Ddr,V gecikme durumu baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için MAE (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için)

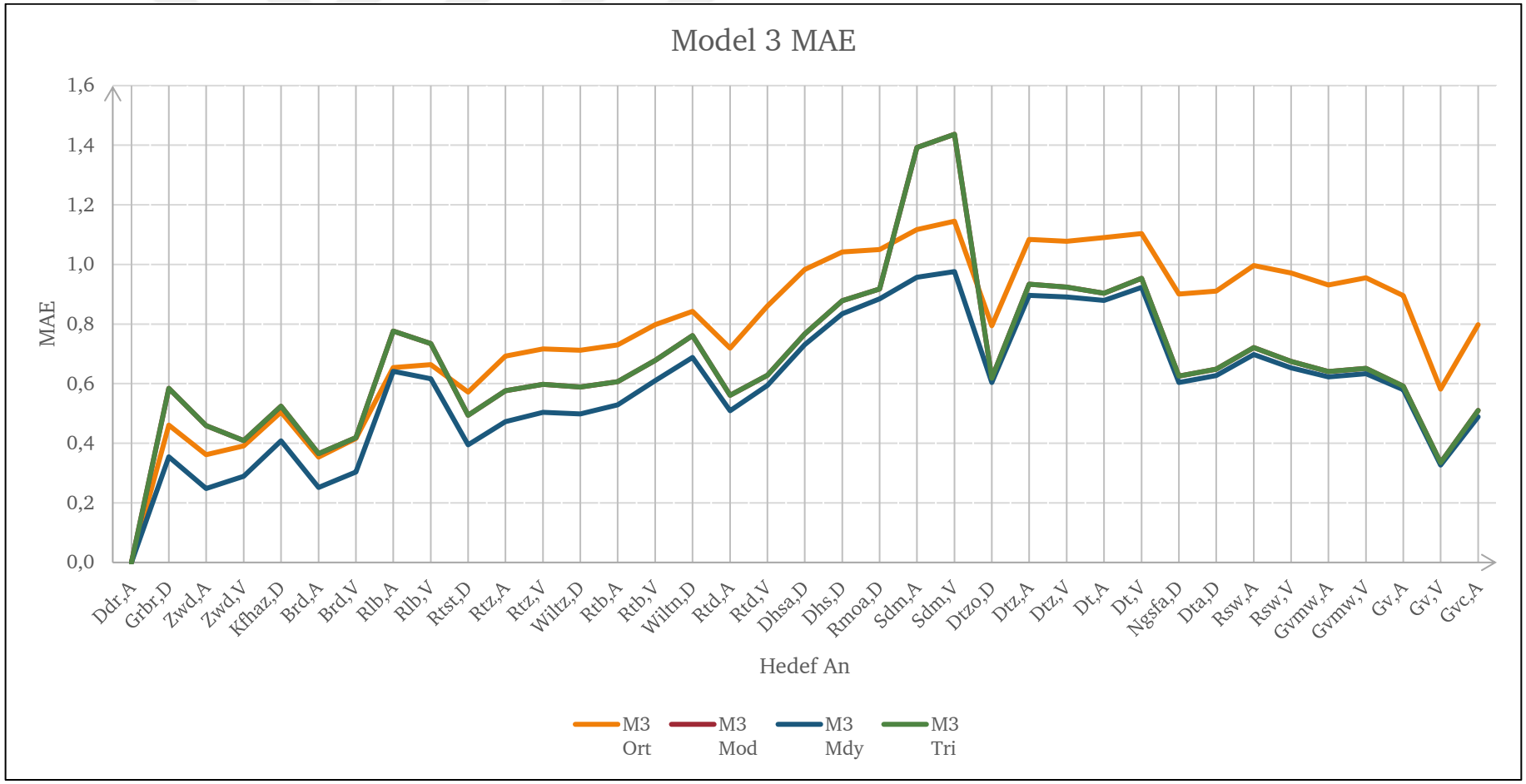
Hedef An	Ağırlıklı Ort.			Mod			Medyan			Trimean		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
Grbr.D	0.42	0.46	0.46	0.58	0.58	0.58	0.37	0.35	0.35	0.58	0.58	0.58
Zwd.A	0.37	0.37	0.36	0.46	0.46	0.46	0.31	0.25	0.25	0.46	0.46	0.46
Zwd.V	0.43	0.40	0.39	0.41	0.41	0.41	0.33	0.33	0.29	0.41	0.41	0.41
Kfhaz.D	0.52	0.51	0.50	0.52	0.52	0.52	0.46	0.40	0.41	0.52	0.52	0.52
Brd.A	0.47	0.38	0.35	0.37	0.37	0.37	0.31	0.29	0.25	0.37	0.37	0.37
Brd.V	0.53	0.44	0.42	0.42	0.42	0.42	0.38	0.34	0.30	0.42	0.42	0.42
Rlb.A	0.68	0.65	0.65	0.78	0.78	0.78	0.73	0.64	0.64	0.78	0.78	0.78
Rlb.V	0.68	0.66	0.66	0.73	0.73	0.73	0.69	0.60	0.62	0.73	0.73	0.73
Rtst.D	0.62	0.58	0.57	0.49	0.49	0.49	0.46	0.44	0.39	0.49	0.49	0.49
Rtz.A	0.68	0.69	0.69	0.58	0.58	0.58	0.54	0.51	0.47	0.58	0.58	0.58
Rtz.V	0.71	0.72	0.72	0.60	0.60	0.60	0.56	0.55	0.50	0.60	0.60	0.60
Wiltz.D	0.71	0.72	0.71	0.59	0.59	0.59	0.55	0.55	0.50	0.59	0.59	0.59
Rtb.A	0.73	0.73	0.73	0.61	0.61	0.61	0.57	0.56	0.53	0.61	0.61	0.61
Rtb.V	0.79	0.80	0.80	0.68	0.68	0.68	0.64	0.63	0.61	0.68	0.68	0.68
Wiltn.D	0.83	0.84	0.84	0.76	0.76	0.76	0.72	0.71	0.69	0.76	0.76	0.76
Rtd.A	0.80	0.73	0.72	0.56	0.56	0.56	0.53	0.53	0.51	0.56	0.56	0.56
Rtd.V	0.89	0.87	0.86	0.63	0.63	0.63	0.60	0.61	0.59	0.63	0.63	0.63
Dhsa.D	0.95	0.99	0.98	0.77	0.77	0.77	0.74	0.74	0.73	0.77	0.77	0.77
Dhs.D	0.99	1.04	1.04	0.88	0.88	0.88	0.85	0.85	0.83	0.88	0.88	0.88
Rmoa.D	1.00	1.05	1.05	0.92	0.92	0.92	0.89	0.89	0.88	0.92	0.92	0.92
Sdm.A	1.08	1.12	1.12	1.39	1.35	1.39	1.37	1.01	0.96	1.39	1.35	1.39
Sdm.V	1.11	1.15	1.15	1.44	1.40	1.44	1.41	1.03	0.98	1.44	1.40	1.44
Dtzo.D	1.03	0.80	0.79	0.62	0.62	0.62	0.61	0.60	0.60	0.62	0.62	0.62
Dtz.A	1.03	1.09	1.08	0.93	0.93	0.93	0.91	0.91	0.90	0.93	0.93	0.93
Dtz.V	1.02	1.08	1.08	0.92	0.92	0.92	0.90	0.90	0.89	0.92	0.92	0.92
Dt.A	1.03	1.09	1.09	0.90	0.90	0.90	0.88	0.88	0.88	0.90	0.90	0.90
Dt.V	1.05	1.10	1.10	0.95	0.95	0.95	0.93	0.93	0.92	0.95	0.95	0.95
Ngsfa.D	1.01	0.91	0.90	0.63	0.63	0.63	0.63	0.60	0.60	0.63	0.63	0.63
Dta.D	1.04	0.92	0.91	0.65	0.65	0.65	0.65	0.63	0.63	0.65	0.65	0.65
Rsw.A	1.01	1.00	1.00	0.72	0.72	0.72	0.72	0.70	0.70	0.72	0.72	0.72
Rsw.V	1.01	0.98	0.97	0.67	0.67	0.67	0.67	0.65	0.65	0.67	0.67	0.67
Gvmw.A	1.00	0.94	0.93	0.64	0.64	0.64	0.64	0.62	0.62	0.64	0.64	0.64
Gvmw.V	1.01	0.96	0.96	0.65	0.65	0.65	0.65	0.63	0.63	0.65	0.65	0.65
Gv.A	1.00	0.91	0.90	0.59	0.59	0.59	0.59	0.58	0.58	0.59	0.59	0.59
Gv.V	0.87	0.60	0.58	0.33	0.33	0.33	0.33	0.32	0.33	0.33	0.33	0.33
Gvc.A	0.96	0.82	0.80	0.51	0.51	0.51	0.51	0.49	0.49	0.51	0.51	0.51
Toplu Hesap	**0.83**	**0.81**	**0.80**	**0.69**	**0.69**	**0.69**	**0.65**	**0.62**	**0.60**	**0.69**	**0.69**	**0.69**



