

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**RAYLI SİSTEM KAZALARININ ANALİZİ İÇİN BAYES AĞI TABANLI BİR
YAKLAŞIM**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Derya CEPHE

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mühendislik Yönetimi Programı

HAZİRAN 2025

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**RAYLI SİSTEM KAZALARININ ANALİZİ İÇİN BAYES AĞI TABANLI BİR
YAKLAŞIM**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Derya CEPHE
(507211231)**

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Mühendislik Yönetimi Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Umut ASAN

HAZİRAN 2025

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**A BAYESIAN NETWORK-BASED APPROACH FOR ANALYZING RAILWAY
ACCIDENTS**

M.Sc. THESIS

**Derya CEPHE
(507211231)**

Department of Industrial Engineering

Engineering Management Programme

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dr. Umut ASAN

JUNE 2025

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 507211231 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Derya CEPHE, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “RAYLI SİSTEM KAZALARININ ANALİZİ İÇİN BAYES AĞI TABANLI BİR YAKLAŞIM” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Umut ASAN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Seçkin POLAT**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Nihan Çetin DEMİREL
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **30.05.2025**
Savunma Tarihi : **17.06.2025**





Aileme,



ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının fikrîsel oluşumundan uygulama sürecine kadar geçen her aşamada, engin bilgi birikimi, yol göstericiliği ve sabrıyla bana destek olan çok değerli danışmanım Doç. Dr. Umut ASAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Her zaman yanımda olan, bana koşulsuz destek veren sevgili annem Meryem CEPHE ve babam Alaattin CEPHE'ye yaşamım boyunca olduğu gibi bu zorlu süreçte de varlıklarıyla gücümü artırdıkları için minnettarım.

Ve hayatımın en kıymetli eşlikçisi, bu sürecin her anında sabrıyla, sevgisiyle ve anlayışıyla yanımda olan eşim Kubilay DELİBAŞI'na, verdiği sonsuz desteği için en derin teşekkürlerimi sunarım.

Haziran 2025

Derya CEPHE
Emniyet / Sistem Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xv
ÖZET	xix
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
1.1 Konu ve Kapsam	1
1.2 Problem Tanımı ve Çalışmanın Amacı	1
1.3 Önerilen Yöntem ve Literatüre Katkı	2
1.4 Tezin Akışı	3
2. RAYLI SİSTEMLERE BİR BAKIŞ	5
2.1 Genel Bilgi ve Önemi	5
2.2 ERA- Avrupa Birliği Demiryolları Ajansı	5
2.2.1 ERA'nın emniyet kültürü yaklaşımı	6
2.2.2 ERA raporları ve kaza verilerinin analizi	7
2.3 Literatür	9
3. YÖNTEM	13
3.1 Bayes Ağı Yöntemi	13
3.1.1 Tanımı ve matematiksel ifadesi	13
3.1.2 Ağ yapısı	14
3.1.3 Bayes ağlarının avantajları dezavantajları	15
3.2 Yöntem Aşamaları	16
3.2.1 Niteliksel aşama	16
3.2.2 Niceliksel aşama	17
3.3 Modelleme Yaklaşımı	17
4. UYGULAMA VE BULGULAR	19
4.1 Bayes Ağı'nın Kurulması	19
4.1.1 Niteliksel aşama	19
4.1.1.1 Veri toplama süreci	19
4.1.1.2 Değişkenlerin tanımlanması	20
4.1.1.3 Ön analiz	27
4.1.1.4 Ağ yapısının belirlenmesi	33
4.1.2 Niceliksel aşama	37
4.1.2.1 Olasılıkların belirlenme yöntemi ve koşullu olasılık tablolarının oluşturulması	37
4.1.2.2 Eksik veri ve belirsizlik durumları (varsayımlar)	42
4.2 Model Analizleri	43

4.2.1	Mevcut durum analizi (temel senaryo)	44
4.2.2	Alternatif senaryolar	47
4.2.2.1	Senaryo-1 kötümsenar.....	47
4.2.2.2	Senaryo-2 iyimser	48
4.2.2.3	Senaryo-3 kaza tipi: çarpışma	49
4.2.2.4	Senaryo-4 kaza tipi: raydan çıkma	50
4.2.2.5	Senaryo-5 kaza tipi: araç arızası & yangını	51
4.2.2.6	Senaryo-6 kaza tipi: hemzemin geçit	52
4.2.2.7	Senaryo-7 kaza nedeni: çevre.....	53
4.2.2.8	Senaryo-8 kaza nedeni: ekipman.....	54
4.2.2.9	Senaryo-9 kaza nedeni: insanSİ	55
4.2.2.10	Senaryo-10 kaza nedeni: insanSD.....	56
4.3	Bulguların Yorumlanması ve Çıkarımlar	57
3.3.1.	Senaryo karşılaştırması	58
3.3.2.	Kaza nedeni & kaza tipi ilişkisi.....	60
3.3.3.	Eyaletlerin kaza sonuçlarına etkisi	61
4.4	Model Doğrulama ve Geçerlilik	63
4.4.1	Uzman esaslı geçerlilik	63
4.4.2	Geçmiş verilerle doğrulama	63
4.4.3	Senaryo analizleri ile geçerlilik.....	64
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER	67
KAYNAKLAR.....	69	
EKLER	73	
ÖZGEÇMİŞ.....	77	

KISALTMALAR

AHS	: Analitik Hiyerarşı Süreci
BA	: Bayes Ağı
BEU	: Almanya Federal Demiryolu Kazaları İnceleme Bürosu
ERA	: Avrupa Birliği Demiryolu Ajansı
ERTMS	: Avrupa Demiryolu Trafik Yönetim Sistemi
FRAM	: Functional Resonance Analysis Method
HFACS	: Human Factors Analysis and Classification System
ISM	: Interpretive Structural Modeling
İnsanSİ	: Sistem İçerisindeki İnsan
İnsanSD	: Sistem Dışındaki İnsan
KOT	: Koşullu Olasılık Tablosu
SCM	: Safety Culture Model
SPSS	: Statistical Package for the Social Sciences
STAMP	: System-Theoretic Accident Model and Processes



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : Mevsim değişkeni.....	21
Çizelge 4.2 : Kaza dönemi değişkeni	22
Çizelge 4.3 : Tren operasyon saatleri değişkeni	22
Çizelge 4.4 : Kaza tipi değişkeni	23
Çizelge 4.5 : Ölü durumu değişkeni	23
Çizelge 4.6 : Yaralı durumu değişkeni	23
Çizelge 4.7 : Tren tipi değişkeni.....	24
Çizelge 4.8 : Kaza seviyesi değişkeni.....	24
Çizelge 4.9 : Eyalet değişkeni	25
Çizelge 4.10 : Kaza nedeni değişkeni.....	25
Çizelge 4.11 : Maliyet değişkeni	26
Çizelge 4.12 : Otomasyon seviyesi değişkeni	27
Çizelge 4.13 : Bakım değişkeni	27
Çizelge 4.14 : Boş ilişki matrisi.....	29
Çizelge 4.15 : Dolu ilişki matrisi.....	31
Çizelge 4.16 : İlişki yön değerlendirmesi.....	33
Çizelge 4.17 : Örnek kaza dönemi ve tren operasyon saatleri değişkenleri arasındaki ilişkiyi gösteren pivot tablo.....	38
Çizelge 4.18 : Kaza nedeni – tren tipi değişkeni için veriye dayalı KOT	40
Çizelge 4.19 : Kaza nedeni değişkeni için otomasyon seviyesi	41
Çizelge 4.20 : Kaza nedeni değişkeni için bakım değişkeni	41
Çizelge 4.21 : Senaryoların karşılaştırması	60
Çizelge A.1 : Bileşik KOT.....	74
Çizelge A.2 : Normalize edilmiş bileşik KOT	75



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Raylı sistem kazalarının ülkelere göre tahmini ekonomik maliyetleri (Union Agency For Railways, 2024).....	8
Şekil 2.2 : 2020–2022 Döneminde milyon tren-km başına demiryolu kaynaklı ölüm oranları (Union Agency For Railways, 2024).	9
Şekil 3.1 : Örnek bir bayes ağı.....	15
Şekil 3.2 : Bayes ağı modelleme süreci akış diyagramı	18
Şekil 4.1 : Model değişkenleri	21
Şekil 4.2 : Temel ağ yapısı	34
Şekil 4.3 : Güncellenmiş ağ yapısı	36
Şekil 4.4 : Veriye dayalı doldurulan değişken örneği.....	39
Şekil 4.5 : Otomasyon seviyesi değişkeni KOT	39
Şekil 4.6 : Bakım değişkeni KOT	40
Şekil 4.7 : Mevcut durum GeNle modeli	44
Şekil 4.8 : Senaryo-1 GeNle modeli	47
Şekil 4.9 : Senaryo-2 GeNle modeli	48
Şekil 4.10 : Senaryo-3 GeNle modeli	49
Şekil 4.11 : Senaryo-4 GeNle modeli	50
Şekil 4.12 : Senaryo-5 GeNle modeli	51
Şekil 4.13 : Senaryo-6 GeNle modeli	52
Şekil 4.14 : Senaryo-7 GeNle modeli	53
Şekil 4.15 : Senaryo-8 GeNle modeli	54
Şekil 4.16 : Senaryo-9 GeNle modeli	55
Şekil 4.17 : Senaryo-10 GeNle modeli	56
Şekil 4.18 : Kaza nedenlerine göre kaza tipi dağılımı	61
Şekil 4.19 : Eyaletlere göre ölüm ve yaralanma oranları.....	62



RAYLI SİSTEM KAZALARININ ANALİZİ İÇİN BAYES AĞI TABANLI BİR YAKLAŞIM

ÖZET

Küresel ölçekte artan nüfus, kentleşme dinamikleri ve çevresel sürdürülebilirlik hedefleri, günümüzde ulaşım sistemlerine yönelik talepleri büyük ölçüde artırmakta; buna bağlı olarak emniyetli, verimli ve çevreye duyarlı ulaşım çözümleri geliştirilmesi kaçınılmaz hale gelmektedir. Bu bağlamda raylı sistemler, yüksek yolcu taşıma kapasiteleri, düşük karbon salımı, trafik sıkışıklığını azaltıcı etkisi ve zamanında hizmet sunabilmeleri nedeniyle birçok ülkenin stratejik ulaşım politikalarında öncelikli altyapı yatırımı olarak değerlendirilmektedir. Ancak, bu sistemlerin güvenilirliğinin sağlanması yalnızca teknolojik yatırımlarla sınırlı kalmayıp, aynı zamanda risk odaklı ve sistematik bir emniyet yönetimi yaklaşımıyla mümkün olabilmektedir.

Raylı sistemlerde meydana gelen kazalar, yalnızca teknik ve ekonomik bir sorun değil, aynı zamanda doğrudan insan hayatını tehdit eden toplumsal ve etik bir meseledir. Bu kazalar; can kayıpları, yaralanmalar, kalıcı travmalar ve kamuoyunda güvensizlik gibi olumsuz sonuçlara yol açmaktadır. Her kaza, sadece doğrudan etkilenen bireyleri değil, dolaylı olarak tüm toplumun toplu taşımaya olan yaklaşımını da derinden etkileyebilmekte; bu da sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşılmasında ciddi bir tehdit oluşturmaktadır. Dolayısıyla, yalnızca kazaların sonuçları değil, bu sonuçlara neden olan faktörlerin çok boyutlu ve nedensel yapılar temelinde analiz edilmesi hayati öneme sahiptir.

Bu tez çalışması, raylı sistemlerde meydana gelen kazaların ardında yatan çok boyutlu neden-sonuç ilişkilerini daha derinlemesine analiz edebilmek amacıyla, belirsizlik altında karar verme süreçlerinde güçlü bir araç olan Bayes Ağı (Bayesian Network) yaklaşımını temel alan özgün bir model geliştirilmiştir. Raylı sistem kazaları; insan hatası, teknik arızalar, çevresel koşullar ve sistem dışı etkiler gibi birçok faktörün karmaşık etkileşimi sonucunda ortaya çıkmakta ve bu faktörler çoğunlukla birbirinden bağımsız değil, karşılıklı nedensel bağlantılar içeren yapılar olarak şekillenmektedir. Bu durum, geleneksel analiz yöntemleriyle sınırlı kalan doğrusal ilişki varsayımlarının ötesine geçilmesini, olasılık temelli, nedensel ve çok değişkenli modelleme tekniklerinin kullanılmasını zorunlu hale getirmektedir.

Tezin temel amacı yalnızca geçmiş verilere dayalı olarak nicel analizler yürütmek değil; aynı zamanda bu verilerin ardındaki nedensel yapıları ortaya koymak, kazalara yol açan risk faktörlerini sistematik biçimde belirlemek ve bu bulgular doğrultusunda raylı sistem emniyetinin artırılmasına yönelik proaktif politika ve strateji önerileri geliştirmektir. Bu kapsamda çalışma, Bayes Ağı'nın koşullu olasılık yapısı sayesinde, hem doğrudan hem de dolaylı etkileri aynı anda değerlendirme imkânı sunarak sistem içerisindeki belirsizlikleri modelleyebilmekte ve farklı senaryolar altında risk seviyelerinin nasıl değiştiğine dair öngörüler üretebilmektedir.

Çalışmada kullanılan yöntem, geçmiş kaza verilerinin detaylı bir şekilde sınıflandırılmasını, değişkenlerin kategorilere ayrılmasını ve değişkenler arasındaki ilişkilerin gerek istatistiksel analizler gerekse uzman görüşleriyle belirlenmesini kapsamaktadır. Bu bağlamda, geliştirilen Bayes Ağı modeli yalnızca açıklayıcı bir araç olmakla kalmayıp, aynı zamanda karar vericilere kazaların olası nedenlerini önceden tahmin etme ve müdahale önceliklerini belirleme noktasında rehberlik edecek bir karar destek mekanizması işlevi de görmektedir.

Bu doğrultuda model, Almanya Federal Demiryolu Kazaları İnceleme Bürosu (Germany Federal Railway Accident Investigation Board, BEU) tarafından 2007–2023 yılları arasında yayımlanmış 300’ün üzerinde detaylı kaza raporu üzerinden elde edilen verilerle yapılandırılmıştır. Bu veri seti, kazaların tarihsel dağılımı, coğrafi konumları, nedenleri, sonuçları ve tren özellikleri gibi çok çeşitli parametreleri kapsamaktadır. BEU raporlarının detaylı içerikleri, modelin istatistiksel geçerliliği ve bağlama uygunluğu açısından değerli bir temel sağlamıştır.

Bayes Ağı yöntemi, değişkenler arasındaki koşullu bağımlılıkları yönlendirilmiş döngüsüz çizgeler üzerinden modelleyebilen güçlü bir araçtır. Bu yöntem, yalnızca veriye dayalı değil, aynı zamanda uzman görüşüyle desteklenebilen yapılar oluşturulmasına da olanak tanımaktadır. Bu bağlamda çalışmada önerilen yaklaşım iki temel aşamada yürütülmüştür: (1) niteliksel modelleme süreci ve (2) niceliksel olasılık modellemesi süreci.

Niteliksel modelleme sürecinde, BEU verileri analiz edilerek toplam 13 değişken tanımlanmıştır. Değişkenler arasındaki ilişkiler önce pivot tablolar üzerinden görselleştirilmiş; ardından Ki-kare bağımsızlık testi ile istatistiksel anlamlılık sınanmış; ilişki gücü ise Cramér’s V katsayısı yardımıyla ölçülmüştür. Bu analizler sonucunda, modelde yer alacak güçlü bağlantılar belirlenmiş ve ağ yapısının iskeleti oluşturulmuştur.

Yapının kurulmasının ardından, alanında uzman üç emniyet yöneticisinin görüşleri doğrultusunda değişkenler arasındaki nedensel yönler netleştirilmiş; literatür bilgisi ve alan deneyimiyle desteklenmiştir. Bu sayede yapı yalnızca istatistiksel olarak değil, sektörel bağlamda da anlamlı olacak şekilde tasarlanmıştır.

Niceliksel modelleme sürecinde ise, niteliksel aşamada oluşturulan ağ yapısına bağlı olarak her bir değişken için koşullu olasılık tablosu (KOT) hazırlanmıştır. Bu tablolar, mevcut veri üzerinden hesaplanmış; eksik verilerin bulunduğu durumlarda uzman görüşlerinden faydalanılmıştır. Bu yaklaşımla hem veri temelli hem de bilgi temelli öğeler barındıran hibrit bir model ortaya çıkarılmıştır. Modelin yapılandırılmasının ardından, çeşitli senaryolar altında testler gerçekleştirilmiş ve farklı koşullar altında sistemin kaza üretme eğilimleri analiz edilmiştir.

Model çıktıları, özellikle sistem içi insan hatalarının (İnsanSİ), düşük bakım uygulamalarının ve manuel kontrol sistemlerinin raylı sistem kazalarının temel nedenleri arasında yer aldığını açıkça ortaya koymaktadır. En dikkat çeken bulgulardan biri, “İnsanSİ – Kaza Tipi” ilişkisinin modelde en güçlü etkilerden birine sahip olmasıdır. Bu ilişki, doğrudan insan kaynaklı hataların belirli kaza türleriyle yüksek korelasyon taşıdığını göstermektedir.

Eyalet düzeyinde yapılan analizlerde ise belirli coğrafi bölgelerde kaza sıklığının arttığı gözlemlenmiştir; bu bulgunun, bölgesel altyapı yatırımları, bakım sıklığı, topografya ve çevresel faktörler gibi dışsal etmenlerle ilişkili olabileceği değerlendirilmiştir. Bu değerlendirme, yerel düzeyde risk analizleri yapılması gerektiğini ve tek tip emniyet stratejilerinin her bölge için aynı derecede etkili olmayabileceğini göstermektedir.

Modelin geçerliliği, hem yapısal hem de çıktı düzeyinde çok yönlü biçimde test edilmiştir. Yapısal geçerlilik kapsamında, modeldeki değişkenler ve bunlar arasındaki nedensel bağlantılar uzman mühendisler tarafından incelenmiş ve genel ağ yapısının sektörel gerçeklikle uyumlu olduğu teyit edilmiştir. Çıktı geçerliliği testinde ise, model sonuçları BEU verileriyle karşılaştırılmış ve ölüm oranları, kaza seviyeleri ve neden türleri bakımından yüksek benzerlik elde edilmiştir. Ayrıca farklı senaryolarla yapılan analizlerde modelin öngörü gücünün tatmin edici düzeyde olduğu görülmüştür.

Bu çalışmanın literatüre katkısı, Bayes Ağı gibi esnek ve güncellenebilir bir modelleme yönteminin, raylı sistem kazalarının neden-sonuç yapısını anlamada etkili ve uygulanabilir bir yaklaşım sunduğunu göstermesidir. HFACS, STAMP, FRAM gibi geleneksel sistem temelli analiz yöntemlerinin sınırlı kaldığı durumlarda Bayes Ağı; belirsizlik altında çalışabilme, alternatif senaryolar geliştirme ve nedensel yapılar arasında olasılıksal çıkarım yapma özellikleriyle öne çıkmaktadır. Ayrıca çalışmada kullanılan hibrit yaklaşım, tarihsel veriler ile uzman bilgisini birleştirerek daha güvenilir ve bağlama duyarlı bir model ortaya koymaktadır.

Sonuç olarak, bu tez çalışması yalnızca akademik bir öneri sunmanın ötesine geçerek, raylı sistem emniyetine yönelik karar alma süreçlerinde etkin, esnek ve sürdürülebilir bir karar destek mekanizması geliştirme amacını taşımaktadır. Belirsizlik altında işleyen ve çok değişkenli yapılar içeren raylı sistem kazalarının daha sağlıklı analiz edilebilmesi için önerilen Bayes Ağı tabanlı model, gerek mevcut durumu değerlendirme gerekse risk oluşturan unsurların daha net bir şekilde ortaya konması açısından önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu yönüyle çalışma, yalnızca geçmiş kazaları sınıflamakla kalmayıp, neden-sonuç ilişkileri üzerinden sistematik analizler yapılmasına olanak tanıyan, müdahale önceliklerini belirlemeye yardımcı olan ve politika üretimine doğrudan katkı sağlayan bir yapıya sahiptir.

Geliştirilen modelin ilerleyen çalışmalarda farklı ülkelerin kaza verileriyle test edilmesi ve bu sayede kültürel, teknik ve yönetsel farklılıkların emniyet performansı üzerindeki etkilerinin karşılaştırmalı olarak incelenmesi, literatürde önemli bir boşluğu doldurabilir. Ayrıca zaman serisi verileriyle entegrasyonu sağlanarak Bayes Ağı'nın dinamik versiyonlarının kullanılması, kazaların zaman içerisindeki değişimlerini ve yapısal dönüşümleri anlamak açısından büyük bir potansiyel sunmaktadır.

Bu bağlamda, raylı sistemlerde emniyet performansını artırma hedefiyle çalışan politika yapımcılar, sistem mühendisleri, risk analistleri ve emniyet sorumluları için bu çalışma; hem analitik derinliği hem de uygulama potansiyeliyle dikkat çekici bir kaynak niteliği taşımaktadır. Modelin sunduğu ilişki temelli analizler sayesinde, karar vericilere yalnızca mevcut durumu değerlendirme değil, aynı zamanda emniyet açısından kritik olan etmenlerin daha iyi anlaşılmasını sağlayacak bilimsel bir temel sunulmaktadır. Bu yönüyle tez, teorik katkılarının yanı sıra sektörel uygulamalar için de somut ve işlevsel çıktılar üretme potansiyeline sahip olup, raylı sistem emniyetine

bütüncül bir yaklaşım geliştirmek isteyen tüm paydaşlara kapsamlı bir katkı sağlamaktadır.



A BAYESIAN NETWORK-BASED APPROACH FOR ANALYZING RAILWAY ACCIDENTS

SUMMARY

The growing global population, dynamics of urbanization, and environmental sustainability goals have significantly increased the demand for transportation systems. Consequently, the development of safe, efficient, and environmentally friendly transportation solutions has become inevitable. In this context, railway systems are considered a priority infrastructure investment in the strategic transportation policies of many countries due to their high passenger capacity, low carbon emissions, ability to reduce traffic congestion, and provision of timely services. However, ensuring the reliability of these systems is not limited to technological investments alone; it also requires a risk-oriented and systematic safety management approach.

Accidents occurring in railway systems are not only technical and economic issues but also social and ethical matters that directly threaten human life. These accidents lead to negative consequences such as loss of life, injuries, long-term trauma, and public distrust. Each accident can profoundly affect not only the individuals directly involved but also society's overall perception of public transportation, posing a serious threat to the achievement of sustainable transportation goals. Therefore, it is of vital importance to analyze not only the outcomes of accidents but also the multifaceted and causal structures of the underlying factors.

This thesis develops an original model based on the Bayesian Network approach, a powerful tool for decision-making under uncertainty, to conduct a deeper analysis of the multidimensional cause-effect relationships underlying railway system accidents. Railway accidents result from the complex interaction of various factors such as human error, technical failures, environmental conditions, and external influences. These factors are often not independent of each other but are interconnected through causal structures. This complexity necessitates moving beyond the linear relationship assumptions of traditional analysis methods and requires the use of probabilistic, causal, and multivariate modeling techniques.

The main objective of the thesis is not only to perform quantitative analyses based on historical data but also to reveal the underlying causal structures, systematically identify the risk factors leading to accidents, and develop proactive policy and strategy recommendations to enhance railway safety. In this context, the study utilizes the conditional probability structure of Bayesian Networks to model uncertainties within the system, enabling the simultaneous evaluation of both direct and indirect effects, and providing insights into how risk levels may change under different scenarios.

The methodology employed in this study involves the detailed classification of past accident data, the categorization of variables, and the identification of relationships between these variables through both statistical analyses and expert opinions. In this context, the developed Bayesian Network model functions not only as a descriptive tool but also as a decision support mechanism that guides decision-makers in anticipating the potential causes of accidents and prioritizing interventions accordingly.

Accordingly, the model was constructed using data extracted from over 300 detailed accident reports published between 2007 and 2023 by the Federal Railway Accident Investigation Board of Germany (BEU). This dataset includes a wide range of parameters such as the historical distribution of accidents, geographic locations, causes, consequences, and characteristics of the trains and railway lines involved. The detailed content of BEU reports has provided a valuable foundation for ensuring the statistical validity and contextual relevance of the model.

The Bayesian Network method is a powerful tool capable of modeling conditional dependencies among variables through directed acyclic graphs. This method allows for the construction of models supported not only by data but also by expert input. In this study, the proposed approach was implemented in two main stages: (1) the qualitative modeling phase and (2) the quantitative probability modeling phase.

In the qualitative modeling phase, an analysis of the BEU data led to the identification of 13 variables. The relationships among these variables were first visualized through pivot tables; then, the statistical significance of their associations was tested using the Chi-square independence test, and the strength of these relationships was measured with the Cramér's V coefficient. Based on these analyses, strong connections to be included in the model were identified, forming the structural backbone of the network.

Following the establishment of the structure, the causal directions between variables were clarified through the insights of three domain experts—safety managers and engineers—and supported by literature and field experience. As a result, the structure was designed to be meaningful not only statistically but also within the sectoral context.

In the quantitative modeling phase, conditional probability tables were constructed for each variable based on the network structure developed in the qualitative phase. These tables were calculated using available data, and expert opinions were incorporated where data was incomplete. Through this approach, a hybrid model combining both data-driven and knowledge-based components was developed. After the model was structured, it was tested under various scenarios, and the system's tendencies to generate accidents under different conditions were analyzed.

The model outputs clearly reveal that internal human errors (HumanSI), inadequate maintenance practices, and manual control systems are among the primary causes of railway accidents. One of the most striking findings is the strong influence of the "HumanSI – Accident Type" relationship, indicating a high correlation between human-induced errors and specific types of accidents.

At the state level, the analysis revealed that accident frequency increases in certain geographic regions; this finding is considered to be potentially related to external factors such as regional infrastructure investments, maintenance frequency, topography, and environmental conditions. This evaluation highlights the need for localized risk assessments and indicates that uniform safety strategies may not be equally effective in every region.

The validity of the model was tested in a multifaceted manner, both structurally and in terms of outputs. For structural validity, the variables within the model and their causal relationships were reviewed by expert engineers, who confirmed that the overall network structure aligned with sectoral realities. For output validity, the model results were compared with BEU data, showing a high degree of similarity in terms of fatality rates, accident severity levels, and cause types. Additionally, analyses conducted under different scenarios demonstrated that the model has a satisfactory level of predictive capability.

This study contributes to the literature by demonstrating that Bayesian Networks, as a flexible and updatable modeling approach, offer an effective and applicable framework for understanding the cause-effect structure of railway accidents. In situations where traditional system-based analysis methods such as HFACS, STAMP, and FRAM fall short, Bayesian Networks stand out with their ability to operate under uncertainty, generate alternative scenarios, and perform probabilistic reasoning among causal structures. Furthermore, the hybrid approach employed in this study—combining historical data with expert knowledge—has resulted in a more reliable and context-sensitive model.

In conclusion, this thesis goes beyond presenting a purely academic proposition by aiming to develop a comprehensive, effective, flexible, and sustainable decision support mechanism tailored to the safety-related decision-making processes within railway systems. By addressing the inherent uncertainty and complexity of railway accidents, the proposed Bayesian Network-based model serves as a robust analytical tool that facilitates a more accurate assessment of current safety conditions and enables the identification of risk-inducing factors with greater clarity. Through its probabilistic and multivariate structure, the model supports a deeper understanding of the underlying causal mechanisms of accidents, offering an advanced methodological alternative to traditional linear and deterministic approaches.

In this regard, the study contributes not only to the classification and retrospective analysis of past accidents but also introduces a systematic framework for conducting proactive, forward-looking evaluations. It enables the prioritization of safety interventions based on data-driven and contextually informed insights, thereby offering substantial value to safety-critical decision-making and policy formulation processes. The model's hybrid nature—combining empirical data with expert judgment—enhances its applicability across different operational contexts and strengthens its practical relevance in the field.

Future research can build on the foundations established in this study by applying the model to datasets from other countries and regions, thereby enabling cross-national comparisons and a deeper understanding of how differences in cultural, technical, regulatory, and organizational contexts affect railway safety performance. Such comparative analyses can significantly enrich the literature and support the development of region-specific safety strategies. Furthermore, integrating the model with temporal datasets and advancing toward dynamic Bayesian Networks presents an important avenue for capturing the temporal evolution of accident risks and modeling long-term structural changes in safety patterns.

