

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İŞ GÜVENLİĞİNDE RİSKLERİN İZLENMESİ VE
KONTROLÜ İÇİN BÜTÜNLEŞİK YAKLAŞIMLARIN
GELİŞTİRİLMESİ

Nazlı Gülüm MUTLU

DOKTORA TEZİ
Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
İş Güvenliği ve İşçi Sağlığı Programı

Danışman
Doç. Dr. Serkan ALTUNTAŞ

Ocak, 2020

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**İŞ GÜVENLİĞİNDE RİSKLERİN İZLENMESİ VE KONTROLÜ İÇİN
BÜTÜNLEŞİK YAKLAŞIMLARIN GELİŞTİRİLMESİ**

Nazlı Gülüm MUTLU tarafından hazırlanan tez çalışması 03.01.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı İş Güvenliği ve İşçi Sağlığı Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Serkan ALTUNTAŞ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Serkan ALTUNTAŞ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Alev TAŞKIN GÜMÜŞ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Fatih YILMAZ, Üye
Bandırma Onyedli Eylül Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Koray ALTUN, Üye
Bursa Teknik Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Özge Nalan BİLİŞİK, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Serkan ALTUNTAŞ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan İş Güvenliğinde Risklerin İzlenmesi ve Kontrolü İçin Bütünleşik Yaklaşımların Geliştirilmesi başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Nazlı Gülüm MUTLU

İmza



Bu çalışmanın üçüncü bölümü, Yıldız Teknik Üniversitesi Araştırma Fonu tarafından desteklenmiştir. Proje Numarası: FBA-2018-3303.

*Anneme ve Babama
ithaf ediyorum.*



TEŞEKKÜR

Öncelikle tez konumun belirlenmesinde, olası içeriğin oluşturulmasında ve çalışmaların yürütüldüğü her aşamada bilgi, birikim ve desteğini bir an bile eksik etmeyen çok değerli danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Serkan ALTUNTAŞ' a sonsuz teşekkürlerimi bildirmek isterim. Aynı zamanda, tez kapsamında yayınlanan ve yayına gönderilen makaleler Doç. Dr. Serkan ALTUNTAŞ Hocamın denetim ve değerlendirmeleri olmadan mümkün olmayacağını bildirmek isterim.

Tez izleme komite üyesi iken genç yaşta kaybettiğimiz Doç. Dr. Mustafa Batuhan AYHAN' ın tezin üçüncü bölümde sunulan çalışmanın kalitesinin arttırılmasına yönelik kıymetli yorum ve önerileri olmuştur. Değerli Hocam'a katkıları için teşekkürlerimi belirterek saygıyla anmak isterim.

Bandırma Onyedİ Eylül Üniversitesi'nden değerli Hocam Doç. Dr. Fatih YILMAZ'a tezin ikinci bölümde sunulan çalışmanın kalitesini artırıcı kıymetli öneri ve yorumlarını paylaştığı için teşekkürlerimi sunarım.

Tez savunma jürisinde yer alan Yıldız Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünden değerli Hocalarım Prof. Dr. Alev TAŞKIN GÜMÜŞ'e ve Dr. Öğr. Üyesi Özge Nalan BİLİŞİK'e, Bursa Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümünden Dr. Öğr. Üyesi Koray ALTUN'a kıymetli önerileri ve katkıları için teşekkürlerimi bildirmek isterim.

Amerika Birleşik Devletleri, University of Illinois Springfield'dan Dr. Öğr. Üyesi Sevilay ÖNAL'a çok değerli tecrübelerini benimle paylaştığı için teşekkürlerimi sunarım.

Yıldız Teknik Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümündeki mesai arkadaşlarıma destekleri için teşekkür etmek isterim.

Tezin beşinci bölümünde sunulan çalışma için patent dokümanlarının temin edilmesine yardımcı olan sevgili kardeşim Sunullah Oğuzbeyi MUTLU'ya ve değerli Gökçe SÖNMEZ'e teşekkürlerimi bildirmek isterim.

Tezimin ikinci bölümünde sunulan çalışma için iş kaza verilerini paylaşan T.C. Sosyal Güvenlik Kurumu'na ve Sigorta Primleri Genel Müdürlüğü'nde Şube Müdürü Sayın

Abdurrahman EKİCİ'ye teşekkürlerimi bildirmek isterim.

Tezimin üçüncü bölümünde sunulan çalışma için ihtiyacım olan maddi desteği sağlayan Yıldız Teknik Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunarım.

Son olarak, sonsuz sevgi ve güvenleri ile beni cesaretlendiren ailem'e, manevi güç kaynağım canım babam Uzm. Dr. Tahir Dursun MUTLU'ya şükranlarımı sunarak sevgi, saygı ve özlemle anmak isterim.

Nazlı Gülüm MUTLU



İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	x
KISALTMA LİSTESİ	xii
ŞEKİL LİSTESİ	xiv
TABLO LİSTESİ	xvi
ÖZET	xx
ABSTRACT	xxii
1 Giriş	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	5
1.3 Hipotez	5
1.4 Kullanılan Metodolojiler	7
2 Üretim Sistemlerinde İş Risklerinin Veriye Dayalı Analizi	11
2.1 Özet	11
2.2 Giriş	11
2.3 İş Kazaları Literatür İncelemesi	14
2.4 Materyal ve Metot	16
2.4.1 Veri Seti ve Veri Ön işleme	16
2.4.2 Veriyi Anlama-İstatistiksel Analiz	19
2.4.3 Özellik Seçme Analizi	24
2.4.4 Karar Ağaç Model Analizi	26
2.4.5 İlişkilendirme Kuralları Madenciliği	31
2.5 Sonuçlar	38
3 İş Sağlığı ve Güvenliği için FMEA-FTA-BIFPET Yöntemlerine Dayanan Bir Risk Analiz Yaklaşımı: Tekstil Sektöründe Uygulama	43
3.1 Özet	43
3.2 Giriş	44

3.3	Literatür Özeti	46
3.4	Kullanılan Yöntemler	49
3.4.1	Hata Ağacı Analizi- Fault Tree Analysis (FTA)	49
3.4.2	Hata Türü ve Etkileri Analiz Yöntemi-Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)	50
3.4.3	Zamanın Bulanık Olasılık Tahmininde İnaç - Belief in Fuzzy Probability Estimation of Time (BIFPET) Algoritması	54
3.4.4	Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği: Program Evaluation and Review Technique (PERT) Dağılımı	55
3.5	Önerilen Yöntem	56
3.6	FMEA-FTA-BIFPET, FMEA-FTA-PERT Dağılımının Bütünleştirilmesi ve Gerçek Bir Endüstride Uygulanması	57
3.6.1	Problemin Tanımlanması	57
3.6.2	Uygulama	59
3.7	Bulgular	67
3.8	Değerlendirme	68
3.9	Sonuçlar	85
4	İş Sağlığı ve Güvenliğinde Çoklu Risk Analizi için Duyarlı Öncelik Sıralama Tekniği: Endüstriyel Vaka Çalışmaları	87
4.1	Özet	87
4.2	Giriş	87
4.3	Literatür İncelemesi	89
4.4	Metodoloji	95
4.4.1	Duyarlı Öncelik Sıralama Tekniği (Technique of Precise Order Preference: TPOP)	95
4.5	Uygulama	98
4.5.1	Vaka Çalışması 1	99
4.5.2	Vaka Çalışması 2	101
4.6	Tartışma ve Değerlendirme	105
4.7	Sonuçlar	108
5	İstatistiksel Kontrol Grafikleri ile İş Sağlığı ve Güvenliği Alanındaki Güvenlik Teknolojilerinin Değişiminin İzlenmesi	110
5.1	Özet	110
5.2	Giriş	111
5.3	Literatür İncelemesi	113
5.3.1	İş Sağlığı ve Güvenliği için Teknolojilerin Kullanımı ve Geliştirilmesi	113
5.3.2	Patent Analizi	117

5.3.3	Zaman Serisi ile Tahminleme ve Modelleme	120
5.3.4	İstatistiksel Kontrol Grafiklerinin Oluşturulması	121
5.4	Analiz Yöntemi	123
5.4.1	Zaman Serisi Analizi	124
5.4.2	I-MR Grafiğinin Oluşturulması	124
5.4.3	S-eğrisi ile Büyüme Modelleme	126
5.5	Verilerin Toplanması, Analizi ve Elde Edilen Bulgular	126
5.5.1	Patent Dokümanlarının Toplanması	126
5.5.2	İş sağlığı ve Güvenliği Alanındaki Güvenlik Teknolojilerindeki Değişimin İzlenmesi ve Elde Edilen Bulgular	126
5.5.3	S-eğrisi ile Büyüme Modelleme ve Elde Edilen Bulgular	134
5.6	Sonuçlar	134
6	Sonuçlar ve Öneriler	138
6.1	Önemli Sonuçlar	138
6.2	Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışma Önerileri	139
6.2.1	İkinci Bölüm için Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışma Önerileri . . .	139
6.2.2	Üçüncü Bölüm için Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışma Önerileri . .	140
6.2.3	Dördüncü Bölüm için Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışma Önerileri	140
6.2.4	Beşinci Bölüm için Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışma Önerileri . .	140
A	Ekler	142
	Kaynakça	147
	Tezden Üretilmiş Yayınlar	174

SİMGE LİSTESİ

aO_i^{jd}	O_i^{jr} değerine 1, 2 ve 3. karar verici tarafından atanan olasılık değerleri
αO_i^{jd}	aO_i^{jd} değerine 4. karar verici tarafından atanan inanç değeri
bO_i^{jl}	O_i^{jr} değerinin beklenen değeri
cO_i^{jl}	bO_i^{jl} beklenen değere olan inancın derecesi
d	Karar verici
$E(Q_{OHT_i^{jr}})$	$(Q_{OHT_i^{jr}})$ değeri için elde edilen ortalama fayda değerleri
$E(OHT_i^j)$	Her bir hata türünün potansiyel kök nedeni için nihai beklenen olasılık değerleri
$E(pRPN_i^j)$	Her bir hata türünün potansiyel kök nedeni için PERT dağılımına göre beklenen risk öncelik sayısı
$E(pOHT_i^j)$	Her bir hata türünün potansiyel kök nedeni için PERT dağılımı ile hesaplanan beklenen Olasılık değeri
$E(RPN_i^j)$	Her bir hata türünün potansiyel kök nedeni için beklenen risk öncelik sayısı
e_y	y'nci risk analiz yaklaşımı için entropi değeri
$ f_{xy} $	y'nci risk analiz yaklaşımı ile x'nci hata türü için belirlenen risk skoru değerinin mutlak değeri
f_y	y'nci risk analiz yaklaşımı ile hesaplanmış minimum risk skoru değeri
g_{xy}	$ f_{xy} $ 'nin normalize edilmiş değeri
HT_i^j	i sınıfındaki bir hata türünün j sınıfında bir kök nedeni
HT_x	x'nci hata türü
h_{xy}	y'nci risk analiz yaklaşımı ile x'nci hata türü için belirlenen nihai seçim değerinin üssü
IG	Bilgi kazancı (Information Gain)

O_i^{jr}	BIFPET algoritmasına göre, i sınıfındaki bir hata türünün j sınıfında bir kök nedenin iyimser-ortalama-kötümser olasılık değerleri
O_i^j	FMEA yöntemine göre, i sınıfındaki bir hata türünün j sınıfında bir kök nedenin olasılık değeri
PIG	Bilgi kazanç yüzdesi (Percentage of Information Gain)
PSI_x	x'nci hata türü için nihai seçim indeks değeri (Precise selection index)
RPN_i^j	FMEA yöntemine göre, i sınıfındaki bir hata türünün j sınıfında bir kök nedenin risk öncelik sayısı
RS_{xy}	y'nci risk analiz yaklaşımı ile x'nci hata türü için belirlenen risk skoru değeri
S^1, S^2	Sırasıyla 1'nci ve 2'nci vaka için karar matrisi
s_y	y'nci risk analiz yaklaşımı için görünür ağırlık değeri
τO_i^{jr}	O_i^{jr} değerinin üyelik derecesi
τ_{xy}	y'nci risk analiz yaklaşımı ile x'nci hata türü için belirlenen risk skoru değerinin normalize edilmiş değeri
$Q_{OHT_i^{jr}}$	O_i^{jr} değerinin bulanık olasılık değeri
w_y	y'nci risk analiz yaklaşımı için belirlenen kesin ağırlık değeri

KISALTMA LİSTESİ

AHP	Analitik Hiyerarşi Proses
ARIMA	Autoregressive Integrated Moving Average
BIFPET	Belief In Fuzzy Probability Estimation of Time
FTA	Fault Tree Analysis
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
FP-Growth	Frequent Pattern-Growth
GF	Kaza esnasında yürütülen genel faaliyet
GYB	Kazanın gerçekleştiği yer, bölüm
HT	Hata Türü
IEC	International Electrotechnical Commission
I-MR	Individual-Moving Average
ILO	International Labor Organization
ILOSTAT	International Labour Organization Statistics and Database
ISO	International Organization for Standardization
İSG	İş Sağlığı ve Güvenliği
KT	Kaza Türü
MAG	Kaza esnasında kullanılan malzeme, araç, gereç
MCDM	Multiple Criteria Decision Making
MES	Kazazedenin mesleği
NASA	National Aeronautics and Space Administration
OSHA	Occupational Safety and Health Administration
ÖF	Kaza esnasında yürütülen özel faaliyet
PERT	Program Evaluation and Review Technique

QFD	Quality Function Deployment
SGK	Sosyal Güvenlik Kurumu
TPOP	Technique of Precise Order Preference
USPTO	United States Patent and Trademark Office



ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Türkiye’de 2013 - 2017 yıllarında yaşanan iş kazaları, ölümlü kazalar ve meslek hastalıklarının dağılımı [25].	7
Şekil 1.2	Riskleri izlemek ve kontrol etmek için önerilen yaklaşımların özeti.	9
Şekil 1.3	Riskleri izlemek ve kontrol etmek için önerilen yaklaşımlarda kullanılan yöntemler.	10
Şekil 2.1	Türkiye için ölümlü kaza sıklık oranı ve 85 ülke arasındaki sıralamasının yıllara göre dağılımı [5].	13
Şekil 2.2	İmalat sistemlerinde mesleki risklerin veri odaklı modellerle değerlendirilmesi.	18
Şekil 2.3	Sektörlerin dağılımı (n=242.537).	23
Şekil 2.4	Kaza sebeplerinin dağılımı (n=242.537).	23
Şekil 2.5	Kayıp iş günü dağılımı (n=242.537).	23
Şekil 2.6	Kaza sonrası sigortalının durumu (n=242.537).	24
Şekil 2.7	Kaza sayılarının yıllara göre dağılımı (n=242.537).	25
Şekil 2.8	Kaza türü için en önemli tahmin değişkenleri ve ağırlık yüzdeleri (n=242.537).	25
Şekil 2.9	Kazanın gerçekleştiği yer, bölüm (GYB) bakımından kaza tiplerinin ağaç modeli (J48).	27
Şekil 2.10	Kaza anında kullanılan malzeme, araç, gereç: MAG bakımından kaza tiplerinin ağaç modeli (J48).	29
Şekil 2.11	Özel Faaliyet bakımından kaza tiplerinin ağaç modeli (J48).	29
Şekil 2.12	Genel Faaliyet bakımından kaza tipleri ağaç modeli (J48).	30
Şekil 2.13	Kazazedenin mesleği (MES) bakımından kaza tiplerinin ağaç modeli (Random Tree).	30
Şekil 2.14	Çeşitli minimum destek (support) değerleri için elde edilen kural sayısı ve kuraldaki en yüksek öge sayısı.	32
Şekil 2.15	Kaza tipleri bakımından elde edilen kural sayıları.	33
Şekil 2.16	En güçlü 90 kurala göre SA ve PD etki faktörlerinin kaza tiplerinde görülme durumları.	40
Şekil 2.17	En güçlü 90 kurala göre MES ve GF etki faktörlerinin kaza tiplerinde görülme durumları.	41

