



**T.C. İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ**

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**TÜRKİYE' DEKİ İŞ KAZALARI VERİLERİNİN MODELLENMESİ VE
ÖNGÖRÜ ÇALIŞMALARI**

Selcan KAPLANVURAL

**DOKTORA TEZİ
İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ANABİLİM DALI
İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ PROGRAMI
İSTANBUL - 2025**



**T.C. İSTANBUL TİCARET
ÜNİVERSİTESİ**

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM

**TÜRKİYE' DEKİ İŞ KAZALARI VERİLERİNİN MODELLENMESİ VE
ÖNGÖRÜ ÇALIŞMALARI**

**Selcan KAPLANVURAL
200012830**

**Danışman
Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ**

**İkinci Tez Danışmanı
Dr. Öğr. Üyesi Eren TOSYALI**

**DOKTORA TEZİ
İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ ANABİLİM DALI
İŞ SAĞLIĞI VE GÜVENLİĞİ PROGRAMI
İSTANBUL - 2025**

AKADEMİK VE ETİK KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

İstanbul Ticaret Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada,

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversitede veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı

beyan ederim.

Selcan KAPLANVURAL

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET	ii
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	iv
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	v
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	10
2.1. Kaza Nedenselliği Teorileri	11
2.2. İş Kazaları İstatistiklerine Genel Bakış	14
2.3. İş Kazaları ve Öngörüleme Modelleri	17
2.4. İş Kazaları ve Nüfus Dinamiği İlişkisi	19
3. MATERYAL VE METOT	22
3.1. Epidemiyolojide Kompartıman Modelleri	22
3.2. Zaman Serisi Analizleri	27
3.3. Runge- Kutta Algoritması.....	31
3.4. Çalışmada Kullanılan Veri Özellikleri	33
3.5. İş Kazası Modeli (OA model)	36
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	39
4.1. OA Model Kararlılık Analizi.....	39
4.1.1. OA modeli için kullanılan popülasyonun çoğaltım sayısı (R_0) hesaplanması	41
4.2. OA Modelin Sayısal Simülasyonu ve Sonucu	42
4.3. Modifiye OA Modelin Sayısal Simülasyonu ve Sonucu.....	44
4.4. ARMAX, NLARX Modelin Sayısal Simülasyonu ve Sonucu.....	46
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	53
KAYNAKLAR	56
TEZ SÜRECİNDE ÜRETİLEN YAYINLAR	71

ÖZET

Doktora Tezi

TÜRKİYE'DEKİ İŞ KAZALARI VERİLERİNİN MODELLENMESİ VE ÖNGÖRÜ ÇALIŞMALARI

Selcan KAPLANVURAL

İstanbul Ticaret Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İş Sağlığı ve Güvenliği Anabilim Dalı
İş Sağlığı ve Güvenliği Programı

Danışman: Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ

İkinci Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Eren TOSYALI
2025, 81 sayfa

Tez çalışmasının motivasyonu, SIR (Suspected-Infected-Recovery) tabanlı bir Türkiye'de iş kazalarından etkilenen popülasyonun dinamiğini modelleyen bir iş kazası modeli (OA modeli) oluşturmaktır. OA modelinin popülasyonları 2013-2020 yılları arası Türkiye'deki Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) tarafından aylık olarak yayınlanan resmi sigortalı sayıları ve iş kazası geçiren sigortalı sayıları seçilmiştir. OA modeli, dört değişkenli birleşik birinci dereceden sıradan doğrusal olmayan diferansiyel denklem ile tanımlanmıştır. Ayrıca bu değişkenler arasındaki ilişkiler 10 parametre ile açıklanmıştır. OA modelinin kararlılığı için öncelikle sistemin denge noktaları ve özdeğerleri, daha sonra ise yeni nesil matris yöntemi ile popülasyonların çoğalma sayısı hesaplatılmıştır. OA modeli, Runge-Kutta algoritmasına dayalı ODE45 Matlab rutini kullanılarak 1 aylık zaman aralığı ile 96 adımda sayısal olarak çözülmüştür. Buna ek olarak, iş kazası sayıları üzerindeki azaltıcı etkiyi gözlemlemek için OA modeline İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) yeniden eğitim parametresi eklenerek modifiye bir OA modeli geliştirilmiştir. Son olarak, OA modelde kullanılan popülasyonlar, doğrusal ve doğrusal olmayan otoregressif yöntemler (ARMAX, NLARX) ile analiz edilmiştir. Bu analiz sonuçları popülasyonların tahminleme çalışmalarındaki hata oranları NMSE değerleri üzerinden karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın sonuçları olarak, önerilen modelin iş kazalarının geleceğini tahmin etmek için kullanılabileceği, modele farklı parametreler eklenerek iş kazası sayısının azaltılabileceği ve regresyon yöntemlerinin bu süreçte önerilen modelden daha etkin olabileceği vurgulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Doğrusal olmayan dinamik, iş Kazası, iş sağlığı ve güvenliği, matematiksel modelleme.

ABSTRACT

Ph.D. Thesis

MODELING AND FORECASTING OF OCCUPATIONAL ACCIDENT DATA IN TURKEY

Selcan KAPLANVURAL

İstanbul Ticaret University
Institute of Graduate School
Department of Occupational Health and Safety
Occupational Health and Safety Program

Supervisor: Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ

Co-Supervisor: Assist. Prof. Dr. Eren TOSYALI
2025, 81 pages

The motivation of this thesis is to build an occupational accident model (OA model) based on SIR (Suspected-Infected-Recovery) that models the dynamics of the population affected by occupational accidents in Turkey. The populations of the OA model are the official number of insured persons and the number of insured persons who had occupational accidents published monthly by the Social Security Institution (SSI) in Turkey between 2013 and 2020. The OA model is described by a unified first order ordinary nonlinear differential equation with four variables. In addition, the relationships between these variables are described by 10 parameters. For the stability of the OA model, firstly the equilibrium points and eigenvalues of the system and then the reproduction number of the populations were calculated with the new generation matrix method. The OA model was solved numerically in 96 steps with a time interval of 1 month using the ODE45 Matlab routine based on the Runge-Kutta algorithm. In addition, a modified OA model was developed by adding an Occupational Health and Safety (OHS) retraining parameter to the OA model to observe the mitigating effect on the number of occupational accidents. Finally, the populations used in the OA model were analysed with linear and non-linear autoregressive methods (ARMAX, NLARX). The results of these analyses were compared through the NMSE values of the error rates of the populations in the prediction studies.

As the results of this study, it is emphasised that the proposed model can be used to predict the future of occupational accidents, the number of occupational accidents can be reduced by adding different parameters to the model and regression methods can be more effective than the proposed model in this process.

Keywords: *Mathematical modeling, occupational accident, occupational health and safety, nonlinear dynamic.*

TEŞEKKÜR

Bu araştırma için beni yönlendiren, karşılaştığım zorlukları bilgi ve tecrübesi ile aşmamda yardımcı olan değerli Danışman Hocam Prof. Dr. İsmail EKMEKÇİ' ye ve Eş Danışman Hocam Dr. Öğr. Üyesi Eren TOSYALI' ya teşekkürlerimi sunarım.

Tez izleme komitemde yer alan ve çalışmamı geliştirmem için katkıda bulunan, değerli görüş ve önerileri ile beni yönlendiren Prof. Dr. Berk AYVAZ, Prof. Dr. Mustafa KÖKSAL ve Doç. Dr. Sabri Öz' e teşekkür ederim.

Doktora öğrenimim boyunca bana her türlü desteğini esirgemeyen değerli meslektaşlarım Öğr. Gör. Umut ELBİR, Öğr. Gör. Nihan GEMİCİ ELBİR, Öğr. Gör. Fatma HEYBET, Öğr. Gör. Tuğçe SARUL' a teşekkür ederim.

Çalışmam boyunca her ihtiyaç duyduğumda destek ve katkılarını sunan değerli arkadaşlarım Doç. Dr. Uğur Yasin ASAL, Öğr. Gör. Aslıhan ERGİN ASAL ve Arif Can ASAL' a teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan, sevgi ve desteği ile her zaman yanımda olan sevgili eşim Doç. Dr. İsmail KAPLANVURAL' a ve hayatım boyunca her koşulda beni destekleyen annem Fisun ÇİÇEK, babam Cemil ÇİÇEK, ağabeyim Volkan ÇİÇEK ve eşi Derya ÇİÇEK' e sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

Selcan KAPLANVURAL
İSTANBUL, 2025

ŞEKİLLER

	Sayfa
Şekil 1.1. Yıllara göre iş kazası geçiren sigortalı sayısı (2012-2023).....	8
Şekil 1.2. Yıllara göre ölümlü iş kazası geçiren sigortalı sayısı (2012-2023)	8
Şekil 3.1. SIR modelin sistematik diyagramı.....	22
Şekil 3.2. SEIR modelin sistematik diyagramı.....	24
Şekil 3.3. SIRD modelin sistematik diyagramı.....	25
Şekil 3.4. SIRVD modelin sistematik diyagramı.....	26
Şekil 3.5. İş kazası (OA) modelin sistematik diyagramı	36
Şekil 4.1. OA model sayısal sonuçları, (a) Kaza geçirmeyen sigortalı sayısı, (b) Minör kaza geçiren sigortalı sayısı, (c) Majör kaza geçiren sigortalı sayısı, (d) Ölümlü kaza geçiren sigortalı sayısı	43
Şekil 4.2. Modifiye OA model sayısal sonuçları, (a) Kaza geçirmeyen sigortalı sayısı, (b) Minör kaza geçiren sigortalı sayısı, (c) Majör kaza geçiren sigortalı sayısı, (d) Ölümlü kaza geçiren sigortalı sayısı.....	45
Şekil 4.3. ARMAX model sayısal sonuçları, (a) Kaza geçirmeyen sigortalı sayısı, (b) Minör kaza geçiren sigortalı sayısı, (c) Majör kaza geçiren sigortalı sayısı, (d) Ölümlü kaza geçiren sigortalı sayısı..	48
Şekil 4.4. NLARX model sayısal sonuçları, (a) Kaza geçirmeyen sigortalı sayısı, (b) Minör kaza geçiren sigortalı sayısı, (c) Majör kaza geçiren sigortalı sayısı, (d) Ölümlü kaza geçiren sigortalı sayısı..	50

ÇİZELGELER

	Sayfa
Çizelge 3.1. Genel örtülü Runge- Kutta tablosu	33
Çizelge 3.2. Çalışmada kullanılan (X, A, B, Z) popülasyonları	34
Çizelge 3.3. OA modelin parametre ve değişkenlerin tanımı.....	37
Çizelge 3.4. OA modelin parametre değerleri.....	38
Çizelge 4.1. OA model denge noktaları ve karşılık gelen öz değerler.....	40
Çizelge 4.2. OA modeli X, A, B, Z popülasyonları için elde edilen NMSE değerleri.....	44
Çizelge 4.3. OA modeli ile modifiye OA modeli arasındaki çıkarılmış sayısal sonuçlar	46
Çizelge 4.4. ARMAX modeli çıktıları.....	47
Çizelge 4.5. ARMAX modeli X, A, B, Z popülasyonları için elde edilen NMSE değerleri.....	49
Çizelge 4.6. NLARX modeli X, A, B, Z popülasyonları için elde edilen NMSE değerleri.....	51
Çizelge 4.7. OA, ARMAX ve NLARX modelleri X, A, B, Z popülasyonları için elde edilen NMSE değerleri kıyaslaması.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR

ANN	Yapay Sinir Ağları
ANOVA	Varyans Analizi
AI	Yapay zekâ
AR	Otomatik Regresif
ARIMA	Otomatik Regresif Bütünleşik Hareketli Ortalama
ARMAX	Dışsal Girdili Otoregresif Hareketli Ortalama
ARX	Polinomial AR
BSE	İngiliz Standartları Enstitüsü
GP	Gauss Süreçleri
ILO	Uluslararası Çalışma Örgütü
ISG	İş Sağlığı ve Güvenliği
ISO	Uluslararası Standartlar Organizasyonu
İKS	İş Kazası Sayısı
MLE	Maksimum Olabilirlik Tahmini
MSE	Ortalama Kare Hata
NDS	Doğrusal Olmayan Dinamik Sistemler
NLARX	Doğrusal Olmayan Polinomial AR
NMSE	Normalleştirilmiş Ortalama Kare Hata
OA	İş kazası- Occupational Accident
ODE	Adi Diferansiyel Denklem
ODE	Sıradan Diferansiyel Denklem
OSHA	İş Güvenliği ve Sağlığı Yasası
PAR	Polinomial AR
PTEG	Takvim yılı boyunca tüm sigortalıların toplam çalışma günü
RKM	Runge Kutta Yöntemi
SGK	Sosyal Güvenlik Kurumu
SIR	Duyarlı- Enfekte- İyileşen
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
WHO	Dünya Sağlık Örgütü

1. GİRİŞ

İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG), işle ilgili yaralanmaları, hastalıkları ve kazaları önlemeyi amaçlayan, işyerinde çalışanların refahı ve korunmasıyla ilgilenen çok disiplinli bir bilim olarak ifade edilir (Horozoğlu, 2017). İSG'nin birincil amacı ise çeşitli iş süreçlerinin doğasında bulunan risk ve tehlikeleri en aza indirmek çalışanların fiziksel, zihinsel ve sosyal refahını destekleyerek güvenli bir çalışma ortamı sağlamaktır (Serin ve Çuhadar, 2015).

18'inci yüzyılın sonlarında başlayan Sanayi Devrimi, ekonomileri, toplumları ve işgücü yapılarını temelden yeniden şekillendirmiş ve insanlık tarihinde önemli bir dönüm noktası haline gelmiştir (Zanden, 2009., Dimanov, 2024). Bu hızlı sanayileşme dönemi, teknoloji ve seri üretimde benzeri görülmemiş ilerlemeleri ortaya koyarken, aynı zamanda işçiler için yeni ve çok daha tehlikeli çalışma koşullarını da beraberinde getirmiştir (Min vd., 2019). Bu dönemde İSG alanı, endüstriyel ilerlemenin iş süreçlerine entegrasyonu sırasında işçilerin sağlığı, refahı ve güvenliğinin sağlanması hususunun dikkat çekmesi ile kritik bir endişe alanı haline gelmiştir (Harrison, 2012). Endüstriler büyüdükçe ve fabrika sistemleri genişledikçe, iş kazaları, yaralanmalar ve meslek hastalıkları daha sık hale gelmiş ve bu durum yasal müdahalelere olan ihtiyacı ortaya koymuştur (Ruslan vd., 2020). Bu koşullar, iş sağlığı ve güvenliğine yönelik ilk önlemlerin alınmasını zorunlu kılmış ve böylece İSG uygulamalarının önemi dünya genelinde hızla gündeme gelmiştir (Manav, 2019). Özellikle, işçilerin zorlu çalışma koşulları, uzun vadede işçileri örgütlü hareketlere yöneltmiş ve özellikle 19. yüzyılda Avrupa'da işçi hakları ve iş güvenliği konusunda sosyal reformlar ortaya çıkmıştır (Çiçek ve Öçal, 2016). Bununla birlikte, işçi sağlığını korumaya yönelik ilk çabalar, 1802'den başlayarak Birleşik Krallık'taki Fabrika Yasaları gibi güvenlik mevzuatı şeklinde ortaya konmuştur (Heaton, 1976). Bu yasalar başlangıçta fabrikalardaki çocuk işçilerin güvenliği ve refahına odaklanmış ve resmi işçi koruma yasalarının başlangıcını oluşturmuştur (Şahin, 2012). Eş zamanlı olarak, endüstriyel toksikologlar Hamilton ve Hardy gibi isimlerde hastaların iş geçmişine çok az ilgi gösterilmesini vurgulayarak önderlik ettiği sosyal reform hareketlerinin yükselişi ile işyerindeki tehlikelerin halk sağlığı

üzerindeki geniş etkilerine ışık tutmaya başlamıştır (Petersen ve Milham, 1980). Özellikle, fabrikalardaki kurşun zehirlenmesi ve madenlerdeki kömür tozunun tehlikeleri de dahil olmak üzere endüstriyel çalışma koşullarının sağlık üzerindeki etkileri konusunda kapsamlı araştırmalar yürüterek iş sağlığı alanında öncü figürler haline gelmiştir (Hamilton ve Hardy, 1949). İş kazaları için işveren sorumluluğu kavramı ise, 19. yüzyılın sonlarında işveren sorumluluğunu vurgulayan yasalar ile ilgi görmeye başlamıştır. Bu yasalar, özellikle sanayileşmiş ülkelerde, işgücü düzenlemelerine yönelik serbest piyasa tutumundan hükümetlerin daha müdahaleci bir yaklaşımına geçişin sinyallerini vermiştir (Heino, 2013). Benzer yasal gelişmeler Avrupa ve Kuzey Amerika'da da yaşanmış ve modern İSG sistemlerinin temelini oluşturmuştur. 20. yüzyılda, modern İSG kavramı, işyerlerinde çalışanların fiziksel ve psikolojik sağlıklarının korunmasının yanı sıra, devletler ve uluslararası kuruluşlar tarafından geliştirilen yasa, yönetmelik ve standartlarla çalışan haklarının korunması, işveren sorumluluklarının belirlenmesi, denetimlerin yapılması ve güvenli çalışma koşullarının sağlanması gibi unsurları içeren bir alan olarak ortaya çıkmıştır (Hashmi, 2023). Uluslararası alanda, Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) gibi kuruluşlar da küresel İSG standartlarının geliştirilmesinde etkili olmuştur. Özellikle, iş sağlığı çerçevesini tanımlamak için 1950 yılında Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ile ortaklık kuran ILO gibi kurumların oluşturulmasıyla daha da şekillenmiştir (Lis ve Nowacki, 2019). ILO'nun sözleşmeleri ve tavsiyeleri, ulusal güvenlik yasalarının ve küresel güvenlik standartlarının oluşturulmasını etkileyerek işyeri güvenliği için ölçütler belirlemiştir. ILO'nun 155 sayılı sözleşmesi ile, işçilerin güvenli ve sağlıklı bir çalışma ortamına sahip olma hakkı vurgulanmış, işle ilgili yaralanma ve hastalıkların önlenmesi hedeflenmiş, işçi koruma sistemi için temel unsurlar belirlenmiş, işçilerin güvenlik programlarına katılımı teşvik edilmiş ve iş sağlığı ve güvenliği uygulamaları için uluslararası standartlar getirilmiştir (ILO, 1981). Bu gelişmeleri ile birlikte, Amerika Birleşik Devletleri'nde de 1970 yılında İş Güvenliği ve Sağlığı Yasası'nın (OSHA) kabul edilmesi, büyük ölçüde gönüllü bir güvenlik önlemleri sisteminden uygulanabilir standartlar oluşturan bir sisteme geçişi işaret eden önemli bir olay olarak belirtilmiştir (Stender, 1974). OSHA'nın kurulması, ABD'de işçilerin korunması için temel oluşturmaya yardımcı olmuş, işyeri güvenliği için düzenlemeler

getirmiş, denetimler yapmış ve eğitim programları sunmuştur (OSHA, 2024). Yasa, İSG'nin sadece ahlaki veya etik bir mesele değil, işleyen bir ekonominin gerekli bir parçası olduğu ve bunun da çalışanların üretkenliğini, işte kalmalarını ve kamu sağlığını doğrudan etkilediği konusunda artan bir kabulü yansıtmıştır (Shapiro, 1998).

Modern İSG uygulamaları, çalışanların fiziksel, psikolojik ve sosyal sağlıklarını korumayı hedefleyen bir dizi temel prensibe dayanır; bu prensipler, risklerin önceden tespit edilmesi, iş yerinde güvenli koşulların sağlanması, çalışanların katılımının teşvik edilmesi ve sürekli iyileştirme süreçlerinin uygulanması gibi unsurları içermektedir (Benjamin, 2001). Risk Değerlendirmesi süreçleri, modern İSG yaklaşımının temeli ve risklerin sistematik olarak belirlenmesi, değerlendirilmesi ve kontrol edilmesidir (Saari, 1995). Kuruluşların düzenli risk değerlendirmeleri yapmaları, önleyici tedbirler uygulamaları ve ortaya çıkan riskleri ele almak için protokoller oluşturmaları gerekmektedir (Liu vd., 2023). Bu süreç, risk değerlendirme ekibini oluşturma ve eğitime, tehlike ve risk tanımlama, analiz etme ve periyodik güvenlik denetimleri sağlama gibi önemli adımlar içermektedir (Koçali, 2022). Gelişmiş teknolojiler, gelecekteki risklerin veya olayların olasılığını belirlemek için veriler, istatistiksel algoritmalar, makine öğrenimi teknikleri, çalışanların sağlığını ve çevresel koşullarını izleyen sensörler, akıllı saatler veya fitness takip cihazları gibi araçları, ayrıca insan gücünün yerine geçebilecek makineler, robotlar veya yapay zekâ (AI) kullanımını içermektedir (Zhou vd., 2013., Ahn vd., 2019). Bu teknolojiler, kuruluşların riskleri daha iyi tahmin etmesini ve azaltmasını sağlamaktadır. Sağlığın geliştirilmesi ve refah, modern İSG kavramının bir diğer temel prensibi olup, sadece yaralanmaların önlenmesini değil, çalışanların genel refahına önemli ölçüde odaklanmaktadır (Jain vd., 2021). Buna ruh sağlığı desteği, ergonomik müdahaleler ve stresi azaltmak, kronik hastalıkları önlemek ve sağlıklı bir iş-yaşam dengesini teşvik etmek için tasarlanmış sağlıklı yaşam programları dahildir (Matilla vd., 2021). Mesleki stres, tükenmişlik ve işyeri zorbalığı önemli sağlık riskleri olarak kabul edildiğinden, ruh sağlığı farkındalığı özellikle önemli hale gelmektedir (Saraswaty ve Fadli, 2024). İşyeri Güvenlik Kültürü ise modern İSG alanındaki en büyük değişimlerden biri, kuruluşlar içinde proaktif bir

güvenlik kültürü yaratmaya yapılan vurgudur (Tetzlaff vd., 2021). Bu kültür, çalışanlar ve yönetim arasında potansiyel tehlikeler hakkında açık iletişimi teşvik ederek sürekli iyileştirmeyi destekler ve tüm operasyon seviyelerinde güvenliğe öncelik vermeyi öne çıkarmaktadır. Güvenlik kültürü girişimleri arasında liderlik eğitimi, çalışanların karar alma süreçlerine katılımı ve düzenli güvenlik tatbikatları yer almaktadır (Nielsen, 2014). Kuruluşların İSG alanında yasalara uyumluluk gösterme becerileri modern İSG kavramının bir diğer temel taşı kabul edilmektedir (Caparros ve Ferreira, 2020). Dünyanın dört bir yanındaki hükümetler, zararlı kimyasallara maruz kalma sınırlarının belirlenmesinden makine güvenliği standartlarının düzenlenmesine kadar işyeri güvenliğini sağlamayı amaçlayan yasa ve yönetmelikleri uygulamaktadır (Schenk vd., 2008., Macdonald, 2004). OSHA ve Birleşik Krallık'taki Sağlık ve Güvenlik İdaresi gibi yürütme organları, uyumluluğun izlenmesinde ve ihlaller için cezalar verilmesinde merkezi bir rol oynamaktadır (Brown, 1992). Aynı zamanda, kuruluşlar İSG programlarının en son mevzuat değişikliklerine uyacak şekilde sürekli olarak güncellendiğinden emin olmalıdırlar. Küreselleşmeyle birlikte, çok uluslu şirketler farklı coğrafi bölgelerde tutarlı İSG standartlarını sürdürme zorluğuyla karşı karşıya kalmaktadır. Bu nedenle modern İSG çerçeveleri, tedarik zinciri güvenliğini vurgulayarak ve dünyanın çeşitli bölgelerindeki çalışanlara aynı düzeyde koruma sağlanmasını temin ederek sınır ötesi sorunları ele alacak şekilde uyarlanmıştır (Santos vd., 2013). 2018 yılı öncesi İngiliz Standartları Enstitüsü (BSE) liderliğinde OHSAS 18001 ve 2018 sonrasında ise Uluslararası Standartlar Organizasyonu (ISO) tarafından diğer yönetim sistemlerine de uyumu kolaylaştıran ISO 45001 ortaya konulmuştur (Ballantyne, 2019). Bu uluslararası sertifikasyon standartları, İSG yönetim sistemleri için küresel bir ölçüt sağlayarak işyeri güvenliği uygulamalarında tekdüzelik ve mükemmellik sağlamayı amaçlamaktadır (Marhvilas vd., 2018). Modern anlamda İSG bütün bu yönleri ile beraber sürekli iyileştirme prensibi ile hareket etmektedir. İSG uygulamalarının hayata geçirilmesi düzenli olarak gözden geçirilmeli ve zaman içinde güvenlik standartlarını iyileştirmek için önlemler alınmalıdır (Granerud ve Rocha, 2011). Busayede, kuruluşlar yeni teknolojilere uyum sağlamayı, ortaya çıkan riskleri ele almayı ve yeni araştırma bulgularını İSG protokollerine entegre etmeyi temel bir ilke haline getirmektedir. Bu bağlamda, COVID-19 salgını

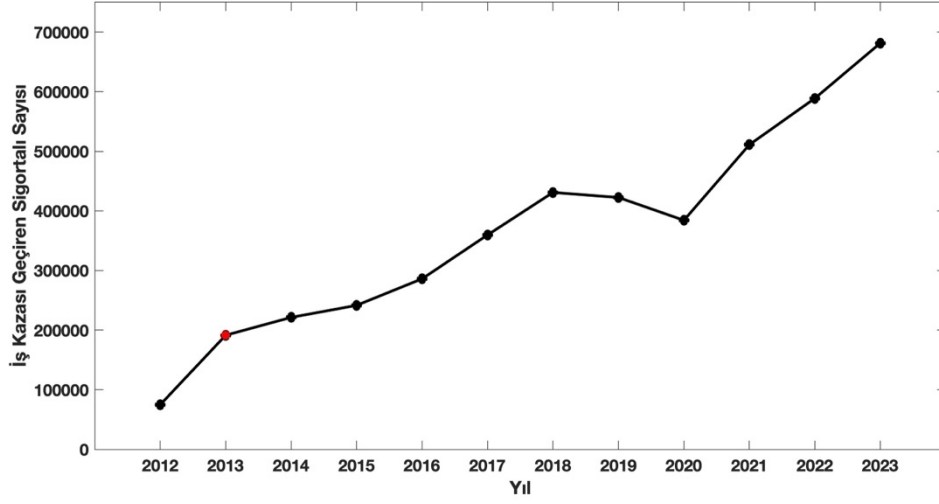
dönemi, iş sağlığı ve güvenliğinin küresel ölçekteki önemini gözler önüne sermiştir. İşyerinde bulaşıcı hastalık kontrolüne benzeri görülmemiş bir odaklanmaya yol açmış ve İSG standartlarını yeniden şekillendirerek ve kişisel koruyucu ekipman (KKD) zorunlulukları, uzaktan çalışma protokolleri ve ruh sağlığının izlenmesi gibi zorunluluklar getirmiştir (Godderis ve Luyten, 2020). İşverenler, çalışan güvenliğini ve iş sürekliliğini sağlamak için hijyen standartlarının uygulanması, sosyal mesafe protokolleri ve uzaktan çalışmaya geçiş gibi yeni önlemler almak zorunda kalmış ve sonuç olarak, birçok kuruluş bulaşıcı hastalıklara hazırlık ve çalışan sağlığına daha fazla odaklanarak İSG çerçevelerinde uzun vadeli değişiklikler yapmıştır (Ranka vd., 2020).

