T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK HATLI DEMİRYOLLARINDA ÇATIŞMA ÇÖZÜMLERİNİN GECİKME ODAKLI İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

İrem OLGAY ŞENKARDEŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Programı

Danışman

Prof. Dr. İsmail ŞAHİN

Temmuz, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TEK HATLI DEMİRYOLLARINDA ÇATIŞMA ÇÖZÜMLERİNİN GECİKME ODAKLI İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

İrem OLGAY ŞENKARDEŞ tarafından hazırlanan tez çalışması 06.07.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Ulaştırma Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. İsmail ŞAHİN
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

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

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

Doç. Dr. N. Özgür BEZGİN, Üye
İstanbul Üniversitesi - Cerrahpaşa _____

Danışmanım Prof. Dr. İsmail ŞAHİN sorumluluğunda tarafımca hazırlanan "Tek Hatlı Demiryollarında Çatışma Çözümlerinin Gecikme Odaklı İstatistiksel Analizi" 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.

İrem OLGAY ŞENKARDEŞ

İmza

Aileme

ve

eşime

TEŞEKKÜR

Başta bu tezin her aşamasında öneri ve görüşleriyle bana ışık tutan, önderlik eden, geçtiğim zorlu süreçlerde desteğini esirgemeyen kıymetli danışmanım Prof. Dr. İsmail ŞAHİN'e, çalışmamın her aşamasında sorularımı bıkmadan yanıtlayan Arş. Gör. Mehmet Şirin ARTAN'a, hem akademik yaklaşımı hem de dostluğuyla her daim yanımda olan sevgili hocam Arş. Gör. Berna AKSOY'a bu teşekkkürü borç bilirim.

Ayrıca, her zaman benim için en iyisini isteyen ve benimle gurur duyan ablam Güner OLGAY, annem Nuray OLGAY ve babam İsmail OLGAY'a teşekkür ederim. İyi ki varsınız ve yanımdasınız.

Son olarak her zaman beni destekleyen, çalışmalarım dahil olmak üzere her zaman bana yardımcı olan, bu tezi tamamlamdaki en büyük etken, güç kaynağım sevgili eşim İnş. Müh. Serdar ŞENKARDEŞ'e teşekkürlerimi sunarım

İrem OLGAY ŞENKARDEŞ

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR iv
SİMGE LİSTESİ vi
KISALTMA LİSTESİ vii
ŞEKİL LİSTESİ viii
TABLO LİSTESİ ix
ÖZET x
ABSTRACT xii
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 1
1.2 Tezin Amacı 3
1.3 Hipotez 3
2 ARİFİYE-ÇUKURHİSAR DEMİRYOLU HATTINDAKİ ÇATIŞMALARIN ANALİZİ 5
2.1 Arifiye-Çukurhisar Hattının Tanıtımı ve Verileri 5
2.2 Çatışma Çeşitleri 7
3 İSTATİSTİKSEL ANALİZLER 10
3.1 Verilerin İstatistiksel Analizi 10
3.2 Çatışmalardaki Gecikmelerin Stokastik Modeli: Markov Zincirleri 15
3.3 Çatışmalardaki Gecikmeleri Karşılaştırma Modeli: Doğrusal Regresyon. 28
3.4 Gecikme Durumlarına Göre Gruplandırılmış Doğrusal Regresyon 34
3.5 Model Hatalarının Karşılaştırılması 40
4 SONUÇ 42
KAYNAKÇA 45
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR 46

SİMGE LİSTESİ

T	Adım Sayısı
p	Başlangıç Durum Vektörü
P_0	Bekleyen Trenlerin Geçiş Matrisi
D	Gecikme Değeri
P	Gecikme Değişim Olasılığı
d	Gecikme Durumu
P_1	Geçen Trenlerin Geçiş Matrisi
p_{ij}	Geçiş Olasılığı
n_{ij}	i Durumundan j durumuna Geçişlerin Sayısı
n_i	i Durumundan Tüm Durumlara Geçişlerin Gözlem Sayısı
f_i	Tahmin Hatası
e_0	Temsili Değer Vektörü
p_j	Trenin Gecikme Dağılım Vektörü

KISALTMA LİSTESİ

DK	Dakika
G.Ç.	Gerçekleşen Çatışma
KM	Kilometre
MAE	Ortalama Mutlak Hata
OS	On Switch
P.Ç.	Planlanan Çatışma
RMSE	Karesel Hataların Ortalamasının Karekökü
TCDD	Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yolları
YHT	Yüksek Hızlı Tren

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Demiryolu kapasitesinin istikrarlı sunulması için gerekli bileşenler **2**

Şekil 2.1 Arifiye - Çukurhisar demiryolu hattı **5**

Şekil 2.2 Arifiye-Çukurhisar demiryolu hattı vaziyet planı **6**

Şekil 2.3 Trengraf örneği **6**

Şekil 2.4 Trengraf üzerinde öne geçme çatışması örneği **8**

Şekil 2.5 Trengraf üzerinde karşılaşma çatışması örneği **8**

Şekil 3.1 Çatışma kesiminden önceki istasyonlardaki gecikmeler histogramı.... **10**

Şekil 3.2 Çatışma kesiminden sonraki istasyonlardaki gecikmeler histogramı... **11**

Şekil 3.3 İstasyonlarda gerçekleşen ve planlanan çatışmalar histogramı **13**

Şekil 3.4 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondan gerçek ve beklenen kalkış gecikmeleri saçılma diyagramı **25**

Şekil 3.5 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondan gerçek ve beklenen varış gecikmeleri saçılma diyagramı **26**

Şekil 3.6 Markov çözümü mevcut çözüm saçılma diyagramı **28**

Şekil 3.7 Geçen trenlerin kalkış-kalkış gecikmeleri saçılma diyagramı **29**

Şekil 3.8 Bekleyen trenlerin varış-varış gecikmeleri saçılma diyagramı **29**

Şekil 3.9 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondaki gerçek ve beklenen gecikmeleri saçılma diyagramı **33**

Şekil 3.10 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondaki gerçek ve beklenen gecikmeleri saçılma diyagramı **33**

Şekil 3.11 Bekleyen trenlerin gecikme durumu ve varış gecikmeleri saçılma diyagramı **35**

Şekil 3.12 Geçen trenlerin gecikme durumu ve kalkış gecikmeleri saçılma diyagramı **35**

Şekil 3.13 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondaki gerçek ve beklenen varış gecikmeleri saçılma diyagramı **39**

Şekil 3.14 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondaki gerçek ve beklenen kalkış gecikmeleri saçılma diyagramı **39**

TABLO LİSTESİ

Tablo 3.1 İstasyonlarda planlanan ve gerçekleşen çatışma sayıları **12**

Tablo 3.2 İstasyonlardaki çatışma çözümleri (%) **13**

Tablo 3.3 Belirlenen gecikme durumları **16**

Tablo 3.4 Gecikme durumları arasındaki geçişlerin sıklıkları (geçen trenler için) **17**

Tablo 3.5 Gecikme durumları arasındaki geçişlerin sıklıkları (bekleyen trenler için) **18**

Tablo 3.6 Geçen ve bekleyen trenler için gecikme durum değişiklikleri (%) **20**

Tablo 3.7 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen kalkış gecikmeleri (30 adet örnek) **23**

Tablo 3.8 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen varış gecikmeleri (30 adet örnek) **24**

Tablo 3.9 Gecikmelerin Markov ve Alternatif Modelle Tahmin Edilmesi **27**

Tablo 3.10 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek) **30**

Tablo 3.11 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek) **31**

Tablo 3.12 Belirlenen gecikme durumları **34**

Tablo 3.13 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek) **36**

Tablo 3.14 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek) **37**

Tablo 3.15 Analiz yöntemlerine göre bekleyen trenler için MAE ve RMSE değerleri **40**

Tablo 3.16 Analiz yöntemlerine göre geçen trenler için MAE ve RMSE değerleri **40**

ÖZET

Tek Hatlı Demiryollarında Çatışma Çözümlerinin Gecikme Odaklı İstatistiksel Analizi

İrem OLGAY ŞENKARDEŞ

İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı

Ulaştırma Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İsmail ŞAHİN

Geçmişten günümüze ulaştırma sorunlarının çözümü için dünyanın birçok ülkesinde raylı sistemlerden yararlanılmaktadır. Ülkemizdeki demiryolu ağının önemli bir bölümü tek hatlı olup bu hatlarda planlı tren işletmeciliği yapılmaktadır. Tek hatlı demiryollarında aynı ve zıt yönde işletilen trenler aynı hattı paylaşırlar. Karşılaşma veya öne geçme durumlarında bu trenler birbirine sadece kısıtlı hat bölümlerinde yol verebilme imkanına sahiptirler. Bu işletim özelliği nedeniyle, hatların verimli kullanımı için tren hareketlerindeki gecikme ve çatışma durumlarının kontrol altında tutulması gerekmektedir. Bu gereklilikten yola çıkarak araştırmamızda, İstanbul-Ankara demiryolu hattının tek hatlı Arifiye-İnönü kesiminde gerçekleşen tren çatışmaları incelenmiştir. Araştırmada, bu hatta iki yönde hizmet veren yolcu ve yük trenlerinin 00:00-23:59 saatleri arasında gerçekleşen 60 günlük seyirlerinden elde edilen veriler kullanılmıştır. Gerçekleşen ve planlanan tren hareketlerine ait veriler dijital ortama aktarılmış, gerçekleşen çatışmaların planlanan çizelgeye (orere) ne kadar uydukları incelenmiştir. Excel programı yardımıyla istatistiksel analizler yapılmış, elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler yardımıyla görsel olarak sunulmuştur. Trenler önceliklerine göre

gruplandırılmıştır. Çatışma kesiminden önceki istasyona gecikmeyle varan bir trenin, çatışma kesiminden sonraki istasyondan kalkış gecikmesi ve olasılığı Markov zincirleri ve doğrusal regresyon modelleri kullanılarak tahmin edilmiştir. Çalışmada ele alınan yöntemler, tek hatlı demiryollarında çatışmaların planlanması, gecikmelerin analizi, trenlerin istasyonlara varış-kalkış zamanlarının tahmin edilmesi, çizelgeye bağlılığın ölçülmesi, gecikme aktarımı ve telafisinin takip edilmesi gibi çeşitli değerlendirmeler ve tahminler yapmaya olanak tanımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Tek hatlı demiryolları, tren çatışmalarında gecikme analizi, Markov zincirleri modeli, doğrusal regresyon modeli

ABSTRACT

Statistical Analysis of Delay-Based Conflict Resolutions in Single-track Railways

İrem OLGAY ŞENKARDEŞ

Department of Civil Engineering Major

Transportation Program

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İsmail ŞAHİN

Railway systems are used in many countries around the world to solve transportation problems from the past to the present. A significant portion of the railway network in our country consists of single-track lines where scheduled train operations are carried out. In single-track railways, trains operated in the same and opposite directions share the same track. In situations of encounter or overtaking, these trains have limited opportunities to yield to each other only in certain sections of the track. Due to this operational feature, it is necessary to control delays and conflicts in train movements for efficient use of the tracks. Based on this requirement, our research examines train conflicts that occur on the single-track Arifiye-İnönü section of the Istanbul-Ankara railway line. The data obtained from the 60-day journeys of passenger and freight trains serving in both directions on this line between 00:00 and 23:59 hours are used in the study. Data on actual and planned train movements are transferred to digital media, and the extent to which the actual conflicts adhere to the planned schedule is examined. Statistical analyses were conducted using Excel program, and the results obtained were visually presented through tables and graphs. Trains were grouped according to their

priorities. The departure delay of a train that arrives at the station before the conflict section due to a delay, and the probability of departure delay from the station after the conflict section were estimated using the Markov chains and linear regression models. The methods discussed in the study allow various evaluations and predictions such as planning conflicts on single-track railways, analyzing delays, predicting arrival and departure times of trains at stations, measuring schedule adherence, monitoring delay transmission and compensation.

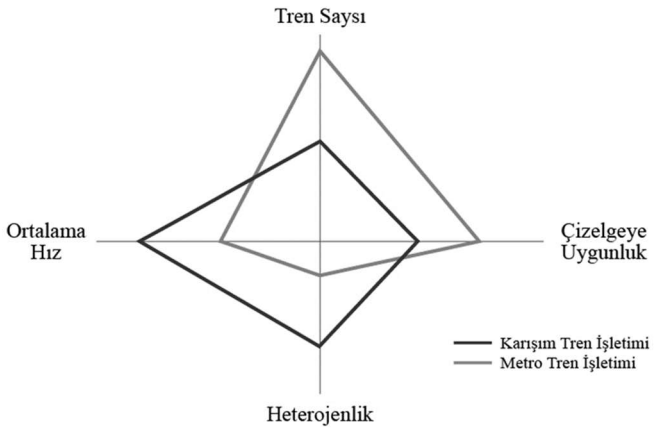
Keywords: Single-track railways, analysis of delays in train conflicts, Markov chain model, linear regression model

1
GİRİŞ

1.1 Literatür Özeti

Ulaştırmanın, bir ülkenin siyasi, sosyal, kültürel ve özellikle iktisadi hayatı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Kaynakların verimli işletilmesi, değerlendirilmesi ve ticaretin gelişmesi, ancak gelişmiş bir ulaşım ağı ile mümkündür. Her türlü gelişmeyle ulaştırma arasında sıkı bir ilişki olduğuna göre yetersiz bir ulaştırma sistemi ile kalkınma düşünülemeyeceği de bir gerçektir. Her ülke için gerekli olan bu durum, alan olarak geniş, nüfusu ve kaynakları daha dağınık ve önemli bir coğrafi konuma sahip olan Türkiye için de büyük önem taşımaktadır" [1]. Demiryolu endüstrisi birçok ülkenin ulaşımında hayati bir rol oynamaktadır. Demiryollarının diğer mevcut modlara göre rekabet üstünlüğü sağladığı hizmetin kalitesine bağlıdır. Bu hizmet kalitesini etkileyen en önemli parametreler arasında demiryolu operasyonlarının yürütüldüğü verimlilik ve etkinlik yer almaktadır [2]. Özellikle son yıllarda sanayileşme ile hızla büyüyen şehirlerde demiryolu işletmelerine yolcu ve yük talepleri artmıştır. Bu talepler kapasitenin daha verimli kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Bunun içinde trenlerinin gecikmeleri iyi analiz edilmelidir. Ulaştırma sektöründeki temel rekabet unsurları arasında işletimin güvenilirliği ve kalitesi önemli bir yer tutmaktadır. Giderek artan yolcu ve yük talebi, mevcut altyapıdan daha verimli faydalanmayı gerektirmektedir. Böylece artan kapasite gereksinimi ile birlikte hizmet düzeyinin de mümkün olduğunca yüksek tutulması gerekmektedir. Bu 2 bağlamda, planlanan tren trafiği ile gerçekleşen tren hareketleri arasındaki uyumun sağlanması da son derece önemlidir [3]. Dış etkenlerden (hava durumu, yolcu sayısı ve davranışları vb.) ve ayrıca bir demiryolu sistemi içindeki dahili unsurlardan (altyapı ve araç donanımının güvenilirliği, personelin davranışı vb.) kaynaklanan rahatsızlıklar birincil gecikmelere, sapmalara neden olur. Zaman çizelgesinde tanımlanan operasyonel planlardan, yoğun olarak kullanılan hatlarda, bir trenin programından sapması, hattaki diğer trenleri etkileyebilir ve domino etkisiyle ikincil gecikme zincirleri oluşturabilir [4]. Bu nedenle hem zaman çizelgesi yapım aşamasında hem de demiryolu işletmesi sırasında gerçek zamanlı olarak bu sapmaların sistem

üzerindeki olası etkisini en aza indirmek için kararlar alınmaktadır [5]. Demiryolu trafiğinde çizelgeleme, büyük boyutu, kaynak paylaşımındaki sınırlamalar ve çeşitli demiryolu bileşenleri arasındaki karmaşık karşılıklı bağımlılıklar nedeniyle çok zor bir problem olarak kabul edilmektedir [6]. Demiryolu trafik kontrolünde en zorlu problemlerden biri trenler arası çatışmaları çözmektir [2]. Demiryolu trafiğinin herhangi bir şekilde kesintiye uğraması, artan etkileşim gecikmeleri nedeniyle yüksek işletme maliyeti ile sistemin kararsız kalmasına neden olabilir. Bu nedenle aksamadan kaynaklanan herhangi bir çatışmanın zamanında ve etkin bir şekilde çözülmesi gerekmektedir [2]. Kesintilerin ve gecikmelerin operasyonel kontrolünde mevcut uygulama, halen ağırlıklı olarak önceden belirlenmiş kurallara ve personelin deneyim ve becerilerine dayanmaktadır. Ne yerel ne de ağ trafik kontrolörleri, kararlarının etkisini tahmin etmek ve bunları değerlendirmek için güvenilir bir destekleyici araca sahip değildir, bu da genellikle ağ düzeyinde yeni çatışmalar ve yetersiz etkiler yaratmaya yol açar [5]. Dünyada sıklıkla karşılaşılmasına rağmen ne yazık ki ülkemizde raylı sistemlerin planlama ve işletimine ilişkin çalışmalar çok sayıda bulunmamaktadır. Kapasite ve gecikme arasındaki ilişkiyi gösteren çeşitli çalışmalar yapılmıştır; Avrupa'da bile gecikme ve kapasite arasındaki ilişkiyi görselleştiren CBS tabanlı sistemler geliştirilmiştir. Demiryolu kapasitesinin istikrarlı/dengeli sunulması için gerekli olan birkaç bileşen vardır [7]. Bu bileşenler Şekil 1.1'de gösterilmiştir. Şekilde, dörtgenin alanı sabit kalmak üzere, eksenlerdeki bileşenler hizmetin türüne göre farklı değerler almaktadır.