Within this framework, the study emerges as a valuable reference for a wide range of stakeholders, including policymakers, system engineers, risk and safety analysts, and

academic researchers dedicated to improving railway system safety. By facilitating causal, evidence-based reasoning, the model offers not only a snapshot of the current safety landscape but also a rigorous scientific basis for understanding and addressing the most critical factors that influence accident occurrence. Consequently, this thesis provides meaningful contributions at both theoretical and practical levels, establishing itself as a resource capable of supporting holistic safety improvement initiatives across the railway industry. Its findings and methodological approach hold potential for adaptation and refinement in future studies, further enhancing the resilience, efficiency, and safety of modern railway transportation systems.



1. GİRİŞ

1.1 Konu ve Kapsam

Küresel ölçekte artan ulaşım ihtiyacı, sürdürülebilir ve emniyetli taşıma sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu bağlamda raylı sistemler; yüksek taşıma kapasitesi, enerji verimliliği ve çevresel sürdürülebilirlik gibi avantajlarıyla öne çıkmakta ve hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler için stratejik bir ulaşım alternatifi olarak değerlendirilmektedir. Ancak bu sistemlerin etkinliğinin sürdürülebilir olması, yalnızca operasyonel verimlilikle değil, aynı zamanda yüksek düzeyde emniyetin sağlanmasıyla doğrudan ilişkilidir.

Raylı sistemlerde meydana gelen kazalar; can kayıpları, yaralanmalar, maddi zararlar ve kamu güveninde azalma gibi çok boyutlu sonuçlara yol açabilmektedir. Bu nedenle, kazaların yalnızca sonuçlarıyla değil, aynı zamanda nedenleriyle birlikte sistematik biçimde analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Emniyetin artırılmasına yönelik çözüm odaklı stratejilerin geliştirilebilmesi için proaktif yaklaşımların benimsenmesi, nedensel analizlerin gerçekleştirilmesi ve belirsizlik altında çıkarım yapılmasına imkân tanıyan yöntemlerin kullanılması giderek daha fazla önem kazanmaktadır.

Bu çalışma, raylı sistemlerde emniyet yönetiminin güçlendirilmesi amacıyla demiryolu kazalarının çok değişkenli bir yapıda analiz edilmesini ve nedensel ilişkilerin ortaya konulmasını hedeflemektedir. Bu kapsamda, Bayes Ağı yöntemi kullanılarak belirsizlik altında karar destek sağlayabilen, esnek ve öngörücü bir model geliştirilmiş; modelin emniyet performansını değerlendirme kapasitesi test edilmiştir. Çalışma, Avrupa ölçeğinde kapsamlı ve güvenilir veri sağlayan Almanya örneği üzerinden yürütülmüş olup, sektörel olarak anlamlı ve genellenebilir çıktılar üretmeyi amaçlamaktadır.

1.2 Problem Tanımı ve Çalışmanın Amacı

Demiryolu emniyeti literatüründe, kazalar çoğunlukla tür ve sonuçlarına göre sınıflandırılmakta; ancak bu kazaların ardındaki çok değişkenli neden-sonuç ilişkileri

yeterince bütüncül biçimde ele alınamamaktadır. HFACS, STAMP, veri madenciliği ve NLP tabanlı yaklaşımlar fayda sağlasa da, belirsizlik içeren sistem yapısını nedensel düzeyde modelleme konusunda sınırlı kalmaktadır. Bu durum, emniyet yönetiminde proaktif ve öngörü temelli stratejiler geliştirme sürecini zorlaştırmaktadır.

Bu bağlamda araştırma problemi şu şekilde özetlenebilir: “Mevcut literatürde raylı sistem kazalarına ilişkin çok değişkenli ve belirsizlik içeren neden-sonuç ilişkilerini modelleyen karar destek yapılarının yetersizliği, bu alanda yeni yaklaşımların geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.”

Bu çalışmanın amacı, Almanya Federal Demiryolu Kazaları İnceleme Bürosu verileriyle 2007–2023 arasındaki kazaları Bayes Ağı yöntemiyle analiz ederek:

- Nedensel ilişkileri niteliksel ve niceliksel olarak incelemek.
- İstatistiksel testler ve uzman görüşleriyle modeli doğrulamak.
- Senaryo analizleriyle sistemin öngörü davranışlarını değerlendirmektir.

Çalışma, yalnızca mevcut durumu açıklamakla kalmayıp, farklı koşullarda kazaların nasıl gelişebileceğine ilişkin öngörü sunarak emniyet yönetimine katkı sağlamayı da amaçlamaktadır.

1.3 Önerilen Yöntem ve Literatüre Katkı

Bu çalışmada, raylı sistem kazalarının nedensel yapısını modellemek amacıyla Bayes Ağı yöntemi kullanılmıştır. Olasılık teorisi ve çizge kuramına dayanan bu yöntem, belirsizlik altında karar destek sağlamada güçlü bir araçtır. Modelleme süreci, hem veri temelli analizler hem de uzman görüşleriyle desteklenerek hibrit bir yaklaşımla yürütülmüştür.

Yöntem iki temel aşamadan oluşmaktadır:

- Niteliksel aşamada, BEU verileriyle değişkenler belirlenmiş; ilişkiler istatistiksel testler ve uzman görüşleriyle analiz edilmiştir.
- Niceliksel aşamada, koşullu olasılık tabloları oluşturularak model sayısal hâle getirilmiştir.

Çalışmanın literatüre katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Bayes Ağı yöntemi literatürdeki HFACS, STAMP gibi yapıların ötesine geçerek, nedensel analiz ve senaryo temelli çıkarımları birleştirmiştir.
- “İnsanSİ (Sistem İçerisindeki İnsan) / İnsanSD (Sistem Dışındaki İnsan)” ayrımıyla insan hataları daha açıklayıcı biçimde modellenmiştir.
- Eksik veri ve belirsizlik, uzman görüşüyle dengelenerek model sektörel bağlamla uyumlu hâle getirilmiştir.
- Belirsizliği dikkate almıştır.
- Gelecek için öngörü yapmaya olanak tanımaktadır.

Bu yönüyle çalışma, Bayes Ağı’nı demiryolu kazalarının analizi ve modellenmesinde uygulanabilir ve öngörücü bir araç olarak kullanarak, literatürde özgün bir örnek sunmaktadır.

1.4 Tezin Akışı

Bu tezin giriş bölümünde, artan ulaşım talebi karşısında emniyete yönelik analizlere duyulan ihtiyaç çerçevesinde raylı sistem kazalarının önemi vurgulanmış, çalışmanın temel amacı tanımlanmış ve önerilen yöntemin belirsizlik ortamlarında etkin bir karar destek aracı olarak sunduğu katkılar özetlenmiştir. İkinci bölümde, raylı sistem emniyetine dair kuramsal çerçeve çizilmiş; Avrupa Birliği Demiryolu Ajansı (European Union Agency for Railways, ERA) politikaları ve literatürdeki yöntemsel yaklaşımlar özetlenmiştir. Üçüncü bölümde, Bayes Ağı yöntemi kuramsal ve teknik yönleriyle açıklanmış; modelin niteliksel ve niceliksel kurulum süreci sunulmuştur. Dördüncü bölüm, çalışmanın uygulama aşamasını oluşturmaktadır. Bu bölümde Almanya’ya ait 2007–2023 dönemi kaza verileri analiz edilmiş; Bayes Ağı modeliyle senaryo bazlı değerlendirmeler yapılmış ve modelin geçerliliği test edilmiştir. Son bölümde ise bulgular ışığında teorik, uygulamalı ve yönetsel çıkarımlar paylaşılmış; gelecekteki araştırmalar için öneriler sunulmuştur.



2. RAYLI SİSTEMLERE BİR BAKIŞ

Bu bölümde, raylı sistemlerin küresel düzeydeki önemi ve Avrupa'daki emniyet yapıları incelenmekte; Avrupa Birliği Demiryolu Ajansı'nın politikaları ve literatürdeki temel araştırmalar üzerinden bir değerlendirme sunulmaktadır.

2.1 Genel Bilgi ve Önemi

Küreselleşen dünyada artan ulaşım talebiyle birlikte raylı sistemlerin önemi giderek artmakta; bu alana yönelik talep her geçen gün büyümektedir. Gelişmiş ve gelişmekte olan ülkelerde, raylı sistem taşımacılığı; yüksek yolcu taşıma kapasitesi, enerji verimliliği ve zaman tasarrufu gibi avantajları nedeniyle stratejik bir öncelik hâline gelmiştir. Ancak bu sistemlerin sürdürülebilir ve güvenilir bir ulaşım biçimi olarak değerlendirilebilmesi, şüphesiz yüksek emniyet düzeylerinin sağlanmasına bağlıdır.

Raylı sistem emniyetinin sağlanmasında temel öncelik, kazaların önlenmesi ve sistematik biçimde analiz edilmesidir. Zira bu kazalar; can kaybı, ağır yaralanmalar ve yüksek düzeyde maddi kayıplar gibi sonuçlara yol açarak yalnızca operasyonel sürekliliği değil, aynı zamanda kamuoyunun raylı sistemlere duyduğu güveni de zedelemektedir. Dolayısıyla bu tür kazaların azaltılması ya da tamamen önlenmesi için proaktif yaklaşımların benimsenmesi, tarihsel kaza verilerinin derinlemesine analiz edilmesi ve uzman görüşlerinin dâhil edildiği çözüm odaklı stratejilerin geliştirilmesi gerekmektedir. Böylece, raylı sistem kazalarının önüne geçilmesi ve genel emniyet seviyelerinin artırılması mümkün hâle gelecektir.

2.2 ERA- Avrupa Birliği Demiryolları Ajansı

Avrupa Birliği Demiryolları Ajansı, Avrupa genelinde demiryolu emniyeti ve sistemler arası karşılıklı işlerliğin sağlanmasından sorumlu kuruluştur. Avrupa Komisyonu'na bağlı olarak faaliyet gösteren ERA'nın temel amacı, Avrupa'da sınır ötesi, kesintisiz ve emniyetli bir demiryolu taşımacılığı altyapısının oluşturulmasına katkı sağlamaktır (ERA, 2025).

Avrupa'da raylı sistemlerin entegrasyonu ve verimliliği hem kurumsal düzenlemeler hem de altyapı kalitesi açısından büyük önem taşımaktadır. Avrupa Birliği (AB), üye ülkelerde Bağımsız Ulusal Demiryolu Düzenleyici Kurumları'nın kurulmasını zorunlu kılmış ve bu yolla ortak bir raylı sistem alanı yaratmayı hedeflemiştir. Ancak, bu sürecin ülkeler arasında farklı biçimlerde uygulandığı ve çoğu zaman ulusal yönetim yapılarının etkisiyle ayrıştığı belirtilmektedir. Diğer yandan, doğu Avrupa ülkelerinin demiryolu sistemlerinin Batı Avrupa'ya kıyasla düşük verimlilik sergilediğini, bunun temel nedenleri arasında düşük altyapı yatırımları, düşük elektrikli hat oranı ve kamu hizmeti yükümlülükleri kapsamında düşük doluluk oranlarıyla işletilen seferlerin yer aldığını vurgulamaktadır.

ERA'nın görev alanı çok yönlüdür. İlk olarak, Avrupa'daki demiryolu sistemlerinin emniyetini izleme ve geliştirme işlevini üstlenir. Bu kapsamda; güvenlik verilerinin toplanması, analiz edilmesi ve elde edilen bulgular doğrultusunda politika önerilerinin geliştirilmesi gibi faaliyetler yürütülmektedir. İkinci olarak, altyapı, araç ve işletme sistemlerine ilişkin teknik uyumu sağlamak amacıyla teknik şartnameler hazırlanmakta ve yayımlanmaktadır. Üçüncü olarak, Avrupa Demiryolu Trafik Yönetim Sistemi (European Rail Traffic Management System, ERTMS) uygulamalarında liderlik ederek, sınır ötesi taşımacılıkta teknik birlikteliğin sağlanmasına katkıda bulunmaktadır. Son olarak, ulusal güvenlik otoriteleri ile iş birliği içinde çalışarak düzenleyici süreçlerde bilgi paylaşımı ve uyumun sağlanmasına destek olmaktadır (ERA, 2025).

2.2.1 ERA'nın emniyet kültürü yaklaşımı

Avrupa Birliği Demiryolu Ajansı, raylı sistem emniyetini yalnızca teknik sistem güvenliğiyle sınırlı görmeyip, bireysel tutumlar, kurumsal davranış kalıpları ve kültürel yapılarla bütüncül şekilde ele almaktadır (ERA, 2018). Bu yaklaşımın merkezinde yer alan Avrupa Emniyet Kültürü Modeli (Safety Culture Model, SCM), emniyetin sürdürülebilirliğini sağlamayı hedefleyen üç temel bileşene dayanır: davranış kalıpları, kültürel kolaylaştırıcılar ve raylı sistem emniyet temelleri (ERA, 2020).

ERA SCM modeli; risk farkındalığı, öğrenen organizasyon yapısı, işyeri gerçekliğinin anlaşılması ve emniyetin operasyonlara entegrasyonu gibi 24 niteliksel göstergeden oluşur. Bu göstergeler, sadece teorik bir çerçeve değil, aynı zamanda

organizasyonların kendilerini değerlendirmesi için uygulamalı araçlar sunar. Bu yaklaşım, 2018 yılında yayımlanan ve 150'den fazla liderin imzaladığı European Railway Safety Culture Declaration ile politik bir taahhüt düzeyine taşınmıştır (ERA, 2018). Uygulama düzeyinde ise “Safety Culture Peer Review Handbook” sayesinde kurumların kendi kùltür düzeylerini değerlendirebilmesi ve gelişim stratejileri belirleyebilmesi sağlanmaktadır (Uluslararası Demiryolu Birliği ve ERA, 2023).

Sonuç olarak ERA'nın emniyet yaklaşımı, teknik sistem performansından çok daha öteye geçerek, insan odaklı, öğrenmeye açık ve kurumsal farkındalığı güçlendiren bir sistem güvenliği perspektifi sunmaktadır.

2.2.2 ERA raporları ve kaza verilerinin analizi

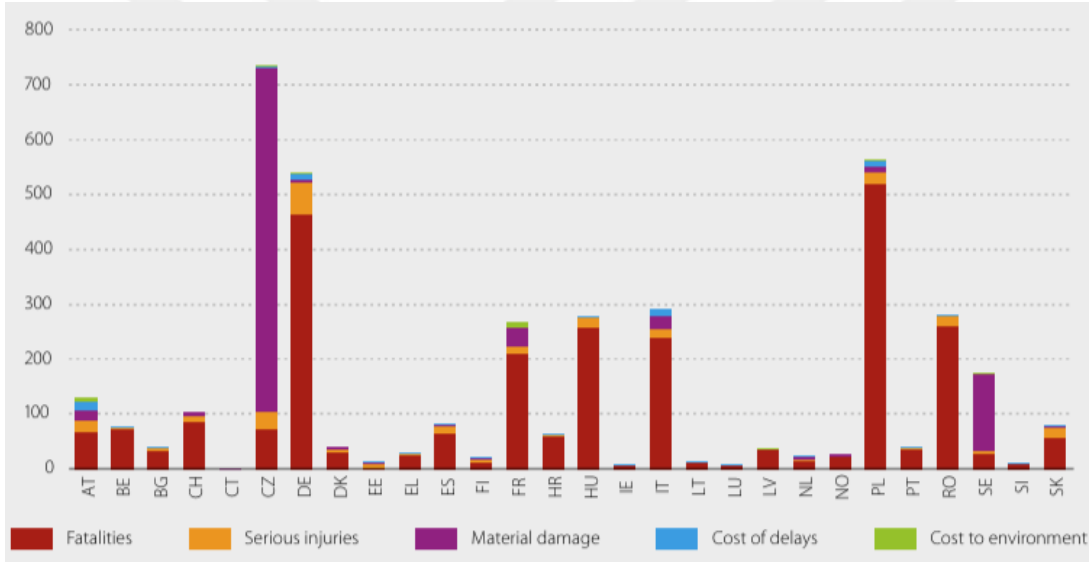
ERA, her yıl yayımladığı “Railway Safety and Interoperability in the EU” başlıklı rapor aracılığıyla Avrupa demiryolu sisteminin emniyet ve işlerlik düzeylerini izlemekte ve analiz etmektedir. Bu kapsamlı rapor, Avrupa Birliği ÷lkelerinden ve aday ÷lkelerden elde edilen emniyet verilerinin değerlendirilmesiyle oluşturulmakta, karar alıcılar için kıymetli istatistikler sunmaktadır. Örneğin, 2024 yılında yayımlanan 2022 yılına ait raporda şu bulgular yer almaktadır (Union Agency For Railways, 2024).

- AB genelinde demiryolu kazalarının toplam maliyeti yaklaşık 4 milyar Euro olarak hesaplanmıştır.
- 2010–2022 döneminde önemli kaza, ölüm ve ciddi yaralanma sayılarında genel bir azalma eğilimi gör÷lmektedir.
- 2022 yılında tren çarpışmaları ve yangınlar gibi bazı kaza türlerinde anlamlı artış yaşanmıştır.
- 1990'dan itibaren ölümc÷l çarpışma ve raydan çıkma kazalarında düşüş yaşanmasına rağmen 2020-2022 döneminde artış gözlenmiştir.
- Milyon tren-km başına düşen kaza ve ölüm oranlarında uzun vadede azalma gör÷lse de 2022 yılında geçici bir artış yaşanmıştır.

Bu bulgular göstermektedir ki, ERA tarafından yayımlanan yıllık raporlar, yalnızca geçmişteki emniyet performansını analiz etmekle kalmamakta; aynı zamanda karar vericilere geleceğe yönelik politika geliştirme süreçlerinde temel teşkil edebilecek anlamlı bir veri zemini sunmaktadır. Bu raporlar, emniyet seviyelerinin zaman

içindeki değişimini izleme, zayıf noktaları belirleme ve iyileştirme fırsatlarını değerlendirme açısından kritik öneme sahiptir.

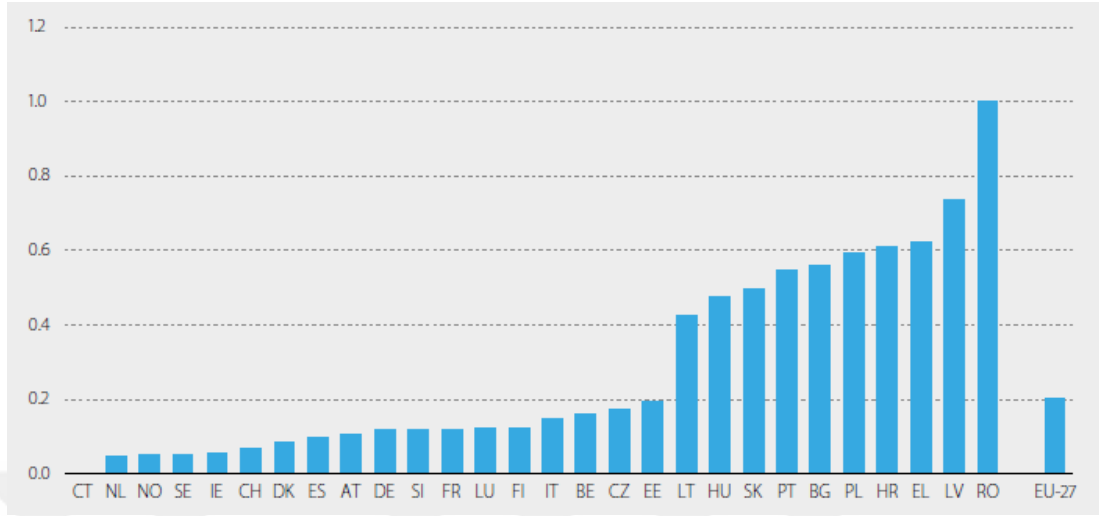
Bunun yanı sıra, söz konusu raporlar ülkeler arasındaki emniyet performansı farklılıklarını da açık biçimde ortaya koymaktadır. Özellikle raylı sistem kazalarının ekonomik etkileri açısından ülkeler arasında dikkat çekici düzeyde farklılıklar bulunmaktadır. Şekil 2.1, Avrupa ülkelerinde meydana gelen demiryolu kazalarına ilişkin tahmini maliyetleri milyon Euro cinsinden karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Grafik, bazı ülkelerde kazaların ekonomik etkisinin oldukça yüksek olduğunu ortaya koyarken, bu durumun sistem emniyeti, altyapı yatırımları ve işletme politikaları gibi çeşitli faktörlerle doğrudan ilişkili olabileceğini düşündürmektedir (Union Agency For Railways, 2024).



Şekil 2.1 : Raylı sistem kazalarının ülkelere göre tahmini ekonomik maliyetleri (Union Agency For Railways, 2024).

Benzer şekilde, 2024 yılı emniyet raporunda yer alan bir diğer önemli gösterge, milyon tren-kilometre başına düşen ölüm oranlarıdır. Şekil 2.2, 2020–2022 yılları arasındaki ortalama değerlere göre Avrupa ülkelerinin demiryolu kaynaklı ölüm oranlarını karşılaştırmalı biçimde sunmaktadır. Grafik incelendiğinde, Romanya (RO), Letonya (LV) ve Hırvatistan (HR) gibi ülkelerde bu oranların Avrupa Birliği ortalamasının belirgin biçimde üzerinde seyrettiği; buna karşılık Hollanda (NL), Norveç (NO), İsveç (SE) ve İsviçre (CH) gibi ülkelerde ise neredeyse sıfıra yakın olduğu gözlemlenmektedir. Bu durum, ulusal emniyet uygulamaları, altyapı kalitesi, bakım

politikaları, otomasyon düzeyi ve toplumsal bilinç gibi unsurların demiryolu emniyeti üzerindeki etkisini ortaya koymaktadır (Union Agency For Railways, 2024).



Şekil 2.2 : 2020–2022 Döneminde milyon tren-km başına demiryolu kaynaklı ölüm oranları (Union Agency For Railways, 2024).

2.3 Literatür

Raylı sistem kazalarının nedenlerini analiz etmeye yönelik literatür, yöntemsel çeşitlilik ve teorik zenginlik açısından oldukça gelişmiştir. Ancak bu çeşitliliğe rağmen hangi analiz yöntemlerinin sistemik karmaşıklığı daha iyi modelleyebildiği ve pratikte daha işlevsel sonuçlar sunduğu konusu hâlâ tartışmalıdır. Mevcut literatürde sistem düşüncesine dayalı yaklaşımlar (HFACS, STAMP, FRAM) ile veri madenciliği ve yapay zekâ tabanlı yöntemler öne çıkarken, Bayes Ağları gibi nedensellik temelli istatistiksel modellerin kullanımı görece azdır; oysa bu yöntemlerin sunduğu avantajlar dikkate değerdir.

Hong ve diğ. (2023) klasik yöntemlerin kazaların neden-sonuç ilişkilerini açıklamada faydalı olduğunu, ancak sistem karmaşıklığını tam anlamıyla modelleyemediğini vurgulamış ve bu boşluğu doldurmak üzere doğal dil işleme (NLP) ve metin madenciliği gibi yeni araçlara dikkat çekmiştir. Ahmadi Rad ve diğ. (2023), sistem düşüncesine dayalı kaza analiz yöntemleri olan HFACS, STAMP, AcciMap ve FRAM'i demiryolu kazaları bağlamında sistematik bir literatür taraması ve bibliyometrik analiz yoluyla incelemiştir. Çalışmada, bu yöntemler sistem kuramı temelleri, yapı ve bileşen ilişkileri ile uygulamadaki güvenilirlik, kullanılabilirlik ve görselleştirme açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bulgular,

demiryolu kazaları analizinde en yaygın kullanılan yöntemlerin HFACS ve STAMP olduğunu, FRAM'ın ise son dönemde artan bir ilgi gördüğünü göstermektedir. Bala ve Bhasin (2018), veri madenciliği tekniklerinin büyük ölçekli kaza verilerinde örüntü çıkarımı ve öngörü modelleri üretmede etkili olduğunu ortaya koymuştur.

BA (Bayes Ağı), demiryolu kazalarının nedensel ilişkiler temelinde modellenmesinde tercih edilebilecek güçlü bir yöntemdir. Bu kapsamda, farklı çalışmalarda BA yöntemi çeşitli yaklaşımlarla birleştirilerek hem öngörü hem de nedensellik analizi sağlanmıştır. Ahmadi ve diğ. (2021), Bayes Ağları'nın nedensel ilişkileri modelleme ve belirsizlik altında çıkarım yapabilme kapasitesine sahip olduğunu belirtmiş; bu yöntemi klasik yöntemlerle karşılaştırarak daha esnek ve tahmin gücü yüksek sonuçlar sunduğunu savunmuştur. Bir başka çalışmada, Meng ve Lu (2022) HFACS ile Bayes Ağlarını birleştirerek geliştirdikleri hibrit model ile 74 küresel kaza üzerinden çalışma yürütmüşler, Bayes Ağları'nın yalnızca geçmişteki nedensel ilişkileri modellemede değil, aynı zamanda olasılıksal senaryolar üretme ve duyarlılık analizi yapma gücüyle gelecekteki risk tahminlerinde de değerli bir araç olduğunu göstermiştir. Her ne kadar literatürde Bayes Ağları'nın kullanımı daha sınırlı olsada, sistematik ve dinamik yapıları sayesinde raylı sistem kazalarının analizi için güçlü ve giderek daha fazla dikkate alınması gereken bir yöntem haline gelmektedir.

Wujie ve diğ. (2022) tarafından gerçekleştirilen çalışmada, balık kılıcı diyagramı ile insan, ekipman, çevre ve yönetim kategorilerinde belirlenen nedenler Bayes Ağına entegre edilerek kaza tahmini gerçekleştirilmiş ve duyarlılık analizleriyle öncelikli risk faktörleri belirlenmiştir. Benzer şekilde, Bhuiyan ve diğ. (2023) HFACS sınıflandırmasını temel alarak insan kaynaklı kazaları Bayes modeli ile analiz etmiş ve kazaların büyük oranda sistem içi insan hatalarından kaynaklandığını ortaya koymuştur.

Huang ve diğ. (2020), ISM yöntemiyle ilişkisel yapıyı belirledikten sonra oluşturdukları BA modeli ile tehlikeli madde taşımacılığında en kritik risk faktörünü “personelin teknik bilgi eksikliği” olarak saptamıştır. Diğer yandan, Liu ve diğ. (2025) dinamik Bayes Ağı kullanarak senaryo evrimi analizine odaklanmış, bilgisayar temellerle desteklenen bu yaklaşım ile tren kazalarının farklı gelişim yolları ve müdahale senaryoları modellenmiştir.

Chen ve diğ. (2024), sahne bazlı veriyle oluşturulan bir BA modeliyle yük trenlerinde meydana gelen kazaların operasyonel bağlamda farklılaştığını göstermiştir; model özellikle tren tipi ve hat yapısının etkisini vurgulamaktadır. Zhang (2018), HFACS-RAs modeli ile insan ve organizasyonel faktörleri derinlemesine analiz etmiş, BA modeliyle bu faktörlerin ağırlıklı etkisini olasılıksal olarak değerlendirmiştir; uzman görüşleri ve AHS ile entegre edilerek modelin nesnelliği artırılmıştır.

Tüm bu çalışmalar, Bayes Ağı'nın gerek klasik gerekse dinamik ve hibrit versiyonlarıyla, demiryolu emniyet analizinde hem önleyici strateji geliştirme hem de sistemik öğrenme açısından etkili bir araç olduğunu göstermektedir.

Bu çalışma kapsamında, uluslararası raylı sistem sektöründe benimsenen emniyet yaklaşımları ile raylı sistem kaza analizlerinde kullanılan yöntemler incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, literatürde kaza analizlerinde kullanılan gruplama yapılarının ve yöntem seçiminin analiz sonuçlarını doğrudan etkilediği görülmüştür. Her ne kadar mevcut literatürde kaza türlerine yönelik sınıflandırmalar ve neden-sonuç ilişkilerine dair çeşitli teorik çerçeveler sunulmuş olsa da bu çalışmaların büyük çoğunluğu geçmiş verilere odaklanmakta; analiz süreçleri ise sınırlı sayıda değişkenle yürütülmekte ve proaktif öngörüler geliştirme açısından yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmada Almanya'ya ait raylı sistem kazaları çok değişkenli bir yapı ile derinlemesine analiz edilmiş ve Bayes Ağı yöntemi kullanılarak nedensel ilişkiler modellenmiştir. Böylece, yalnız mevcut durumun anlaşılması değil, aynı zamanda geleceğe yönelik risk tahmini ve önleyici stratejilerin belirlenmesi amacıyla literatüre uygulamalı ve metodolojik bir katkı sunulmuştur.