Modern İSG, geleneksel yaralanma önleme kaygılarının çok ötesine uzanan dinamik ve gelişen bir alandır. Günümüzün İSG çerçeveleri, daha güvenli ve sağlıklı işyerleri yaratmak için proaktif risk yönetimi, çalışan sağlığı, mevzuata uyum ve teknolojik yeniliklerin entegrasyonunu vurgulamaktadır. Çalışma ortamları, yeni teknolojilerin ve küresel zorlukların ortaya çıkmasıyla gelişmeye devam ettikçe, İSG, kuruluşların sürdürülebilir başarısını ve çalışanlarının refahını merkez alan bir bilim olmaya devam etmektedir. Bu bağlamda, İSG'nin önemi, endüstrinin ve teknolojinin gelişimiyle her geçen gün artmakta olup, çalışanların iş kaynaklı yaralanmalarını, hastalıklarını ve ölümlerini ortadan kaldırmayı amaçlamaktadır (Quinlan, Bohle ve Lamm 2010., Yassi, Kjellström De Kok ve Guidotti 2001). Bunun yanı sıra, İSG, mühendislik, ergonomi, fizik, biyoloji, hukuk, tıp, sosyoloji ve psikoloji vb. bilimlerden faydalanan çok disiplinli bir bilim olma özelliğine sahiptir. Çok disiplinli bu özelliği, çalışanların yürüttükleri iş nedeniyle yaralanmalarını ve hastalıklara maruz kalmalarını önlemek için önem taşımaktadır (Le Coze, Salvi ve Gaston 2006). Çalışanların iş kazalarına, maruz kalmaları toplum sağlığını ve verimliliğini etkileyen küresel bir sorun olarak ifade edilmektedir (Karadeniz, 2012). Bu bağlamda, Uluslararası Çalışma Örgütü (ILO) istatistikleri, her yıl yaklaşık 3 milyon çalışanın işle ilgili kazalar ve hastalıklar nedeniyle hayatını kaybettiğini ve özellikle iş kazalarından kaynaklanan yaklaşık 330.000 ölüm gerçekleştiğini ifade etmektedir (ILO, 2023). Takala ve arkadaşları, yaptıkları çalışmada iş kazalarının yüksek gelirli bölgelerde (Amerika, Doğu Avrupa ve Batı Pasifik Dünya Sağlık Örgütü (WHO) verilerine göre) ekonomik

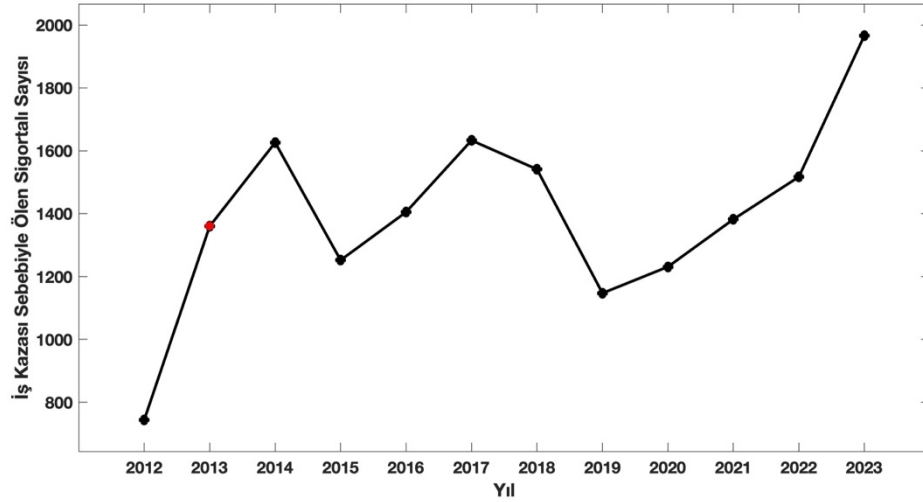
etkilerini araştırmış; 2019 yılı için yaklaşık ekonomik kaybın 180 milyon dolar olduğunu ve bu kaybın küresel gayri safi milli hasıla üzerindeki etkisinin %5,8 olduğunu vurgulamıştır (Takala vd., 2024). Yine ILO yayınları, özellikle Asya-Pasifik bölgesine işaret ederek, küresel ölümlerin yaklaşık %63' nn bu bölgelerde olduğunu, tarım, inşaat ve imalat sektörlerinin de en tehlikeli sektörler olduğuna dikkat çekmiştir (ILO, 2023). Bu istatistikler, küresel çapta İSG iyileştirmelerine öncelik verilmesine duyulan kritik ihtiyacın altını çizmektedir. Geliştirilmiş İSG yasaları ve yönetmelikleri işyeri kazalarını ve hastalıklarını azaltarak daha düşük sağlık hizmeti maliyetleri, artan çalışan memnuniyeti ve daha yüksek üretkenlik sağlamaktadır (Bayram vd., 2017). Ayrıca, İSG çerçevelerinin güçlendirilmesi, Birleşmiş Milletler'in (BM) Sürdürülebilir Kalkınma Hedefleri (SKH'ler) kapsamında özellikle de insana yakışır iş ve ekonomik büyümeye vurgu yapan hedefleri ile uyumludur (BM, 2024). Bu doğrultuda dünya genelinde İSG yasa ve yönetmeliklerinin iyileştirilmesinin önünde çeşitli engeller bulunmaktadır. Ekonomik kısıtlamalar özelikle gelişmekte olan ülkelerin İSG programlarını uygulamak için yeterli kaynak ve altyapıya sahip olmamaları bu engellerin başında gelmektedir. Yasalardaki boşluklar, tutarsız ve eski yasaların modern teknolojilere ve gelişen çalışma ortamlarıyla ilişkili yeni risklere uyum gösterememesi, belirlenen İSG politikalarının işyerlerinde uygulanamaması, zayıf denetim mekanizmaları, işyeri güvenliğine yönelik sınırlı farkındalık, kültürel tutumlar vb. durumlar İSG standartlarının uygulanmasını zorlaştıran faktörlerdendir (Arastoo vd., 2015). Günümüz teknoloji ile birlikte iş kazalarının düzenli kayıt altına alınması kazaların nedenleri ile ilgili birçok fikir vermektedir (Saldana vd., 2003). Ülkemizde de iş kazaları son birkaç on yıldıki hızlı sanayileşme ve ekonomik gelişim süreci dikkate alındığında oldukça önemli bir konudur (iek ve al 2016). Özellikle, 2000'li yılların başından itibaren işgücüne katılım oranlarının artması ve tarım sektöründen sanayi ile hizmet sektörlerine geçişin hızlanmasıyla birlikte ülkemizin endüstriyel yapısındaki köklü değişimler, iş kazalarının sayısında da önemli değişikliklere yol açmış ve hükümet ile sivil toplum kuruluşlarını İSG konusuna daha fazla dikkat vermeye yöneltmiştir (Sayis, 2017). İş kazaları verileri, çalışma ortamlarında mevcut tehlikelerin boyutunu anlamak, etkili güvenlik önlemleri almak ve sonuç olarak bu kazaların

sıklığını azaltmak için hayati bir rol oynamaktadır (Karakurt ve Özbakır 2024). Yüksek iş kazası oranları, ülkemizde önemli bir toplum sağlığı ve güvenliği sorunu olarak öne çıkmaktadır. Özellikle 2013 yılında yürürlüğe giren 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu, iş kazalarının bildirim süreçlerini daha güvenilir hale getirerek, bu alandaki denetim ve önleyici tedbirlerin güçlendirilmesine önemli bir katkı sağlamıştır. 5510 sayılı Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu'nun 31 Mayıs 2006 tarihli 13. maddesine göre iş kazası, sigortalının bedensel ya da ruhsal özür almasına yol açan olaylar olarak tanımlanmaktadır (5510 sayılı Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu, 2006). Türkiye'de iş kazası geçiren kişilerin kayıtları Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) tarafından tutulmakta olup, SGK'nın yayımladığı veriler, sigorta ve işyeri demografisi ile iş kazaları ve meslek hastalıklarına ilişkin istatistikleri içermektedir (SGK, 2024). Bu istatistikler, 4a/4b/4c olarak kategorize edilen aktif ve pasif sigortalı çalışan sayısı ve kazanın şiddetine göre sınıflandırılan iş kazaları ve meslek hastalıkları vakaları gibi çeşitli parametreleri kapsamaktadır. Özellikle, iş kazası istatistikleri sektörel, yıllık, aylık, il bazında, yaş ve cinsiyete göre tasvir edilmektedir. Ayrıca, bireyin kaza günü çalışıp çalışmadığı, iş göremez hale gelip gelmediği ve iş göremezlik süresi (1, 2, 3, 4 veya 5+ gün) gibi faktörlerin yanı sıra ölümcül sonuçlara göre de bölümlere ayrılmıştır.

2012-2023 yılları arası yaşanan toplam iş kazası geçiren sigortalı sayısı Şekil 1.1' de ve ölümlü iş kazası geçiren sigortalı sayısı Şekil 1.2' de verilmiştir (SGK istatistik yıllıkları, 2024).



Şekil 1.1 Yıllara göre iş kazası geçiren sigortalı sayısı (2012-2023)



Şekil 1.2 Yıllara göre ölümlü iş kazası geçiren sigortalı sayısı (2012-2023)

Şekil 1.1 ve 1.2' de, 6331 sayılı İSG kanununun 2013 yılında yürürlüğe girmesinin iş kazalarının bildirim süreçleri üzerindeki etkisi kırmızı olarak işaretlenmiştir. Küresel salgın döneminde bir azalış gözükse de son yıllarda iş kazası geçiren sigortalı sayısı ve kazalar sonucu ölen kişi sayısı ciddi bir artış eğiliminde olduğu görülmüştür. SGK 2021 yılı iş kazaları istatistiklerinde, 511.084 iş kazası rapor edilirken, bu kazalar sonucunu hayatını kaybeden kişi sayısı 1382 olarak tespit edilmiştir (SGK, 2021). Bu bağlamda, Özbakır ve Deniz, Türkiye' de yaşanan ölümlü iş kazaları sayısını Avrupa Birliği ülkeleri ile kıyasladığı çalışmalarında, 2021 yılı için, Türkiye' de yaşanan ölümlü kaza hızının AB ülkelerine kıyasla 6,9 kat daha fazla olduğunu ortaya koymuştur (Özbakır ve Deniz, 2024). Yine SGK

verilerine göre, 2012 yılında yaklaşık 75.000 olan iş kazası sayısı dramatik bir şekilde artarak 2023 yılında 681.401 gibi şaşırtıcı bir rakama ulaşmıştır (SGK, 2023). Ülkemizde artan iş kazası vakaları, İSG uygulamalarında kapsamlı bir reform gereksinimini gözler önüne sermektedir. İş kazaları ile mücadele ederken, çalışanları korumak ve işyeri yaralanmaları ile ölümlerinin yol açtığı ekonomik yükü azaltmak amacıyla mevcut politikaları gözden geçirmeli ve daha etkili stratejiler geliştirmelidir. Bu doğrultuda, iş kazalarının sayısını ve bu kazaların içinde ölümlü kazaların oranını doğru bir şekilde tahmin edebilmek hem önleyici stratejilerin geliştirilmesi hem de gelecekteki risklerin belirlenmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

Bu çalışmanın motivasyonu, iş kazaları ve ölümlü kazalar arasındaki korelasyonu dikkate alarak, bu olayların gelecekteki olası sayılarını tahmin etmektir. Literatürde, iş kazalarını tahmin etmeye yönelik çeşitli istatistiksel ve matematiksel modeller geliştirilmiş olsa da bu modeller genellikle doğrusal özellikte olup, iş kazalarının ve ölümlü kazaların dinamik yapısını modellemek için doğrusal olmayan bir yaklaşım sunulmamaktadır. Bu çalışmada, iş kazaları ve ölümlü kazaların birbirine bağlı gelişimini gerçekçi bir şekilde ifade edebilmek amacıyla doğrusal olmayan diferansiyel denklemler kullanılmaktadır. Geliştirilen model, iş kazalarının sayısını ve ölümlü kazaların oranını etkileyen bir dizi faktörü bir arada değerlendirerek, gelecekteki kaza sayılarının düşük bir hata oranı ile tahmin edilmesini hedeflemektedir. Bu yaklaşım ile, kazaların önlenmesine yönelik stratejilerin etkinliğinin artacağı ve iş sağlığı ve güvenliği politikalarının daha sağlam bir veri temeline dayalı olarak planlanmasına olanak tanıyacağı düşünülmektedir. Ayrıca, model, iş sağlığı ve güvenliği alanında özgün bir katkı sunarak, ilgili kurumların etkili politika geliştirmelerine yardımcı olacak yeni bir bakış açısı ortaya koymaktadır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

İş kazaları, toplum sağlığı ve güvenliği açısından önemli bir sorun olup, bu olayların nedenlerini anlamak ve gelecekteki riskleri tahmin edebilmek, İSG alanında yapılan araştırmaların temel odak noktalarından biri olmuştur (Ciarapica ve Giacchetta, 2009).

İş kazalarının nedenleri üzerine geliştirilen teoriler, bu olayların çok sayıda faktörün etkileşimiyle meydana geldiğini öne sürmektedir. Kaza nedenselliği teorileri, kazaları sadece bireysel hatalarla açıklamamın yetersiz olduğunu, insan, çevre ve organizasyonel faktörlerin birleşiminin bu olayların temel dinamiklerini oluşturduğunu vurgulamaktadır (Fu vd., 2020). Bu bağlamda, iş kazalarının önlenmesi için iş yerindeki dinamiklerin ve risk faktörlerinin bütünsel bir şekilde analiz edilmesi gerekliliği ortaya çıkmaktadır (Oppong, 2015).

Mevsimsel ve zaman temelli analizler, iş kazalarını etkileyen bu karmaşık etkileşimleri daha iyi anlamaya yardımcı olabilir, dolayısıyla iş yerlerindeki risklerin doğru bir şekilde yönetilmesine ve kazaların azaltılmasına yönelik daha etkin stratejilerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır (Freivalds ve Johnson, 1990).

İş kazalarına dair istatistiksel çalışmalar, bu kazaların oranlarını ve dağılımlarını inceleyerek çeşitli çözüm önerileri sunmayı hedeflemektedir (Baraza vd., 2023). Literatürde, iş kazalarının sıklığının ve ölümlü kazaların oranlarının belirlenmesi amacıyla yapılan sayısal analizler, iş sağlığı ve güvenliği politikalarının geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Altunkaynak, 2018). Türkiye’de de iş kazaları, Sosyal Güvenlik Kurumu (SGK) tarafından düzenli olarak kaydedilmekte ve bu veriler üzerinden çeşitli istatistiksel incelemeler yapılmaktadır (SGK, 2024). Ancak, iş kazaları üzerinde yapılan mevcut modeller genellikle doğrusal yöntemler üzerine kurulmuştur ve bu modellerin kazaların karmaşık yapısını yansıtmakta yetersiz kalabileceği düşünülmektedir (Katsakiori vd., 2009).

Zaman serileri analizleri, iş kazalarının geçmişteki verilerine dayalı olarak gelecekteki olası kaza sayılarını tahmin etmek için sıklıkla kullanılmaktadır (Tuna, 2017). Ancak, iş kazalarının dinamikleri ve zaman içindeki değişimlerini düşük hata oranı ile modellemek için doğrusal olmayan (non-linear) modellerin potansiyeli henüz tam anlamıyla keşfedilmemiştir. Bu bağlamda, iş kazalarının neden olduğu yaralanma ve ölüm oranlarının daha iyi anlaşılabilmesi için, nüfus dinamiği modelleri gibi daha sofistike yaklaşımların kullanılabilmesi öne sürülmektedir. Nüfus dinamiği ve salgın hastalık modellemeleri, belirli bir sistemin zamanla nasıl evrileceğini ve bireyler arasındaki etkileşimlerin sistem üzerindeki etkilerini anlamada güçlü araçlar sunmaktadır (Öztürk vd., 2023).

Bu literatür özetinde, iş kazalarının nedenselliği üzerine yapılan teorik çalışmalar, bu kazaların istatistiksel süreçleri ve matematiksel olarak doğrusal ve doğrusal olmayan şekilde modellendiğine dair bir bakış açısı sunulmuştur.

2.1. Kaza Nedenselliği Teorileri

İSG' nin tarihsel sürecinde iş kazalarının nedenselliği yoğun bir biçimde araştırılmıştır. Heinrich ilk kez kaza zinciri modelini öne sürerek, kaza nedenlerini beş domino taşı ile tanımlamıştır. Bu nedenler:

- Sosyal çevre ve yetiştirilme
- Hata veya ihmale yol açan kişisel faktörler
- Güvenli olmayan eylemlerin veya koşulların varlığı
- Kaza
- Yaralanma

olarak ifade edilmiştir (Henrich, 1931). Rad vd., 2013 yılında yaptıkları çalışmalarında domino teorisinin inşaat gibi çok tehlikeli sahalardaki kazaları anlama ve önleme konusundaki uygulamalarını incelemiştir. Bu bağlamda, nedensellik zincirindeki “domino taşlarının” (güvensiz uygulamalar, yetersiz eğitim, yetersiz güvenlik önlemleri veya denetim eksikliği gibi) belirlenmesi ve ele alınmasıyla, şantiye kazalarının önemli ölçüde azaltılabileceğini öne sürmüştür (Rad vd., 2013).

Heinrich'in görüşleri, kaza nedenselliğinde insan davranışının kontrolünü çok fazla basitleştirdiği için eleştirilmiştir; ancak Heinrich'in araştırma ve çalışmaları diğer birçok araştırmacı için temel oluşturmuştur (Busch, 2019). Heinrich'in domino teorisi, kazaların asıl nedeni olarak yönetime daha fazla vurgu yapılarak yıllar içinde değiştirilmiş ve güncellenmiştir. İlk olarak, Weaver 1971 yılında, kaza zincirine yönetsel süreçlerin etkisinin dahil edilmesini önermiştir. Weaver, kazaların meydana gelmesinde sadece operasyondan kaynaklanan hataların rolü olmadığını, aynı zamanda bu hataların devam etmesine izin veren yönetsel faktörlerin de etkili olduğunu vurgulamıştır (Weaver, 1971). Bu yaklaşımda, üç, dört ve beş numaralı dominolar operasyondan kaynaklanan hatalar olarak değerlendirilmiş, yönetimin kazanın oluşmasını engellemek için gerekli güvenlik bilgisine sahip olup olmadığı ve operasyondaki hataların nedenlerine ilişkin yönetsel eksiklikler incelenmiştir (Hosseinian ve Torghabeh, 2012). Aynı şekilde, Bird ve Loftus yönetici rolünü yansıtmak için "Domino Teorisi" ni güncellemiştir (Bird ve Loftus, 1976). Bu teorideki ana nokta, yönetimin çalışanların güvenliği ve sağlığından sorumlu olduğudur. Teori aynı zamanda güvensiz eylem ve durumların önlenmesi halinde temas olaylarının da önlenebileceğini vurgulamaktadır. Kaza nedenleri domino teorisinden farklı olarak aşağıdaki gibi sıralanmıştır (Rahiman ve Mahat, 2018).

- Kontrol/yönetim eksikliği
- Temel nedenler/kökenler (kişisel veya iş faktörleri)
- Acil nedenler/semptomlar
- Olay (enerji ve madde ile temas)
- Kayıp (mülk, insanlar, süreç)

Ferrell ise kazaların en sonunda insan hatasından kaynaklanan olaylar zincirine bağlı olduğunu ifade eden insan faktörleri teorisini ortaya atmıştır (Hale ve Glendon, 1987). Bu hataların, öncelikle kişinin zihinsel yetenekleri ile çalıştığı fiziksel ortam arasındaki uyumsuzlukla ilgili bir dizi faktörden etkilendiğini savunmuştur. Teori, bu faktörler aynı hizada olmadığında, sonunda kazalara yol açan bir dizi olayla sonuçlanabileceğini öne sürmektedir. Ferrel'in teorisinin temel unsurları arasında aşırı yüklenme, yanlış tepki ve uygunsuz faaliyet yer almaktadır (Abdelhamid ve Everett, 2000). Petersen' in insan faktörü teorisi, insan davranışı ve bilişsel sınırlamalar bağlamında kazaları ve nedenlerini

anlamaya yönelik kapsamlı bir yaklaşım sunmuştur (Petersen, 1981). Genellikle çevresel faktörlere, makinelere veya belirli eylemlere odaklanan geleneksel kaza nedensellik modellerinin aksine, Peterson'ın teorisi kazaların önlenmesinde insan unsurunu vurgulamıştır (Reason, 1990). Teorisinin temel önermesi, çoğu kazanın hem bireysel hem de organizasyonel faktörlerden etkilenen bir dizi insan hatası veya hatasından kaynaklanması olup, insan hatasının her zaman ihmal ya da kötü muhakeme sonucu ortaya çıkmadığını, genellikle insan yetenekleri ile çalışma ortamının koşulları arasındaki uyumsuzluktan kaynaklandığını savunmuştur. Ferrell' in teorisine ek olarak ergonomik eksiklik, hatalı karar alma, sistem hataları ve aşırı yük nedeniyle hata yapma gibi kavramları eklemiştir (Heinrich, Petersen ve Roos, 1980).