Şekil 2.18	En güçlü 90 kurala göre MAG etki faktörünün kaza tiplerinde görülme durumları.	42
Şekil 3.1	Türkiye için yıllara göre iş kazaları ölüm ağırlığı dağılımı [118]. . .	44
Şekil 3.2	Önerilen yaklaşım.	57
Şekil 3.3	Önerilen yaklaşımdaki bilgi akışı.	58
Şekil 3.4	Boyama işletmesinin hata ağacı analizi.	72
Şekil 3.5	Risk derecelerinin karşılatılması.	73
Şekil 3.6	Olasılık değerlerinin karşılaştırılması.	73
Şekil 3.7	Şiddet değerlerinin karşılaştırılması.	84
Şekil 3.8	Saptanabilirlik değerlerinin karşılaştırılması.	85
Şekil 4.1	Risk değerlendirme yöntemleri [234].	90
Şekil 4.2	Çalışmada ele alınan problem ve çözüm yaklaşımı.	98
Şekil 4.3	Nükleer yeniden ısıtma valf sistemindeki hata türleri için duyarlı sıralama düzeni (birinci vaka).	102
Şekil 4.4	Takım tezgahı hata türleri için duyarlı sıralama düzeni (ikinci vaka).	106
Şekil 5.1	Yürütülen çalışmanın akış şeması.	127
Şekil 5.2	USPTO'dan elde edilen İSG alanındaki teknolojiler ile ilgili patent sayıları ve değişimleri.	128
Şekil 5.3	Başlangıçta uydurulmuş (fit edilmiş) eğri.	129
Şekil 5.4	1947 - 1988 yılları için I-MR grafiği.	129
Şekil 5.5	1947 - 1989 yılları için I-MR grafiği.	130
Şekil 5.6	1947 - 1988 yılları için uydurulmuş (fit edilmiş) eğride belirgin bir sapmanın tespit edilmesinden sonraki eğri durumu.	130
Şekil 5.7	1988 - 2011 yılları için uydurulmuş (fit edilmiş) eğri.	131
Şekil 5.8	1988 - 2011 yılları için I-MR grafiği.	131
Şekil 5.9	1988 - 2012 yılları için I-MR grafiği.	132
Şekil 5.10	1988 - 2013 yılları için I-MR grafiği.	132
Şekil 5.11	1988 - 2011 yılı için uydurulmuş (fit edilmiş) eğride belirgin bir sapmanın tespit edilmesinden sonraki eğri durumu.	133
Şekil 5.12	2011 - 2018 yılı için uydurulmuş (fit edilmiş) eğri.	133
Şekil 5.13	2011 - 2018 yılları için I-MR grafiği.	134
Şekil 5.14	Uydurulmuş (fit edilmiş) eğrilerin karşılaştırılması.	137
Şekil 5.15	İş sağlığı ve güvenliği teknolojilerinin patent sayıları için S-eğrisi. . .	137

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	İş kazalarının veri madenciliği uygulamaları ile analiz edildiği çalışmalar.	17
Tablo 2.2	Kaza analizinde kullanılan nitelikler.	17
Tablo 2.3	Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537).	19
Tablo 2.4	Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537), (Devamı-1).	20
Tablo 2.5	Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537), (Devamı-2).	21
Tablo 2.6	Kaza türünü etkileyen nitelikleri değerlendirmek için kullanılan değerlendirici yöntemler, arama yöntemleri ve özellik seçme modu.	25
Tablo 2.7	Kaza türü 1 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.	34
Tablo 2.8	Kaza türü 2 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.	34
Tablo 2.9	Kaza türü 3 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.	34
Tablo 2.10	Kaza türü 4 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.	35
Tablo 2.11	Kaza türü 5 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.	35
Tablo 2.12	Kaza türü 6 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.	35
Tablo 2.13	Kaza türü 7 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.	36
Tablo 2.14	Kaza türü 8 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.	36
Tablo 2.15	Kaza türü 9 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.	36
Tablo 2.16	Her bir kaza türü için elde edilen ilişkilendirme kurallarında gözlenen niteliklerin sayısı.	37
Tablo 2.17	Kurallarda en çok ve en az gözlenen alt nitelikler ve mutlak yüzdeleri.	38
Tablo 3.1	Risk analiz ve değerlendirme yöntemleri [32]	48
Tablo 3.2	FMEA yönteminde eleştirilen hususlar (IEC 60812 [48], Liu vd. [45] ve Liu [49] çalışmalarına dayanılarak ve geliştirilerek hazırlanmıştır).	53
Tablo 3.3	Boyama işletmesi ve iş süreçleri.	59
Tablo 3.4	Boyama işletmesi için FMEA ekibi.	60
Tablo 3.5	Olasılık değerlendirme skalası.	61
Tablo 3.6	Şiddet değerlendirme skalası.	62
Tablo 3.7	Saptanabilirlik değerlendirme skalası.	63

Tablo 3.8	Risk kabul edilebilirlik seviyeleri.	63
Tablo 3.9	HT_{18}^1 potansiyel kök nedenin, O, S ve D değerleri	64
Tablo 3.10	HT_{18}^1 potansiyel kök nedenin O, S ve D değerleri için İyimser, Ortalama ve Kötümser değerler	64
Tablo 3.11	Boyama işletmesindeki iş süreçleri için toplam ve ortalama risk yükleri.	68
Tablo 3.12	Boyama işletmesi, hata türleri ve potansiyel kök sebepler.	69
Tablo 3.13	Boyama işletmesi, hata türleri ve potansiyel kök sebepler, (Devamı-1).	70
Tablo 3.14	Boyama işletmesi, hata türleri ve potansiyel kök sebepler, (Devamı-2).	71
Tablo 3.15	Boyama işletmesi, hata türleri ve potansiyel kök sebepler, (Devamı-3).	73
Tablo 3.16	Boyama işletmesi için FMEA-FTA'dan elde edilen sonuçlar.	74
Tablo 3.17	Apri iş süreci için potansiyel kök nedenlerinin “FMEA-FTA-BIFPET yöntemi” ile oluşturulan Bulanık Olasılık değerleri ile hesaplanan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerleri.	75
Tablo 3.18	Apri iş süreci için potansiyel kök nedenlerinin “FMEA-FTA-BIFPET yöntemi” ile oluşturulan Bulanık Olasılık Değerleri ile hesaplanan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerleri (Devamı-1)	76
Tablo 3.19	Apri iş süreci için potansiyel kök nedenlerinin “FMEA-FTA-BIFPET yöntemi” ile oluşturulan Bulanık Olasılık Değerleri ile hesaplanan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerleri (Devamı-2)	77
Tablo 3.20	Apri iş süreci için potansiyel kök nedenlerinin “FMEA-FTA-BIFPET yöntemi” ile oluşturulan Bulanık Olasılık Değerleri ile hesaplanan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerleri (Devamı-3)	78
Tablo 3.21	Apri iş süreci için potansiyel kök nedenlerin “FMEA-FTA-PERT dağılımı” ile hesaplan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik Değerleri.	79
Tablo 3.22	Apri iş süreci için potansiyel kök nedenlerin “FMEA-FTA-PERT dağılımı” ile hesaplan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik Değerleri (Devamı-1).	80
Tablo 3.23	Apri iş süreci için potansiyel kök nedenlerin “FMEA-FTA-PERT dağılımı” ile hesaplan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik Değerleri (Devamı-2).	81
Tablo 3.24	Apri iş süreci için potansiyel kök nedenlerin “FMEA-FTA-PERT dağılımı” ile hesaplan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik Değerleri (Devamı-3).	82
Tablo 3.25	FMEA-FTA; FMEA-FTA-BIFPET; FMEA-FTA-PERT dağılımı ile elde edilen Risk Öncelik Sayıları ve Risk Dereceleri.	83
Tablo 3.26	Hata türü potansiyel kök nedenler için kabul edilebilirlik düzeylerinin karşılaştırılması.	83

Tablo 3.27	FMEA'da eleştirilen ve gelişme sağlanan hususlar için yöntemlerin karşılaştırılması.	84
Tablo 3.28	Yöntemler ve 15 potansiyel kök neden için elde edilen sonuçlar . .	85
Tablo 4.1	Nükleer yeniden ısıtma valf sistemi için hata türleri ve şiddet (S), olasılık (O), saptanabilirlik (D) değerleri [244].	99
Tablo 4.2	Hata türleri için 4 farklı yaklaşım ile elde edilen nihai risk değerleri [244].	99
Tablo 4.3	Normalize edilmiş risk skoru değerleri (birinci vaka).	100
Tablo 4.4	Her bir risk analiz yaklaşımı için e_y , s_y , s_y' , S_y' ve w_y değerleri (birinci vaka).	100
Tablo 4.5	Her bir hata türü için her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorunun g_{xy} değerleri (birinci vaka).	101
Tablo 4.6	Her bir hata türü için her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorunun h_{xy} değerleri (birinci vaka).	101
Tablo 4.7	Birinci vakada her bir hata türü için her bir risk analiz yöntemine göre risk dereceleri ve TPOP ile elde edilen risk dereceleri.	102
Tablo 4.8	Takım tezgahı için tanımlanan hata türleri [246].	103
Tablo 4.9	Hata türlerinin 3 farklı yaklaşım ile elde edilen nihai risk değerleri [246].	103
Tablo 4.10	Normalize edilmiş risk skoru değerleri (ikinci vaka).	105
Tablo 4.11	Her bir risk analiz yaklaşımı için e_y , s_y , s_y' , S_y' ve w_y değerleri (birinci vaka).	105
Tablo 4.12	Her bir hata türü için her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorunun g_{xy} değerler (ikinci vaka).	106
Tablo 4.13	İkinci vakada her bir hata türü için her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorunun h_{xy} değerleri.	107
Tablo 4.14	Her bir hata türünün, her bir risk analiz yöntemine göre risk dereceleri ve TPOP ile elde edilen risk dereceleri (ikinci vaka). . . .	108
Tablo 5.1	Patent analiz yöntemleri.	117
Tablo 5.2	1947 - 1988 yılları için en düşük MAPE değerini dikkate alan modelleme sonuçları.	128
Tablo 5.3	1988 - 2011 yılları için en düşük MAPE değerini dikkate alan modelleme sonuçları.	131
Tablo 5.4	2011 - 2018 yılları için en düşük MAPE değerini dikkate alan modelleme sonuçları.	133
Tablo A.1	Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537). .	143
Tablo A.2	Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537), (Devamı-1).	144

Tablo A.3 Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537), (Devamı-2).	145
Tablo A.4 Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537), (Devamı-3).	146



İş Güvenliğinde Risklerin İzlenmesi ve Kontrolü İçin Bütünleşik Yaklaşımların Geliştirilmesi

Nazlı Gülüm MUTLU

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı
Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Serkan ALTUNTAŞ

İş güvenliği uzmanları kazaları önlemek için yasal düzenlemeleri de dikkate alarak birçok girişimde bulunmaktadır. Bu tezin amacı, iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için riskleri izlemeyi ve kontrol etmeyi sağlayan bütünleşik yaklaşımlar sunmaktır. İlk olarak, özellik seçme (feature selection), karar ağacı modellemesi (decision tree modeling) ve ilişkilendirme kuralları madenciliği yöntemlerinden oluşan veri madenciliği yaklaşımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşım ile kaza türleri üzerinde en çok etkiye sahip olan kaza faktörleri belirlenmekte ve kazalar arasındaki ilişkiler elde edilmektedir. Bu sayede kazaya neden olan ve iyileştirilmesi gereken riskli faktörlere odaklanılması sağlanmaktadır. İkinci çalışmada, risk analiz ve değerlendirme sürecindeki tüm paydaşların görüşlerinin alınmasını sağlanarak gerçeğe daha yakın bir risk değerlendirme tablosu elde etmek üzere proaktif bir risk analiz ve değerlendirme yaklaşımı önerilmiştir. Hata Türleri ve Etkileri Analiz (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) yöntemi güvenlik uzmanları tarafından sıklıkla kullanılmasına rağmen bazı zayıflıkları bulunmaktadır. Bu nedenle, FMEA yöntemi Hata Ağacı Analiz (Fault Tree Analysis: FTA) yöntemi, Zamanın Bulanık Olasılık Tahmininde İnanç (Belief In Fuzzy Probability Estimation of Time: BIFPET) algoritması ile entegre edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre FMEA yöntemi performansı iyileştirilmiş ve proaktif bir risk analiz sonucu elde edilmiştir. Üçüncü çalışmada ise, farklı risk değerlendirme yöntemleri ile elde edilen farklı risk sıra düzeni nedeniyle ortaya çıkan karışıklığı önlemek ve tek bir risk sıra düzeni elde etmek amacıyla Duyarlı Öncelik Sıralama Tekniğinin (Technique of Precise Order Preference: TPOP) kullanılması önerilmiştir. Dördüncü çalışmada ise, güvenlik uzmanlarının iş sağlığı ve

güvenliği alanındaki güvenlik teknolojilerindeki değişimleri ve gelişimleri izlemesini sağlayan bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yaklaşım güvenlik teknolojileri ile ilgili patent verilerini dikkate alarak zaman serisi analizi, istatistiksel kontrol grafiklerinin kullanımı ve güvenlik teknolojilerinin büyüme potansiyelini belirlemek üzere S-eğrilerinin oluşturulmasına dayanmaktadır. Bu tezin sonuçlarının iş güvenliği uzmanlarına ve karar vericilere, üretim ve servis sistemlerindeki olası riskleri azaltmalarına yardımcı olmaları beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: İş sağlığı ve güvenliği, veri madenciliği, risk analizi ve değerlendirme, TPOĞ patent analizi.



ABSTRACT

Development of Integrated Approaches for Monitoring and Controlling Risks in Occupational Safety

Nazlı Gülüm MUTLU

Department of Industrial Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Serkan ALTUNTAŞ

Occupational safety professionals take many initiatives in order to prevent accidents, taking into account the legal regulations. The aim of this dissertation is to introduce integrated approaches for monitoring and controlling risks to enhance occupational health and safety. First, we propose the data mining approach for accident analysis, which includes feature selection, decision tree modeling and association rules mining method. Using this approach, we obtain the associations among accidents and determine the factors that have the most impact on accident types. In the second study, we propose a proactive risk analysis and evaluation approach in order to achieve a more realistic risk assessment table by gathering the opinions of all stakeholders in the risk analysis and evaluation process. Despite its frequent use by safety professionals, Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) method has several weaknesses. Therefore, we integrate FMEA with Fault Tree Analysis (FTA) and Belief in Fuzzy Probability Estimation of Time (BIPFET). In order to overcome confusion caused by the rankings of different risk assessment methods, in the third study we propose the use of Technique of Precise Order Preference (TPOP) whose aim is to achieve a single risk ranking. In the fourth study, we use time series analysis and statistical control charts and draw an S-curve to determine technology life cycle of safety based on patent data to enable safety professionals to monitor the changes and developments of safety technologies. The results of this dissertation help occupational safety professionals and decision makers to decrease the possible risks in manufacturing and service systems.

Keywords: Occupational health and safety, data mining, risk analysis and assessment, TPOP, patent analysis.

YILDIZ TECHNICAL UNIVERSITY
GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES



1.1 Literatür Özeti

Endüstri devrimleri ile birlikte üretim sistemleri, çalışanlar için ciddi riskler barındıran sistemlere dönüşmüştür. Söz konusu riskleri kontrol altına almak ve iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için ülkelerde ilk girişimler birer birer ortaya çıkmıştır. Endüstri devrimi sonrasında iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için kilometre taşı olarak da kabul edilen ilk yasa Birleşik Krallıkta 1802 yılında yayınlanan çıraklık yasası olarak da bilinen fabrikalar kanunudur [1]. Amerika Birleşik Devletleri'nde de endüstriyel kazaların artması nedeniyle 1900'lü yıllarının başından itibaren iş sağlığı ve güvenliği konusunda yasal düzenlemelerin oluşturulduğu bilinmektedir [2]. Devam eden süreçte, 1919 yılında 187 ülkede çalışan ve işverenleri tek bir çatı altında buluşturarak çalışma standartlarını oluşturan ve ilgili politikaları geliştiren Uluslararası Çalışma Örgütü (International Labor Organization: ILO), 1947 yılında resmen faaliyete başlayan ve bugüne kadar 22.810'dan fazla standart yayınlayan Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization: ISO) ve çalışanlar için sağlıklı ve güvenli çalışma koşullarının oluşturulması amacıyla 1970 yılında kurulan İş Sağlığı ve Güvenliği İdaresi (Occupational Safety and Health Administration: OSHA) sayesinde konunun dünya çapında öneminin ve yaygınlığının arttığını söylemek mümkündür. Ülkelerin gelişmişlik seviyelerine göre iş sağlığı ve güvenliğine verilen önemde farklılıklar görülmektedir [3]. Gelişmiş ülkelere kıyasla gelişmekte olan ülkelerde sosyal, ekonomik ve politik problemler nedeniyle iş sağlığı ve güvenliğinin ihmal edildiği, bilimsel araştırmalar sonucunda elde edilen bilgiyi eyleme dönüştüren mekanizmalardan yoksun oldukları bilinmektedir [4]. İş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için organize olmuş kuruluşların girişimleri son derece değerli olmakla birlikte gelişmekte olan ülkelerde iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için daha fazla zorluğun aşılması gerekmektedir. Gelişmekte olan ülkeler sınıfında yer alan Türkiye için de iş sağlığı ve güvenliği problemlerinin ciddiyeti Uluslararası Çalışma Örgütü iş kaza istatistiklerinden anlaşılmaktadır [5]. Türkiye'de iş sağlığı ve güvenliği konulu akademik çabalar dikkat çekici düzeyde olmasına karşın, iş kazalarını

ve meslek hastalıklarını önlemek için daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır [6].