Bu kapsamda geliştirilen Bayes Ağı tabanlı yaklaşım, literatürde sıklıkla karşılaşılan sınırlı değişken kullanımı ve yalnızca geçmiş veriye dayalı analizlerden farklı olarak, çok değişkenli yapıları dikkate alan, nedensel ilişkileri hem veri temelli hem de uzman görüşleriyle güçlendiren hibrit bir model sunmaktadır. Modelde, özellikle insan hataları İnsanSİ ve İnsanSD olarak ayrıştırılarak detaylandırılmış; bu sayede karar vericilere daha hedefli ve etkili müdahale alanları tanımlanmıştır. Ayrıca, yalnızca mevcut durumu anlamakla kalmayıp, alternatif senaryolar üzerinden risk düzeylerinin nasıl değiştiğine dair öngörüler sunularak, proaktif emniyet stratejilerinin geliştirilmesine katkı sağlanmıştır. Bu yönüyle çalışma, sistem temelli analiz yaklaşımlarının sunduğu teorik çerçeveyi, veri destekli ve uygulanabilir bir modelleme tekniği ile birleştirerek literatüre özgün ve işlevsel bir katkı sunmaktadır.



3. YÖNTEM

3.1 Bayes Ağı Yöntemi

Bayes Ağı (Bayesian Network, BA), belirsizlik içeren karmaşık sistemlerin modellenmesinde kullanılan güçlü bir karar destek aracıdır. Temelini olasılık kuramı ile çizge kuramının birleşiminden alan bu yöntem, değişkenler arasındaki koşullu bağımlılıkları yönlendirilmiş döngüsüz çizge yapısı ile hem görsel hem de matematiksel biçimde ifade eder (Pearl, 1988).

Bayes Ağları; neden-sonuç ilişkilerini tanımlamak, mevcut bilgiler ışığında çıkarım yapmak, olasılık güncellemesi gerçekleştirmek ve çeşitli senaryolar altında sistemin davranışını öngörmek amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu yönüyle, özellikle karar verme, tanı koyma, risk analizi, emniyet değerlendirmesi ve stratejik planlama gibi belirsizliğe dayalı süreçlerde tercih edilmektedir.

3.1.1 Tanımı ve matematiksel ifadesi

Döngüsüz çizge yapısında her bir düğüm, bir rassal değişkeni temsil ederken, düğümler arasındaki yönlü kenarlar bu değişkenler arasındaki nedensel veya bilgiye dayalı bağımlılık ilişkilerini yansıtır. Her bir değişken (düğüm), yalnızca ebeveyn düğümlerine bağlı olarak tanımlanan koşullu olasılık dağılımları ile modellenir. Bu dağılımlar, Koşullu Olasılık Tablosu (Conditional Probability Table, KOT) aracılığıyla sistematik bir şekilde ifade edilir (Pearl, 1988).

Lee ve Abbott (2003) tarafından yapılan çalışmada, Bayes Ağlarının bu bağımlılık yapısını Genel Zincirleme Kuralı (General Chain Rule) üzerinden nasıl tanımladığı açıkça ortaya konmuştur. Verilen bir rassal değişkenler kümesi $X = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ için, her bir değişkenin ebeveyn kümesi $Pa(X_i)$ olmak üzere, Bayes Ağı tarafından tanımlanan birleşik (ortak) olasılık dağılımı formül 3.1’de gösterilmiştir (Ben-Gal, 2007):

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i | Pa(X_i)) \quad (3.1)$$

Bu ifade, karmaşık çok değişkenli sistemlerdeki birleşik olasılıkların, yerel koşullu dağılımlara dayalı olarak daha basit ve yönetilebilir bir yapıya indirgenmesini sağlar. Bayes Ağı, yalnızca olasılık hesaplamalarını kolaylaştırmakla kalmaz; aynı zamanda sistemin nedensel ve istatistiksel yapısını görsel olarak da temsil eder.

3.1.2 Ağ yapısı

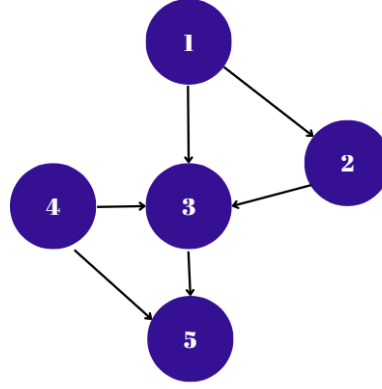
Bayes Ağları, değişkenler arasındaki koşullu bağımlılık ilişkilerini yönlendirilmiş döngüsüz çizge yapısı ile temsil eder.

Nadkarni ve Shenoy (2004), yönlendirilmiş döngüsüz çizge yapısının Bayes Ağlarında koşullu bağımsızlık ilişkilerinin açık biçimde modellenmesini sağladığını vurgulamaktadır. Ayrıca, modelleme sürecinde nedensel haritalarda (causal maps) yer alabilecek döngülerin kaldırılmasının zorunlu olduğunu belirtmişlerdir; çünkü döngüsel yapılar, yönlü bilgi akışını ve koşullu bağımsızlık varsayımlarını bozar.

Lee ve Abbott (2003) ise, yönlendirilmiş döngüsüz çizge yapısının yalnızca görsel bir araç olmadığını, aynı zamanda birleşik olasılık dağılımının daha az parametreyle ifade edilmesini sağladığı için hesaplama açısından da büyük avantaj sunduğunu belirtmektedir. Her değişkenin yalnızca ebeveynlerine bağlı olarak tanımlanması, özellikle büyük veri kümelerinde modelin hem yorumlanabilirliğini hem de verimliliğini artırır. Bayes Ağı yapısının temel bileşenleri aşağıda özetlenmiştir.

- Düğüm (Node): Rassal bir değişkeni temsil eder.
- Kenar (Edge): İki değişken arasındaki yönlü bağımlılığı gösterir.
- Ebeveyn–Çocuk İlişkisi (Parent–Child): Bir kenarın yönü, hangi değişkenin "neden" (ebeveyn) ve hangisinin "sonuç" (çocuk) olduğunu belirler.
- Koşullu Olasılık Tablosu: Her çocuk düğüm, yalnızca ebeveynlerinin durumuna bağlı olarak tanımlanır ve bu ilişkiler tabloları ile nicel olarak ifade edilir.

Örnek bir Bayes Ağı yapısı Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1 : Örnek bir bayes ağı.

Bu ağdaki yapıya göre, sistemin bileşik olasılık dağılımı (joint probability distribution) şu şekilde faktörize edilir:

$$P(X_1, X_2, X_3, X_4, X_5) = P(X_1) \cdot P(X_2|X_1) \cdot P(X_3|X_1, X_2, X_4) \cdot P(X_4) \cdot P(X_5|X_3, X_4) \quad (3.2)$$

Bu ifade, Genel Zincirleme Kuralı temel alınarak ve ağdaki koşullu bağımsızlık varsayımları dikkate alınarak sadeleştirilmiştir.

3.1.3 Bayes ağlarının avantajları dezavantajları

Bayes Ağları, belirsizlik altında karar verme süreçlerinde sunduğu güçlü modelleme yetenekleriyle özellikle karmaşık sistemlerde tercih edilen bir yöntemdir. Bu yöntem, nedensel ilişkilerin hem görsel hem de matematiksel olarak temsil edilmesini sağlar; bu sayede uzman bilgisi ya da tarihsel veriler kullanılarak sistemin davranışı anlamlandırılabilir. Shi ve diğ. (2024), demiryolu kazalarına yönelik çalışmasında görüldüğü üzere, veri temelli Bayes Ağı modelleri, farklı risk faktörlerinin kazalara etkisini ayrıştırarak, senaryo bazlı çıkarımlar yapılmasına olanak tanır. Nadkarni ve Shenoy (2004) önerdiği nedensel haritalama yaklaşımı, yeterli verinin olmadığı durumlarda uzman bilgisini sistematik şekilde modele dahil ederek yapının teorik tutarlılığını güvence altına alır. Dereli (2012) ise Bayes Ağı'nı hem uzman görüşüne hem de anket temelli verilere dayalı olarak uygulayarak yönteminin hibrit yapısal esnekliğini göstermiştir. Bayes Ağı'nın görsel doğası, karar vericilerin sistem içindeki değişkenler arası ilişkileri kolayca anlamasını sağlar ve bu yapı, sistemin yeni bilgiler ışığında kendini güncelleyebilmesine olanak tanır.

Bununla birlikte, Bayes Ağları bazı sınırlılıklar da içerir. Özellikle düğümlerin ebeveyn sayısının artması durumunda koşullu olasılık tablolarının boyutu üssel olarak artmakta, bu da modelin veri ihtiyacını ve hesaplama yükünü ciddi biçimde artırmaktadır (Jones ve diğ., 2010). Ayrıca, veriye dayalı modelleme mümkün olmadığında modele girilen uzman görüşleri, öznellik riski taşımaktadır. Bu durum, modelin çıktılarında önyargılı sonuçlara neden olabilir. Örneğin, Trucco ve diğ. (2008) denizcilik sektöründe insan ve organizasyonel faktörleri içeren risk analizinde, uzman yargılarının koşullu olasılık tablosunda belirleyici olduğunu vurgulamış, bunun model duyarlılığına etkisini tartışmıştır. Veri tabanlı modellemenin avantajı olan nesnellik, yeterli miktarda ve kalitede veri bulunmadığı takdirde zayıflamaktadır. Aynı zamanda, Bayes ağlarının başarılı bir şekilde kurgulanması için değişkenler arası koşullu bağımlılıkların dikkatle yapılandırılması gerekir; bu da özellikle büyük sistemlerde modelleme sürecini oldukça karmaşık hale getirebilir.

Tüm bu avantaj ve sınırlılıklar dikkate alındığında, Bayes Ağları özellikle neden-sonuç ilişkilerinin modellenmesi, çok değişkenli sistemlerde olasılıksal çıkarım yapılması ve eksik bilgiyle başa çıkılması gibi durumlarda güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır. Ancak modelin etkinliği hem yapısal hem de parametrik doğruluğun sağlanmasına, dolayısıyla kullanılan veri kalitesi ile uzmanlık düzeyine doğrudan bağlıdır.

3.2 Yöntem Aşamaları

Bayes Ağı modeli oluşturulurken süreç genel olarak iki temel aşamadan oluşur: niteliksel (qualitative) ve niceliksel (quantitative) aşama. Bu aşamalar sırasıyla ağı yapısal çerçevesinin belirlenmesi ve bu yapının sayısal olarak ifade edilmesiyle ilgilidir (Pearl, 1988).

3.2.1 Niteliksel aşama

Bu aşamada, Bayes Ağı'nın temel yapısı olan yönlendirilmiş döngüsüz çizgeler oluşturulur. Modelleme kapsamında ele alınacak değişkenler ve bu değişkenler arasındaki koşullu bağımlılık ilişkileri tanımlanır. Niteliksel yapılandırma süreci, iki temel yaklaşım doğrultusunda yürütülebilir (Nadkarni ve Shenoy, 2004):

- Uzman görüşüne dayalı yapılandırma (knowledge-based): Alan uzmanlarının bilgi ve deneyimlerinden yararlanılarak, değişkenler arasındaki koşullu

bağımlılıklar, doğrudan ve dolaylı ilişkiler ile nedensel bağlantılar yapılandırılır. Bu süreçte aşağıdaki hususlar dikkate alınır;

- koşullu bağımsızlık ilişkilerinin belirlenmesi,
 - nedensel ilişkilerin ortaya konması,
 - yapay döngülerin elenmesi ve tutarlı bir yönlendirilmiş yapı kurulması.
- Veri temelli yapılandırma (data-based): Gözlemsel veri setlerinden değişkenler arasındaki koşullu bağımlılık ilişkileri istatistiksel yöntemlerle öğrenilir. Özellikle koşullu bağımsızlık testlerine dayalı algoritmalar kullanılarak ağ yapısı elde edilir.

Her iki yaklaşımın birleşimi ile değişkenler arasındaki ilişkiler hem teorik bilgi hem de ampirik veriler doğrultusunda modellenerek, mantıksal tutarlılığı olan bir grafik yapı elde edilir (Pearl, 1988).

3.2.2 Niceliksel aşama

Niceliksel aşamada, daha önce belirlenen yapısal model üzerine koşullu olasılık dağılımları tanımlanır. Bu dağılımlar, her bir değişkenin ebeveynlerine bağlı olarak alabileceği olasılık değerlerini içerir. Bu süreç şu adımlardan oluşur:

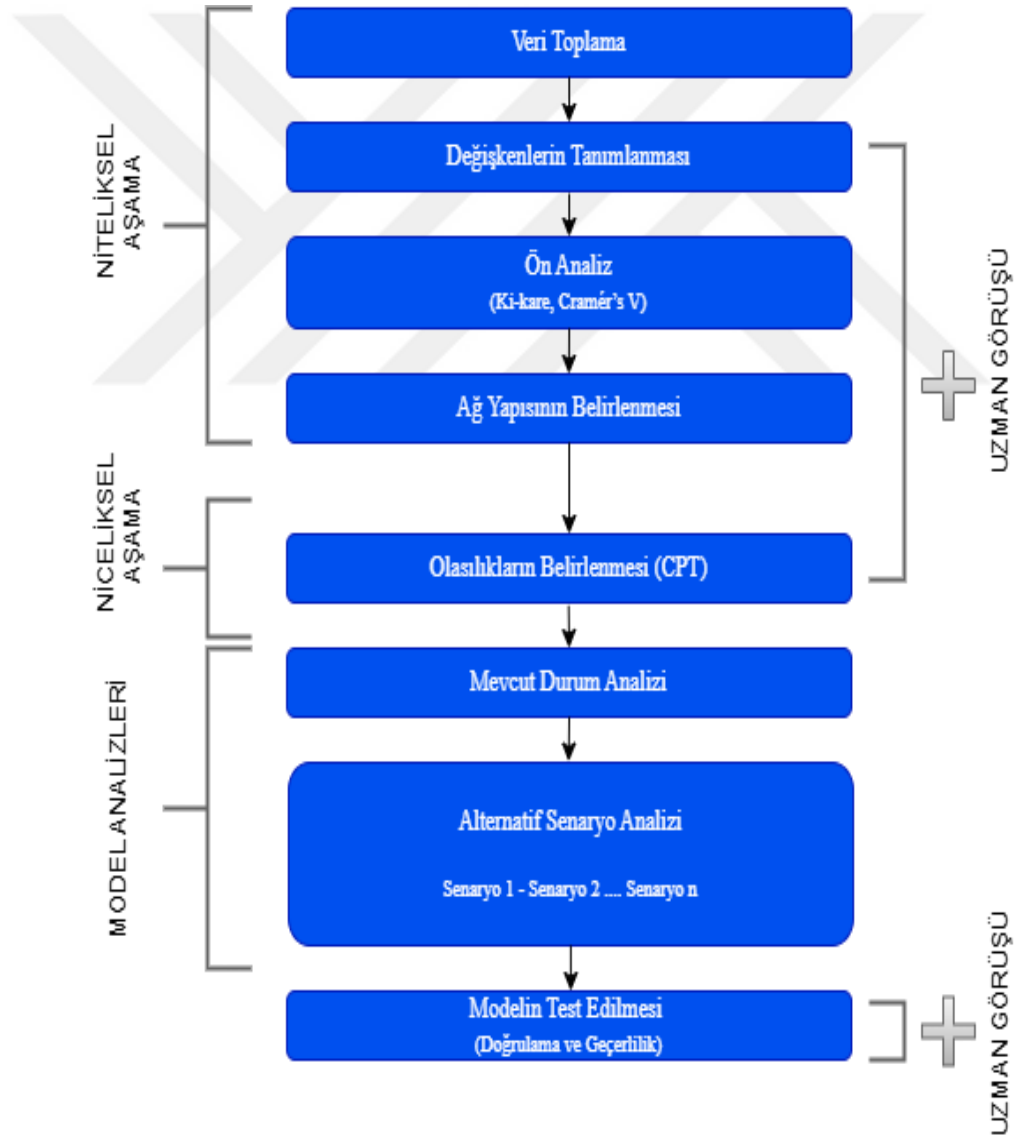
- Her bir değişkenin durum uzayı (state space) belirlenir.
- Koşullu olasılıklar iki yolla elde edilebilir:
 - Veriye dayalı olarak (nesnel): Geniş çaplı gözlemsel verilerden istatistiksel öğrenme algoritmaları kullanılarak olasılık değerleri tahmin edilir.
 - Uzman görüşüne dayalı olarak (öznel): Yapılandırılmış görüşmeler, puan tahsis yöntemi ya da senaryoya dayalı tercihler yoluyla uzmanların inançları modellenir.
- Tüm değişkenler için koşullu olasılık tabloları oluşturularak, ağın niceliksel analize uygun hale gelmesi sağlanır.

3.3 Modelleme Yaklaşımı

Bayes Ağı modelleme sürecinde, yalnızca uzman bilgisine ya da salt verilere dayalı yaklaşımlar yerine, her iki yöntemin entegre edildiği hibrit modelleme stratejileri daha güvenilir ve geçerli sonuçlar üretmektedir. Bu çerçevede, uzman görüşü modelin

kuramsal bütünlüğünü ve alan bilgisine dayalı yapısal doğruluğunu sağlarken, veri odaklı analizler modelin ampirik temellendirilmesini ve sayısal sağlamlığını pekiştirmektedir. Hibrit yaklaşım sayesinde, her iki yöntemin güçlü yönleri bir araya getirilerek, hem yapısal hem de niceliksel düzeyde daha sağlam ve esnek Bayes Ağları oluşturulabilmektedir.

Şekil 3.2'de sunulan akış diyagramı, Bayes Ağı modelleme sürecinin başından sonuna kadar izlenen adımları özetlemekte; veri toplama, değişken belirleme, ağ yapısının kurulması, olasılıkların hesaplanması, senaryo analizi ve doğrulama aşamalarını bir bütün olarak görselleştirmektedir. Bu yapı, uygulama bölümüne geçişte kavramsal bir çerçeve sunmakta ve modelin kurgusunu yalın biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 3.2 : Bayes ağı modelleme süreci akış diyagramı.

4. UYGULAMA VE BULGULAR

Çalışma kapsamında geliştirilen Bayes Ağı modeli, literatürdeki yaklaşımlar ve uzman görüşlerinden yararlanılarak iki temel aşamada yapılandırılmıştır: niteliksel ve niceliksel. İlk aşamada değişkenler tanımlanmış, aralarındaki nedensel ilişkiler analiz edilerek ağın yapısı oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise bu yapıya uygun koşullu olasılık tabloları hazırlanarak model sayısal hale getirilmiş, Almanya'ya ait demiryolu kaza verileri üzerinden uygulanarak modelin açıklayıcılığı ve öngörü başarısı değerlendirilmiştir.

4.1 Bayes Ağı'nın Kurulması

Bayes Ağı oluşturulurken önce niteliksel aşamada veri seti analiz edilmiş, değişkenler belirlenmiş ve aralarındaki ilişkiler istatistiksel olarak değerlendirilmiştir. Bu bulgularla ağın yapısı tanımlanmıştır. Ardından niceliksel aşamada, oluşturulan yapıya göre koşullu olasılık tabloları düzenlenmiş ve model kullanıma hazır hale getirilmiştir.

4.1.1 Niteliksel aşama

4.1.1.1 Veri toplama süreci

Bu çalışmada kullanılan veri seti, BEU tarafından yayımlanan yıllık kaza raporlarının sistematik biçimde derlenmesiyle oluşturulmuştur. BEU'nun temel misyonu; raylı sistem işletmelerinde meydana gelen ciddi kazaların nedenlerini tarafsız şekilde ortaya koymak, bu nedenlere ilişkin kapsamlı analizler yapmak ve elde edilen bulgular doğrultusunda emniyetin artırılmasına yönelik öneriler sunmaktır.

Almanya'nın çalışma kapsamında seçilmesinin başlıca nedeni, Avrupa Birliği Demiryolu Ajansı'na veri sağlayan ülkeler arasında en kapsamlı ve düzenli kaza verilerinin bu ülke tarafından sağlanmasıdır. BEU her yıl, bir önceki yıla ait kaza verilerini analiz ederek ayrıntılı bir rapor yayımlamaktadır. Bu raporlarda; kazalara ve ciddi olaylara ilişkin yapılan incelemeler, sistemsel zafiyetler ve sunulan emniyet tavsiyeleri detaylı biçimde yer almaktadır.

BEU'nun faaliyetleri, Avrupa Birliği tarafından yürürlüğe konan Demiryolu Emniyeti Direktifi çerçevesinde yürütülmektedir. Söz konusu direktif, Avrupa genelinde ortak emniyet hedeflerinin oluşturulmasını ve bu hedeflerin üye ülkeler tarafından benimsenmesini zorunlu kılmaktadır (European Union, 2016). Bu çerçevede, Almanya'nın sunduğu BEU verileri; emniyet performans göstergelerinin izlenmesi ve Bayes Ağı modeliyle gerçekleştirilecek nedensel analizler için güçlü ve güvenilir bir temel sunmaktadır.

Veri toplama sürecinde, BEU tarafından 2007–2023 yılları arasında yayımlanan yıllık kaza raporları tek tek incelenmiş ve içeriklerinden kaza verileri sistematik biçimde ayıklanmıştır. Bu süreçte, her bir raporda yer alan kazalara ilişkin temel bilgiler derlenmiş; kaza tarihi, yaralı ve ölü sayısı, kazanın olay örgüsü gibi temel nitelikler içeren ham veri seti oluşturulmuştur. Oluşturulan ham veri setinin ardından, tüm kaza kayıtları tekil olarak değerlendirilmiş ve yorumlanabilir bir yapıya kavuşturulmuştur. Bu aşamada, eksik veya anlam bütünlüğü taşımayan kayıtlar elenmiş; boş veya eksik veri içeren kazalar analiz dışında bırakılmıştır. Elde edilen veri seti, Bayes Ağı modellemesine uygun hale getirilmek üzere temizlenmiş ve yapılandırılmıştır.

4.1.1.2 Değişkenlerin tanımlanması

Çalışma kapsamında, ham veri setlerinden hem uzman görüşü ile doğrudan veya dolaylı olarak toplam 13 adet değişken türetilmiştir. Bu değişkenler; Mevsim, Kaza Dönemi, Tren Operasyon Saatleri, Kaza Tipi, Ölü Durumu, Yaralı Durumu, Tren Tipi, Kaza Seviyesi, Eyalet, Kaza Nedeni, Maliyet, Otomasyon Seviyesi ve Bakım olarak sıralanmaktadır. Şekil 4.1'de, bu değişkenlerin görsel temsiline yer verilmiştir. Her bir değişken, Bayes Ağı modellemesinde nedensel ilişkilerin kurulması ve analiz edilmesi amacıyla belirlenmiştir.

Bu bölümde, Bayes Ağı modellemesinde kullanılmak üzere seçilen ve analizlerde temel alınan değişkenler detaylı bir biçimde tanımlanmıştır. Söz konusu değişkenler, kazaların özelliklerini daha iyi anlayabilmek ve sistematik analizler gerçekleştirebilmek adına hem teorik dayanakları hem de veri setine özgü bağlamları göz önünde bulundurularak yapılandırılmıştır. Bu süreçte, literatürde sıkça karşılaşılan sınıflandırma yapıları ile yerel demiryolu emniyet verileri arasındaki uyum gözetilmiştir. Ayrıca, değişkenlerin kategorik yapısı, Bayes Ağı'nın nedensel ilişkileri doğru şekilde temsil edebilmesi amacıyla dikkatle tasarlanmıştır.



Şekil 4.1 : Model değişkenleri.

Mevsim: Kaza raporlarında yer alan tarih bilgileri dikkate alınarak, her bir olayın gerçekleştiği döneme karşılık gelen mevsim bilgisi türetilmiştir. Bu kapsamda, yıl içerisindeki dört ana dönem olan İlkbahar, Yaz, Sonbahar ve Kış olmak üzere dört kategori oluşturulmuştur. Mevsim değişkeni, kazaların yılın hangi dönemlerinde yoğunlaştığını analiz edebilmek ve çevresel koşulların kazalar üzerindeki etkisini değerlendirebilmek amacıyla tanımlanmıştır. Elde edilen bu sınıflandırma, mevsimsel faktörlerin demiryolu güvenliği üzerindeki olası etkilerini ortaya koymak için modelde açıklayıcı bir değişken olarak kullanılmıştır. Mevsim değişkenine ait kategoriler Çizelge 4.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1 : Mevsim değişkeni.

Mevsim
İlkbahar
Yaz
Kış
Sonbahar

Kaza Dönemi: Çalışmada kullanılan kaza raporları, 2007–2023 yılları arasında gerçekleşen olayları kapsamaktadır. Bu 17 yıl, analiz kolaylığı ve karşılaştırılabilirlik amacıyla üç ayrı kategoriye ayrılmıştır: İlk Dönem (2007–2012), Orta Dönem (2013–2017) ve Son Dönem (2018–2023). Her bir kategori, belirli bir zaman aralığındaki yapısal, teknolojik veya operasyonel değişimleri temsil etmektedir. Bu ayırım, hem dönemler arası gelişmelerin etkilerini karşılaştırmalı olarak değerlendirebilmek hem

de modeldeki zaman boyutunu daha anlamlı hale getirebilmek için yapılmıştır. Kaza Dönemi değişkenine ait kategoriler Çizelge 4.2’de sunulmuştur.

Çizelge 4.2 : Kaza dönemi değişkeni.

Kaza Dönemi	
2007	İlk Dönem
2008	
2009	
2010	
2011	
2012	
2013	Orta Dönem
2014	
2015	
2016	
2017	
2018	Son Dönem
2019	
2020	
2021	
2022	
2023	

Tren Operasyon Saatleri: Kaza raporlarında yer alan saat bilgileri temel alınarak, kazalar tren operasyon saatlerine göre sınıflandırılmıştır. Gün, 24 saatlik zaman dilimi esas alınarak dört eşit parçaya ayrılmış ve bu doğrultuda Gece (00:00–05:59), Sabah (06:00–11:59), Öğleden Sonra (12:00–17:59) ve Akşam (18:00–23:59) olmak üzere dört temel kategori oluşturulmuştur. Saat bilgisi bulunmayan kazalar için ise “Diğer” kategori tanımlanmıştır. Böylece toplam beş kategori altında gruplandırma yapılmıştır. Tren Operasyon Saatleri değişkenine ait detaylı sınıflama Çizelge 4.3’te sunulmuştur.

Çizelge 4.3 : Tren operasyon saatleri değişkeni.

Tren Operasyon Saatleri		
00:00:00	05:59:00	Gece
06:00:00	11:59:00	Sabah
12:00:00	17:59:00	Öğleden Sonra
18:00:00	23:59:00	Akşam
-	-	Diğer

Kaza Tipi: Bu değişken, ERA tarafından yayımlanan 2024 tarihli “Report on Railway Safety and Interoperability in the EU” raporu referans alınarak oluşturulmuştur. ERA, demiryolu emniyeti performans göstergeleri kapsamında kazaları sistematik biçimde kategorize etmektedir (Union Agency For Railways, 2024).

Bu doğrultuda, çalışma kapsamında oluşturulan kaza tipi sınıflandırması Almanya'ya ait kaza verilerine uyarlanmış; en sık karşılaşılan beş ana kategori temel alınarak aşağıdaki şekilde gruplandırılmıştır: Tren Çarpışmaları, Raydan Çıkmlar, Araç Arızası & Yangını, Hemzemin Geçit Kazası ve Diğer. Söz konusu sınıflandırma, Almanya kaza raporlarında yer alan açıklamalar dikkate alınarak düzenlenmiş olup, hem veri setinin sade ve anlamlı bir biçimde analiz edilmesini hem de ERA'nın resmi yaklaşımıyla uyumlu bir yapı sağlanmasını hedeflemektedir. Kaza Tipi değişkenine ait detaylı sınıflama Çizelge 4.4'te sunulmuştur.

Çizelge 4.4 : Kaza tipi değişkeni.

Kaza Tipi
Çarpışma
Raydan çıkma
Araç Arızası & Yangını
Hemzemin Geçit Kazası
Diğer

Ölü Durumu: Kaza analizlerinde en kritik göstergelerden biri, kazanın insan hayatına etkisini ortaya koyan ölüm vakalarıdır. Bu değişken, her bir kazaya ilişkin raporlarda yer alan ölüm bilgisi esas alınarak oluşturulmuştur. "Ölü Durumu" değişkeni, kazanın sonucunda en az bir ölümün meydana gelip gelmediğini ifade etmektedir. Ölü Durumu değişkenine ait detaylı sınıflama Çizelge 4.5'te sunulmuştur.