Sanders 1993 yılında yayınladığı kitabında insan faktörü teorilerini, çalışanın kaza yatkınlığı, çalışanın yeteneklerine göre işe yerleştirilmesi ve psikososyal boyutları ile genişletmiştir (Sanders, 1993). Reason vd. ise "İsviçre Peyniri" adını verdiği günümüzde de yaygın olarak kullanılan, sistemi nedensel diziler ve epidemiyolojik bir karışıma dayanan kaza nedensellik modeli ortaya atmıştır (Reason, 1988, 1997). Bu bağlamda, savunma ve engellerin yüksek teknoloji sistemlerinde önemli bir rol oynadığını öne sürmüştür. Bu nedenle, İsviçre Peyniri Modeli örgütsel etki, güvensiz denetim, güvensiz eylemler için ön koşul ve güvensiz eylemler olmak üzere dört savunma katmanı önermiştir (Shappell ve Wiegmann, 2000., Wu vd., 2009). Her bir peynir diliminin karmaşık bir sistemdeki bir savunma katmanını veya bariyerleri temsil ettiğini; her bir dilimdeki deliklerin ve peynir dilimi arasındaki boşlukların sistemin insan seviyesindeki başarısızlıkları ve hataları (aktif ve gizli) temsil ettiğini varsaymıştır (Reason, 2005).

Kaza teorilerinin ortak özelliğinin, kaza nedenlerinden bir kaza zinciri oluşturmak olduğu görülmektedir. Bu zincir genel olarak, yönetsel süreçleri, insan faktörleri, fiziksel çevre güvenliği, yetersiz eğitim ve denetim, insan-makine-çevre ilişkisi vb. etmenleri içermektedir.

2.2. İş Kazaları İstatistiklerine Genel Bakış

Günümüzde, teknolojinin gelişimi ile birlikte kaza nedenlerini araştıran teoriler, iş kazalarının düzenli kayıt altına alınması ile farklı boyutlara ulaşmıştır (Albar, 2024). Özellikle bu veriler ile çalışma ortamında tehlikelerin belirlenmesi, risklerin aza indirilmesi ve önleyici tedbirlerin geliştirilmesi vb. proaktif yaklaşımları destekleyerek, gelecekteki kazaları önceden tahmin etmek için kullanılmaktadır (Rasmussen, 2000). Bu bağlamda, Soltanzadeh vd., çalışmalarında İran'ın en büyük inşaat endüstrisinde kaza şiddet oranına katkıda bulunan nedensel faktörleri 2009-2013 arasında resmi kaza verilerini kullanarak modellemiştir (Soltanzadeh vd., 2017). Bir diğer çalışmada, Shafique ve Rafiq ise, Hong Kong'daki inşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının mevcut mesleki yaralanma eğilimi incelemiş ve genellikle bu kazaların düşme, çarpma ve malzeme taşıma kaynaklı olduğunu ortaya koymuştur. Çalışmalarında, 2008-2018 yılları arasında Hong Kong çalışma departmanının yıllık raporları değerlendirilerek, her bir kaza türünü değerlendirmek için insidans ve ölüm oranlarının istatistiksel analizini yapmıştır (Shafique ve Rafiq, 2019). Cheng vd., Taywan'da küçük inşaat işletmelerindeki iş kazalarının karakteristik özelliklerini inceleyerek, bu işletmelerde kazaların genellikle yetersiz güvenlik önlemleri, iş gücü eğitimsizliği ve düşük kaynaklara bağlı olarak daha sık meydana ortaya koymuştur. Veri olarak 2000- 2007 yılları arasında Tayvan Merkezi Hükümeti Çalışma İşleri Konseyi tarafından yayınlanan iş kazaları kullanılmıştır (Cheng, Leu, Lin ve Fan, 2010). Ayrıca sadece çok tehlikeli sektörler değil, ülkelerin resmi yıllık verileri iş kazalarının geleceği ile ilgili fikirler vermektedir. Bu bağlamda, Carnero ve Pedregal, çalışmasında, İspanya'daki iş kazalarını farklı şiddet seviyelerine göre modellemiş ve tahmin etmiştir. Araştırmacılar, kazaların frekansını ve şiddetini analiz etmek için bir zaman serisi analizi ve Poisson regresyon modeli kullanarak, kazaların daha ileri düzeydeki şiddetlerinin gelecekte nasıl değişebileceğini öngörmüşlerdir. Veri olarak 1998- 2009 yılları arasında İspanya devleti tarafından yayınlanan iş kazaları kullanılmıştır (Carnero ve Padregal, 2010). Kaza vakalarının miktarı ülkelerin gelişmişlik düzeyi ile ilişkilidir. Macedo ve Silva, araştırmalarında 1992-2001 yılları arasında işyerlerinde resmi olarak kayıtlı kazaları, çalışma

koşullarıyla ilişkilendirerek incelemiştir. Çalışmalarında, iş kazalarının insan hayatını büyük ölçüde etkilediğini ve bir ülkenin sosyal güvenlik sistemine de yüksek maliyetler getirdiğini (Macedo ve Silva, 2005) vurgulamıştır.

Türkiye de diğer birçok ülke gibi iş kazalarından kaynaklanan önemli sorunlarla boğuşmaktadır (Unsar, 2000). SGK tarafından yayınlanan resmi verilere göre, Türkiye'de yılda en az 1.500 işçi iş kazalarında hayatını kaybetmektedir (SGK, 2024). Özellikle ölümlü iş kazalarının en çok inşaat, madencilik ve taşımacılık sektörlerinde yaşandığını gösteren bu veriler, konuya farklı açılardan yaklaşılması gerektiğinin altını çizmektedir (Ceylan, 2022). Bu bağlamda, Erginel ve Toptancı İç Anadolu bölgesinde yer alan inşaat sektöründe 2005- 2015 yılları arasında gerçekleşen iş kazaları verilerini kullanarak, sektörel İSG performansı ile ilgili bir model ortaya koymuştur (Erginel ve Toptancı, 2017). Bayraktar ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir başka çalışmada, 2002-2015 yılları arasında SGK tarafından yayınlanan iş kazası verileri maden sektörü özelinde istatistiksel olarak incelenmiş ve bu sektörün kaza oranları diğer sektörlerle karşılaştırılmıştır (Bayraktar, 2018). Kandemir ve Şimşek çalışmalarında, iş kazaları sonucu oluşan geçici iş göremezlik sürelerinin cinsiyet, çalışılan ortam ve iş kazası türleri ile ilişkisini istatistiksel olarak analiz etmişlerdir. Araştırmada, çoklu regresyon analizi kullanarak bu faktörlerin kazaların ciddiyetini ve iş göremezlik sürelerini nasıl etkilediğini incelemişlerdir. Sonuçlar, kadın ve erkek işçilerin farklı iş kazası türleri ve çalışma koşullarına bağlı olarak farklı geçici iş göremezlik süreleri geçirdiklerini göstermektedir. (Kandemir ve Şimşek, 2019).

İş kazalarının sıklığı, yalnızca iş yerindeki güvenlik önlemleri veya organizasyonel faktörlerle değil, aynı zamanda çevresel ve mevsimsel değişkenlerle de doğrudan ilişkilidir (Liao, 2016). Çevresel koşullar, iş gücünün dinamikleri, çalışma saatleri ve çalışanların ruh hali gibi faktörler, kazaların meydana gelmesinde önemli bir rol oynamaktadır (Babovic, 2009). Bu bağlamda, Akboğa ve Baradan (2015) inşaat sektörü üzerinde gerçekleştirdikleri çalışmada, ölümlü kazaların karakteristik özelliklerini detaylı bir şekilde inceleyerek, kazaların çevresel faktörlerle olan ilişkisini ortaya koymuşlardır (Akboğa ve Baradan, 2015). Bunun yanısıra, iş kazalarının mevsimsel dalgalanmalardan

etkilediği açıkça görülmektedir. Hola ve arkadaşları, inşaat sektöründe iş kazaları ile günlük hava sıcaklığı değerleri arasındaki ilişkiyi, 1988-2019 yılları arasında 48 İspanya ilinden alınan veri ile yarı- Poisson zaman serisi regresyon modelleri kullanarak kapsamlı bir biçimde değerlendirmiştir (Hola vd., 2022). Bununla birlikte, soğuk hava koşullarının olduğu kış aylarında, çalışanların fiziksel performansı azalabilir ve bu durum kazaların artmasına neden olabilmektedir. Hassi ve arkadaşlarının maden sektöründe yaptıkları çalışmalarında, sıcaklık düştükçe ve soğuğa maruz kalma arttıkça kayma ve düşme yaralanma oranlarının yükseldiğini, özellikle 29°F (yaklaşık -1.67°C) ve altındaki sıcaklıklarda bu tür yaralanmaların yoğunlaştığını belirtmiştir (Hassi vd., 2000). Aynı şekilde, yaz aylarında, sıcaklık ve yüksek nem oranları, aşırı terleme ve yorgunluk gibi faktörlere yol açarak, iş kazalarının sıklığını arttırabilmektedir. Garriazzo ve arkadaşlarının İtalya'da inşaat sektöründe gerçekleştirdikleri ve 184.936 iş kazasını inceledikleri çalışmada, yüksek sıcaklıkların kazaların yaklaşık %21,6 oranında daha fazla meydana gelmesine yol açtığı görülmüştür. Bu sonuç, inşaat sektöründe sıcaklık arttıkça iş kazalarının arttığını açıkça ortaya koymuştur (Garriazzo vd., 2023). Mevsimsel etkileşimin iş kazalarına olan etkisi, daha çok inşaat, tarım ve dış mekân işlerinde çalışanlar için belirginleşmekte ve bu sektörlerde çalışanlar yılın farklı zamanlarına özgü çevresel zorluklarla karşılaştıkları için bu durum kazaların sıklığını etkileyebilmektedir (Vielma vd., 2024).

İş kazalarının çalışma süreleri içinde de belirli zaman dilimlerinde artış veya azalma eğilimleri gösterdiği birçok çalışma tarafından vurgulanmaktadır (Karadağ ve Kepekli, 2018). Ropponen ve arkadaşları, sağlık sektöründe yaptıkları çalışmada 1.626 kişi üzerinde iş kazalarının zaman dilimleri ve çalışma saatlerinin düzenine bağlı olarak farklılıklar gösterdiğini ortaya koymuşlardır. Çalışmaya göre, 11 saatten daha kısa bir sürede bir vardiyadan diğerine geçiş yapmanın, kazaların daha fazla görüldüğü bir düzen oluşturduğu belirtilmiştir (Ropponen vd., 2023).

Kazaların genellikle sabah saatlerinde arttığı ve çalışanların uykusuzluk, düşük dikkat ve erken saatlerde yüksek iş yükü gibi faktörlerden kaynaklandığı

gözlenmiştir. Hänecke ve arkadaşları iş kazalarının farklı çalışma saatlerine göre nasıl arttığını ve bu değişimin ne kadar belirgin olduğunu göstermek için yaptıkları çalışmalarında, Almanya' da 1.2 milyon iş kazası verisini inceleyerek, iş kazasının en çok yaşandığı saat diliminin mesainin yeni başladığı 06:00-08:00 olduğunu belirtmiştir.

Bu etmenlerin bir arada değerlendirilmesi, iş kazalarının önlenmesi ve yönetilmesi için daha kapsamlı ve etkili stratejilerin geliştirilmesine olanak tanımakla birlikte, iş yerindeki güvenlik önlemlerinin ve çalışma koşullarının bu tür faktörlere göre optimize edilmesi, kazaların azaltılmasına yönelik önemli bir adım olarak kabul edilmektedir.

2.3. İş Kazaları ve Öngörüleme Modelleri

İş kazaları insan vücut bütünlüğünü bozabilecek önemli bir sorundur. Ölüme, ciddi yaralanmaya ve uzuv kaybına neden olabilir. İş kazalarının, bireylerin fiziksel ve psikolojik sağlığı üzerinde olumsuz etkiler yarattığı açıktır. Aslında iş kazaları verileri, konuya çeşitli açılardan yaklaşmanın gerekliliğini vurgulamaktadır. İş kazalarının öngörülebilmesi hem İSG politikalarının geliştirilmesi hem de iş gücü verimliliğinin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, iş kazalarının dinamiklerini anlamak ve bu kazaları önlemek amacıyla çeşitli analiz ve öngörüleme yöntemleri geliştirilmiştir.

İş kazası verileri zamana bağlı bir yapı göstermekte ve zaman serisi analizinin gelecekteki olayları tahmin etmek için değerli bir araç olarak kullanılma potansiyelini ortaya koymaktadır. Bu doğrultuda Mani ve Goniewichz, gelişmiş varyans analizleri (ANOVA) kullanarak 2003-2023 yılları arasında Asya bölgesi için ulaşım felaketlerini değerlendirmiştir. Çalışmalarında zamana bağlı veri formunu kullanmışlar ve bölgedeki ulaşım kazalarının nedenlerini ve kaza sayısını azaltmak için uygulanan süreçlerin (yasalar, yönetmelikler, standartlar vb.) etkinliğini araştırmışlardır (Mani ve Goniewichz, 2023). Bir başka çalışmada, Zhou, Ding ve diğerleri Wuhan kentindeki metro inşaatında meydana gelen ramak kala kaza zaman serisini incelemiştir. Bu veri seti, güvenlik yönetimi için

faydalı ipuçları sağlamak üzere karmaşık ağ teorisi kullanılarak analiz edilmiştir (Zhou vd., 2017). Literatürde zaman serilerinin analizinde birçok istatistiksel yöntem kullanılmaktadır. Bu bağlamda, Otomatik Regresif Bütünleşik Hareketli Ortalama (ARIMA) modeli, özellikle yeterli veri olduğunda ve kısa dönem için tahmin amaçlandığında en sık tercih edilen modeldir (Shumway ve Stoffer, 2017). Bu model Otomatik Regresif (AR) modelinin genişletilmiş bir versiyonudur (Jenkins ve Box, 1976). Rajaprasad, Hindistan fabrikalarındaki ölümcül kazaları tahmin etmek için ARIMA modelini kullanmıştır. Kurulan modellerin uygunluğunu değerlendirmek için çeşitli tanısal testler yapılmıştır. Bulgular, ARIMA (0, 0, 1) modelinin ölümcül yaralanmaları tahmin etmek için uygun olduğunu göstermektedir. Ölümcül kazaların sayısına ilişkin tahminler 2014-2019 yılları arasındaki dönem için yapılmıştır (Rajaprasad, 2018). Bir diğer çalışmada, Melchior ve arkadaşları tarafından yapılmıştır. Bu çalışma, Brezilya'daki iş kazaları sonucu ölüm oranlarını öngörmek için autoregresif hareketli ortalama (ARMA) modelini kullanmıştır (Melchior, 2021). Bu tür istatistiksel modeller, iş kazalarının öngörülmesinde belirli bir bölge ya da sektöre özgü istatistiksel verilerin etkin bir şekilde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Benzer şekilde, Klimova vd., iş kazalarının öngörülmesi ve yönetimi için bir bilgi sistemi önererek, iş kazalarının risklerini azaltmaya yönelik sistematik bir yaklaşım geliştirmiştir. Çalışmada geliştirilen bilgi sistemi, iş kazalarının tahmin edilmesinde kullanılan veri setleri ile iş yerindeki potansiyel tehlikeleri erken tespit edebilmek için analizler yapmıştır (Klimova vd., 2019). Farklı bir çalışmada Verma, Dhalmahapatra ve Maiti, bir çelik fabrikasındaki birimlerin İSG performansını değerlendirmek için ARIMA yöntemini kullanmıştır. Yaralanmalar, maddi hasar ve ramak kala kazalardaki eğilimleri inceleyerek 45 aylık olay verilerinin analizini yapmışlardır. Çalışma, çelik fabrikasının güvenlik uygulamalarındaki iyileştirme alanlarını belirlemeyi amaçlamıştır (Verma vd., 2023). Benzer şekilde Malysa ise Polonya'daki çelik endüstrisi üzerinde yaptığı bir çalışma ile iş sağlığı ve güvenliği alanındaki iyileştirmelerin etkinliğini artırmak için öngörüleme yöntemlerinin nasıl kullanılabileceğini incelemiştir. Bu çalışma, iş kazalarının öngörülmesinde kullanılan tahminsel analizlerin, belirli bir endüstri için ne kadar kritik olduğunu ortaya koymuştur (Malysa, 2022). Bu bağlamda, çelik endüstrisi gibi yüksek riskli

sektörlerde, iş kazalarının doğru bir şekilde tahmin edilmesi, doğru önlemlerin zamanında alınmasını sağlarken, kazaların minimize edilmesine yardımcı olabileceği ifade edilmektedir. Lee ve arkadaşları, inşaat sektöründeki iş kazalarının öngörülmesine yönelik bir çalışmada, veri ön işleme ve kazaların tahmin edilmesinde kullanılan modelleri incelemişlerdir. İnşaat sektörü gibi yüksek tehlikeli sektörlere özgü iş kazalarının öngörülmesinde veri analitiği ve makine öğrenmesi yöntemlerinin kullanımını vurgulamışlardır (Lee, 2020).

Bu bağlamda çok disiplinli teorileri incelemek ve iş kazaları verileri üzerinde uygulamak kazaların nedenleri ve iyileştirme çalışmalarına yeni yaklaşımlar sunmaktadır. Ayrıca, bu alandaki araştırmalar, iş kazalarının önlenmesinde daha etkili stratejiler geliştirilmesine yardımcı olmaktadır. Farklı sektörlerde özgü yöntemlerin ve sistemlerin entegrasyonu, iş sağlığı ve güvenliğini iyileştirmek için gelecekteki çalışmaların temel odak noktalarından biri olmaktadır.

2.4. İş Kazaları ve Nüfus Dinamiği İlişkisi

Doğrusal olmayan dinamikler (NDS) teorisi, karmaşık sistemlerin zaman içindeki evrimini anlamak için geniş bir disiplin yelpazesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fizik, biyoloji, ekoloji, fizyoloji, sosyoloji ve ekonomi gibi alanlar, doğası gereği karmaşık örüntülerin ve öngörülemeyen davranışların ortaya çıktığı sistemlerdir ve bu sistemlerin dinamiklerini analiz etmek için NDS'yi kullanmaktadırlar (Goldstein, 1996; Guastello, 2001; Strogatz, 2018). Bu disiplinler, yalnızca teorik değil, aynı zamanda uygulamalı araştırmalar yaparak, sistemlerin davranışlarını anlamak, önemli fenomenleri tahmin etmek ve bu dinamiklerin altında yatan temel mekanizmaları açıklamak için sayısal simülasyonlardan ve matematiksel modellere dayalı analizlerden yararlanır.

Nüfus dinamikleri, karmaşık doğrusal olmayan etkileşimler ve geri besleme döngüleri içerdiği için, araştırmacılar için önemli bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Malthus tarafından geliştirilen "Malthus büyüme modeli", nüfus artışını zamanla sürekli bir şekilde modellemeyi amaçlamış ve nüfusun sınırsız bir şekilde büyümesini öngörmüştür (Malthus, 1872). Ancak bu modelin

sınırlamaları olduğu, çünkü çevresel kaynakların sınırlı olduğu ve doğal dengenin etkisiyle nüfus artışının sınırlanacağı anlaşılmıştır. Bu noktada, Verhulst tarafından geliştirilen lojistik büyüme modeli, daha gerçekçi bir nüfus artış modeli sunmuştur (Verhulst, 1845). Lojistik modelde, nüfus artışı, çevresel faktörlerin etkisiyle sınırlanır ve dengeye doğru evrimleşir. Bu tür modellerin yanı sıra, av-avcı ilişkilerini açıklamak amacıyla Lotka-Volterra denklemleri geliştirilmiştir (Lotka, 1910). Bu denklemler, ekosistemlerdeki türler arasındaki etkileşimleri ve dengelerini incelemek için kullanılır. Lotka-Volterra denklemleri, popülasyonlar arasındaki etkileşimlerin doğrusal olmayan bir biçimde nasıl geliştiğini açıklar. Zamanla, bu denklemlerin kaotik davranışlar sergileyebileceği, özellikle de serbestlik derecesinin üç veya daha fazla olduğu durumlarda, sistemlerin tahmin edilmesi zor hale geldiği gözlemlenmiştir (Tang ve Chen, 2002; Gakhar ve Naji, 2003).

Nüfus dinamiklerinin yanı sıra, bulaşıcı hastalıkların yayılımı da doğrusal olmayan dinamik yöntemler ile modellenmektedir. Kermack ve McKendrick tarafından geliştirilen SIR modeli, bulaşıcı hastalıkların evrimini anlamak için sıklıkla kullanılan temel bir modeldir (Kermack ve McKendrick, 1927). SIR modelinde, bireyler üç kategoride incelenir: Duyarlı (S), Enfekte (I) ve İyileşen (R). Bu model, hastalığın yayılma hızını ve bunun popülasyon üzerindeki etkilerini tahmin etmek için güçlü bir araçtır. SIR modelinin doğrusal olmayan doğası, enfeksiyon oranlarının, iyileşme oranlarının ve bulaşıcılığın zamanla değişebileceğini ve birden fazla faktörün etkisiyle bu süreçlerin daha karmaşık hale gelebileceğini göstermektedir.

SIR modelinin, tüberküloz, HIV, SARS, Covid-19 gibi önemli bulaşıcı hastalıkların yayılımını modellemek için başarılı bir şekilde uygulandığı görülmüştür (Whang, Choi ve Jung, 2011; Sultanoğlu, Saad, Şanlıdağ, Hincal, Sayan ve Süer, 2022; Dos Santos, Almeida ve De Moura, 2021; Calafiore, Novara ve Possieri, 2020). Bu tür bulaşıcı hastalık modelleri, yalnızca hastalıkların yayılma dinamiklerini anlamak için değil, aynı zamanda kamu sağlığı müdahalelerinin etkinliğini değerlendirmek için de kullanılmaktadır. Covid-19 pandemisi sırasında, SIR tabanlı modeller, hükümetlerin aldığı sosyal mesafe, maske takma ve aşılama

yönelik tedbirlerin ne kadar etkili olacağını tahmin etmek için geniş çapta kullanılmıştır. Bu tür simülasyonlar, sağlık sistemlerinin kapasitesini planlamak ve hastalık yayılımını kontrol altına almak için kritik bilgiler sunmaktadır. İş kazaları verileri de tıpkı salgın hastalık verileri gibi nüfus dinamiği özelliği taşımaktadır. Guastello, doğrusal olmayan dinamiklerin iş kazalarını anlamada nasıl önemli bir rol oynadığını, özellikle çekiciler, çattanmalar, kaos ve öz-organizasyon gibi kavramlarla açıklayarak, iş kazalarının deterministik süreçlerle nasıl şekillendiğini ortaya koymuştur. Bu yaklaşım ile, iş kazalarının öngörülemeyen ve karmaşık yapısını daha iyi kavramamıza yardımcı olmayı hedeflemiştir. (Guastello, 2003). Bununla birlikte, iş kazalarının modellenmesi ve tahmin edilmesine yönelik çeşitli istatistiksel çalışmalar bulunsa da literatürde iş kazası verilerini doğrusal olmayan dinamiklerle modellemeye yönelik bir araştırma henüz yapılmamıştır.

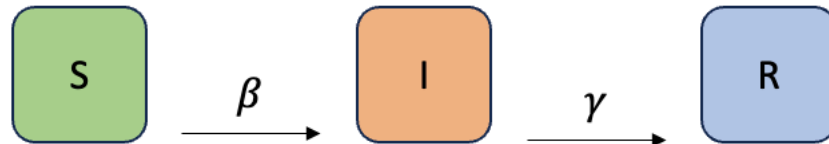
Bu tez çalışmasında, iş kazaları dinamiğini tanımlamak için nüfus dinamiği ve SIR modeline bağlı yeni bir model önerilmiştir. Önerilen model, iş kazalarının İngilizce karşılığı olan 'occupational accident' teriminin baş harfleri (OA) kullanılarak 'OA model' olarak isimlendirilmiştir. 2013-2020 yılları arasında Türkiye' de SGK tarafından aylık olarak yayınlanan resmi iş kazası ve sigortalı sayıları verileri modelde kullanılmıştır. Modelin numerik çözümleri için, Runge-Kutta algoritması kullanılmıştır. İş kazalarının dinamiğini modellemek için on parametre değeri tanımlanmıştır. Parametre değerlerinin dört tanesi gerçek verilere uydurularak bulunmuş olup, kalan parametre değerleri ise SGK ve TÜİK tarafından yayınlanan resmi verilerden hesaplanmıştır. Reel ve sentetik olarak üretilmiş veriler arasındaki fark, Normalleştirilmiş Ortalama Kare Hata (NMSE) yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. OA model için kararlılık analizi ve popülasyon çoğalma sayısı hesaplatılmıştır. Çalışmanın bir diğer bölümünde ise, iş kazası geçiren kişilerin işe başlamadan önce yeniden İSG eğitimi almaları gerekliliğinin etkisi OA modele parametre olarak eklenerek modifiye edilmiş yeni bir OA model ortaya konulmuştur. Tez çalışmasında son olarak, ortaya atılan OA model, çok değişkenli zaman serileri tahminleri yöntemleri (Dışsal girdili otoregresif hareketli ortalama (ARMAX), Doğrusal olmayan dışsal girdili otoregresif (NLARX)) ile kıyaslanmıştır.