İş sağlığı ve güvenliği bakımından yeterli düzeyde gelişme sağlanamaması nedeniyle yaşanan iş kazaları sonucunda çalışanlar, işverenler, toplum ve devlet zarar görmektedir. Bu tez çalışmasında, başta Türkiye olmak üzere gelişmekte olan ülkelerin ortak problemi olan iş kazalarını ve kayıplarını önlemek üzere çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesine odaklanılmıştır. Aqlan ve Ali [7] 'de risklerin izlenmesi ve kontrol edilmesinin kaza ve kayıpları önlemek, etkilerini azaltmak için uygulanan stratejilerin etkinliğinin denetlenmesi açısından büyük öneme sahip olduğunu ifade etmiştir. Hollnagel vd. [8] çalışmasında, kaza ve kayıpların, bir sistemin bileşenindeki başarısızlıktan ziyade, sosyo-teknik sistemin geliştirilmesi, tasarlanması ve işletilmesi sürecinde güvenliği kontrol eden mekanizmaların yetersiz olmasından kaynaklandığını ifade etmiştir.

İş sağlığı ve güvenliği probleminin varlığına işaret eden en önemli göstergelerden birisi iş kazalarıdır [9]. Kazalar ile başa çıkmak için geçmiş kazaların analiz edilmesi Tixier vd.[10] ve kazalardan öğrenilen kaza riskleri dikkate alınarak önlemler geliştirilmesi son derece önemlidir. Ayrıca, kaza analizi ile kazaların neden ve nasıl gerçekleştiği belirlenmekte ve bu sayede iş sağlığı ve güvenliği yönetim sisteminde gereken güncellemeler yapılabilmektedir [11]. İş kazalarının analiz edilmesi ile ilgili daha önce yürütülen çalışmalar arasında: kazaların örgüt, çalışan ve kaza faktörleri açısından istatistiksel yöntemler ile analiz edildiği [12–18], veri madenciliği yaklaşımları ile kazaların analiz edildiği araştırmaların yürütüldüğü bilinmektedir [19–23]. Bu çalışmalarda en dikkat çeken iki önemli husustan birincisi imalat sanayii ile ilgili çalışma sayısının oldukça sınırlı düzeyde olmasıdır [20, 24]. İkincisi ise zaman içerisinde dijital ortamda kayıtlanan veri sayısına bağlı olarak analiz edilen kaza kayıt sayısının artış göstermesidir. Bununla birlikte, Türkiye’de 2013 - 2016 yıllarında yaşanan iş kazalarının %42,20’si meslek hastalıklarının %46,24’ü imalat sektöründe yaşanmıştır [25]. İş kazalarının analiz edilmesi ile kazalar üzerinde etkili olan nedenlere odaklanılarak önlemler geliştirilmesi ile güvenlik performansının geliştirilebileceği bilinmektedir [26–28]. Söz konusu sebeplerden dolayı, tez’in ikinci bölümünde Türkiye’deki imalat sanayii’nde yaşanan iş kazaları dikkate alınmıştır. Kazalar üzerinde etkili olan önemli faktörlerin belirlenmesi ve bu faktörlerin dikkate alındığı, kaza sonuç değişkeni bakımından kaza kurallarının elde edilmesini sağlayan bütünlük bir veri madenciliği yaklaşımının kullanılması önerilmiştir.

İş sağlığı ve güvenliğinin gelişmesinde son derece önemli bir role sahip olan bir diğer husus ise tehlike/risk analizleri ve değerlendirme uygulamalarının yürütülmesidir. Tehlike, kaza ve istenmeyen sonuçların ortaya çıkmasına neden olan potansiyel durum

olarak tanımlanmaktadır [29]. Tehlikeler iş sistemlerine özgü olup, söz konusu sistemdeki tehlikelerin güvenilir bir şekilde tanımlanabilmesi için mesleki tecrübe oldukça önemli bir rol oynamaktadır [30]. Kahnzodo vd. [30] yaralanma riskinin hem tanımlanması hem de üstesinden gelinebilmesi için tehlikeleri güvenilir bir şekilde tanımlamanın önemine dikkat çekmiştir ve tehlike tanımlama yöntemlerini yanlı reaktif, yanlı proaktif ve yanlı olmayan proaktif yaklaşımlar olmak üzere 3 sınıfta listelemiştir. Yanlı reaktif yaklaşım, bir kaza meydana geldikten sonra kaza olayının analiz edilmesi ile karakterizedir. Yanlı proaktif yaklaşım, olası tehlikeler ile sistem ile ilgili kayıtlı geçmiş hata/tehlike bilgilerine dayanılarak tehlike analizinin yapılmasıdır. Yanlı olmayan proaktif yaklaşımda ise, olay/kaza meydana gelmeksizin ve kısıtlayıcı varsayımlar olmaksızın yapılan tehlike analiz yaklaşımlarıdır. Söz konusu analiz yaklaşımlarının detayları için Khanzode vd. [30]'nin çalışması incelenebilir. Tehlikenin meydana gelme sıklığı ve ortaya çıkaracağı sonuç, riski oluşturan en temel faktörler olarak tanımlanmakta ve bu iki faktördeki belirsizliğin bir fonksiyonu ile de risk tanımlanmaktadır [31]). Risk analizi ve değerlendirmesi ile ilgili yürütülen çalışmalar arasında, Tixier vd. [10] risk değerlendirme yöntemlerini kalitatif, kantitatif, deterministik ve olasılıklı olmak üzere 4 kriterin birleşimlerinde oluşan 6 grupta listelemiştir. Marhaviyas vd. [32] ise klasik risk analiz ve değerlendirme yöntemlerini kalitatif, kantitatif ve hibrid yaklaşımlar olarak üç sınıfta ifade etmiştir. Literatürde, zaman içerisinde daha da karmaşık hale gelen çalışma ortamlarındaki riskleri analiz etmek için klasik yöntemlerin ihtiyacı karşılamadığı ve geliştirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [33, 34]. Araştırmacılardan bazıları, klasik risk analiz ve değerlendirme yöntemlerini geliştirmek için bulanık mantık, çok kriterli karar verme yöntemleri ile hibrid etmeyi önermiştir [35–41]. Gul [42] ise risk analiz ve değerlendirme yöntemleri ile çok kriterli karar verme yöntemi ve bulanık mantık yaklaşımlarının entegre edildiği 40 yöntem listelemiştir. Geliştirilen yöntemlerin büyük bir kısmının ise FMEA temelli olduğunu ifade etmiştir. FMEA yöntemi çok geniş bir perspektifte sıklıkla kullanılan bir yöntem olmasına karşın geliştirilmesi gerektiği konusunda haklı eleştiriler bulunmaktadır [43–49]. Tezin üçüncü bölümünde FMEA yöntemine dayanan bütünleşik bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntemin, güvenilir ve proaktif bir risk analiz ve değerlendirme yöntemi olarak kullanılması beklenmektedir.

Risk analizinin en önemli ve kullanışlı çıktılarından biriside risk derecesidir. Risk analizi sonucunda risklerin derecelendirilmesi/önceliklendirilmesi yöneticilerin karar vermelerini kolaylaştıran bir bilgi olarak kullanılmaktadır [50]. Risk öncelik derecesinin organizasyonel faydaları artırmak [51], yangın tehlikelerini derecelendirerek güvenliği geliştirmek [52], öncelik sırasına göre sağlık risklerini derecelendirmek ve güvenliği geliştirmek [53] gibi çeşitli amaçlar için kullanıldığı

bilinmektedir. Bununla birlikte, çoklu risk analiz yaklaşımları ile aynı tehlikler/hatalar için farklı risk önceliklerinin elde edilmesi de söz konusu olabilmektedir [54–56]. Söz konusu durum, karar vericiler için kafa karıştırıcı bir probleme yol açmaktadır. Literatürde daha önce dikkate alınmamış olan tutarsız risk sıra düzeni probleminin üstesinden gelmek ve daha güvenilir bir risk öncelik sıralaması elde edebilmek için risk derecelerini bütünleştirerek tek bir risk sıralama düzenin elde edilmesini önerilmiştir. Tutarsız risk derecesi problemini çözmek için kullanılabilecek yöntemlerden birisi Bairagi vd. [57] tarafından önerilen duyarlı öncelik sıralama tekniğinin (Technique of Precise Order Preference: TPOP) risk analiz ve değerlendirme sürecinde kullanılması önerilmiştir. Yöntem, risk analiz ve değerlendirme sürecine uyarlandığında çalışma prensibi, birden fazla risk analiz ve değerlendirme yöntemi ile aynı hata türleri için elde edilen nihai risk skorlarının kullanılmasına dayanmaktadır. Farklı yöntemlerin avantajlarının bütünleştirilmesi ile tek bir risk sıra düzeninin elde edilmesi sağlanabilmektedir. Bu sayede, karar vericiler için büyük kolaylık sağlaması ve iş sağlığı ve güvenliğinin gelişmesine katkı sunulması beklenmektedir. Bu nedenle, tez'in dördüncü bölümünde tutarsız risk sıra düzeni probleminin üstesinden gelmek üzere TPOP yönteminin uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Teknolojinin gelişmesi ile birlikte daha da karmaşık hale gelen endüstrilerde iş sağlığı ve güvenliği riskleri artmıştır [58, 59]. İş sağlığı ve güvenliği alanında güvenlik performansını artırmak için yeterli düzeyde olmasa da teknolojik araçların giderek yaygın bir şekilde kullanıldığı ve yeni güvenlik teknolojilerinin geliştirildiği de bilinmektedir [60–65]. Devam eden süreç için, işletme kaynaklarının verimli bir şekilde kullanılması ve yatırım kararlarına yardımcı olması için geçmiş ve şimdiki teknolojilerin doğru bir şekilde analiz edilmesine ve geleceğe ışık tutan bilgiler elde edilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Güvenlik teknolojilerinin izlenmesi ve önemli teknolojik değişimlerin belirlenmesi için Song ve Suh [66] ile Jeon ve Suh [67] çalışmalarında olduğu gibi, teknolojik gelişmelerin en önemli göstergelerinden birisi olan patent dökümanları [68–70] kullanılmıştır. Patent dökümanları kullanılarak teknoloji tahmin modeli oluşturmak ve önemli değişimleri belirlemek için ise Durmusoglu [71] tarafından önerilen zaman serisi tahmin modeli oluşturulması ve artık değerlerin kullanımına dayanan bireysel kontrol grafikleri (I-MR: Individual Moving Range) ile değişimin izlenmesine dayanan bir yol izlenmiştir. Daha önceki çalışmalarda, söz konusu yaklaşımının iş sağlığı ve güvenliği alanındaki güvenlik teknolojilerindeki değişimin izlenmesi ve tahmin modelinin geliştirilmesi sürecinde kullanıldığı bilinmektedir. Bu nedenle, tez'in beşinci bölümünde iş sağlığı ve güvenliği alanındaki güvenlik teknolojileri için önemli değişime neden olan yılların belirlenmesinin sağlamak üzere bütünlük bir yaklaşımının kullanılması önerilmiştir. Bu sayede değişime itici güç olan unsurlar araştırılabilecek, yatırım yapılmak

istenen teknolojilere karar verilmesine yardımcı olunabilecektir. Ayrıca, güvenlik teknolojilerinin kullanılması teşvik edilmesi, iş sağlığı ve güvenliğinin gelişmesi beklenmektedir.

Tez çalışmasından elde edilen bulguların risklerin izlenmesi ve kontrol edilmesi sürecinde kullanılması ile daha etkili aksiyon planlarının oluşturulacağı, iş yerlerinin güvenlik teknolojileri ile olan etkileşimlerinin artmasına vesile olunacağı, iş sağlığı ve güvenliğinin geliştirilmesine destek sağlanacağı ve literatüre katkı sunulacağı düşünülmektedir.

1.2 Tezin Amacı

Türkiye'deki iş kazaları ve meslek hastalıkları istatistikleri kaygı verici boyutlara ulaşmıştır. Mevcut yasal düzenlemeler ve uygulamalar yetersiz kalmakta, riskleri izlemek ve kontrol etmek için çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle tez kapsamında aralarında bilgi akışına imkan veren, riskleri izlemek ve kontrol etmek için dört bütünlük yaklaşımları önerilmiştir. Önerilen yaklaşımların kullanılması ile kazaların önlenmesi, iş sağlığı ve güvenliğinin gelişmesine katkı sunulması beklenmektedir.

1.3 Hipotez

Tez çalışmasında dikkate alınan esas problem iş kazalarıdır. Ölümle sonuçlanan kaza sıklığı bakımından Türkiye sıralaması Dünya çapında 1 ile 7 arasında değişmektedir [5]. Ülke çapında da iş sağlığı ve güvenliği probleminin ciddiyeti Şekil 1.1'de verilen istatistiklerden anlaşılmaktadır [25]. İş kazalarını önlemek için mevcut çözüm yaklaşımlarının geliştirilmesi gereksinimden ziyade bir zorunluluk olarak görülmektedir. Tez çalışmasının merkezinde yer alan iş kazaları probleminin yapısını anlamak, onu ve etkilerini ortadan kaldırmaya yarayacak çözüm yaklaşımlarını geliştirme üzerine odaklanılmıştır. Tezin ana hipotezi aşağıda verilmiştir.

Hipotez: İş güvenliğinde riskleri izlemek ve kontrol etmek için çok boyutlu bütünlük yaklaşımların kullanılması iş güvenliği ve işçi sağlığını olumlu yönde etkiler.

Ana hipotezi destekleyecek şekilde dört alt hipotez kurulmuştur. İş kazaları üzerinde kritik öneme sahip olan faktörlerin belirlenmesi ve bu faktörlerin risklerin değerlendirilmesinde ve önlenmesi aşamasında dikkate alınmasının hayati derecede öneme sahiptir [72]. Tezin ikinci bölümünde, iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için risklerin izlenmesi ve kontrolünü sağlamak üzere Türkiye'de yaşanan iş kazaları üzerinde en güçlü etkiye sahip faktörlerin tanımlanması ve kaza türleri açısından kaza

kurallarının keşfedilmesine odaklanılmıştır. Bu amaçla kurulan birinci alt hipotez aşağıdaki gibidir.

Hipotez a: İş kaza kayıtlarının veri madenciliği yaklaşımları kullanılarak derinlemesine analiz edilmesi ile geliştirilen güvenlik tedbirleri, iş sağlığı ve güvenliğini olumlu yönde etkiler (bakınız: Şekil 1.2’de ifade edilen Hipotez a).

İş sağlığı ve güvenliğini geliştirme çabalarından beklenen sonuçları elde edebilmek için güvenilir risk analiz ve değerlendirme araçlarının kullanılması da son derece önemlidir. Eduljee [73] çalışmasında, risk değerlendirmelerinde karar aşamasındaki problemlerin çözümüne yönelik ilgili uzman ve paydaş görüşlerine dayanan uzlaşılı bir çözüm geliştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Benzer şekilde, 2012 yılında yayınlanan iş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirme yönetmeliğinin 6. maddesinde de risk değerlendirmesinin işveren tarafından oluşturulan ve iş yerindeki tüm birimleri temsil eden çalışanın da dahil olduğu bir ekip tarafından yürütülmesi gerekliliği bildirilmiştir. Bu sebeplerden dolayı, söz konusu yönetmelikte belirtilen prensipler ile uyumlu olan, risklerin proaktif bir şekilde analiz edilmesi ve değerlendirilmesini sağlayan bir yöntem geliştirilmesine ihtiyaç bulunmaktadır. Tez kapsamında ikinci alt hipotez aşağıdaki gibi kurulmuştur.

Hipotez b: Kazalar üzerinde etkili olan faktörlerin dikakte alındığı aynı zamanda, risklerin proaktif bir şekilde değerlendirilmesi iş sağlığı ve güvenliğini olumlu yönde etkiler (bakınız: Şekil 1.2’de ifade edilen Hipotez b).

Tezde ele alınan alınan üçüncü problem; çoklu risk analiz ve değerlendirmeleri nedeniyle tutarsız risk derecesidir. Söz konusu probleme çözüm geliştirmek için kurulan üçüncü alt hipotez aşağıda verilmiştir.

Hipotez c: Güvenilir bir risk sıralama düzeni iş sağlığı ve güvenliğini olumlu yönde etkiler (bakınız: Şekil 1.2’de ifade edilen Hipotez c).

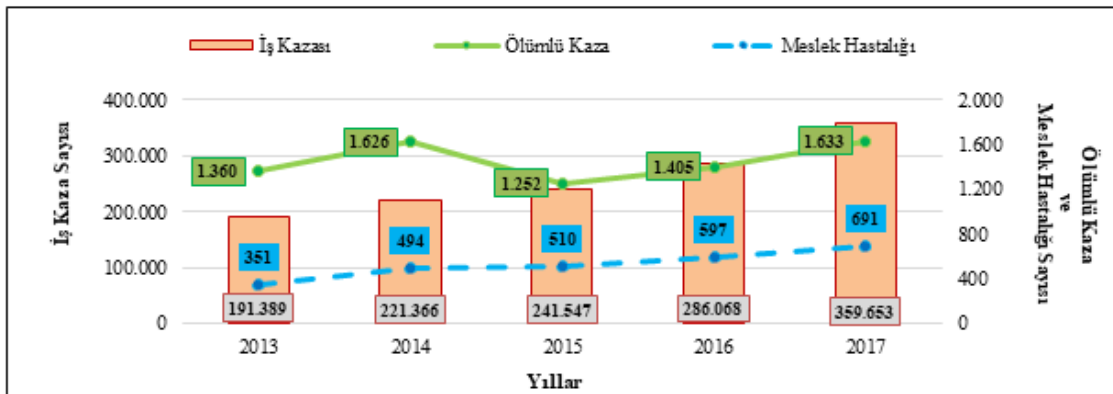
Tez kapsamında ele alınan dördüncü problem; dinamik bir çevrede oldukça hızlı bir gelişme gösteren iş sağlığı ve güvenliği alanındaki güvenlik teknolojilerindeki önemli değişimlerin olduğu yılların belirlenmesine odaklanılmıştır. Riskleri izlemek ve kontrol altına almak için söz konusu teknolojilerin avantajlarından yararlanabilmek ve iş sağlığı ve güvenliğinin gelişmesine katkı sunmak üzere tez kapsamında kurulan dördüncü alt hipotez aşağıdaki gibidir.