Çizelge 4.5 : Ölü durumu değişkeni.

Ölü Durumu
Var
Yok

Yaralı Durumu: Kaza analizlerinde dikkate alınması gereken bir diğer önemli gösterge, kazaların insan sağlığı üzerindeki etkisini yansıtan yaralanma vakalarıdır. Bu değişken, kaza raporlarında yer alan yaralı bilgisi esas alınarak oluşturulmuştur. "Yaralı Durumu" değişkeni, kazanın sonucunda en az bir kişinin yaralanıp yaralanmadığını ifade etmektedir. Yaralı Durumu değişkenine ait detaylı sınıflama Çizelge 4.6'da sunulmuştur.

Çizelge 4.6 : Yaralı durumu değişkeni.

Yaralı Durumu
Var
Yok

Tren Tipi: Kazaya karışan tren veya trenlerin türleri, kaza raporları incelendiğinde anlaşılmaktadır. İki trenin karıştığı kaza vakalarında, kazaya sebebiyet verdiği değerlendirilen ilk tren tipi esas alınarak sınıflandırma yapılmıştır. Almanya raylı sistem sektöründe çeşitli tren türleri bulunmakla birlikte, veri setinde en yüksek temsil oranına sahip iki ana kategori ön plana çıkmaktadır: Yolcu Treni ve Yük Treni. Diğer tüm tren türleri ise istatistiksel analizlerde tutarlılık sağlamak amacıyla Diğer başlığı altında birleştirilmiştir. Tren Tipi değişkenine ait detaylı sınıflama Çizelge 4.7’de sunulmuştur. Bu yaklaşım, hem analizlerin odaklanmasını kolaylaştırmakta hem de düşük frekansa sahip kategorilerin model üzerindeki etkisini dengelemektedir.

Çizelge 4.7 : Tren tipi değişkeni.

Tren Tipi
Yolcu Treni
Yük Treni
Diğer

Kaza Seviyesi: Kazalar, sonuçlarının ciddiyetine göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma, özellikle ölü ve yaralı sayıları göz önünde bulundurularak yapılmaktadır. Ciddi Kazalar, en yüksek risk düzeyini temsil etmekte olup en az bir ölüm vakasının bulunduğu kazaları ifade eder. Orta Düzey Kazalar, ölüm bulunmayan ancak ağır yaralanma ile sonuçlanan kazaları kapsar. Hafif Kazalar ise ölüm ya da ağır yaralanmanın meydana gelmediği, çoğunlukla hafif yaralanmalarla sonuçlanan olayları içermektedir. Değişken Çizelge 4.8’de gösterilmiştir.

Literatürde bazı çalışmalar bu sınıflandırmayı maliyet değişkenleriyle birlikte değerlendirse de bu çalışmada odak noktası emniyet göstergelerinin analizidir. Bu nedenle Kaza Seviyesi değişkeni yalnızca emniyet sonuçları temel alınarak değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.8 : Kaza seviyesi değişkeni.

Kaza Seviyesi
Hafif Kaza
Orta Düzey Kaza
Ciddi Kaza

Eyalet: Kaza raporlarında yer alan istasyon veya şehir bilgileri kullanılarak, her bir kazanın gerçekleştiği eyalet belirlenmiş ve bu doğrultuda Eyalet değişkeni oluşturulmuştur. Almanya’daki eyaletler esas alınarak yapılan bu sınıflandırmada, kazaların en yoğun şekilde gerçekleştiği ilk beş eyalet ayrı ayrı kategorilendirilmiştir.

Diğer eyaletler ise, istatistiksel olarak anlamlı bir temsiliyet sunmadıkları gerekçesiyle Diğer kategorisi altında birleştirilmiştir. Eyalet değişkenine ilişkin kategoriler Çizelge 4.9’da sunulmaktadır.

Çizelge 4.9 : Eyalet değişkeni.

Eyalet
Nordrhein-Westfalen
Bayern
Niedersachsen
Baden-Württemberg
Hessen
Diğer

Kaza Nedeni: Kaza raporlarında, olayların oluş şekli özet biçimde sunulmakta olup, soruşturması tamamlanan vakalarda resmi kaza nedenlerine yer verilmektedir.

Bölüm 2’de ele alınan literatür incelemelerinde, kaza nedenlerinin genel olarak beş ana başlık altında sınıflandırıldığı görülmektedir: insan, ekipman, çevre, yönetim/organizasyon ve diğer faktörler. Bu çalışma kapsamında yapılan analizlerde ise, insan ve yönetim kaynaklı nedenlerin pratikte birbirinden kesin çizgilerle ayrıştırılamadığı tespit edilmiştir. Bu doğrultuda, yönetsel unsurlar ile sistem içerisinde görev yapan personelden kaynaklanan nedenler birlikte ele alınarak Sistem İçindeki İnsan (İnsanSİ), sistem dışı aktörlerden kaynaklanan hatalar ise Sistem Dışındaki İnsan (İnsanSD) olarak ayrı bir başlıkta sınıflandırılmıştır. Bu ayrım, çalışmanın literatüre sunduğu özgün katkılardan biri olarak değerlendirilmektedir.

Çevre ve Ekipman kategorileri ise mevcut literatür sınıflandırmalarıyla uyumludur. Çevre; sel, fırtına, toprak kayması, ağaç düşmesi gibi doğa olaylarını kapsarken, Ekipman kategorisi sistemsal arıza, teknik yetersizlik ve bakım eksikliği gibi ekipman temelli nedenleri ifade etmektedir. Kaza Nedeni değişkenine ilişkin kategoriler Çizelge 4.10’da sunulmaktadır.

Çizelge 4.10 : Kaza nedeni değişkeni.

Kaza Nedeni
Çevre
Ekipman
İnsanSİ
İnsanSD

Maliyet: Kaza raporlarında, soruşturması tamamlanan vakalar için doğrudan maliyet verisi sunulmuş, bazı raporlarda ise olayın kapsamına göre tahmini maliyet bilgisine yer verilmiştir. Bu çalışmada kullanılan tüm maliyet verileri, kazanın gerçekleştiği yıl baz alınarak ilgili yılın enflasyon oranlarına göre güncellenmiş ve son yıl verileri esas alınarak normleştirilmiştir.

Normleştirilmiş verilere dayanarak kazalar, maliyet düzeylerine göre dört kategori altında sınıflandırılmıştır. 1 Euro ile 500.000 Euro arasındaki kazalar düşük maliyetli, 500.001 ile 2.000.000 Euro arasındaki kazalar orta maliyetli, 2.000.000 Euro üzerindeki kazalar ise yüksek maliyetli olarak değerlendirilmiştir. Bu kategorilendirme sürecinde, ERA tarafından önerilen maliyet sınıflamaları ile veri setinin kendi dağılımı birlikte göz önünde bulundurulmuştur. Öte yandan, bazı kaza raporlarında maliyet bilgisi yer almaması ya da güvenilir bir tahmin yapılamaması durumunda veri bütünlüğünü korumak ve analiz sürecinde tutarlılığı sağlamak amacıyla “Bilinmeyen Maliyet” kategorisi oluşturulmuş ve bu kazalar ilgili analiz sürecine bu şekilde dahil edilmiştir. Sınıflandırmaya ilişkin detaylı bilgi Çizelge 4.11’de sunulmaktadır.

Çizelge 4.11 : Maliyet değişkeni.

Maliyet (Euro Cinsinden)	
Bilinmeyen Maliyet	-
Düşük Maliyetli	1-500.000
Orta Maliyetli	500.001 - 2.000.000
Yüksek Maliyetli	2.000.001 +

Otomasyon Seviyesi: Bu değişken, tren hatlarında kullanılan kontrol sistemlerinin teknolojik düzeyini temsil etmektedir. Kazaların meydana geldiği hatlara ilişkin detaylı açıklamalar ve uzman görüşleri doğrultusunda her bir olay, otomasyon seviyesi açısından değerlendirilmiştir.

Bu kapsamda, kontrol sistemlerinin insan müdahalesine olan ihtiyacı ve sistemin işleyiş düzeyi temel alınarak üç kategori oluşturulmuştur. Tam Otomasyon, trenin tüm işlevlerinin insan müdahalesi olmadan yürütüldüğü sistemleri ifade ederken; Yarı Otomatik Kontrol, insan ve sistemin birlikte çalıştığı hibrit kontrol yapısını temsil etmektedir. Manuel Kontrol ise trenin tüm operasyonlarının insan tarafından doğrudan yönetildiği sistemleri kapsamaktadır. Otomasyon Seviyesi değişkenine ait sınıflandırma Çizelge 4.12’de sunulmuştur.

Çizelge 4.12 : Otomasyon seviyesi değişkeni.

Otomasyon Seviyesi
Tam Otomasyon
Yarı Otomatik Kontrol
Manuel Kontrol

Bakım: Raylı sistemlerde bakım uygulamaları, sistemin emniyetli ve sürekli çalışması açısından kritik bir rol oynamaktadır. Bu değişken, uzman görüşleri temel alınarak kazaların gerçekleştiği hatlarda uygulanan bakım düzeyini temsil edecek şekilde yapılandırılmıştır. Bakım seviyesi hem planlı bakım sıklığı hem de bakımın kapsamı göz önünde bulundurularak üç kategoriye ayrılmıştır. Yüksek Bakım, düzenli ve kapsamlı bakım uygulamalarının gerçekleştirildiği sistemleri ifade ederken; Orta Bakım, periyodik ancak sınırlı kapsamlı uygulamaları tanımlamaktadır. Düşük Bakım ise yetersiz veya düzensiz bakım uygulamalarıyla karakterize edilen durumları kapsamaktadır. Bakım değişkenine ait sınıflandırma Çizelge 4.13’te sunulmuştur.

Çizelge 4.13 : Bakım değişkeni.

Bakım
Yüksek Bakım
Orta Bakım
Düşük Bakım

Tanımlanan bu değişkenler, Bayes Ağı modellemesinde nedensel ilişkilerin doğru biçimde kurgulanabilmesi ve analiz sürecinin sistematik bir şekilde yürütülebilmesi açısından temel yapı taşlarını oluşturmaktadır. Her bir değişkenin kapsamlı ve kategorik biçimde yapılandırılması, modelin hem yapısal bütünlüğünü hem de analitik geçerliliğini artırmakta; böylece yorumlanabilirliğini ve karar destek kapasitesini önemli ölçüde güçlendirmektedir.

4.1.1.3 Ön analiz

Bayes Ağı’nın yapısal kurgusuna sağlam bir temel oluşturmak amacıyla, tanımlanan değişkenler arasındaki istatistiksel ve yapısal ilişkilerin belirlenmesine yönelik çok aşamalı bir ön analiz süreci yürütülmüştür. Bu kapsamda; değişken çiftleri arasında oluşturulan ilişki matrisi aracılığıyla görsel ve sistematik bir değerlendirme yapılmış, ki-kare testi kullanılarak bu ilişkilerin istatistiksel anlamlılığı test edilmiş ve uzman görüşleri doğrultusunda değişkenler arasındaki ilişkilerin nedensel yönleri analiz edilmiştir. Bu bütüncül yaklaşım, yalnızca veriye dayalı bulgulara değil, aynı zamanda

sektörel bilgi ve bağlamsal değerlendirmelere de yer vererek, Bayes Ağı modelinin nedensel yapısını güçlü biçimde destekleyecek bir temel oluşturmuştur.

Ön analiz sürecinin ilk aşamasında, değişkenler arasındaki olası ilişkileri görsel ve sistematik biçimde değerlendirebilmek amacıyla bir ilişki matrisi oluşturulmuştur. Bu matrisin temel amacı, her bir değişken çifti arasında potansiyel bir ilişki olup olmadığını gözlemleyebilmektir. Böylelikle, Bayes Ağı modellemesi kapsamında nedensel bağlantı kurulabilecek değişken çiftlerine yönelik ön değerlendirme yapılması mümkün hale gelmiştir.

İlişki matrisinin oluşturulması aşamasında, her bir değişken için bir sıra numarası atanarak sistematik bir eşleştirme yapılmıştır. Bu numaralandırma, matris üzerinde belirli bir hücrenin hangi iki değişken arasındaki ilişkiyi temsil ettiğinin açık biçimde tanımlanabilmesini sağlamaktadır. Örneğin, Mevsim değişkeni “1” numara ile, Kaza Dönemi değişkeni ise “2” numara ile gösterilmektedir. Bu durumda, 1. satır ve 2. sütunda yer alan 12 numaralı hücre, Mevsim ile Kaza Dönemi değişkenleri arasındaki ilişkiyi temsil etmektedir. Çizelge simetrik olarak yapılandırıldığından, yalnızca matrisin üst üçgeni doldurularak tüm değişken çiftlerinin ilişkileri değerlendirilebilmektedir. Boş ilişki matrisine Çizelge 4.14’de sunulmaktadır.

Ön analiz aşamasının ikinci adımında, bir önceki adımda oluşturulan boş ilişki matrisi referans alınarak, her bir değişken çifti için veri seti üzerinden frekans dağılımlarını gösteren pivot tablolar oluşturulmuştur. Bu tablolar aracılığıyla, iki değişkenin kategorik düzeyde nasıl bir dağılım sergilediği incelenmiş ve olası ilişkilerin ilk bulguları elde edilmiştir. Her bir değişken çifti için oluşturulan bu çapraz tablolar, SPSS paket programı kullanılarak istatistiksel olarak test edilmiştir. Bu kapsamda, Ki-kare bağımsızlık testi uygulanmış ve her ilişkinin anlamlılık düzeyi, elde edilen p -değeri (p -value) üzerinden değerlendirilmiştir. Elde edilen p -değerleri, %95 güven düzeyi ($\alpha = 0.05$) esas alınarak yorumlanmış; $p < 0.05$ durumunda ilgili değişkenler arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki olduğu kabul edilmiştir. Bu test süreci, modelleme aşamasında yalnızca istatistiksel olarak anlamlı ilişkilerin dikkate alınmasına olanak sağlamış ve böylece Bayes Ağı’nın nedensel yapısının veri temelli biçimde desteklenmesi mümkün olmuştur. Ayrıca, bu analizler değişkenler arasındaki yapısal ilişkilerin belirlenmesinde de önemli bir temel sağlamıştır.

Çizelge 4.14 : Boş ilişki matrisi.

*	Mevsim	Kaza Dönemi	Tren Opr. Saatleri	Kaza Tipi	Ölü Durumu	Yaralı Durumu	Tren Tipi	Kaza Seviyesi	Eyalet	Kaza Nedeni	Maaliyet
Mevsim	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1 10	1 11
Kaza Dönemi	21	22	23	24	25	26	27	28	29	2 10	2 11
Tren Opr Saatleri	31	32	33	34	25	36	37	38	39	3 10	3 11
Kaza Tipi	41	42	43	44	45	46	47	48	49	4 10	4 11
Ölü Durumu	51	52	53	54	55	56	57	58	59	5 10	5 11
Yaralı Durumu	61	62	63	64	65	66	67	68	69	6 10	6 11
Tren Tipi	71	72	73	74	75	76	77	78	79	7 10	7 11
Kaza Seviyesi	81	82	83	84	85	86	87	88	89	8 10	8 11
Eyalet	91	92	93	94	95	96	97	98	99	9 10	9 11
Kaza Nedeni	10 1	10 2	10 3	10 4	10 5	10 6	10 7	10 8	10 9	10 10	10 11
Maaliyet	11 1	11 2	11 3	11 4	11 5	11 6	11 7	11 8	11 9	11 10	11 11

Cramér's V katsayısı, iki kategorik değişken arasındaki ilişkinin güçlü mü yoksa zayıf mı olduğunu ölçen bir istatistiksel bağıntı katsayısıdır (Agresti, 2007). Bu katsayının yorumlanmasında, literatürde yaygın biçimde kabul gören eşik değerler dikkate alınmıştır. Buna göre, Cramér's V değeri 0.00 ile 0.10 arasında ise değişkenler arasındaki ilişkinin zayıf olduğu, 0.10 ile 0.30 arasında ise orta düzeyde bir ilişki bulunduğu kabul edilmektedir. Değerin 0.30 ile 0.50 arasında olması, değişkenler arasında güçlü bir ilişkiye işaret ederken, 0.50'nin üzerindeki değerler çok güçlü ilişki düzeyini ifade etmektedir. Bu sınıflandırma çerçevesinde yapılan değerlendirmeler, Bayes Ağı'ndaki bağlantıların yalnızca varlığını değil, aynı zamanda etkisinin derecesini de dikkate alarak modelin daha doğru ve anlamlı biçimde yapılandırılmasına katkı sağlamıştır.

Ön analiz sürecinin ikinci aşaması, boş ilişki matrisinin veri seti üzerinden oluşturulan çapraz tablolar ve hesaplanan Ki-kare testi sonuçları doğrultusunda sistematik biçimde doldurulmasıyla tamamlanmıştır. Her bir değişken çifti için elde edilen p-değeri ve Cramér's V katsayısı dikkate alınarak anlamlı ilişkiler işaretlenmiş ve böylece matris, Bayes Ağı yapısının kurgulanmasında yol gösterici bir yapıya dönüştürülmüştür.

Çizelge 4.15'te sunulan Cramér's V değerleri, incelenen kategorik değişkenler arasındaki ilişkinin gücünü değerlendirmek amacıyla sınıflandırılmıştır. Bu sınıflandırmada: 0.10 ile 0.30 aralığındaki değerler orta düzeyde ilişki (açık yeşil renkle), 0.30 ile 0.50 aralığındaki değerler güçlü ilişki (yeşil renkle), 0.50 ile 1.00 aralığındaki değerler ise çok güçlü ilişki görsel olarak vurgulanmıştır. Öte yandan, ki-kare testine ait p -değeri istatistiksel olarak anlamlı olmayan ($p > 0.05$) durumlar ile anlamlı olsa dahi Cramér's V değeri 0.10'un altında kalan ilişkiler, zayıf ve yorumlanabilirlikten uzak görüldüğü için analiz dışında bırakılmış; bu hücreler tabloda boş olarak gösterilmiştir. Doldurulmuş ilişki matrisine ilişkin görsel ifade Çizelge 4.15'te sunulmaktadır.

Ön analiz sürecinin son aşamasını oluşturan üçüncü adımda, veri setinde istatistiksel olarak anlamlı bulunan değişkenler arası ilişkiler, raylı sistem sektörü emniyet uzmanlarının görüşleriyle desteklenmiştir. Bu kapsamda, alanında deneyimli üç farklı uzmana, çiftler halinde belirlenen değişkenler arasındaki ilişkiler sunulmuş; bu ilişkilerin istatistiksel olarak anlamlı ya da anlamsız oluşu, uzman değerlendirmeleriyle karşılaştırmalı biçimde ele alınmıştır.

Çizelge 4.15 : Dolu ilişki matrisi.

	Mevsim	Kaza Dönemi	Tren Opr Saatleri	Kaza Tipi	Ölü Durumu	Yaralı Durumu	Tren Tipi	Kaza Seviyesi	Eyalet	Kaza Nedeni	Maaliyet
Mevsim	11	12	13	14	15	16	17	18	19	1 10	1 11
Kaza Dönemi	21	22	23 P-Value:0 Cramer's V: 0,280	24	25	26	27 P-Value : 0 Cramer's V: 0,214	28	29	2 10	2 11 P-Value : 0,003 Cramer's V: 0,207
Tren Opr Saatleri	31	32	33	34	25	36	37 P-Value : 0,001 Cramer's V: 0,237	38	39	3 10	3 11
Kaza Tipi	41	42	43	44	45 P-Value : 0 Cramer's V: 0,368	46 P-Value : 0 Cramer's V: 0,442	47 P-Value : 0 Cramer's V: 0,305	48 P-Value : 0 Cramer's V: 0,379	49	4 10 P-Value : 0 Cramer's V: 0,605	4 11 P-Value : 0,059 Cramer's V: 0,172
Ölü Durumu	51	52	53	54	55	56 P-Value : 0 Cramer's V: 0,301	57 P-Value : 0,001 Cramer's V: 0,275	58 P-Value : 0 Cramer's V: 1	59 P-Value : 0,020 Cramer's V: 0,240	5 10 P-Value : 0 Cramer's V: 0,398	5 11
Yaralı Durumu	61	62	63	64	65	66	67 P-Value : 0,001 Cramer's V: 0,338	68 P-Value : 0 Cramer's V: 0,938	69 P-Value : 0,029 Cramer's V: 0,232	6 10 P-Value : 0 Cramer's V: 0,421	6 11
Tren Tipi	71	72	73	74	75	76	77	78 P-Value : 0 Cramer's V: 0,273	79	7 10 P-Value : 0 Cramer's V: 0,234	7 11
Kaza Seviyesi	81	82	83	84	85	86	87	88	89 P-Value : 0,014 Cramer's V: 0,219	8 10 P-Value : 0,014 Cramer's V: 0,374	8 11
Eyalet	91	92	93	94	95	96	97	98	99	9 10	9 11
Kaza Nedeni	10 1	10 2	10 3	10 4	10 5	10 6	10 7	10 8	10 9	10 10	10 11 P-Value : 0,063 Cramer's V: 0,152
Maaliyet	11 1	11 2	11 3	11 4	11 5	11 6	11 7	11 8	11 9	11 10	11 11

Ayrıca, yalnızca ilişkinin varlığı değil, değişkenler arasındaki muhtemel nedensellik ilişkisi ve bu ilişkinin yönü de uzman görüşleri doğrultusunda analiz edilmiştir. Uzmanlar, raylı sistemlerdeki operasyonel süreçler, emniyet sistemi ve kazaların neden-sonuç yapıları konularındaki bilgi ve deneyimlerinden faydalanarak, istatistiksel bulguların sektörel gerçeklikle ne ölçüde örtüştüğünü yorumlamışlardır.

Bu çerçevede, istatistiksel olarak anlamlı bulunan değişken çiftlerine ilişkin nedensellik yönünü ve bağlamsal uygunluğunu değerlendirmek amacıyla uzman görüşleri detaylandırılmış; elde edilen bulgular Çizelge 4.16'da bağımsız ve bağımlı değişken eşleşmeleriyle birlikte sunulmuştur. Uzman değerlendirmeleri kapsamında, ilişkiler doğrudan (direkt) ya da dolaylı etkiler şeklinde sınıflandırılmış, bazı değişken çiftleri arasında ise nedensel bir bağ bulunmadığı belirtilmiştir.

Çizelge 4.16'da yer alan değerlendirmelere göre örneğin; "ölü durumu" ve "yaralı durumu" değişkenleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki bulunmasına rağmen, her iki değişkenin de kazanın sonucu olması nedeniyle neden-sonuç ilişkisi kurulamayacağı ifade edilmiştir. Benzer şekilde, "kaza nedeni" değişkeninin "kaza tipi", "yaralı durumu" ve "ölü durumu" üzerinde dolaylı etkilerle sonuç doğurduğu; "kaza tipi"nin ise doğrudan "kaza seviyesi", "ölü durumu" ve "yaralı durumu" gibi sonuç değişkenleriyle ilişkili olduğu uzmanlarca belirtilmiştir.

Öte yandan, "eyalet", "tren tipi" ve "kaza dönemi" gibi bazı değişkenlerin doğrudan veya dolaylı yollarla birden fazla değişkeni etkileyebildiği gözlemlenmiştir. Bu değerlendirmeler sonucunda, değişkenler arasındaki ilişkilerin hem yönü hem de açıklanabilirliği belirginleşmiş; Bayes Ağı modelinde nedensel yönlerin tutarlı ve sektörel bağlamla uyumlu biçimde kurgulanmasına katkı sağlanmıştır. Ek olarak, mevsim değişkeni ile hiçbir değişken arasında anlamlı bir ilişki olmadığı modelde yer almamaktadır.

Bununla birlikte, uzman görüşlerinin sadece ilişkilerin yönünü belirlemede değil, aynı zamanda modelleme sürecinde gereksiz veya yanıltıcı bağların elimine edilmesinde de kritik bir rol oynadığı görülmüştür. Örneğin, istatistiksel olarak anlamlı ancak sektörel gerçeklikle örtüşmeyen bazı ilişkiler, uzman değerlendirmeleri sayesinde model dışı bırakılarak, Bayes Ağı'nın hem yorumlanabilirliği hem de karar destek kapasitesi artırılmıştır. Böylece, sadece istatistiksel anlamlılık değil, sektörel geçerlilik de gözetilerek model yapısı daha sağlam ve güvenilir hale getirilmiştir.

Çizelge 4.16 : İlişki yön değerlendirmesi.

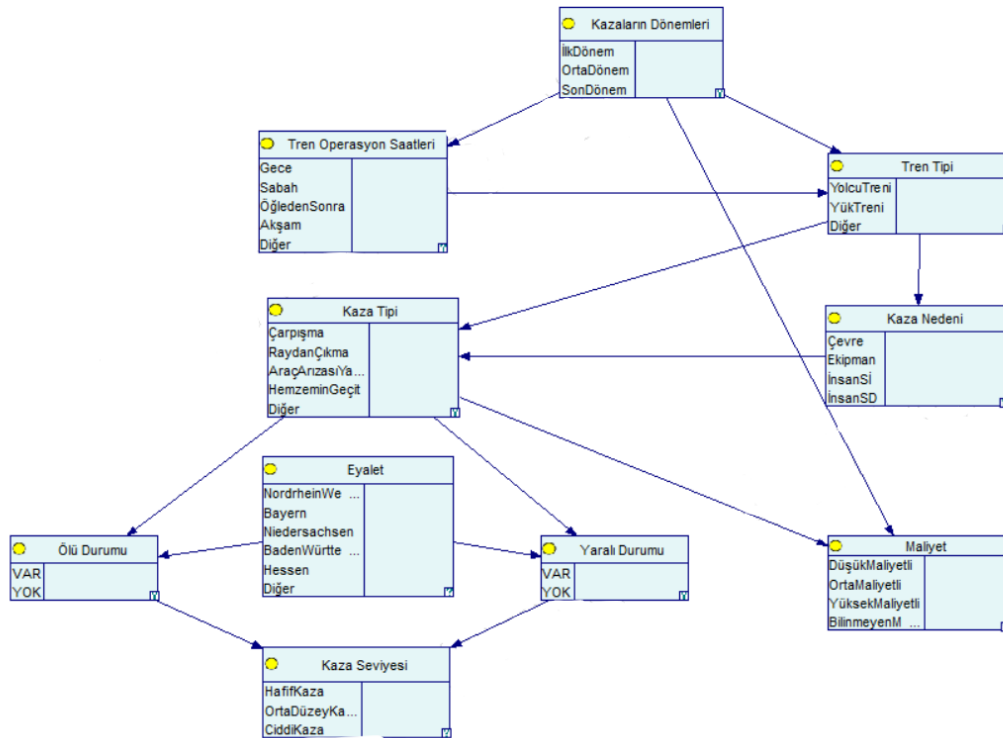
<u>Bağımsız Değişken</u>		<u>Bağımlı Değişken</u>	<u>Uzman Görüşü</u>
Ölü Durumu	→	Kaza Seviyesi	Direkt İlişki
Yaralı Durumu	→	Kaza Seviyesi	Direkt İlişki
Kaza Nedeni	→	Kaza Tipi	Direkt İlişki
Kaza Tipi	→	Yaralı Durumu	Direkt İlişki
Kaza Nedeni	→	Yaralı Durumu	Dolaylı İlişki
Kaza Nedeni	→	Ölü Durumu	Dolaylı İlişki
Kaza Tipi	→	Kaza Seviyesi	Dolaylı İlişki
Kaza Nedeni	→	Kaza Seviyesi	Dolaylı İlişki
Kaza Tipi	→	Ölü Durumu	Direkt İlişki
Tren Tipi	→	Yaralı Durumu	Dolaylı İlişki
Tren Tipi	→	Kaza Tipi	Direkt İlişki
Ölü Durumu	-	Yaralı Durumu	Neden-Sonuç ilişkisi yok
Kaza Dönemi	→	Tren Operasyon Saatleri	Direkt İlişki
Tren Tipi	→	Ölü Durumu	Dolaylı İlişki
Tren Tipi	→	Kaza Seviyesi	Dolaylı İlişki
Eyalet	→	Ölü Durumu	Direkt İlişki
Tren Operasyon Saatleri	→	Tren Tipi	Direkt İlişki
Tren Tipi	→	Kaza Nedeni	Direkt İlişki
Eyalet	→	Yaralı Durumu	Direkt İlişki
Eyalet	→	Kaza Seviyesi	Dolaylı İlişki
Kaza Dönemi	→	Tren Tipi	Dolaylı İlişki
Kaza Dönemi	→	Maliyet	Dolaylı İlişki
Kaza Tipi	→	Maliyet	Dolaylı İlişki
Kaza Nedeni	-	Maliyet	Neden-Sonuç ilişkisi yok

4.1.1.4 Ağ yapısının belirlenmesi

Ön analiz sürecinde elde edilen istatistiksel bulgular ve uzman görüşleri doğrultusunda, Bayes Ağı modelinin temelini oluşturan ağ yapısı yapılandırılmıştır.