3. MATERYAL VE METOT

3.1. Epidemiyolojide Kompartıman Modelleri

Bernoulli'nin 1760 yılında çiçek hastalığı için geliştirdiği ilk dinamik modelden bu yana, epidemiyolojide matematiksel modellemenin köklü ve saygın bir geçmişi vardır (Bernoulli, 1760). Özellikle, bulaşıcı hastalıkların yayılmasını matematiksel olarak modellemede kompartıman modelleri yaygın olarak kullanılmaktadır. (Brauer, 2012, Siengenfeld vd., 2022). Bu modeller, nüfusu tipik olarak bölmelere ayırır ve zaman içinde bireylerin bölmeler arasındaki geçişlerin analiz ederek, araştırmacıların kontrol stratejilerini simüle etmelerine olanak tanır (Anderson ve May, 1991). Bu sayede, hastalığın ilerlemesinin farklı aşmalarına göre araştırmacıların enfeksiyon oranları, iyileşme oranları ve müdahalelerin etkileri gibi dinamikleri analiz ederek hastalığın geleceği ile ilgili bilgi verir (Akpınar, 2012). Her biri benzersiz özelliklere ve uygulamalara sahip çeşitli kompartıman modelleri mevcuttur.

SIR modeli, zaman içerisinde kapalı bir popülasyonda kişilere bulaşan hastalıkların yayılmasını tanımlamak için kullanılan epidemiyolojik kompartıman modellerindendir (Weiss, 2013). Model popülasyonu üç bölüme ayırır ve enfekte olmayan ancak enfekte olabilen bireyleri Duyarlı (S) ile, enfekte olan ve hastalığı duyarlı bireylere bulaştırabilen bireyleri ise Enfekte (I) ile ve son olarak hastalıktan kurtulmuş ve bağışıklığı olduğu varsayılan bireyleri ise İyileşmiş (R) ile tanımlamaktadır (Kermarck ve MCKendrick, 1927).



şekil 3.1. SIR modelin sistematik diyagramı

Şekil 3.1' de bölümler arası ilişkiyi tanımlayan parametreler, β bulaşma oranı, γ ise birim zamanda iyileşen enfekte bireylerin oranı yani iyileşme oranı olarak tanımlanır. Bölümler arası geçişler ok ile ifade edilirken, okun ucu işaret ettiği bölüme pozitif katkı vermektedir. Modelde, toplam popülasyon N olarak ifade edilir. $N = S + I + R$ hastalık, duyarlı ve enfekte bireyler arasındaki temas yoluyla yayılmakta ve iyileşen bireyler bağışıklık kazanarak ve duyarlı gruba geri dönmemektedir. SIR modeli aşağıdaki sıradan diferansiyel denklemler (ODE' ler) kümesi tarafından yönetilmektedir (Denklemler 3.1) (Kermarck ve MCKendrick, 1927).

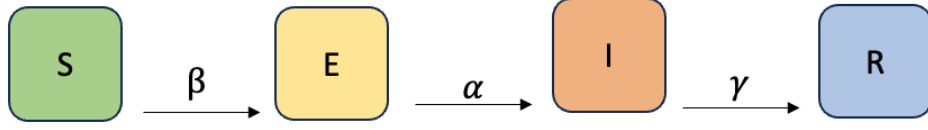
$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI \quad (3.1a)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I \quad (3.1b)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I \quad (3.1c)$$

Denklemler 3.1a, duyarlı bireylerin enfekte olma oranını, 3.1b yeni enfeksiyonlar ve iyileşmeyi ve 3.1c ise enfekte nüfusun hastalıktan kurtuldukça iyileşen nüfusa dönüşmesini tanımlamaktadır.

SEIR modeli ise, SIR modelini temel alarak geliştirilen bir kompartıman modelidir (Yang ve Hsu, 2012). Özellikle hasta olmuş ancak henüz bulaştırıcı olmayan bireyleri ekleyerek SIR modeline yeni bir bakış açısı sunmuştur (Wang, Tao ve Song, 2009). Bu model, bulaşıcı hastalıkların yayılımını incelerken nüfusu dört bölümde ele alır. (Berger, Herkenhoff ve Mongey, 2020). Hastalık yayıldıkça, duyarlı birey (S), önce hastalığı yaymadığı dönem olan maruz kalan (E) popülasyona daha sonra ise hastalığı bulaştırdığı enfekte (I) popülasyona ve en sonunda ise iyileşen (R) popülasyona doğru hareket eder. Hastalığın yayılımını gösteren sistematik diyagram Şekil 3.2' de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. SEIR modelin sistematik diyagramı

Bölümler arasındaki ilişki matematiksel olarak Denklem 3.2 kümesi ile ifade edilebilir (Cuesta-Herrera vd., 2022; Feng, 2007):

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI \quad (3.2a)$$

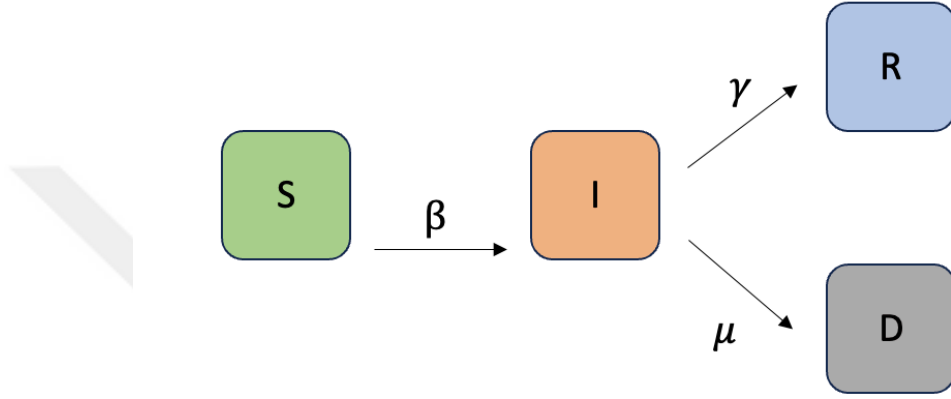
$$\frac{dE}{dt} = \beta SI - \alpha E \quad (3.2b)$$

$$\frac{dI}{dt} = \alpha E - \gamma I \quad (3.2c)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I \quad (3.2d)$$

Denklem 3.2a, duyarlı bireylerin (S) hastalığa maruz kalma oranını temsil eder. β parametresi, hastalığın enfekte bireylerden (I) duyarlı bireylere (S) ne kadar etkili bir şekilde yayıldığını gösteren bulaşma oranıdır. SI çarpımı ise enfeksiyon olasılığının hem duyarlı birey sayısına hem de bulaşıcı birey sayısına bağlı olduğunu yansıtmaktadır. Denklem 3.2b' de E, maruz kalmış ancak henüz bulaşıcı olmayan nüfusu temsil etmektedir. βSI , yeni maruziyetleri açıklarken, αE ise maruz kalan bireylerin bulaşıcı duruma geçiş hızını temsil eder. Parametre α , maruz kalan bireylerin bulaşıcı hale gelme oranıdır. Denklem 3.2c ise bulaşıcı bireylerin nasıl iyileştiğini açıklamaktadır. αE , maruz kalınan bölümden geçiş yapan yeni enfeksiyonları gösterirken, γI , enfeksiyondan iyileşmeyi ifade eder. Burada, γ iyileşme oranıdır. Son olarak, denklem 3.2d, bulaşıcı bireyler hastalıktan kurtuldukça iyileşen bireylerin arttığını göstermektedir. Parametre γ doğrudan enfekte bireylerin ne kadar hızlı iyileştiğiyle ilgilidir (Hou ve Bidkhor, 2024).

SIRD model, SIR modelin ölen nüfusu (D) tanımlandığı bölüm içeren bir versiyonudur. Özellikle, ölüm oranlarına sahip ciddi bulaşıcı hastalıkların analiz edildiği, basit bir kompartıman modelidir (Fernandez-Villaverde ve Jones, 2022). SIRD modeli, nüfusu Duyarlı (S), Enfekte (I), İyileşmiş (R) ve Ölen (D) olmak üzere 4 bölümde ayırır (Nie, Jiang ve Feng, 2023). Bölümler arası ilişki Şekil 3.3' te verilmiştir.



Şekil 3.3. SIRD modelin sistematik diyagramı

Modelde, S nüfusu, hastalığı bulaştırdığı enfekte I nüfusuna, I nüfusu ise iyileşen R nüfusuna veya ölen D nüfusuna doğru hareket eder. Burada β bulaşma oranını, γ iyileşme oranını ve μ ise hastalık kaynaklı ölüm oranını ifade etmektedir (Sebbagh ve Kechida, 2022). Model, her bir kompartımanın zaman içindeki değişim oranlarını temsil eden bir dizi adi diferansiyel denklem kümesi (Denklem 3.3) tarafından yönetilmektedir (Schlickeiser ve Kröger, 2024).

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI \quad (3.3a)$$

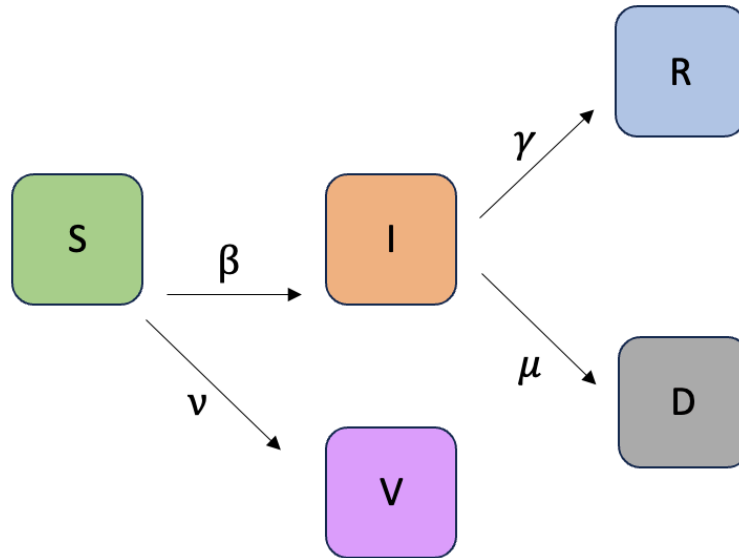
$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I - \mu I \quad (3.3b)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I \quad (3.3c)$$

$$\frac{dD}{dt} = \mu I \quad (3.3d)$$

Denklem 3.3a, S nüfusunun, bulaşıcı bireylere temas ettiklerinde I nüfusuna nasıl dönüştüklerini açıklamaktadır. Denklem 3.3b ise, S nüfusundan kaynaklanan yeni enfeksiyonları dikkate alır ve I nüfusuna geçiş yapan bireylerin iki sonucunu (iyileşen veya ölen) göstermektedir. Denklem 3.3c, I nüfusun hastalıktan kurtuldukça R nüfusuna dönüşmesini ifade etmektedir. Son olarak, denklem 3.3d ise I nüfusun hastalık sonucu D nüfusuna geçişini göstermektedir (Bailey, 1975).

Son olarak, SIRVD modeli ise, nüfusu Duyarlı (S), Enfekte (I), İyileşen (R), Aşılanan (V) ve Ölen (D) bireyler olarak bölümlere ayırır (Omae vd., 2022). Bu model, klasik SIR modeline aşılanan ve ölen bireyleri de ekleyerek geliştirilmiştir ve hastalığın dinamiklerini daha kapsamlı bir şekilde anlamamıza olanak tanır (Liao vd., 2021).



Şekil 3.4. SIRVD modelin sistematik diyagramı

Modelde, S nüfusu, hastalığı bulaştırdığı enfekte I nüfusuna ve hastalığın bulaşmayacağı aşılı V nüfusa, I nüfusu ise iyileşen R nüfusuna veya ölen D nüfusuna doğru hareket eder. Burada β bulaşma oranını, γ iyileşme oranını, μ ölüm oranını ve ν ise aşılama oranını ifade etmektedir (Gupta, 2023). Bölümler arası ilişki bir dizi diferansiyel denklem kümesi ile Denklem 3.4' te ifade edilmektedir.

$$\frac{dS}{dt} = -\beta SI - \nu V \quad (3.4a)$$

$$\frac{dI}{dt} = \beta SI - \gamma I - \mu I \quad (3.4b)$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma I \quad (3.4c)$$

$$\frac{dV}{dt} = \nu S \quad (3.4d)$$

$$\frac{dD}{dt} = \mu I \quad (3.4e)$$

Denklem 3.4a, S nüfusunun, bulaşıcı bireylere temas ettiklerinde I nüfusuna ve hastalığın bulaşmayacağı bağışık V nüfusuna dönüşümünü açıklamaktadır. Denklem 3.4b' de, hastalığın bulaştığı enfekte I nüfus için iyileşme ve ölüm ilişkisi ifade edilmektedir. Denklem 3.4c, 3.4d ve 3.4e sırasıyla I nüfusun iyileşmesi ile R nüfusuna, duyarlı nüfusun aşılmanması ile V nüfusuna, I nüfusunun ölmesi ile D nüfusun dönüşmesini ifade etmektedir (Schlickeiser ve Kröger, 2024).

Bu bağlamda, kompartıman modelleri temel olarak bulaşıcı hastalıkların dinamiklerini anlamak için hastalığın bulaşmasını, maruz kalma sürelerini, ölüm oranlarını ve aşılmanmanın etkilerini incelemektedir. Bu modellemeler sayesinde, halk sağlığı için salgınlar daha iyi tahmin edilebilir ve uzmanlar ve politika yapıcılar tarafından müdahale stratejileri geliştirilebilir.

3.2. Zaman Serisi Analizleri

Zaman serisi analizleri, ilk istatistiksel modellerden günümüzün popüler konularından makine öğrenimi yaklaşımlarına kadar önemli ölçüde gelişmektedir.

Zaman serisi analizi, belirli zaman aralıklarında toplanan veya kaydedilen verileri analiz etmeye odaklanan, araştırmacıların ve analistlerin zaman içindeki eğilimleri, kalıpları ve mevsimsel değişimleri belirlemelerine olanak tanıyan istatistiksel bir tekniktir (Akgül, 1994). Bu analizler, geçmiş verilere dayanarak gelecekteki değerlerin tahmin edilmesini sağladığından ekonomi, finans, çevre bilimi ve mühendislik dahil olmak üzere çeşitli alanlarda çok önem görmektedir

(Oğul, 2022., Çiftçi ve Yıldız, 2015., Turgut ve Temiz, 2015). Bu bağlamda, Yule, özellikle otoregresif (AR) modeller üzerine yaptığı çalışmalarla zaman serisi analizine önemli katkılarda bulunmuş ve bu alandaki modern istatistiksel çalışmalara temel oluşturmaktadır (Yule, 1927).

Bir diğer çalışmada, Box ve Jenkins, zaman serisi verilerini analiz etmek için özellikle kısa vadeli tahminlemelerde kullanışlı bir istatistiksel yaklaşım ortaya koymaktadır (Box ve Jenkins, 1976). Bu yaklaşım, otoregresyon ve kısmi otoregresyon fonksiyonlarının incelenmesi ile ARIMA modelinin tanımlanmasıyla başlar (Wilson ve Armitage, 2012). Model tanımlandıktan sonra, parametreler maksimum olabilirlik tahmini (MLE) yöntemiyle tahmin edilir ve model, zaman serisinin dinamiklerini ne kadar iyi yakaladığını değerlendirmek amacıyla doğrulanmaktadır (Hyndman ve Athanasopoulos, 2018). Zaman serisi analizi için çok yönlü ve yaygın olarak benimsenen bir yöntem olan Box-Jenkins yöntemi, birçok modern tahmin tekniğinin temelini oluşturmaktadır (Shumway ve Stoffer, 2019).

Zaman serisi modellerinde basit ve yaygın kullanılan AR modeli, aynı değişkenin geçmiş verilerine dayanarak gelecekteki durumunu tahmin etmektedir (Liu, Kumar ve Palomar, 2019). AR modeli, p mertebesinde $AR(p)$ olarak gösterilir. Modelin formülasyonu aşağıdaki şekilde ifade edilmektedir (He ve Jin, 2008).

$$Y_t = \alpha + \sum_{i=1}^p \phi_i Y_{t-i} + e_t \quad (3.5)$$

Burada, Y_t , zaman serisinin t zamanındaki değerini, α sabit, ϕ her bir i gecikmesi için otoregresif katsayılarıdır. Y_{t-i} , serinin gecikmeli değerleri (yani, $Y_{t-1}, Y_{t-2}, \dots, Y_{t-p}$), e_t ise, t zamanındaki hata terimi olarak ifade edilir (Hamilton, 2020).

Otoregresif hareketli ortalama (ARMA) modeli ise hem AR hem de hareketli ortalama (MA) bileşenlerini birleştirir (Patterson, 2011). AR kısmı mevcut değer ile önceki değerleri arasındaki ilişkiyi yakalarken, MA kısmı geçmiş tahmin

hatalarının etkisinde yakalar (Chib ve Greenberg, 1994). ARMA modeli (p, q) mertebesindeki formülasyonu denklem 3.6' da ifade edilmektedir (Box, Jenkins vd., 2015).

$$Y_t = \alpha + \sum_{i=1}^p \phi_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^q \theta_j e_{t-j} + e_t \quad (3.6)$$

Burada, Y_t, Y_{t-i}, e_t ve e_{t-j} ARMA modelindeki değişkenlerdir. ARMA modelinde, hem geçmiş gözlemler (Y_t) hem de hata terimleri (e_t) kullanılarak daha gelişkin bir modelleme yapılır. Zaman serisinin karmaşık yapısını yakalayarak, daha doğru tahminler yapılabilir (Makridakis ve Hibon, 1997).

ARIMA modelinin ARMA modelinden farklılığı, durağan olmayan zaman serilerini ele alabilmesidir (Jadhav ve Chinnappa, 2017). Trendleri ve mevsimselliği ortadan kaldırarak durağan olmayan bir seriyi durağan bir seriye dönüştürmek için farklılaştırma (entegrasyon I ile gösterilir) kavramını ortaya koyar (Singh, Kumar ve Prabakaran, 2013). ARIMA modeli (p, d, q) matematiksel ifadesi denklem 3.7' de verilmektedir (Nihan ve Holmesland, 1980).

$$(1 - \sum_{i=1}^p \phi_i B^i)(1 - B)^d Y_t = \alpha + \sum_{j=1}^q \theta_j B^j e_t \quad (3.7)$$

Burada, B geri kaydırma operatörüdür (yani $B^k Y_t = Y_{t-k}$), d ise serinin kaç kere farklılandırılması gerektiğini belirtir (Fattah, Ezzine ve Aman, 2018). Bu farklılaştırma işlemi, durağan olmayan zaman serilerini modellemek için kullanılır. AR, MA ve fark alma (I) bileşenleri bir araya getirir ve çok çeşitli zaman serisi davranışlarını modelleyebilen güçlü bir araçtır (McGough ve Tsolacos, 1995).

ARMAX modeli, ARMA modelinin dışsal faktörleri (X) modelleme sürecine dahil eden versiyonudur (Prasad, Teja vd., 2023). Bu metodoloji, özellikle sistemin iç dinamiklerinin dış faktörlerden etkilendiği zaman serileri için kullanışlıdır (Marc, 2022). ARMAX modeli (p, q, r) genel formu şu şekilde ifade edilmektedir (Likothanassis ve Demiris, 1998).

$$Y_t = \alpha + \sum_{i=1}^p \beta_i Y_{t-i} + \sum_{j=0}^q \gamma_j e_{t-j} + \sum_{k=1}^r \delta_k X_{t-k} + e_t \quad (3.8)$$

Burada, X_{t-k} dışsal değişkenlerdir ve p, q ve r ise sırasıyla AR, MA ve X terimlerinin mertebeleridir (Akal, 2004). Model, geçmiş veriler ile birlikte dış değişkenleri dikkate alarak, karmaşık sistemler için daha güvenilir tahminler sağlamaktadır (Lütkepohl, 2005).

AR yöntemlerinin yanı sıra, özellikle karmaşık doğrusal olmayan sistemleri analiz etmek için ve çok az önsel bilgi mevcut olduğunda, yalnızca geçmiş girdi/çıkış verilerinin ilişkilerine dayanarak mevcut ve gelecekteki çıktıların nasıl olacağını tahmin eden kara kutu (Black-box) modelleri öne çıkmaktadır (Juditsky vd., 1995). Kara kutu modelleri, makine öğrenmesi, istatistiksel, fiziksel ve optimizasyon tabanlı olmak üzere farklı türlerde sınıflandırılabilir; bunlar arasında en yaygın olarak makine öğrenmesi tabanlı yapay sinir ağları (ANN), istatistiksel ve optimizasyon tabanlı Gauss süreçleri (GP) ile fiziksel sistemler için polinomial AR (PAR, ARX) yöntemleri kullanılmaktadır (Mjalli vd., 2007, Kocijan vd., 2004, Kielslich vd., 2018).

PAR, ARX modelleri, doğrusal olmayan özellikteki zaman serilerini modellemek için AR modelinden türetilmektedir (Christini vd., 1995). Özellikle mevcut değer ile geçmiş değerler arasındaki ilişki doğrusal olmadığında kullanılır ve verilerdeki daha karmaşık kalıpları yakalayarak zaman serisinin dinamiklerini daha iyi açıklamaya olanak tanır (Karakuş, Kuruoğlu ve Altinkaya, 2017).

Bu yöntemde, otoregresif terimler gecikmeli değerlerin polinom fonksiyonları ile değiştirilir. Örneğin, d dereceli bir polinom AR modeli şu şekilde ifade edilir (Kuruoğlu, 2002):

$$Y_t = \sum_{i=1}^p \beta_i Y_{t-i} + \sum_{j=1}^d \gamma_j Y_{t-j}^2 + \dots + \sum_{k=1}^d \delta_k Y_{t-k}^d + e_t \quad (3.9)$$

Burada, $\sum_{i=1}^p \beta_i Y_{t-i}$, geçmiş değerlerin doğrusal ilişkisini, $\sum_{j=1}^d \gamma_j Y_{t-j}^2 + \dots + \sum_{k=1}^d \delta_k Y_{t-k}^d + e_t$, ise geçmiş değerlerin kareli, küp veya daha yüksek dereceleri polinomial ilişkilerini içerir. Bu bileşenler doğrusal olmayan

etkileşimleri yakalamak için eklenmiş olup, doğrusal olmayan sistem modellemesinde büyük başarı ile kullanılan Volterra seri açılımına dayanmaktadır (Kuruoğlu, 2002., Koh ve Powers, 1985). Böylelikle, PAR modellerinin, literatürde zengin doğrusal olmayan dinamik davranışlar gösteren rüzgâr enerjisi üretilen yerlerde, kısa vadeli rüzgâr gücü tahmininde yaygın kullanıldığı dikkat çekmektedir (Duran vd., 2007).

Bir diğer yaklaşım olan GP modelleri, doğrusal olmayan dinamik sistemleri kara kutu çerçevesinde olasılıksal parametrik olmayan model türüdür (Kocijan vd., 2004). En basit haliyle GP modeli, çıktıyı doğrusal olmayan bir şekilde şu şekilde modeller (Erickson, Ankenman ve Sanchez, 2018):

$$y_i = f(x_i) + e_i \quad (3.10)$$

Burada, bir dizi gözlenmiş veri verildiğinde $\{x, y\}$, $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ tek boyutlu girdi, $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ ise tek boyutlu çıktı ve e_i ' de gauss süreci olarak ifade edilmektedir (Cruz ve Vaerenbergh, 2013). GP modeli, kriging olarak bilinen jeostatik alanında enterpolasyon için de kullanılır (Diggle, Tawn ve Moyeed, 1998). İstatistik ve makine öğrenimi topluluğunda GP, sınıflandırma, tahmin ve regresyon problemleri için yaygın olarak uygulanmaktadır (Gregorcic ve Lightbody, 2009).