Hipotez d: Güvenlik teknolojilerindeki değişimlerin izlenmesi ile proaktif bir iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemlerinin tasarlanması ve iş sağlığı ve güvenliğinin geliştirilmesini olumlu yönde etkiler (bakınız: Şekil 1.2’de ifade edilen Hipotez d).

1.4 Kullanılan Metodolojiler

Tez çalışmasının ikinci bölümünde sunulan iş kazaları üzerinde etkili olan kritik faktörlerin belirlenmesi ve faktörlerin bir arada olma durumlarının keşfedilmesine odaklanılan çalışmada, veri madenciliği yöntemlerinden özellik seçme, ilişkilendirme kural madenciliği ve karar ağaç analiz yöntemleri uygulanmıştır (bakınız: Şekil 1.3’de ifade edilen II. Bölüm). Kaza türü üzerinde en çok etkiye sahip değişkenleri belirlemek için Weka 3.9.2 v. aracı kullanılmıştır. Özellik değerlendirme yöntemlerinden, InfoGainAttributeEval, ChiSquaredAttributeEval, FilterAttributeEval yöntemleri ve arama yöntemi olan Ranker kullanılmıştır. Bunun yanında, cevap değişkeni olan kaza türü üzerinde en çok etkiye sahip nitelikleri belirlemek için nitelik değerlendirme yöntemlerinden, ClassifierSubsetEval, CfsSubsetEval, FilterSubsetEval yöntemleri arama yöntemleri olan GreedyStepwise, ExhaustiveSearch, BestFirst ve GeneticSearch kullanılmıştır. İlişkilendirme kuralları madenciliği uygulamak için ise RapidMiner Studio v.9.0 programı kullanılmıştır. Kural çıkarımı için FP - Growth (Frequent Pattern - Growth) algoritmasından yararlanılmıştır. FP - Growth algoritması, veri setini FP - Tree isimli özel bir grafik yapısına dönüştürmekte, işlem kayıtlarının sıkıştırılması ile sık kullanılan ögeyi hesaplayan, alternatif bir yol izlemektedir [74]. Çalışmamızda kaza türü ve kaza türü üzerinde etkili olan faktörler bakımından karar ağaç modellerini oluşturmak için Weka 3.9.2 v. aracı kullanılmıştır. Karar ağaç modeli oluşturmak için, Quinlan [75] tarafından geliştirilen J48 algoritması ile her düğümün oluşturulmasında niteliklerin rastgele seçildiği ve ağaç kümelerinin oluşma şansının eşit olduğu bir sınıflandırma yapan Random Tree algoritması kullanılmıştır [76]. Bu çalışmanın yürütülmesi için gerekli olan ve kamu erişimine açık olmayan iş kaza kayıtları, 2016 yılında Sosyal Güvenlik Kurumu’ndan özel anlaşma ile temin edilmiştir.

Tez çalışmasının üçüncü bölümünde yürütülen, risklerin proaktif ve katılımcı bir bakış açısı ile analizini ve değerlendirmesini gerçekleştirmek üzere önerilen ikinci çalışmada



Şekil 1.1 Türkiye’de 2013 - 2017 yıllarında yaşanan iş kazaları, ölümlü kazalar ve meslek hastalıklarının dağılımı [25].

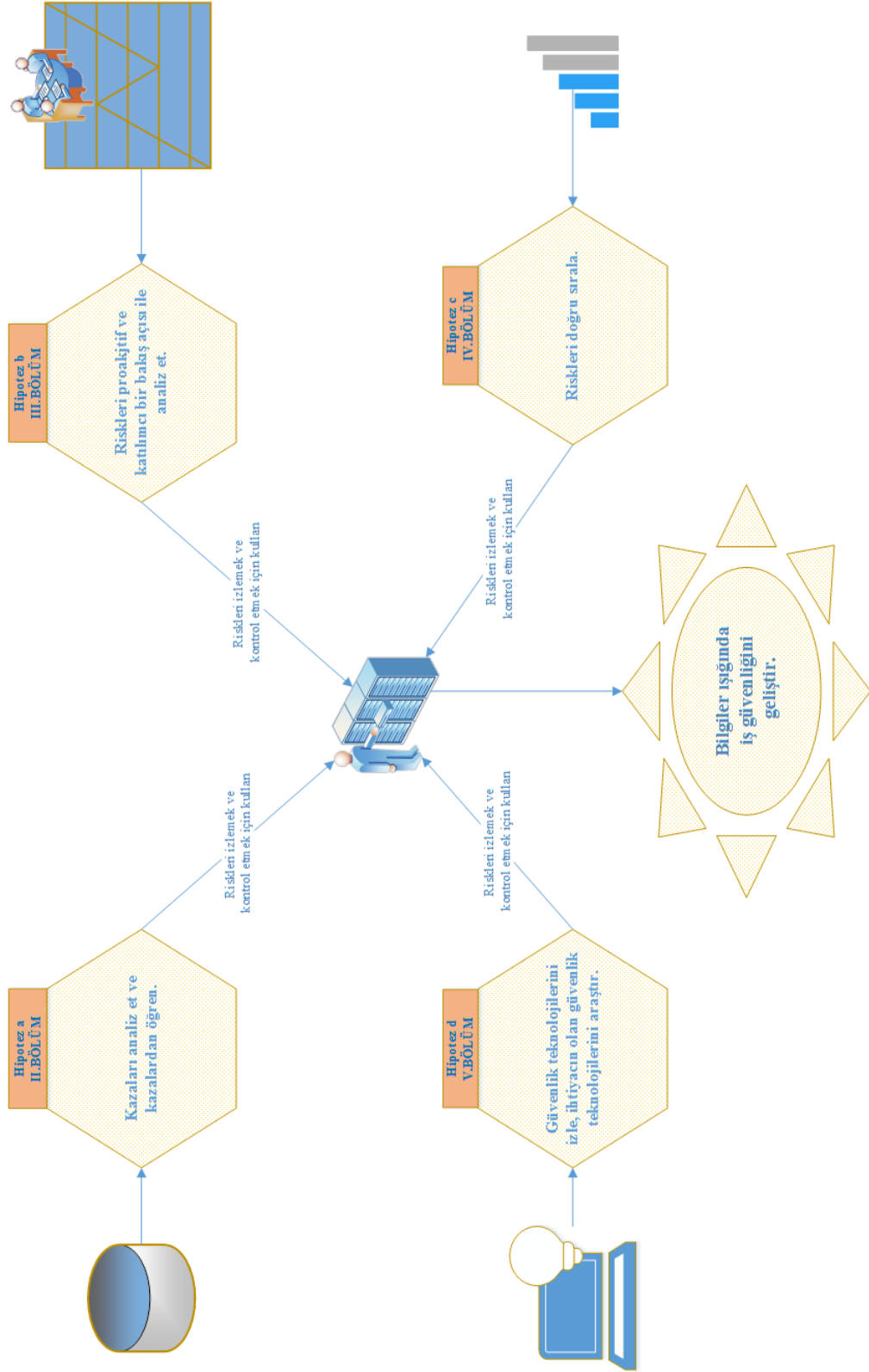
ise sırasıyla, Hata Türleri ve Etkileri Analiz (Failure Mode And Effect Analysis: FMEA), Hata Ağacı Analiz (Fault Tree Analysis: FTA) ve Sihpley vd. [77] tarafından önerilen Zamanın Bulanık Olasılık Tahmininde İnanç (Belief In Fuzzy Probability Estimation of Time: BIFPET) algoritması kullanılmıştır (bakınız: Şekil 1.3'de ifade edilen III. Bölüm). BIFPET yönteminin uygulama prensibi ile iş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirme yönetmeliğinde belirtilen risk değerlendirme ekibinin oluşturulması ve görüşlerinin alınması için önemli bir fonksiyonun yerine getirilmesi sağlanmıştır. Veriler, beyin fırtınası yöntemi ile toplanmıştır. FMEA yöntemi hata türlerini analiz etmek ve değerlendirmek, FTA yöntemi ise hata türü kök nedenlerini tanımlanmak için kullanılmıştır. Önerilen yöntemin uygulamasının yürütüleceği alandan sorumlu Mühendis, Kimyager, İş güvenliği uzmanı ve İşletme Müdürü ile birebir görüşme yapılarak verileri toplanmıştır. Yöntem performansını değerlendirmek için Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme (Program Evaluation and Review Technique: PERT) dağılımı da kullanılan yöntemler arasındadır.

Tez çalışması kapsamında risklerin izlenmesi ve kontrol edilmesini doğrudan etkileyen risk derecesi problemini çözmek üzere Bairagi vd. [57] tarafından önerilen duyarlı öncelik sıralama tekniğinin (Technique of Precise Order Preference: TPOP) ilk kez risk analiz ve değerlendirme sürecinde kullanılması önerilmiştir (bakınız: Şekil 1.3'de ifade edilen IV. Bölüm). Yöntem birden fazla risk önceliklendirme yönteminin avantajını bütünleştirme özelliği taşımaktadır. Önerilen yöntemin uygulanabilirliğini göstermek için daha önce literatürde yürütülen ve risk analiz ve değerlendirme yöntemleri ile elde edilen sonuçların karşılaştırıldığı iki endüstriyel vakadaki hatalar ve nihai risk skoru verileri kullanılmıştır.

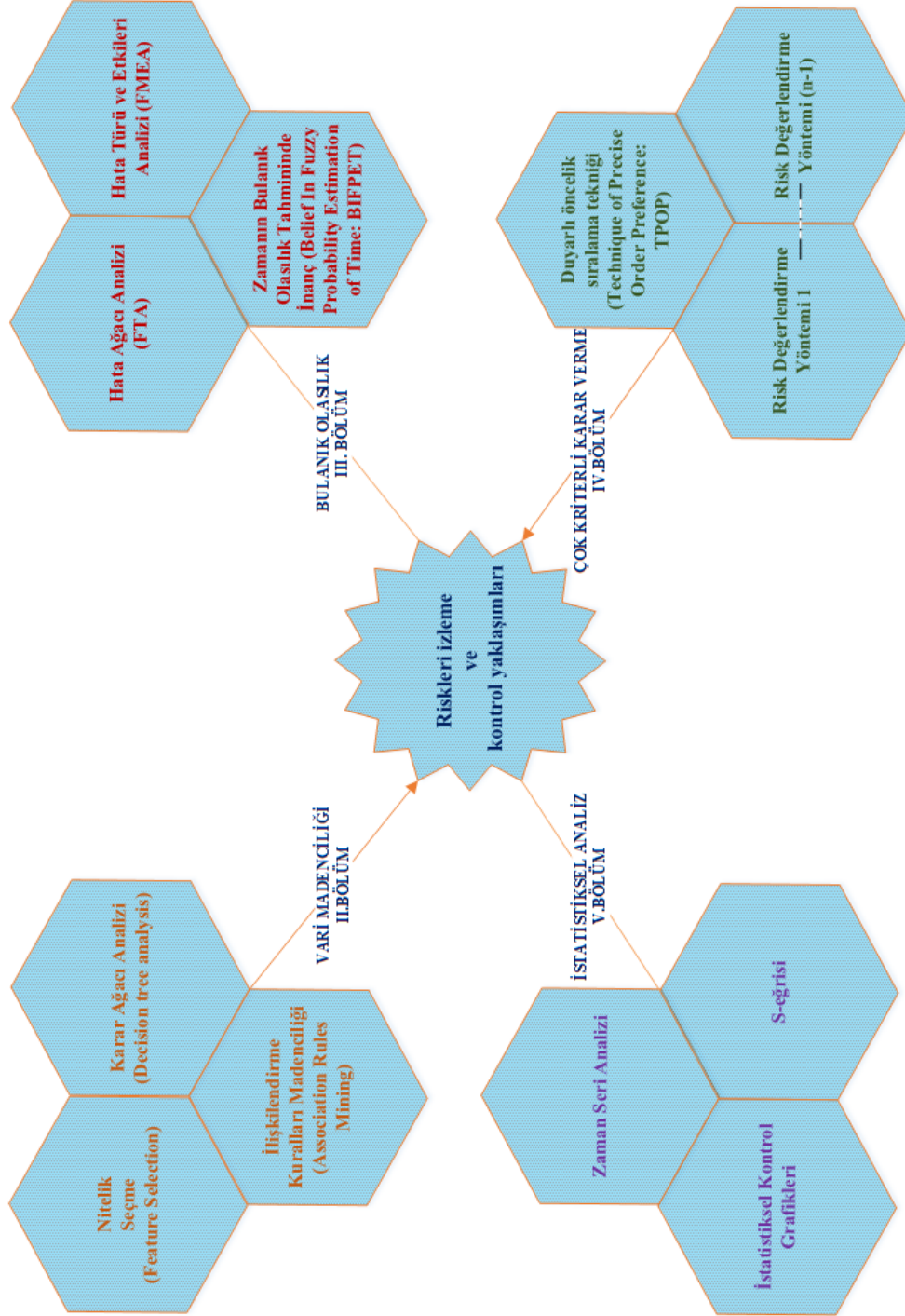
İş sağlığı ve güvenliği alanındaki güvenlik teknolojilerinin değişim ve gelişimlerini izlemek ve değişime neden olan itici güçleri araştırma fırsatı sunmak için teknoloji göstergesi olan patent verileri USPTO veri tabanından 2019 mayıs ayında temin edilmiştir. Patent verileri kullanılarak zaman serisi analizi ile en uygun tahmin modeli belirlenmiş, tahmin modelinin güncellenmesi gereken zamanı belirlemek için ise tahmin modeli artık değerlerinin kullanımına dayanarak oluşturulan istatistiksel kontrol grafikleri kullanılmıştır (bakınız: Şekil 1.3'de ifade edilen V. Bölüm). Teknoloji büyüme potansiyelini belirlemek için ise S - eğrisi oluşturulmuştur. Şekil 1.3'de ise kullanılan yöntemlerin özeti sunulmuştur.

İş sağlığı ve güvenliğinin geliştiğinin bir göstergesi olan kaza ve kayıplara maruz kalmadan, tehlikelerin öngörülmesi, kazalar üzerinde kritik öneme sahip olan faktörlerin bilinmesi, izlenmesi için bunu sağlayacak güvenilir izleme araçlarının kullanılması ile doğrudan ilişkilidir [78]. Tez çalışması kapsamında geliştirilen hipotezler aracılığı ile elde edilecek sonuçlar dikkate alınarak risklerin kontrol altına

alınacağı ve iş sağlığı ve güvenliğinin geliştirileceği düşünülmektedir.



Şekil 1.2 Riskleri izlemek ve kontrol etmek için önerilen yaklaşımların özeti.



Şekil 1.3 Riskleri izlemek ve kontrol etmek için önerilen yaklaşımlarda kullanılan yöntemler.

2 Üretim Sistemlerinde İş Risklerinin Veriye Dayalı Analizi

2.1 Özet

İş kazaları, işin yürütülmesi esnasında kullanılan makine ekipmana, çalışma koşullarına veya organizasyonel faktörlere bağlı olarak, çoğu zaman birden fazla nedenin bir kombinasyonu ile oluşmaktadır. Uluslararası çalışma örgütü iş kaza istatistiklerine göre, son dokuz yılda ölümlü iş kazalarında Türkiye sıralaması 1 ile 7 arasında değişmektedir. İş kaza problemi Türkiye için acilen çözülmesi gereken önemli bir sorundur. Türkiye’de iş kazalarının büyük bir çoğunluğu imalat sanayii’nde yaşanmaktadır ve literatürde, imalat sanayii’ni dikkate alarak iş kaza analizinin yapıldığı çalışma sayısı sınırlıdır. Bu nedenlerden dolayı çalışmamızda, Türkiye Sosyal Güvenlik Kurumu’ndan temin edilen, 2013 - 2016 yıllarında imalat sanayii’nde yaşanan 242.537 iş kaza kaydı dikkate alınmıştır. Veri analiz yöntemi olarak veri madenciliği yöntemlerinden özellik seçme, karar ağacı analizi ve ilişkilendirme kuralları madenciliği uygulanmıştır. Analiz sonucunda kaza tipi üzerinde etkili olan faktörlerin sırasıyla: kaza esnasında kullanılan malzeme-araç-gereç, özel faaliyet, genel faaliyet, kazanın gerçekleştiği yer-bölüm ve meslek olmak üzere 5 faktörün %92,40 düzeyinde etkili olduğu belirlenmiştir. Bu faktörler için kaza tipi bakımından ağaç modelleri oluşturulmuş, daha sonra ise her bir kaza tipi için ilişkilendirme kuralları elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların, Türkiye Cumhuriyeti Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği Konseyi için iş kazalarını önleme politikalarının geliştirilmesi ve güncellenmesinde, iş sağlığı ve güvenliği profesyonellerinin risk analiz ve değerlendirme süreçlerinde ve iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinde kullanabilecekleri faydalı ve pratik bilgiler olduğu düşünülmektedir.