Şekil 7.10 Model 1 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için MAE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için)

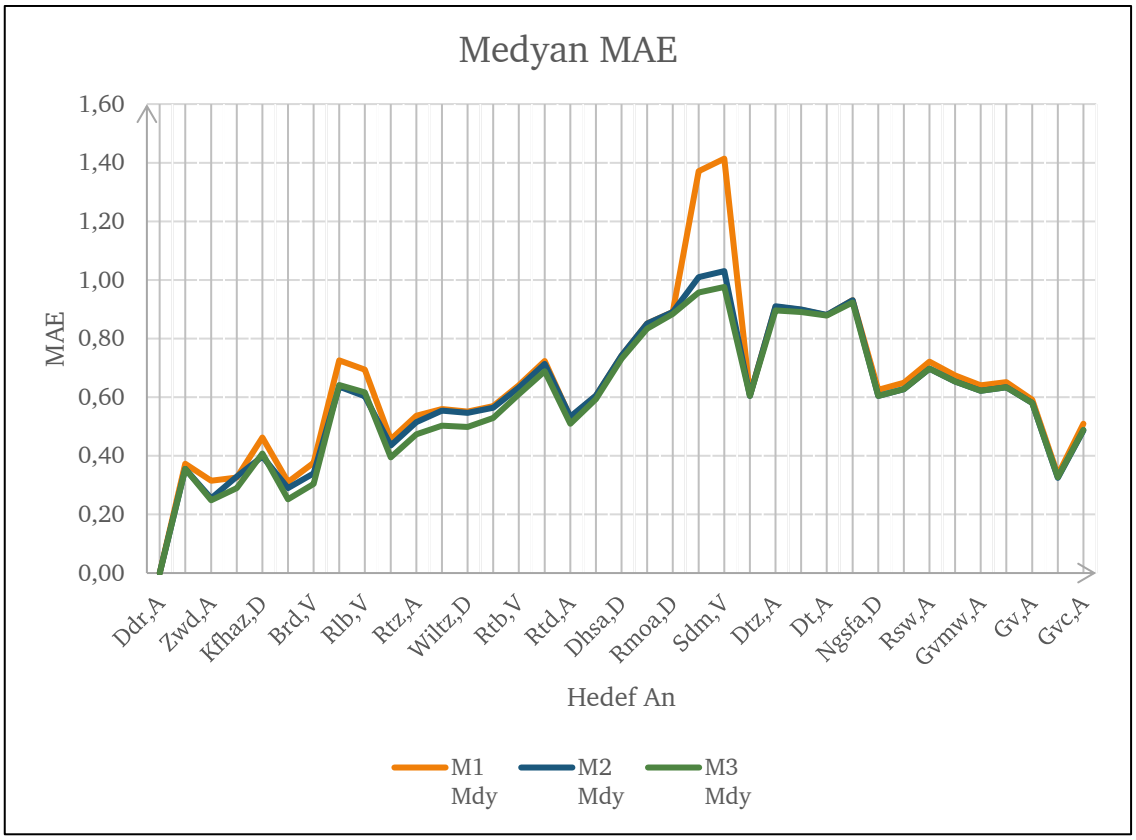


Şekil 7.11 Model 2 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için MAE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için)



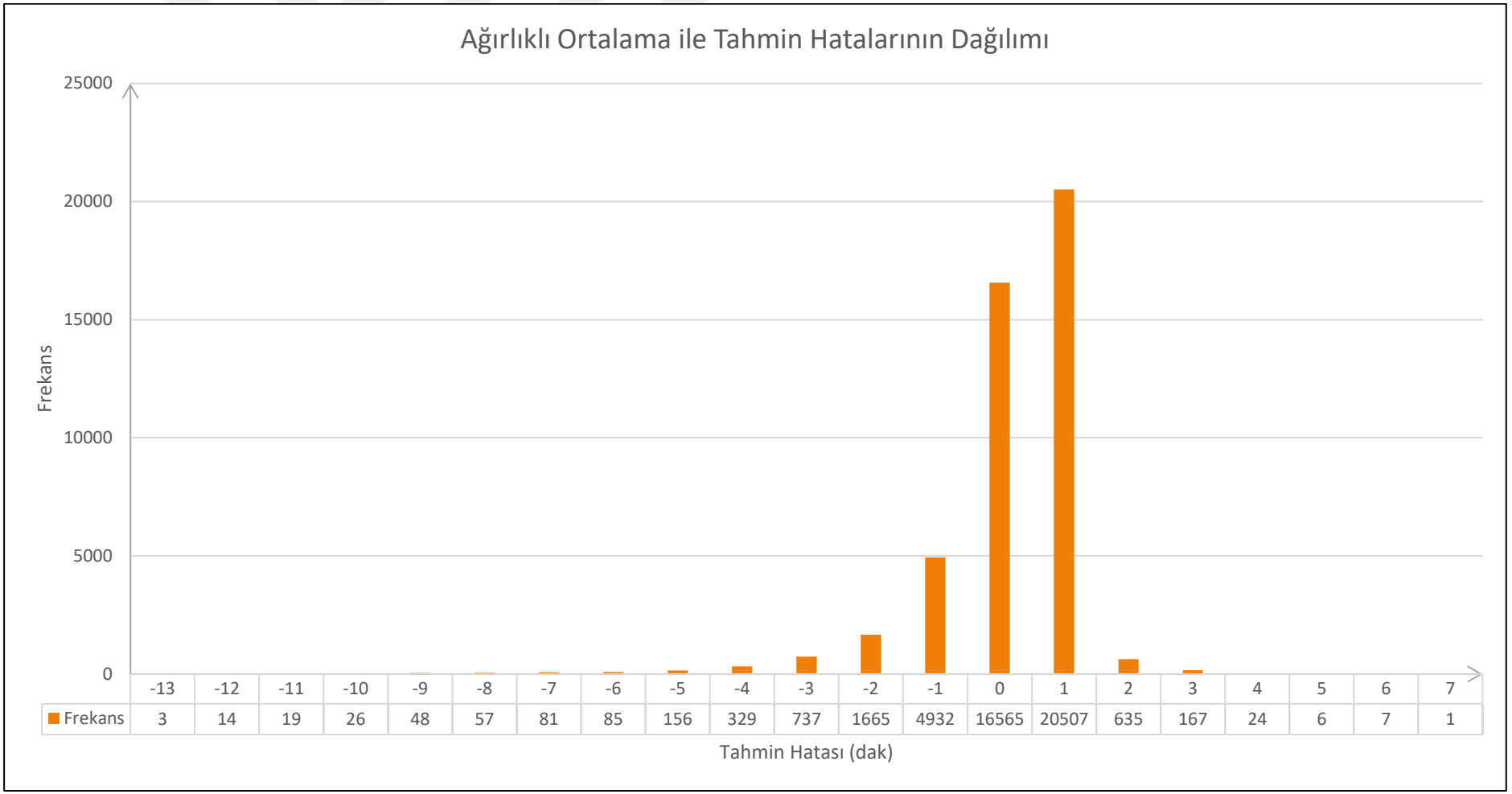
Şekil 7.12 Model 3 tahminine göre Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için MAE değerleri (seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için)

Her model için ağırlıklı ortalama, mod, medyan ve trimean ile yapılan tahminlerin MAE değerleri karşılaştırıldığında, medyan ile yapılan tahminlerin en iyi sonuçları verdiği görülmektedir (Şekil 7.10, Şekil 7.11 ve Şekil 7.12). Medyan ile yapılan tahminlerin MAE değeri karşılaştırıldığında, en iyi modelin Model 3 olduğu görülmektedir (Şekil 7.13).