Bu aşamada, değişkenler arasındaki yönlü ilişkiler dikkate alınarak, nedensel bağlantıları temsil eden bir yönlendirilmiş döngüsüz çizge oluşturulmuştur. Ağ yapısının kurgulanmasında yalnızca istatistiksel anlamlılık değil, aynı zamanda sektörel bağlamda tutarlılığı sağlayan uzman değerlendirmeleri de dikkate alınmıştır. Böylece modelleme sürecinde, veri temelli analiz ile uzman görüşüne dayalı yapısal uygunluk birlikte ele alınarak, Bayes Ağı'nın nedensel kurgusu hem sayısal hem de bağlamsal düzeyde geçerli bir yapıya oturtulmuştur.

Ağ yapısı oluşturulurken ilk olarak ön analiz sürecinde oluşturulan ilişki tablosu ve ilişkilerin yön değerlendirmesi tablosu esas alınmıştır. Bu tablolarda yer alan bağlantılar, hem Ki-kare testi sonuçlarına dayalı istatistiksel ilişkiler hem de sektör uzmanlarının yorumları doğrultusunda belirlenen nedensel yönelimlerle birleştirilmiştir. Elde edilen bilgiler ışığında, değişkenlerin ebeveyn ve çocuk ilişkileri tanımlanarak GeNIe Academic yazılımı aracılığıyla modelin iskeleti oluşturulmuştur. Kurulan bu temel yapı, Bayes Ağı'nın hem senaryo analizlerinde hem de nedensellik değerlendirmelerinde referans alınacak temel ağ yapısını temsil etmektedir. Şekil 4.2'de bu yapının görsel temsili sunulmuştur. Ağın bu şekilde kurgulanması, sonraki aşamalarda gerçekleştirilecek niceliksel modellemelere sağlam bir temel oluşturarak, analizlerin geçerliliğini ve güvenilirliğini artırmaktadır.



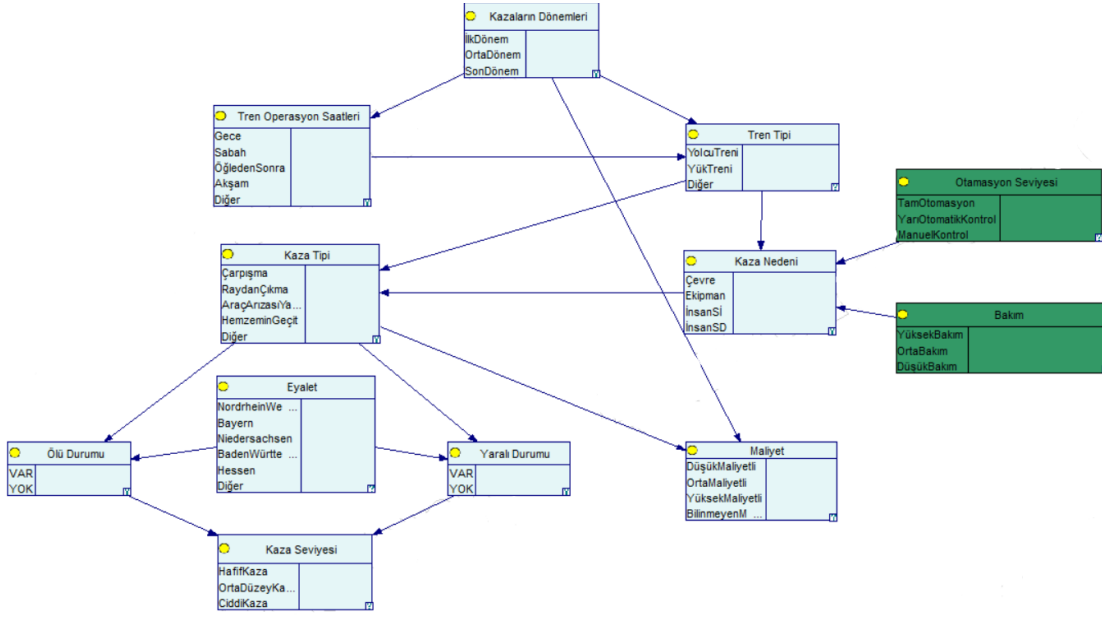
Şekil 4.2 : Temel ağ yapısı.

Bu modelde, Çizelge 4.15'te istatistiksel olarak anlamlı ilişki gösteren 10 değişken dikkate alınmış ve her bir değişkenin kategorik düzeyde tanımı yapılmıştır. Ardından, yön değerlendirme tablosunda tanımlanan neden-sonuç ilişkileri doğrultusunda değişkenler arasına yönlü oklar atanarak ağ yapısı kurgulanmıştır. Örneğin, “Yaralı Durumu” ve “Ölü Durumu” değişkenleri, doğrudan “Kaza Seviyesi” değişkenini etkileyen sonuç göstergeleri olarak değerlendirilmiş ve bu doğrultuda her iki değişkenden “Kaza Seviyesi”ne doğru yönlü bağlantılar oluşturulmuştur. Benzer şekilde, dolaylı etkisi olan değişkenler için, nedensel bağlar birden fazla düğüm aracılığıyla modellenmiştir. Örneğin, “Kaza Nedeni” değişkeni, “Kaza Tipi” üzerinden dolaylı olarak “Ölü Durumu”nu etkileyen bir yapıya sahiptir. Bu yapı, Bayes Ağı'nın nedensel mantığını yansıtacak şekilde hem veri destekli hem de uzman temelli yaklaşımı bütünleştirmektedir. Oluşturulan bu temel yapı, bir sonraki aşamada koşullu olasılık tablolarının hazırlanması için gerekli nedensel iskeleti sağlamaktadır.

Temel ağ yapısının oluşturulmasının ardından, modelin kapsayıcılığını ve açıklayıcılığını artırmak amacıyla iki yeni değişkenin daha sisteme dahil edilmesine karar verilmiştir. Bu değişkenler, doğrudan veri setinde nicel olarak yer almamakla birlikte, sektörel bilgi birikimi ve literatür desteğiyle “Kaza Nedeni” değişkeni üzerinde anlamlı bir etkiye sahip oldukları gerekçesiyle modele entegre edilmiştir. Ayrıca, söz konusu değişkenlerin kontrol edilebilir nitelikte olmaları ve olası kazaların önlenmesine yönelik strateji geliştirme süreçlerinde karar vericilere yol gösterici olma potansiyeli taşımaları da modele dahil edilmelerini destekleyen önemli bir gerekçe olmuştur.

İlk olarak eklenen “Otomasyon Seviyesi” değişkeni, sistemlerin tam otomatik, yarı otomatik ya da manuel kontrol altında olmasının kazalara neden olan insan-makine etkileşimini doğrudan etkilediği varsayımına dayanmaktadır. İkinci olarak eklenen “Bakım” değişkeni ise, hatların veya araçların bakım düzeyinin ekipman arızaları başta olmak üzere birçok kaza nedeni üzerinde belirleyici bir rol oynadığı öngörüsüne dayanmaktadır.

Bu değişkenlerin veri temelli bir karşılığı olmamasına rağmen, Kaza Nedeni değişkenine yönlendirilmiş bağlantılar ile sisteme dahil edilmesi, Bayes Ağı'nın gerçekçi ve sektörel olarak anlamlı bir yapıya kavuşmasını sağlamıştır. Böylelikle hem uzman görüşü hem de kuramsal yaklaşımla desteklenen bir model elde edilmiştir. Geliştirilmiş ağ yapısı Şekil 4.3'te sunulmaktadır.



Şekil 4.3 : Güncellenmiş ağ yapısı.

Şekil 4.3’de sunulan geliştirilen Bayes Ağı modeli, demiryolu kazalarının neden ve sonuç ilişkilerini nedensel bağlamda sistematik biçimde ortaya koymaktadır. Model, doğrudan veri setinden elde edilen değişkenlerin yanı sıra sektörel bilgiyle desteklenen iki kritik değişkenin (Otomasyon Seviyesi ve Bakım) dahil edilmesiyle kapsamlı hale getirilmiştir. Bu yapı sayesinde kazaların meydana gelişinde rol oynayan çevresel, operasyonel, teknik ve insan faktörleri birlikte ele alınmış; sonuç değişkenleri olan maliyet, yaralı durumu, ölü durumu ve kaza seviyesi gibi kritik çıktılar üzerinde etkili olabilecek tüm belirleyiciler modellenmiştir. Geliştirilen bu ağ yapısı, modelin olasılık yapısının tanımlanacağı niceliksel aşama için gerekli temel bağlantı haritasını sunmaktadır.

Sonuç olarak, niteliksel aşamada yürütülen bu çok katmanlı analiz süreciyle, Bayes Ağı’nın yapısal temeli başarıyla inşa edilmiştir. Değişkenler arasındaki nedensel ilişkiler, hem istatistiksel analizlerle hem de uzman görüşleriyle desteklenerek yönlendirilmiş döngüsüz çizge yapısına dönüştürülmüş; böylece kazaların oluş nedenlerini ve sonuçlarını açıklamaya yönelik kapsamlı bir çerçeve oluşturulmuştur. Ayrıca veri setinde yer almayan ancak sektörel bilgiyle önemi vurgulanan “Otomasyon Seviyesi” ve “Bakım” gibi değişkenlerin de yapıya entegre edilmesi, modelin gerçek dünyadaki karşılığını güçlendirmiştir.

Bu yapısal temelin ardından, bir sonraki aşamada modelin olasılık dağılımlarının tanımlanması ve koşullu olasılık tablolarının oluşturulması amacıyla niceliksel aşamaya geçilmiştir.

4.1.2 Niceliksel aşama

Bayes Ağı modelinin niceliksel aşamasında, daha önce yapılandırılmış olan yönlendirilmiş ağ yapısı temel alınarak, her bir değişken için koşullu olasılık tabloları oluşturulmuştur. Bu tablolar, değişkenlerin ebeveynleriyle olan nedensel ilişkileri doğrultusunda belirlenen durum uzayları üzerinden olasılık değerleriyle doldurulmuş; modelin tepe düğümünden başlayıp, hiyerarşik bir şekilde aşağı doğru ilerleyen yapısal düzen içerisinde uygulanmıştır. İlk olarak, "Kaza Nedeni" değişkeninin bağlı olduğu üç ebeveyn değişken temelinde koşullu olasılık dağılımları belirlenmiş; her bir ebeveyn kombinasyonu için "Kaza Nedeni" değişkenine ait Koşullu Olasılık Tablosu ayrı ayrı hesaplanmıştır. Bu sayede, değişkenin ağ yapısındaki rolü hem istatistiksel hem de nedensel olarak temsil edilmiştir. Son olarak, modelin en alt seviyesinde yer alan "Kaza Seviyesi" değişkeni için gerekli koşullu olasılıklar tanımlanmıştır. Bu aşama, yalnızca modelin sayısal temelini oluşturmakla kalmayıp, veri temelli çıkarımların yapılabilmesi, çeşitli senaryoların analiz edilebilmesi ve belirsizlik altındaki durumların daha sağlıklı yorumlanabilmesi açısından kritik bir rol üstlenmiştir. Olasılıkların belirlenmesinde hem tarihsel veri seti hem de uzman görüşlerinden yararlanılmasıyla, model hem nesnel hem de deneyimsel bilgiyle desteklenmiştir.

4.1.2.1 Olasılıkların belirlenme yöntemi ve koşullu olasılık tablolarının oluşturulması

Niceliksel aşamada, Bayes Ağı yapısında yer alan değişkenlere ait koşullu olasılık tabloları, veri seti ve uzman görüşlerine dayanarak oluşturulmuştur.

Koşulsuz olasılıkların belirlenmesinde, ilgili değişkenin her bir durumunun toplam frekansa oranı esas alınarak hesaplama yapılmış; koşullu olasılıklar ise, ebeveyn değişken(ler)in her bir kombinasyonu için alt değişkenin kategori dağılımının satır bazlı normalize edilmesiyle elde edilmiştir. Bu hesaplamalarda, önceden oluşturulan pivot tablolar ve veri seti üzerinden gerçekleştirilen filtrelemelerden yararlanılmıştır.

Örneğin, “Kaza Dönemi” ile “Tren Operasyon Saatleri” değişkenleri arasındaki ilişkiyi gösteren Çizelge 4.17 pivot tablo çalışmalarına dayalı olarak koşullu olasılık belirleme sürecinin bir çıktısıdır. Bu tür tablolar sayesinde, farklı dönemlerdeki kazaların günün hangi saat aralıklarında yoğunlaştığı analiz edilmiş ve modelin niceliksel yapısına doğrudan katkı sağlanmıştır.

Çizelge 4.17 : Örnek kaza dönemi ve tren operasyon saatleri değişkenleri arasındaki ilişkiyi gösteren pivot tablo.

Kazaların Dönemleri - Tren Operasyon Saatleri						
Tren Operasyon Saatleri						
Kazaların Dönemleri	-	Akşam	Gece	Öğleden Sonra	Sabah	Genel Toplam
İlk Dönem	11	12	12	10	10	55
Orta Dönem		39	16	29	28	112
Son Dönem	1	23	10	14	17	65
Genel Toplam	12	74	38	53	55	232

Bu çalışma kapsamında, toplamda 11 değişkenin birbiriyle olan ilişkilerini analiz edebilmek amacıyla her biri için ayrı ayrı pivot tablolar oluşturulmuştur. Bayes Ağı’ndaki değişkenler arasında çift yönlü ilişkiler söz konusu olabileceğinden dolayı, tablolar simetrik yapı gösterdiği için yalnızca bir yönlü analiz yapılmıştır. Bu analizler sırasında, her bir değişken çifti arasındaki frekans dağılımları gözlemlenmiş ve anlamlı ilişkiler değerlendirilmeye alınmıştır. Ancak, Mevsim değişkeni ile diğer hiçbir değişken arasında anlamlı veya dikkat çekici bir ilişki gözlemlenmediğinden, bu değişken analiz sürecinin sonraki aşamalarında dikkate alınmamıştır.

Değişkenler, olasılık belirleme yöntemine göre aşağıdaki şekilde sınıflandırılmıştır:

- Veriye dayalı olarak doldurulan değişkenler: Kaza Dönemi, Tren Operasyon Saatleri, Tren Tipi, Kaza Tipi, Eyalet, Ölü Durumu, Yaralı Durumu, Maliyet ve Kaza Seviyesi gibi değişkenlerin koşullu olasılık tabloları, doğrudan veri setinde yer alan gözlemlere dayalı olarak frekans analizleriyle oluşturulmuştur. Her bir değişkenin farklı kategorileri için, gözlenen sayımların normalize edilmesi yoluyla olasılıklar hesaplanmış ve GeNIe Academic yazılımı aracılığıyla modele entegre edilmiştir. Bu yöntemin uygulamasına örnek olarak, “Tren Operasyon Saatleri” değişkenine ait koşullu olasılık tablosunun bir bölümü Şekil 4.4’te sunulmaktadır.

Kazaların Dönem.	İlkDönem	OrtaDönem	SonDönem
Gece	0.21818182	0.14285714	0.15384615
Sabah	0.18181818	0.25	0.26153846
ÖğledenSonra	0.18181818	0.25892857	0.21538462
Akşam	0.21818182	0.34821429	0.35384615
Diğer	0.2	0	0.015384615

Şekil 4.4 : Veriye dayalı doldurulan değişken örneği.

- Uzman görüşü ile doldurulan değişkenler: Veri setinde doğrudan temsil edilemeyen Bakım ve Otomasyon Seviyesi değişkenleri için koşullu olasılık tabloları, ilgili alanda uzman kişilerin değerlendirmelerine dayanarak oluşturulmuştur. Her iki değişken için üçer kategori tanımlanmış olup, belirsizliğin dengelenmesi amacıyla bu kategorilere eşit olasılık değerleri atanmıştır. Böylece, veri eksikliğine rağmen uzman bilgisiyle tutarlı ve dengeli bir yapı kurulması hedeflenmiştir. Ayrıca eşit dağılım yapılmasının diğer bir nedeni ise senaryolar nezdinde bu değişkenlerin kategorilerinin olasılık değişimlerini gözlemlemektir. Bu değişkenlere ait koşullu olasılık tablolarının GeNIe Academic yazılımında oluşturulan görselleri Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da sunulmaktadır.

Otomasyon Seviyesi	Değer
TamOtomasyon	0.33333333
YarıOtomatik Kontrol	0.33333333
Manuel Kontrol	0.33333333

Şekil 4.5 : Otomasyon seviyesi değişkeni KOT.

Node properties: Bakım

Property	Value
Yüksek Bakım	0.33333333
Orta Bakım	0.33333333
Düşük Bakım	0.33333333

Şekil 4.6 : Bakım değişkeni KOT.

- Hibrit yöntemle oluşturulan doldurulan değişkenler: Kaza Nedeni değişkeni için oluşturulan koşullu olasılık tablosu, hem veri tabanlı analizleri hem de uzman görüşüne dayalı tahminleri bütünleştiren çok aşamalı bir yöntemle yapılandırılmıştır.

- Veriye Dayalı KOT oluşturulması: İlk aşamada, yalnızca gözlemsel veriye dayalı olarak Kaza Nedeni ile Tren Tipi arasındaki ilişki analiz edilmiştir (Çizelge 4.18). Elde edilen frekans verileri normalize edilerek koşullu olasılık değerlerine dönüştürülmüş ve ilk koşullu olasılık tablosu oluşturulmuştur. Bu yapı, daha önce veriye dayalı olarak hesaplanan diğer değişkenlerle aynı metodolojik yaklaşıma sahiptir.

Çizelge 4.18 : Kaza nedeni – tren tipi değişkeni için veriye dayalı KOT.

Kaza Nedeni		Yolcu Treni	Yük Treni	Diğer
	Çevre	0,072727	0,026316	0,125
	Ekipman	0,336364	0,552632	0,125
	İnsanSİ	0,372727	0,377193	0,625
	İnsanSD	0,218182	0,04386	0,125

- Uzman görüşüne dayalı KOT oluşturulması: İkinci aşamada, doğrudan veriyle temsil edilemeyen Otomasyon Seviyesi ve Bakım değişkenleri için uzman görüşlerine başvurulmuştur. Her iki değişken için de üç kategori tanımlanmış ve eşit dağılıma sahip (uniform) olasılık değerleri atanarak KOT oluşturulmuştur. Otomasyon Seviyesi ile Kaza Nedeni

arasındaki ilişkiye ait tablo yapısı Çizelge 4.19’da, Bakım ile Kaza Nedeni arasındaki yapı ise de Çizelge 4.20’de ifade edilmektedir.

Çizelge 4.19 : Kaza nedeni değişkeni için otomasyon seviyesi.

Kaza Nedeni		Tam	Yarı	Manuel
	Çevre	0,10	0,05	0,05
	Ekipman	0,45	0,35	0,25
	İnsanSi	0,05	0,30	0,55
	İnsanSD	0,40	0,30	0,15

Çizelge 4.20 : Kaza nedeni değişkeni için bakım değişkeni.

Kaza Nedeni		Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım
	Çevre	0,050	0,050	0,050
	Ekipman	0,300	0,400	0,550
	İnsanSi	0,450	0,350	0,200
	İnsanSD	0,200	0,200	0,200

3. Bileşik KOT oluşturulması:

Koşullu olasılık tablolarının oluşturulması sürecinde, özellikle çok sayıda ebeveyni olan düğümler için, doğrudan olasılık atamaları yapmak çoğu zaman hem uzmanlar için zorlayıcı olmakta hem de tutarlılık sorunlarına neden olmaktadır. Bu zorluğa çözüm sunan ilk yaklaşımlardan biri Kim ve Pearl (1983) tarafından geliştirilmiştir. Bu çalışmada, bir düğümün birden fazla ebeveyni olması durumunda, düğüme ait koşullu olasılığın, her bir ebeveyne bağlı koşullu olasılıkların çarpımıyla yaklaşık olarak hesaplanabileceği önerilmiştir. Bu yöntem, olasılıkların toplamının 1 olacak şekilde normalize edilmesini gerektirmekte ve bağımlı değişkenin ebeveynlerine koşullu bağımsız olduğu varsayımına dayanmaktadır. Böylece çok sayıda kombinasyon için doğrudan uzman görüşü alma yükü azaltılmış, hesaplama verimliliği artırılmıştır (Kim ve Pearl, 1983).

Bu temel prensip, daha sonra Chin ve diğ. (2009) tarafından sistematik bir metodolojiye dönüştürülerek genişletilmiştir. Söz konusu çalışmada, Bayes Ağı içerisinde çok ebeveynli düğümler için koşullu olasılıkların belirlenmesi amacıyla üç farklı durum için önerilen çözümler sunulmuştur: (i) kök düğüm olasılıklarının ikili karşılaştırmalar yoluyla belirlenmesi, (ii) tek ebeveynli düğümler için pairwise comparison matrisleriyle KOT oluşturulması ve (iii) çok ebeveynli düğümler için Kim

ve Pearl yaklaşımının genelleştirilmesi. Bu üçüncü durumda, her bir ebeveyne koşullu olarak elde edilen olasılıklar ayrı ayrı hesaplanmakta, ardından bu değerlerin çarpımı normalize edilerek birleşik koşullu olasılık elde edilmektedir. Bu yöntem sayesinde hem hesaplama kolaylığı sağlanmakta hem de uzman değerlendirmelerinin sistematik bir biçimde kullanılmasına olanak tanınmaktadır.

Bu çalışmada, Bayes Ağı modeli kapsamında yer alan “Kaza Nedeni” değişkeninin üç ayrı ebeveyne olan Tren Tipi, Otomasyon Seviyesi ve Bakım Düzeyi ile olan ilişkileri üzerinden birleşik bir KOT oluşturulmuştur. Söz konusu üç ebeveynden Tren Tipi için veriler doğrudan veri setinden (Çizelge 4.18), Otomasyon Seviyesi (Çizelge 4.19) ve Bakım (Çizelge 4.19) değişkenleri için ise uzman görüşlerine dayalı olarak oluşturulmuştur.

Üçüncü aşamada, yukarıda ayrı ayrı belirlenen kaza nedeni - tren tipi, kaza nedeni - otomasyon seviyesi ve kaza nedeni - bakım ilişkilerine ait koşullu olasılık tabloları birleştirilerek bileşik bir koşullu olasılık tablosu oluşturulması amaçlanmıştır. Bu birleştirme sürecinde, Chin ve diğ. (2009) tarafından önerilen yöntem temel alınmış; her bir ebeveyne ait koşullu olasılıkların çarpımı alınmış ve sonuçlar normalize edilerek “Kaza Nedeni” değişkenine ait tüm kombinasyonlara karşılık gelen olasılık değerleri hesaplanmıştır. Nihai bileşik koşullu olasılık tablolarına Çizelge A.1 ve Çizelge A.2’de yer verilmiştir.

Bu çalışmada Kaza Nedeni değişkenine ait koşullu olasılık tablosu, hem veriye dayalı analizler hem de uzman görüşlerini bütünleştiren hibrit bir yaklaşımla oluşturulmuştur. Süreç; veri setinden elde edilen frekanslarla ilk koşullu olasılık tablosunun kurulması, uzman değerlendirmeleriyle Otomasyon Seviyesi ve Bakım değişkenlerinin eklenmesi, bu üç tablo üzerinden bileşik olasılıkların hesaplanması ve nihai olarak normalizasyon işlemiyle tamamlanmıştır. Böylece, hem gözlemsel hem de uzman temelli bilgilerle güçlendirilmiş bütüncül bir model yapısı elde edilmiştir.

4.1.2.2 Eksik veri ve belirsizlik durumları (varsayımlar)

Bayes Ağı modellemesinin niceliksel aşamasında, GeNIe Academic yazılımı kullanılarak oluşturulan koşullu olasılık tablolarında, her sütunun toplamının 1 (yani %100) olması gerekmektedir. Ancak, bazı değişken kombinasyonları için veri setinde gözlem bulunmadığı durumlarda, ilgili sütun toplamı sıfır olmakta ve yazılım bu

durumu kabul etmemektedir. Bu nedenle, modelin çalışabilirliğini sağlamak ve mantıksal tutarlılığı korumak amacıyla, istatistiksel bütünlüğü bozmayacak ve modelin çıktıları üzerinde minimal düzeyde etki oluşturacak varsayımlar yapılmıştır.

Gerçekleştirilen bu varsayımlar, eksik gözlemleri temsil edecek şekilde kurgulanmış ve yalnızca birer kayıt düzeyinde sisteme entegre edilmiştir. Aşağıda yapılan varsayımlar maddeler halinde sunulmaktadır:

- Tren Tipi değişkenine ilişkin olarak, “Kaza Dönemi” Orta Dönem ve “Tren Operasyon Saati” Diğer olan kombinasyonda veri bulunmamaktadır. Bu nedenle, bu kombinasyona ait “Diğer” tren tipinde bir kazanın var olduğu varsayılmıştır.
- Ölü Durumu değişkeni için;
 - “Kaza Tipi” Araç Arızası & Yangını ve “Eyalet” Bayern olan bir kaza bulunmamaktadır. Bu kombinasyon için Ölü Durumu Yok şeklinde bir kayıt varsayılmıştır.
 - Aynı şekilde, “Eyalet” Hessen için de benzer bir eksiklik tespit edilmiş ve Ölü Durumu Yok olan bir vaka varsayılmıştır.
- Yaralı Durumu değişkeni için;
 - “Kaza Tipi” Araç Arızası & Yangını ve “Eyalet” Bayern kombinasyonu için veri mevcut değildir. Bu eksikliği gidermek adına Yaralı Durumu Yok olan bir kaza eklenmiştir.
 - “Eyalet” Hessen için de aynı koşullarda eksiklik bulunmakta olup, Yaralı Durumu Yok olan bir kayıt modele dahil edilmiştir.

Tüm varsayımlar, veri mantığı ve sektör bilgisiyle tutarlılık gözetilerek tanımlanmıştır.

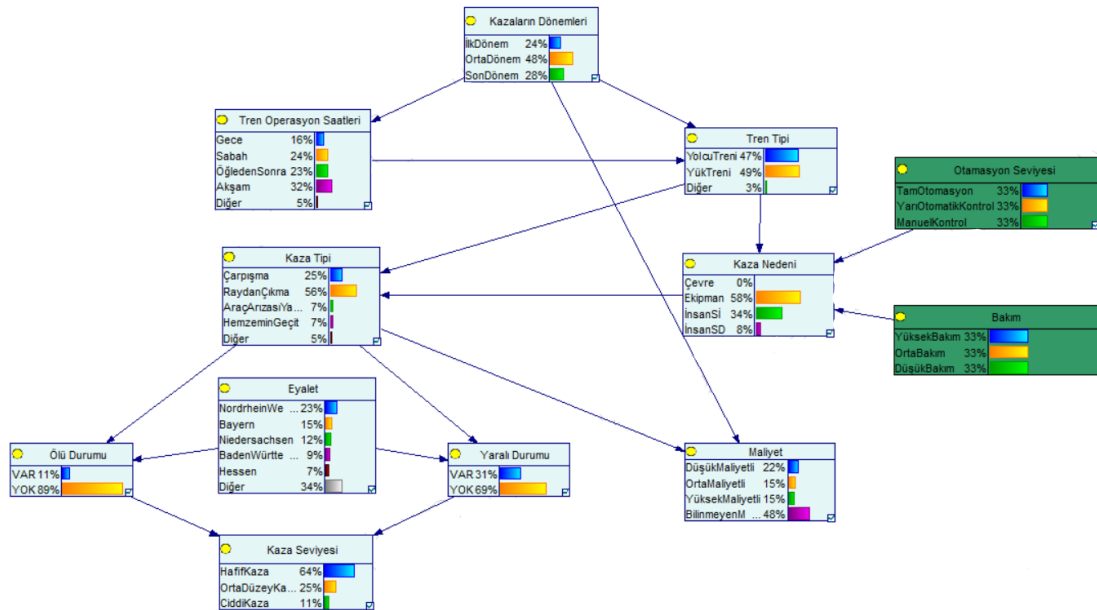
4.2 Model Analizleri

Bu bölümde, Bayes Ağı modeli kurulduktan sonra Almanya’ya ait kaza verileriyle gerçekleştirilen analizlere yer verilmektedir. Analizler, hem mevcut verilerin değerlendirilmesini hem de farklı senaryoların sistem üzerindeki etkilerinin incelenmesini kapsamaktadır. Bu sayede modelin yalnızca geçmiş olayları açıklama yeteneği değil, aynı zamanda karar destek süreçlerinde nasıl kullanılabileceği de ortaya konmuştur.