Şekil 1.1 Demiryolu kapasitesinin istikrarlı sunulması için gerekli bileşenler

Planlanan ve gerçekleşen tren hareketleri arasındaki ilişkilerin ortaya konulması, işletimin değerlendirilmesi ve alınması gereken muhtemel işletim kararları için önemli bir girdi oluşturmaktadır. Söz konusu ilişkiler istatistiksel analiz yöntemleri kullanılarak gerçekleştirilebilmektedir [3]. İstanbul-Ankara demiryolu hattının tek hatlı Arifiye-İnönü kesiminde gerçekleşen tren çatışmaları incelenmiştir. Araştırmada, bu hatta iki yönde hizmet veren yolcu ve yük trenlerinin 00:00-23:59 saatleri arasında gerçekleşen 45 günlük seyirlerinden elde edilen veriler üzerinde sayısal bir analiz yapılmıştır. İzleyen bölümde, gerçekleşen çatışmaların planlanan çizelgeye (orere) ne kadar uydukları incelenmiştir. Excel programı yardımıyla istatistiksel analizler yapılmış, elde edilen sonuçlar tablo ve grafikler yardımıyla görsel olarak sunulmuştur. Trenler önceliklerine göre gruplandırılmıştır. Çatışma kesiminden önceki istasyonda gecikme yaşayan bir trenin, çatışma kesiminden sonraki istasyondaki gecikmesi ve olasılığı Markov zincirleri modeli kullanılarak tahmin edilmiştir. Çalışmada ele alınan yöntemler, tek hatlı demiryollarında çatışmaların planlanması, gecikmelerin analizi, trenlerin istasyonlara varış-kalkış zamanlarının tahmin edilmesi, çizelgeye bağlılığın ölçülmesi, gecikme aktarımı ve telafisinin takip edilmesi gibi çeşitli değerlendirmeler ve tahminler yapmaya olanak sağlamıştır.

1.2 Tezin Amacı

İnceleme ve araştırmamızda çeşitli istatistiksel analizlerle Arifiye-Çukurhisar demiryolu hattında gün boyu gerçekleşen çatışmaların işletimine dair, gecikme analizi, çizelgelere uyumluluk, tahmini varış ve kalkış sürelerini hesaplama gibi çeşitli matematiksel analizler yapmak hedeflenmiştir. Bunun yanında çatışmalarda hangi trene öncelik verileceği kararı verilirken Markov zincirleri metodunun bize ne kadar yardımcı olabileceğini tespit etmek amaçlanmıştır.

1.3 Hipotez

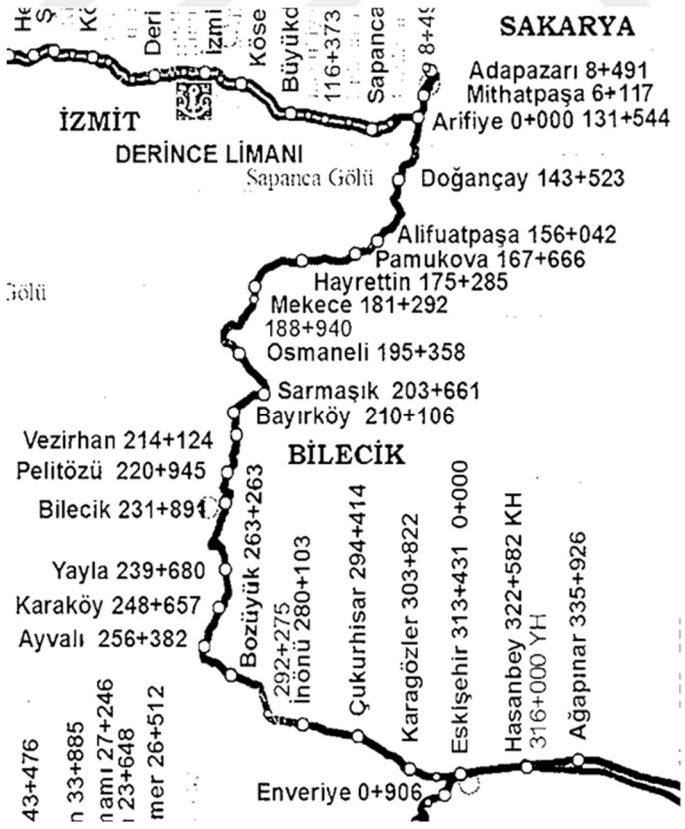
Demiryolu taşımacılığında planlanan çizelgeye uyum nitelikli hizmet ve verimlilik bakımından önem arz etmektedir. Trenlerin seyrindeki öngörülememeyen ve gerçekleşen çaltışmalar olumsuzluklar doğurabilir. Bu belirsizliğin önüne geçebilmek için çeşitli çalışmalar yapılmalıdır. TCDD 1. Bölge Müdürlüğü'nün yönetiminde olan Arifiye-Çukurhisar demiryolu hattındaki trenlerin 2007 yılının

ağustos, eylül ve ekim aylarına ait 00:00-23:59 saatleri arasında gerçekleşen çatışmalardaki trenlerin istasyonlara varış ve kalkış zamanları trengraflardan elde edilmiş ve bu zamanlar planlanan zamanlarla karşılaştırılmıştır. Elde edilen verilere kapsamlı istatistiksel analizler uygulanarak geliştirilen çeşitli hipotezlerin geçerli olup olmadığı araştırılmıştır. Trenlerin (öncelik durumuna göre) çatışma kesiminden önceki ve sonraki istasyona varış, çatışma kesiminden önceki ve sonraki istasyonlardan kalkış zamanlarından yararlanarak belirli gecikmeler altında trenlerin çatışmalardan sonraki durumlarına ilişkin tahminler yapılabileceği varsayılmış ve uygulanan tahmin yöntemiyle, trenlerin çatışmalardan sonraki gecikme durumları tahmin edilmiştir.

2
ARİFİYE-ÇUKURHİSAR DEMİRYOLU HATTINDAKİ ÇATIŞMALARIN ANALİZİ

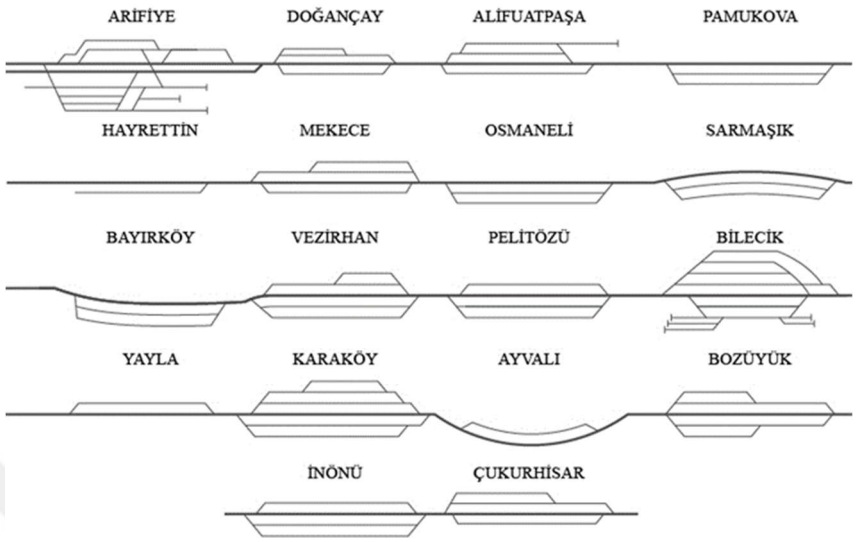
2.1 Arifiye-Çukurhisar Hattının Tanıtımı ve Verileri

Bağdat Demiryolu Projesi kapsamında 1872 yılında Haydarpaşa'dan inşaatına başlanan ve 1892 yılında Ankara'ya ulaşan 576 km uzunluğundaki Ankara-İstanbul demiryolu hattı, bu dönemin teknolojisine paralel olarak yüksek hızlı bir işletmeciliğe izin vermemekte ve karayoluna kıyasla çok uzun bir güzergâh izlemektedir. Bu çalışmada, Ankara-İstanbul arasında YHT (Yüksek Hızlı Tren) projesinden önce hizmet veren demiryolu hattı ve işletilen trenler dikkate alınmıştır. Bu hattaki trafik kumanda merkezlerinin sayısı 3 olup bunlar Haydarpaşa, Eskişehir ve Ankara'da bulunmaktaydı. Bu çalışmadaki demiryolu, 576 km uzunluğa sahip Ankara ve İstanbul arasındaki hattın, Eskişehir (Çukurhisar) ve Arifiye arasındaki tek hatlı kesimi olup Şekil 2.1'de gösterilmiştir. Hat üzerindeki istasyonların krokisi Şekil 2.2'de verilmiştir.



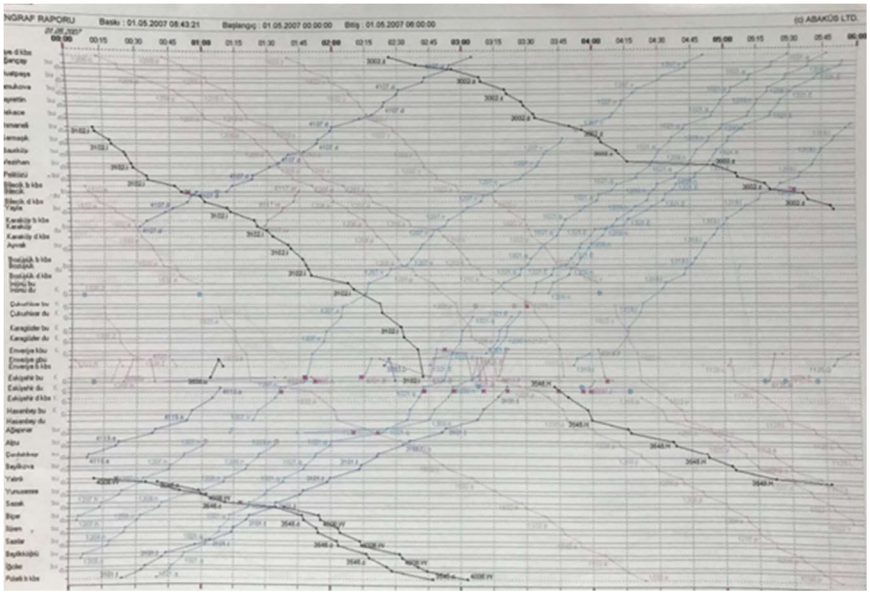
Şekil 2.1 Arifiye - Çukurhisar demiryolu hattı

Bu hat üzerinde Anadolu Ekspresi (1207 numaralı tren), Ankara Ekspresi (1209 numaralı tren), Fatih Ekspresi (1021 numaralı tren) ve Pamukkale Ekspresi (1321 numaralı tren) ana hat trenleri çalışmaktadır.



Şekil 2.2 Arifiye-Çukurhisar demiryolu hattı vaziyet planı

Trenlerin gerçekleşen varış ve kalkış zamanları, istasyonların girişinde ve çıkışındaki makaslarda bulunan OS (On Switch) adı verilen algılayıcıların kumanda merkezine gönderdiği elektrik sinyalleri aracılığıyla kaydedilir. Trenlerin konum-zaman bilgilerini içeren bu sinyaller kumanda merkezinde trengraf adı verilen istasyon-zaman grafiklerine dönüştürülerek gerçek zamanlı olarak işlenirler. Şekil 2.3'te bir örnek trengraf görülmektedir.



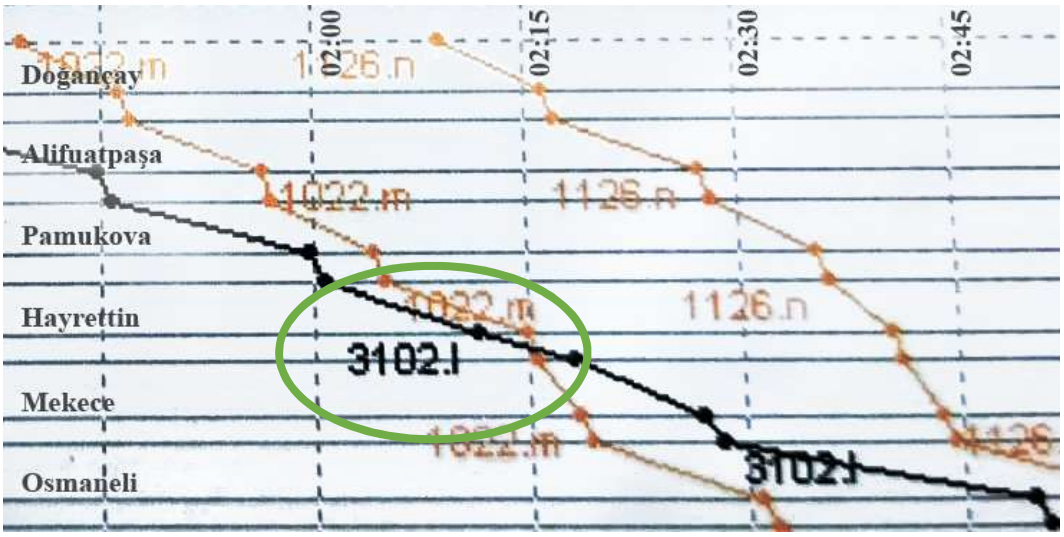
Şekil 2.3 Trengraf örneği

2.2 Çatışma Çeşitleri

Planlı işletmecilikte trenler planlanan zamanlardan saptıklarında "çatışma" adı verilen uygun olmayan tren hareketleri ile karşılaşılır. Trenler arasındaki çatışmalar dispeçerler tarafından önceden saptanır ve çözülürler. Çatışma çözümlerinde genellikle çatışan trenlerden biri istasyonda bekletilirken, diğerinin geçmesine (yoluna devam etmesine) izin verilir. Çatışmanın çözüldüğü istasyon plandaki istasyondan farklı olabilir. Tren hareketlerindeki fizibiliteyi (uygunluğu) sağlamak için gerekli olan bu düzenlemeler sonucunda, bazı trenlerin zamansal sapmaları kaçınılmaz olur. Çözümü yapılan çatışmalar, plandaki çatışmalardan zamansal ve mekansal olarak farklı olabilir. Aşağıda çatışma türleri ve çözümleri ele alınmaktadır.