Şekil 7.13 Medyan yöntemine göre modellerin Ddr,V gecikmesi baz alınarak yapılan akım aşağıdaki gecikme tahminleri için MAE
(seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için)

Sonuç olarak hem RMSE hem de MAE sonuçlarına göre Model 3, gecikme tahminleri için en iyi sonuçları veren modeldir. Bölüm 6'da elde edilen tekil trenlerin gecikme durumlarına ilişkin olasılık dağılımları gecikme tahminlerine dönüştürülürken, RMSE sonuçlarına göre dağılımın ağırlıklı ortalaması, en iyi sonuçları veren merkezi ölçüyken, MAE sonuçlarına göre en iyi sonuçları veren dağılımın medyan değeridir. Bu farkın sebebi tahmin hatalarının dağılımının çarpıklığıdır. Örneğin, ağırlıklı ortalama ile yapılan tahminler için (tam sayıya yuvarlanmış) tahmin hatalarının dağılımı Şekil 7.14'te gösterilmiştir.



	-13	-12	-11	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7
Frekans	3	14	19	26	48	57	81	85	156	329	737	1665	4932	16565	20507	635	167	24	6	7	1

Şekil 7.14 Ağırlıklı ortalama ile yapılan tahminler için tahmin hatalarının dağılımı

Şekil 7.14'teki tahmin hataları ve frekansları, Arena simülasyon programının Input Analyzer modülüne beslenmiş ve istatistikte tanımlanmış olan bazı dağılımlara uyumu incelenmiştir. Uyum testi sonuçlarına göre denenen dağılımlardan hiçbirinde ki-kare testine göre uygun sonuç çıkmamıştır. Ancak bu dağılımlara uygunluk bakımından bir sıralama elde edilmiştir (Tablo 7.5).

Tablo 7.5 Tahmin hatalarının uygunluğu bakımından dağılımların sıralaması

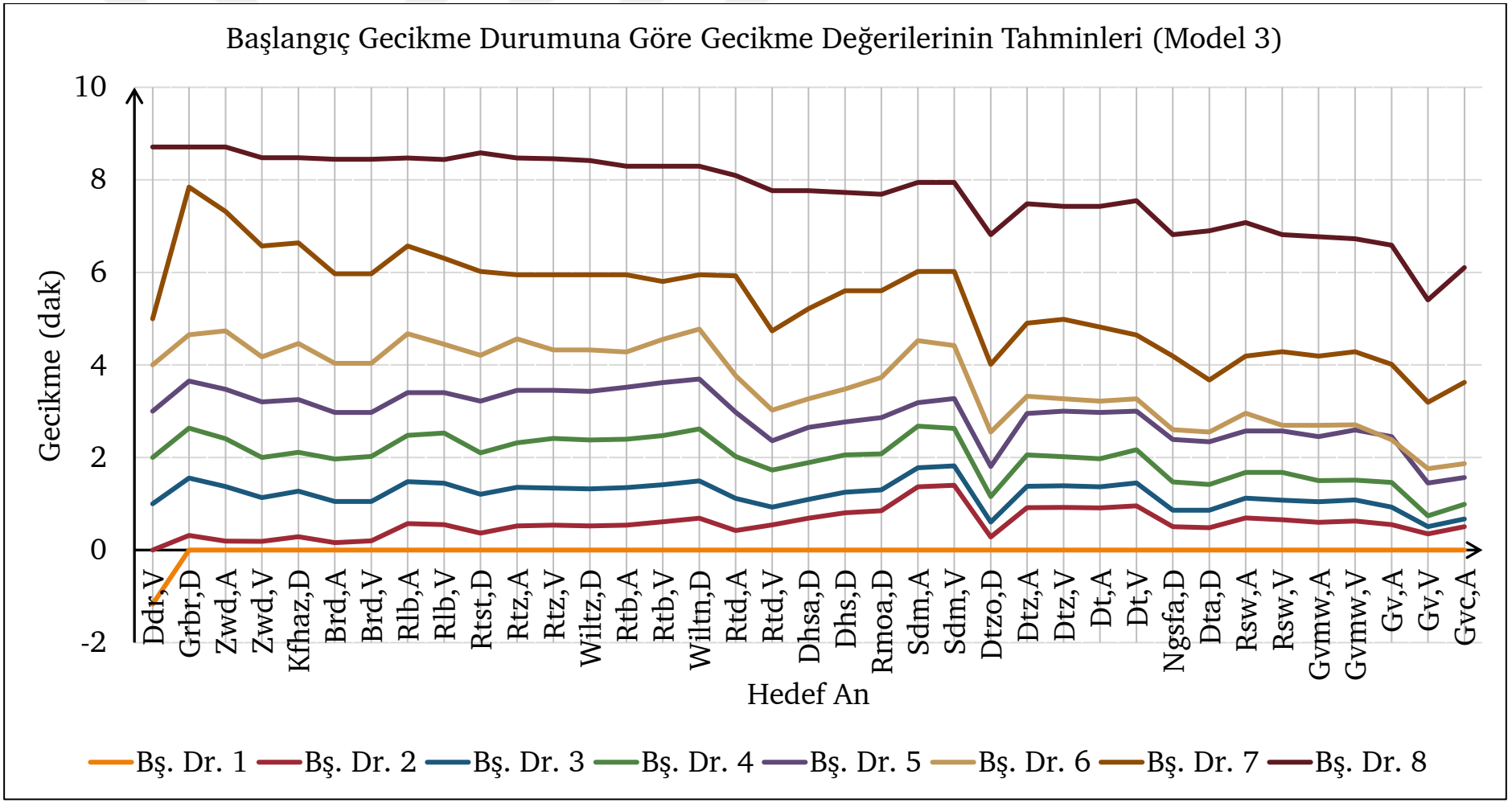
Dağılım Türü	Karesel Hata
Beta D.	0,065
Normal D.	0,070
Erlang D.	0,178
Gamma D.	0,178
Üçgen D.	0,228
Uniform D.	0,293
Weibull D.	0,293
Üssel D.	0,321
Poisson D.	0,950

Modellerin karşılaştırılması için literatürde sıkça kullanılan bu RMSE ve MAE ölçütlerinin karşılaştırılmasına yönelik literatürde bir çok çalışma mevcuttur (Chai ve Draxler, 2014; Willmott ve Matsuura, 2005). Bu çalışmalarda elde edilen bazı sonuçlar, ortalama kare hatalarının karekökünü almanın RMSE için bazı ilginç etkiler oluşturduğuna dikkat çekmektedir. Hataların ortalaması alınmadan önce kareleri alındığından, RMSE büyük hatalara nispeten yüksek bir ağırlık verir. Bu bağlamda, MAE, çok sayıda ölçümün ortalama hata değerlerini gösterirken bazı büyük hataları yeterince yansıtamayabilir. Büyük hatalara daha yüksek ağırlık veren RMSE, model performans farklılıklarını ortaya koymada genellikle daha iyidir. Bu, özellikle büyük hataların istenmediği durumlarda RMSE'nin daha yararlı olduğu anlamına gelmektedir. MAE ise eşit olarak (uniform) dağılan hataları tanımlamak için daha uygundur.

Model hatalarının uniform dağılım yerine normal dağılıma sahip olması daha muhtemel olduğundan (Tablo 7.5), RMSE, böyle bir veri türü için MAE'den daha