2.2 Giriş

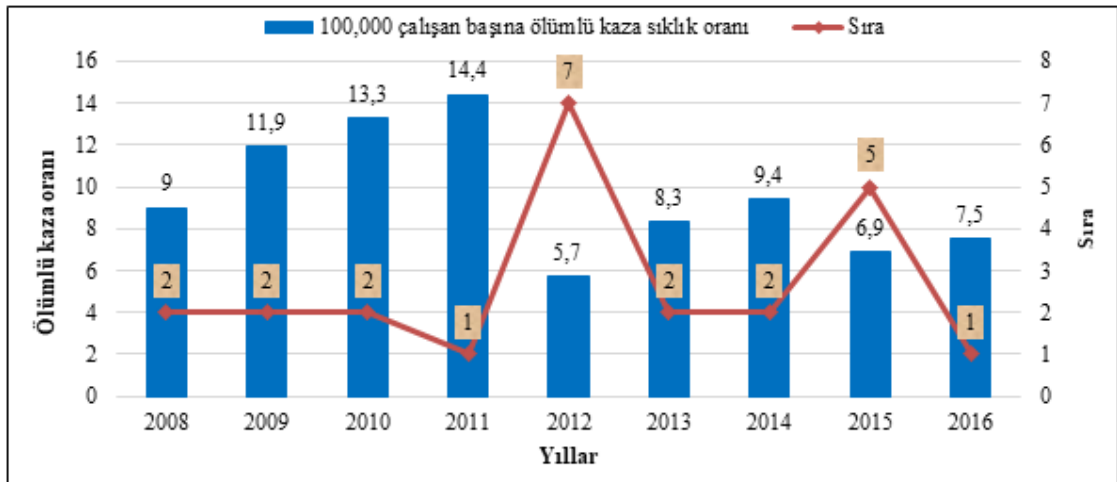
İş kazaları bireyin, kurumların ve toplumun bir bütün olarak zarar görmesine neden olan istenmeyen olaylardır. Çalışma hayatında sağlık ve güvenliği temin etmek için

birçok ülkede yasal düzenlemeler oluşturulmakta ve uygulanmaktadır. Türkiye’de 6331 sayılı iş sağlığı ve güvenliği kanununun [79] 10. ve 30. maddelerine dayanılarak hazırlanan iş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirme yönetmeliğide [80], işyerlerinde iş sağlığı ve güvenliği yönünden yapılacak risk değerlendirmesinin usul ve esasları bildirilmiştir. Türkiye Cumhuriyeti Ulusal İş Sağlığı ve Güvenliği Konseyi yönetmeliği de 2013 yılında yayınlanmıştır. Konseyin kuruluş amacı, çalışma hayatının iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili mevcut şartlarının iyileştirilmesi ve güvenlik kültürünün ülke genelinde yaygınlaştırılmasıdır. Bu amaçla, üyelerin işbirliği içinde çalışmasını esas almakta, iş sağlığı ve güvenliği alanında ülke politikalarını oluşturulması sürecinde tarafların görüş ve düşüncelerinin alınmasını sağlamaktır [81]. Bu ve diğer yasal düzenlemeler sayesinde iş kazaları, meslek hastalıkları ve olası istenmeyen durumlara yönelik proaktif uygulamalar ile kayıpların önlenmesi beklenmektedir. ILO istatistiklerine göre 85 ülke içinde Türkiye, ölümlü kaza oranları sıralaması 1 ile 7 arasında değiştiği Şekil 2.1’de gösterilmiştir [5]. Başta Türkiye olmak üzere diğer ülkeler için de iş sağlığı ve güvenliğinin gelişmesi için ayrılan kaynakların verimli bir şekilde kullanılabilmesi ve çalışanların sağlık ve güvenliklerinin temin edilebilmesi için öncelikle iş kazalarının kök nedenlerin iyi bir şekilde analiz edilmesi büyük önem taşımaktadır. Persona vd. [82] kazaları analiz etmenin, altında yatan nedenleri anlamaya çalışmanın güvenlik yönetiminin ve kaza önleme sürecinin en önemli aşaması olduğunu ifade etmiştir. Kazalar birden fazla nedenin bir kombinasyonu şeklinde yaşanmaktadır [83]. İş kazalarının altında yatan faktörlerin belirlenmesi için birçok analiz yöntemi kullanılmaktadır. Ancak, kaza modellerinin iyileştirilmesi, yeni sağlık ve güvenlik yönetim araçlarının geliştirilmesi de gerekmektedir [84]. Bununla birlikte, Cheng vd. [85] iş güvenliği eğitimlerinin yapılması, risk değerlendirme personelinin ve denetleyicilerin yasal düzenlemeleri uygulamasının kazaları önlemek için önemli bir role sahip olduğunu ifade etmiştir. Sarkar vd. [86] çalışmasında, kaza ve yaralanmaları önlemek için analizlerin daha yoğun bir derinlikte planlanması gerektiğine dikkat çekmiştir.

Türkiye’de 2013 - 2016 yıllarında yaşanan iş kazalarının %42,20’si meslek hastalıklarının %46,24’ü imalat sektöründe yaşanmıştır [25]. Literatürde, çeşitli sektörlerde iş kazalarının analiz edildiği çalışmalar da yürütülmüştür. Ancak, imalat sektöründe yaşanan iş kaza kayıtlarının kullanıldığı çalışma sayısı sınırlı düzeydedir (bakınız: Tablo 2.1). İmalat sektöründe yaşanan iş kazalarının altında yatan faktörleri belirlemek, konu ile ilgili literatüre bir katkı sunmak için çalışmamızda Türkiye Sosyal Güvenlik Kurumundan temin edilen, 2013 - 2016 yıllarında imalat sektöründe yaşanan iş kazaları analiz edilmiştir. Analizde 242.537 iş kaza kaydı dikkate alınmıştır. Bu bölümdeki amaç, kaza türü sonuç değişkeni üzerinde etkili olan faktörleri belirlemek, bu faktörlerin kaza türleri açısından karar ağaç modellerini oluşturmak

ve sonuç değişkeni kaza türü olan ilişkilendirme kuralları elde etmektir. Daha önce literatürde çeşitli sektörlerde kaza türü ve kaza faktörlerinin dikkate alındığı çalışmalar yürütülmüştür [16, 20, 24, 83, 87]. Çalışmamızda, kaza türü üzerinde etkili olan faktörleri belirlemek için Weka v.3.9.2 yazılımının özellik seçme aracındaki yöntemler kullanılmıştır. Kaza faktörleri bakımından kaza tiplerinin karar ağaç modelini görsel olarak sunmak için ise sınıflandırma algoritmalarından J48 ve Random Tree analizleri yapılmıştır. Son olarak ilişkilendirme kural madenciliği uygulaması yapılmıştır. Literatürde ilişkilendirme kural madenciliği uygulamalarında Apriori algoritması iyi bilinmekte ve sık kullanılmaktadır. Ancak yapılan son çalışmalarda FP-Growth (Frequent Pattern-Growth) algoritmasının Apriori algoritmasından daha iyi performans gösterdiğini belirlenmiştir [88]. Bu nedenle, sonuç değişkeni kaza türü olan kurallar elde etmek için çalışmamızda FP-Growth algoritması uygulanmıştır. Her bir kaza türü için elde edilen ilk 10 kural ise destek (support) değeri dikkate alınarak listelenmiştir. İmalat sektöründe yaşanan iş kaza tipleri için elde edilen ilişkilendirme kurallarının, iş sağlığı ve güvenliği profesyonelleri için kazalar nedeniyle yaşanan sosyal ve ekonomik kayıpları önlemeye yönelik kullanışlı bilgiler sunulduğu, literatüre de önemli katkılar sağlandığı düşünülmektedir.

Çalışmanın devam eden bölümlerinde kaza analizi ile ilgili literatür incelemesi, çalışmada kullanılan materyal ve metot, analizler ve değerlendirilmesi, sonuçlar bulunmaktadır.



Şekil 2.1 Türkiye için ölümlü kaza sıklık oranı ve 85 ülke arasındaki sıralamasının yıllara göre dağılımı [5].

2.3 İş Kazaları Literatür İncelemesi

Literatürde iş kaza analizi ile ilgili çalışmalar dört tema altında değerlendirilebilir. Çalışmalar sırasıyla, kazalar ile ilgili genel bir görünüm elde etme açısından elverişli bilgiler sağlayan iş kaza kayıtlarının tanımlayıcı istatistikler ile ifade edildiği (örneğin:[13, 14, 87, 89–91]) kayıpları önlemeye yönelik alınacak tedbirler için yol gösterici nitelikteki, yaşanmış iş kazalarından yola çıkılarak gelecekte olabilecek iş kaza sayıları ve kaza sonuçlarının tahmin edilmesini sağlayan model önerileri (örneğin: [92–94]), araştırmacılar için çok önemli ve pratik bilgiler sağlayan iş kazaları ile ilgili literatür incelemeleri (örneğin: [30, 95]) ve veri madenciliği yaklaşımları ile çok sayıdaki kaza verilerinin analiz edilerek anlamlı bilgilerin ortaya konulduğu çalışmalar yürütülmüştür (bakınız: Tablo 2.1).

Veri madenciliği yaklaşımlarının kullanıldığı çalışmalar, yeni veri madenciliği yaklaşımlarının önerildiği ve mevcut veri madenciliği yaklaşımları ile kaza analizlerinin yapıldığı çalışmalar olmak üzere iki grupta ifade edilebilir. Yöntem önerisi ve kaza analizlerinin yapıldığı çalışmalar arasında, Sarkar vd.[86] iş kazalarını analiz etmek için makine öğrenme yöntemlerinden destek vektör makineleri (Support Vector Machine: SVM) ve yapay sinir ağları (Artificial Neural Network: ANN), optimizasyon yöntemlerinden genetik algoritma (Genetic Algorithm: GA) parçacık sürüm optimizasyonu (Particle Swarm Optimization: PSO) yöntemlerini kullanarak makine öğrenme parametrelerinin optimizasyonuna dayanan, kaza mekanizması ve sonucunu tahmin eden bir yöntem önermiştir. Sarkar vd. [86] önerdiği yöntemin uygulamasını, Hindistan'daki entegre çelik endüstrisinde yaşanan iş kazalarını analiz etmek için kullanmış ve performansı en iyi olan yöntemin PSO'ya dayalı SVM olduğunu belirlemiştir. Sarkar vd. [96] Hindistan'da entegre bir çelik endüstrisinde yaşanan iş kazalarının, yaralanmalı, maddi hasarlı ve ramak kala olmak üzere kaza sonucunu tahmin etmek için genetik algoritma (Genetic Algorithm: GA), sınıflandırma ve regresyon ağacı (Classification and regression tree: CART), grid based-CART ve pruned-grid based-CART yöntemlerini önermiştir. Sarkar vd. [96] Genetik Algoritma ile CART parametrelerinin optimize edildiği kaza tahmin modelinin diğer iki yöntemle göre performans ve doğruluğunun daha iyi olduğunu belirlemiştir. Liao vd. [97]iş kazaları sebep-sonuç ilişkisini belirlemek için ekstrakte edilen olasılık ölçütünü dikkate alan 3 ilişkilendirme kural madenciliği modeli önermiştir. Liao vd. [97] Tayvan inşaat sektöründe yaşanan ölümlü iş kaza kaydını, kaza sebebi, kamu projesi olup olmaması, ay, yağış olması, ortalama yağış miktarı faktörlerini dikkate alarak ilişkilendirme kural madenciliği uygulaması yapmış, önerdiği model ile destek-güven çerçevesinde güvenilir sonuçlar elde edildiğini ifade etmiştir. Ciarapica ve Giacchetta [94] İtalya'da yaşanan iş kazaları için yapay sinir ağları (ANN) ve bulanık çıkarım sistemi (Fuzzy Inference System: FIS) kullanarak kaza tahmin modeli

geliştirmiştir. İş kazalarının mevcut veri madenciliği yaklaşımları ile analiz edildiği ve anlamlı bilgilerin sunulduğu çalışmalar arasında, Altunkaynak [20] Türkiye’de imalat sektöründe yaşanan kazaları karar ağacı ve ilişkilendirme kuralları madenciliği ile analiz etmiş, kaza türü üzerinde %92 düzeyinde etkili olan faktörlerin sektör tipi, iş yeri büyüklüğü, yaş, tecrübe ve kazanın gün içinde gerçekleştiği saat olduğunu ve kaza türü sonuç değişkeni olan en iyi 10 ilişkilendirme kuralını ortaya koymuştur. Nakata [98] NASA havacılık güvenlik raporlarını metin madenciliği ile analiz ederek, havacılık sektörü için 3 tipik kaza dizisi ortaya koymuştur. Nenonen [99] Finlandiya’da kayma, tökezleme, düşme nedeniyle yaşanan iş kazalarını analiz etmek için karar ağacı ve ilişkilendirme kurallarını kullanmış, kazalar üzerinde etkili olan faktörlerin: çalışanın fiziksel aktivitesi, mesleği ve yaşı olduğunu belirlemiştir. Cheng vd. [100] Tayvan’da inşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının sebep-sonuç ilişkilerini belirlemek için CART yöntemini kullanmış ve kaza nedenlerinden düşme ve çökmenin kazalar üzerinde kilit role sahip olduğunu belirlemişlerdir. Cheng vd. [83] çalışmasında Tayvan’da inşaat sektöründe yaşanan iş kazalarını, proje mülkiyet türü, şirket büyüklüğü, proje tipi, kaza türü, hareket türü, yaralanma nedeni, kaza anına kadar ki çalışma süresi, kazanın yaşandığı yer, tecrübe, cinsiyet, tecrübe, güvensiz davranışlar, güvensiz şartları dikkate alarak korelasyon, OLAP analizi ve cevap değişkeni kaza türü olan ilişkilendirme kuralları belirlemiştir. Cheng vd. [83]’nin elde ettiği sonuçlara göre, iş kazalarının büyük bölümünün çalışan sayısının 10’dan az olduğu küçük ölçekli iş yerlerinde meydana geldiğini belirlemişlerdir. Liao ve Perng [101] Tayvan inşaat sektöründe yaşanan iş kazalarının kaza karakteristiklerini belirlemek için ilişkilendirme kurallarını kullanmış, yağmurlu havanın ölümlü iş kazaları üzerinde önemli bir etkisi olduğunu belirlemiştir. Bevilacqua vd. [102] Ancona’daki API rafinerisinde yaşanmış iş kaza kayıtlarını, ergonomik, yönetsel ve operasyonel parametrelerin kaza riskine etkisi bakımından değerlendirmek için CART yöntemini kullanmış ve doğruluğu yüksek sonuçlar elde etmiştir. Persona vd. [82] İtalya’da yerel sağlık kurumu iş kaza kayıtlarını CART yöntemi ile analiz ederek, en tehlikeli sanayi alanlarının, nakliye ve servis endüstrisi, inşaat ve deniz inşaatı, tesis kurulum sektörü ve makine endüstrisi olduğunu, az tehlikeli olmasına rağmen yaralanma sayısının fazla olan sektörün ise sağlık ve kamu idaresi olduğu, en tehlikeli görevlerin ise bakım ve kontrol operatörlüğü, yükleme/boşaltma/malzeme elleçleme operatörü, tesis kurucu, mason/woodworker, sürücü olduğu ve bu görevlerde çalışanların kaza sonrası iyileşme sürelerinin oldukça uzun olduğunu, en kritik iş unvanının ise fabrika işçiliği ve çıraklık olduğunu belirlemiştir. Persona vd. [82]’nin elde ettiği bulgulara göre iyileşme süresi >90 gün olan ciddi yaralanmaların kişisel koruyucu ekipmanların uygun olmayan şekilde kullanımı veya hiç kullanılmaması durumunda yaşandığını, iyileşme süresi <40 gün olan yaralanmaların ticaret, ahşap/plastik endüstrisi, sağlık ve kamu yönetimi, tesis kurulumu sektörleri ile ilişkili olduğunu belirlemiştir.

İş kazalarının veri madenciliği yaklaşımları ile analiz edildiği çalışmalardan bazılarında, dikkate alınan sektör, kullanılan veri sayısı ve zaman periyodunu içeren bilgiler Tablo 2.1’de verilmiştir. Riskli çalışma şartları ile bilinen inşaat sektöründe, veri madenciliği uygulamalarının en çok yapıldığı ve zaman içerisinde analiz edilen veri sayısının arttığı anlaşılmıştır. İmalat sanayii ile ilgili çalışma sayısının ise sınırlı düzeyde olduğu da dikkat çekmektedir.