Öncelikle mevcut durum analizi ile modelin veri seti üzerindeki temsil gücü test edilmiş, ardından uzman görüşleri doğrultusunda belirlenen senaryolar oluşturulmuştur. Bu senaryolarda, belirli değişkenlerde yapılan değişikliklerin model çıktıları üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir; örneğin bakım düzeyinin düşmesi ya da otomasyon seviyesinin artması gibi durumların kaza nedeni ve tipi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Böylece model, hem açıklayıcı hem de öngörücü bir araç olarak yapılandırılmıştır.

4.2.1 Mevcut durum analizi (temel senaryo)

Bu analiz, 2007–2023 yılları arasında Almanya’da meydana gelen demiryolu kazalarına ait veri setinin mevcut durumunu yansıtmaktadır. Bayes Ağı modeli üzerinde herhangi bir ön koşul veya sabitleme uygulanmadan elde edilen bu sonuçlar, veri setinin genel yapısına ve tarihsel eğilimlerine dayanan marjinal olasılık dağılımlarını ortaya koymaktadır. Aşağıda, modelde yer alan her bir değişken için bu genel duruma göre olasılık dağılımları detaylı olarak analiz edilmiştir. Bu analizler, veri setinin kendi iç dinamiklerine bağlı olarak modelin nasıl davrandığını gözlemlemeye olanak tanımakta ve modelin temsiliyet düzeyinin değerlendirilmesi açısından önemli bir temel oluşturmaktadır. Ayrıca, daha sonra yapılacak senaryo analizleri için referans niteliğindedir. Mevcut durumu temsil eden Bayes Ağı modelinin yazılım çıktısı Şekil 4.7’de sunulmaktadır.



Şekil 4.7 : Mevcut durum GeNle modeli.

Kaza Tipi: Değişken incelendiğinde en baskın kaza türünün %56 oranıyla “Raydan Çıkma” olduğu görülmektedir. Bu durumu %25 ile “Çarpışma” takip etmektedir. “Araç Arızası ve Yangını”, “Hemzemin Geçit Kazaları” ve “Diğer” kategorileri ise oldukça düşük paylara sahiptir. Bu, sistemde raydan çıkma olaylarının emniyet açısından en kritik olaylar arasında yer aldığını göstermektedir.

Kaza Nedeni: Kazaların nedenleri arasında %58 ile Ekipman kaynaklı nedenler başı çekmektedir. Ardından %34 ile İnsanSD kaynaklı hatalar gelmektedir. İnsanSD %8 ile sınırlı bir paya sahiptir. Çevresel faktörlerin etkisi ise %0 olarak modellenmiştir. Bu dağılım, kazaların büyük ölçüde sistem bileşenleri veya sistem içindeki insan hatalarından kaynaklandığını ortaya koymaktadır.

Tren Tipi: Kazaya karışan trenlerin %49’unun yük trenleri, %47’sinin ise yolcu trenleri olduğu görülmektedir. Bu dağılım oldukça dengeli olmakla birlikte yük trenlerinin hafif baskın olduğu görülmektedir. Bu, hem yolcu hem de yük operasyonlarının emniyet açısından eşit önemde değerlendirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Tren Operasyon Saatleri: Kazaların en sık meydana geldiği zaman dilimi %32 ile Akşam saatleridir. Sabah saatleri %24, Öğleden Sonra %23, Gece %10 oranındadır. Bu, günün ilerleyen saatlerinde operasyonel dikkat veya yoğunluk nedeniyle kaza olasılığının arttığını düşündürebilir.

Ölü Durumu: Modeldeki ölümlü kazaların oranı %11, ölümsüz kazaların oranı ise %89 olarak öne çıkmaktadır. Bu, sistem genelinde ölümle sonuçlanan kazaların görece düşük oranlarda olduğunu gösterse de her bir olayın ciddiyetle değerlendirilmesi gerekliliğini ortaya koymaktadır.

Yaralı Durumu: Yaralı bulunan kazaların oranı %31, yaralanmasız kazaların oranı ise %69’dur. Bu oran, ölüm oranına göre daha yüksektir ve kaza sonrası insan etkisinin önemli olduğunu göstermektedir.

Kaza Seviyesi: Kaza seviyelerine göre dağılımda, hafif kazalar %64 ile en yüksek orana sahiptir. Orta düzeydeki kazalar %25, ciddi kazalar ise %11 oranındadır. Bu dağılım, olayların çoğunlukla hafif etkilerle sonuçlandığını, ancak yine de ciddi kazaların göz ardı edilemeyecek düzeyde olduğunu göstermektedir.

Maliyet: Kazaların mali etkilerine ilişkin dağılım incelendiğinde, %43 ile düşük maliyetli kazalar en yüksek orana sahiptir. Bunu %31 ile yüksek maliyetli kazalar ve %27 ile orta maliyetli kazalar takip etmektedir. Ancak bu dağılım, veri setinin emniyet departmanı kaynaklı olması ve maliyet bilgilerinin büyük ölçüde tahmini değerlere dayanması nedeniyle, diğer değişkenlere kıyasla daha düşük bir doğruluk payına sahip olabilir. Bu durum, modeldeki maliyet değişkeninin yorumlanmasında temkinli olunması gerektiğine işaret etmektedir.

Eyaletler: Kazaların eyaletlere göre dağılımında, %20 ile Nordrhein-Westfalen ilk sırada yer almakta, ardından %12 ile Bayern, %11 ile Niedersachsen ve %9 ile Baden-Württemberg gelmektedir. %34'lük oran ise diğer eyaletlerdeki kazaları kapsamaktadır. Bu dağılım, yalnızca kaza sıklığını değil, aynı zamanda eyaletlerin demiryolu ağı yoğunluğu, nüfus büyüklüğü ve sanayi/lojistik faaliyetlerinin düzeyi gibi faktörleri de yansıtmaktadır. Örneğin, Nordrhein-Westfalen, Almanya'nın en kalabalık eyaleti olmasının yanı sıra sanayi ve yük taşımacılığı açısından da kritik bir bölge olduğundan, kazaların bu bölgede daha sık görülmesi beklenen bir durumdur. Benzer şekilde, Bayern ve Baden-Württemberg gibi eyaletler geniş demiryolu altyapısına ve yüksek yolcu/yük trafiğine sahip olmaları nedeniyle öne çıkmaktadır. Dolayısıyla bu dağılım, yalnızca emniyet açısından değil, bölgesel risk yönetimi, bakım planlaması ve kapasite düzenlemeleri gibi alanlarda da farklı eyaletlerin özel önlemlerle ele alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Otomasyon Seviyesi ve Bakım: Her iki değişken de modelde eşit oranlarla (%33) dağılmıştır. Bu durum, modelin bu değişkenler açısından tarafsız bir başlangıç noktası sunduğunu göstermektedir. Bu iki değişkenin etkileri, sabitleme yapılarak gerçekleştirilen senaryo analizlerinde detaylı olarak ele alınmıştır.

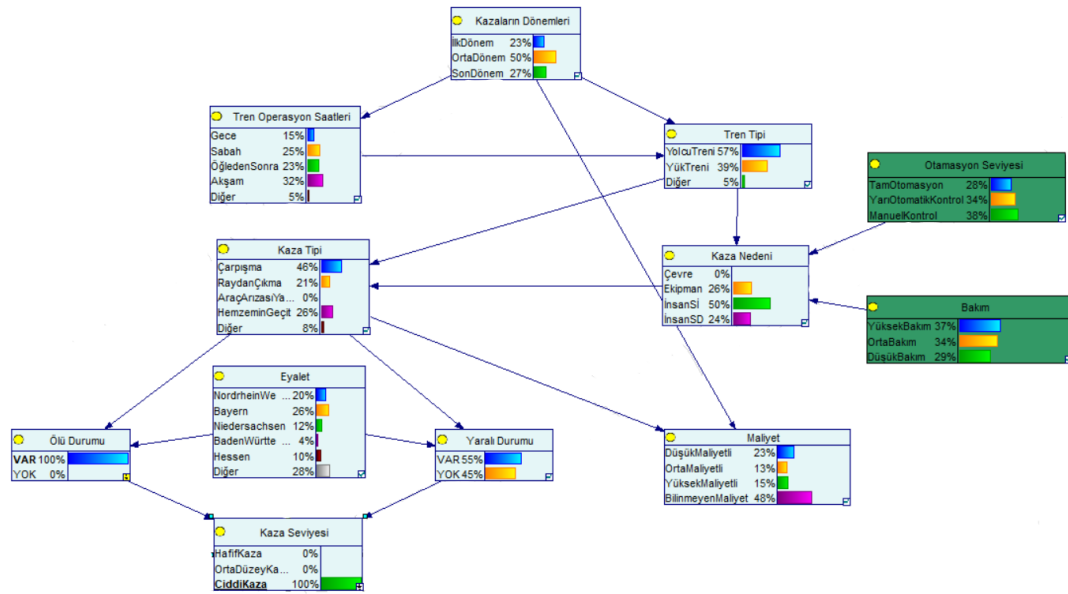
Genel olarak mevcut durum analizi, demiryolu kazalarının ağırlıklı olarak ekipman kaynaklı nedenlerden ve raydan çıkma olaylarından kaynaklandığını, yük trenlerinin bu kazalarda daha yüksek oranda yer aldığını ve özellikle akşam saatlerinde kaza olasılığının arttığını ortaya koymaktadır. Bölgesel olarak yoğun sanayi ve taşımacılık altyapısına sahip eyaletlerde kaza oranlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiş; bu durum, hem teknik önlemlerin hem de operasyonel planlamaların bölgesel farklılıklar gözetilerek ele alınması gerektiğine işaret etmektedir. Elde edilen bu genel tablo, sonraki adımda yapılacak senaryo analizleri için önemli bir referans oluşturmaktadır.

Ayrıca, analiz bulgularının gerçek veri setinden elde edilen sonuçlarla örtüştüğü görülerek modelin güvenilirliği pekiştirilmiştir.

4.2.2 Alternatif senaryolar

4.2.2.1 Senaryo-1 kötümser

Senaryo 1 kapsamında, Kaza Seviyesi değişkeni yalnızca “Ciddi Kaza” kategorisine sabitlenerek sistemin en ağır kaza koşullarında nasıl davrandığı analiz edilmiştir. Model çıktıları, bu koşul altında tüm kazaların ölümlü gerçekleştiğini ve %55 oranında yaralanma içerdiğini göstermiştir. Kazaların %57’si yolcu trenleri, %39’u ise yük trenleri ile ilişkilidir. Kazaların en sık meydana geldiği zaman dilimleri %32 ile akşam saatleri ve %25 ile sabah saatleridir. Kaza nedenleri arasında %50 oranıyla sistem içi insan kaynaklı hatalar ön plana çıkmakta, bunu %26 ile ekipman ve %24 ile sistem dışı insan faktörleri izlemektedir. Kazaların %50’si 2013–2017 döneminde, %27’si 2018–2023 döneminde ve %23’ü 2007–2012 döneminde meydana gelmektedir. Kaza türleri içinde %46 oranında çarpışma, %26 oranında hemzemin geçit kazası ve %21 oranında raydan çıkma olayları yer almaktadır. Maliyet açısından ise kazaların %34’ü yüksek maliyetli, %22’si orta maliyetli ve %44’ü düşük maliyetli olarak modellenmiştir. Senaryoya ilişkin Bayes Ağı modeli ve değişkenler arasındaki olasılık dağılımları Şekil 4.8’de sunulmaktadır.



Şekil 4.8 : Senaryo-1 GeNle modeli.

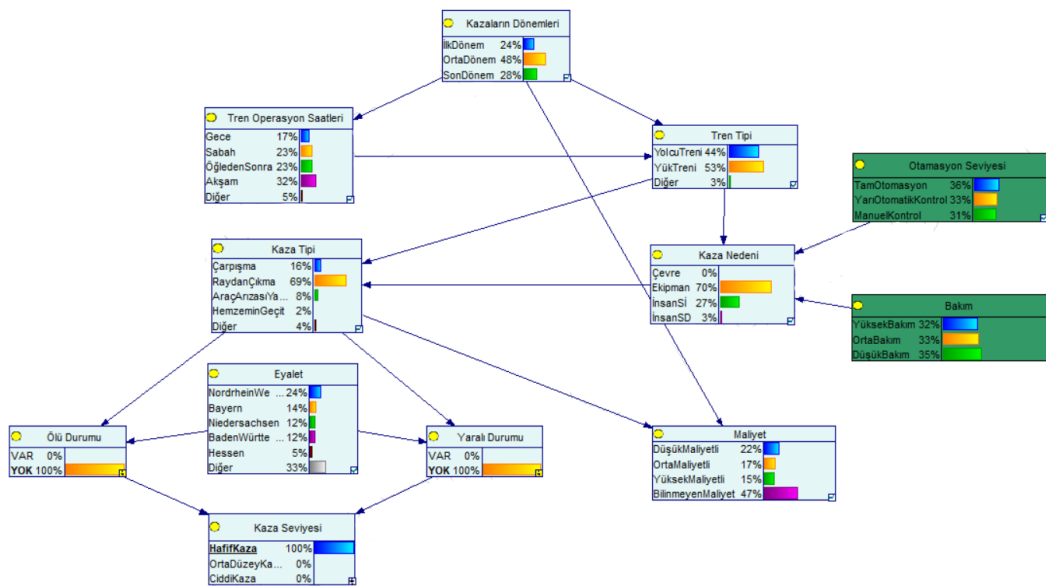
4.2.2.2 Senaryo-2 iyimser

Senaryo 2 kapsamında, Kaza Seviyesi değişkeni yalnızca “Hafif Kaza” kategorisine sabitlenerek sistemin en olumlu kaza koşullarında nasıl davrandığı analiz edilmiştir. Model çıktıları, bu koşul altında tüm kazaların ölümsüz (%0 ölüm) ve yaralanmasız (%0 yaralanma) olarak gerçekleştiğini göstermiştir. Kazaların %53’ü yük trenleri, %44’ü yolcu trenleri ile ilişkilidir. En sık kaza meydana gelen zaman dilimi %32 oranıyla akşam saatleridir; sabah ve öğleden sonra saatleri ise %23 oranında eşit dağılım göstermektedir.

Kaza nedenlerinin dağılımına bakıldığında, %70 oranıyla ekipman kaynaklı nedenler ilk sıradadır; bunu %27 oranıyla sistem içi insan hataları izlemektedir. Sistem dışı insan etkisi %3 oranında kalmıştır.

Kaza türleri içinde en yüksek orana %69 ile raydan çıkma olayları sahiptir; çarpışmalar %16, araç arızası ve yangın %8, hemzemin geçit kazaları ise %2 oranında gerçekleşmiştir. Kazaların dönemsel dağılımında %48 ile 2013–2017 arası dönem öne çıkmakta, ardından %28 ile son dönem ve %24 ile ilk dönem gelmektedir. Maliyet açısından ise kazaların %42’si düşük maliyetli, %29’u orta maliyetli ve %29’u yüksek maliyetli olarak modellenmiştir.

Senaryoya ilişkin Bayes Ağı modeli ve değişkenler arasındaki olasılık dağılımları Şekil 4.9’da sunulmaktadır.



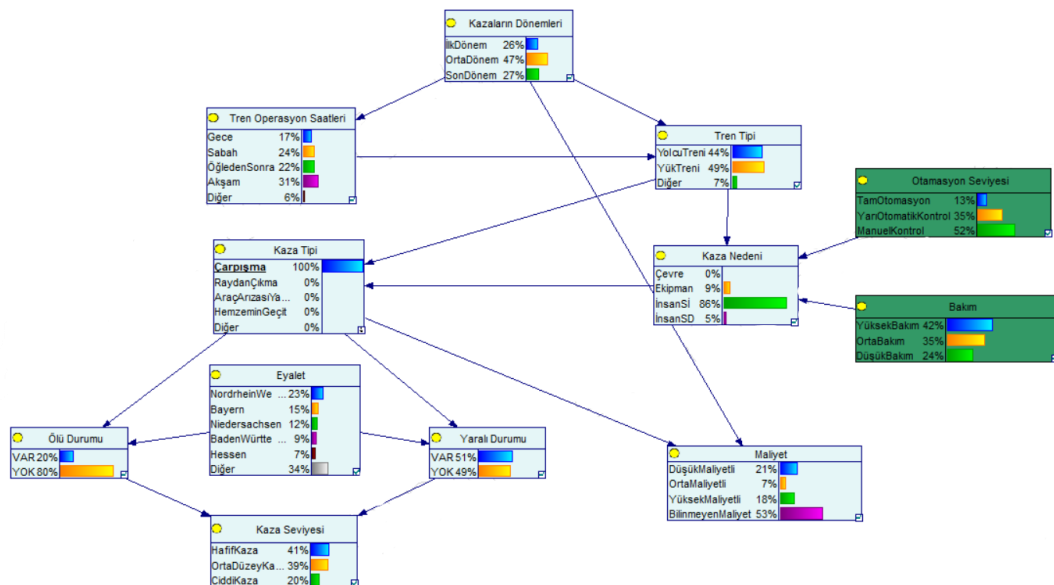
Şekil 4.9 : Senaryo-2 GeNle modeli.

4.2.2.3 Senaryo-3 kaza tipi: çarpışma

Senaryo 3 kapsamında, Kaza Tipi değişkeni yalnızca “Çarpışma” kategorisine sabitlenerek, bu tür kazaların sistem üzerindeki etkileri model aracılığıyla ayrıntılı olarak analiz edilmiştir. Model çıktıları, bu koşul altında meydana gelen kazaların %20’sinin ölümlü olarak sonuçlandığını, %51’inin ise bir veya birden fazla kişinin yaralanmasıyla neticelendiğini ortaya koymuştur. Geriye kalan %29’luk dilimi ise can kaybı ya da yaralanma yaşanmayan, yalnızca maddi hasarla sınırlı kazalar oluşturmaktadır.

Tren tipine göre dağılımda, kazaların %49’u yük trenleri, %44’ü yolcu trenleri ve %7’si diğer tren türleriyle ilişkilendirilmiştir. En sık kaza meydana gelen zaman dilimi %31 ile akşam saatleridir; sabah %24, öğleden sonra %22 ve gece %17 oranındadır. Kaza nedenlerinin %86’sı sistem içi insan kaynaklıdır; ekipman kaynaklı nedenler %9, sistem dışı insan etkisi ise %5 oranındadır. Kazaların dönemsel dağılımı incelendiğinde, %47’si 2013–2017 yılları arasındaki dönemde, %27’si 2018–2023 ve %26’sı 2007–2012 yılları arasında meydana gelmiştir. Kaza seviyelerine göre dağılımda %41’i hafif, %39’u orta düzey ve %20’si ciddi kaza olarak modellenmiştir. Maliyet açısından ise kazaların %50’si yüksek maliyetli, %12’si orta maliyetli ve %38’i düşük maliyetli kategorisindedir.

Senaryoya ilişkin Bayes Ağı modeli ve değişkenler arasındaki olasılık dağılımları Şekil 4.10’da ayrıntılı şekilde sunulmaktadır.

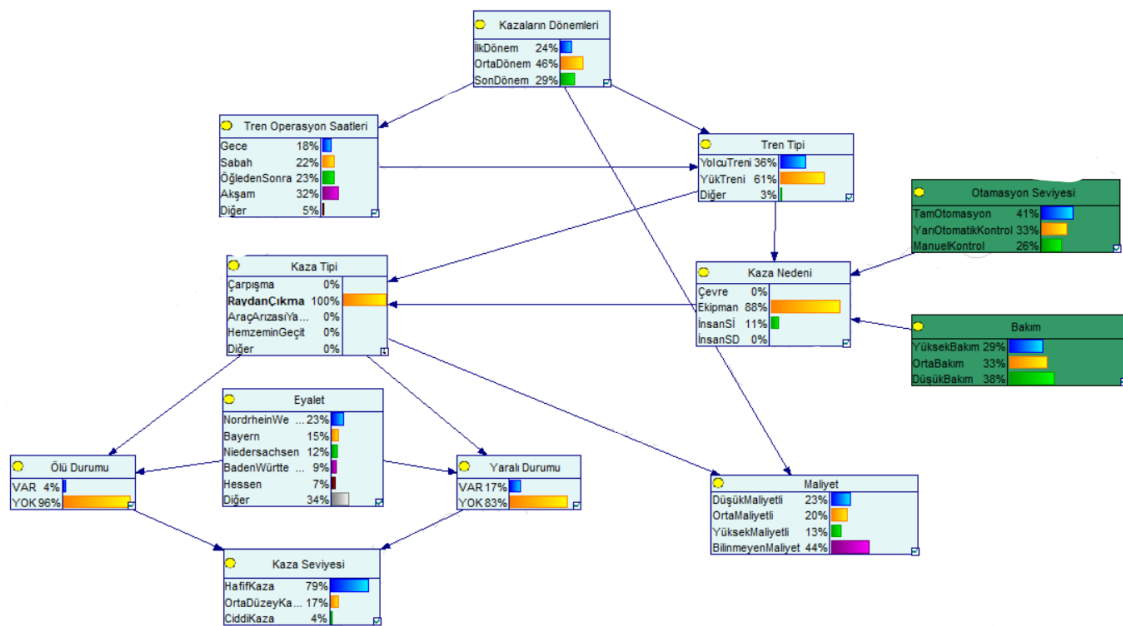


Şekil 4.10 : Senaryo-3 GeNle modeli.

4.2.2.4 Senaryo-4 kaza tipi: raydan çıkma

Senaryo 4 kapsamında, Kaza Tipi değişkeni yalnızca “Raydan Çıkma” kategorisine sabitlenerek, bu tür kazaların sistem üzerindeki etkileri ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir. Bayes Ağı modeli kullanılarak yapılan değerlendirme sonucunda, raydan çıkma tipi kazaların %4’ünün ölümlü kazalarla sonuçlandığı, %17’sinin ise bir ya da birden fazla kişinin yaralanmasına yol açtığı belirlenmiştir. Geriye kalan %79’luk bölüm ise herhangi bir can kaybı veya yaralanmanın yaşanmadığı, yalnızca maddi hasar içeren kazalar şeklinde gerçekleşmiştir.

Tren tipine göre dağılımda kazaların %61’i yük trenleri, %36’sı yolcu trenleri ve %3’ü diğer tren türleriyle ilişkilidir. Kazaların en sık meydana geldiği zaman dilimi %32 oranıyla akşam saatleridir; öğleden sonra %23, sabah %22 ve gece %18 oranlarında dağılmıştır. Kaza nedenlerinin %88’i ekipman kaynaklıdır; %11’i sistem içi insan hatalarına, %0’ı ise sistem dışı insan veya çevresel faktörlere dayanmaktadır. Kazaların dönemsel dağılımında %46’sı 2013–2017 döneminde, %29’u 2018–2023 döneminde ve %24’ü 2007–2012 döneminde gerçekleşmiştir. Kaza seviyelerine göre dağılımda %79’u hafif, %17’si orta düzey ve %4’ü ciddi kaza olarak sınıflandırılmıştır. Maliyet açısından ise %41’i düşük maliyetli, %34’ü orta maliyetli ve %24’ü yüksek maliyetli kazalar olarak modellenmiştir. Senaryoya ilişkin Bayes Ağı modeli ve değişkenler arasındaki olasılık dağılımları Şekil 4.11’de sunulmaktadır.



Şekil 4.11 : Senaryo-4 GeNle modeli.

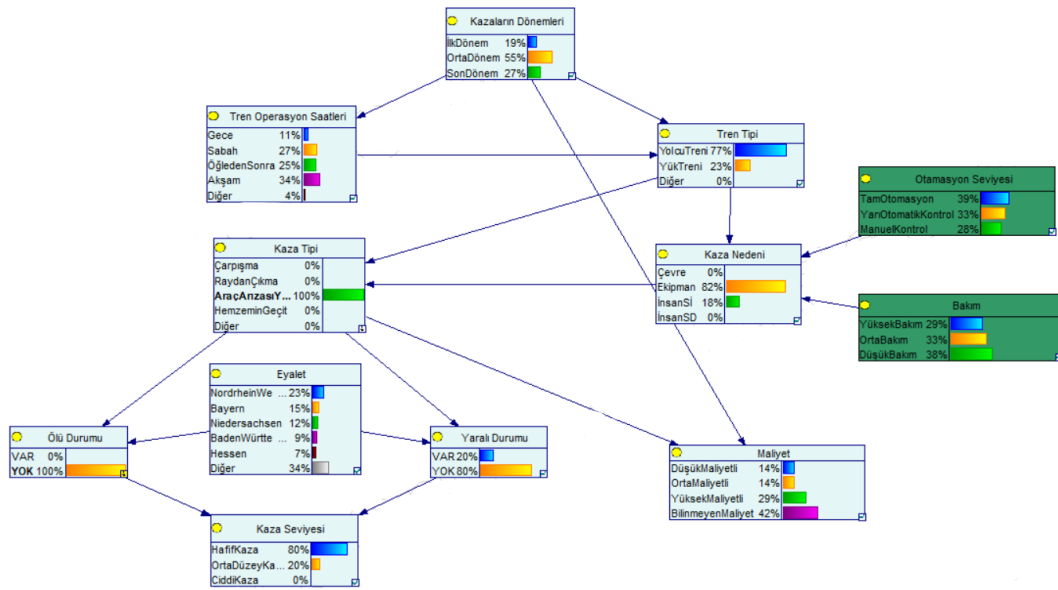
4.2.2.5 Senaryo-5 kaza tipi: araç arızası & yangını

Senaryo 5 kapsamında, Kaza Tipi değişkeni yalnızca “Araç Arızası ve Yangını” kategorisine sabitlenerek, bu tür kazaların sistem üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Model çıktıları, bu koşul altında kazaların tamamının (%100) ölümsüz ve %20 oranında yaralanmalı olarak gerçekleştiğini göstermiştir. Kalan %80’lik kısmı ise herhangi bir can kaybı veya yaralanma yaşanmadan, yalnızca teknik arıza ve maddi hasarla sınırlı kazalar şeklinde modellenmiştir.

Kazaların %77’si yolcu trenleri ve %23’ü yük trenleriyle ilişkilidir. En sık kaza meydana gelen zaman dilimi %27 oranıyla sabah saatleridir; öğleden sonra %25, akşam %23 ve gece %11 oranlarında izlenmektedir. Kaza nedenlerinin %82’si ekipman kaynaklıdır; %18’i sistem içi insan hatalarından kaynaklanmaktadır. Sistem dışı insan veya çevresel nedenlere ilişkin bir etkilenme gözlenmemiştir.

Kazaların dönemsel dağılımında %55’i 2013–2017 döneminde, %27’si 2018–2023 ve %19’u 2007–2012 döneminde gerçekleşmiştir. Kaza seviyelerine göre dağılımda %80’i hafif, %20’si orta düzey kazadır; ciddi kaza oranı %0’dır. Maliyet dağılımına göre kazaların %39’u düşük maliyetli, %20’si orta maliyetli ve %41’i yüksek maliyetli olarak sınıflandırılmıştır.

Senaryoya ilişkin Bayes Ağı modeli ve değişkenler arasındaki olasılık dağılımları Şekil 4.12’de sunulmaktadır.



Şekil 4.12 : Senaryo-5 GeNle modeli.