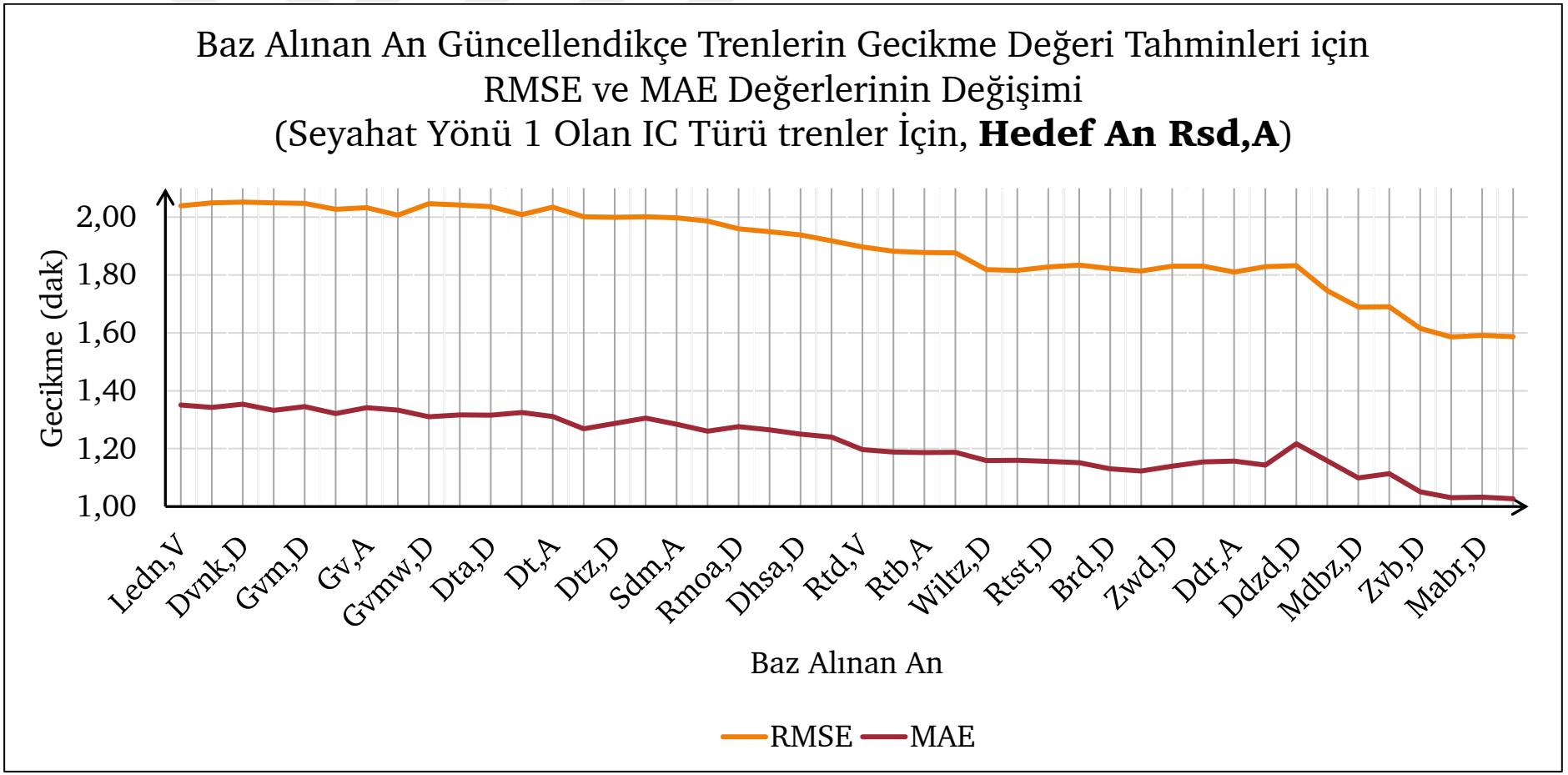
iyi bir ölçüttür. Dolayısıyla, Model 3 ile elde edilen gecikme durumlarına ilişkin olasılık dağılımları ile ağırlıklı ortalama kullanılarak tekil trenler için gecikme tahmini yapılması daha uygun olmaktadır. Her Ddr,V (başlangıç) gecikme durumuna göre Model 3 ve ağırlıklı ortalama kullanılarak yapılan, seyahat yönü 2 olan SPR türü trenlerin akım aşağıdaki gecikme tahminleri Şekil 7.15'te verilmiştir.

Tekil trenler için yapılan tahminlerde gecikme durumu baz alınan an (Ddr,V) sabit olmakla beraber akım aşağıdaki gecikmelerin tahmin edilmesi hedeflenmişti. Ancak trenlerin seyahati sırasında yeni bilgiler (gecikme) elde edilebilir. Bu yeni bilgiler baz alınarak gecikme tahminleri gerçek zamanlı olarak yenilenebilir. Bu şekilde, ilgili tahminlerin doğruluğu artırılabilir. Örneğin, seyahat yönü 1 olan IC türü trenlerin Leiden Centraal istasyonundan kalkışından (Ledn,V) itibaren seyirleri boyunca Roosendal istasyonuna varış (Rsd,A) gecikmesi, baz alınan gecikme güncellenerek tahmin edilmiştir. Model 3 kullanılarak yapılan bu tahminlerde olasılık dağılımlarının gecikmeye dönüştürülmesi için ağırlıklı ortalama kullanılmıştır. Test verisindeki her bir tren için yapılan Rsd,A gecikme tahminleri gerçekleşen gecikmelerle karşılaştırılmıştır. Baz alınan an güncellendikçe tahminlerin yenilenmesi durumunda tahmin hatalarının azaldığı görülmüştür (Şekil 7.16). Böylece tahmin doğruluğunu arttırmak için yeni gecikme bilgileri kullanılarak dinamik gecikme tahmini yapılabilir.



Şekil 7.15 Başlangıç gecikme durumuna göre Model 3'ün gecikme tahminleri

(seyahat yönü 2 olan SPR türü trenler için, ağırlıklı ortalama)



Şekil 7.16 Baz alınan an güncellendikçe gecikme tahminleri için RMSE ve MAE değerlerinin değişimi (seyahat yönü 1 olan IC türü trenler için, hedef an Rsd,A, Model 3, ağırlıklı ortalama)

8
SONUÇ VE ÖNERİLER

Demiryolu işletiminde ortaya çıkan ana zorluklardan biri, trenlerin gecikmesi durumunda, bu gecikmelerin doğru tahmin edilmesidir. Ortaya çıkabilecek gecikmelerin yeri ve büyüklüğünün doğru tahmin edilmesi, tolerans sürelerinin etkili tahsisine, bu sürelerin tam olarak kullanılmasına ve demiryolu altyapısının daha iyi kullanılması ile kapasitenin boşa harcanmamasına yardımcı olabilir. Ayrıca bir demiryolu hattındaki trenlerin akım aşağı istasyonlardaki gecikmesinin doğru bir şekilde tahmin edilmesi, hizmet güvenirliğini arttırmaya ve yolcu memnuniyetini arttırmak için beklenen gecikmeyi yolculara bildirmeye yardımcı olabilir (Wen vd., 2017). Bu sebeplerle demiryolu işletimlerinde tren gecikmelerinin, bu gecikmelerin değişiminin ve telafi edilmesi için gereken sürenin doğru tahmin edilmesi önemlidir.

Bu tezde, trenlerin gecikme tahmini/analizi için pratik ve güvenilir bir modelleme aracı geliştirmek amaçlanmıştır. Bu bağlamda Hollanda demiryolu ağının 112,2 km uzunluğundaki bir parçası ele alınmıştır. Model geliştirmek için kullanılan 66 hafta içi güne ait gerçek zamanlı tren verilerinden, rastgele 47 güne ait olanlar (yaklaşık %70, 738894 adet) çalışma verisi, diğer 19 güne ait veriler (yaklaşık %30, 305438 adet) test verisi olarak seçilmiştir. Tren hareketlerindeki belirsizler nedeniyle, tren gecikmeleri rastgele değişken olarak ele alınarak stokastik modelleme yaklaşımı benimsenmiş ve kesikli Markov zincirleri ile modellenmiştir.

Bir rastgele değişkenin Markov zincirleri ile modellenebilmesi için Markovyen özelliğe sahip olması gerekmektedir. Bunun için Bölüm 4.1'de, aynı tren seyahatindeki iki ardışık gecikme durumları eşleştirilerek 710305 adet gecikme çifti oluşturmuştur. Bu gecikme çiftleri kullanılarak ağ parçasının geneli için Markov geçiş olasılıkları matrisi oluşturulmuştur. Daha sonra Bölüm 4.2'de, oluşturulan Markov geçiş olasılıkları matrisine Markovyen özellik testi

uygulanmıştır. Testin sonucu, tren gecikmesinin Markov zincirleri ile modellenebilecek bir rastgele değişken olduğunu göstermiştir.

Tren türüne (kentiçi veya şehirlerarası), geçiş süreci türüne (seyir veya bekleme) ve seyahat yönüne göre verilerin gruplara ayrılması ile farklı Markov geçiş olasılıkları matrisleri oluşturulabilir. Verilerin bu şekilde bölümlenmesi, kalibrasyon için gerekli olan (istatistiksel olarak anlamlı) veri sayısının sağlanamama riskini ortaya çıkarmaktadır. Diğer yandan, verileri gruplara ayırmamak (homojenlik kabulleri), tahmin hatalarını arttırabilmektedir. Bu nedenle, homojenlik kabullerinin istatistiksel olarak test edilmesi gerekmektedir. Bu bağlamda, Bölüm 4.3'te homojenlik testleri yapılmıştır. Test sonuçları gecikmelerin tren türüne, geçiş süreci türüne ve seyahat yönüne göre heterojen olduğunu, daha doğru tahminler için verilerin bu şekilde gruplandırılması gerektiğini göstermiştir.