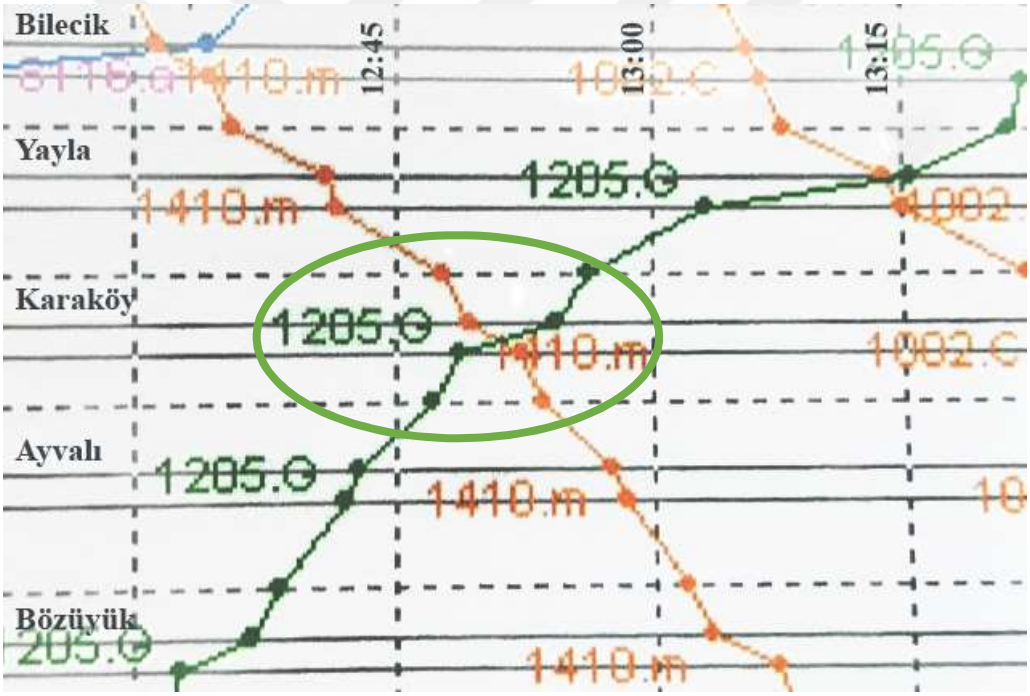
2.2.1 Aynı Yönlü Trenler Arasındaki Öne Geçme Çatışması

Bir demiryolu hattı üzerinde aynı yönde ilerleyen (birbirini takip eden) iki tren arasındaki “öne geçme” çatışması, seyirlerine devam etmeleri halinde bu trenlerden arkadakinin öndeki treni bir istasyon aralığında (çatışma kesiminde) yakalayacak olması nedeniyle gerçekleşir. Bu durum arkadaki trenin öndekine göre daha hızlı olması durumunda yaşanır. Arkadan gelen trenin öndekinin önüne geçmesi istendiğinde, öndeki tren belirlenen çatışma çözüm istasyonunda arkadaki tren geçene kadar bekletilir. Şekil 2.4’te aynı yönlü olan 1022 ve 3102 no’lu trenler arasındaki öne geçme çatışması örneğine yer verilmiştir. Bu örnekte Arifiye-Çukurhisar yönünde hareket eden 3102 no’lu tren 02:11’de vardığı çatışma çözüm istasyonunda (Hayrettin) aynı yönlü 1022 no’lu treni beklemiş, 1022 no’lu tren çatışma çözüm istasyonuna 02:15’de varmış ve (çok kısa bir süre içerisinde) 02:15’de istasyondan kalkmıştır. 1022 no’lu tren çözüm istasyonundan kalktıktan 3 dk sonra (saat 02:18’de) 3102 no’lu tren seyrine devam etmiştir. 3102 no’lu tren çözüm istasyonunda 7 dk beklemiştir.



Şekil 2.4 Trengraf üzerinde öne geçme çatışması örneği

2.2.2 Zıt Yönlü Trenler Arasındaki Karşılaşma Çatışması



Şekil 2.5 Trengraf üzerinde karşılaşma çatışması örneği

Tek hatlı bir demiryolunda zıt yönde seyreden iki tren arasındaki "karşılaşma" çatışması, seyirlerine devam etmeleri halinde bu trenlerin tek hatlı kesimde (çatışma kesiminde) karşılaşacak olmaları nedeniyle gerçekleşir. Şekil 2.5'te zıt yönlü olan 1205 ve 1410 no'lu trenler arasındaki karşılaşma çatışması örneğine yer verilmiştir. Bu örnekte Çukurhisar-Arifiye yönünde hareket eden 1205 no'lu tren 12:48'de vardığı çatışma çözüm istasyonunda (Karaköy) Arifiye-Çukurhisar yönünde

hareket eden 1410 no'lu treni beklemiş, 1410 no'lu tren çözüm istasyonuna 12:49'da varmış ve 12:52'de istasyondan kalkmıştır. 1410 no'lu tren çözüm istasyonundan kalktıktan 3 dk sonra (saat 12:55'de) 1205 no'lu tren seyrine devam etmiştir. 1205 no'lu tren çözüm istasyonunda 6 dk beklemiştir.

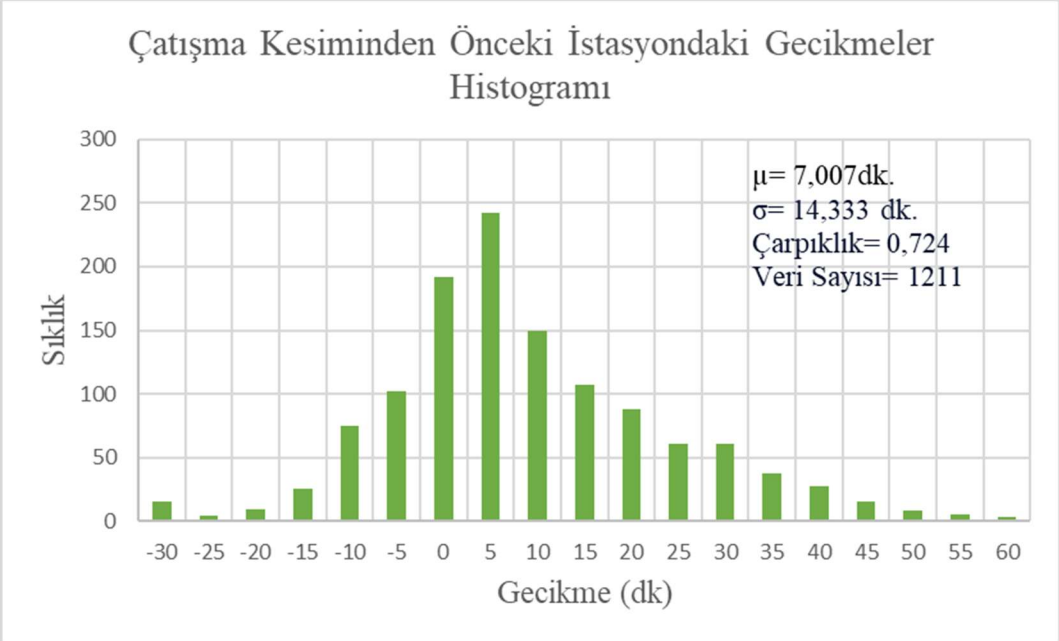
3
İSTATİSTİKSEL ANALİZLER

3.1 Verilerin İstatistiksel Analizi

Arifiye – İnönü istasyonları arasında bulunan tek hatlı güzergahta 2007 yılına ait trengraflarda tespit edilen çatışmalar ile livre üzerinde görülen planlanan çatışmalar karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda aşağıdaki analizler yapılabilmektedir.

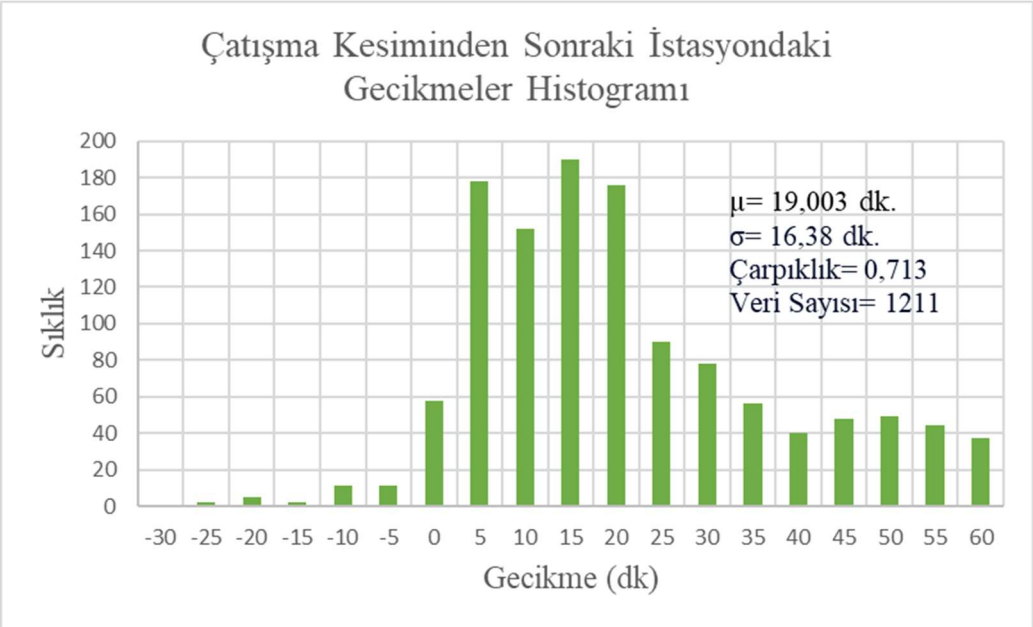
Trenlerin gerçekleşecek bir çatışmadan önceki istasyondaki gecikmelerinden yola çıkılarak, çatışmadan sonraki istasyondaki gecikmelerinin nasıl etkilendiği gösterilebilir.

Çatışma kesiminden önceki istasyonlarda gerçekleşen ve planlanan zamanlar arasındaki farklar orerden sapma ya da kalkış gecikmesi olarak olarak hesaplanabilir. Buna ilişkin kabul edilen belirli bir veri grubuna ait histogram Şekil 3.1'de gösterilmiştir. Gecikmelerin ortalaması (μ) 7,007 dk ve standart sapması (σ) 14,333 dk olarak bulunmuştur. Çatışma kesiminden hemen önceki istasyonlarda gerçekleşen gecikmelerin rastgele değişkenlik gösterdiği histogramda net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.1 Çatışma kesiminden önceki istasyonlardaki gecikmeler histogramı

Çatışma kesiminden sonraki istasyonlarda gerçekleşen ve planlanan zamanlar arasındaki farklar orerden sapma ya da varış gecikmesi olarak olarak hesaplanabilir. Buna ilişkin kabul edilen belirli bir veri grubuna ait histogram Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Gecikmelerin ortalaması (μ) 19,003 dk ve standart sapması (σ) 16,38 dk olarak bulunmuştur. Çatışma kesiminden hemen sonraki istasyonlarda gerçekleşen gecikmelerinde rastgele değişkenlik gösterdiği histogramda net bir şekilde görülmektedir.



Şekil 3.2 Çatışma kesiminden sonraki istasyonlardaki gecikmeler histogramı

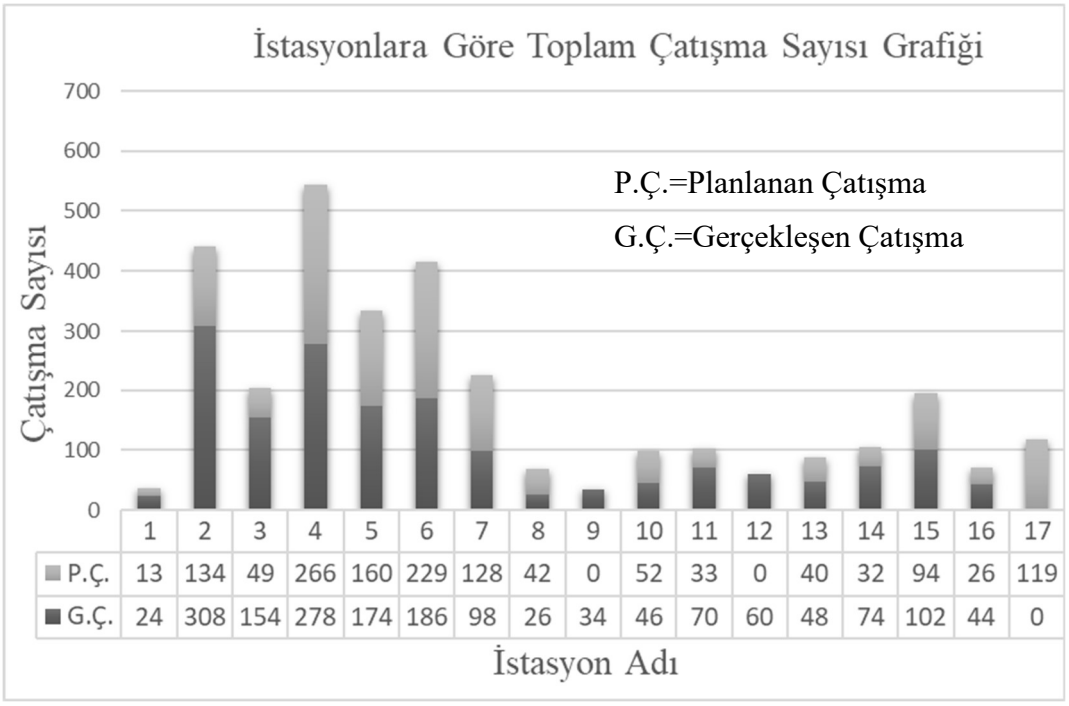
Şekil 3.1 ve Şekil 3.2 karşılaştırıldığında çatışma kesiminden sonraki istasyonlarda gecikmelerin artma eğiliminde olduğu görülmektedir. Buradan da çatışmaların planlanan çözümlere uygun gerçekleşmediği çıkarımına varmak mümkündür. Bu uyumsuzluğu çatışmaların çözümlendiği istasyonları inceleyerek anlamak da mümkündür. Tablo 3.1'de incelediğimiz çatışma çözümlerinin hangi istasyonlarda gerçekleştiği ve planlandığı sayısal olarak gösterilmektedir.

Tablo 3.1 İstasyonlarda planlanan ve gerçekleşen çatışma sayıları

İstasyonlar	Çatışmanın Çözüldüğü İstasyon	Planlanan Çatışma Çözüm İstasyonu
İnönü	12	7
Bozüyük	154	67
Ayvalı	12	7
Karaköy	154	67
Yayla	77	25
Bilecik	139	133
Pelitözü	87	80
Vezirhan	93	115
Bayırköy	49	64
Sarmaşık	13	21
Osmaneli	17	0
Mekece	23	26
Hayrettin	35	17
Pamukova	30	0
Alifuatpaşa	24	20
Doğançay	37	16
Arifiye	51	47
Toplam	22	13

Tablo 3.1 incelendiğinde planlanan ve gerçekleşen çatışma çözümlerinin, planlanan istasyonlarda gerçekleşme oranının oldukça düşük olduğu anlaşılabilir.