Klasik istatistiksel yöntemler ile veri madenciliği yaklaşımları aslında benzer problemleri çözmektedir [103]. Klasik istatistiksel yöntemler, kavramsal bir referans paradigmasına bağlı olarak geliştirilmiştir ve istatistiksel yöntemlerin bilgi teknolojileri ve makine öğrenme uygulamalarına adapte olmaları sınırlıdır [104]. Bunun yanında, istatistiksel yaklaşımlar ile veri setindeki değişkenler arasındaki ilişkileri belirlemek ile sınırlı iken veri madenciliği yaklaşımları, gözleme dayalı verilere uyan ve onları temsil eden modeli oluşturma süreci ile ilgilenilmektedir [74]. Günümüz teknolojik gelişmelerine bağlı olarak elektronik ortamdaki bilgi miktarının artışı ile birlikte veri madenciliği yöntemlerine yöneliş kaçınılmaz kılınmıştır. Veri madenciliğindeki esas amaç çok büyük miktardaki veri setlerinden geçerli, anlamlı ilişkilerin, desenlerin ve kuralların keşfedilmesini sağlamaktır [103, 105]. Bu nedenlerden dolayı çalışmamızda, iş kaza verilerindeki gömülü bilgileri keşfetmek, anlamlı kurallar elde etmek amacı ile veri madenciliği yöntemlerinin avantajlarından yararlanılmıştır.

2.4 Materyal ve Metot

2.4.1 Veri Seti ve Veri Ön işleme

1. Kod’u bilinen ancak açıklaması yazılmamış boş hücrelerden, elle doldurulması mümkün olanların Excel programı yardımı ile doldurulmuştur.
2. Doğum tarihi, iş’e başlama tarihi, işi bırakma tarihi, kaza tarih bilgisi: gün/ay/yıl ve ay/gün/yıl olarak girilmiş tüm tarih bilgileri gün/ay/yıl olarak düzenlenmiş ve kaza tarihi gün (G), ay (A), yıl (YL) olarak ayrı ayrı ifade edilmiştir.
3. Kazazedenin yaşı hesaplanmış ve 6 sınıfta gruplandırılmıştır (Y).
4. Kazanın yaşandığı gün dikkate alınarak kaza anına kadar ki çalışma süresi hesaplanmış ve 6 grupta listelenmiştir (CS).
5. En son işe başladığı yerde kaza anına kadar ki iş tecrübesi hesaplanmış ve 6 grupta listelenmiştir (T).
6. Kaza anı (kaza saati), gün içerisindeki 4 zaman dilimi ile ifade edilmiştir (GS).

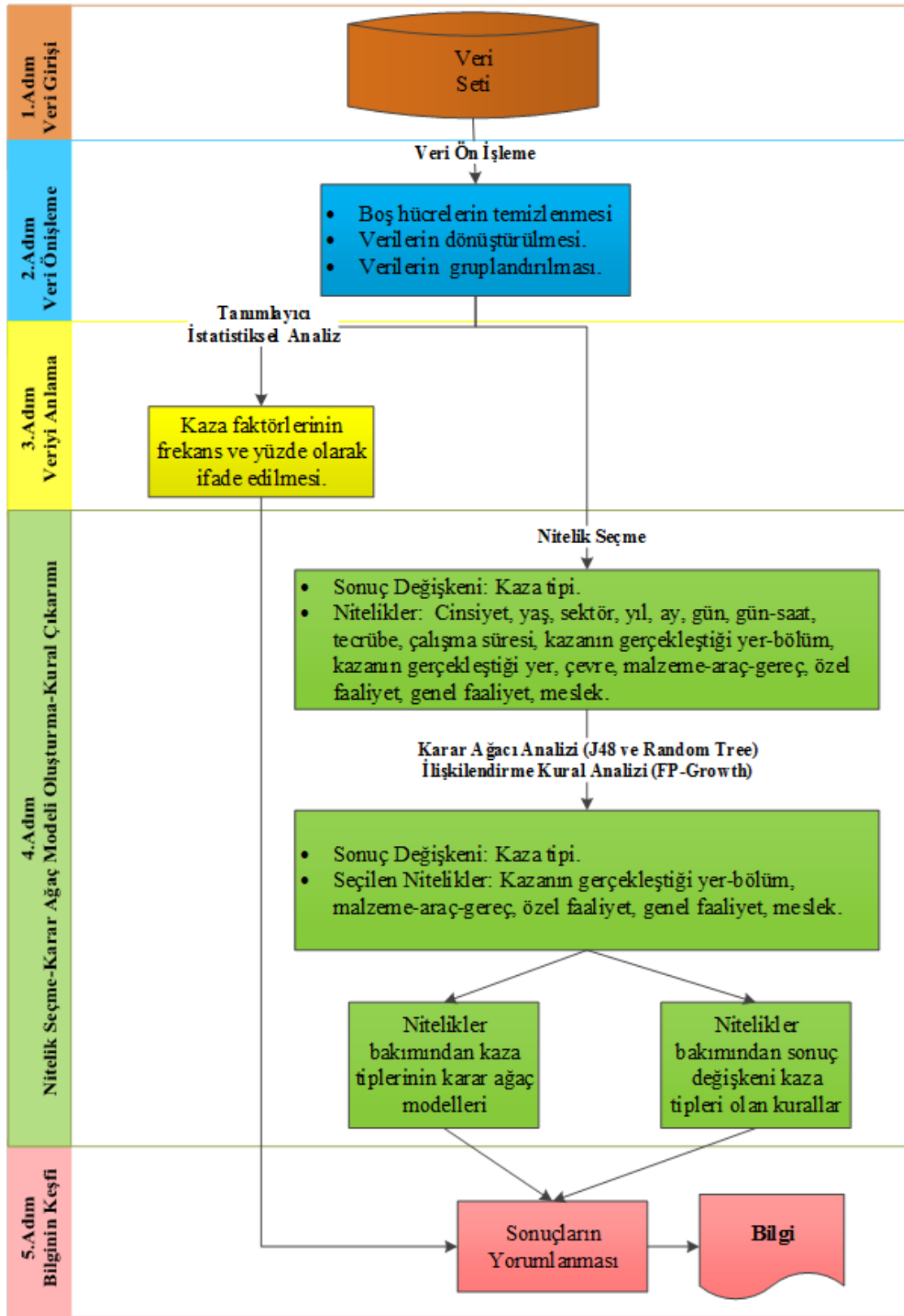
7. Kayıp iş günü 5 grupta ifade edilmiştir (KIG), (bakınız: Şekil 2.2).

Tablo 2.1 İş kazalarının veri madenciliği uygulamaları ile analiz edildiği çalışmalar.

Yazarlar (yıl)	Sektör	Periyot	Veri sayısı
Shin vd. [106]	İnşaat	2006 - 2010	98,189
Sarkar vd. [31]	Çelik Endüstrisi	2010 - 2013	1.500
Altunkaynak [20]	İmalat Sanayii	2012	37.735
Nakata [98]	Havacılık Sektörü	2013	4.469
Sarkar vd. [96]	Çelik Endüstrisi	2010 - 2013	4.744
Sarkar vd. [107]	Çelik Endüstrisi	2010 - 2013	998
Berkhout ve Damen [108]	262 Sektör	1999 - 2011	24.071
Sanmiquel vd. [48]	Madencilik	2003 - 2012	70.000
Chang ve Tsai [24]	İmalat Sanayii	1996 - 2012	92.577
Abdat vd. [109]	İnşaat	1990 - 2011	143
Chi vd. [110]	İnşaat	2001 - 2005	401
Cheng vd. [85]	Petrokimya Endüstri	2000 - 2010	349
Nenonen [99]	Çeşitli Sektörler	2006 - 2007	222.932
Cheng vd. [100]	İnşaat	2000 - 2009	1.542
Cheng vd. [43]	İnşaat	2000 - 2007	1.347
Liao vd. [97]	İnşaat	2000 - 2005	1.062
Liao ve Perng [101]	İnşaat	1999 - 2004	309
Bevilacqua vd. [102]	Petrokimya Endüstri	1998 - 2004	>200
Persona vd. [82]	Çeşitli Sektörler	2000 - 2002	156

Tablo 2.2 Kaza analizinde kullanılan nitelikler.

Sektör bilgisi	Kaza bilgisi	Kazazede bilgileri
Sektör Türü	Kaza sebebi-Kaza tipi (KT)	Dogum günü-Yaş (Y)
	Kaza esnasında kullanılan malzeme, araç, gereç (MAG)	Meslek (MES): Uluslararası Standart Meslek Sınıflaması (ISCO 08)
	Kaza tarihi:yıl, ay, gün (YL, A, G)	Kaza sonrası sigortalının durumu (KSD)
	Kazanın gün içerisinde gerçekleştiği saat-gün saat (GS)	Kayıp iş günü (KIG)
	Kaza nerede gerçekleşti? Yer-Bölüm:YB	Cinsiyet (K, E)
	Kaza tam olarak nerede oldu? (YR)	Tecrübe (T)
	Kaza tam olarak hangi ortamda yaşandı?-Çevre (C)	Çalışılan süre (saat) (CS)
	Genel faaliyet (GF)	
	Özel Faaliyet (ÖF)	



Şekil 2.2 İmalat sistemlerinde mesleki risklerin veri odaklı modellerle değerlendirilmesi.

2.4.2 Veriyi Anlama-İstatistiksel Analiz

Çalışmamızın ikinci adımında ise veri setini tanımlayıcı özellikleri belirlemek için istatistiksel analiz yapılmıştır. İstatistiksel analizler için literatürde iyi bilinen ve sıklıkla kullanılan bir araç olan Weka v.3.9.2 yazılımı kullanılmıştır. Veri setinin tanımlayıcı istatistikleri Tablo 2.3, 2.4, 2.5 ve Ek-A'da verilen Tablo A1, A2, A3 ve A4'de sunulmuştur.

Tablo 2.3 Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537).

Nitelik	Mutlak frekans	%
Kaza türü (KT)		
KT1: Elektrik arızası nedeniyle elektrik ile doğrudan temas; patlama; yangın, tutuşma; bu sınıflandırma kapsamındaki, diğer sapma.	1.982	0,82
KT2: Gaz durumunda-buharlaşıma, aerosol oluşum, gaz oluşu mu; Katı durumunda-taşma, devrilme; Sıvı durumunda-sızma, kaçırma, akma, sıçrama, püskürme; Toz halindeki madde -duman oluşumu, havadaki/yayılmış toz ve zerrecikleri; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer sapma.	9.955	4,10
KT3: Kırılma, patlama-kıymık oluşumu (tahta, cam, metal, taş, plastik, diğerleri); Maddenin kırılması-eklemlerde, birleşme noktalarında; Maddi aracın kayma, düşme, çökmesi -aşağıdan (kazazedeyi aşağı çekerek); Maddi aracın kayma, düşme, çökmesi; Maddi aracın kayma, düşme yukarıdan (kaza-zedenin üstüne düşerek); bu sınıflandırma kapsamındaki diğer sapma.	24.124	9,95
KT4: Denetim kaybı (tam veya kısmi)-el aleti (motorlu olsun veya olmasın) veya alet tarafından kullanılan maddi aracın; Denetim kaybı (tam veya kısmi)-hayvanın; Denetim kaybı (tam veya kısmi)-makine (istenmeyen başlama da dahil olmak üzere) veya maddi araç; Denetim kaybı (tam veya kısmi)- makine (istenmeyen başlama da dahil olmak üzere) veya maddi araç; Denetim kaybı (tam veya kısmi)-taşıt aracı veya ekipman kullanımının (motorlu olsun veya olmasın); bu sınıflandırma kapsamındaki diğer sapma.	47.088	19,41
KT5: Kayma - tökezleme ve düşme-Kişinin düşmesi-aynı düzeyde; Kişinin düşmesi-alt düzeye; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer sapma.	28.031	11,56
KT6: Diz çökme, oturma, yaslanma; İşbirliği olmaksızın yapılan hareket, gereksiz veya zamansız eylemler; Kapılma veya götürülme -bir şey veya ivme tarafından; Keskin bir nesne üzerinde yürüme; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer sapma.	28.506	11,75

2013 - 2016 yıllarında üretim sektöründe yaşanan iş kazalarının yıl, sektör, kaza türü, kayıp iş günü ve kaza sonrası sigortalının durumu ile ilgili dağılımları Şekil 2.3 - 2.7'de ifade edilmiştir.

2.4.2.1 Veriyi Anlama Analizi için Değerlendirmeler

Bu çalışmada, Türkiye’de 2013 - 2016 yıllarında imalat sanayii’nde yaşanan 242.537 iş kaza kaydı analiz edilmiştir. Kazazedelerin %90’ı erkek, %30,37’si 25 - 29, %24,28’i 30

Tablo 2.4 Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537),
(Devamı-1).

Nitelik	Mutlak frekans	%
Kaza türü (KT)		
KT7: Aşağı bırakma, eğilme; Bükülme, dönme;Çiğnenmek, bacak veya bilek bükülmesi,düşmeden kaymak; İtme,çekme; Kaldırma, taşıma, ayakta durma; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer sapma.	12.012	4,95
KT8: Saldırı, dürtülme-hayvan tarafından;Şok, korku; Üçüncü bir kimsenin veya kişinin kendisinin, kendine ve başkasına da tehlike yaratması; Vahşet, saldırı,tehdit -işlerini yapmakta olan kazazedeye yönelik şirket dışındaki kişiler tarafından (banka soygunu,otobüs şoförleri, vb.); Vahşet, saldırı, tehdit -işverenin otoritesine tabi olan şirket çalışanları arasında; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer sapma.	401	0,17
KT9: Yukarıdaki sınıflandırmada listelenmemiş başka bir sapma.	90.438	37,29
Sektör (Nace Rev.2 Kodu: Tanımı)	Mutlak frekans	%
10: Gıda ürünlerinin imalatı	24.010	9,90
13: Tekstil ürünlerinin imalatı	27.234	11,23
16: Ağaç, ağaç ürünleri ve mantar ürünleri imalatı	6.554	2,70
22: Kauçuk ve plastik ürünlerin imalatı	18.300	7,55
23: Diğer metalik olmayan mineral ürünlerin imalatı	24.189	9,97
24: Ana metal sanayii	34.482	14,22
25: Makine ve teçhizat hariç. fabrikasyon metal ürünleri imalatı	47.935	19,76
27: Elektrikli teçhizat imalatı	10.171	4,19
28: Başka yerde sınıflandırılmamış makine ve ekipman imalatı	14.010	5,78
29: Motorlu kara taşıtı. treyler (römork) ve yarı treyler (yarı römork) imalatı	17.571	7,24
31: Mobilya imalatı	11.021	4,54
33: Makine ve ekipmanların kurulumu ve onarımı	7.060	2,91

Tablo 2.5 Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537),
(Devamı-2).

Nitelik					
Cinsiyet		Mutlak frekans		%	
K: Kadın		24.366		10	
E: Erkek		218.171		90	
Ay (A)	Mutlak frekans	%	Gün saat (GS)	Mutlak frekans	%
A1: Ocak, Şubat, Mart	57.843	23,85	GS1: 00:00-06:59	26.967	11,12
A2: Nisan, Mayıs, Haziran	62.169	25,63	GS2: 07:00-12:59	90.153	37,17
A3: Temmuz, Ağustos, Eylül	61.327	25,29	GS3: 13:00-18:59	89.743	37,00
A4: Ekim, Kasım, Aralık	61.198	25,23	GS4: 19:00-23:59	35.674	14,71
Gün (G)	Mutlak frekans	%	Tecrübe (T, yıl)	Mutlak frekans	%
G1: Pazartesi	39.564	16,31	T1: 0-5	206.555	85,16
G2: Salı	38.550	15,89	T2: 6-10	23.494	9,69
G3: Çarşamba	38.811	16,00	T3: 11-15	6.900	2,84
G4: Perşembe	39.072	16,11	T4: 16-20	1.497	0,62
G5: Cuma	36.992	15,25	T5: 21-25	1.814	0,75
G6: Cumartesi	28.973	11,95	T6: 26-	2.277	0,94
G7: Pazar	20.575	8,48			
Çalışma süresi (CS, saat)	Mutlak frekans	%	Yaş (Y)	Mutlak frekans	%
CS1: [0 - 1)	44.379	18,30	Y0: 0 - 15	97	0,04
CS2: (1 - 4)	64.220	26,48	Y1: 16 - 24	45.856	18,91
CS3: (4 - 8]	69.622	28,71	Y2: 25 - 29	73.661	30,37
CS4: (8 - 10]	9.438	3,89	Y3: 30 - 34	58.898	24,28
CS5: (10 - 12]	2.481	1,02	Y4: 35 - 39	32.732	13,50
CS6: (12,	52.397	21,60			

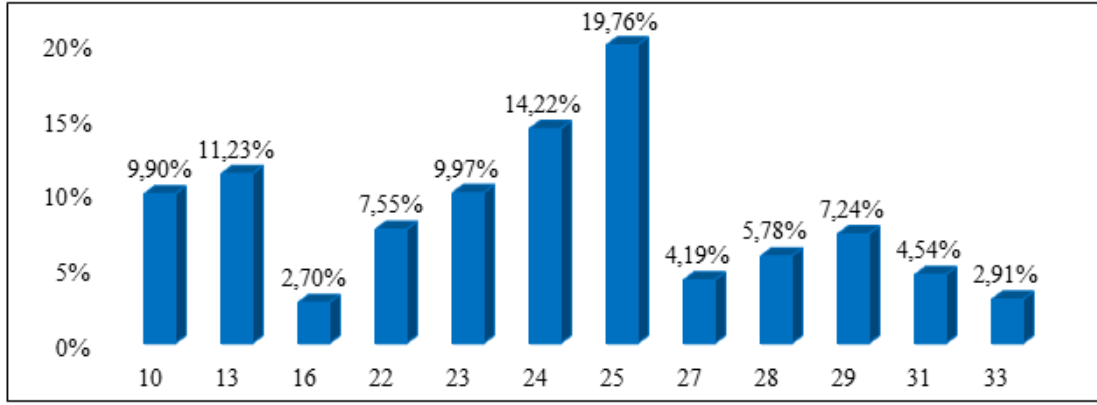
- 34 yaş grubundaki çalışanlar olduğu belirlenmiştir. Kazaların en çok yaşandığı ilk üç sektör sırasıyla, %19,76'sı makine ve teçhizat hariç fabrikasyon metal ürünleri imalatı, %14,22'si Ana metal sanayii, % 11,23'ü tekstil ürünleri imalatı yapan iş yerleridir. Kazaların %37,17'si saat 07:00 - 12:00'de, %37'si saat 13:00 - 18:00'de gerçekleşmiştir. Kazazedelerin %85,16'sı 0 - 5 yıl tecrübeye sahiptir. İmalat sanayii'nde yaşanan kazaların %37,29'u kaza türü 9, %19,41'i kaza türü 4, %11,75'i kaza türü 6 ile sonuçlanmıştır. Kaza sonrası sigortalının durumu açısından kazaların, % 77,67'si yaralanma ile, %0,22'si ölümle sonuçlanmıştır. İş günü kaybı açısından, kazaların %79'unda 1 - 9, %15'inde ise 10 - 19 iş günü kaybı ile sonuçlanan kazalar yaşanmıştır.