Gecikmelerin değişim davranışı, farklı zaman dilimleri için değişkenlik gösterebilir. Bu durumda verilerin zamana göre gruplandırılması gerekebilir. Bunun için Bölüm 4.4'te, konum sabit tutulmak üzere, öncelikle haftanın günleri için sonra da günün saatleri (2 saatlik dilimler) için zamanda durağanlık testleri yapılmıştır. Test sonuçlarına göre, geçiş olasılıkları hem haftanın günleri hem de günün saatleri için durağandır. Yani, verilerin zamana göre gruplandırılmamasının, tahmin hatalarında anlamlı derecede bir artışa sebep olmayacağı öngörülmüştür. Zamanda durağanlık testi, rastgele seçilmiş bir tren türünde (SPR), rastgele seçilmiş bir seyahat yönünde (seyahat yönü 1), rastgele seçilmiş bir geçiş süreci türünde (seyir süreci) ve rastgele seçilmiş olan bir konumda (Dhs-Rmoa kontrol noktaları arasındaki kesim) uygulanmıştır. Zamanda durağanlık kabulünün yapılması veya yapılmaması kararının daha doğru verilmesi için bu testlerin tüm tren türü/seyahat yönü/geçiş süreci türü/konum kombinasyonları için uygulanması gerekmektedir.

Gecikmelerin değişim davranışı, ağın farklı konumlarında değişkenlik gösterebilir. Bu durumda verilerin istasyona/kesime göre gruplandırılması gerekebilir. Bunun için Bölüm 4.5'te seyahat yönü 1 olan IC trenlerin 7 farklı istasyondaki bekleme

süreçleri için konumda durağanlık testi yapılmıştır. Test sonucuna göre, geçiş olasılıkları, farklı konumlar için durağan değildir, yani modelin tahmin performansını arttırmak için verilerin istasyon ve kesim bazında gruplandırılması gerekmektedir. Konumda durağanlık testi, rastgele seçilmiş bir tren türünde rastgele seçilmiş bir seyahat yönünde rastgele seçilmiş bir geçiş süreci türünde uygulanmıştır. Konumda durağanlık kabulünün yapılması veya yapılmaması kararının daha doğru verilmesi için bu testlerin tüm tren türü/seyahat yönü/geçiş süreci türü/konum kombinasyonları için uygulanması gerekmektedir. Bölüm 4.4 sonucuna dayanarak zamanda durağanlık kabulü yapıldığı için konumda durağanlık testi yapılırken zaman sabit tutulmamıştır.

Geçiş olasılıkları matrisleri her tren türü, her seyahat yönü ve her istasyon/kesim için ayrı ayrı oluşturulacak olsa da başlangıç istasyonlarının farklı olması sebebiyle trenler, aynı konuma ulaşana kadar farklı sayılarda seyir/bekleme süreci gerçekleştirebilmektedir. Örneğin, Bölüm 4.6'da aynı konuma kadar 17 ve 49 adet geçiş gerçekleştirmiş aynı yönlü aynı tür iki farklı tren grubunun verilerinden oluşturulmuş geçiş olasılıkları matrisleri için homojenlik testi uygulanmıştır. Sonuçta, geçiş olasılıkları matrislerinin, başlangıç istasyonundan bağımsız olarak homojen olduğu görülmüştür. Yani, gecikme tahmini yapılırken geçiş olasılıkları matrislerinin başlangıç istasyonu bazında oluşturulmaması, tahmin hatalarında anlamlı derecede bir artışa sebep olmayacaktır. Başlangıç istasyonuna göre homojenlik kabulünün yapılması veya yapılmaması kararının daha doğru verilmesi için bu testlerin sayısının arttırılması gerekmektedir.

Bölüm 5'te Markov geçiş olasılıkları matrisi, gecikmelerin değişim davranışının analizi için 4 grupta değerlendirilmiştir:

1. Negatif gecikme (erken varış/kalkış/geçiş) durumunda gecikmenin değişim davranışı
2. Sıfır gecikme (gecikmesiz olma) durumunda gecikmenin değişim davranışı
3. Görece küçük (1 ila 5 dakika arası) gecikmeli olma durumunda gecikmenin değişim davranışı

4. Görece büyük (6 dakika ve üzeri) gecikmeli olma durumunda gecikmenin değişim davranışı.

Birinci grupta sürücülerin orer zamanlarını bekleyip beklemedikleri, ikinci grupta gecikmelerin oluşumunu engellemesi bakımından mevcut tolerans sürelerin yeterliliği, üçüncü grupta görece küçük gecikmelerin telafisi bakımından mevcut tolerans sürelerin yeterliliği ve dördüncü grupta görece büyük gecikmelerin telafisi bakımından mevcut tolerans sürelerin yeterliliği değerlendirilmiştir.

Bölüm 5.1'de ağ parçasının geneli için yapılan değerlendirmede, tek adımda, negatif gecikmeli trenlerin bir geçiş sonra %55,56'sı yine negatif gecikmeye sahipken %43,24'ünün çizelgeye uyum sağladığı görülmektedir. Gecikmesiz olan trenlerin %86,63'ü yine gecikmesiz olarak kalmakta ve sadece %13,37'si çizelgeden sapmaktadır. Kullanılan tolerans sürelerinin, gecikme oluşumunu engelleme işlevinin yüksek olduğu, bir adımda bile küçük gecikmeleri kısmen telafi edebilmek için yeterli olduğu, ancak büyük gecikmeleri telafi edebilmek için yetersiz olduğu görülmüştür. Tren gecikmeleri büyüdükçe, seyahatin devamında bu gecikmelerin, akım aşağıdaki istasyon(lar)a büyüyerek aktarılma ihtimali de genel olarak artmaktadır. Benzer değerlendirmeler, 10 adım için de yapılmıştır. Ağ parçası genelinde beş dakikaya kadar olan gecikmelerin yarısının 3 dakika toleransla dakik olması için 10 adımın (geçiş sürecinin) yeterli olduğu belirlenmiştir.

Tren hizmetlerinin dakiklik düzeyini belirlemek için gecikme analizi yapılmıştır. Ağ parçası genelinde (eğitme verileri için), tren hareketlerinin %61,20'si gecikmesiz, %35,83'ü gecikmeli ve %2,97'si erken gerçekleşmiştir. 3 dakika toleransla ağ parçası genelinde dakiklik %93,77 olarak belirlenmiştir. Bölüm 5.2'de ağ parçasının geneli için oluşturulan tek adım geçiş olasılıkları matrisi kullanılarak kararlı durum olasılıkları belirlenmiştir. Kararlı durum olasılıklarına göre uzun vadede tren hareketlerinin %3,40'ının erken, %58,60'ının orer ile uyumlu, %38'inin gecikmeli gerçekleşeceği öngörülmektedir. 3 dakika toleransla ağ parçası genelinde dakikliğin %92,01 olacağı öngörülmüştür. Markov modeliyle tahmin edilen kararlı durum olasılıklarının (gerçek) eğitme (çalışma) verilerinden

ve test verilerinden elde edilen oranlar ile uyumlu olması, kullanılan modelin tutarlılığına işaret etmektedir.

Ağ parçasının geneli için ortalama ilk geçiş adım sayıları hesaplanmıştır. Gecikmenin telafi edilmesinin, gecikme oluşumuna kıyasla daha olası olduğu belirlenmiştir. Örneğin gecikmesiz bir trenin gecikmesinin 3 dakikaya ulaşması için ortalama 99,09 geçiş gerekli iken, 3 dakika gecikmeli bir trenin gecikmesinin tamamını telafi edebilmesi için ortalama 16,26 geçiş gereklidir. Gecikme büyüdükçe gecikmenin tamamının telafi edilebilmesi için gerekli olan ortalama geçiş sayısı da artmaktadır.