Gerçekleşmesi planlanan çözüm istasyonlarındaki çatışma sayıları ile çatışmaların çözümünün gerçekleştiği istasyonlardaki çatışma sayıları Şekil 3.3'deki histogramda da gösterilmiştir. İncelediğimiz güzergah üzerinde planlanan toplam çatışma sayısı 1417 olsa da gerçekleşen toplam çatışma sayısı 1726'dır. Gerçekleşen çatışmaların planlananlardan oldukça fazla olduğu histogramda görülmektedir.



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
P.Ç.	13	134	49	266	160	229	128	42	0	52	33	0	40	32	94	26	119
G.Ç.	24	308	154	278	174	186	98	26	34	46	70	60	48	74	102	44	0

Şekil 3.3 İstasyonlarda gerçekleşen ve planlanan çatışmalar histogramı

Ayrıca çatışmalarda birebir karşılaştırma yapıldığında ise incelenen 863 çatışmadan 256'sının planlanan istasyonda gerçekleştiği görülmüştür. Bu da %29,66 oranında plana uyum gerçekleştiğini göstermektedir.

Tablo 3.2 İstasyonlardaki çatışma çözümleri (%)

İstasyonlar	**Çatışmanın Çözüldüğü İstasyon (%)**	**Planlanan Çatışma Çözüm İstasyonu (%)**
İnönü	1,390498	0,917431
Bozüyük	17,84473	9,456598
Ayvalı	8,922364	3,45801

Tablo 3.2 İstasyonlardaki çatışma çözümleri (%) (devamı)

Karaköy	16,1066	18,77205
Yayla	10,08111	11,29146
Bilecik	10,77636	16,1609
Pelitözü	5,677868	9,033169
Vezirhan	1,506373	2,964008
Bayırköy	1,969873	0
Sarmaşık	2,665122	3,669725
Osmaneli	4,05562	2,328864
Mekece	3,476246	0
Hayrettin	2,780997	2,822865
Pamukova	4,28737	2,258292
Alifuatpaşa	5,909618	6,633733
Doğançay	2,549247	1,834862
Arifiye	0	8,398024
Toplam	100	100

Tablo 3.2 incelendiğinde ise çatışmaların daha çok Karaköy istasyonunda çözülmesi planlanırken çatışmalar Bozüyük istasyonunda çözülmüştür. Planlanan ve gerçekleşen çatışmalarda en büyük uyum ise Hayrettin istasyonunda gerçekleşmiştir.

3.2 Çatışmalardaki Gecikmelerin Stokastik Modeli: Markov Zincirleri

Trenlerin istasyonlardaki gerçek varış ve kalkış zamanlarında, çizelge zamanlarına göre sapmalara sebep olabilecek bir dizi içsel ve dışsal etkiler bulunur. Bu durum tren hareketlerine, tren trafiğine ve genel olarak demiryolu sistemine ilişkin belirsizliklere yol açar. Tren hareketlerinin tahmininde, doğal olarak, bu etkilere bağlı belirsizlikler dikkate alınmalıdır. Diğer taraftan, tren gecikmelerinin doğru tahmin edilmesi demiryolu trafiği ve taşımacılığının planlı ve gerçek zamanlı kontrolü için önemli bir gerekliliktir. (Kecman ve diğ., 2015). Bunun gibi karar verme süreçlerinde deterministik veya stokastik özellikte çeşitli tahmin model ve yöntemlerinden faydalanılabilmektedir. Tren kalkış ve varış zamanlarının belirsiz bir süreç olarak görülmesi, stokastik modelleme yaklaşımlarının benimsendiği bir bakış açısını gerektirmektedir.

Bir tren çatışma kesiminden sonraki istasyondan; mevcut gecikme değerine eşit, bu gecikmeden daha küçük veya bundan daha büyük bir gecikme değeriyle kalkış veya varış yapabilir. Bu çalışmada, trenler belirli bir istasyondan belirli bir gecikmeyle kalktığında veya belirli bir istasyona vardığında, izleyen istasyondaki kalkış veya varış gecikmesini ve olasılığını tahmin için Markov zinciri modeli kullanılmıştır. Markov zincirleri, stokastik süreçlere sahip sistemler için yaygın olarak kullanılan bir analiz ve modelleme aracıdır. Sadece tek yönlü olarak değişebilen bir süreci tasvir etmez (örneğin, sıradan bir diferansiyel denklemin çözümünde olduğu gibi). Bir stokastik süreçte, bazı belirsizlikler vardır. Hatta başlangıçtaki durum (veya başlangıç noktası) biliniyor olsa dahi sürecin gelişebileceği/değişebileceği bazı (çoğunlukla sonsuz) yönler vardır. Markovyen özelliğine sahip stokastik süreçte, bir sonraki duruma veya konuma geçiş olasılığı, yalnızca mevcut duruma bağlıdır ve işlemin önceki durumlarından veya değerlerinden bağımsızdır (Lawler, 2006). Örneğin, bir trenin belirlenen bir istasyondan kalkış gecikmesinin sadece bir önceki istasyondan kalkış gecikmesine bağlı olduğu varsayılmaktadır (3.1).

$$\begin{aligned} &P(D_{k+1} = d_{k+1} | D_k = d_k, D_{k-1} = d_{k-1}, D_1 = d_1, D_0 = d_0) \\ &= P(D_{k+1} = d_{k+1} | D_k = d_k) \end{aligned} \tag{3.1}$$

Burada *P*, *k* istasyonundan *k+1* istasyonuna kadar gecikme değişimi olasılığını temsil eden, gecikme değişkeni *D*'nin bir fonksiyonudur. d_0, d_1,… d_k önceki gecikme durumlarıdır. Bu çalışmada, Markov matrisindeki olasılık değerlerinin incelenmesi amacıyla Arifiye-Çukurhisar demiryolu hattındaki trenlerin 00:00-23:59 saatleri arasında incelenen trenlerin istasyonlardan kalkış gecikmeleri birbirine yakın sayıda gözlem içeren 10 gruba ayrılmış ve belirlenen gecikme durumları Tablo 3.3'de gösterilmiştir. Gecikme durumları her gruba ait beklenen temsili bir değerle temsil edilmiştir.

Tablo 3.3 Belirlenen gecikme durumları

Gecikme Durumu, *d* (*i* veya *j*)	**Gecikme Değerleri, D (dakika)**	**Gözlem Sayısı (n_i)**	**Temsili Değer, e_j (dakika)**
1	X ≤ -4	112	-6,231
2	-4 < x ≤ 0	233	-1,280
3	0 < x ≤ 2	111	1,439
4	2 < x ≤ 4	103	3,515
5	4 < x ≤ 6	85	5,456
6	6 < x ≤ 10	151	8,423
7	10 < x ≤ 16	144	13,373
8	16 < x ≤ 22	114	19,395
9	22 < x ≤ 30	113	26,460
10	30 < x	126	37,130

Gecikmenin i durumundan j durumuna geçiş olasılığı pij, tüm seyirlerde aynı ve dolayısıyla Markov zinciri homojen (durağan) kabul edilmiştir (3.2).

$$=(D\mathrm{k}+1 = i \mid D\mathrm{k} = j) = p\mathrm{ij} \qquad (3.2)$$

Gözlenen ardışık kalkış gecikme çiftleri içerisinden, i durumundan j durumuna geçenlerin sayısı (nij) ve i durumundan tüm durumlara geçenlerin sayısı (n_i) olduğunda, i'den j'ye geciş olasılığı pij (3.3):

$$P_{ij} = n_{ij} / n_i \tag{3.3}$$

Gecikme durumları tanımlandıktan sonra, gecikmelerde gözlenen değişiklikleri incelemek amacıyla gecikme geçişlerindeki sıklıkları gösteren matrisler çatışmalarda geçen ve bekleyen trenler için oluşturulmuştur.

Geçen trenler için oluşturulmuş sıklık matrisi Tablo 3.4'te, bekleyen trenler için oluşturulmuş sıklık matrisi Tablo 3.5'te gösterilmiştir.

Tablo 3.4 Gecikme durumları arasındaki geçişlerin sıklıkları (geçen trenler için)

Gecikme Durumları	**D_1**	**D_2**	**D_3**	**D_4**	**D_5**	**D_6**	**D_7**	**D_8**	**D_9**	**D_{10}**	**Toplam**
D_1 x<=-4	3	6	4	5	5	13	25	31	51	294	436
D_2 -4<x≤0	4	41	21	9	3	10	16	15	8	3	130
D_3 0<x≤2	0	15	21	32	2	5	3	3	6	4	91
D_4 2<x<=4	2	5	12	33	20	1	6	5	16	4	104
D_5 4<x<=6	1	1	1	19	22	10	5	9	9	7	84
D_6 6<x<=10	0	1	1	1	3	61	17	12	12	11	119
D_7 10<x<=16	0	0	0	0	0	14	51	19	13	32	129
D_8 16<x<=22	0	0	0	0	0	0	6	49	10	54	119
D_9 22<x<=30	0	0	0	0	0	0	0	2	31	74	107
D_{10} 30<x	1	1	0	0	0	0	0	0	0	136	138
Toplam	11	70	60	99	55	114	129	145	156	619	1457

Tablo 3.5 Gecikme durumları arasındaki geçişlerin sıklıkları (bekleyen trenler için)

Gecikme Durumları	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	Toplam
D_1 $x \leq -4$	1	5	4	3	2	5	8	10	10	1	49
D_2 $-4 < x \leq 0$	3	10	9	19	14	13	18	6	7	4	103
D_3 $0 < x \leq 2$	0	3	6	2	6	14	8	3	4	2	48
D_4 $2 < x \leq 4$	0	3	2	0	0	8	8	7	4	5	37
D_5 $4 < x \leq 6$	0	0	1	2	1	6	6	3	5	1	25
D_6 $6 < x \leq 10$	0	0	1	1	4	6	11	7	9	6	45
D_7 $10 < x \leq 16$	0	0	0	0	0	2	8	13	4	20	47
D_8 $16 < x \leq 22$	0	0	0	0	0	0	0	7	15	16	38
D_9 $22 < x \leq 30$	0	0	0	0	0	0	0	3	1	30	34
D_{10} $30 < x$	0	0	0	0	0	0	0	1	0	30	31
Toplam	4	21	23	27	27	54	67	60	59	115	457

Matrisler trenlerin öncelik verilme durumlarına göre ayrılmış iki grup veri ile oluşturulmuştur. Verilerin iki gruba ayrılmasının sebebi, tüm trenlerde istasyonda bekleme ve çatışma kesiminde geçirilen sürelerin dikkate alınması gerektiği gerçeğiydi. Bu sebeple beklemiş (öncelik verilme durumu=0) trenlerin Markov matrisi oluşturulurken çatışma kesiminden önceki ve sonraki duraklara varış gecikmesi kullanıldı. Öncelik verilmiş (öncelik verilme durumu=1) trenlerde ise çatışma kesiminden önceki ve sonraki duraklardaki kalkış gecikmeleri kullanılmıştır. Bu sayede trenlerin ardışık iki çatışmaya girme ihtimaline karşın ortaya çıkabilecek etkiler devre dışı bırakılmıştır.

Tablo 3.5'deki veriler göz önünde bulundurulursa; birinci satırda yer alan D_1 durumundan ($x \leq -4$) üçüncü sütünda yer alan D_3 durumuna ($0 < x \leq 2$) geçişleri temsil eden "4" değeri ve ikinci satırda yer alan D_2 durumundan ($-4 < x \leq 0$) yine üçüncü sütünda yer alan D_3 durumuna ($0 < x \leq 2$) geçişleri temsil eden "9" değeri, gecikme değişimlerine bakıldığında negatif gecikmeden (erken kalkıştan) pozitif gecikmeye (geç kalkış) geçişin istasyonlar arasında 9+4=13 kez görüldüğünü göstermektedir.

Bu sayıda toplam çatışmaların %2,84'lük kısmını oluşturmaktadır. Diğer bir ifade ile trenlerin herhangi bir istasyona erken vardığı ve sonraki istasyondan da zamanında veya 2 dakikaya kadar gecikmeyle kalkışların gerçekleştiği 13 adet geçiş gerçekleşmiştir. Arifiye-Çukurhisar banliyö hattındaki çatışmalarda bekleyen trenler için elde edilen matriste (Tablo 3.5) diyagonal üzerindeki elemanlar mevcut gecikme durumlarının korunma sıklıklarını, diyagonalin sağında yer alan elemanlar gecikme değerlerinin büyüme sıklıklarını ve diyagonalin solunda yer alan elemanlar gecikme değerlerinin azalma sıklıklarını göstermektedir. Diyagonal üzerindeki mevcut gecikme durumlarını koruma sıklıklarını yansıtan değerin "70" olduğu görülmektedir. Bu değer bekleyen trenlerde %15,3'luk bir grupta gecikme durumlarının korunma eğilimini ifade etmektedir. Diyagonalin alt kısmında yer alan gecikme değişimlerinin sıklığına baktığımızda toplam sayısal değerin "26" olduğu görülmektedir. Bu değer bekleyen trenlerde %5,7'lik bir grupta gecikme değişimlerinde azalma eğilimini ifade etmektedir. Diyagonalin üst kısmına bakıldığında ise toplam sayısal değerin "361" olduğu görülmektedir. Bu değer bekleyen trenlerde %79'luk bir grupta gecikme değişimlerinde artma eğilimini ifade etmektedir.

Bekleyen ve geçen trenler arasında bir karşılaştırma yapabilmek adına geçen trenler için hazırlanan Tablo 3.4'i de incelersek; birinci satırda yer alan D_1 durumundan ($x \leq -4$) üçüncü sütünda yer alan D_3 durumuna ($0 < x \leq 2$) geçişleri temsil eden "4" değeri ve ikinci satırda yer alan D_2 durumundan ($-4 < x \leq 0$) yine üçüncü sütünda yer alan D_3 durumuna ($0 < x \leq 2$) geçişleri temsil eden "21" değeri, gecikme değişimlerine bakıldığında negatif gecikmeden (erken kalkıştan) pozitif gecikmeye (geç kalkış) geçişin istasyonlar arasında 21+4=25 kez görüldüğünü göstermektedir. Bu sayıda toplam çatışmaların %1,72'lik kısmını oluşturmaktadır. Diğer bir ifade ile trenlerin herhangi bir istasyona erken vardığı ve sonraki istasyondan da zamanında veya 2 dakikaya kadar gecikmeyle kalkışların gerçekleştiği 25 adet geçiş gerçekleşmiştir. Diyagonal üzerindeki mevcut gecikme durumlarının koruma sıklıklarını yansıtan değerin "448" olduğu görülmektedir. Bu değer bekleyen trenlerde %30,75'lik bir grupta gecikme durumlarının korunma eğilimini ifade etmektedir. Diyagonalin alt kısmında yer alan gecikme değişimlerinin sıklığına baktığımızda toplam sayısal değerin "90" olduğu görülmektedir. Bu değer bekleyen trenlerde %6,18'lik bir grupta gecikme değişimlerinde azalma eğilimini ifade

etmektedir. Diyagonalin üst kısmına bakıldığında ise toplam sayısal değerin "919" olduğu görülmektedir. Bu değer bekleyen trenlerde %63,1'lik bir grupta gecikme değişimlerinde artma eğilimini ifade etmektedir.

Elde ettiğimiz değerlerle Tablo 3.6'deki karşılaştırmayı yapmak da mümkündür. Tablo incelendiğinde geçen trenlerin bekleyen trenlere göre gecikme durumunu koruma eğiliminin daha fazla, gecikme durumunda artma eğiliminin daha az ve gecikme durumunda azalma eğiliminin daha fazla olduğu görülmektedir.