Literatürde, birçok sektörde yaşanmış iş kazalarının dikkate alındığı ve kazaların çalışanın cinsiyeti, yaş grubu ve iş günü kaybı, kaza türü, sektör, kazanın yaşandığı saat, tecrübe bakımından değerlendirildiği çalışmalar da yürütülmüştür. Çalışmamızda olduğu gibi, Türkiye'de imalat sanayii'nde yaşanmış kazaları analiz

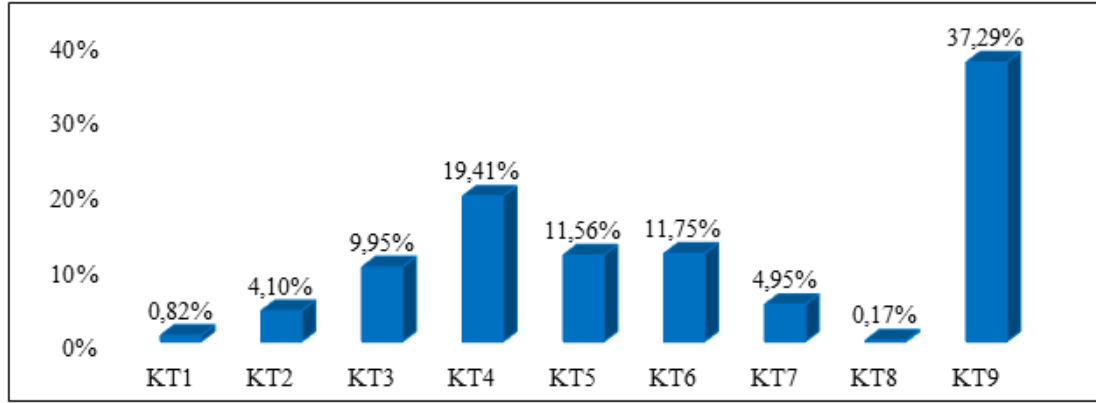
eden Altunkaynak [20] en sık karşılaşılan iş kaza türünün iki cisim arasında vücudun sıkışması olduğunu ve bu tip kazaların çoğunun makine ve teçhizat hariç fabrikasyon metal ürünleri imalatı sektöründe yaşandığını, kazazede yaşının 40'dan az olduğu ve 30 - 59 iş günü kaybı ile sonuçlandığını belirlemiştir. Altunkaynak [20]'ın sektör bakımından elde ettiği bulgular çalışma sonuçlarımız ile uyumludur. Benzer şekilde, Erdugan ve Türkan [13]'da Türkiye inşaat, maden, taş ocakçılığı, su ve kanalizasyon sektöründe yaşanan iş kazaları için erkek çalışanların belirleyici rol oynadığını belirtmiştir. Turkkan ve Pala [14]'da Türkiye'de çeşitli sektörlerde yaşanan ölümlü ve yaralanmalı iş kazalarını incelemiş, kazaların %98,5'inin erkek çalışanların maruz kaldığını, ölüm ve yaralanma oranının en çok görüldüğü yaş grubunun 60 yaş ve üzeri çalışanların olduğu, kalıcı iş göremezlikle sonuçlanan kazaların çoğunun 35 - 44 yaş grubu çalışanların yaşadığını bulgulamıştır. Chi vd. [110] Tayvan inşaat sektöründe yaşana iş kazalarının %94,2'sinin erkek, %53,5'inin 25 - 44 yaş grubundaki çalışanların maruz kaldığını bildirmiştir. Chi vd. [110] Tayvan inşaat sektöründe iş kazası yaşamış çalışanların %89,3'ünün 1 yıldan az tecrübeye sahip olan çalışanlar olduğunu ifade etmiştir. Kazazedelerin %28,71'i 4 - 8 saat, %26,48'i 1 - 4 saat çalıştıktan sonra iş kazası geçirmiştir. Ceylan [89] Türkiye'de elektrik üretim-iletim ve dağıtım sektörü için çalışan yaşı çok genç ve tecrübesiz çalışanlar ile ileri yaş grubunda olan çalışanların iş kazası için riskli grupta yer aldıklarına dikkat çekmiştir. Nag ve Patel [91] Hindistan tekstil sektöründe yaşanan kazaları analiz etmiş, sabah vardiyasının ilk yarısında kazaların %60 düzeyinde gerçekleştiği, gece vardiyasının ikinci yarısında ise kazaların %57'sinin gerçekleştiğini bulgulamıştır.

Literatürde yürütülen çalışmalardan anlaşıldığı gibi, imalat sanayii ve inşaat sektörlerinde yaşanan iş kazaları için erkek çalışanların önemli bir role sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bunun yanında, sektör bakımından iş kazaları değerlendirildiğinde makine ve teçhizat hariç fabrikasyon metal ürünleri imalatı yapan işletmelerin, iş tecrübesi ve yaş bakımından iş kazaları değerlendirildiğinde ise imalat sanayii, elektrik üretim ve iletim-dağıtım, inşaat sektöründe yaşanan iş kazalarında tecrübe eksikliğinin ve genç çalışanların dikkat çektiği görülmektedir.

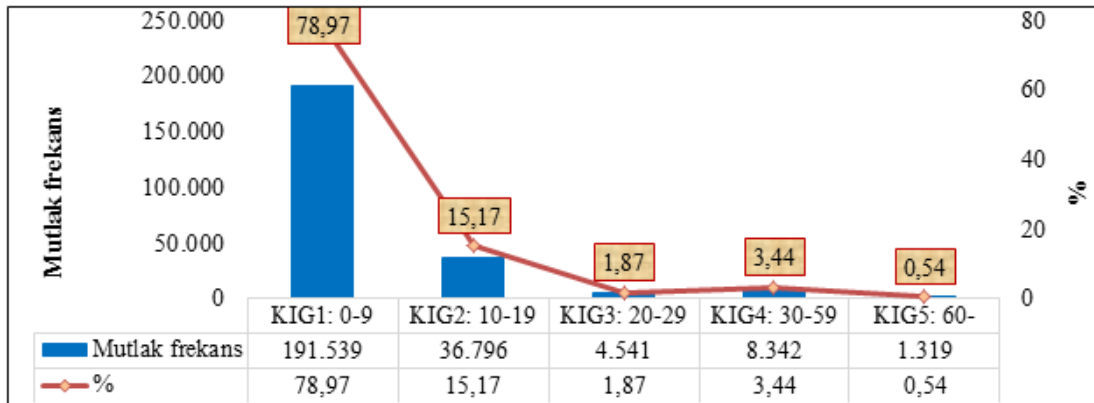
Kaza bildirim formlarında “diğer sınıf” olarak tanımlanan kaza türünün dikkat çekici düzeyde olduğu, bu sonucun kaza bildirimini yapan işveren veya işveren temsilcisinin kazayı sınıflandırması sırasında bir tereddüt etmesi ile ilgili olduğu anlaşılmaktadır. Bu nedenle, bu sınıftaki kazaların gerçek kaza bilgilerini zayıf bir şekilde yansıttığı söylenebilir. Kaza raporlarının doğru şekilde hazırlanması, iş yerlerinde kazaları önlemek için doğru müdahale tekniklerinin geliştirilmesi için çok önemli bir role sahiptir [111]. Bu zayıflığın üstesinden gelmek için işveren veya işveren temsilcisinin kaza bildirim ve raporunun hazırlanması konusunda eğitmek gerekir.



Şekil 2.3 Sektörlerin dağılımı (n=242.537).



Şekil 2.4 Kaza sebeplerinin dağılımı (n=242.537).

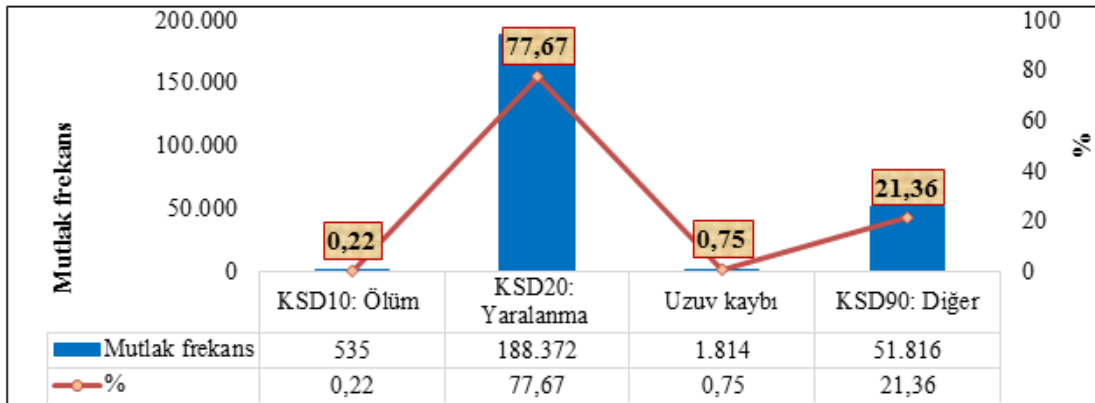


Şekil 2.5 Kayıp iş günü dağılımı (n=242.537).

2.4.3 Özellik Seçme Analizi

Çalışmanın üçüncü adımında, kaza türü üzerinde en çok etkiye sahip değişkenleri belirlemek için Weka 3.9.2 v. aracı kullanılmıştır. Özellik değerlendirme yöntemlerinden, InfoGainAttributeEval, ChiSquaredAttributeEval, FilterAttributeEval yöntemleri ve arama yöntemi olan Ranker kullanılmıştır. Bunun yanında, cevap değişkeni olan kaza türü üzerinde en çok etkiye sahip nitelikleri belirlemek için nitelik değerlendirme yöntemlerinden, ClassifierSubsetEval, CfsSubsetEval, FilterSubsetEval yöntemleri arama yöntemleri olan GreedyStepwise, ExhaustiveSearch, BestFirst ve GeneticSearch kullanılmıştır (bakınız: Tablo 2.6). Nitelik değerlendirme yöntemleri full training ile n=3,5 ve 10 cross-validation şartlarında çalıştırılmıştır. Kaza türü üzerinde %92,40 düzeyinde etkili olan nitelikler: kaza esnasında kullanılan malzeme, araç, gereç; özel faaliyet; genel faaliyet; kazanın gerçekleştiği yer, bölüm; sigortalının mesleği olup Şekil 2.8’de ifade edilmiştir. Bu bölümde elde edilen bulguların detaylı incelemeleri, özellik seçme ve değerlendirmeler başlığında ifade edilmiştir.

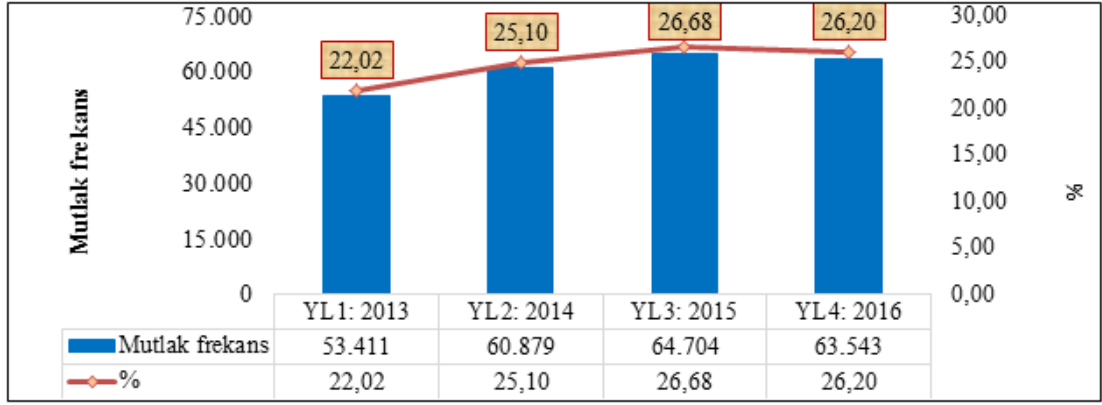
Eşitlik 2.1, bir yanıt değişkeni olarak kaza türü üzerinde etkisi olan en iyi yordayıcı değişkenlerin önem düzeyini hesaplamak için kullanılmıştır. Eşitlik 2.1’in detayları Altunkaynak [20]’in çalışmasında yer verilmiştir.



Şekil 2.6 Kaza sonrası sigortalının durumu (n=242.537).

Tahmin değişkeni için InfoGain değerinin IG_i olsun. Eşitlik 2.1 kullanılarak tahmin değişkeni için InfoGain yüzde değeri PIG_i için yüzde hesaplanır.

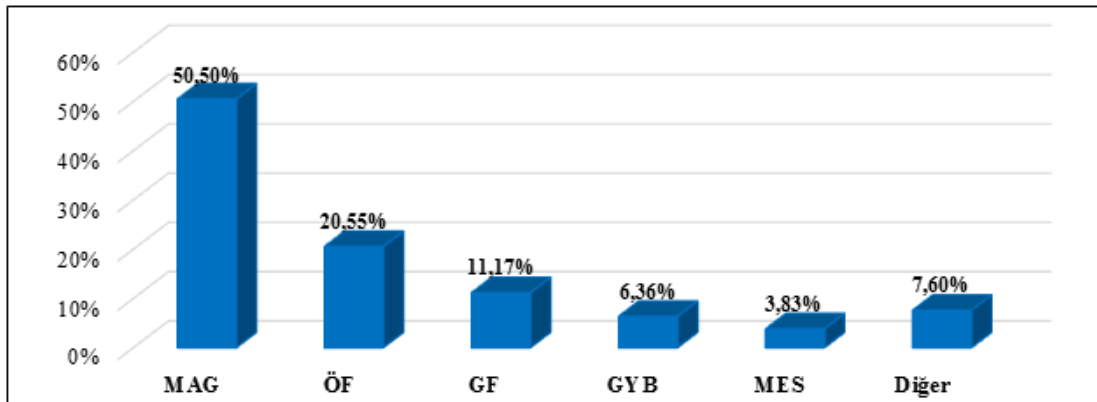
$$PIG_i = \frac{IG_i}{\sum IG_i} \quad (2.1)$$



Şekil 2.7 Kaza sayılarının yıllara göre dağılımı (n=242.537).

Tablo 2.6 Kaza türünü etkileyen nitelikleri değerlendirmek için kullanılan değerlendirici yöntemler, arama yöntemleri ve özellik seçme modu.

Nitelik değerlendirici	Arama yöntemi	Özellik seçme modu
InfoGainAttributeEval	Ranker	3,5 ve 10 cross-validation Full training set
ChiSquaredAttributeEval		
FilterAttributeEval		
ClassifierSubsetEval	GreedyStepwise	
CfsSubsetEva	ExhaustiveSearch	
FilterSubsetEval	BestFirst	
	GeneticSearch	



Şekil 2.8 Kaza türü için en önemli tahmin değişkenleri ve ağırlık yüzdeleri (n=242.537).