Bölüm 5.3'te kesimlerde seyir süreçleri ve istasyonlarda bekleme süreçleri için ayrı ayrı Markov geçiş olasılıkları matrisleri oluşturularak, tolerans süreleri (kesimlerde seyir süresi takviyesi ve istasyonlarda tampon süre) ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Ağ parçası genelinde kullanılan seyir süresi takviyeleri ve tampon süreler, gecikme oluşumunun engellenmesi bakımından işlevsel olmakla birlikte tampon sürelerin yeterliliği daha fazladır. Hem istasyonda bekleme hem de kesim seyir süreçlerinde de ortaya çıkan gecikmeler azalma eğilimindedir. Bu, ağ genelinde kullanılan hem tampon sürelerin hem de seyir süresi takviyelerinin bir adımda bile görece küçük gecikmeleri kısmen telafi edebilmek için yeterli olduğu anlamına gelmektedir. Her iki tolerans süresi de görece büyük gecikmelerin büyük bir kısmını telafi edememektedir. Son tren hareketi erken gerçekleşmiş trenlerde, sürücülerin büyük bir kısmının erken varışı/geçişi engellemek için yavaşlamadıklarını ancak erken varmış olsalar bile istasyondan kalkmak için planlanan zamanları bekledikleri gözlenmiştir. Kalkışlardaki negatif geçikme oranının (%0,24), varış/geçişlerdeki negatif gecikme oranından (%3,98) çok daha küçük olması bu çıkarımı desteklemektedir.

Bölüm 5.4'te her iki tolerans süresi, kentiçi (SPR) ve şehirlerarası (IC) trenler için ayrı ayrı ele alınmıştır. Gecikme oluşumunun engellenmesi ve gecikme telafisi bakımından SPR türü trenler için kullanılan tampon sürelerin yeterliliği daha fazladır. Gecikme oluşumunun engellenmesi bakımından kullanılan seyir süresi takviyesinin yeterliliği iki tren türü için yakın seviyededir. Küçük gecikmeler söz

konusu olduğunda SPR türü trenlerin gecikmeleri telafi etme başarısı daha fazladır. Her iki tren türü için de seyir süresi takviyesi, görece büyük gecikmelerin büyük bir kısmını telafi edememektedir.

Tolerans süreleri Markov zincirleri modeli ile istasyon veya kesim bazında incelenebilir. Bölüm 5.5 ve Bölüm 5.6'da istasyon veya kesim bazında bu değerlendirmelere örnekler verilmiştir. Böylece yetersiz kalan tolerans sürelerin miktarı arttırılarak dakiklik düzeyi iyileştirilebilir veya fazla olduğuna kanaat getirilen tolerans süreleri bir miktar azaltılarak kapasitenin daha verimli kullanılması sağlanabilir. Markov matrislerinin incelenmesi sonucunda kesimlerde/istasyonlarda beklenen gecikme değişimleri, Bölüm 5.7'te gösterilen ortalama gecikmelerin gösterildiği grafiklerle desteklenmiştir.

Bölüm 5'te yapılan bu analizlerle, çeşitli ölçeklerde oluşturulan matrisler ile ağ genelinde, tren türü bazında, seyahat yönü, geçiş süreci bazında veya istasyon/kesim bazında demiryolu işletiminin dakiklik düzeyi ve gecikmenin değişim davranışları incelenmiştir. Benzer analizler, farklı çizelgeleme stratejilerinin uygulandığı veri grupları bulunması halinde bu stratejileri ya da farklı altyapı seçeneklerini (örneğin paralel hat sayısının 2 ve 4 olduğu kesimler) karşılaştırılabilir. Markov geçiş olasılıkları matrisleri ile kullanılan seyir süresi takviyesi ve tampon süreler ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Böylece yetersiz kalan tolerans sürelerin miktarı arttırılarak dakiklik düzeyi iyileştirilebilir veya fazla olduğuna kanaat getirilen tolerans süreleri bir miktar azaltılarak kapasitenin daha verimli kullanılması sağlanabilir.

Bölüm 6'da trenlerin gelecekteki gecikmeleri için olasılık dağılımı tahminleri yapılmıştır. Homojenlik ve durağanlık kabullerinin tahmin hatalarını arttıracağı Bölüm 4'te yapılan testlerde öngörülmüştür. Ancak daha büyük tahmin hatalarına rağmen sağladıkları kolaylık sebebiyle bazı durumlarda tercih edilebilirler. Bu sebeple olasılık dağılımı tahminleri için gerekli olan (T) adım geçiş olasılıkları matrisi, 3 farklı biçimde hesaplanmıştır. Birinci modelde (M1), geçiş sürecinin türü, seyahat yönü, tren türü için homojenlik kabulü ve konumda durağanlık kabulü yapılmıştır. İkinci modelde (M2), geçiş olasılıkları için geçiş sürecinin türü,

seyahat yönü, tren türü için homojenlik kabulü ve konumda durağanlık kabulü yapılmamıştır. Üçüncü modelde (M3), seyahat yönü ve tren türü için homojenlik kabulü yapılmamıştır. *T* adım geçiş olasılıkları matrisi, ikinci modelde tek adım geçiş olasılıkları matrislerinin çarpımından elde edilmiştir. Üçüncü modelde ise baz alınan an ve hedeflenen an arası tek adım olarak kabul edilerek *T* adım geçiş olasılıkları matrisi, tek adım geçiş olasılıkları matrisi gibi oluşturulmuştur.

Başlangıç/mevcut gecikmesi baz alınarak her bir trenin her bir hedef andaki/konumdaki (akım aşağıdaki her bir tren hareketi sırasındaki) gecikme durumu için üç model ile elde edilen olasılık dağılımları, test verilerinden elde edilen gerçek oranlarla karşılaştırılmıştır. Benzer şekilde başlangıç/mevcut gecikme dağılımı bilinen bir tren grubunun her bir hedef andaki gecikme dağılımı için üç model ile elde edilen olasılık dağılımları, test verilerinden elde edilen gerçek oranlarla karşılaştırılmıştır. RMSE ve MAE ölçütleri kullanılarak modellerin tahmin başarısı karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, başlangıç gecikmesi bilinen bir trenin akım aşağıdaki tren hareketlerinde hangi gecikmenin hangi olasılıkla gerçekleşeceğini tahmin etmek bakımından Model 3'ün en iyi sonuçları verdiğini göstermektedir. Model 2, Model 1'e göre oldukça başarılı ve Model 3'e göre kısmen daha başarısızdır. Başlangıç gecikme vektörü bilinen bir tren grubunun akım aşağıda gecikme dağılımını tahmin etmek bakımından Model 2 ve Model 3'ün daha iyi sonuçlar verdiğini göstermektedir. Model 1, Model 2 ve Model 3'e göre oldukça başarısızdır. Model 2 ve Model 3'ün tahmin hataları baz alınan andan uzaklaştıkça büyük bir dalgalanma göstermemekle beraber Model 1'in tahmin hataları oldukça değişken olmaktadır. Bunun sebebi Model 1'de yapılan konumda durağanlık kabulüdür.

Bölüm 4'te yapılan homojenlik ve durağanlık testleri ile öngörüldüğü üzere, Bölüm 6'da Model 1'in tahmin hatalarının, Model 2 ve Model 3'e göre oldukça büyük olduğu görülmüştür. Buna rağmen Model 1 sadece bir adet geçiş olasılıkları matrisi ile ağın geneli için oldukça kullanışlı (örneğin ağ genelinde dakiklik analizi veya ağ genelinde tolerans sürelerinin yeterliliğinin değerlendirilmesi gibi) birçok değerlendirmeye pratik bir şekilde olanak sağlayabilmektedir. Ancak daha detaylı (istasyon/kesim bazında) analizlerde kötü sonuçlar vermektedir. Model 2'de, her

tren türünün her seyahat yönünde her bir geçiş süreci için birer geçiş olasılıkları matrisine ihtiyaç vardır. Çok sayıda geçiş olasılıkları matrisi oluşturulması gerekse de tahmin hataları Model 1'in tahmin hatalarına göre oldukça küçüktür. Her bir geçiş süreci için oluşturulan geçiş olasılıkları matrisleri, istasyon/kesim bazında pratik değerlendirmeler yapmaya fırsat tanımaktadır. Model 3, Model 2'ye eşit veya bir miktar daha iyi tahminler yapabilse de her baz alınan başlangıç anı – hedef an çifti için birer geçiş olasılıkları matrisi oluşturulması gerekmektedir. Bu durum Model 3'ün uygulanmasını zor kılmaktadır. Bir hat için istasyon sayısı arttıkça oluşturulması gereken geçiş olasılıkları matrisi sayısı, M2'de doğrusal, M3'te üstel olarak artmaktadır. M3'ün diğer bir dezavantajı, tahmin yapılan baz alınan an – hedef an arasındaki bölümün tamamını kapsayan tren seyahatlerine ilişkin verilerin bulunma zorunluluğudur. M2'de diğer trenlerin verileri ile her bir geçiş sürecine ait geçiş olasılıkları matrisleri oluşturulabiliyor ise planlanmakta olan bir rota için tahminler yapılabilir.