Tablo 3.6 Geçen ve bekleyen trenler için gecikme durum değişiklikleri (%)

	Geçen Trenler	**Bekleyen Trenler**
Mevcut Gecikme Durumlarının Koruma Eğilimi	%30,75	%15,3
Gecikme Değişimlerinde Artma Eğilimi	%63,1	%79
Gecikme Değişimlerinde Azalma Eğilimini	%6,15	%5,7
Toplam	%100	%100

Gecikme Durumları Arasındaki Geçişlerin Sıklıkları görüldükten sonra çatışma kesiminden önceki istasyonda meydana gelen gecikmelerin sonraki istasyonda meydana gelen gecikmelere geçişini ortaya çıkarmak adına geçiş olaslıkları matrisleri (ya da Markov Matrisleri) oluşturulmuştur.

"1" öncelik durumuna sahip verilerden oluşturulmuş matris (3.4) ve "0" öncelik durumuna sahip verilerden oluşturulmuş matris (3.5) aşağıda gösterilmiştir. Markov zinciri için geçiş olasılıkları matrisi (ya da Markov matrisi), durum sayısı kadar satır ve sütundan oluşan kare bir matristir. Bu matrisin (*i,j)* elemanı, p*ij* geçiş olasığını temsil etmektedir.

$$P_1=\begin{bmatrix}
0{,}007 & 0{,}013 & 0{,}009 & 0{,}011 & 0{,}012 & 0{,}029 & 0{,}056 & 0{,}071 & 0{,}118 & 0{,}674\\
0{,}031 & 0{,}315 & 0{,}162 & 0{,}069 & 0{,}023 & 0{,}077 & 0{,}123 & 0{,}115 & 0{,}062 & 0{,}023\\
0{,}000 & 0{,}165 & 0{,}231 & 0{,}352 & 0{,}022 & 0{,}055 & 0{,}033 & 0{,}033 & 0{,}066 & 0{,}044\\
0{,}019 & 0{,}048 & 0{,}115 & 0{,}317 & 0{,}192 & 0{,}010 & 0{,}058 & 0{,}048 & 0{,}154 & 0{,}038\\
0{,}012 & 0{,}012 & 0{,}012 & 0{,}226 & 0{,}262 & 0{,}119 & 0{,}060 & 0{,}107 & 0{,}107 & 0{,}083\\
0{,}000 & 0{,}008 & 0{,}008 & 0{,}008 & 0{,}025 & 0{,}513 & 0{,}143 & 0{,}101 & 0{,}101 & 0{,}092\\
0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}109 & 0{,}395 & 0{,}147 & 0{,}101 & 0{,}248\\
0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}050 & 0{,}412 & 0{,}084 & 0{,}454\\
0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}019 & 0{,}290 & 0{,}692\\
0{,}007 & 0{,}007 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}986
\end{bmatrix} \quad (3.4)$$

$$P0=\begin{bmatrix}
0{,}020 & 0{,}102 & 0{,}082 & 0{,}061 & 0{,}041 & 0{,}102 & 0{,}163 & 0{,}204 & 0{,}204 & 0{,}020\\
0{,}029 & 0{,}097 & 0{,}087 & 0{,}184 & 0{,}136 & 0{,}126 & 0{,}175 & 0{,}058 & 0{,}068 & 0{,}039\\
0{,}000 & 0{,}063 & 0{,}125 & 0{,}042 & 0{,}125 & 0{,}292 & 0{,}167 & 0{,}063 & 0{,}083 & 0{,}042\\
0{,}000 & 0{,}081 & 0{,}054 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}216 & 0{,}216 & 0{,}189 & 0{,}108 & 0{,}135\\
0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}040 & 0{,}080 & 0{,}040 & 0{,}240 & 0{,}240 & 0{,}120 & 0{,}200 & 0{,}040\\
0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}022 & 0{,}022 & 0{,}089 & 0{,}133 & 0{,}244 & 0{,}156 & 0{,}200 & 0{,}133\\
0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}043 & 0{,}170 & 0{,}277 & 0{,}085 & 0{,}426\\
0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}184 & 0{,}395 & 0{,}421\\
0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}088 & 0{,}029 & 0{,}882\\
0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}000 & 0{,}032 & 0{,}000 & 0{,}968
\end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Geçiş olasılıkları matrisleri, stokastik matrisler olduğu için matrisin her satırının toplamı 1'e eşittir (3.6).

$$\sum_{j=1}^{10} p_{ij} = 1 \quad (3.6)$$

Birden fazla (T) adım için geçiş matrisi, bir adımlık geçiş olasılıkları matrisinin adım sayısı kadar kuvveti alınarak bulunabilir (3.7).

$$P_T = P^T \quad (3.7)$$

Yukarıdaki matrisler ve değerler elimizdeki toplam verilerin %70'i olan 1914 eğitme verisi kullanılarak oluşturulmuştur. Mevcut gecikme durumu bilinen bir

trenin gecikme dağılım vektörü p_j, matrisin ilgili gecikme durumu satırından okunabileceği gibi; trenin başlangıç durum vektörü p ve geçiş matrisi P_G çarpımı ile bulunur (3.8).

$$p_j = p \times P_G \tag{3.8}$$

Örneğin, geçen trenin çatışma kesiminden önceki istasyona varış gecikmesi durum 2 ise, çatışma kesiminden sonraki gecikme dağılım vektörü p_j (3.10), başlangıç durum vektörü p (3.9) ile geçiş olasılıkları matrisi $P_G = P_1$ çarpımından aşağıdaki gibi elde edilir.

$$p = [0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0] \tag{3.9}$$

$$p_j = [0{,}03\ \ 0{,}32\ \ 0{,}16\ \ 0{,}07\ \ 0{,}02\ \ 0{,}08\ \ 0{,}12\ \ 0{,}12\ \ 0{,}06\ \ 0{,}02] \tag{3.10}$$

Gecikme durumlarının temsili değer vektörü e_0 (3.11) ile gösterilirse, trenin gecikme dağılım vektörü p_j ile temsili değer vektörünün transpozesi e_o^T çarpılarak (3.12) beklenen gecikme değerleri hesaplanır (3.13).

$$e_0 = [-6{,}23\ \ -1{,}28\ \ 1{,}44\ \ 3{,}51\ \ 5{,}46\ \ 8{,}42\ \ 13{,}37\ \ 19{,}39\ \ 26{,}46\ \ 37{,}13] \tag{3.11}$$

$$g_{ort} = \Sigma_{j=1}^{K} = \left(p_j * e_0^T\right) \tag{3.12}$$

$$g_{ort} = 5{,}02 \text{ dak} \tag{3.13}$$

Toplam verilerin %30'u olan 820 test verisi ile temsili değer vektörü kullanılarak bekleyen ve geçen trenlerin tahmin edilen çatışma kesiminden sonraki istasyonlardaki gecikmeleri (bekleyen trenler için varış, geçen trenler için kalkış gecikmeleri) Tablo 3.7 ve Tablo 3.8' da gösterilmiştir.

Tablo 3.7 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen kalkış gecikmeleri (30 adet örnek)

Çatışma No	Çatışan Tren No (Geçen Tren)	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyonda Gerçekleşen Kalkış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Sonraki İstasyonda Gerçekleşen Kalkış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyondaki Kalkış Gecikme Durumu	Markov Tahmini	Hata Oranı (%)
7	1208	6	5	5	11,96	139,15
17	1126	10	11	6	14,45	31,39
28	1410	6	8	5	11,96	49,47
31	1304	20	19	8	27,73	45,96
68	1126	2	7	3	6,40	-8,62
76	1126	5	3	5	11,96	298,58
87	1410	60	60	10	36,54	-39,10
96	1030	7	6	6	14,45	140,88
105	1322	19	20	8	27,73	38,66
113	1208	4	4	4	9,43	135,82
125	1126	12	11	7	20,93	90,32
143	3002	49	39	10	36,54	-6,31
171	1126	-2	-1	2	7,02	802,33
174	1022	-2	2	2	7,02	251,16
176	1209	1	34	3	6,40	-81,19
177	1021	27	47	9	33,71	-28,28
179	1126	16	15	7	20,93	39,57
217	1126	-5	10	1	30,58	205,83
226	1126	15	14	7	20,93	49,53
235	1410	17	19	8	27,73	45,96
252	1409	30	55	9	33,71	-38,71
328	1207	9	34	6	14,45	-57,49
338	1205	16	35	8	27,73	-20,76
350	1030	12	13	7	20,93	61,04
354	1029	36	56	10	36,54	-34,75
357	1322	26	26	9	33,71	29,64
358	1320	0	7	2	7,02	0,33
372	1022	-2	-3	2	7,02	334,11
373	1126	3	15	4	9,43	-37,11
399	1322	13	12	7	20,93	74,46

Tablo 3.7 ve Tablo 3.8' de gösterilen hata oranı (%) değerlerinin negatif olması tahmin edilen gecikme değerlerinde azalma; pozitif olması ise tahmin edilen gecikme değerlerinde artış olduğunu göstermektedir.

Tablo 3.8 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen varış gecikmeleri (30 adet örnek)

Çatışma No	Çatışan Tren No (Bekleyen Tren)	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyonda Gerçekleşen Varış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Sonraki İstasyonda Gerçekleşen Varış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyondaki Varış Gecikme Durumu	Markov Tahmini	Hata Oranı (%)
28	1205	24	45	9	35,25	-21,66
31	1001	23	40	9	35,25	-11,87
51	1322	3	9	4	16,23	80,38
103	1322	13	15	7	26,05	73,67
113	1207	-10	17	1	13,46	-20,85
143	4001	32	59	10	36,56	-38,04
171	1207	-10	9	1	13,46	49,51
176	1210	-7	16	1	13,46	-15,90
177	1126	3	17	4	16,23	-4,51
202	1206	29	38	9	35,25	-7,23
217	1207	5	21	5	14,89	-29,08
226	1321	34	54	10	36,56	-32,30
235	1205	8	31	6	18,25	-41,14
252	1206	13	14	7	26,05	86,08
271	1322	28	35	9	35,25	0,72
328	1022	-5	-1	1	13,46	1445,6
333	1126	12	21	7	26,05	24,05
338	1002	2	9	3	10,58	17,53
354	1030	13	23	7	26,05	13,27
368	1022	-2	-3	2	8,98	399,33
397	1320	4	16	4	16,23	1,46
414	1209	-3	52	2	8,98	-82,73
426	1002	0	5	2	8,98	79,60
472	1022	-2	5	2	8,98	79,60
505	1409	32	56	10	36,56	-34,72
511	1322	6	16	5	14,89	-6,92
541	1209	-9	25	1	13,46	-46,17
566	3001	25	48	9	35,25	-26,56
623	1205	19	49	8	29,65	-39,49
663	1022	-2	7	2	8,986	28,29

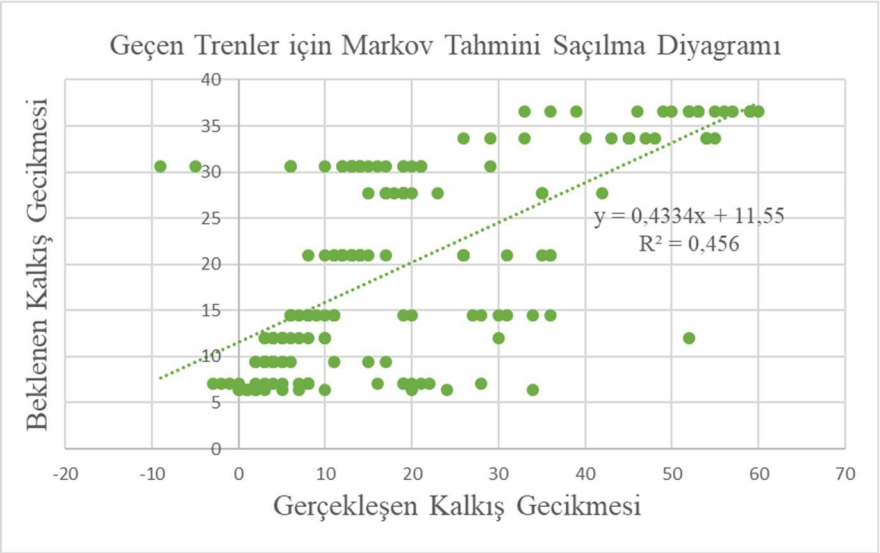
Bekleyen ve geçen trenlerin test verileri kullanılarak Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error, MAE) (3.14) ve Ortalama Karesel Hatanın Karekökü (Root Mean Square Error,RMSE) (3.15) değerleri bulunur.

$$\mathbf{MAE} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{n}} \sum_{\mathbf{j=1}}^{\mathbf{n}} |\mathbf{f_i}| \tag{3.14}$$

$$\mathbf{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{\mathbf{j=1}}^{\mathbf{n}} \boldsymbol{f_j^2}}{\boldsymbol{n}}} \tag{3.15}$$

f_i : Gerçekleşen ve tahmin edilen gecikme arasındaki fark, başka bir deyişle tahmin hatasıdır.

MAE(ortalama mutlak hata), iki sürekli değişken arasındaki farkın ölçüsüdür. RMSE ise tahmin hatalarının karesel ortalamasının karekköküdür. Bu hata ölçülerinin sıfıra yakın olması hata oranının düşük olduğunu gösterir. Denklem 3.14 ve 3.15 kullanılarak geçen trenlerin MAE değeri 10,16 dakika RMSE değeri 12,24 dakika olarak bulunmuştur. Bekleyen trenlerin MAE değeri 9,07 dakika RMSE değeri 11,41 dakika olarak bulunmuştur.

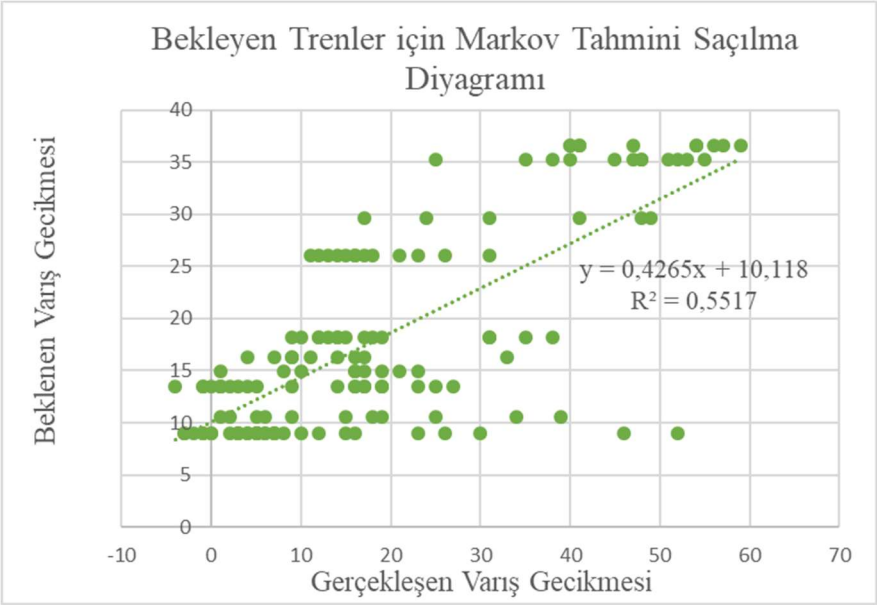


Şekil 3.4 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondan gerçek ve beklenen kalkış gecikmeleri saçılma diyagramı

Tahminlerin gerçek değerlere yakınlığını incelemek adına çatışma çözümlerinde geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyonda gerçek ve beklenen kalkış gecikmelerine ilişkin saçılma diyagramı Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Saçılma diyagramına ait eğilim doğrusunun pozitif eğime sahip olması, gerçekleşen gecikme artışının Markov tarafından algılandığını ve beklenen gecikmenin de arttığını göstermektedir. Eğimin sayısal değeri 0,43 ve belirlilik katsayısı R^2 =

0,456'dir. Bu da eğilim doğrusunun saçılma diyagramında bulunan veri çiftlerini kısmen temsil ettiğini göstermektedir.