ARMAX, Black Box ve GP metodolojileri, zaman serisi analizi ve sistem tanımlamada öne çıkan tekniklerdir ve her biri karmaşık dinamik sistemleri modellemek için benzersiz avantajlar sunar (Rasmussen ve Williams, 2006., Box vd., 2015).

3.3. Runge- Kutta Algoritması

Runge- Kutta yöntemi (RKM), adi diferansiyel denklemler (ODE) için hesaplama verimliliği ve doğruluk arasındaki dengeyi sağlayarak yaklaşık çözümler üreten iteratif tekniktir (Butcher ve Wanner, 1996). Bu yöntem, hava durumunun modellenmesi, iklim simülasyonları, nüfus dinamikleri, salgın hastalık

dinamikleri vb. kimya, elektrik ve elektronik vb. bilim ve mühendislik alanlarında geniş bir uygulama alanı bulmuştur (Mengaldo vd., 2018., Yang ve Isa, 2024., Side, Utami ve Pratama, 2018., Britz, 1988., Aryza vd., 2017). Bunun yanısıra, çeşitli bilim ve mühendislik disiplinlerinde başlangıç değer problemlerini çözmek için en yaygın kullanılan yöntemlerden biri haline gelmiştir (Zheng ve Zhang, 2017). Bir ODE için başlangıç değer probleminin genel formu şöyledir:

$$\frac{dy}{dt} = f(x, y), y(x_0) = y_0 \quad (3.11)$$

Burada, $f: R * R^m$ ve $y_0 \in R^m$ başlangıç vektör değerlerini ifade etmektedir. Adım boyutu h olan s -aşaması için açık Runge-Kutta yönteminin formülasyonu:

$$y_{n+1} = y_n + h \sum_{i=1}^s b_i k_i \quad (3.12)$$

Burada,

$$k_i = f(x_n + c_i h, y_n + \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} k_j), i = 1, 2, \dots, s \quad (3.13)$$

c_i ise şu şekilde tanımlanabilir:

$$c_i = \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \quad (3.14)$$

ve genel örtülü Runge- Kutta formülü için Butcher tablosu (Butcher, 1964) Çizelge 3.1' de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Genel örtülü Runge-Kutta tablosu

0					
c_2	a_{21}				
c_3	a_{31}	a_{32}			
\vdots	\vdots		\ddots		
c_s	a_{s1}	a_{s2}	\dots	$a_{s,s-1}$	
	b_1	b_2	\dots	b_{s-1}	b_s

3.4. Çalışmada Kullanılan Veri Özellikleri

Tez çalışmasında, 2013-2020 yılları arası aylık olarak yayınlanan iş kazası geçiren sigortalı sayısı verisi kullanılmak üzere seçilmiştir. Veri, 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu'nun yürürlüğe girdiği 2013 yılından itibaren başlatılmış ve bu sayede daha yüksek bir veri güvenilirliği sağlanmıştır. Çalışmanın bitiş noktası, 2020 olarak belirlenmiştir. Ayrıca, 2013 ve 2020 yılları arasındaki aylık iş kazaları verileri, küçük (minör) kazalar, büyük (majör) kazalar ve ölümlü kazalar arasında ayırım yapılarak aylık raporlar halinde kategorize edilmiştir. Bu sınıflandırmada, minör kazalar iş günü kaybının 3 gün ve altı olan ve ilk yardım gerektiren kazaları (A Popülasyonu), majör kazalar üç iş gününden fazla kayıpla sonuçlanan önemli kazaları (B Popülasyonu), ölümlü kazalar ise ölümlü sonuçlanan kazaları (Z Popülasyonu) ifade etmektedir. Ayrıca, ortalama 4a-Zorunlu sigortalı sayısı (N Popülasyon) sistemin evreni olarak seçilmiştir. Kaza geçirmeyen sigortalı sayısı (X Popülasyonu), N popülasyonundan toplam iş kazası sayısı çıkarılarak hesaplanmaktadır. Ayrıca, X, A, B ve Z popülasyonları kümülatif olarak 1/1000000 ölçekli olarak hesaplanmaktadır. Tez çalışmasında kullanılan popülasyonlar Çizelge 3.2' de verilmiştir.

Çizelge 3.2 Çalışmada kullanılan popülasyonlar (X, A, B, Z popülasyonları)

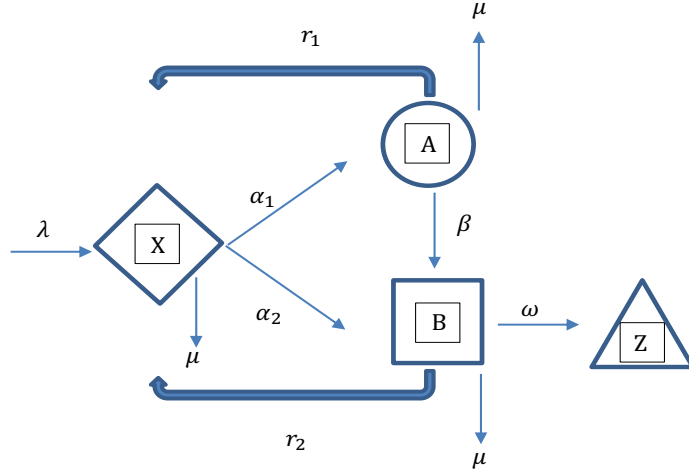
Yıl	Ay	X Popülasyonu	A Popülasyonu	B Popülasyonu	Z Popülasyonu
2013	1	13639019	7713	5874	108
	2	13626040	15201	11283	190
	3	13611126	23619	17695	274
	4	13595208	32834	24290	382
	5	13577267	43368	31594	485
	6	13559712	53546	38864	592
	7	13541173	64485	46335	721
	8	13525936	73605	52328	845
	9	13507930	84142	59657	985
	10	13493974	92624	65013	1103
	11	13476823	102475	72189	1227
	12	13459965	112447	78942	1360
2014	1	13443691	122129	85444	1450
	2	13427719	131621	91842	1532
	3	13409692	142462	98928	1632
	4	13391035	153793	106142	1744
	5	13370658	166414	113488	2154

	6	13350377	179060	121009	2268
	7	13331373	191522	127435	2384
	8	13310429	205507	134278	2500
	9	13290130	219447	140508	2629
	10	13274110	230600	145243	2761
	11	13256021	242830	150990	2873
	12	13236973	256066	156689	2986
2015	1	13219603	265724	164295	3092
	2	13202745	275107	171698	3164
	3	13183746	285972	179732	3264
	4	13164444	297163	187751	3356
	5	13143502	309456	196304	3452
	6	13122519	321671	204961	3563
	7	13101859	333898	213280	3677
	8	13078879	347334	222706	3795
	9	13059403	358987	230430	3894
	10	13037415	371853	239443	4003
	11	13015649	384797	248146	4122
	12	12994174	397618	256684	4238
2016	1	12974460	409644	264294	4316
	2	12953819	421908	272582	4405
	3	12929920	436291	281998	4505
	4	12904872	451775	291428	4639
	5	12879861	467163	300947	4743
	6	12853949	483162	310708	4895
	7	12833173	496847	317671	5023
	8	12804399	515933	327208	5174
	9	12784023	529317	334096	5278
	10	12758285	545467	343564	5398
	11	12731457	562604	353114	5539
	12	12706701	578665	361705	5643
2017	1	12682649	594065	370230	5770
	2	12659129	609066	378644	5875
	3	12630235	627610	388872	5997
	4	12602353	645696	398536	6129
	5	12573741	664177	408558	6238
	6	12546276	682030	418057	6351
	7	12509495	706242	430455	6522
	8	12474669	729661	441693	6691
	9	12445020	748975	451907	6812
	10	12410677	771230	463823	6984
	11	12377318	792998	475263	7135
	12	12345415	814286	485737	7276
2018	1	12313705	835310	496307	7392
	2	12282855	855869	506474	7516
	3	12246122	881068	517880	7644

	4	12210198	908306	526439	7771
	5	12171903	943512	529400	7899
	6	12137886	976049	530740	8039
	7	12090483	1021569	532464	8198
	8	12056184	1054482	533706	8342
	9	12019140	1089643	535443	8488
	10	11981033	1125469	537602	8610
	11	11945549	1158109	540331	8725
	12	11912889	1185647	545361	8817
2019	1	11882170	1207553	554079	8912
	2	11852971	1228063	562680	9000
	3	11819797	1251533	572310	9074
	4	11787035	1274928	581566	9185
	5	11752402	1299860	591171	9281
	6	11719704	1323421	600216	9373
	7	11677219	1354028	611986	9481
	8	11643190	1378822	621141	9561
	9	11603658	1406798	632594	9664
	10	11562306	1436581	644067	9760
	11	11524910	1463033	654907	9864
	12	11489279	1488439	665032	9964
2020	1	11456258	1511604	674811	10041
	2	11422462	1535360	684760	10132
	3	11391239	1556843	694412	10220
	4	11373348	1568929	700136	10301
	5	11355019	1581444	705874	10377
	6	11321802	1603846	716572	10494
	7	11284749	1629732	727608	10625
	8	11249372	1653755	738850	10737
	9	11210194	1680393	751274	10853
	10	11171356	1706842	763543	10973
	11	11138188	1729162	774276	11088
	12	11103786	1752475	785258	11195

3.5. İş Kazası Modeli (OA model)

Çalışmamızda Türkiye’ de iş kazalarına uğrayan popülasyon, dört değişken ile tanımlanmaktadır. Zaman bağılı olarak değişkenler arasındaki ilişki, Şekil 3.5 ile görselleştirilmiştir. Şekil 3.5’ te kullanılan baklava, daire, kare ve üçgen şekilleri her bir değişkeni temsil etmektedir. Değişkenler arasındaki ilişkileri tanımlayan parametreler oklarlar gösterilmiştir.



Şekil 3.5. İş kazası modelinin sistematik diyagramı.

λ popülasyona katılımı gösterir. X popülasyonu, A ve B popülasyonuna dönüşür. A popülasyonu, B popülasyonuna ve son olarak B popülasyonu, Z popülasyonuna dönüşür. Ok ucu değişkenlere doğru pozitif katkı anlamına gelmektedir. Benzer şekilde, ok ucunun diğer tarafı ise negatif katkı vermektedir. İş kazası dinamiği, zamana bağlı birinci dereceden birleştirilmiş adi diferansiyel denklemler oluşturularak incelenmiştir. Denklemler, Şekil 3.5' de sunulan diyagram yardımıyla oluşturulmuştur. OA modelinin denklem sistemi aşağıda verilmiştir (Denklem 3.15).

$$\frac{dX}{dt} = \lambda N_1 + r_1 A + r_2 B - \alpha_1 X A - \alpha_2 X B - \mu X \quad (3.15a)$$

$$\frac{dA}{dt} = \alpha_1 X A - (\mu + r_1 + \beta) A \quad (3.15b)$$

$$\frac{dB}{dt} = \alpha_2 X B + \beta A - (r_2 + \omega + \mu) B \quad (3.15c)$$

$$\frac{dZ}{dt} = \omega B \quad (3.15d)$$

Burada $X(t)$, $A(t)$, $B(t)$, $Z(t)$ kaza geçirmeyen kişi sayısı, 3 gün ve altı rapor alan kaza geçiren sigortalı sayısı (Minör kaza), 3 gün üzeri rapor alan kaza geçiren sigortalı sayısı (Major kaza) ve kaza sonucu ölen kişi sayısı olarak sıralanmaktadır. λ , μ , α_1 , α_2 , r_1 , r_2 , β , ω , N , N_1 parametre değerleri ise sırasıyla, istihdam oranı, doğal ölüm oranı, minör kaza sıklık oranı, majör kaza sıklık oranı, minör kaza iyileşme oranı, majör kaza iyileşme oranı, majör kaza ölüm oranı, ortalama zorunlu sigortalı sayısı, ortalama kaza geçirmeyen sigortalı sayısını

ifade etmektedir. Bütün değişkenler ve parametre değerleri izelge 3.3' de özetlenmektedir.

Çizelge 3.3 Parametre ve Değişkenlerin tanımı

Değişkenler	Tanımı
X	Kaza geçirmeyen sigortalı sayısı
A	3 gün ve altı rapor alan kaza geçiren sigortalı sayısı (Minör kaza)
B	3 gün üzeri rapor alan kaza geçiren sigortalı sayısı (Major kaza)
Z	Kaza sonucu ölen kişi sayısı
Parametre	Tanımı
λ	İstihdam oranı
μ	Doğal lm oranı
α_1	Minör kaza sıklık oranı
α_2	Majör kaza sıklık oranı
r_1	Minör kaza iyileşme oranı
r_2	Majör kaza iyileşme oranı
β	Minör kazanın majre dönüşüm oranı
μ	Doğal lm oranı
N	Ortalama zorunlu sigortalı sayısı
N_1	Ortalama kaza geçirmeyen sigortalı sayısı

Sistemin evreni olarak ortalama 4a-zorunlu sigortalı sayısı N seçilmiştir. X değişkeni, kümülatif olarak toplam kaza sayısının N 'den çıkarılmasıyla hesaplanır. Sistemin evreni $N(t) = X(t) + A(t) + B(t) + Z(t)$ olarak tanımlanır. Ayrıca X, A, B, Z değişkenleri 1/1000000 ölçekli ve kümülatif olarak hesaplanır.

λ ve μ parametreleri yıllık olarak Türkiye İstatistik Kurumu (TİİK) tarafından beyan edilirken, α_1 ve α_2 parametreleri aşağıdaki Denklem 3.16' da verilen SGK'nın yıllık iş kazası sıklık oranı (IR) ile hesaplanmaktadır.

$$\dot{IKSO} = \frac{IKS}{((PTEG*8)*225000)} \quad (3.16)$$

Burada İKS, iş kazası sayısını temsil eder ve PTEGS ise takvim yılı boyunca tüm sigortalıların toplam çalışma günüdür. 100 sigortalının yılda 50 hafta, haftada 45 saat çalıştığını varsayımı ile 225000 sayısı elde edilmektedir. Ayrıca 8 ise günlük

ortalama çalışma saatidir. λ , μ , α_1 ve α_2 parametreleri 2013-2020 yılları arasında açıklanan yıllık değerlerin ortalaması alınarak kullanılmıştır.

β , r_1 , r_2 , ve ω parametreleri MATLAB kütüphanesinden fminsearch komutu kullanılarak iş kazası verileri üzerinden hesaplanmıştır (Lagarias, Reeds, Wright & Wright 1998). Değişkenler için başlangıç koşulları $(X(0), A(0), B(0), Z(0)) = (13.639, 0.007713, 0.005874, 0.000108)$ ve parametreler için $(\beta, r_1, r_2, \omega) = (0.009, 0,001, 0,01, 0,04)$ olarak seçilmiştir. X, A, B, Z için başlangıç koşulları Ocak 2013 iş kazası verilerinden alınmıştır. Heinrich'in kaza piramidi oranı (300-yaralanmasız kaza, 29-küçük yaralanmalı kaza, 1-büyük yaralanmalı kaza), β ve ω parametreleri için başlangıç değerlerinin seçiminde etkilidir (Heinrich n.d.). Bunun yanı sıra, r_1 ve r_2 parametreleri, kazaların büyüklüğüne göre sınıflandırılmaktadır. r_1 , 3 gün veya daha kısa sürede rapor edilen küçük (minör) kazaları ifade ederken, r_2 parametresi, 3 günden daha uzun sürede rapor edilen büyük (major) kazaları ifade eder. Tüm parametreler 1/1000000 ölçeklidir. Parametreler Çizelge 3.4' te verilmiştir.

Çizelge 3.4. OA model parametre değerleri

Parametre	Değer
λ	0.0045
μ	0.0052
α_1	0.01338
α_2	0.00612
r_1	0.039
r_2	0.096
β	0.0098
ω	0.0011
N	13.64
N_1	12.55

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1 OA Model Kararlılık Analizi

İş kazası modelinde Z değişkeni sadece B değişkenine bağlıdır ve bu durumda Z değişkenin türevi sistemin geneline etki etmediğinden kararlılık analizinde ihmal edilmektedir. OA modelin vektör alanı f ile gösterilmektedir.

$$f = (\lambda N_1 + r_1 A + r_2 B - \alpha_1 X A - \alpha_2 X B - \mu X, \alpha_1 X A - (\mu + r_1 + \beta) A, \alpha_2 X B + \beta A - (\mu + r_2 + \omega) B) \quad (4.1)$$

OA modelinin vektör alanının kararlılığını sınıflandırmak için, alanın iraksaması kullanılmaktadır. $\nabla \cdot f = (-\alpha_1 A - \alpha_2 B - \mu + \alpha_1 X - (\mu + r_1 + \beta) + \alpha_2 X - (\mu + r_2 + \omega))$. Bununla birlikte, $\nabla \cdot f$ ifadesi, OA modelindeki parametre ve değişken değerleri yerine yazıldığında, sistemin her zaman pozitif çıktılar ürettiği ve bunun sonucunda sistemin konservatif olmadığı ifade edilmektedir.

OA modeli için denge noktaları sistemi sıfıra eşitleyen noktaları bularak hesaplanmaktadır. Bu doğrultuda, $x' = f(x)$ olmak üzere $f(x) = 0$ kullanılmaktadır. OA modelde tanımlanan parametre değerlerine ilişkin olarak denge noktaları aşağıda belirtilen Denklem 4.2' de gösterilmektedir.

$$X \rightarrow \frac{N_1 \lambda}{\mu}, A \rightarrow 0, B \rightarrow 0 \quad (4.2a)$$

$$X \rightarrow \frac{r_2 \omega + \mu}{\alpha_2}, A \rightarrow 0, B \rightarrow \frac{N_1 \alpha_2 \lambda - r_2 \mu - \omega \mu - \mu^2}{\alpha_2 (\omega + \mu)} \quad (4.2b)$$

$$\begin{aligned} X &\rightarrow \frac{r_1 + \beta + \mu}{\alpha_1}, \\ A &\rightarrow \frac{(r_2 \alpha_2 + \omega \alpha_1 - r_1 \alpha_2 - \alpha_2 \beta + \alpha_1 \mu - \alpha_2 \mu)(N_1 \alpha_1 \lambda - r_1 \mu - \beta \mu - \mu^2)}{\alpha_1 (\omega \alpha_1 \beta + r_2 \alpha_1 \mu + \omega \alpha_1 \mu - r_1 \alpha_2 \mu + \alpha_1 \beta \mu - \alpha_2 \beta \mu + \alpha_1 \mu^2 - \alpha_2 \mu^2)}, \\ B &\rightarrow \frac{N_1 \alpha_1 \beta \lambda - r_1 \beta \mu - \beta^2 \mu - \beta \mu^2}{\omega \alpha_1 \beta + r_2 \alpha_1 \mu + \omega \alpha_1 \mu - r_1 \alpha_2 \mu + \alpha_1 \beta \mu - \alpha_2 \beta \mu + \alpha_1 \mu^2 - \alpha_2 \mu^2} \end{aligned} \quad (4.2c)$$

Denklem 3.15 sistemi doğrusal olamayan özellikte olup ve OA model denge noktalarına bağlı olarak farklı dinamik davranışlar içermektedir. Denge

noktalarının kararlılığını belirlemek için sistemi Jacobian matris ile doğrusal hale getirmek gereklidir. Bu sayede, Jacobian matrisinin özdeğerleri ile OA modelinin denge noktaları etrafındaki davranışı bulunmaktadır. Özellikle özdeğerler, faz uzayındaki denge noktalarının yakınında ise OA modelinin dinamiği ile ilgili dinamiğin kaotik mi yoksa periyodik mi olduğu gibi önemli bilgiler vermektedir.

Jacobian matrisi, doğrusal olmayan problemleri çözmek ve sayısal algoritmalar için temel bir doğrusallaştırma yöntemidir. Denklem 3.15 sistemi için uygulanan Jacobian matris aşağıdaki gibi gösterilmektedir.

$$J = \begin{pmatrix} -A\alpha_1 - B\alpha_2 - \mu & r_1 - X\alpha_1 & r_2 - X\alpha_2 \\ A\alpha_1 & -r_1 + X\alpha_1 - \beta - \mu & 0 \\ B\alpha_2 & \beta & -r_2 - \omega + X\alpha_2 - \mu \end{pmatrix} \quad (4.3)$$

İş kazası modelinin denge noktaları ve Jacobian matris kullanılarak ($|J - \lambda I| = 0$) Denklem 3.15 sistemi için öz değerler ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) hesaplanmıştır. Denge noktalarına karşılık gelen öz değerler ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$) Çizelge 4.1' de verilmiştir.

Çizelge 4.1 OA model denge noktaları ve karşılık gelen öz değerler

Denge noktaları X^*, A^*, B^*	Öz değerler			Karakteri
	λ_1	$\lambda_2,$	λ_3	
$(10.8606, 0, 0)$	0.0343148	0.0211669	-0.0052	Eyer noktası
$(7.40196, 0, 2.85473)$	-0.015628	-0.0119618	-0.00704292	Düğüm
$(8.29596, -2.19186, 3.92597)$	$0.017609 + 0.i$	$-0.00601882 + 0.00438355i$	$-0.00601882 - 0.00438355i$	Spiral eyer noktası

Çizelge 4.1' e göre birinci denge noktasının özdeğerleri λ_1, λ_2 pozitif, λ_3 ise negatif ve gerçektir. Bu özellikler doğrultusunda birinci denge noktasının özdeğerlerinin karakteri eyer noktası (kararlı ve kararsız manifold düğümü) olarak ifade edilmektedir. İkinci denge noktasının özdeğerleri ise negatif ve gerçektir. Bu doğrultuda ikinci denge noktasının özdeğerlerinin karakteri düğüm olarak belirtilmektedir. Son denge noktası için λ_1 gerçektir, λ_2 ve λ_3 sanal sayılar ve λ_1 pozitif, λ_2 'ler gerçektir, sanal kısım negatif ve λ_3 'ün her iki kısmı da negatiftir. Böylece, son öz değerlerin

karakteri ise spiral eyer noktası olarak gösterilmektedir. Üç denge noktasının kararlılığını özetlemek gerekirse olarak, birinci denge noktası için kararlı-kararsız manifoldlar, ikinci denge noktası kararlı düğümler ve üçüncü denge noktası ise kararlı spiral eyer ve kararsız manifold olarak ifade edilmektedir.

4.1.1 OA modeli için kullanılan popülasyonun çoğaltım sayısı (R_0) hesaplaması

Literatürde, R_0 sayısını hesaplamak için, yeni nesil matris tabanlı, salgın eğrisi ve seri aralık (SI) tabanlı vb. yöntemler bulunmaktadır (Abudunaibi vd., 2023). Bu çalışmada R_0 hesaplamasında yeni nesil matris yöntemi kullanılmaktadır (Diekmann vd., 1990, Van den Driessche ve Watmough, 2002, Van den Driessche ve Watmough, 2008).

OA modelin doğrusal kararlılığının serbest denge noktaları (OFE), $s(F - V)$ Jacobian matrisi kullanılarak belirlenebilir, burada s matrisin maksimum reel kısmıdır. F ve V sırasıyla negatif olmayan ve tekil olmayan matrislerdir. R_0 , s ile ilişkilidir. OFE, OA modeli için $(X_0, 0, 0, 0)$ olarak bulunur. X_0 , X' in başlangıç değeridir. Denklem 4.3' de yer alan Jacobian matrisine OFE'ler yerine yazılırsa elde edilen Jacobian matrisi aşağıdaki gibidir.

$$J = \begin{bmatrix} -\beta - \mu - r_1 + \frac{\lambda N_1 \alpha_1}{\mu} & 0 \\ \beta & -\mu - \omega - r_2 + \frac{\lambda N_1 \alpha_2}{\mu} \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

Burada, $\frac{\lambda N_1}{\mu} = X_0$. OA modelin iş kazaları bölümleri A ve B popülasyonlarıdır. F ve V vektörleri için OFE matrisleri Hurwitz teoremi ile şu şekilde yazılabilir:

$$F = \begin{bmatrix} \alpha_1 X_0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 X_0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$V = \begin{bmatrix} \beta + \mu + r_1 & 0 \\ -\beta & \mu + \omega + r_2 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Yeni nesil matris aşağıdaki gibi bulunabilir,

$$FV^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\beta+\mu+r_1} & 0 \\ \frac{\beta}{(\beta+\mu+r_1)(\mu+\omega+r_2)} & \frac{1}{(\mu+\omega+r_2)} \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Yeni nesil matris iki adet öz değere sahiptir. Bu özdeğerler sırasıyla, $\lambda_1 = \frac{N_1\lambda_1}{\mu(\beta+\omega+r_1)}$ ve $\lambda_2 = \frac{N_1\lambda_2}{\mu(\mu+\omega+r_2)}$ şeklindedir. Çizelge 3.4' te yer alan parametre değerleri yerine yazıldığında özdeğerlerin değerleri, $\lambda_1 = 1.304919$ ve $\lambda_2 = 1.46726$ olarak bulunur. Özdeğerlerden büyük olan R_0 ' ı vermektedir.

$$R_0 = \frac{N_1\lambda_2}{\mu(\mu+\omega+r_2)} \quad (4.8)$$

$R_0 < 1$ olduğunda, iş kazası geçiren kişi sayısı monoton bir şekilde sıfıra düşer. Ancak eğer $R_0 > 1$ ise bu sayı artacaktır. Yapılan hesaplamalar sonucunda, baskın özdeğerin pozitif değere sahip olması OA modelinin kararsız olduğunu ifade etmektedir.