Eğer bir olayın gelecekteki durumuyla ilgili belirsizlikler varsa, bu olayın gelecekteki durumu, genellikle olasılık dağılımı ile temsil edilir. Bölüm 6'da elde edilen olasılık dağılımları, gelecekteki tren gecikmelerini bu şekilde temsil etmektedir. Bu dağılımları girdi olarak kullanan simülasyon programları ile demiryolu işletim verimliliği ve hizmet kalitesi analiz edilebilir.

Tahmin edilen olasılık dağılımları, Bölüm 7'de bir tahmin edilen (beklenen) gecikme değerine dönüştürülmüştür. Bunun için olasılık dağılımının 4 merkezi ölçüsü (ağırlıklı ortalama, mod, meydan ve trimean/üçlü ortalama) kullanılmıştır. Test verilerinde baz alınan andaki gecikmesi bilinen her bir tren için her bir hedef an gecikmesi 12 farklı yöntemle (3 model ve 4 merkezi ölçü) tahmin edilmiş ve gerçekleşen gecikme ile karşılaştırılmıştır. RMSE ölçütü ile yapılan karşılaştırmada tüm modeller için en iyi tahmin sonucunu veren merkezi ölçü, ağırlıklı ortalamadır. MAE ile bu karşılaştırma yapıldığında en iyi sonucu medyan vermiştir. RMSE büyük hatalara nispeten yüksek bir ağırlık verdiğinden, sayıları nispeten az da olsa büyük hataların istenmediği durumlarda RMSE, MAE'ye göre daha kullanışlıdır. Ayrıca RMSE ve MAE ölçütlerini karşılaştıran çalışmalarda (Chai ve Draxler, 2014; Willmott ve Matsuura, 2005), tahmin hatalarının uniform

dağılımdansa normal dağılıma daha yakın olduğu durumlarda RMSE kullanılması tavsiye edilmiştir. Örnek olarak M3 ve ağırlıklı ortalama ile yapılan gecikme tahminlerindeki hataların dağılımı normal dağılıma daha uygundur. Böyle bir veri için RMSE daha uygun olduğundan, gecikme tahmini için M3 ve ağırlıklı ortalamanın kullanılması daha uygun olmaktadır.

Trenlerin seyahati sırasında yeni bilgiler (gecikme) elde edilebilir. Bu yeni bilgiler baz alınarak gecikme tahminleri gerçek zamanlı olarak yenilenebilir. Bu şekilde, ilgili tahminlerin doğruluğu artırılabilir. Bölüm 7'de, dinamik tren gecikmesi tahminlerine bir örnek verilmiştir. Model 3 kullanılarak yapılan bu tahminlerde olasılık dağılımlarının gecikmeye dönüştürülmesi için ağırlıklı ortalama kullanılmıştır. Gecikme tahminleri, test verisindeki her bir tren için gerçekleşen gecikmelerle karşılaştırılmıştır. Böylece tahmin doğruluğunun tren seyahati boyunca arttırılabildiği görülmüştür.

Görüldüğü gibi Markov zincirleri tren gecikmelerinin değişimini modellemek için kullanılabilmektedir. Böylece tren işletiminin dakiklik düzeyi belirlenebilmekte, çizelge performansı değerlendirilebilmekte ve gecikme tahminleri yapılabilmektedir. Markov zincirleri ile diğer ulaştırma türleri için de gecikmenin Markovyen özelliğe sahip olduğunun saptanması durumunda bu analiz ve tahminler yapılabilir. Ancak modelleme yapılacak olan demiryolu veya diğer ulaştırma ağı için modelin kalibre edilmesi gerekmektedir. Bunun için istatistiksel olarak yeterli sayıda geçmiş veriye ihtiyaç vardır. Hizmet vermeye başlamamış olan veya geçmiş verileri elde edilemeyen bir ulaştırma ağı için analiz ve tahminlerin yapılamaması Markov zincirleri modelinin dezavantajıdır. Diğer yandan, geçmiş verilerin elde edilebildiği durumlarda oldukça pratik, hızlı sonuç veren, çok işlevli bir modeldir.

Bu tezin devamında ele almak istediğimiz bazı çalışma konuları mevcuttur. Örneğin, bu tezde yapılan analizler, ülkemizdeki demiryolu hatlarında tekrarlanarak karşılaştırmalar ve öneriler sunulabilecektir. Gecikme tahminlerinin devamı niteliğinde seyahat süresi tahminleri yapılabilir. Bir başka çalışma konusu olan yeniden çizelgeleme problemi için bu tezden elde ettiğimiz kesim/istasyon

bazındaki geçiş olasılıkları matrislerinden yararlanılarak tolerans süreleri yeniden tahsis edilebilir. Periyodik olarak planlanmış çizelgelerin kullanıldığı demiryolu ağlarında (örneğin, Hollanda demiryolu ağında) ortaya çıkan tren gecikmelerinin, aynı trenin sonraki seyahatlerine nasıl aktarıldığını modelleyerek terminal sürelerinin yeterliliğini değerlendirmek için Markov zincirleri kullanılabilir. Etkileşime giren trenler tespit edilerek bunların verilerinin ayrılması ile birincil ve ikincil gecikmeler ayrı ayrı incelenebilir. Bir aktarma istasyonunda trenlerin birbirini beklemesi durumları için gecikme aktarımı modellenebilir. Tek hatlı demiryolu işletiminde, çatışmalar için geçiş olasılıkları matrisleri oluşturularak bu tezdeki analiz ve tahminler tek hatlı demiryolu ağlarında tekrarlanabilir. Gecikme tahmini için sürekli Markov zincirleri ile trenlerin sadece varış/kalkış/geçiş gecikmeleri değil, trenlerin herhangi bir andaki gecikmeleri tahmin edilebilir.

KAYNAKÇA

Abril, M., Barber, F., Ingolotti, L., Salido, M. A., Tormos, P., ve Lova, A. (2008). An assessment of railway capacity. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *44*(5), 774-806. https://doi.org/10.1016/j.tre.2007.04.001

Berger, A., Gebhardt, A., Müller-Hannemann, M., ve Ostrowski, M. (2011). *Stochastic Delay Prediction in Large Train Networks*. 12 pages. https://doi.org/10.4230/OASICS.ATMOS.2011.100

Bhat, U. N., ve Miller, G. K. (2002). *Elements of Applied Stochastic Processes* (Üçüncü Baskı). Wiley-Interscience.

Büker, T., ve Seybold, B. (2012). Stochastic modelling of delay propagation in large networks. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, *2*(1-2), 34-50. https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2012.10.001

Cacchiani, V., Huisman, D., Kidd, M., Kroon, L., Toth, P., Veelenturf, L., ve Wagenaar, J. (2014). An overview of recovery models and algorithms for real-time railway rescheduling. *Transportation Research Part B: Methodological*, 63, 15-37. doi: 10.1016/j.trb.2014.01.009

Carey, M., ve Kwieciński, A. (1994). Stochastic approximation to the effects of headways on knock-on delays of trains. *Transportation Research Part B: Methodological*, *28*(4), 251-267. https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)90001-9

Carey, M., ve Kwieciński, A. (1995). Properties of expected costs and performance measures in stochastic models of scheduled transport. *European Journal of Operational Research*, *83*(1), 182-199. https://doi.org/10.1016/0377-2217(93)E0248-V

Chai, T., ve Draxler, R. R. (2014). Root mean square error (RMSE) or mean absolute error (MAE)? – Arguments against avoiding RMSE in the

literature. *Geoscientific Model Development*, *7*(3), 1247-1250. https://doi.org/10.5194/gmd-7-1247-2014

Corman, F., ve Kecman, P. (2018). Stochastic prediction of train delays in real-time using Bayesian networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *95*, 599-615. https://doi.org/10.1016/j.trc.2018.08.003

Corman, F., & Meng, L. (2014). A review of online dynamic models and algorithms for railway traffic management. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(3), 1274-1284. doi: 10.1109/TITS.2014.2358392

Çelik, İ. (2013). *Markov Zincirlerinin Temel Özellikleri ve Çeşitli Uygulamalar* [Yüksek Lisans Tezi]. Ordu Üniversitesi.