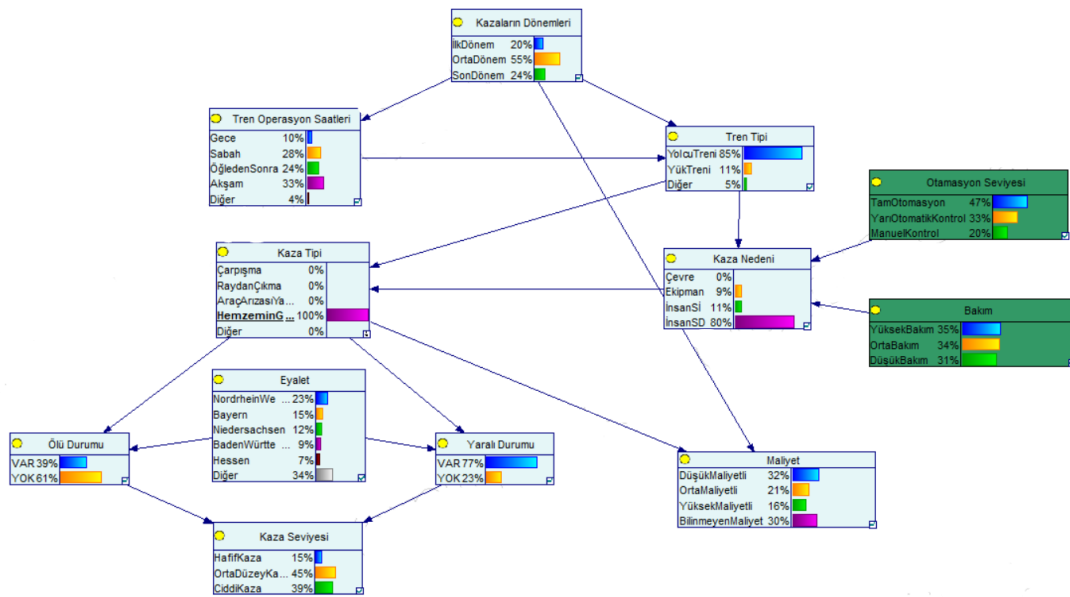
4.2.2.6 Senaryo-6 kaza tipi: hemzemin geçit kazası

Senaryo 6 kapsamında, Kaza Tipi değişkeni yalnızca “Hemzemin Geçit Kazası” kategorisine sabitlenerek, bu tür kazaların sistem üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Model çıktıları, bu koşul altında kazaların %39’unun ölümlü ve %77’sinin yaralanmalı olarak gerçekleştiğini göstermiştir. Aynı zamanda, bu kaza türüne ilişkin önleyici tedbirlerin belirlenmesinde insan güvenliğinin öncelikli unsur olarak ele alınmasının gerekliliğine işaret etmektedir.

Tren tipine göre dağılımda kazaların %85’i yolcu trenleri ve %11’i yük trenleri ile ilişkilidir. En sık kaza meydana gelen zaman dilimi %33 oranıyla akşam saatleridir; sabah %28, öğleden sonra %24 ve gece %10 oranlarında dağılmıştır. Kaza nedenlerinin %80’i sistem dışı insan kaynaklıdır; %11’i sistem içi ekipman, %9’u çevresel faktör etkisi gözlemlenmemiştir. Kazaların dönemsel dağılımında %55’i 2013–2017 döneminde, %24’ü 2018–2023 döneminde ve %20’si 2007–2012 döneminde meydana gelmiştir.

Kaza seviyelerine göre dağılımda %39’u ciddi, %45’i orta düzey ve %15’i hafif kaza olarak sınıflandırılmıştır. Maliyet açısından kazaların %46’sı düşük maliyetli, %29’u orta maliyetli ve %25’i yüksek maliyetli olarak modellenmiştir.

Senaryoya ilişkin Bayes Ağı modeli ve değişkenler arasındaki olasılık dağılımları Şekil 4.13’te sunulmaktadır.



Şekil 4.13 : Senaryo-6 GeNle modeli.

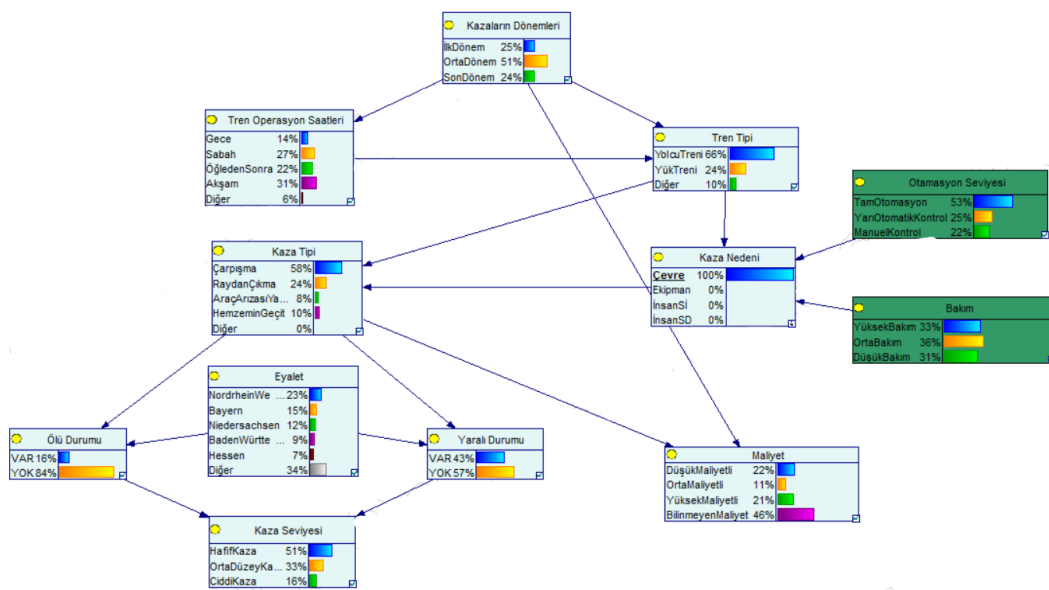
4.2.2.7 Senaryo-7 kaza nedeni: çevre

Senaryo 7 kapsamında, Kaza Nedeni değişkeni yalnızca “Çevre” kategorisine sabitlenerek, çevresel faktörlerden kaynaklanan kazaların sistem üzerindeki etkileri analiz edilmiştir.

Model çıktıları, bu koşul altında gerçekleşen kazaların %16’sının ölümlü ve %57’sinin yaralanmalı olduğunu göstermiştir. Geriye kalan %27’lik kısmı ise herhangi bir can kaybı veya yaralanma içermeyen, yalnızca maddi hasarla sınırlı vakalardan oluşmaktadır.

Kazaların %66’sı yolcu trenleri, %24’ü yük trenleri ve %10’u diğer tren türleriyle ilişkilidir. En sık kaza meydana gelen zaman dilimi %31 oranıyla akşam saatleridir; sabah %27, öğleden sonra %22 ve gece %14 oranlarında izlenmektedir. Kaza tipi dağılımında %58’i çarpışma, %24’ü raydan çıkma, %8’i araç arızası ve yangın, %10’u ise hemzemin geçit kazası olarak gerçekleşmiştir. Kazaların dönemsel dağılımında %51’i 2013–2017 döneminde, %25’i 2007–2012 ve %24’ü 2018–2023 döneminde meydana gelmiştir.

Kaza seviyelerine göre dağılımda %51’i hafif, %33’ü orta düzey ve %16’sı ciddi kaza olarak sınıflandırılmıştır. Maliyet açısından kazaların %43’ü yüksek maliyetli, %36’sı orta maliyetli ve %18’i düşük maliyetli olarak modellenmiştir. Senaryoya ilişkin Bayes Ağı modeli ve değişkenler arasındaki olasılık dağılımları Şekil 4.14’te sunulmaktadır.



Şekil 4.14 : Senaryo-7 GeNle modeli.

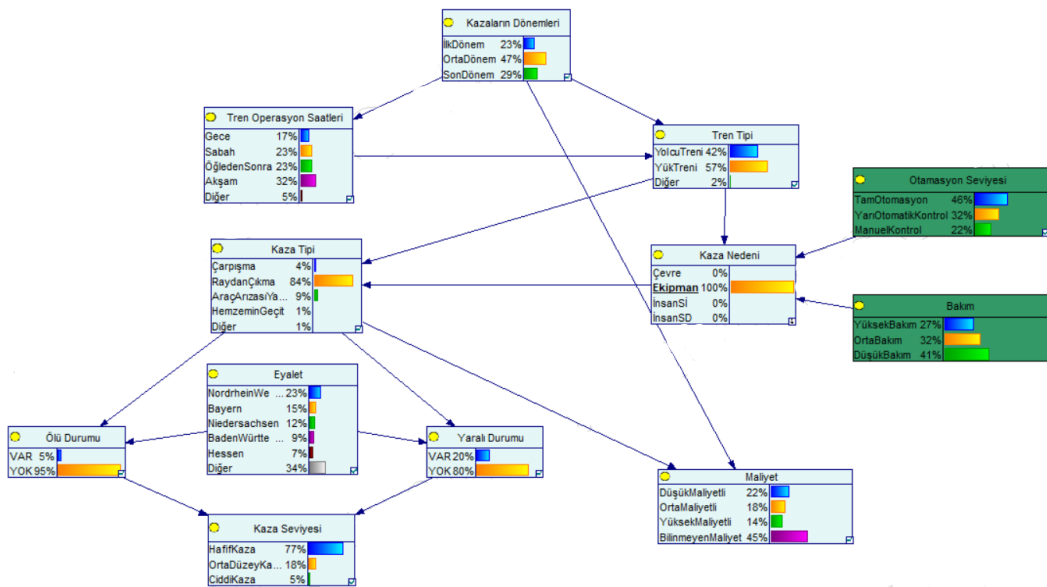
4.2.2.8 Senaryo-8 kaza nedeni: ekipman

Senaryo 8 kapsamında, Kaza Nedeni değişkeni yalnızca “Ekipman” kategorisine sabitlenerek, ekipman arızalarından kaynaklanan kazaların sistem üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Model çıktıları, bu koşul altında meydana gelen kazaların %5’inin ölümlü, %20’sinin ise yaralanmalı olarak gerçekleştiğini göstermiştir. Geri kalan %75’lik kısmın ise can kaybı ya da yaralanma içermeyen, yalnızca teknik aksaklık ve maddi hasarla sınırlı kazalar olduğu belirlenmiştir.

Kazaların %57’si yük trenleri, %42’si yolcu trenleri ve %2’si diğer tren türleriyle ilişkilidir. En sık kaza meydana gelen zaman dilimi %32 oranıyla akşam saatleridir; sabah ve öğleden sonra %23 oranında eşit dağılmıştır. Kaza tipi dağılımında %84’ü raydan çıkma, %9’u araç arızası ve yangın, %4’ü çarpışma ve %1’i hemzemin geçit kazası olarak gerçekleşmiştir.

Kazaların dönemsel dağılımında %47’si 2013–2017 döneminde, %29’u 2018–2023 ve %23’ü 2007–2012 döneminde meydana gelmiştir. Kaza seviyelerine göre dağılımda %77’si hafif, %18’i orta düzey ve %5’i ciddi kaza olarak sınıflandırılmıştır. Maliyet açısından kazaların %42’si düşük maliyetli, %32’si orta maliyetli ve %26’sı yüksek maliyetli olarak modellenmiştir.

Senaryoya ilişkin Bayes Ağı modeli ve değişkenler arasındaki olasılık dağılımları Şekil 4.15’de sunulmaktadır.



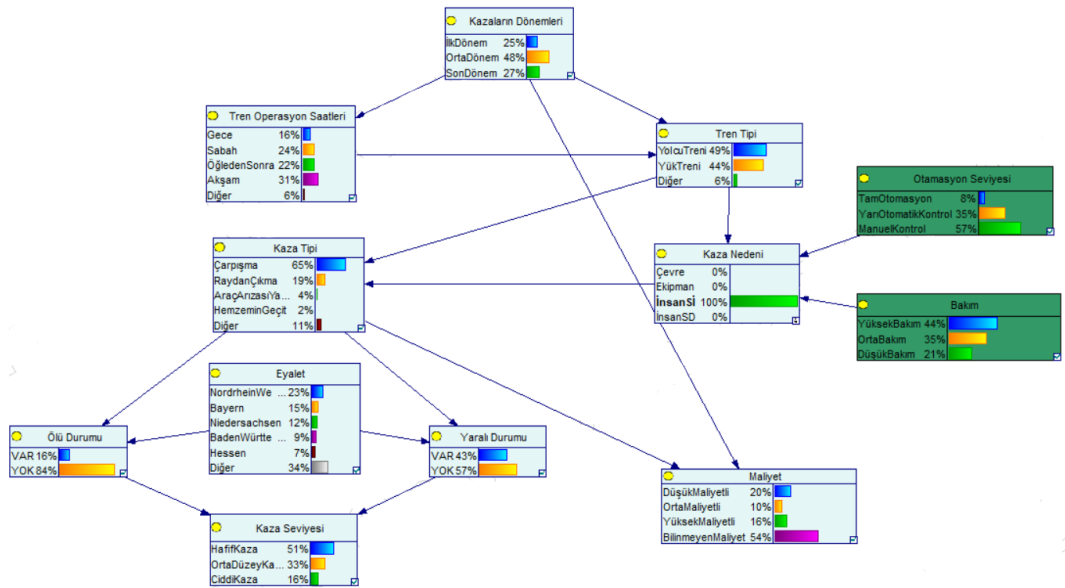
Şekil 4.15 : Senaryo-8 GeNle modeli.

4.2.2.9 Senaryo-9 kaza nedeni: insanSİ

Senaryo 9 kapsamında, Kaza Nedeni değişkeni yalnızca “İnsanSİ” (Sistem İçindeki İnsan) kategorisine sabitlenerek analiz edilmiştir. Model çıktıları, bu koşul altında meydana gelen kazaların %16’sının ölümlü, %43’ünün ise yaralanmalı olarak gerçekleştiğini göstermiştir. Geriye kalan %41’lik bölüm ise herhangi bir can kaybı ya da yaralanma içermeyen, yalnızca maddi hasarla sınırlı olaylardan oluşmaktadır. Bu analiz, sistem içerisinde görev yapan personelin kararları, dikkat hataları veya prosedürel ihmallerinin kazalar üzerindeki etkisini ayrı bir senaryo üzerinden değerlendirme imkânı sunmuştur.

Kazaların %49’u yolcu trenleri, %44’ü yük trenleri ve %6’sı diğer tren türleri ile ilişkilidir. En sık kaza meydana gelen zaman dilimi %31 oranıyla akşam saatleri olup, sabah %24, öğleden sonra %22 ve gece %16 oranlarında izlenmektedir. Kaza tipi dağılımında %65’i çarpışma, %19’u raydan çıkma, %11’i diğer, %4’ü araç arızası ve %2’si hemzemin geçit kazası olarak gerçekleşmiştir. Kazaların dönemsel dağılımında %48’i 2013–2017 döneminde, %27’si 2018–2023 ve %25’i 2007–2012 döneminde meydana gelmiştir. Kaza seviyeleri açısından %51’i hafif, %33’ü orta düzey ve %16’sı ciddi kaza olarak sınıflandırılmıştır. Maliyet açısından ise %43’ü düşük maliyetli, %39’u yüksek maliyetli ve %18’i orta maliyetli kazalar olarak modellenmiştir.

Senaryoya ilişkin Bayes Ağı modeli ve değişkenler arasındaki olasılık dağılımları Şekil 4.16’da sunulmaktadır.



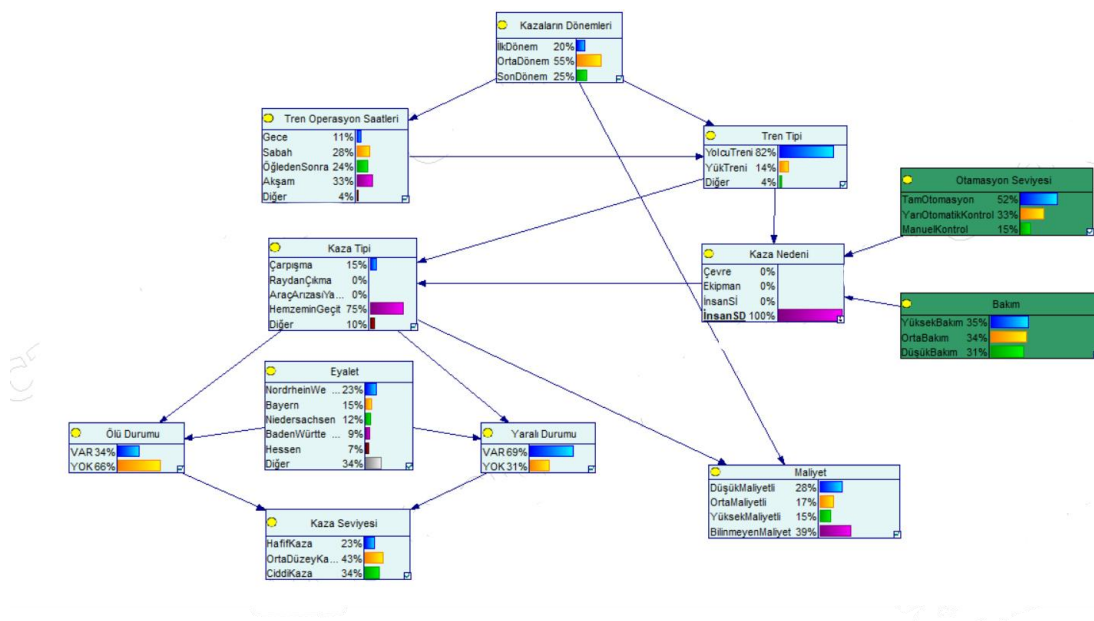
Şekil 4.16 : Senaryo-9 GeNle modeli.

4.2.2.10 Senaryo-10 kaza nedeni: insanSD

Senaryo 10 kapsamında, Kaza Nedeni değişkeni yalnızca “İnsanSD” (Sistem Dışındaki İnsan) kategorisine sabitlenerek, demiryolu sisteminin doğrudan bir parçası olmayan bireylerden (örneğin yayalar, sürücüler, üçüncü şahıslar) kaynaklanan kazaların sistem üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Model çıktıları, bu koşul altında meydana gelen kazaların %34’ünün ölümlü ve %69’unun yaralanmalı olarak gerçekleştiğini göstermiştir.

Kazaların %82'si yolcu trenleri, %14'ü yük trenleri ve %4'ü diğer tren türleriyle ilişkilidir. En sık kaza meydana gelen zaman dilimi %33 oranıyla akşam saatleridir; sabah %28, öğleden sonra %24 ve gece %11 oranlarında izlenmektedir. Kaza tipi dağılımında %75'i hemzemin geçit kazası, %15'i çarpışma, %10'u diğer türdeki kazalar olarak gerçekleşmiştir; raydan çıkma ve araç arızası kaynaklı kaza oranları %0'dır. Kazaların dönemsel dağılımında %55'i 2013–2017 döneminde, %25'i 2018–2023 ve %20'si 2007–2012 döneminde meydana gelmiştir. Kaza seviyelerine göre dağılımda %43'ü orta düzey, %34'ü ciddi ve %23'ü hafif kaza olarak sınıflandırılmıştır. Maliyet açısından kazaların %49'u düşük maliyetli, %26'sı yüksek maliyetli ve %25'i orta maliyetli olarak modellenmiştir.

Senaryoya ilişkin Bayes Ağı modeli ve değişkenler arasındaki olasılık dağılımları Şekil 4.17’de sunulmaktadır.



Şekil 4.17 : Senaryo-10 GeNle modeli.

4.3 Bulguların Yorumlanması ve Çıkarımlar

Bu bölümde, Bayes Ağı modeli ile gerçekleştirilen analizlerin sonuçları detaylı olarak yorumlanmış ve emniyet perspektifinden çıkarımlar sunulmuştur. Mevcut durum analizi ile başlayarak, farklı senaryoların karşılaştırmalı etkileri değerlendirilmiş; kaza nedeni ile kaza tipi arasındaki ilişkiler ortaya konmuş ve eyaletler özelinde ölüm ve yaralanma oranları analiz edilmiştir. Bu sayede hem modelin açıklayıcılığı hem de karar destek mekanizması olarak sunduğu katkılar kapsamlı biçimde ortaya konmuştur.

Bayes Ağı modeli ile elde edilen sonuçlara göre, kazaların bölgesel etkileri farklılık göstermekte; bazı eyaletlerde kazalar daha yüksek ölüm ve yaralanma oranlarıyla sonuçlanmaktadır. Emniyet temelli yapılan bu değerlendirmede özellikle kaza seviyesi, ölüm durumu, yaralı durumu, kaza tipi ve kaza nedeni değişkenleri kritik belirleyiciler olarak öne çıkmaktadır. Mevcut durum analizine göre kazaların çoğunluğu hafif düzeyde olup (%64), ölümlle sonuçlanan olayların oranı %11, yaralanmalı kazaların oranı ise %31'dir. Bu bulgular, ölümlle sonuçlanan kazaların oranının görece düşük olduğunu göstermektedir; ancak emniyet odaklı sistemlerde hedef her zaman sıfır ölüm olduğu için, bu durum dahi kabul edilemez niteliktedir. Bu nedenle, her düzeydeki kazanın kök nedenleriyle birlikte detaylı olarak analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır.

Kazaların büyük bir bölümü raydan çıkma (%56) ve çarpışma (%25) şeklinde gerçekleşirken, nedenler arasında ekipman arızaları (%58) ve sistem içi insan hataları (%34) ön plana çıkmaktadır. Bu durum, teknik altyapı ve operasyonel süreçlerin birlikte değerlendirilmesi gerektiğine işaret etmektedir. Eyalet değişkeni, kazaların bölgesel dağılımını analiz etmek için önemli bir referans noktası sunmaktadır. Özellikle sanayi ve yük taşımacılığının yoğun olduğu bölgelerde daha yüksek kaza oranları gözlemlenmiş, bu durum bölgesel risk analizlerinin önemini ortaya koymuştur.

Buna karşılık, maliyet değişkeni doğrudan emniyet performansına işaret etmemekle birlikte, yönetsel karar süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır. Ancak bu değişkene ilişkin veriler, emniyet departmanı tarafından yayımlanan raporlardan elde edildiğinden bazı kazalar için sadece tahmini değerlere dayanmakta, hatta kaza soruşturmaları tamamlanmamış olaylarda veri hiç sunulamamaktadır. Bu nedenle

maliyet değişkeni bu çalışmada yardımcı bir değişken olarak değerlendirilmiş; analiz sonuçları yorumlanırken sınırlılıkları dikkate alınmıştır.

3.3.1. Senaryo karşılaştırması

Bayes Ağı modeli kapsamında, sistemin farklı koşullar altında nasıl davrandığını incelemek amacıyla toplam 10 alternatif senaryo tasarlanmıştır. Her bir senaryoda belirli bir değişken sabitlenmiş ve modelin bu koşul altındaki olasılık dağılımları analiz edilmiştir. Kaza seviyesine (Senaryo 1–2), kaza tipine (Senaryo 3–6) ve kaza nedenine (Senaryo 7–10) odaklanan bu senaryolar sayesinde, sistemin yüksek riskli durumlara nasıl tepki verdiği ayrıntılı biçimde değerlendirilmiştir.

Senaryo analizleri, demiryolu emniyeti açısından sistemin farklı koşullar altında nasıl tepki verdiğini ortaya koymakla kalmamış; aynı zamanda hangi faktörlerin ölüm, yaralanma ve kaza seviyeleri üzerinde daha belirleyici olduğunu da netleştirmiştir. Özellikle Senaryo 1 (Kötümser Senaryo), tüm kazaların ölümle sonuçlandığı ve %55'inin yaralanma içerdiği bir tablo çizmiştir. Bu senaryoda kazalar ağırlıklı olarak yolcu trenleriyle (%57) ilişkili olup, nedenler arasında sistem içi insan hataları (%50) ve çarpışma tipi kazalar (%46) öne çıkmıştır. Bu durum, insan faktörünün yüksek riskli senaryolarda kritik bir zafiyet noktası olduğunu göstermektedir.

Öte yandan Senaryo 2 (İyimser Senaryo), %0 ölüm ve yaralanma oranı ile en emniyetli durumu temsil etmektedir. Bu senaryoda raydan çıkma kazaları (%69) ve ekipman kaynaklı nedenler (%70) baskındır. Bu bulgu, raydan çıkma olaylarının sıklıkla yaşanmasına karşın genellikle hafif etkili sonuçlar doğurduğuna işaret etmektedir ve bu tür kazaların, sistemin genel emniyet düzeyini ciddi şekilde etkilemediğini göstermektedir.

Kaza Tipi sabitlenerek yapılan senaryolarda önemli farklılıklar göze çarpmaktadır. Örneğin:

- Çarpışma tipi kazalarda ölüm oranı %20, yaralanma oranı %51 olup, %86 oranla sistem içi insan hatası belirleyicidir.
- Raydan çıkma sabitlendiğinde ölüm %4, yaralanma %17 düzeyindedir ve ekipman kaynaklı nedenler %88 gibi yüksek bir orandadır.

- Hemzemin geçit kazaları, %39 ölüm ve %77 yaralanma oranlarıyla en yüksek insan etkili kazalardan biri olarak öne çıkmakta; burada kazaların %80'i sistem dışı insan kaynaklıdır.

Kaza Nedeni sabitlenerek yapılan senaryolarda ise:

- Çevresel nedenlerde, ölüm %16, yaralanma %57 oranındadır; çarpışmalar %58 oranla öne çıkar.
- İnsanSİ kaynaklı kazalarda ölüm ve yaralanma oranları sırasıyla %16 ve %43'tür; baskın kaza tipi yine çarpışmadır (%65).
- İnsanSD etkili kazalar, %34 ölüm ve %69 yaralanma oranlarıyla en yüksek insan etkili senaryolardan biridir ve hemzemin geçit kazaları %75 gibi çok yüksek bir oranla öne çıkar.
- Ekipman kaynaklı senaryoda ölüm oranı %5, yaralanma %20 seviyesinde kalmış; kazaların %84'ü raydan çıkma şeklinde gerçekleşmiştir.

Bu bulgular, demiryolu emniyeti açısından farklı nedenlerin ve kaza türlerinin kendine özgü risk profilleri taşıdığını ortaya koymaktadır. Özellikle insan faktörü, çarpışma ve hemzemin geçit kazaları gibi yüksek etkili senaryolarda doğrudan belirleyici olurken; ekipman kaynaklı olaylar, sıklıkla gözlenen ancak daha düşük ölüm ve yaralanma riski barındıran kazalarla ilişkilidir. Bu durum, emniyet yatırımlarında farklı önceliklerin belirlenmesi ve senaryo bazlı risk yönetiminin geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Aşağıda, farklı senaryoların karşılaştırmalı olarak özetlendiği Çizelge 4.21'de sunulmaktadır. Her bir senaryo için ölüm ve yaralanma oranları, baskın kaza nedeni ve kaza tipi ile en çok etkilenen tren türü belirtilmiştir. Bu yapı, modelin hangi koşullarda daha yüksek risk barındırdığını açıkça ortaya koymakta ve karar vericilere senaryo bazlı önceliklendirme açısından bütünsel bir bakış açısı sağlamaktadır.

Ayrıca, bu senaryo karşılaştırmaları sayesinde, belirli kaza nedenlerinin spesifik sonuçlarla ne ölçüde ilişkili olduğu daha net biçimde anlaşılmış ve olası müdahale alanları somutlaştırılmıştır. Örneğin, hemzemin geçit kazalarının çoğunlukla insanSD kaynaklı hatalardan kaynaklandığı ve yolcu trenlerinde daha ölümcül sonuçlar doğurduğu gözlemlenmiştir.

Çizelge 4.21 : Senaryoların karşılaştırması.