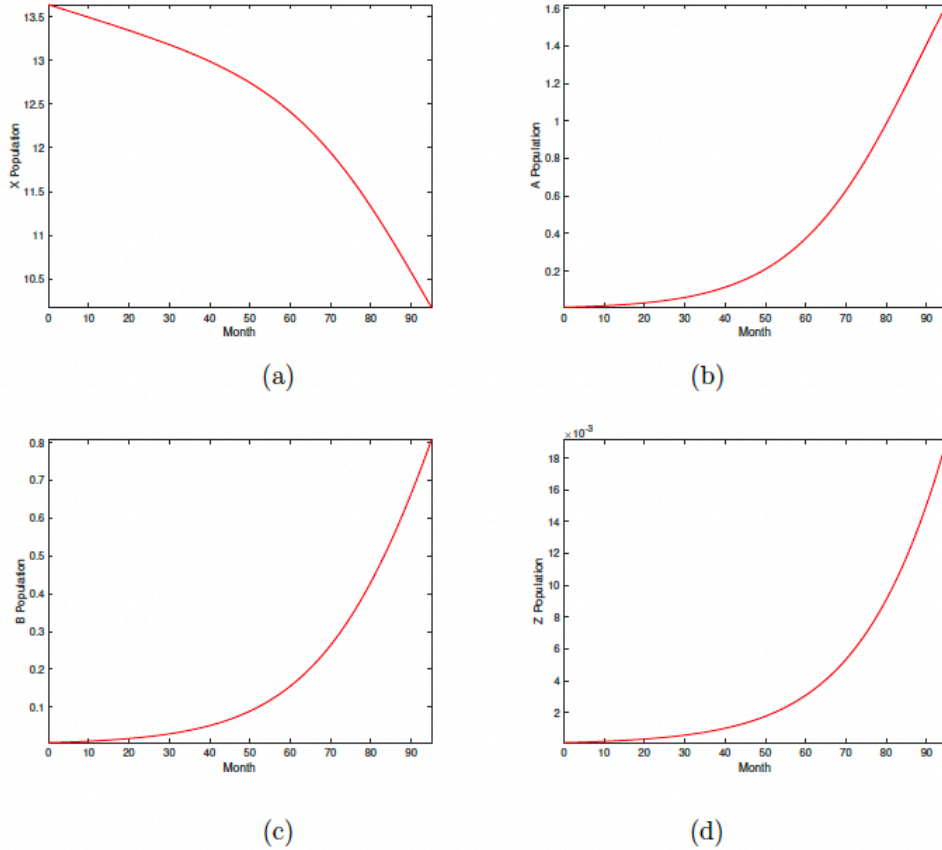
4.2. OA Modelin Sayısal Simülasyonu ve Sonucu

2013-2020 yılları arasında SGK tarafından sağlanan resmi iş kazası ve sigortalı sayıları verileri çalışmada kullanılmaktadır. 2013 yılı, Türkiye'de İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) Kanunu'nun yürürlüğe girmesi nedeniyle başlangıç yılı olarak seçilmiştir. Bu kanunun getirdiği değişiklikler ve iş kazalarının bildirim süreçlerinde yapılan düzenlemeler, verinin güvenilirliği açısından önemli bir rol oynamaktadır. Çalışmada kullanılan verilerin bitiş dönemi ise, çalışmaya başladığında en son yayımlanan veri yılı olan 2020 olarak belirlenmiştir. Bu doğrultuda, 2013 yılı başlangıç ve 2020 yılı bitiş yılı olarak seçilmiştir.

OA modeli, çiftli birinci dereceden doğrusal olmayan bir diferansiyel denklemdir. Doğrusal olmama nedeniyle kesin çözüm bulmak zordur. Bu nedenle, Denklem 3.15 sistemi OA modeli, Çizelge 3.4' teki parametreler kullanılarak Runge-Kutta

yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür ve Matlab ODE45 rutini kullanılmıştır (Dormand & Prince 1980, Shampine & Reichelt 1997).

Başlangıç koşulu olarak Ocak 2013 iş kazası verileri seçilmiştir. Denklem sistemi ayda bir zaman aralığında 96 adımda çözülmüştür. Sayısal sonuçlar Şekil 4.1' de verilmiştir.



Şekil 4.1 OA model sayısal sonuçlar, (a) Kaza geçirmeyen sigortalı sayısı, (b) Minör kaza geçiren sigortalı sayısı, (c) Majör kaza geçiren sigortalı sayısı, (d) Ölümlü kaza geçiren sigortalı sayısı

OA modelin hata hesabı için normalleştirilmiş ortalama kare hatası (NMSE) yöntemi kullanılır. NMSE yöntemi, gerçek verileri sayısal çözümle karşılaştırarak hatayı hesaplayan yöntemdir. Yöntem şu şekilde verilmiştir;

$$\frac{NMSE = \sum (g(x,y)) - f(x,y))^2}{\sum (f(x,y))^2} \quad (4.10)$$

Burada $g(x, y)$ ve $f(x, y)$ sırasıyla gerçek verileri ve sayısal çözümü temsil eder. OA modelinin hatası Çizelge 4.2' de verilmiştir.

Çizelge 4.2 OA model için X, A, B, Z değişkenleri için elde edilen NMSE değerleri

Değişken	Değer
X	3.9×10^{-6}
A	1.7×10^{-3}
B	2.8×10^{-3}
Z	2.6×10^{-3}

4.3. Modifiye OA Modelin Sayısal Simülasyonu ve Sonucu

Türkiye'de iş kazası geçiren her kişinin yeniden İSG eğitimi alması mevzuat gereği zorunludur. Bu bağlamda, yeni parametre eklenerek İSG yeniden eğitimin OA model dinamikleri üzerindeki etkisini belirlemek için değiştirilmiş bir OA modeli geliştirilmiştir. Değiştirilmiş OA modelinin Denklem 4.11 sistemi şu şekilde verilir:

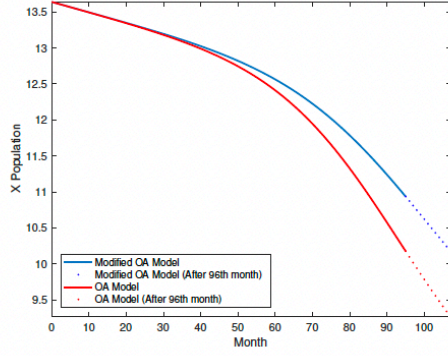
$$\frac{dX}{dt} = \lambda N_1 + (r_1 + u)A + (r_2 + u)B - \alpha_1 XA - \alpha_2 XB - \mu X \quad (4.11a)$$

$$\frac{dA}{dt} = \alpha_1 XA - (\mu + (r_1 + u) + \beta)A \quad (4.11b)$$

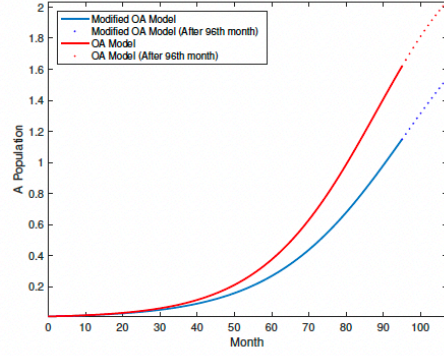
$$\frac{dB}{dt} = \alpha_2 XB + \beta A - ((r_2 + u) + \omega + \mu)B \quad (4.11c)$$

$$\frac{dZ}{dt} = \omega B - uZ \quad (4.11d)$$

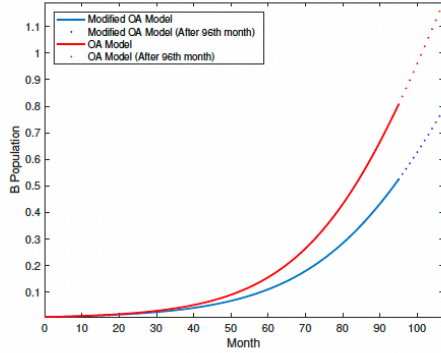
Burada u , İSG yeniden eğitim oranını temsil eder. u , yasal düzenlemelere göre r_1 ve r_2 parametrelerine eklendiğinde pozitif katkı nedeniyle pozitif işaretli iken Z değişkeni için mortalite nedeniyle negatiftir. u değeri 0.006 olarak hesaplanmıştır, çünkü kaza yapan kişilerin %60'ının İSG yeniden eğitim aldığı varsayılmaktadır. Modifiye OA modeli için Denklem 4.6, $u = 0.006$ olan Çizelge 3.4 parametreleri ve Matlab ODE45 rutini kullanılarak Runge-Kutta yöntemi ile sayısal olarak çözülmüştür. Her bir değişken için başlangıç koşulu Ocak 2013 iş kazası verilerinden seçilmiştir. Denklem sistemi birer aylık zaman aralığında 108 adımda çözülmüştür. Denklem 3.15 ve 4.11 sistemleri için sayısal sonuçlar Şekil 4.2'te verilmiştir.



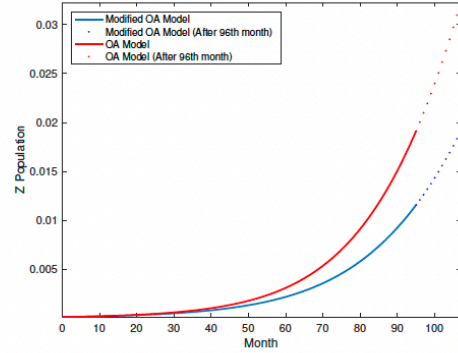
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.2 OA model ve Modifiye OA model sayısal sonuçlar, (a) Kaza geçirmeyen sigortalı sayısı, (b) Minör kaza geçiren sigortalı sayısı, (c) Majör kaza geçiren sigortalı sayısı, (d) Ölümlü kaza geçiren sigortalı sayısı

Şekil 4.2' de u parametresinin A, B ve Z popülasyonları üzerindeki azaltıcı etkisi gösterilmektedir. İki çizgi arasındaki fark 40. aydan sonra açılır. 96. aydan sonra daha da fark artar. OA modeli ile Modifiye OA modeli (96. Aydan sonra) arasındaki çıkarılmış sayısal sonuçlar Çizelge 4.3 'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 OA modeli ile modifiye OA modeli arasındaki çıkarılmış sayısal sonuçlar (96. Aydan sonra)(Ölçeklenmiş=1/1000000)

A popülasyonu	B popülasyonu	Z Popülasyonu
0.4774	0.2929	0.0080
0.4833	0.3031	0.0084
0.4884	0.3134	0.0088
0.4927	0.3237	0.0092
0.4962	0.3340	0.0096
0.4988	0.3443	0.0101
0.5005	0.3545	0.0106
0.5013	0.3647	0.0111
0.5012	0.3749	0.0116

0.5003	0.3850	0.0121
0.4985	0.3950	0.0126
0.4959	0.4048	0.0132
0.4925	0.4146	0.0138

Sayısal sonuçlar 108. ayda, A popülasyonunda %24, B popülasyonunda %33 ve Z popülasyonunda %40'lık azalma göstermektedir.

4.4. ARMAX, NLARX Modellerinin Sayısal Simülasyonu ve Sonuçları

Çalışmamızın bu bölümünde, ARMAX, NLARX doğrusal ve doğrusal olmayan özellikte olan otoregresif modellemeler kullanılarak zaman serileri için tahminleme yapılmış ve son olarak OA model ile kıyaslanmaktadır. Veri olarak, OA model içinde kullanılan Çizelge 3.2' de verilen 96 aylık veride yer alan X , A , B ve Z popülasyonları üzerinde ARMAX modeli kurularak, tahmin ve öngörü adımları gerçekleştirilmektedir. Öncelikle, X , A , B ve Z değerleri sisteme tanıtılarak, her bir popülasyonun çıktısı sırasıyla $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$ ve $y_4(t)$ olarak tanımlanmaktadır. Popülasyonların ilk altmış veri noktası ise eğitim seti (ze), geri kalan veriler ise test seti (zv) olarak ifade edilmektedir. Zaman serisinin olası eğilimi (detrend) çıkartılarak, döngüsel hareketleri ve kısa dönemli bileşenleri öğrenmesi sağlanmaktadır. ARMAX modelinin parametre değerlerinin belirlenmesi için (na, nb, nc) mertebeleri seçilmektedir. Burada, ARX modelin mertebesi (na - gecikme sayısı) ile belirlenir. na değerleri 1 ve 10' arası olup; eğitim ve test verileri üzerinden model için en uygun na_1 ve na_2 parametreleri belirlenir.

$y_1(t)$ ve $y_2(t)$ için mertebeler parametreleri $na = [2,1; 1,2]$, $nc = [2; 2]$ ve $y_3(t)$, $y_4(t)$ için ise $na = [2,1; 3,4]$, $nc = [2; 4]$ olarak belirtilmektedir. ARMAX modelinin (çoklu-girişli çıkışlı) genel formu Denklem (4.12)' de verilmektedir.

$$A(z)y(t) = -A_i(z)y_i(z) + C(z)e(t) \quad (4.12)$$

Burada $A(z)$ çıktıya ilişkin AR polinomudur. $-A_i(z)y_i(z)$ ise modeldeki çapraz etkileşimleri ifade etmektedir. $y_1(t)$ çıktısı, $y_2(t)$ çıktısı ile veya diğer çıktılar ile

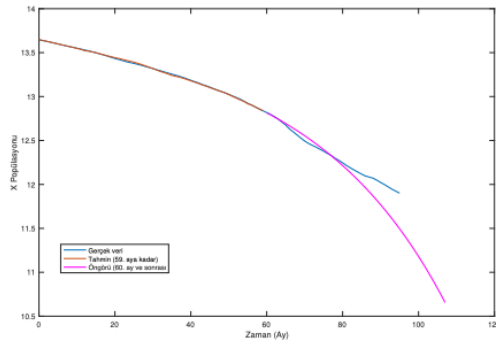
ilşkili olabilir. $A_i(z)$, bu çapraz bağımlılıkları ifade eder ve diğer çıktılarının etkisini yansıtır. $C(z)e(t)$ terimi de hata terimi veya gürültü polinomu (MA modelinin bir parçası) olarak ifade edilir. Bu bağlamda $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$ ve $y_4(t)$ çıktıları için AR ve MA bileşenleri Çizelge 4.4' te verilmektedir.

Çizelge 4.4 ARMAX modeli $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_3(t)$ ve $y_4(t)$ çıktıları

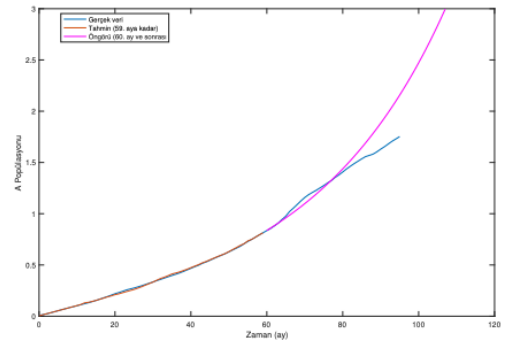
Çıktı	Polinom	Katsayılar	Açıklama
$y_1(t)$	$A(z)$	$1 - 1.017z^{-1} + 1.016z^{-2}$	$y_1(t)$ çıktısının kendi geçmişine bağımlılığı
	$A_2(z)$	$0.9995z^{-1}$	$y_1(t)$ çıktısının $y_2(t)$ 'nin önceki zaman adımlarına olan etkisi (çapraz bağımlılık)
	$C(z)$	$1 - 0.7804z^{-1} - 0.1907z^{-2}$	Hata terimlerinin geçmişe etkisi
$y_2(t)$	$A(z)$	$1 - 1.017z^{-1} + 1.016z^{-2}$	$y_2(t)$ çıktısının kendi geçmişine bağımlılığı
	$A_1(z)$	$0.9995z^{-1}$	$y_2(t)$ çıktısının $y_1(t)$ 'nin önceki zaman adımlarına olan etkisi (çapraz bağımlılık)
	$C(z)$	$1 - 0.7804z^{-1} - 0.1907z^{-2}$	Hata terimlerinin geçmişe etkisi
$y_3(t)$	$A(z)$	$1 - 2.004z^{-1} + 1.009z^{-2}$	$y_3(t)$ çıktısının kendi geçmişine bağımlılığı
	$A_4(z)$	$-0.312z^{-1}$	$y_3(t)$ çıktısının $y_4(t)$ 'nin önceki zaman adımlarına olan etkisi (çapraz bağımlılık)
	$C(z)$	$1 - 0.6833z^{-1} - 0.1148z^{-2}$	Hata terimlerinin geçmişe etkisi
$y_4(t)$	$A(z)$	$1 - 0.9604z^{-1} - 0.6297z^{-2} + 0.1162z^{-3} + 0.5052z^{-4}$	$y_4(t)$ çıktısının kendi geçmişine bağımlılığı

$A_3(z)$	$0.0009556z^{-1} - 0.001454z^{-2} + 1.658 * 10^{-5}z^{-3}$	$y_4(t)$ çıktısının $y_3(t)$ 'nin önceki zaman adımlarına olan etkisi (çapraz bağımlılık)
$C(z)$	$1 + 0.1664z^{-1} - 0.4016z^{-2} - 0.5183z^{-3} - 0.2465z^{-4}$	Hata terimlerinin geçmişe etkisi

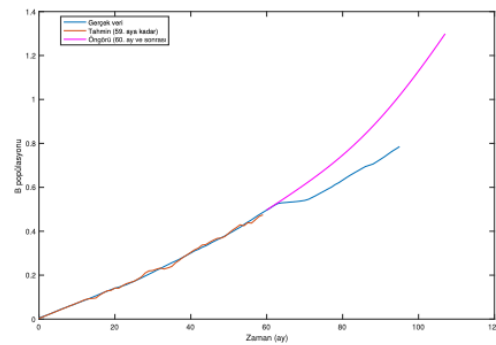
Modelde gerçek veri (60. Aya kadar) ile eğitim verilerinin (60. aya kadar) uyumu $y_1(t)$ ve $y_2(t)$ için %99.34 olarak belirlenmiş ve ortalama kare hatası (MSE) değeri ise $4.669 * 10^{-6}$ olarak elde edilmiştir. $y_3(t)$ için ise bu uyum %99.32 ve $y_4(t)$ için ise %97.34 bulunmuş ve MSE değeri $8.892 * 10^{-7}$ olarak hesaplanmıştır. Modelin sayısal sonuçları Şekil 4.3' te görselleştirilmektedir.



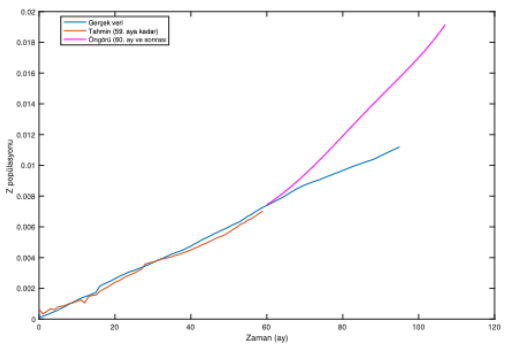
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 4.3 ARMAX modelin sayısal sonuçlar, (a) Kaza geçirmeyen sigortalı sayısı- (X popülasyonu), (b) Minör kaza geçiren sigortalı sayısı- (A popülasyonu), (c) Majör kaza geçiren sigortalı sayısı- (B popülasyonu), (d) Ölümlü kaza geçiren sigortalı sayısı- (Z popülasyonu)

Şekil 4.3' te yer alan mavi çizgi gerçek veriyi, turuncu çizgi 60 aya kadar gerçek veriden oluşturulan tahmini, pembe çizgi ise 60. aydan-108 aya öngörülemeyi ifade etmektedir. Ayrıca modelin gerçek verisi (96 aylık) ile tahmin ve öngörü verilerinin NMSE değerleri her bir popülasyon için ayrı ayrı hesaplatılmıştır. Hesaplanan NMSE değerleri Çizelge 4.5' te verilmiştir. Tüm popülasyonlar için hata ve uyum oranları incelendiğinde model ile uyumunun yüksek olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.5 ARMAX modeli X, A, B, Z popülasyonları için elde edilen NMSE değerleri

Popülasyon	Değer
X	5.45×10^{-7}
A	1.14×10^{-4}
B	3.26×10^{-4}
Z	5.47×10^{-4}

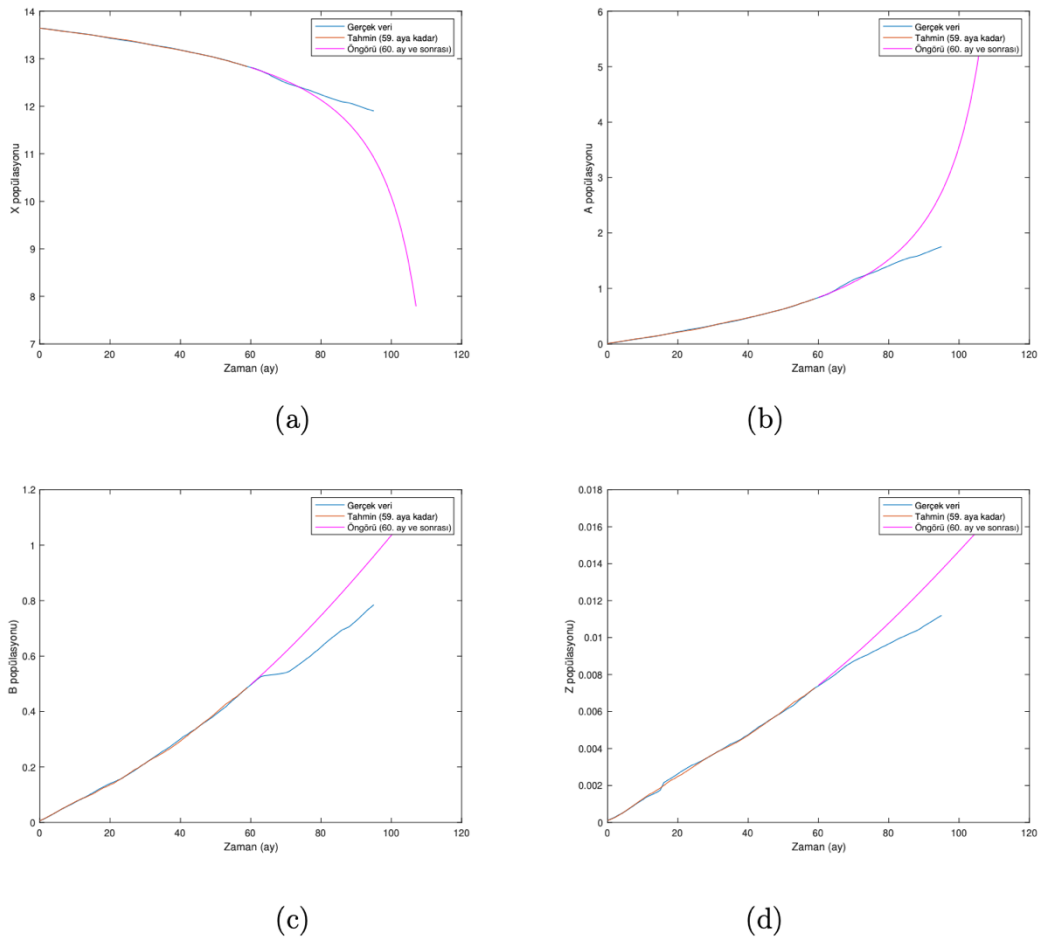
Bir sonraki model olarak, dışsal girdilerle doğrusal olmayan otoregresif (NLARX) bir model tercih edilmektedir. Bu modelde kullanılan temel formülasyon denklem 4.13' te verilmektedir.

$$y(t) = f(y(t-1), y(t-2), \dots, y(t-n), u(t), u(t-1), \dots, u(t-m)) + e(t) \quad (4.13)$$

Burada, $y(t)$ çıktı yani tahmin edilmesi gereken değerler ($y_1(t), y_2(t)$ gibi), $u(t)$ modelin dışsal faktörlerini, $f()$ doğrusal veya doğrusal olmayan fonksiyonları, $e(t)$ hata terimini ifade eder. Oluşturulan NLARX modelde de, X, A, B ve Z değerleri sisteme yine sırasıyla $y_1(t), y_2(t), y_3(t)$ ve $y_4(t)$ çıktıları olarak tanıtılmaktadır. Popülasyonların ilk altmış veri noktası ise eğitim seti (ze), geri kalan veriler ise test seti (zv) olarak ifade edilmektedir. Zaman serisinin olası eğilimi (detrend) çıkartılarak, döngüsel hareketleri ve kısa dönemli bileşenleri öğrenmesi sağlanmaktadır. Bu modelde, $y_1(t), y_2(t), y_3(t)$ ve $y_4(t)$ çıktıları için sisteme $y_1(t), y_2(t), y_3(t)$ ve $y_4(t)$, bunların kareleri ($y_1(t-1)^2, y_2(t-1)^2, y_3(t-1)^2$ ve $y_4(t-1)^2$) ve çarpımları ($y_1(t-1) * y_2(t-1) * y_3(t-1) * y_4(t-1)$) girdileri eklenir. Bu, doğrusal fonksiyonun, her bir geçmiş çıkış ve bunların doğrusal olmayan terimleri (kareler ve çarpımlar) üzerinde bir

regresyon yapacağı anlamına gelir. Yani model, sadece geçmiş verilere bakarak ve doğrusal olmayan ilişkileri öğrenerek çıktı tahmini yapar. $y_1(t)$, $y_2(t)$ çıktıları için $[-0.2281, 0.0028]$, $y_3(t)$ ve $y_4(t)$ çıktıları için ise $[0.137, -0.00627, -0.000151, 3.05e-06, -0.000261]$ değerleri başlangıçta verilen katsayılar olarak belirlenmiş ve bu katsayılar öğrenme süreci sırasında optimize edilmiştir.