Dolder, U., Krista, M., ve Voelcker, M. (2009). RCS – Rail Control System – Realtime train run simulation and conflict detection on a net wide scale based on updated train positions. *Proceedings of the 3rd International Seminar on Railway Operations Modelling and Analysis*, 1-15.

Fukurami, K., ve Yamamoto, H. (2001). A new diagram forecasting system for the Tokaido-Sanyo Shinkansen. *Proceedings of the World Congress on Railway Research*, 1-6.

Gorman, M. F. (2009). Statistical estimation of railroad congestion delay. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *45*(3), 446-456. https://doi.org/10.1016/j.tre.2008.08.004

Goverde, R. M. P. (2010). A delay propagation algorithm for large-scale railway traffic networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *18*(3), 269-287. https://doi.org/10.1016/j.trc.2010.01.002

Goverde, R. M. P. (2013). Performance indicators for railway timetables. *Intelligent Rail Transportation (ICIRT)*, 301-306.

Hagstrom, J. N. (1988). Computational complexity of PERT problems. *Networks*, *18*(2), 139-147. https://doi.org/10.1002/net.3230180206

Hansen, I. A., Goverde, R. M. P., ve van der Meer, D. J. (2010). Online train delay recognition and running time prediction. *13th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems*, 1783-1788. https://doi.org/10.1109/ITSC.2010.5625081

Harris, N. G., Mjøsund, C. S., ve Haugland, H. (2013). Improving railway performance in Norway. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, *3*(4), 172-180. https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2014.02.002

Huang, P., Wen, C., Peng, Q., Lessan, J., Fu, L., ve Jiang, C. (2019). A data-driven time supplements allocation model for train operations on high-speed railways. *International Journal of Rail Transportation*, *7*(2), 140-157. https://doi.org/10.1080/23248378.2018.1520613

Jovanović, P., Kecman, P., Bojović, N., ve Mandić, D. (2017). Optimal allocation of buffer times to increase train schedule robustness. *European Journal of Operational Research*, *256*(1), 44-54. https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.05.013

Kecman, P. (2014). *Models for predictive railway traffic management.* [Doktora Tezi]. Delft University of Technology.

Kecman, P., Corman, F., D'Ariano, A., ve Goverde, R. M. P. (2013). Rescheduling models for railway traffic management in large-scale networks. *Public Transport*, *5*(1-2), 95-123. https://doi.org/10.1007/s12469-013-0063-y

Kecman, P., Corman, F., ve Meng, L. (2015). Train delay evolution as a stochastic process. *Proceedings of the 6th International Conference on Railway Operations Modelling and Analysis: RailTokyo2015*, 19.

Kecman, P., ve Goverde, R. M. P. (2013). Adaptive, data-driven, online prediction of train event times. *16th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2013)*, 803-808. https://doi.org/10.1109/ITSC.2013.6728330

Khadilkar, H. (2017). Data-Enabled Stochastic Modeling for Evaluating Schedule Robustness of Railway Networks. *Transportation Science*, *51*(4), 1161-1176. https://doi.org/10.1287/trsc.2016.0703

Lindfeldt, O. (2010). Evaluation of punctuality on a heavily utilised railway line with mixed traffic. *Timetable Planning and Information Quality*, 115.

Marković, N., Milinković, S., Tikhonov, K. S., ve Schonfeld, P. (2015). Analyzing passenger train arrival delays with support vector regression. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *56*, 251-262. https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.04.004

Medeossi, G., Longo, G., ve de Fabris, S. (2011). A method for using stochastic blocking times to improve timetable planning. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, *1*(1), 1-13. https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2011.07.001

Meester, L. E., ve Muns, S. (2007). Stochastic delay propagation in railway networks and phase-type distributions. *Transportation Research Part B: Methodological*, *41*(2), 218-230. https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.007

Murali, P., Dessouky, M., Ordóñez, F., ve Palmer, K. (2010). A delay estimation technique for single and double-track railroads. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *46*(4), 483-495. https://doi.org/10.1016/j.tre.2009.04.016

Müller-Hannemann, M., ve Schnee, M. (2009). Efficient Timetable Information in the Presence of Delays. Içinde *Robust and Online Large-Scale Optimization* (ss. 249-272). Springer.

Nash, A., ve Huerlimann, D. (2004). Railroad simulation using OpenTrack. *Computers in Railways IX*, 10.

nieuws.ns.nl. (2019). https://nieuws.ns.nl/download/611967/spoorkaart2019-231351.pdf

Olgay, İ., Suvar, U., Aksoy, B., Artan, M. Ş., ve Şahin, İ. (2019). Kentiçi Raylı Sistemlerde Tren İşletimi Analizi. *13. Ulaştırma Kongresi*, 27-36.

Oneto, L., Fumeo, E., Clerico, G., Canepa, R., Papa, F., Dambra, C., Mazzino, N., ve Anguita, D. (2017). Dynamic Delay Predictions for Large-Scale Railway Networks: Deep and Shallow Extreme Learning Machines Tuned via Thresholdout. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, *47*(10), 2754-2767. https://doi.org/10.1109/TSMC.2017.2693209

Oneto, L., Fumeo, E., Clerico, G., Canepa, R., Papa, F., Dambra, C., Mazzino, N., ve Anguita, D. (2018). Train Delay Prediction Systems: A Big Data Analytics Perspective. *Big Data Research*, *11*, 54-64. https://doi.org/10.1016/j.bdr.2017.05.002

RAS 2017. (2017). INFORMS. https://connect.informs.org/railway-applications/new-item3/problem-solving-competition681/new-item11

RAS 2018. (2018). INFORMS. https://connect.informs.org/railway-applications/new-item3/problem-solving-competition681/new-item12

Rudolph, R., ve Radtke, A. (2006). Optimisation of allowances in railway scheduling. *Congress Proceedings: 7th World Congress on Railway Research*. Congress Proceedings: 7th World Congress on Railway Research, Fairmont The Queen Elizabeth, Montreal, Canada.

Siefer, T., ve Radtke, A. (2006). Evaluation of delay propagation. *Proceedings of 7th World Congress on Railway Research*. Proceedings of 7th World Congress on Railway Research, Montreal.

Şahin, İ. (2017). Markov chain model for delay distribution in train schedules: Assessing the effectiveness of time allowances. *Journal of Rail Transport Planning & Management*, *7*(3), 101-113. https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2017.08.006

Şahin, İ. (2019). Markov Chain Model for Delay Prediction of Trains. *RailNorrköping 2019*, 20.

Tukey, J. W. (1997). *Exploratory data analysis*. Addison-Wesley.

Vromans, M. J. C. M. (2005). *Reliability of railway systems* [Doktora Tezi]. Erasmus University Rotterdam.

Wen, C., Lessan, J., Fu, L., Huang, P., ve Jiang, C. (2017). Data-driven models for predicting delay recovery in high-speed rail. *2017 4th International Conference on Transportation Information and Safety (ICTIS)*, 144-151. https://doi.org/10.1109/ICTIS.2017.8047758

Willmott, C., ve Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate Research*, *30*, 79-82. https://doi.org/10.3354/cr030079

Winston, W. L. (2003). *Operations research: Applications and algorithms* (4. ed., internat. student ed., [Nachdr.]). Brooks/Cole, Thomson Learning.

Yang, X., Hou, Y., ve Li, L. (2019). Buffer time allocation according to train delay expectation at stations. *International Journal of Rail Transportation*, 1-15. https://doi.org/10.1080/23248378.2019.1655805

Yuan, J., ve Hansen, I. A. (2002). Punctuality of Train Traffic in Dutch Railway Stations. *Traffic And Transportation Studies (2002)*, 522-529. https://doi.org/10.1061/40630(255)73

Yuan, Jianxin, ve Hansen, I. A. (2007). Optimizing capacity utilization of stations by estimating knock-on train delays. *Transportation Research Part B: Methodological*, *41*(2), 202-217. https://doi.org/10.1016/j.trb.2006.02.004

Zhang, Y.-F., Zhang, Q.-F., ve Yu, R.-H. (2010). Markov property of Markov chains and its test. *Ninth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, 1864-1867.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

İletişim Bilgisi: msartan@hotmail.com

Konferans Bildirileri

1. Artan, M. Ş., ve Şahin, İ. (2020). Demiryolu İşletimlerinde Kullanılan Tolerans Sürelerin Değerlendirilmesi. *OECD Countries Conference on Engineering, Technology and Robotics*, 13-14, Ankara.