Aynı değerlendirmeyi bekleyen trenler (Şekil 3.5) için de yapabiliriz. Eğimin sayısal değeri 0,43 ve belirlilik katsayısı R^2 = 0,55'dir. Bu da eğilim doğrusunun saçılma diyagramında bulunan veri çiftlerini kısmen temsil ettiğini göstermektedir.



Şekil 3.5 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondan gerçek ve beklenen varış gecikmeleri saçılma diyagramı

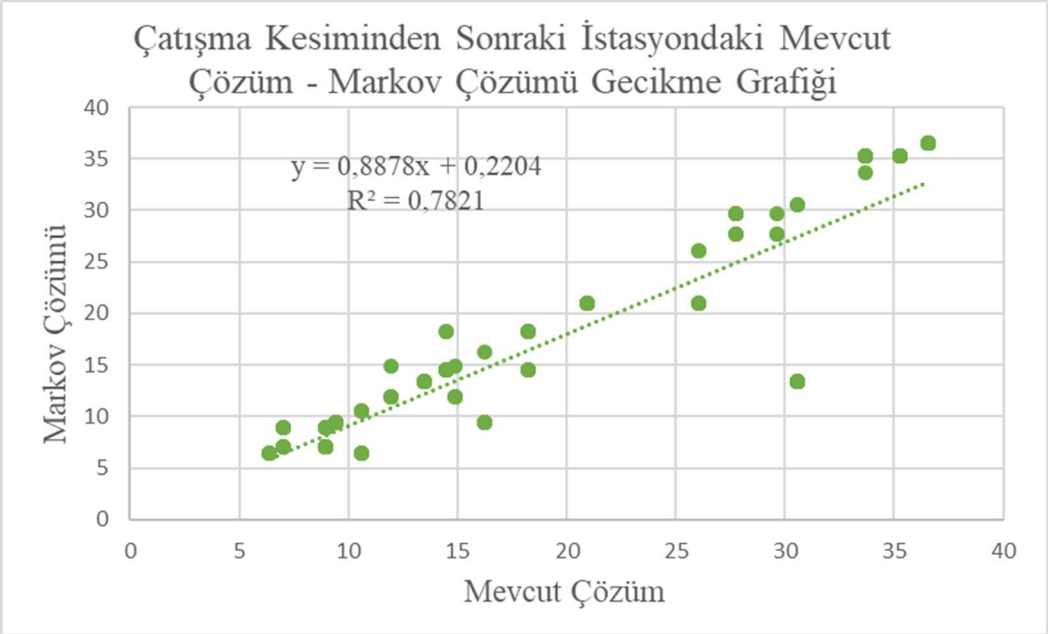
Markov tahminlerinin doğruya yakın sonuçlar vermesi, çatışma çözümlerinde karar vermeye yardımcı olabileceğini göstermiştir. Bu yaklaşımdan yola çıkarak çatışmalardaki trenlerin öncelik durumlarının değiştirilmesiyle nasıl sonuçlar elde edilebileceği incelenmiştir. Bu alternatif çözümlerde, bekleyen trenlerin çatışmadan sonraki istasyonlardaki gecikme değerlerinin tahminleri için geçen trenlerin Markov gecikme dağılım matrisi; Geçen trenlerin çatışmadan sonraki istasyonlardaki gecikme değerlerinin tahminleri için bekleyen trenlerin Markov gecikme dağılım matrisi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlardan 15 çatışma değeri Tablo 3.9'da gösterilmiştir. Bu tabloda "Mevcut Çözüm" sütunu Markov tahminini; "Alternatif Çözüm" sütunu öncelik durumlarını değiştirerek hesaplanan Markov tahmini; "Markov çözümü" sütunu ise mevcut ve alternatif çözüm durumlarından gecikmesi az olanın seçilmesiyle ortaya çıkan gecikme değerlerini ifade etmektedir.

Tablo 3.9 Gecikmelerin Markov ve Alternatif Modelle Tahmin Edilmesi

Çatışma No	Öncelik Durumu	Çatışma Kesiminden Sonraki 1: Gerçek Kalkış Gecikmesi, 0: Gerçek Varış Gecikmesi (dk)	Mevcut Çözüm (dk)	Alternatif Çözüm (dk)	Markov Çözümü (dk)
28	1	8	11,96	14,89	11,96
	0	45	35,25	33,71	35,25
31	1	19	27,73	29,65	27,73
	0	40	35,25	33,71	35,25
113	1	4	9,43	16,23	9,43
	0	17	13,46	30,58	13,46
143	1	39	36,54	36,56	36,54
	0	59	36,56	36,54	36,56
171	1	-1	7,02	8,98	7,02
	0	9	13,46	30,58	13,46
176	1	34	6,40	10,58	6,40
	0	16	13,46	30,58	13,46
177	1	47	33,71	35,25	35,25
	0	17	16,23	9,43	9,43
217	1	10	30,58	13,46	13,46
	0	21	14,89	11,96	11,96
226	1	14	20,93	26,05	20,93
	0	54	36,56	36,54	36,56
235	1	19	27,73	29,65	29,65
	0	31	18,25	14,45	14,45
252	1	55	33,71	35,25	35,25
	0	14	26,05	20,93	20,93
328	1	34	14,45	18,25	14,45
	0	-1	13,46	30,58	13,46
338	1	35	27,73	29,65	29,65
	0	9	10,58	6,40	6,40
354	1	56	36,54	36,56	36,56
	0	23	26,05	20,93	20,93
426	1	19	7,02	8,98	7,02
	0	5	8,98	7,02	8,98

İncelenen 93 çatışmanın mevcut Markov çözümü ve alternatif Markov Çözümü karşılaştırıldığında alternatif çözümle gecikme değerleri azalmış çatışma sayısı 41, gecikme değeri değişmemiş çatışma sayısı 15, gecikme değeri artmış çatışma sayısı 37 olmuştur. Veriler yüzde olarak değerlendirildiğinde alternatif çözümle % 60,2

olumlu (gecikmelerde azalma veya değişmeme) sonuç elde edilmiştir. Alternatif çözüm ile ortalama 2,03 dk gecikme tahminlerinde azalma görülmüştür.



Şekil 3.6 Markov çözümü mevcut çözüm saçılma diyagramı

Şekil 3.6'da görülen grafikte test verileri üzerinde çatışma bazında inceleme yapılmıştır. Çatışmalardaki öncelik durumları karşılıklı olarak değiştirildiği ve bu değişiklik sonucunda tahmini gecikmelerin hangi öncelik durumunda azaldığı tespit edilerek Markov çözümü olarak isimlendirilmiştir. Grafik incelendiğinde eğimin sayısal değerinin 0,8878 olduğu görülmektedir. Bu da açının 45°'den az olduğu anlamına gelir. Eğilim doğrusu eğiminin 1'den küçük olması, mevcut ve alternatif çözüm durumlarından gecikmesi az olanın seçilmesiyle ortaya çıkan gecikme değerlerinin (Markov çözümü gecikme değerlerinin), Markov zincirleri metoduyla gerçek öncelik durumlarına göre tahmin edilen gecikme değerlerinden genel olarak daha küçük olduğunu göstermektedir.

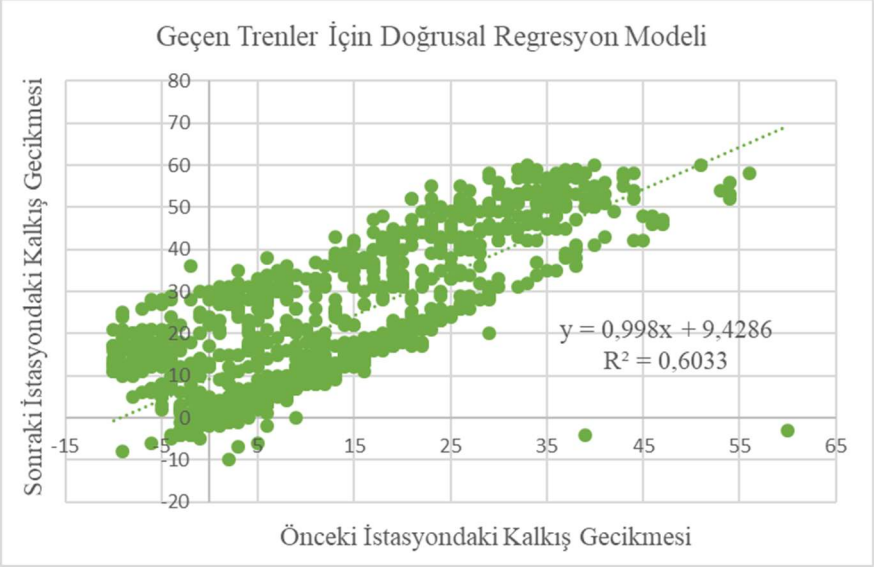
3.3 Çatışmalardaki Gecikmeleri Karşılaştırma Modeli: Doğrusal Regresyon

Doğrusal regresyon, doğrusal ve sürekli değişkenler için kullanılan bir yöntemdir. Doğrusal regresyon, iki değişken arasındaki ilişkiye dayanarak birinin değerini diğerinden tahmin etmeyi sağlayan bir denklem (model) oluşturmayı içerir. Doğrusal regresyon, bir dizi gözlem noktasına en uygun düz çizgiyi veya hiper

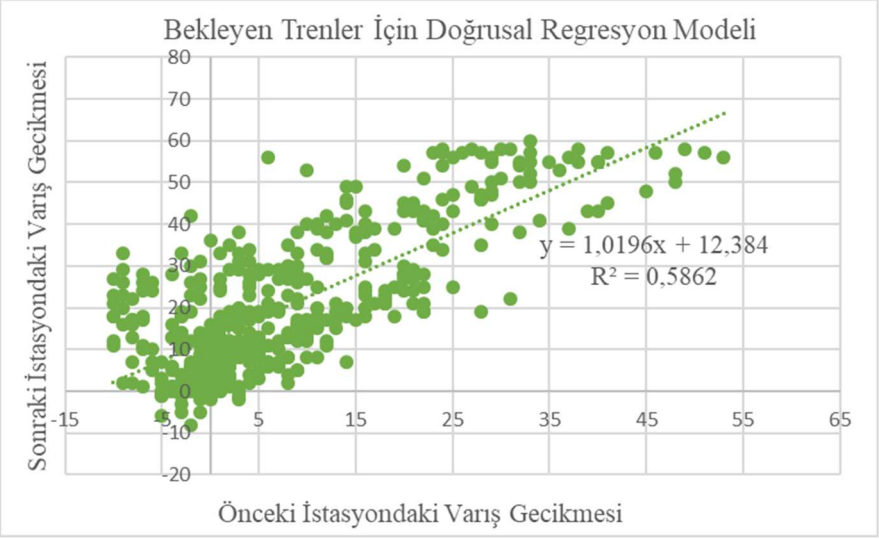
düzlemi bulmak için kullanılmaktadır. Bir diğer ifadeyle doğrusal regresyon, en uygun düz çizgi (regresyon çizgisi olarak da bilinir) kullanarak bağımlı değişken (Y) ile bir veya daha fazla bağımsız değişken (X) arasında bir ilişki kurar.

Doğrusal Regresyon Modelinde temel amaç, değişkenler arasında doğrusal ilişki gözlendiğinde geleceğe dair tahminde bulunmak, değişkenlerin birbirleri üzerinde nasıl etkide bulunduğunu incelemek ve çıkarım yapmaktır.

Şekil 3.7 ve Şekil 3.8'de gösterilen grafikler eldeki toplam verilerin %70'i olan eğitme verileri kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 3.7 Geçen trenlerin kalkış-kalkış gecikmeleri saçılma diyagramı



Şekil 3.8 Bekleyen trenlerin varış-varış gecikmeleri saçılma diyagramı

Basit Doğrusal Regresyon bağıntısında; Y bağımlı değişken (çatışma kesiminden sonraki istasyon gecikmesini), a doğru eğimini, X bağımsız değişkeni (çatışma kesiminden önceki istasyon gecikmesini) ve b (x=0 için) sabit terimi ifade etmektedir (3.16).

$$Y = aX + b \tag{3.16}$$

Bekleyen ve geçen trenler için ayrı ayrı bulunan doğrusal regresyon bağıntıları %30'luk test verisi üzerinde uygulanmıştır. Her bekleyen tren verisi için beklenen gecikme hesaplanabilir (3.17). Örneğin, Doğrusal Regresyon Modeline göre 13 dakika gecikme ile çatışma kesiminden önceki durakta olan 354 no'lu çatışmadaki 1030 no'lu bekleyen trenin sonraki istasyondaki gecikmesinin 25,64 dakika olacağı tahmin edilmektedir. Aynı tahmin Markov Zincirleri ile yapıldığında beklenen kalkış gecikmesi 26,05 dakikadır (Tablo 3.8). Gerçekleşen kalkış gecikmesi ise 23 dakikadır.

$$Y = 1{,}0196 * 13 + 12{,}384 \tag{3.17}$$

$$Y = 25{,}64 \text{ dk}$$

Yukarıdaki hesaplamalar yapılarak Tablo 3.10'da bekleyen trenler için Tablo 3.11'de ise geçen trenler için örnek veriler listelenmiştir.

Tablo 3.10 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek)

Çatışma No	Çatışan Tren No	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyona Gerçek Varış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Sonraki İstasyona Gerçek Varış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyondaki Varış Gecikmesi Durumu	Doğrusal Regresyon Tahmini	Hata Oranı (%)
28	1205	24	45	9	36,85	-18,10
31	1001	23	40	9	35,83	-10,41
51	1322	3	9	4	15,44	71,59
103	1322	13	15	7	25,64	70,93
113	1207	-10	17	1	2,19	-87,13
143	4001	32	59	10	45,01	-23,71
171	1207	-10	9	1	2,19	-75,69
176	1210	-7	16	1	5,25	-67,21

Tablo 3.10 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek) (devamı)

177	1126	3	17	4	15,44	-9,16
202	1206	29	38	9	41,95	10,40
217	1207	5	21	5	17,48	-16,75
226	1321	34	54	10	47,05	-12,87
235	1205	8	31	6	20,54	-33,74
252	1206	13	14	7	25,64	83,13
271	1322	28	35	9	40,93	16,95
328	1022	-5	-1	1	7,29	828,60
333	1126	12	21	7	24,62	17,23
338	1002	2	9	3	14,42	60,26
354	1030	13	23	7	25,64	11,47
368	1022	-2	-3	2	10,34	444,83
397	1320	4	16	4	16,46	2,89
414	1209	-3	52	2	9,33	-82,07
426	1002	0	5	2	12,38	147,68
472	1022	-2	5	2	10,34	106,90
505	1409	32	56	10	45,01	-19,62
511	1322	6	16	5	18,50	15,63
541	1209	-9	25	1	3,21	-87,17
566	3001	25	48	9	37,87	-21,10
623	1205	19	49	8	31,76	-35,19
663	1022	-2	7	2	10,34	47,78

Denklem 3.14 ve 3.15 kullanılarak bekleyen trenlerin MAE değeri 8,72 dakika RMSE değeri 10,70 dakika olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.11 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek)