Modelde gerçek veri (60. Aya kadar) ile eğitim verilerinin (60. aya kadar) uyumu $y_1(t)$ ve $y_2(t)$ için %99.34 olarak belirlenmiş ve ortalama kare hatası (MSE) değeri ise $4.62 * 10^{-6}$ olarak elde edilmiştir. $y_3(t)$ için eğitim verilerinin uyumu %99.38 ve $y_4(t)$ için ise %98.22 bulunmuş ve MSE değeri $7.382 * 10^{-7}$ olarak hesaplanmıştır. Modelin sayısal sonuçları Şekil 4.4' te görselleştirilmektedir.



Şekil 4.4 NLARX modelin sayısal sonuçlar, (a) Kaza geçirmeyen sigortalı sayısı- (X popülasyonu), (b) Minör kaza geçiren sigortalı sayısı- (A popülasyonu), (c) Majör kaza geçiren sigortalı sayısı- (B popülasyonu), (d) Ölümlü kaza geçiren sigortalı sayısı- (Z popülasyonu)

Şekil 4.4' te yer alan mavi çizgi gerçek veriyi, turuncu çizgi 60 aya kadar gerçek veriden oluşturulan tahmini, pembe çizgi ise 60. aydan-108 aya öngörülemediği ifade etmektedir. Ayrıca modelin gerçek verisi (96 aylık) ile tahmin ve öngörü verilerinin NMSE değerleri her bir popülasyon için ayrı ayrı hesaplatılmıştır. Hesaplanan NMSE değerleri Çizelge 4.6' da verilmiştir. Tüm popülasyonlar için hata ve uyum oranları incelendiğinde model ile uyumunun yüksek olduğu söylenebilir.

Çizelge 4.6 NLARX modeli X, A, B, Z popülasyonları için elde edilen NMSE değerleri

Popülasyon	Değer
X	2.92×10^{-6}
A	6.15×10^{-4}
B	2.54×10^{-4}
Z	1.49×10^{-4}

Bu bölümün sonunda ortaya atılan OA model ve çok değişkenli zaman serisi yöntemleri NMSE değerleri üzerinden kıyaslanmaktadır. X, A, B ve Z popülasyonları için OA model, ARMAX ve NLARX modellerin NMSE değerleri Çizelge 4.7' de gösterilmektedir.

Çizelge 4.7 OA, ARMAX ve NLARX modeli X, A, B, Z popülasyonları için elde edilen NMSE değerleri

Popülasyon	OA model NMSE	ARMAX model NMSE	NLARX model NMSE
X	3.9×10^{-6}	5.45×10^{-7}	2.92×10^{-6}
A	1.7×10^{-3}	1.14×10^{-4}	6.15×10^{-4}
B	2.8×10^{-3}	3.26×10^{-4}	2.54×10^{-4}
Z	2.6×10^{-3}	5.47×10^{-4}	1.49×10^{-4}

Çizelge 4.8' i incelendiğinde, X popülasyonu için en düşük NMSE değeri ARMAX modeline ait olup, bu model en iyi performansı göstermektedir. OA ve NLARX modelleri, ARMAX'a göre daha yüksek hatalar vermekte, ancak aralarındaki farklar çok büyük değildir. A popülasyonunda ise ARMAX modelinin NMSE değeri belirgin şekilde düşük olup, yine en iyi sonuçları veren modeldir. OA modelinin hatası en büyük olup, ARMAX ve NLARX modelleri arasında ise ARMAX daha iyi bir performans sergileyerek NLARX modelinden daha düşük bir hata oranına

sahiptir. B popülasyonu için ARMAX ve NLARX modelleri birbirine oldukça yakın NMSE değerleri sunarken, her ikisi de OA modeline göre belirgin şekilde daha iyi performans sergilemektedir. Aralarındaki küçük fark, hangi modelin daha iyi olduğunu belirlemede zorluk yaratabilir, ancak genel olarak her iki model de OA modeline kıyasla daha doğru sonuçlar vermektedir. Z popülasyonuna bakıldığında, NLARX modelinin NMSE değeri en düşük olup, en iyi performansı gösteren modeldir. ARMAX modelinin NMSE değeri ise NLARX'in gerisinde kalmış olsa da OA modeline kıyasla çok daha iyi sonuç vermektedir. Bu durumda, NLARX modelinin daha üstün olduğu, ARMAX ve OA modellerinin ise sırasıyla daha yüksek hata oranları sunduğu görülmektedir.

ARMAX modelinin genel performansı, çoğu popülasyonda diğer modellere göre daha iyi görünmektedir. Özellikle A ve B popülasyonlarında ARMAX belirgin bir şekilde üstün performans sergilemektedir. NLARX modelinin ise Z popülasyonu daha iyi performans gösterdiği görülmektedir, bu modelin özellikle bu popülasyon için avantajlı olabileceği söylenebilir.

OA modelinin tüm popülasyonlar için daha yüksek NMSE değerlerine sahip olması, bu modelin çok değişkenli regresyon modellerinden daha düşük doğruluk sunduğunu ve performansının diğer iki modele kıyasla daha zayıf olduğunu gösteriyor. Bu kıyaslama, farklı modellerin belirli popülasyonlar için etkinliğini değerlendirmek adına önemli bir analiz sunmaktadır. Popülasyonlar arasında model seçimi yaparken, NMSE değerlerine bakarak her bir modelin güçlü ve zayıf olduğu yönler dikkate alınmalıdır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasının temel amacı, iş kazalarının sayısını ve önleyici tedbirlerin iş güvenliği dinamikleri üzerindeki etkisini birinci adi diferansiyel denklem perspektifinden değerlendirmektir. Bu çalışmada SIR modeli referans alınarak iş kazaları dinamikleri için OA model oluşturulmuştur. Bu dinamikler, dört değişken (X, A, B ve Z popülasyonları) ve değişkenler arasındaki ilişkiyi açıklayan 10 parametre ile gösterilmiştir. β , r_1 , r_2 ve ω parametreleri gerçek verilere uydurularak bulunmuş, α_1 , α_2 , μ , λ , N ve N_1 ise gerçek verilerden hesaplanmıştır. OA modelin kararlılık analizi yapılmış olup, sistemin denge noktaları ve özdeğerleri hesaplatılmıştır. Buna ek olarak, yeni nesil matris yöntemi ile popülasyonun çoğaltım sayısı hesaplanmış ve modelin kararsız olduğu sonucu ortaya konulmuştur. OA modeli Runge-Kutta yöntemi kullanılarak 96 adımda sayısal olarak çözülmüştür. Şekil 4.1' de gösterilen OA modeli için sayısal sonuçlar gerçek verilerle uyumludur. OA modeli ile gerçek veriler arasındaki hata NMSE kullanılarak hesaplatılmıştır. X, A, B ve Z popülasyonu için sonuç sırasıyla $3,9 \times 10^{-6}$, $1,7 \times 10^{-3}$, $2,8 \times 10^{-3}$ ve $2,6 \times 10^{-3}$ tür. Genel olarak, modelin hata oranları değerlendirildiğinde, X popülasyonu en iyi performansı sergilemekte, ardından A, Z ve B popülasyonu gelmektedir. Bu değerler, modelin tahminlerinin genel olarak iyi olduğunu, ancak iyileştirmelere açık olduğunu gösterir. Bir sonraki aşamada OA modeline, İSG yeniden eğitimine ilişkin u parametresi eklenerek yeni bir modifiye OA model önerilmiştir. u parametresinin iş kazaları sayısı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Modifiye OA modeli 108 adımda Runge-Kutta yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Şekil 4.2' de u parametresinin sistem üzerindeki azaltıcı yönde etkisi olduğu gözlenmiş ve 108. ayın sonunda A, B ve Z popülasyonundaki azalma sırasıyla %24, %33 ve %40. bulunmuştur. Sonuçlar, modelin iş kazalarının karmaşık dinamiklerini etkili bir şekilde yakalama ve İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) yeniden eğitimleri gibi önleyici tedbirlerin uygulamaya konulması yoluyla bu kazaları azaltma potansiyelini ortaya koymuştur. Tez çalışmamızda son olarak, OA modelde kullanılan Çizelge 3.2'de verilen veriye ARMAX ve NLARX regresyon modelleri uygulanmış ve üç model NMSE değerleri üzerinden kıyaslanmıştır. Bunun sonucunda ise ARMAX modelinin performansı diğer yöntemlere göre öne çıkmıştır.

OA modeli, iş kazalarının anlaşılması ve azaltılması için birçok önemli avantaj sağlamaktadır. Bunların başında modelin, iş kazalarının dinamiklerini matematiksel bir çerçeveye dönüştürerek iş güvenliği konusunda nicel ve dinamik bir bakış açısı sunması özelliği gelmektedir. Bu bakış açısı ile birlikte, adi diferansiyel denklemler kullanılarak, işçi nüfusu (X), kaza oranları (A , B , Z) ve güvenlik önlemlerinin zaman içindeki etkilerinin analizine olanak sağlanmaktadır. Bir başka önemli güçlü yanı, modelin gerçek verilere göre kalibre edilmesi ve sayısal sonuçların oldukça düşük hata oranına sahip olmasıdır. Bu durum modelin güvenilirliğini güçlendirmekte ve iş güvenliği alanında karar verme sürecinde uygulanabilirliğini arttırmaktadır. Modelin bir diğer önemli özelliği ise, iş kazası geçiren çalışanların yeniden İSG eğitimi almasının zorunluluğuna yapılan vurgu, önerilen modele entegre edilerek minör, majör ve ölümlü kaza oranlarını önemli ölçüde azalttığı için önleyici bir strateji olarak büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, bu durum, modele farklı önleyici tedbirlerin eklenebileceğini ve bunların simülasyon kabiliyetini ortaya koymaktadır. Modelin farklı senaryoları simüle etme yeteneği, politika yapıcılar için değerli bir araç olmasını sağlamaktadır. Sayısal sonuçlara dayalı olarak, bu çalışma, işyeri denetimlerine ilişkin hükümet düzenlemelerinin geliştirilmesi, İSG eğitim sıklığının artırılması ve uyumsuzluk durumunda cezai yaptırımların uygulanması gibi önerilerde bulunmaktadır. Bu tavsiyeler, işyeri güvenliğini iyileştirmeye yönelik hükümet ve kuruluş stratejilerini doğrudan yönlendirebilir. Modelin güçlü yönlerinden biri de uyarlanabilirliğidir. Yerel veriler kullanılarak farklı ülkelerdeki veya sektörlerdeki iş kazalarının sayısını tahmin etmek için kolayca uygulanabileceği önerilmektedir. Özellikle inşaat, maden ve ağır imalat gibi yüksek riskli sektörler için modifiye edilerek iş kazaları öngörüleme ve önemli önlem parametreleri geliştirmek için kullanılabileceği ifade edilmektedir.

Modelin bu önemli avantajları yanı sıra birtakım kısıtlamaları bulunmaktadır. Bunların başında, iş kazaları ve güvenlik önlemlerinin gerçek dünyadaki karmaşıklığını basitleştirmektedir. Ekonomik koşullar, sosyal faktörler ve teknolojik değişiklikler gibi kaza oranlarını etkileyen olası değişkenlerin tamamını kapsamamaktadır. Ayrıca, veri güvenilirliği sağlamak için her ne kadar 6331 sayılı yasanın yürürlüğe girdiği tarih olan 2013 yılı sonrası özellikle tercih

edilse de modelin gerçek bir veri kaynaklı çalışması sebebiyle verideki eksiklik veya yanlışlık modeli doğrudan etkilemektedir. Ek olarak model, farklı senaryoları simüle etme yeteneği için, özellikle sektörel açıdan İSG hizmetlerinin yürütümü ile ilgili veri yetersizliği sebebi ile bazı kabullerde bulunmaktadır.

Bu çalışmanın sunduğu avantajlar ve kısıtlar doğrultusunda, OA modelin iyileştirilmesi, daha kapsamlı, hassas tahminlerde bulunması ve nleme parametreleri geliştirmesi için İSG hizmetleri alanındaki çalışmaların düzenli kayıt altına alınması oldukça önem taşımaktadır. Bu durum politika yapıcıların bu konudaki çalışmalarına katkı vermektedir.

Gelecek alışmalarda, OA modelinin sektörel verilere uyarlanması ve farklı senaryolar üretilerek önleyici parametrelerin geliştirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, model uluslararası karşılaştırmalar için genişletilebilir ve farklı düzenlemelere, güvenliğe yönelik kültürel tutumlara ve ekonomik koşullara sahip farklı ülkelerdeki iş kazası dinamikleri incelenebileceği düşünülmektedir. Bu, farklı bağımların güvenlik politikalarının ve İSG eğitiminin etkinliği hakkında değerli bilgiler sağlayacağı öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdelhamid, T. S., & Everett, J. G. (2000). Identifying root causes of construction accidents. *Journal of construction engineering and management*, 126(1), 52-60.
- Abudunaibi B., Liu W., Guo Z., Zhao Z., Rui J., Song W., ... Chen T., 2023. A comparative study on the three calculation methods for reproduction numbers of COVID-19, *Frontiers in Medicine*, 9, 1079842.
- Ahn, C. R., Lee, S., Sun, C., Jebelli, H., Yang, K., & Choi, B. (2019). Wearable sensing technology applications in construction safety and health. *Journal of Construction Engineering and Management*, 145(11), 03119007.
- Akal M., 2004. Forecasting Turkey's tourism revenues by ARMAX model. *Tourism Management*, 25(5), 565-580.
- Akboğa, Ö., & Baradan, S. (2015). İnşaat sektöründeki ölümlü iş kazalarının karakteristiklerinin incelenmesi: İzmir alan çalışması, 5. İşçi Sağlığı ve İş Güvenliği Sempozyumu, İzmir, 215-224.
- Akgül I., 1994. Zaman serisi analizi ve öngörü modelleri, *Öneri Dergisi*, 1(1), 52-69.
- Akı E., 2013. 6331 Sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu ve Çalışma Yaşamına Etkileri, *Dokuz Eylül Üniversitesi Hukuk Fakültesi Dergisi*, 15, 3-24.
- Akpınar H., 2012. Bulaşıcı Hastalıkların Yayılımının Tahmininde Deterministik Modellerin Kullanılması, *Öneri Dergisi*, 10(38), 97-103.
- Albar B. Ö., 2024. İş Kazalarının Önlenmesinde Kaza Sebep Teorilerinin
- Altunkaynak, B. (2018). A statistical study of occupational accidents in the manufacturing industry in Turkey. *International journal of industrial ergonomics*, 66, 101-109.
- Arastoo, H., Hakimovich, A. P., & Esfandiarpour, S. (2015). Assessment of barriers to establish OSH: a country report. *Industrial health*, 53(4), 378-384.
- Aryza S., Irwanto M., Lubis Z., Putera A., Siahaan U., 2017. A Novelty Stability Of Electrical System Single Machine Based Runge Kutta Orde 4 Method. *IOSR J. Electr. Electron. Eng. Ver. II*, 12(4), 2278-1676.
- Babovic, P. (2009). Occupational accidents as indicators of inadequate work conditions and work environment. *Acta Med. Median*, 48, 22-26.
- Bailey N. T., 1975. The mathematical theory of infectious diseases and its applications.

- Ballantyne, M. (2019). What is the correlation between safety management systems and International Organization for Standardization (ISO 45001: 2018-OHSAS 18001: 2007) and the reduction of workplace accidents and serious incidents?. The Centre for Lifelong Learning, A thesis presented in fulfilment of the requirements for the degree of Master of Science In Safety and Risk Management.
- Baraza, X., Cugueró-Escofet, N., & Rodríguez-Elizalde, R. (2023). Statistical analysis of the severity of occupational accidents in the mining sector. *Journal of safety research*, 86, 364-375.
- Bayraktar, B., Uyguçgil, H., & Konuk, A. (2018). Türkiye madencilik sektöründe iş kazalarının istatistiksel analizi. *Scientific Mining Journal*, 57, 85-90.
- Bayram, M., Ünğan, M. C., & Ardiç, K. (2017). The relationships between OHS prevention costs, safety performance, employee satisfaction and accident costs. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 23(2), 285-296.
- Benjamin, O. (2001). Fundamental principles of occupational health and safety. ILO, 13(2), 1-59.
- Berger D. W., Herkenhoff K. F., Mongey S., 2020. An seir infectious disease model with testing and conditional quarantine, National Bureau of Economic Research.
- Bernoulli D., 1760. Essai d'une nouvelle analyse de la mortalite causee par la petite verole et des avantages de l'inoculation pour la prevenir. *Mem. Math. Phys. Acad. Roy. Sci., Paris*, 1-45. In *Histoire de l'Academie Royale des Sciences*, 1766.
- Bird F. E., Loftus R. G., 1976. *Loss control management*, Institute Press.
- Birleşmiş Milletler, 2024. Erişim tarihi: 28.12.2024. <https://unglobalcompact.org/take-action/action-platforms/sdg-reporting>
- Box G. E., Jenkins G. M., Reinsel G. C., Ljung G. M., 2015. *Time series analysis: forecasting and control*, John Wiley & Sons.
- Brauer F., Castillo-Chavez C., 2012. *Mathematical models in population biology and epidemiology*, New York: springer.
- Brown, R. M. (1992). Administrative and criminal penalties in the enforcement of occupational health and safety legislation. *Osgoode Hall LJ*, 30, 691.
- Busch, C. (2019). Heinrich's Local Rationality: Shouldn't 'New View' Thinkers Ask Why Things Made Sense To Him?.

- Butcher J. C., 1964. On Runge-Kutta processes of high order, *Journal of the Australian Mathematical Society*, 4(2), 179-194.
- Butcher J. C., Wanner G., 1996. Runge-Kutta methods: some historical notes. *Applied Numerical Mathematics*, 22(1-3), 113-151.
- Calafiore G. C., Novara C., Possieri C., 2020. A modified sir model for the covid-19 contagion in italy, 2020 59th IEEE Conference on Decision and Control (CDC), IEEE, 3889-3894.
- Carnero M. C., Pedregal D. J., 2010. Modelling and forecasting occupational accidents of different severity levels in spain, *Reliability Engineering & System Safety* 95(11), 1134-1141.
- Cheng C.-W., Leu S. S., Lin C.-C., Fan C., 2010. Characteristic analysis of occupational accidents at small construction enterprises, *Safety Science* 48(6), 698-707.
- Chib S., Greenberg E., 1994. Bayes inference in regression models with ARMA (p, q) errors. *Journal of Econometrics*, 64(1-2), 183-206.
- Christini D. J., Bennett F. H., Lutchen K. R., Ahmed H. M., Hausdorff J. M., Oriol N., 1995. Application of linear and nonlinear time series modeling to heart rate dynamics analysis. *IEEE transactions on Biomedical Engineering*, 42(4), 411-415.
- Ciarapica, F. E., & Giacchetta, G. (2009). Classification and prediction of occupational injury risk using soft computing techniques: An Italian study. *Safety science*, 47(1), 36-49.
- Cuesta-Herrera L., Pastenes L., Córdova-Lepe F., Arencibia A. D., Torres-Mantilla H., Gutiérrez-Jara J. P., Analysis of SEIR-type models used at the beginning of COVID-19 pandemic reported in high-impact journals Análisis de modelos tipo SEIR utilizados en los inicios de la pandemia COVID-19 reportados en revistas de alto impacto.
- Çiçek Ö., Öçal M., 2016. Dünyada ve Türkiye’de İş Sağlığı ve İş Güvenliğinin Tarihsel Gelişimi. *Hak İş Uluslararası Emek ve Toplum Dergisi*, 5(11), 106-129.
- Çiftci F., Yıldız R., 2015. Doğrudan Yabancı Yatırımların Ekonomik Belirleyicileri, Türkiye Ekonomisi Üzerine Bir Zaman Serisi Analizi, *Business & Economics Research Journal*, 6(4).
- Diggle P. J., Tawn J. A., Moyeed R. A., 1998. Model-based geostatistics. *Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics*, 47(3), 299-350.

- Dimanov, D. K. (2024). Social And Human Costs Of Industrialization: A Review Of Some Negative Effects On Society During The First Industrial Revolution. *Knowledge-International Journal*, 62(1), 123-127.
- Dormand J. R., Prince P. J., 1980. A family of embedded runge-kutta formulae, *Journal of computational and applied mathematics* 6(1), 19-26.
- Dos Santos I., Almeida G., De Moura F., 2021. Adaptive sir model for propagation of sars-cov-2 in brazil, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications* 569, 125773.
- Duran M. J., Cros D., Riquelme J., 2007. Short-term wind power forecast based on ARX models. *Journal of Energy Engineering*, 133(3), 172-180.
- Erginel, N., & Toptancı, Ş. (2017). İş Kazası Verilerinin Olasılık Dağılımları ile Modellenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5, 201-212.
- Erickson C. B., Ankenman B. E., Sanchez, S. M., 2018. Comparison of Gaussian process modeling software. *European Journal of Operational Research*, 266(1), 179-192.
- Fattah, J., Ezzine, L., Aman, Z., El Moussami, H., & Lachhab, A. (2018). Forecasting of demand using ARIMA model. *International Journal of Engineering Business Management*, 10, 1847979018808673.
- Feng Z., 2007. Final and peak epidemic sizes for SEIR models with quarantine and isolation, *Mathematical Biosciences & Engineering*, 4(4), 675-686.
- Fernández-Villaverde J., Jones C. I., 2022. Estimating and simulating a SIRD model of COVID-19 for many countries, states, and cities. *Journal of Economic Dynamics and Control*, 140, 104318.
- Freivalds, A., & Johnson, A. B. (1990). Time-series analysis of industrial accident data. *Journal of Occupational Accidents*, 13(3), 179-193.
- Fu, G., Xie, X., Jia, Q., Li, Z., Chen, P., & Ge, Y. (2020). The development history of accident causation models in the past 100 years: 24Model, a more modern accident causation model. *Process Safety and Environmental Protection*, 134, 47-82.
- Gakkhar S., Naji R. K., 2003. Order and chaos in predator to prey ratio-dependent food chain, *Chaos, Solitons & Fractals* 18(2), 229-239.
- Gariazzo, C., Taiano, L., Bonafede, M., Leva, A., Morabito, M., De'Donato, F., & Marinaccio, A. (2023). Association between extreme temperature exposure and occupational injuries among construction workers in Italy: An analysis of risk factors. *Environment international*, 171, 107677.