Senaryo No	Sabitlenen Değişken	Ölüm (%)	Yaralanma (%)	En Sık Kaza Nedeni	En Sık Kaza Tipi	En Çok Etkilenen
Mevcut	-	11	31	Ekipman	Raydan Çıkma (%56)	Yük (%49)
1	Ciddi Kaza	100	55	İnsanSİ (%50)	Çarpışma (%46)	Yolcu (%57)
2	Hafif Kaza	0	0	Ekipman (%70)	Raydan Çıkma (%69)	Yük (%53)
3	Kaza Tipi: Çarpışma	20	51	İnsanSİ (%86)	Çarpışma (sabit)	Yük (%49)
4	Kaza Tipi: Raydan Çıkma	4	17	Ekipman (%88)	Raydan Çıkma (sabit)	Yük (%61)
5	Araç Arıza & Yangın	0	20	Ekipman (%82)	Araç Arıza & Yangın	Yolcu (%77)
6	Hemzemin Geçit Kazası	39	77	İnsanSD (%80)	Hemzemin Geçit (sabit)	Yolcu (%85)
7	Kaza Nedeni: Çevre	16	57	Çevre (sabit)	Çarpışma (%58)	Yolcu (%66)
8	Kaza Nedeni: Ekipman	5	20	Ekipman (sabit)	Raydan Çıkma (%84)	Yük (%57)
9	Kaza Nedeni: İnsanSİ	16	43	İnsanSİ (sabit)	Çarpışma (%65)	Yolcu (%49)
10	Kaza Nedeni: İnsanSD	34	69	İnsanSD (sabit)	Hemzemin Geçit (%75)	Yolcu (%82)

3.3.2. Kaza nedeni & kaza tipi ilişkisi

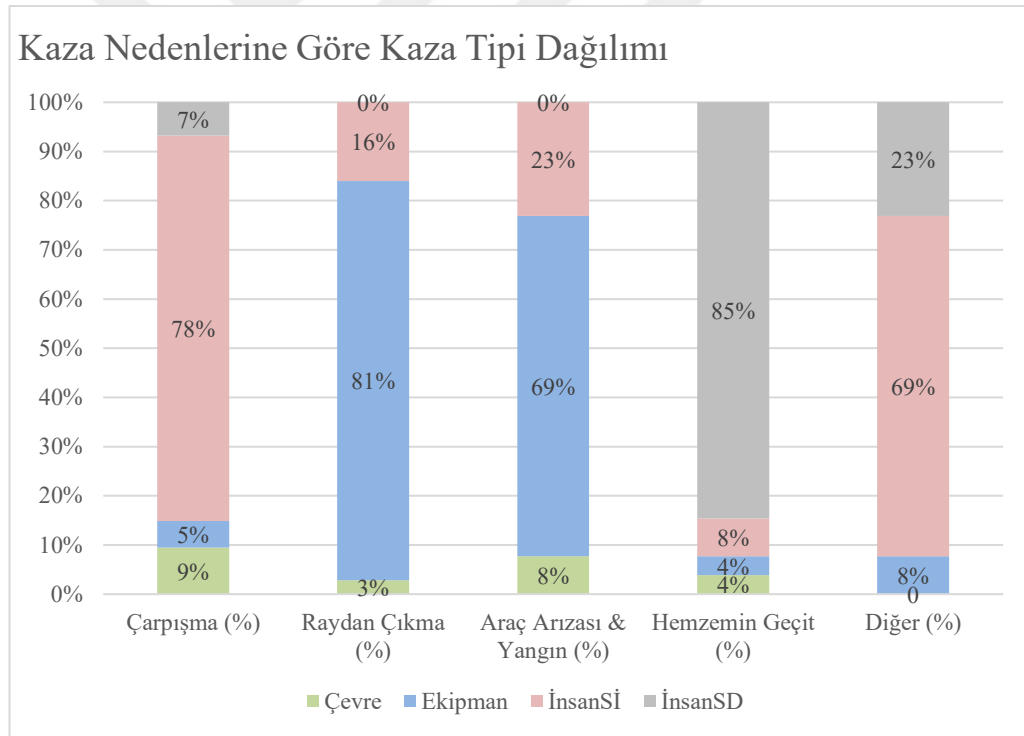
Bayes Ağı modelinde yapılan senaryo analizleri, kazaların nedenleri ile gerçekleşen kaza tipleri arasında güçlü ve dikkat çekici ilişkiler olduğunu ortaya koymuştur. Özellikle sabitlenen kaza nedeni değişkeni üzerinden yürütülen analizler, farklı nedenlerin sistemde farklı sonuçlarla ilişkilendiğini göstermektedir. Bu durum, kazaların yalnızca oluşum frekansı açısından değil, niteliksel sonuçları açısından da ayrıştığını göstermekte ve müdahale önceliklerinin neden bazlı yeniden yapılandırılmasına olanak tanımaktadır. Örneğin, insan kaynaklı nedenler (İnsanSİ ve İnsanSD) çoğunlukla yüksek ölüm ve yaralanma oranları ile birlikte çarpışma ve hemzemin geçit tipi kazalarla ilişkilendirilmiştir. Özellikle İnsanSD (sistem dışı insan) etkisi altında meydana gelen kazalarda hemzemin geçit kazalarının oranı %75'e kadar çıkarken, ölüm ve yaralanma oranları sırasıyla %34 ve %69 olarak belirlenmiştir. Bu durum, toplumsal farkındalık, fiziksel bariyer sistemleri ve davranışsal müdahaleler gibi dışsal stratejilerin önemine işaret etmektedir.

Buna karşılık, ekipman kaynaklı kazalarda baskın kaza tipi açık ara farkla raydan çıkma olarak öne çıkmıştır (%84). Bu kazalarda ölüm ve yaralanma oranlarının daha

düşük olması, ekipman problemlerinin sıklıkla meydana gelmesine rağmen görece daha hafif etkilerle sonuçlandığını göstermektedir. Ancak bu durum, ekipman temelli risklerin ihmal edilebileceği anlamına gelmemekte; sıklık ve yaygınlık bakımından operasyonel sürdürülebilirlik açısından ciddi bir tehdit oluşturduğunu göstermektedir.

Çevresel faktörlere bağlı kazalarda ise daha çok çarpışma tipi olaylar (%58) gözlemlenmiştir. Bu bulgu, ekstrem hava koşulları, doğal afetler veya çevresel kontrol sistemlerindeki yetersizliklerin özellikle trenler arası koordinasyonu tehdit edebileceğini düşündürmektedir.

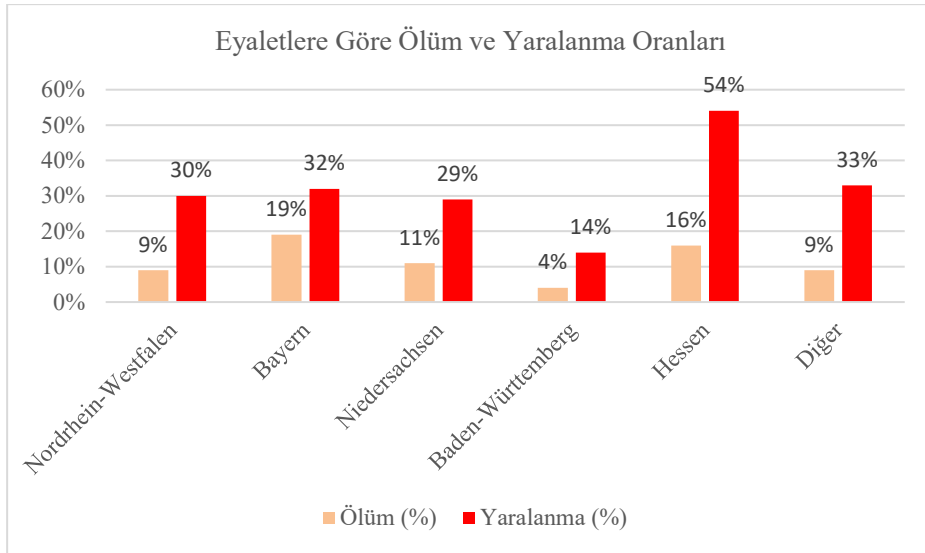
Aşağıda yer alan Şekil 4.18, kaza nedenleri ile kaza tipleri arasındaki ilişkiyi görsel olarak sunmaktadır. Her bir kaza tipi için, farklı nedenlerin hangi oranlarda etkili olduğu yığılmış bar grafik biçiminde gösterilmiş olup; bu yapı, neden-sonuç bağlamında hangi faktörlerin hangi tür kazalarla daha sık ilişkilendirildiğini açık biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 4.18 : Kaza nedenlerine göre kaza tipi dağılımı.

3.3.3. Eyaletlerin kaza sonuçlarına etkisi

Farklı eyaletlerde meydana gelen demiryolu kazalarının ölüm ve yaralanma oranları incelendiğinde, bölgeler arasında belirgin farklılıklar olduğu görülmektedir. Şekil 4.19’da eyaletlerin kaza sonuçları üzerindeki etkisini karşılaştırmalı olarak sunmakta; her bölgedeki ölüm ve yaralanma oranlarını görsel olarak ortaya koymaktadır.



Şekil 4.19 : Eyaletlere göre ölüm ve yaralanma oranları.

Özellikle Hessen, %54 ile en yüksek yaralanma oranına sahip olup, ölüm oranı da %16 düzeyindedir. Bu oranlar, bölgedeki kazaların sayıca az olmasına rağmen etkilerinin oldukça ciddi olduğunu göstermektedir. Bu nedenle Hessen’de özellikle kazaların etkisini azaltmaya yönelik müdahale stratejilerine, yolcu güvenlik sistemlerine ve hızlı acil müdahale altyapısına öncelik verilmesi önerilmektedir. Bayern ise %19 ile en yüksek ölüm oranına sahip eyalet olarak öne çıkmaktadır. Yaralanma oranı da %32 seviyesindedir. Bu durum, bölgede meydana gelen kazaların yüksek etki düzeyine sahip olduğunu göstermekte olup, teknik altyapının güçlendirilmesi, sürücü performans sistemlerinin iyileştirilmesi ve sistem içi insan hatalarını azaltacak emniyet kültürü uygulamalarının yaygınlaştırılması gerektiğini ortaya koymaktadır.

Nordrhein-Westfalen, Almanya’nın en yoğun nüfusa ve sanayi altyapısına sahip eyaleti olarak, %9 ölüm ve %30 yaralanma oranı ile frekans açısından en riskli bölge olarak değerlendirilmektedir. Bu bölgede özellikle önleyici bakım, yük taşımacılığı yönetimi ve sinyalizasyon iyileştirmeleri kritik öneme sahiptir. Niedersachsen ve Baden-Württemberg gibi eyaletlerde ölüm ve yaralanma oranları görece daha düşüktür; ancak bu değerlerin daha düşük sayıda kazaya dayandığı unutulmamalıdır. Bu nedenle bu bölgelerdeki analiz sonuçları, istatistiksel anlamlılık açısından dikkatle yorumlanmalıdır. “Diğer” kategorisi ise eyalet bilgisi eksik veya az temsil edilen bölgelerden gelen verileri içermektedir. %9 ölüm ve %33 yaralanma oranı ile genel ortalamaya yakın seyretmektedir; ancak bölgesel politika üretimi açısından sınırlı çıkarım gücüne sahiptir.

Sonuç olarak, her eyaletin kazalara ilişkin farklı risk profilleri taşıdığı görülmekte; bu durum, bölgesel önceliklerin belirlenmesi ve yerel ihtiyaçlara özel emniyet stratejilerinin geliştirilmesini gerekli kılmaktadır.

4.4 Model Doğrulama ve Geçerlilik

Bayes Ağı modeli ile gerçekleştirilen analizlerin bilimsel geçerliliğini ve güvenilirliğini sağlamak amacıyla bu çalışmada üç aşamalı bir doğrulama ve geçerlilik süreci izlenmiştir. Söz konusu süreç, sırasıyla uzman esaslı geçerlilik, geçmiş verilerle doğrulama ve senaryo analizleri ile geçerlilik adımlarından oluşmaktadır. Bu çok boyutlu yaklaşım sayesinde, hem modelin yapısal bütünlüğü hem de çıktılarının saha verileriyle ve olası senaryolarla olan uyumu değerlendirilmiştir.

4.4.1 Uzman esaslı geçerlilik

Modelin yapısal tutarlılığı ve nedensel bağlantılarının doğruluğu, alanında uzman üç yönetici/mühendis tarafından yürütülen iki aşamalı bir değerlendirme süreciyle test edilmiştir.

İlk aşamada, Bayes Ağı'nın yapısal şeması uzmanlara sunulmuş; değişkenler arasındaki nedensel ilişkiler kapsamlı biçimde incelenmiştir. Bu aşamada özellikle “Maliyet” değişkeni üzerine odaklanılmış ve modelin çıktılarında mantıklı sonuçlar üretse de, kaza raporlarındaki veri eksikliği nedeniyle yorumlanmasında dikkatli olunması gerektiği belirtilmiştir.

İkinci aşamada, modelin eksik veya geliştirilebilir yönleri üzerine uzman görüşleri alınmış ve bu doğrultuda “Otomasyon Seviyesi” ve “Bakım” olmak üzere iki yeni değişken modele eklenmiştir. Bu değişkenler, sistemin teknolojik altyapısı ve sürdürülebilirliği açısından kritik görülerek hem modelin geneline hem de senaryo analizlerine entegre edilmiştir.

4.4.2 Geçmiş verilerle doğrulama

Modelin tarihsel verilerle ne derece tutarlı sonuçlar verdiğini değerlendirmek amacıyla geçmiş kaza kayıtları ile senaryo çıktıları karşılaştırılarak doğrulama analizi gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, Kaza Dönemi, Tren Operasyon Saati, Tren Tipi ve Kaza Tipi değişkenleri sabit tutulmuş; Kaza Seviyesi ve Kaza Nedeni değişkenleri

model çıktısı olarak değerlendirilmiştir. Her senaryo için, modelin en yüksek olasılıkla belirlediği kategori senaryo sonucu olarak kabul edilmiştir.

Model çıktıları, veri setindeki gerçek sonuçlarla karşılaştırılarak üç sınıf altında değerlendirilmiştir:

- Her iki değişken eşleşiyorsa: Uyumlu,
- Sadece biri eşleşiyorsa: Kısmen Uyumlu,
- Hiçbiri eşleşmiyorsa: Uyumsuz.

Tüm kombinasyonlar dikkate alındığında 270 senaryo kartı oluşturulması mümkünken, çalışmanın verimliliği açısından ortogonal deney tasarımı uygulanarak bu sayı 49 senaryo kartına indirgenmiştir. Bu kartlardan 20'si, veri setinde doğrudan karşılığı bulunan senaryolarla eşleşmiştir. Elde edilen bulgular şu şekildedir:

- 11 senaryo kartı (%55) tamamen uyumlu,
- 8 senaryo kartı (%40) kısmen uyumlu,
- 1 senaryo kartı (%5) uyumsuz.

Bu doğrulama süreci, ağırlıklı ortalama yöntemiyle değerlendirildiğinde model ile geçmiş veriler arasındaki genel uyumluluk oranı %72,5 olarak hesaplanmıştır. Bu oran, modelin tarihsel veriyle güçlü bir şekilde örtüştüğünü ve öngörü gücünün yüksek olduğunu göstermektedir.

4.4.3 Senaryo analizleri ile geçerlilik

Modelin davranışsal tutarlılığı ve gerçekçi sonuçlar üretip üretmediği, oluşturulan senaryolar aracılığıyla test edilmiştir. Her bir senaryo hem mantıksal bütünlük açısından hem de gerçek dünyada karşılaşılabilecek koşulları yansıtması yönüyle değerlendirilmiştir. Örneğin, Ciddi Kaza senaryosunda modelin tüm kazaları ölümle ve büyük oranda yaralanma ile sonuçlandırması, bu tür kazaların doğal sonuçlarını doğru yansıttığını göstermektedir. Benzer şekilde, Hafif Kaza senaryosunda ölüm ve yaralanmanın sıfır olarak modellenmesi, modelin kazanın ciddiyeti ile sonuçlar arasında doğru bir nedensellik kurduğunu ortaya koymaktadır.

İnsanSD etkisine dayalı senaryolarda, hemzemin geçit kazalarının çok yüksek oranda (%75) gözlemlenmesi ve buna bağlı olarak yüksek ölüm/yaralanma oranlarının çıkması, literatürle ve pratik deneyimlerle uyumludur. Yine Ekipman kaynaklı

senaryoda raydan çıkma oranının (%84) yüksek olması, modelin sistemsel neden-sonuç ilişkilerini başarıyla temsil ettiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, bu çalışmada Bayes Ağı modeli ile gerçekleştirilen analizlerin geçerliliği ve güvenilirliği, çok boyutlu bir yaklaşımla sistematik olarak test edilmiştir. Uzman görüşleriyle modelin yapısal bütünlüğü ve nedensel ilişkileri değerlendirilmiş; geçmiş veri seti ile karşılaştırmalı analizler yapılarak öngörü gücü ölçülmüş; senaryo analizleri ile de modelin davranışsal tutarlılığı ve gerçek dünya ile örtüşme düzeyi test edilmiştir. Üç aşamalı bu doğrulama ve geçerlilik süreci sonucunda, modelin hem mevcut koşulların analizinde hem de geleceğe yönelik karar destek sistemlerinde etkin biçimde kullanılabileceği ortaya konmuştur. Elde edilen bulgular, modelin hem açıklayıcı hem de kestirimci potansiyelini ortaya koymakta; raylı sistem güvenliğine yönelik veri temelli analizlerde Bayes Ağı yönteminin uygulanabilirliğini güçlü bir şekilde desteklemektedir.



5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, Almanya'da 2007–2023 yılları arasında gerçekleşen demiryolu kazaları Bayes Ağı yöntemiyle analiz edilmiştir. Literatürde yaygın olarak kullanılan yöntemlerin ötesine geçilerek, hem geçmiş veriye dayalı hem de uzman görüşlerini içeren hibrit bir yaklaşım benimsenmiştir. Çalışmada; veri toplama, değişken belirleme, ilişki analizi, ağ yapısının kurulması, koşullu olasılık tablolarının oluşturulması, senaryo analizleri ve model geçerlilik kontrolleri gibi adımlar sistematik biçimde yürütülmüştür. Bu yönüyle çalışma, literatürdeki birçok kaza analizinden hem kapsam hem de yöntemsel derinlik açısından ayrılmaktadır.

Bayes Ağı yöntemi, kazaların nedensel yapısını belirsizlik altında modelleyebilme gücü sayesinde, geleneksel yöntemlere kıyasla daha esnek ve dinamik bir yapı sunmuştur. Bu yöntem, özellikle senaryo temelli analizlerde çıkarımsal gücü artırmış; sistemin farklı koşullar altındaki davranışlarını öngörme olanağı sağlamıştır. Literatürde sınırlı sayıda çalışmada kullanılan hibrit Bayes Ağı yaklaşımı, bu tez kapsamında detaylı bir yapısal ve sayısal modelleme ile uygulanmış, böylece yöntemin raylı sistem emniyeti alanındaki kullanılabilirliğine dair güçlü bir örnek sunulmuştur.

Model, hangi faktörlerin ölüm, yaralanma ve ciddi kazalar üzerinde daha etkili olduğunu belirlemiş; insan, ekipman ve çevresel nedenlerin sonuç değişkenleri üzerindeki etkisini senaryo bazlı olarak ortaya koymuştur. Özellikle hemzemin geçit kazalarının yüksek ölüm oranlarıyla ilişkili olması ve sistem dışı insan faktörlerinin etkisinin net biçimde modellenmesi, güvenlik önlemlerinin hangi alanlara yönelmesi gerektiği konusunda karar vericilere yol göstermektedir.

Elde edilen bulgular, bakım politikaları, otomasyon seviyesi ve insan faktörlerinin etkileşimlerinin detaylı biçimde analiz edilmesini sağlamıştır. Böylece yöneticilere; bölge bazlı önceliklendirme, sistemsal yatırım planlaması, insan-makine arayüzlerinin yeniden yapılandırılması gibi stratejik konularda karar desteği sunacak bir zemin oluşturulmuştur.

Bu çalışma, raylı sistem emniyeti alanında Bayes Ağı yönteminin uygulanabilirliğini ve analitik katkı potansiyelini ortaya koymuştur. Gelecek araştırmalar için aşağıdaki öneriler geliştirilmiştir:

- Farklı ülkelerin demiryolu kaza verileri analiz edilerek karşılaştırmalı çalışmalar yürütülmesi, bu sayede uluslararası düzeyde emniyet eğilimlerinin karşılaştırılması,
- Zaman boyutunun da dikkate alındığı dinamik Bayes Ağları'nın kullanılarak modelin daha gerçekçi ve öngörücü hale getirilmesi böylelikle olasılıkların nasıl değişeceğini öngörebilmek,
- Özellikle maliyet değişkenine yönelik daha ayrıntılı ve güvenilir verilerin temin edilmesiyle modelin güncellenmesi ve ekonomik etki analizlerinin detaylandırılması.

Bu çalışmanın bazı sınırlılıkları bulunmaktadır:

- Kullanılan veri seti yalnızca Almanya'ya ait kaza verilerini kapsamaktadır; bu durum genelleştirme açısından dikkat gerektirir.
- Bayes Ağı modeli gereği döngüsel yapılar modellenememekte, bu da bazı sistemsel geri besleme ilişkilerinin dışarıda bırakılmasına neden olmuştur.
- Veri eksiklikleri ve bazı değişkenler için sadece uzman görüşüne dayalı koşullu olasılık tablosu tahminleri, modelde öznelliğe neden olabilir.
- Modelde varsayımlar yapılmıştır (örneğin, eksik veri kombinasyonlarında varsayımsal kayıtlar eklenmiştir). Bu durum modelin güvenilirliğini zayıflatmamakla birlikte, metodolojik dikkat gerektirir.

KAYNAKLAR

- Ahmadi Rad, M., Lefsrud, L. M., & Hendry, M. T.** (2023). Application of systems thinking accident analysis methods: A review for railways, *Safety Science*, 160, 106066. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2023.106066>
- Agresti, A.** (2007). An introduction to categorical data analysis (2nd ed.). Wiley.
- Bala, M., & Bhasin, A.** (2018). A review on analysis of railway traffic accident with data mining techniques. *International Journal of Computer Sciences and Engineering*, 6(6), 1251–1256. <https://doi.org/10.26438/ijcse/v6i6.12511256>
- Ben-Gal, I.** (2007). Bayesian networks. In F. Ruggeri, F. Faltin, & R. Kenett (Eds.), *Encyclopedia of Statistics in Quality and Reliability* (pp. 1–6). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9780470061572.eqr089>
- Bhuiyan, M. R. H., Ibtihal, S. A., & Nokshi, K. N.** (2023). Involvement of human and organizational factors in railway accidents: Application of the Human Factors Analysis and Classification System and Bayesian Network. *Transportation Research Record*, 2677(8), 496–508. <https://doi.org/10.1177/03611981231156932>
- Chen, X., Ma, X., Jia, L., Zhang, Z., Chen, F., & Wang, R.** (2024). Causative analysis of freight railway accident in specific scenes using a data-driven Bayesian network. *Reliability Engineering and System Safety*, 243, 109781. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109781>
- Chin, K.-S., Tang, D. W., Yang, J.-B., Wong, S. Y., & Wang, H.** (2009). Assessing new product development project risk by Bayesian network with a systematic probability generation methodology. *Expert Systems with Applications*, 36(6), 9879–9890. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.02.019>
- Dereli, B.** (2012). *Bayes ağları ile gelecek odaklı konumlandırma analizi: Oyun konsolları pazarında bir uygulama* (Yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Endüstri Mühendisliği.
- European Union.** (2016). Directive (EU) 2016/798 of the European Parliament and of the Council of 11 May 2016 on railway safety. Official Journal of the European Union.
- European Union Agency for Railways.** (2020). *Introduction to the European Railway Safety Culture Model: Safety Culture Series #1*. https://www.era.europa.eu/domains/safety-management/safety-culture_en
- European Union Agency for Railways.** (2024). *Report on railway safety and interoperability in the EU – 2024*. Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2821/64343>

- Fitzová, H., & Nash, C.** (2024). Why are the railways of Eastern Europe less efficient than those of the West? *Transport Economics and Management*, 2, pp. 263–274. <https://doi.org/10.1016/j.team.2024.09.004>
- Hong, W. T., Clifton, G., & Nelson, J. D.** (2023). Railway accident causation analysis: Current approaches, challenges and potential solutions. *Accident Analysis and Prevention*, 186, 107049. <https://doi.org/10.1016/j.aap.2023.107049>
- Huang, W., Zhang, Y., Kou, X., Yin, D., Mi, R., & Li, L.** (2020). Railway dangerous goods transportation system risk analysis: An Interpretive Structural Modeling and Bayesian Network combining approach. *Reliability Engineering and System Safety*, 204, 107220. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2020.107220>
- International Union of Railways (UIC), & European Union Agency for Railways (ERA).** (2023). *Safety culture – Peer review handbook*. UIC Safety Unit.
- Jones, B., Jenkinson, I., Yang, Z., & Wang, J.** (2010). The use of Bayesian network modelling for maintenance planning in a manufacturing industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 95(3), 267–277. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2009.10.007>
- Kim, J. H., & Pearl, J.** (1983). *A computational model for causal and diagnostic reasoning in inference systems*. In Proceedings of the 8th International Joint Conference on Artificial Intelligence (pp. 190–193).
- Lee, S. M., & Abbott, P. A.** (2003). Bayesian networks for knowledge discovery in large datasets: Basics for nurse researchers. *Journal of Biomedical Informatics*, 36 (4–5), pp. 389–399. <https://doi.org/10.1016/j.jbi.2003.09.022>
- Liu, G., Liu, S., Li, X., Li, X., & Gong, D.** (2025). Multiscenario deduction analysis for railway emergencies using knowledge metatheory and dynamic Bayesian networks. *Reliability Engineering and System Safety*, 255, 110675. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2024.110675>
- Meng, B., & Lu, N.** (2022). A hybrid model integrating HFACS and BN for analyzing human factors in CFIT accidents. *Aerospace*, 9(11), 711. <https://doi.org/10.3390/aerospace9110711>
- Nadkarni, S., & Shenoy, P. P.** (2004). A causal mapping approach to constructing Bayesian networks. *Decision Support Systems*, 38(2), 259–281. [https://doi.org/10.1016/S0167-9236\(03\)00095-2](https://doi.org/10.1016/S0167-9236(03)00095-2)
- Shi, L., Liu, Y., Zhang, Y., & Liang, J.** (2024). Data-driven Bayesian network analysis of railway accident risk. *IEEE Access*, 12, 38631–38645. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3376590>
- Tomo, A., Pezzillo Iacono, M., Mercurio, L., Mangia, G., & Todisco, L.** (2024). Regulation, governance and organisational issues in European railway regulation authorities. *Journal of Rail Transport Planning and Management*, 29, 100428. <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2023.100428>

- Trucco, P., Cagno, E., Ruggeri, F., & Grande, O.** (2008). A Bayesian belief network modelling of organisational factors in risk analysis: A case study in maritime transportation. *Reliability Engineering and System Safety*, 93(6), 845–856. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2007.03.035>
- Wujie, J., Le, J., Lixin, Y., & Cheng, Z.** (2022). Analyzing and predicting railway operational accidents based on Fishbone Diagram and Bayesian Networks. *Tehnicki Vjesnik*, 29(2), 542–552. <https://doi.org/10.17559/TV-20211102092922>
- Zhang, G.** (2018). A human and organizational analysis method for Chinese high-speed railway accidents/incidents based on Bayesian Network. https://doi.org/10.0/Linux-x86_64





EKLER

EK-A: Bileşik KOT



Çizelge A.1 : Bileşik KOT

Kaza Nedeni +	Tren Tipi	Yolcu Treni									Yük Treni									Diğer								
	Otasyon Seviyesi	TAM			Yarı			Manuel			TAM			Yarı			Manuel			TAM			Yarı			Manuel		
	Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım
	Çevre	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ekipman	0,05	0,06	0,08	0,04	0,05	0,06	0,03	0,03	0,05	0,07	0,10	0,14	0,06	0,08	0,11	0,04	0,06	0,08	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02
	İnsanSi	0,01	0,01	0,00	0,05	0,04	0,02	0,09	0,07	0,04	0,01	0,01	0,00	0,05	0,04	0,02	0,09	0,07	0,04	0,01	0,01	0,01	0,08	0,07	0,04	0,15	0,12	0,07
	İnsanSD	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00

Çizelge A.2 : Normalize edilmiş bileşik KOT

Kaza Nedeni +	Tren Tipi	Yolcu Treni									Yük Treni									Diğer								
	Otasyon Seviyesi	Tam			Yarı			Manuel			Tam			Yarı			Manuel			Tam			Yarı			Manuel		
	Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım	Yüksek Bakım	Orta Bakım	Düşük Bakım
	Çevre	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Ekipman	0,63	0,71	0,79	0,36	0,47	0,65	0,20	0,30	0,49	0,86	0,91	0,95	0,52	0,65	0,81	0,30	0,43	0,64	0,41	0,51	0,65	0,12	0,19	0,35	0,06	0,09	0,19
	İnsanSİ	0,12	0,08	0,04	0,51	0,39	0,22	0,74	0,64	0,44	0,10	0,06	0,03	0,46	0,33	0,17	0,69	0,56	0,35	0,34	0,25	0,13	0,80	0,72	0,54	0,92	0,88	0,76
	İnsanSD	0,24	0,21	0,17	0,13	0,13	0,13	0,05	0,06	0,07	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,24	0,23	0,21	0,07	0,08	0,11	0,02	0,03	0,04
toplam		1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Derya CEPHE

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2021, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2025, İstanbul Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Mühendislik Yönetimi Programı

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Cephe, D., Asan, U.** (2025). “Bayesian Network-Based Approach for Analyzing Railway Accidents”, *International Graduate Research Symposium – IGRS’24*, 12 Mayıs 2025, İstanbul, Türkiye.