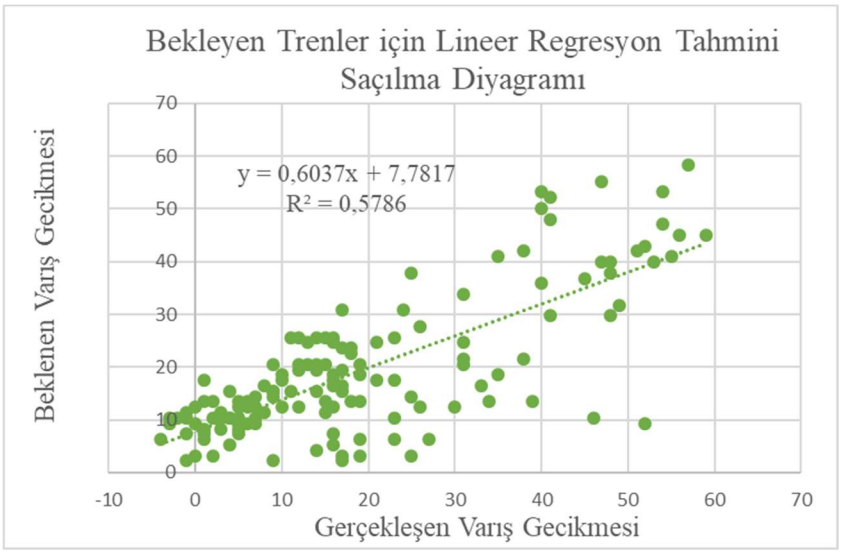
Çatışma No	Çatışan Tren No	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyondan Gerçek Kalkış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Sonraki İstasyondan Gerçek Kalkış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyondan Kalkış Gecikmesi Durumu	Doğrusal Regresyon Tahmini	Hata Oranı (%)
7	1208	6	5	5	15,42	208,33
17	1126	10	11	6	19,41	76,44
28	1410	6	8	5	15,42	92,71
31	1304	20	19	8	29,39	54,68
68	1126	2	7	3	11,43	63,21
76	1126	5	3	5	14,42	380,62

Tablo 3.11 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek) (devamı)

87	1410	60	60	10	69,31	15,51
96	1030	7	6	6	16,42	173,58
105	1322	19	20	8	28,40	41,95
113	1208	4	4	4	13,42	235,52
125	1126	12	11	7	21,41	94,59
143	3002	49	39	10	58,33	49,57
171	1126	-2	-1	2	7,433	843,2
174	1022	-2	2	2	7,43	271,63
176	1209	1	34	3	10,43	-69,33
177	1021	27	47	9	36,38	-22,61
179	1126	16	15	7	25,40	69,31
217	1126	-5	10	1	4,44	-55,61
226	1126	15	14	7	24,40	74,28
235	1410	17	19	8	26,40	38,92
252	1409	30	55	9	39,37	-28,42
328	1207	9	34	6	18,41	-45,85
338	1205	16	35	8	25,40	-27,44
350	1030	12	13	7	21,41	64,65
354	1029	36	56	10	45,36	-19,01
357	1322	26	26	9	35,38	36,06
358	1320	0	7	2	9,43	34,69
372	1022	-2	-3	2	7,43	347,7
373	1126	3	15	4	12,42	-17,18
399	1322	13	12	7	22,40	86,69

Denklem 3.14 ve 3.15 kullanılarak geçen trenlerin MAE değeri 9,71 dakika RMSE değeri 10,76 dakika olarak bulunmuştur.

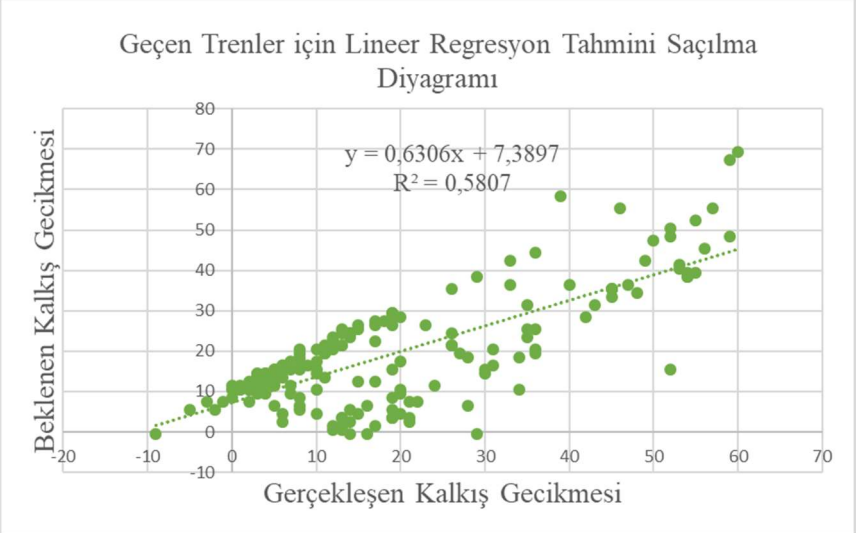
Çatışma çözümlerinde bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondaki gerçek ve beklenen gecikmelerine ilişkin saçılma diyagramı Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondaki gerçek ve beklenen varış gecikmeleri saçılma diyagramı

Saçılma diyagramına ait eğilim doğrusunun pozitif eğime sahip olması, gerçekleşen gecikme artışının Doğrusal regresyon tarafından algılandığını ve beklenen gecikmenin de arttığını göstermektedir. Eğimin sayısal değeri 0,60 ve belirlilik katsayısı $R^2 = 0,5786$'dır. Bu da eğilim doğrusunun saçılma diyagramında bulunan veri çiftlerini kısmen temsil ettiğini göstermektedir.

Aynı değerlendirmeyi geçen trenler (Şekil 3.10) için de yapabiliriz. Eğimin sayısal değeri 0,63 ve belirlilik katsayısı $R^2 = 0,5807$'dir. Bu da eğilim doğrusunun saçılma diyagramında bulunan veri çiftlerini kısmen temsil ettiğini göstermektedir.



Şekil 3.10 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondaki gerçek ve beklenen kalkış gecikmeleri saçılma diyagramı

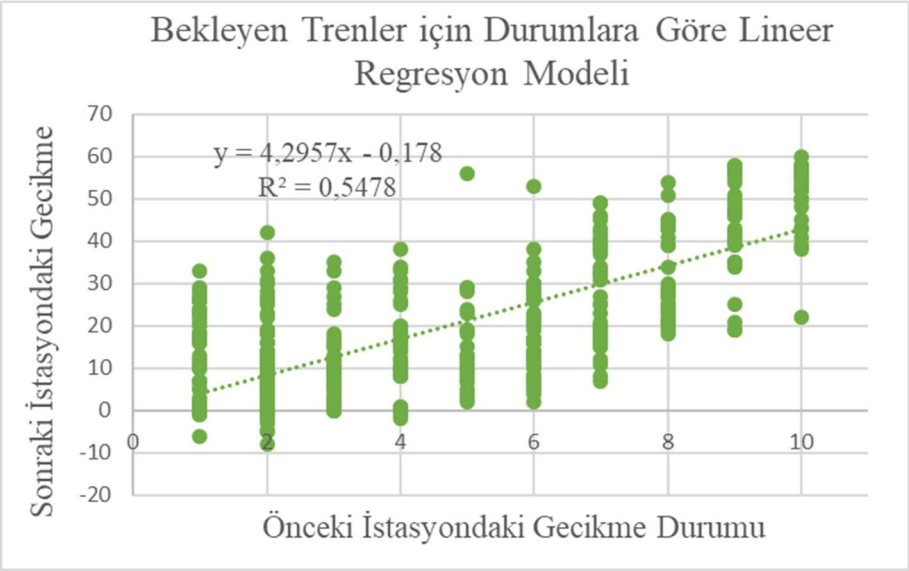
3.4 Gecikme Durumlarına Göre Gruplandırılmış Doğrusal Regresyon

Markov Zincirleri Modeli tahminleri gecikme değerlerinin gruplandırılmış haline göre yapılmıştır. Doğrusal Regresyon modelinde ise tahminler direkt gecikme değeri kullanılarak yapılmıştır. İki uygulamanın karşılaştırması söz konusu olduğunda yeterince objektif bir sonuç ortaya koymak adına Doğrusal Regresyon modeli gecikme değeri yerine Markov Zincirleri gibi gecikme durumlarına göre gruplandırılıp, model gecikme durumlarına göre tekrar kalibre edildikten sonra tahminler buna göre tekrarlanmıştır. Tablo 3.12'de bu gruplandırma değerleri görülmektedir.

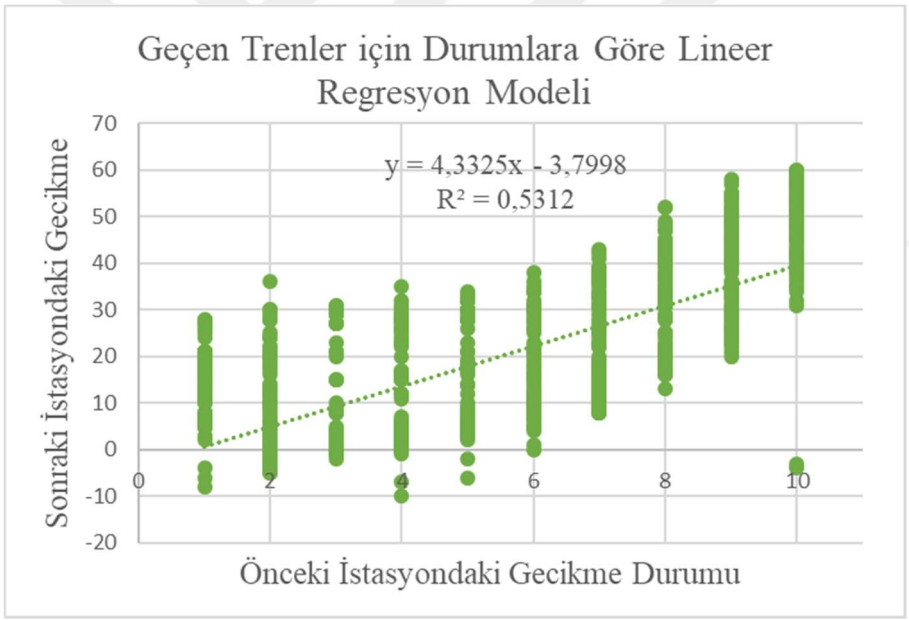
Tablo 3.12 Belirlenen gecikme durumları

Gecikme Durumu, D (i veya j)	Gecikme Değerleri, D (Dakika)	Gözlem Sayısı (N_i)
1	$x \leq -4$	112
2	$-4 < x \leq 0$	233
3	$0 < x \leq 2$	111
4	$2 < x \leq 4$	103
5	$4 < x \leq 6$	85
6	$6 < x \leq 10$	151
7	$10 < x \leq 16$	144
8	$16 < x \leq 22$	114
9	$22 < x \leq 30$	113
10	$30 < x$	126

Şekil 3.11 ve Şekil 3.12'de gösterilen grafikler eldeki toplam verilerin %70'i olan eğitme verileri kullanılarak oluşturulmuştur.



Şekil 3.11 Bekleyen trenlerin gecikme durumu ve varış gecikmeleri saçılma diyagramı



Şekil 3.12 Geçen trenlerin gecikme durumu ve kalkış gecikmeleri saçılma diyagramı

Basit Doğrusal Regresyon bağıntısında; Y bağımlı değişken (çatışma kesiminden sonraki istasyon gecikmesini), a doğru eğimini, X bağımsız değişkeni (çatışma kesiminden önceki istasyondaki gecikme durumlarını) ve b (x=0 için) sabit terimi ifade etmektedir (3.18).

$$Y = aX + b \tag{3.18}$$

Bekleyen ve geçen trenler için ayrı ayrı bulunan doğrusal regresyon bağıntıları %30'luk test verisi üzerinde uygulanmıştır. Her bekleyen tren verisi için beklenen gecikme değeri hesaplanabilir (3.19). Örneğin Durumlar Göre Doğrusal Regresyon Modelin'de 13 dakika gecikme ve D_7 durumu ile çatışma kesiminden önceki durakta olan 354 no'lu çatışmadaki 1030 no'lu bekleyen trenin sonraki istasyondaki beklenen gecikmesinin gecikmesinin 29,89 dakika olacağı tahmin edilmektedir. Aynı trene ait gecikme Markov Zincirleri ile tahmin edildiğinde beklenen kalkış gecikmesi 26,05 dk (Tablo 3.8) ve Doğrusal Regresyon modelinde 25,64 dk'dır. (Tablo 3.9). Gerçekleşen kalkış gecikmesi ise 23 dakikadır.

$$Y = 4{,}2957 * 7 + 0{,}178 \tag{3.19}$$

$$\mathrm{Y} = 29{,}89\ \mathrm{dk}$$

Yukarıdaki hesaplamalar yapılarak Tablo 3.13'de bekleyen trenler için Tablo 3.14'de ise geçen trenler için örnek veriler listelenmiştir.

Tablo 3.13 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek)

Çatışma No	Çatışan Tren No	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyona Gerçek Varış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Sonraki İstasyona Gerçek Varış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyona Varış Gecikmesi Durumu	Gecikme Durumlarına Göre Doğrusal Regresyon Tahmini	Hata Oranı (%)
28	1205	24	45	9	38,48	-14,48
31	1001	23	40	9	38,48	-3,79
51	1322	3	9	4	17,00	88,94
103	1322	13	15	7	29,89	99,28
113	1207	-10	17	1	4,12	-75,78
143	4001	32	59	10	42,78	-27,49
171	1207	-10	9	1	4,12	-54,25
176	1210	-7	16	1	4,12	-74,26
177	1126	3	17	4	17,00	0,03
202	1206	29	38	9	38,48	1,27
217	1207	5	21	5	21,30	1,43
226	1321	34	54	10	42,78	-20,78
235	1205	8	31	6	25,60	-17,43

Tablo 3.13 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek) (devamı)

252	1206	13	14	7	29,89	113,51
271	1322	28	35	9	38,48	9,95
328	1022	-5	-1	1	4,12	511,77
333	1126	12	21	7	29,89	42,34
338	1002	2	9	3	12,71	41,21
354	1030	13	23	7	29,89	29,96
368	1022	-2	-3	2	8,41	380,45
397	1320	4	16	4	17,00	6,28
414	1209	-3	52	2	8,41	-83,82
426	1002	0	5	2	8,41	68,27
472	1022	-2	5	2	8,41	68,27
505	1409	32	56	10	42,78	-23,61
511	1322	6	16	5	21,30	33,13
541	1209	-9	25	1	4,12	-83,53
566	3001	25	48	9	38,48	-19,83
623	1205	19	49	8	34,19	-30,23
663	1022	-2	7	2	8,41	20,19

Denklem 3.14 ve 3.15 kullanılarak bekleyen trenlerin MAE değeri 9,23 dakika RMSE değeri 11,51 dakika olarak hesaplanmıştır.