- Godderis, L., & Luyten, J. (2020). Challenges and opportunities for occupational health and safety after the COVID-19 lockdowns. *Occupational and environmental medicine*, 77(8), 511-512.
- Goldstein J., 1996. Causality and emergence in chaos and complexity theories, *Nonlinear Dynamics in human behavior*, World Scientific, 159–190.
- Granerud, R. L., & Rocha, R. S. (2011). Organisational learning and continuous improvement of health and safety in certified manufacturers. *Safety Science*, 49(7), 1030-1039.
- Gregorčič G., Lightbody G., 2009. Gaussian process approach for modelling of nonlinear systems. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 22(4-5), 522-533.
- Guastello S. J., 2001. Managing emergent phenomena: Nonlinear dynamics in work organizations, Psychology Press.
- Gupta N., 2023. On the calibration of compartmental epidemiological models (Master's thesis, New York University Tandon School of Engineering).
- Hale A. R., Glendon A. I., 1987. Individual behaviour in the control of danger. Elsevier Science.
- Hamilton J. D., 2020. Time series analysis, Princeton university press.
- Hamilton, H., Alice, A., MD], M., Hardy, H., Harriet L, H. L., & MD], M. (1949). *Industrial toxicology*.
- Harrison, J. (2012). Occupational safety and health in the United Kingdom: securing future workplace health and wellbeing. *Industrial health*, 50(4), 261-266.
- Hashmi, S. H. Brief Discussion on Occupational Health and Safety. *Industrial Psychology*, 91.
- Hassi, J., Gardner, L., Hendricks, S., & Bell, J. (2000). Occupational injuries in the mining industry and their association with statewide cold ambient temperatures in the USA. *American journal of industrial medicine*, 38(1), 49-58.
- He Z. Y., Jin, L. W., 2008. Activity recognition from acceleration data using AR model representation and SVM. In 2008 international conference on machine learning and cybernetics, 2245-2250.
- Heaton, J. R. (1976). The Evolution of the Working Conditions and Associated Legislation of Apprentices and Child Labour in British Factories and Trades from the Late 18th to the Middle of the 19th Centuries (Doctoral dissertation, Rhodes University).

- Heesterbeek H., Anderson R. M., Andreasen V., Bansal S., De Angelis D., Dye C., ... Isaac Newton Institute IDD Collaboration, 2015. Modeling infectious disease dynamics in the complex landscape of global health, *Science*, 347(6227).
- Heino, B. (2013). The state, class and occupational health and safety: locating the capitalist state's role in the regulation of OHS in NSW. *Labour & Industry: a journal of the social and economic relations of work*, 23(2), 150-167.
- Heinrich H. (n.d.). W., 1931. *Industrial Accident Prevention, A scientific approach*.
- Hoła, B., Topolski, M., Szer, I., Szer, J., & Blazik-Borowa, E. (2022). Prediction model of seasonality in the construction industry based on the accidentality phenomenon. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 22, 1-13.
- Horozoğlu, K. (2017). İş kazalarının iş sağlığı ve güvenliği açısından analizi. *Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 265-281.
- Hosseinian, S. S., & Torghabeh, Z. J. (2012). Major theories of construction accident causation models: A literature review. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 4(2), 53.
- Hou Y., Bidkhorji H., 2024. Multi-feature SEIR model for epidemic analysis and vaccine prioritization. *Plos one*, 19(3).
- Hyndman R. J., 2018. *Forecasting: principles and practice*.
- Jadhav V., Chinnappa R. B., Gaddi G. M., 2017. Application of ARIMA model for forecasting agricultural prices.
- Jain, A., Hassard, J., Leka, S., Di Tecco, C., & Iavicoli, S. (2021). The role of occupational health services in psychosocial risk management and the promotion of mental health and well-being at work. *International journal of environmental research and public health*, 18(7), 3632.
- Jenkins G. M., Box, G. E., 1976. *Time series analysis: forecasting and control*.
- Juditsky A., Hjalmarsson H., Benveniste A., Delyon B., Ljung L., Sjöberg J., Zhang Q., 1995. Nonlinear black-box models in system identification: Mathematical foundations, *Automatica*, 31(12), 1725-1750.
- Kandemir A. Ş., Şimşek M., 2019. Geçici İş Göremezlik Süresi, Cinsiyet, Çalışılan Ortam ve İş Kazası Türleri Etkileşimlerinin İstatistiksel Analizi, *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 7(1).
- Karadağ, T., & Kepekli, T. A. (2018). İnşaat sektöründe yaşanan iş kazaları ve kaza nedenleri. *Karabük Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 314-322.

- Karadeniz O., 2012. Dünya’da ve Türkiye’de iş kazaları ve meslek hastalıkları ve sosyal koruma yetersizliği, *Çalışma ve Toplum*, 3(34), 15-73.
- Karakurt F. Z., Özbakır, O., 2024. Türkiye’de 2013-2022 Yılları Arasında Yaşanan İş Kazalarının Kökenleri.
- Karakuş O., Kuruoğlu E. E., Altınkaya, M. A., 2017. One-day ahead wind speed/power prediction based on polynomial autoregressive model. *IET Renewable Power Generation*, 11(11), 1430-1439.
- Katsakiori, P., Sakellariopoulos, G., & Manatakis, E. (2009). Towards an evaluation of accident investigation methods in terms of their alignment with accident causation models. *Safety science*, 47(7), 1007-1015.
- Kermack W. O., McKendrick, A. G., 1927. A contribution to the mathematical theory of epidemics, *Proceedings of the royal society of london. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character* 115(772), 700-721.
- Kieslich C. A., Boukouvala F., Floudas C. A., 2018. Optimization of black-box problems using Smolyak grids and polynomial approximations, *Journal of Global Optimization*, 71, 845-869.
- Klimova, E. V., Semeykin, A. Y., & Nosatova, E. A. (2019, June). Information system for forecasting and management of occupational risks. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 272, No. 2, p. 022198). IOP Publishing.
- Kocijan J., Murray-Smith R., Rasmussen C. E., Girard A., 2004. Gaussian process model based predictive control. In *Proceedings of the 2004 American control conference* (Vol. 3, pp. 2214-2219). IEEE.
- Koçali, K. (2022). How to perform a risk assessment step by step for occupational health and safety. *EURAS-Journal of Engineering and Applied Sciences*.
- Koh T., Powers, E. 1985. Second-order Volterra filtering and its application to nonlinear system identification, *IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing*, 33(6), 1445-1455.
- Kuruoğlu E. E., 2002. Nonlinear least lp-norm filters for nonlinear autoregressive α -stable processes, *Digital Signal Processing*, 12(1), 119-142.
- Lagarias J. C., Reeds J. A., Wright M. H., Wright P. E., 1998. Convergence properties of the nelder-mead simplex method in low dimensions, *SIAM Journal on optimization* 9(1), 112-147.

- Le Coze J. C., Salvi O., Gaston D., 2006. Complexity and Multi (Inter or Trans) - Disciplinary Sciences, Which Job for Engineers in Risk Management, *Journal of risk research*, 9(5), 569-582
- Lee, J. Y., Yoon, Y. G., Oh, T. K., Park, S., & Ryu, S. I. (2020). A study on data pre-processing and accident prediction modelling for occupational accident analysis in the construction industry, *Applied Sciences*, 10(21), 7949.
- Liao, C. W. (2012). Pattern analysis of seasonal variation in occupational accidents in the construction industry. *Procedia Engineering*, 29, 3240-3244.
- Liao Z., Lan P., Fan X., Kelly B., Innes A., Liao Z., 2021. SIRVD-DL: A COVID-19 deep learning prediction model based on time-dependent SIRVD, *Computers in Biology and Medicine*, 138.
- Likothanassis S. D., Demiris E. N., 1998. Armax model identification with unknown process order and time-varying parameters. In *Signal Analysis and Prediction*, Boston, MA, Birkhäuser Boston, 175-184.
- Liu J., Kumar S., Palomar D. P., 2019. Parameter estimation of heavy-tailed AR model with missing data via stochastic EM, *IEEE Transactions on Signal Processing*, 67(8), 2159-2172.
- Liu, R., Liu, H. C., Shi, H., & Gu, X. (2023). Occupational health and safety risk assessment: A systematic literature review of models, methods, and applications. *Safety science*, 160, 106050.
- Lotka A. J., 1910. Contribution to the theory of periodic reactions, *The Journal of Physical Chemistry* 14(3), 271-274.
- Lütkepohl H., 2005. *New introduction to multiple time series analysis*, Springer Science & Business Media.
- Macdonald, D. (2004). *Practical machinery safety*. Elsevier.
- Macedo A. C., Silva I. L., 2005. Analysis of occupational accidents in portugal between 1992 and 2001, *Safety Science* 43(5-6), 269-286.
- Makridakis S., Hibon M., 1997. ARMA models and the Box-Jenkins methodology, *Journal of forecasting*, 16(3), 147-163.
- Malthus T. R., 1872. *An Essay on the Principle of Population*.
- Małysa, T. (2022). Application of Forecasting as an Element of Effective Management in the Field of Improving Occupational Health and Safety in the Steel Industry in Poland. *Sustainability*, 14(3), 1351.

- Manav, H. Metal sanayinde çalışanların iş sağlığı ve güvenliği açısından risk faktörleri: Konya ili örneği (Master's thesis, Sosyal Bilimler Enstitüsü).
- Mani, Z. A., & Goniewicz, K. (2023). Transportation disaster trends and impacts in western Asia: A comprehensive analysis from 2003 to 2023. *Sustainability*, 15(18), 13636.
- Marc T., 2022. Optimal ARMAX model order identification of dynamic systems. *London Journal of Engineering Research*, 22(1), 1-22.
- Marhavilas, P., Koulouriotis, D., Nikolaou, I., & Tsotoulidou, S. (2018). International occupational health and safety management-systems standards as a frame for the sustainability, Mapping the territory. *Sustainability*, 10(10), 3663.
- Mattila, S., Kinnari, I., Tappura, S., & Lehto, M. (2021). Promoting occupational safety, health, and well-being in emergency medical services. In *Advances in Safety Management and Human Performance: Proceedings of the AHFE 2021 Virtual Conferences on Safety Management and Human Factors, and Human Error, Reliability, Resilience, and Performance*, July 25-29, 2021, USA (pp. 324-330). Springer International Publishing.
- May R. M., 1991. *Infectious diseases of humans: dynamics and control*, Oxford University Press.
- McGough T., Tsolacos S., 1995. Forecasting commercial rental values using ARIMA models. *Journal of Property Valuation and Investment*, 13(5), 6-22.
- Melchior, C., Zanini, R. R., Guerra, R. R., & Rockenbach, D. A. (2021). Forecasting Brazilian mortality rates due to occupational accidents using autoregressive moving average approaches. *International Journal of Forecasting*, 37(2), 825-837.
- Mengaldo G., Wyszogrodzki A., Diamantakis M., Lock S. J., Giraldo F. X., Wedi, N. P., 2019. Current and emerging time-integration strategies in global numerical weather and climate prediction. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 26, 663-684.
- Min, J., Kim, Y., Lee, S., Jang, T. W., Kim, I., & Song, J. (2019). The fourth industrial revolution and its impact on occupational health and safety, worker's compensation and labor conditions. *Safety and health at work*, 10(4), 400-408.
- Mjalli F. S., Al-Asheh S., Alfadala H. E., 2007. Use of artificial neural network black-box modeling for the prediction of wastewater treatment plants performance, *Journal of environmental management*, 83(3), 329-338.
- Nie N., Jiang J., Feng Y., 2023. Parameter Estimation for a Class of Fractional Stochastic SIRD Models with Random Perturbations. *Fundamental Journal of Mathematics and Applications*, 6(2), 101-106.

- Nielsen, K. J. (2014). Improving safety culture through the health and safety organization: A case study. *Journal of safety research*, 48, 7-17.
- Nihan N. L., Holmesland K. O., 1980. Use of the Box and Jenkins time series technique in traffic forecasting. *Transportation*, 9(2), 125-143.
- Oğul B., 2022. Türkiye’de finansal gelişmenin vergi gelirleri üzerine etkisinin zaman serisi analizleri ile incelenmesi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(2), 967-979.
- Omae Y., Kakimoto Y., Sasaki M., Toyotani J., Hara K., Gon Y., Takahashi H., 2022. SIRVVD model-based verification of the effect of first and second doses of COVID-19/SARS-CoV-2 vaccination in Japan. *Math Biosci Eng*, 19(1), 1026-40.
- Opping, S. (2015). Risk chain process model: Linking risk perception to occupational accidents. *Sigurnost: časopis za sigurnost u radnoj i životnoj okolini*, 57(1), 0-0.
- Özbakır O., Deniz E., 2024. Avrupa Birliği ve Türkiye’de Yaşanan Ölümlü İş Kazalarının Karşılaştırılması.
- Öztürk, Z., Sorgun, S., & Bilgil, H. (2023). Kesir mertebeden diferansiyel denklemlerin bazı matematiksel modellemeleri (Master's thesis, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi).
- Patterson K., 2011. An introduction to arma models. In *Unit Root Tests in Time Series: Key Concepts and Problems*, London: Palgrave Macmillan UK, 68-122.
- Pérez-Cruz F., Van Vaerenbergh S., Murillo-Fuentes J. J., Lázaro-Gredilla M., Santamaria I., 2013. Gaussian processes for nonlinear signal processing: An overview of recent advances. *IEEE Signal Processing Magazine*, 30(4), 40-50.
- Petersen, D. C. (1981). Human error reduction and safety management.
- Petersen, G. R., & Milham, S. (1980). Occupational mortality in the state of California 1959-1961.
- Prasad G. L. V., Teja B. R., Govathoti S., Dhanikonda S., 2023. Leveraging ARMA and ARMAX Time-Series Forecasting Models for Rainfall Prediction. In *2023 9th International Conference on Advanced Computing and Communication Systems*, 353-357.
- Quinlan M., Bohle P., Lamm F., 2010. *Managing occupational health and safety*, Palgrave Macmillan.

- Rahiman, M. A., & Mahat, N. A. A. (2018). The influence of domino theories in preventing construction accidents.
- Rajaprasad S. V. S., 2018. Prediction of fatal accidents in Indian factories based on ARIMA. *Production Engineering Archives*, 18(18), 24-30.
- Ranka, S., Quigley, J., & Hussain, T. (2020). Behaviour of occupational health services during the COVID-19 pandemic. *Occupational Medicine*, 70(5), 359-363.
- Rasmussen J., Suedung I., others., 2000. Proactive risk management in a dynamic society. Swedish Rescue Services Agency.
- Reason, J. (1990). *Human error*. Cambridge university press.
- Reason, J. (2005). Safety in the operating theatre–Part 2: Human error and organisational failure. *BMJ Quality & Safety*, 14(1), 56-60.
- Ropponen, A., Gluschkoff, K., Ervasti, J., Kivimäki, M., Koskinen, A., Krutova, O., ... & Härmä, M. (2023). Working hour patterns and risk of occupational accidents. An optimal matching analysis in a hospital employee cohort. *Safety science*, 159, 106004.
- Ruslan, K., Inshyn, M., Dmytro, S., Yelena, T., & Olena, A. (2020). Occupational safety and health of factory workers in European countries in the nineteenth century: historical and legal analysis. *Labor History*, 61(3-4), 388-400.
- Saari, J. (1995). Risk assessment and risk evaluation and the training of OHS professionals. *Safety science*, 20(2-3), 183-189.
- Saldaña M. A. M., Herrero S. G., Del Campo M. A. M., Ritzel, D. O., 2003. Investigation of risks, incidents and injuries: Development of a report form and model, *The International Electronic Journal of Health Education*, 6, 47-60.
- Salguero-Caparrós, F., Pardo-Ferreira, M. D. C., Martínez-Rojas, M., & Rubio-Romero, J. C. (2020). Management of legal compliance in occupational health and safety. A literature review. *Safety science*, 121, 111-118.
- Santos, G., Barros, S., Mendes, F., & Lopes, N. (2013). The main benefits associated with health and safety management systems certification in Portuguese small and medium enterprises post quality management system certification. *Safety science*, 51(1), 29-36.
- Saraswaty, A., & Fadli, Z. (2024). The Impact of Occupational Health and Safety (Ohs) Policies on Employees' psychological Well-Being in Soppeng City. *Publicus: Jurnal Administrasi Publik*, 2(2), 315-325.

- Sayis T., 2017. Küreselleşmeyle Birlikte İş Kazalarının Değişen Yüzü, İş Cinayetleri, *Fiscaeconomia*, 1(2), 113-149.
- Schenk, L., Hansson, S. O., Rudén, C., & Gilek, M. (2008). Occupational exposure limits: A comparative study. *Regulatory toxicology and pharmacology*, 50(2), 261-270.
- Schlickeiser R., Kröger M., 2024. Mathematics of Epidemics: On the General Solution of SIRVD, SIRV, SIRD, and SIR Compartment Models. *Mathematics*, 12(7), 941.
- Sebbagh A., Kechida S., 2022. EKF-SIRD model algorithm for predicting the coronavirus (COVID-19) spreading Dynamics, *Sci Rep* 12, 13415.
- Serin, G., & Çuhadar, M. (2015). İş güvenliği ve sağlığı yönetim sistemi. *Teknik Bilimler Dergisi*, 5(2), 44-59.
- Shafique M., Rafiq M., 2019. An overview of construction occupational accidents in hong kong, A recent trend and future perspectives, *Applied Sciences* 9(10), 2069.
- Shampine L. F., Reichelt M. W., 1997. The matlab ode suite, *SIAM journal on scientific computing* 18(1), 1-22.
- Shapiro, S. A. (1998). The necessity of OSHA. *Kan. JL & Pub. Pol'y*, 8, 22.
- Shappell, S. A. (2000). The Human Factors Analysis and Classification System-HFACS.
- Shumway R., Stoffer D., 2019. Time series: a data analysis approach using R. Chapman and Hall/CRC.
- Shumway, R. H., Stoffer, D. S., 2017. ARIMA models. Time series analysis and its applications: with R examples, 75-163.
- Siegenfeld Alexander F., Kollepara Pratyush K., Bar-Yam Y., 2022. Modeling Complex Systems: A Case Study of Compartmental Models in Epidemiology, Complexity.
- Singh D. P., Kumar P., Prabakaran K., 2013. Application of ARIMA model for forecasting Paddy production in Bastar division of Chhattisgarh. *American International Journal of Research in Science, Technology, Engineering & Mathematics*, 5, 82-87.
- Sosyal Güvenlik Kurumu, 2024. Erişim tarihi: 28.11.2024. <https://www.sgk.gov.tr/Istatistik/Yillik/fcd5e59b-6af9-4d90-a451-ee7500eb1cb4/>

- Soltanzadeh, A., Mohammadfam, I., Moghimbeygi, A., & Ghiasvand, R. (2017). Exploring causal factors on the severity rate of occupational accidents in construction worksites. *International journal of civil engineering*, 15, 959-965.
- Stender, J. H. (1974). Enforcing the Occupational Safety and Health Act of 1970: The Federal Government as a Catalyst. *Law and Contemporary Problems*, 38(4), 641-650.
- Strogatz S. H., 2018. *Nonlinear dynamics and chaos: with applications to physics, biology, chemistry, and engineering*, CRC press.
- Sultanoglu N., Saad F., Sanlidag T., Hincal E., Sayan M., Suer K., 2022. Analysis of hiv infection in cyprus using a mathematical model., *Erciyes Medical Journal* 44(1), 63-68.
- Şahin, L. (2012). Geçmişten günümüze çocuk işçiliği. *Sosyal Bilimler Araştırmaları Dergisi*, 7(2), 103-118.
- Şen H., Özaydın Ö., 2009. ARMAX Modelleri ve Porsuk Barajı Su Seviyesinin Öngörüsü. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 1-14.
- Takala J., Hämäläinen P., Sauni R., Nygård C. H., Gagliardi D., Neupane S., 2024. Global-, regional-and country-level estimates of the work-related burden of diseases and accidents in 2019, *Scandinavian journal of work, environment & health*, 50(2), 73.
- Tang S., Chen L., 2002. Chaos in functional response host-parasitoid ecosystem models, *Chaos, Solitons & Fractals* 13(4), 875-884.
- Tetzlaff, E. J., Goggins, K. A., Pegoraro, A. L., Dorman, S. C., Pakalnis, V., & Eger, T. R. (2021). Safety culture: a retrospective analysis of occupational health and safety mining reports. *Safety and health at work*, 12(2), 201-208.
- Tuna, G. Türkiyede meydana gelen iş kazalarının veri madenciliği kümeleme modelinde graf teori ile analizi.
- Tunncliffe Wilson G., Armitage P., 2012. Box-jenkins seasonal models, In *System Identification, Environmental Modelling, and Control System Design*, 153-170. London, Springer London.
- Turgut D., Temiz, İ., 2015. Ankara'daki Hava Kirliliği İçin Zaman Serileri Analizi ve Tahmin: Box-Jenkins Yaklaşımı, *Alphanumeric Journal*, 3(2), 131-138.
- Türkiye Cumhuriyeti. 2006. Sosyal Sigortalar ve Genel Sağlık Sigortası Kanunu (Kanun No: 5510, Md. 13). Resmî Gazete. Erişim adresi: [<https://www.mevzuat.gov.tr/mevzuatmetin/1.5.5510.pdf>]

- Türkiye İstatistik Kurumu, 2024. Erişim tarihi: 28.11.2024.
<https://www.tuik.gov.tr//>
- Uluslararası Çalışma Örgütü, 1981. Erişim tarihi: 26.12.2024.
<https://www.ilo.org/tr/resource/155-nolu-sagligi-ve-guvenligi-ve-calisma-ortamina-iliskin-sozlesme>
- Uluslararası Çalışma Örgütü, 2024. Erişim tarihi: 28.11.2024.
<https://www.ilo.org/>
- Van den Driessche P., Watmough J., 2002. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. *Mathematical biosciences*, 180(1-2), 29-48.
- Van den Driessche P., Watmough J., 2008. Further notes on the basic reproduction number, *Mathematical epidemiology*, 159-178.
- Van Zanden, J. L. (2009). *The long road to the industrial revolution: the European economy in a global perspective, 1000-1800 (Vol. 1)*. Brill.
- Verhulst P. F., 1845. *Resherches mathematiques sur la loi d'accroissement de la population*, *Nouveaux memoires de l'academie royale des sciences* 18, 1-41.
- Verma, A., Dhalmahapatra, K., & Maiti, J. (2023). Forecasting occupational safety performance and mining text-based association rules for incident occurrences. *Safety science*, 159, 106014.
- Vielma, C., Achebak, H., Quijal-Zamorano, M., Lloyd, S. J., Chevance, G., & Ballester, J. (2024). Association between temperature and occupational injuries in Spain: The role of contextual factors in workers' adaptation. *Environment International*, 192, 109006.
- Wang X., Tao Y., & Song X., 2009. Pulse vaccination on SEIR epidemic model with nonlinear incidence rate. *Applied Mathematics and Computation*, 210(2), 398-404.
- Weaver D., 1971. Symptoms of operational error, *Professional safety* 104(2), 39-42.
- Weiss H. H., 2013. The SIR model and the foundations of public health. *Materials matematics*, 0001-17.
- Whang S., Choi S., Jung E., 2011. A dynamic model for tuberculosis transmission and optimal treatment strategies in south korea, *Journal of theoretical biology* 279(1), 120-131.
- Williams C. K., Rasmussen, C. E., 2006. *Gaussian processes for machine learning*, Cambridge, MA: MIT press.

Wu, T. C., Liu, C. W., & Lu, M. C. (2007). Safety climate in university and college laboratories: Impact of organizational and individual factors. *Journal of Safety Research*, 38(1), 91-102

Yang K. H., Hsu J. Y., 2012. A new SIR-based model for influenza epidemic. *International Journal of Health and Medical Engineering*, 6(7), 701-706.

Yassi A., 2001. *Basic environmental health*, Oxford University Press, USA.

Yule G. U., 1927. VII. On a method of investigating periodicities disturbed series, with special reference to Wolfer's sunspot numbers. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 226(636-646), 267-298.

Zhou, Z., Irizarry, J., & Li, Q. (2013). Applying advanced technology to improve safety management in the construction industry: a literature review. *Construction Management and Economics*, 31(6), 606-622.

TEZ SÜRECİNDE ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Kaplanvural, S., Tosyalı, E., & Ekmekçi, İ. (2024). A new approach to determine occupational accident dynamics by using ordinary differential equations based on SIR model. *Scientific Reports*, 14(1), 23985.