Tablo 3.14 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek)

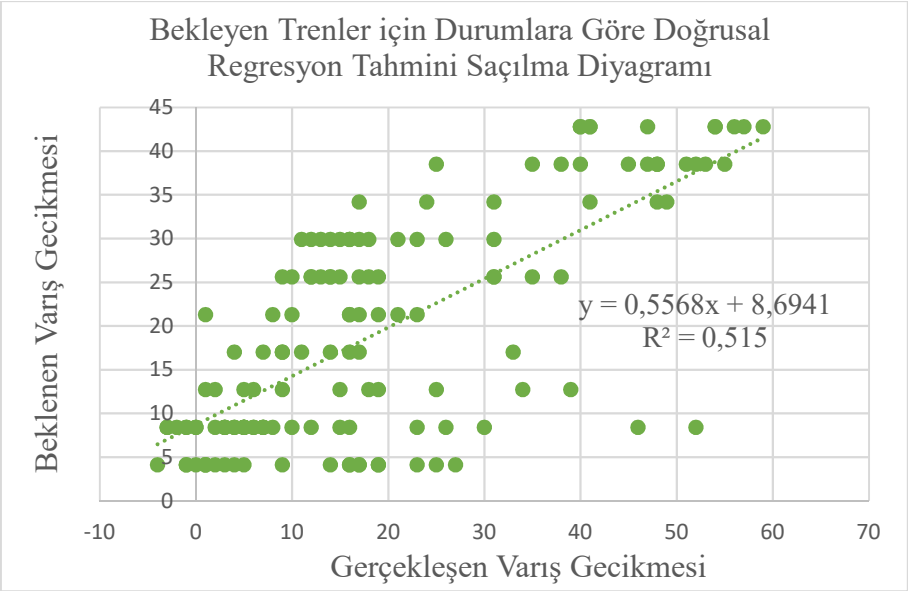
Çatışma No	Çatışan Tren No	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyondan Gerçek Kalkış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Sonraki İstasyondan Gerçek Kalkış Gecikmesi	Çatışma Kesiminden Önceki İstasyondan Kalkış Gecikmesi Durumu	Gecikme Durumlarına Göre Doğrusal Regresyon Tahmini	Hata Oranı (%)
7	1208	6	5	5	17,86	257,25
17	1126	10	11	6	22,20	101,77
28	1410	6	8	5	17,86	123,28
31	1304	20	19	8	30,86	62,42
68	1126	2	7	3	9,20	31,40
76	1126	5	3	5	17,86	495,42
87	1410	60	60	10	39,53	-34,12
96	1030	7	6	6	22,20	269,92
105	1322	19	20	8	30,86	54,30
113	1208	4	4	4	13,53	238,26

Tablo 3.14 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki tahmin edilen gecikmeleri (30 adet örnek) (devamı)

125	1126	12	11	7	26,53	141,16
143	3002	49	39	10	39,53	1,35
171	1126	-2	-1	2	4,87	586,52
174	1022	-2	2	2	4,87	143,26
176	1209	1	34	3	9,20	-72,95
177	1021	27	47	9	35,19	-25,12
179	1126	16	15	7	26,53	76,85
217	1126	-5	10	1	0,53	-94,67
226	1126	15	14	7	26,53	89,48
235	1410	17	19	8	30,86	62,42
252	1409	30	55	9	35,19	-36,01
328	1207	9	34	6	22,20	-34,72
338	1205	16	35	8	30,86	-11,83
350	1030	12	13	7	26,53	104,06
354	1029	36	56	10	39,53	-29,42
357	1322	26	26	9	35,19	35,36
358	1320	0	7	2	4,87	-30,50
372	1022	-2	-3	2	4,87	262,17
373	1126	3	15	4	13,53	-9,80
399	1322	13	12	7	26,53	121,06

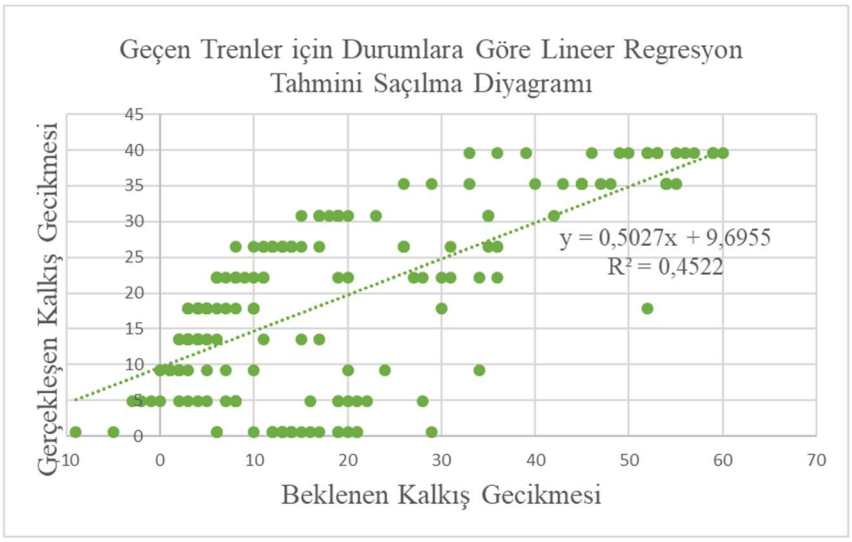
Denklem 3.14 ve 3.15 kullanılarak geçen trenlerin MAE değeri 11,05 dakika RMSE değeri 12,29 dakika olarak hesaplanmıştır.

Çatışma çözümlerinde bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondaki gerçek ve beklenen gecikmelerine ilişkin saçılma diyagramı Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondaki gerçek ve beklenen varış gecikmeleri saçılma diyagramı

Durumlara göre Doğrusal regresyon tahmini saçılma diyagramına ait eğilim doğrusunun pozitif eğime sahip olması, gerçekleşen gecikme artışının Doğrusal Regresyon tarafından algılandığını ve beklenen gecikmenin de arttığını göstermektedir. Eğimin sayısal değeri 0,56 ve belirlilik katsayısı $R^2 = 0,515$'dır. Bu da eğilim doğrusunun saçılma diyagramında bulunan veri çiftlerini kısmen temsil ettiğini göstermektedir.



Şekil 3.14 Geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyondaki gerçek ve beklenen kalkış gecikmeleri saçılma diyagramı

Aynı değerlendirmeyi geçen trenler (Şekil 3.14) için de yapabiliriz. Eğimin sayısal değeri 0,50 ve belirlilik katsayısı $R^2 = 0,4522$'dir. Bu da eğilim doğrusunun saçılma diyagramında bulunan veri çiftlerini bekleyen trenlerdeki kadar olmasa da kısmen temsil ettiğini göstermektedir.

Çalışmada gösterilen 3 analiz yöntemini karşılaştırmak ve sonuçların daha net görülmesi amacıyla MAE ve RMSE değerleri Tablo 5.1 ve Tablo 5.2'de verilmiştir.

3.5 Model Hatalarının Karşılaştırılması

Çalışmada gösterilen 3 analiz yöntemini karşılaştırmak ve sonuçların daha net görülmesi amacıyla MAE ve RMSE değerleri Tablo 3.15 ve Tablo 3.16'da verilmiştir.

Tablo 3.15 Analiz yöntemlerine göre bekleyen trenler için MAE ve RMSE değerleri

	Markov Zincirleri	**Durumlara Göre Doğrusal Regresyon**	**Doğrusal Regresyon**
MAE	**9,07**	**9,23**	**8,72**
RMSE	**11,41**	**11,51**	**10,70**

Tablo 3.16 Analiz yöntemlerine göre geçen trenler için MAE ve RMSE değerleri

	Markov Zincirleri	**Durumlara Göre Doğrusal Regresyon**	**Doğrusal Regresyon**
MAE	**10,16**	**11,05**	**9,71**
RMSE	**12,25**	**12,29**	**10,76**

Bekleyen ve geçen tren analizleri incelendiğinde bekleyen trenler için yapılan tahminlerin geçen trenlere göre küçük bir farkla da olsa gerçeğe daha yakın

sonuçlar verdiği görülmektedir. Kullanılan yöntemleri karşılaştırmak gerekirse; uygulanan analiz yöntemlerinin üçünde de birbirine yakın sonuçlar elde edilebildiği söylenebilir. Doğrusal Regresyonun görece daha başarılı çalıştığı da görülmektedir. Ancak Markov zincirleri ve durumlara göre doğrusal regresyonda gecikme durumlarına göre analiz yapıldığı için ikisini karşılaştırmak daha doğru olacaktır. Bu açıdan bakılırsa Markov zincirleri yönteminin durumlara göre doğrusal regresyona göre küçük bir farkla daha doğru sonuçlar verdiği söylenebilir.

4
SONUÇ

İstanbul-Ankara kentlerini bağlayan bu demiryolu hattının Arifiye-Çukurhisar kesiminde çalışan yolcu trenlerinin performansına ilişkin incelemeler yapılmıştır. Bu araştırma ve incelemede; Ağustos, Eylül ve Ekim (2007) aylarında, 00:00- 23:59 saatleri arasında hattın Arifiye-Çukurhisar kesiminde çalışmış olan trenlerin işletim performansları planlanan zamanlarına bağlı olarak incelenmiştir. Burada trenlerin gerçekleştirdiği çatışmalar özelinde gecikmelerin analizleri ve çözümleri üzerinde yoğunlaşılmıştır.

Arifiye-Çukurhisar demiryolu hattında trenlerin seferleri sırasında gerçekleşen çatışma durumlarında, bekleyen ve geçen (öncelik verilen) trenlerin gecikme verileri istatistiksel olarak incelenmiş, bu verilerin dağılımları ile ilgili çeşitli grafikler elde edilmiştir.

Arifiye-Çukurhisar kesiminde çalışan trenlerin seyir esnasında gerçekleştirdiği çatışmalardaki öncelik durumları tespit edilip bu trenlerin varış ve kalkış gecikmeleri analiz edilmiştir. Çalışmada gözlemlenen 1248 çatışma verisi incelendiğinde bekleyen trenlerdeki varış-varış gecikmeleri ortalamasının 13,80 dk ve standart sapmasının 15,83 dk olduğu, geçen trenlerdeki kalkış-kalkış gecikmeleri ortalamasının 17,17 dk standart sapmasının 16,65 dk olduğu yapılan hesaplamalarda ortaya konmuştur. İncelenen trenlerin çatışma kesiminden önceki ve sonraki gecikmeleri ayrı ayrı incelendiğinde ise; bekleyen trenlerin çatışma kesiminden önceki istasyonlara varış gecikmelerinin ortalaması 7,81 dk standart sapması 12,42 dk; bekleyen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyonlara varış gecikmelerinin ortalaması 19,79 dk standart sapması 16,6 dk; geçen trenlerin çatışma kesiminden önceki istasyonlara varış gecikmelerinin ortalaması 12,47 dk standart sapması 13,33 dk; geçen trenlerin çatışma kesiminden sonraki istasyonlara varış gecikmelerinin ortalaması 21,87 dk standart sapması 18,23 dk olduğu tespit edilmiştir. Bu durum öncelik verilen trenlerin çoğunlukla çatışmaya girmeden önce zaten gecikmiş olduğunu göstermektedir. Bu sonuçtan yola çıkarak trenlere öncelik verirken var olan gecikmeyi azaltmaya yönelik hareket edildiği söylenebilir. Aynı zamanda trenlere öncelik verilse de bekletilse de gerçekleşen çatışma sonucunda gecikmelerin arttığı görülmektedir.

Gecikmeli kalkışların diğer istasyonlarda bekleme sürelerini azaltarak veya istasyon ikilileri arasında seyir hızlarını arttırarak telafi edilmeleri mümkün olabilir. Ancak yolcuların istasyonlara planlanan zaman diliminde geleceği düşünülürse erken bir kalkışın gerçekleşmesi yolcuların mağduriyetine sebep olacaktır.

Çatışma durumları planlanmış olmakla beraber gecikmeli veya erken kalkış-varışların gerçekleşmesi çatışmaları başka istasyonlara kaydırabilir. Çatışma beklenen istasyonda herhangi bir trenin seyrine başlaması için karşıdan gelen trenin hattı boşaltması göz önünde bulundurularak hesaplanmış bir bekleme süresi vardır. Bu normal bekleme süresinden fazla olabilmektedir. Ancak çatışmaların başka istasyonlara kayması çatışma beklenen istasyonlardaki bekleme süresini azaltabilir ve çatışmanın kaydığı istasyonlardaki planlanan bekleme sürelerini arttırabilir. Bu da bekleme sürelerine bağlı olarak gecikmeli kalkışların gerçekleşmesine sebep olabilmektedir. Bu durum karşı yönlerden gelen trenlerin gecikmeleri anlık hesaplanıp çatışma istasyonları değiştirilerek telafi edilebilir. Anlık hesaplamaların hızlı şekilde gerçekleştirilebilmesi için Markov zincirleri gibi stokastik modellerin uygulanabilirliği önem arz etmektedir.

Tüm bu incelemeler sonucunda, ara istasyonlarda erken varışların, erken kalkışa sebep olduğu ve yolcuların treni kaçırma ihtimalini doğurduğunu, geç kalkış ve geç varışların ise aktarma yapacak yolcular için problem teşkil edeceği saptanmıştır. Bu bakımdan ister erken ister geç kalkış-varışlar olsun, çizelgeye uygunluk önem arz etmektedir.

Tren hareketlerindeki rastgeleliğin getirdiği belirsizlik, tren trafiği için geliştirilen modellerin önemli bir parametresidir. Çalışma kapsamında geliştirilen Markov zinciri modeli, trenlerin istasyonlar arasındaki seyirleriyle ilgili rastgeleliği stokastik bir süreç olarak modellemektedir. Bu model aracılığıyla; çatışmalı durumların gecikme sürelerini nasıl etkilediği üzerinde yorum yapılabilmiştir. Arifiye-Çukurhisar hattı için elde edilen geçiş olasılıkları matrisinde köşegen üzerindeki elemanlar mevcut gecikme durumlarının korunma olasılıklarını, köşegenin sağında yer alan elemanlar gecikme değerlerinin büyüme olasılıklarını ve köşegenin solunda yer alan elemanlar gecikme değerlerinin azalma olasılıklarını göstermektedir. Köşegenin sağında yer alan olasılıkların, solunda yer alanlara göre daha büyük olması, çatışmaların gecikmeleri arttırdığını göstermektedir. Çatışma

durumları, gecikmelerin oluşmasında ve gecikme değerlerinin büyümesinde önemli bir faktördür.

Raylı sistemler kullanıcılarına dayanıklı, dengeli ve kararlı bir ulaşım olanağı sağlamalıdır. Ancak, işletimdeki iç ve dış kaynaklı belirsizlikler planlanan hizmetlerin aksamasına neden olabilmektedir. Bu çalışmada, bekleyen ve geçen trenler için homojen Markov matrisleri oluşturulmuş oluşturulmuş ve gecikme tahminleri bu matrisler yardımıyla yapılmıştır. Burada sadece ikincil (aktarılan) gecikmeler dikkate alınmıştır. Çalışmanın ileri aşamalarında, daha isabetli tahminler yapabilmek için, birincil gecikmelerin kaynakları sınıflandırılarak homojen olmayan Markov matrisleri geliştirilebilir ve gecikme tahminleri bunlar yardımıyla yapılabilir.

Tren işletimine ilişkin istatistiksel yöntemlerin demiryolu idareleri tarafından ölçme ve değerlendirme hatta karar verme aracı olarak kullanılması gerekmektedir. Bu yolla sunulan hizmetin niteliği ve verimliliği arttırılabilir, gerekli düzenlemeler yapılabilir ve alınması gereken önlemler alınabilir. Veri analizi, demiryolu işletmesine yönelik tahmin modelleri geliştirmek için kullanılabilir. Bu uygulama işletmede verimliliği ve güvenilirliği arttıracağı gibi başka olumlu sonuçlar da doğurabilecek potansiyele sahiptir.

KAYNAKÇA

[1] Y. Karabulut, Türkiye'de demiryolu ulaşımı, Ankara Üniversitesi Türkiye Coğrafyası Araştırma ve Uygulama Merkezi Dergisi, 1997, 6, pp. 163-187.

[2] İ. Şahin, Railway traffic control and train scheduling based oninter-train conflict management, Transportation Research Part B: Methodological, 1999, 33(7), pp. 511-534.

[3] İ. Şahin, S. Zırhlı, S., Tren İşletiminde İstatistiksel Analizler, Yedinci Uluslararası İnşaat Mühendisliğinde Gelişmeler Kongresi, 2006, pp. 1-2

[4] R.M. Goverde, A Delay Propagation Algorithm for Large-Scale Railway TrafficNetworks, Transportation Research 2010, part C, 18, pp. 269-287.

[5] P. Kecman, F. Corman, A. D'Ariano & R.M. Goverde, Rescheduling models for railway traffic management in large-scale networks, Public Transport, 2013, 5(1-2), pp. 95-123.

[6] S. Narayanaswami, & N. Rangaraj, Modelling disruptions and resolving conflicts, optimally in a railway schedule, Computers & Industrial Engineering, 2013, 64(1), pp. 469-481.

[7] A. Landex, Gis analyses of railroad capacity and delays, In Proceedings of ESRI User Conference, San Diego, California, USA, 2009, pp. 1-10.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. M.Ş. Artan, İ. Şahin, İ. Olgay, Statistical Analysis Of Punctuality In Railway Operations, International OECD Studies Conference on Engineering, Technology & Robotics, Ankara, 2020