2.4.3.1 Özellik Seçme Analizi için Değerlendirmeler

Türkiye’de 2013 - 2016 yıllarında imalat sanayii’nde yaşanan iş kaza tipleri üzerinde %92,40 düzeyinde etkili olan niteliklerin: kaza esnasında kullanılan malzeme, araç, gereç (MAG); özel faaliyet (ÖF); genel faaliyet (GF); kazanın gerçekleştiği yer, bölüm (GYB); sigortalının mesleği (MES) olduğu belirlenmiştir. Daha önce imalat sanayii için iş kaza tipleri üzerinde etkili olan faktörlerin araştırıldığı çalışmalar da literatürde bulunmaktadır. Altunkaynak [20]’da Türkiye 2012 yılında imalat sanayii’nde yaşanan iş kaza tipleri üzerinde etkili faktörlerin, sektör tipi, iş yeri büyüklüğü, yaş, tecrübe ve kazanın gün içinde gerçekleştiği saat olduğunu belirlemiştir. Chang ve Tsai [24]’ de 1996 - 2012 yıllarında imalat sanayii’ndeki kazaları incelemiş ve yaralanma modeli için iş döngüsü, çalışma ortamı, iş süreçleri, üretim prosedürlerinin önemli olduğunu ifade etmiştir. Diğer sektörlerde yaşanan iş kaza tipleri üzerinde etkili faktörlerin incelendiği çalışmalardan, Sanmiquel vd. [16]’de İspanya madencilik sektöründe yaşanan iş kaza tipleri üzerinde etkili olan faktörlerin, kaza sebebi, kaza alanı, iş yeri büyüklüğü, fiziksel aktivite, koruyucu örgüt tipi, tecrübe ve yaş olduğunu belirlemiştir. Nenonen [99] çalışmasında, Finlandiya’da kayma-tökezleme-düşme nedeniyle yaşanan kazalar için çalışanın fiziksel aktivitesi, mesleği ve yaşının önemli faktörler olduğunu ortaya koymuştur. Cheng vd. [100] Tayvan inşaat sektöründe yaşanan kazalar için düşme ve çökmenin en önemli kaza nedenleri arasında olduğu belirtmiştir. Liao ve Perng [101]’ de Tayvan, inşaat sektöründe yaşanan ölümlü kazalar üzerinde hava şartlarının yağmurlu olmasının kritik düzeyde önemli olduğunu belirtmiştir.

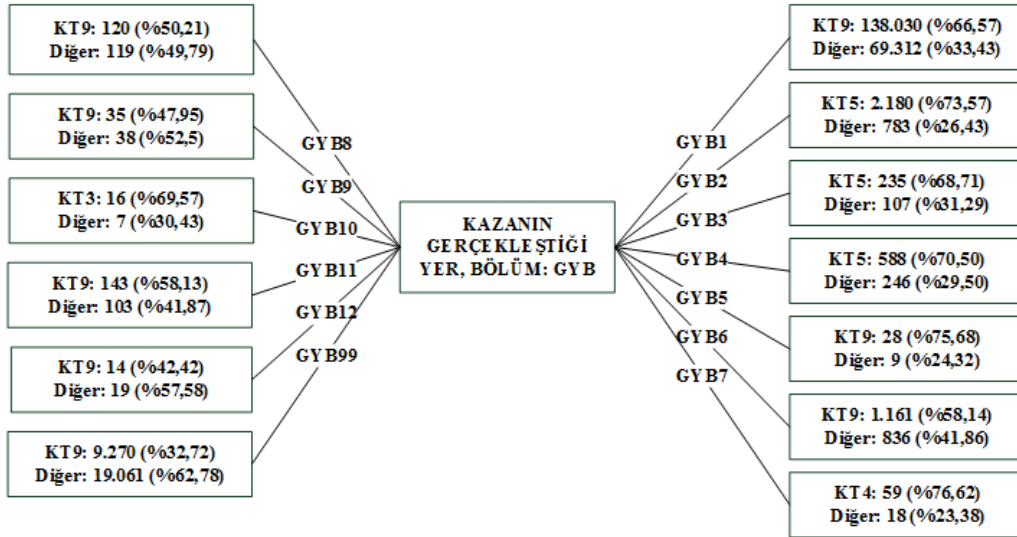
Persona vd. [82] kazaların yaşanmasında öncelikle bireylerin sorumlu olduğunu, yaralanma ile sonuçlanana kazalar için kullanılan materyal araç-gerecinde de önemli bir yere sahip olduğuna dikkat çekmektedir ve çalışmamızda elde edilen sonuçları desteklemektedir. Çalışmamızda elde edilen sonuçlardan kazanın gerçekleştiği yer bölüm ve yapılan iş (genel faaliyet, özel faaliyet) ile ilgili buğuların Chang ve Tsai [24] araştırması ile uyumlu olduğu görülmüştür.

2.4.4 Karar Ağaç Model Analizi

Çalışmanın dördüncü adımında, kaza türü üzerinde etkili olduğu belirlenen niteliklerin kaza türü üzerindeki etki düzeyini tanımlamak ve görsel bir sunum için karar ağaç modelleri oluşturulmuştur (bakınız: Şekil 2.9 - 2.13). Literatürde veri madenciliği yöntemlerinden Sınıflandırma ve Regresyon ağacı (Classification And Regression Tree: CART) analizinin uygulandığı [82, 96, 100, 102] çalışmalar yürütülmüştür. Daha önce Nenonen [99]’de çalışmasında kayma, tökezleme, düşme nedeniyle yaşanan kazalar için kaza faktörleri bakımından karar ağaç

modeli oluşturmıştır. Bağımsız (girdi) değerleri verilen bağımlı bir niteliğin (değişken) değerini belirleyen, sınıflandırma işlevini öğrenmek için karar ağaç analizi yapılmaktadır [112]. J48’de sınıflandırma yapmak için kullanılan bir karar ağacı algoritmasıdır. Kazanç oranına dayanan varsayılan bir bölme kriteri, test sonuçlarının farklı sayılarını (ve farklı olasılıklarını) dikkate alan bilgiye dayalı bir ölçüt kullanmaktadır [113]. Bilgi kazanım ölçüsü, ağaçtaki her düğümdeki test niteliğini seçmek için kullanılmaktadır ve en yüksek bilgi kazancına sahip olan özellik, geçerli düğüm için test niteliği olarak seçilmektedir [114].

Çalışmamızda kaza türü ve kaza türü üzerinde etkili olan faktörler bakımından karara ağaç modellerini oluşturmak için Weka 3.9.2 v. aracı kullanılmıştır. Şekil 2.9 - 2.12’de verilen ağaç modellerini oluşturmak için sınıflandırma yöntemlerinden J48, kazazedenin mesleği (MES) bakımından kaza tiplerinin ağaç modeli ise Random Tree yöntemi kullanılmıştır. Weka’da J48 sınıflandırma yöntemi olarak bilinen C4.5, Quinlan [75] tarafından geliştirilmiştir. Random Tree yönteminde her düğüm oluşturulmasında niteliklerin rastgele seçildiği ve ağaç kümelerinin oluşma şansının eşit olduğu bir sınıflandırma yapılmaktadır [76]. Şekil 2.13’in oluşturulması için en iyi sonuç Random Tree ile elde edildiği için bu yöntem tercih edilmiştir. Bu bölümde elde edilen bulgular, karar ağaç model analizi ve değerlendirmeler başlığı altında ifade edilmiştir.



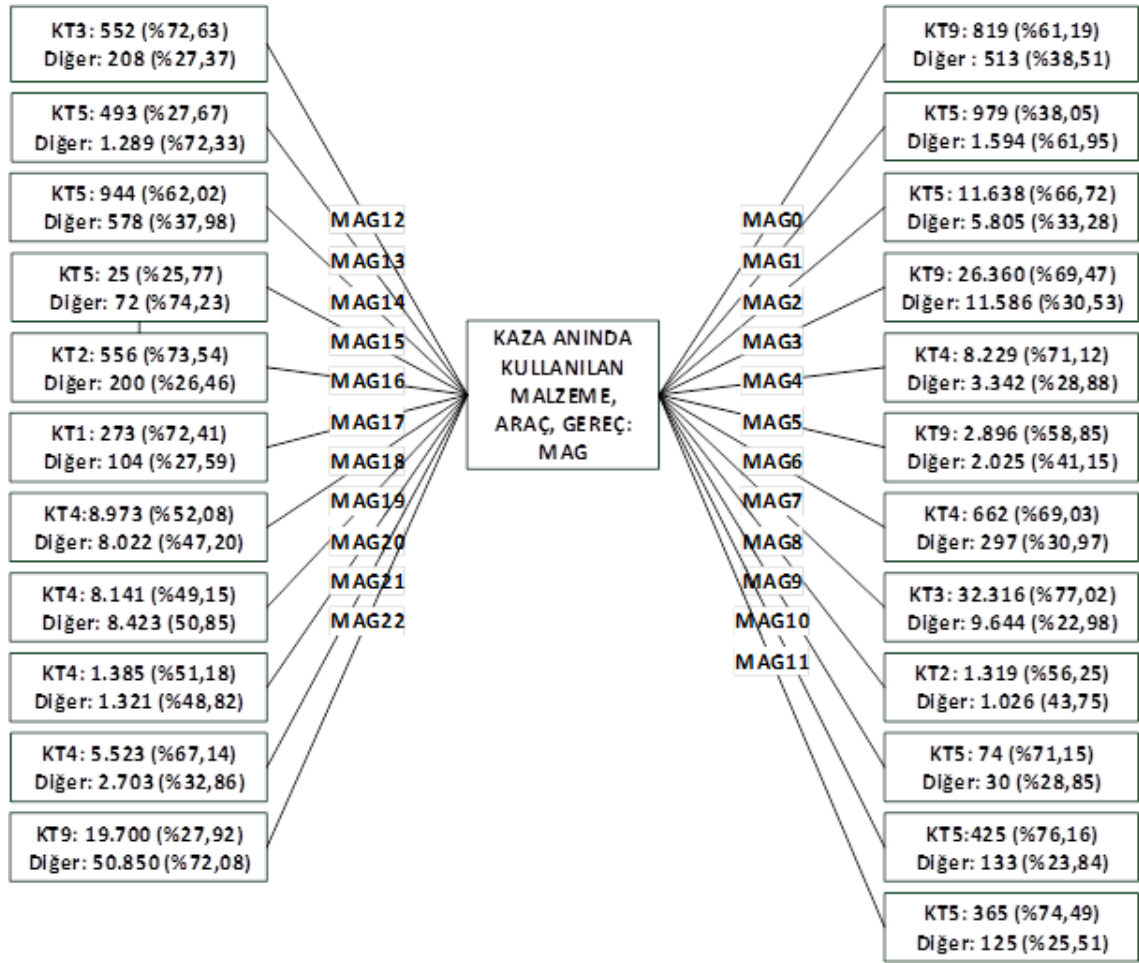
Şekil 2.9 Kazanın gerçekleştiği yer, bölüm (GYB) bakımından kaza tiplerinin ağaç modeli (J48).

2.4.4.1 Karar Ağaç Model Analizi için Değerlendirmeler

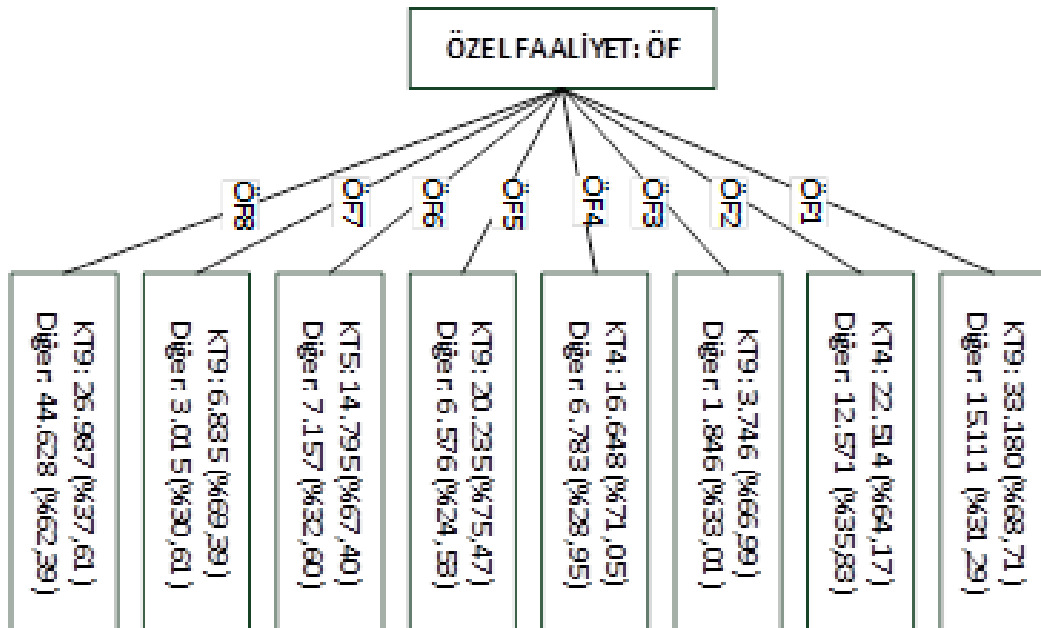
Bu çalışmada, karar ağaç model analizi ile kaza türü üzerinde etkili olan kaza esnasında kullanılan malzeme-araç-gereç (MAG), özel faaliyet (ÖF), genel faaliyet

(GF), kazanın gerçekleştiği yer-bölüm (GYB) ve meslek (MES) faktörleri açısından kaza tiplerinin dağılımları incelenmiştir.

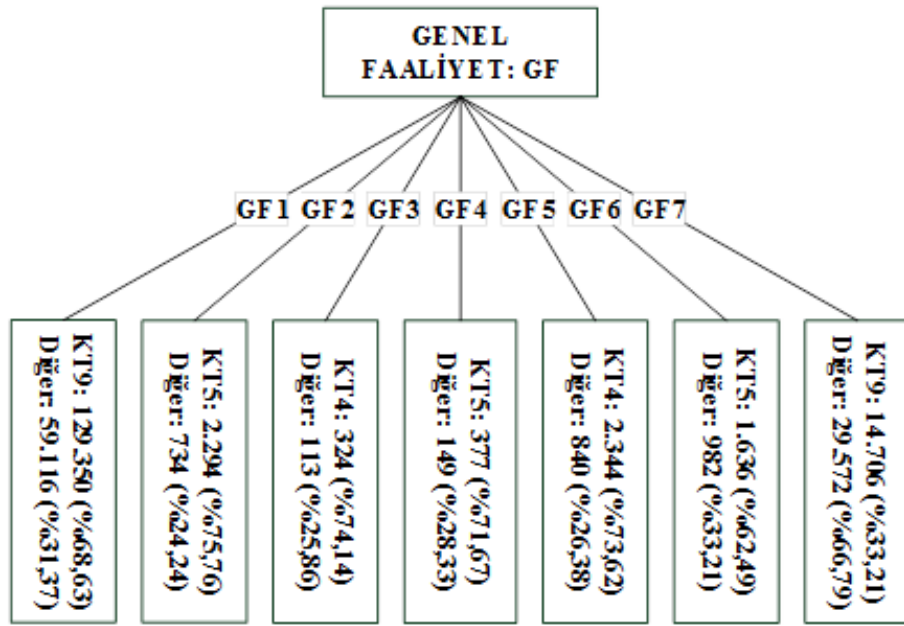
Çalışmamızda, karar ağaç model analizinde elde edilen sonuçlara göre, kazanın gerçekleştiği yer bölüm GYB2: açık hava taşocağı, açık hava madeni; yeni inşa edilen bina, yeraltı, yıkılan, onarılan, bakımı yapılan bina, yüksek basınçlı ortam bulunan inşaat mevki; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer çalışma alanı olması durumunda 242.537 kazadan 2.180'i için (%73,57) kaza türü 5: kayma - tökezleme ve düşme - kişinin düşmesi - aynı düzeyde; kişinin düşmesi - alt düzeye; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer sapma olmaktadır ve kaza türü 5 için GYB2'nin önemli olduğu Şekil 2.9'dan anlaşılmaktadır. Benzer şekilde kaza esnasında kullanılan malzeme araç, gereç MAG4 olduğunda 242.537 kazadan 8.229'unda (%71,12) kaza türü 4 olduğu ve MAG4'ün kaza türü 4 için önemli olduğu Şekil 2.10'da görülmektedir. Özel faaliyet ÖF4: kutu, paket açmak; bir nesneyi atmak, savurmak; bağlamak, yapıştırmak, vidalamak; ele almak, tutmak, kavramak; asmak; bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet) olduğunda 242.537 kazadan 16.648'inde (%71,05) kaza türü 4'ün görüldüğü, ÖF4'ün kaza türü 4 için önemli olduğu Şekil 2.11'de görülmektedir. Kazazedenin genel faaliyeti GF2: Yeni inşaat-bina-inşaat mühendisliği; alt yapı, yol, köprü, baraj ve liman yapımı, yeni modelleme, onarım, genişletme, bina bakımı, inşaat yıkım faaliyetleri; bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet) olduğunda, yaşanan 242.537 kazadan 2.294'ünün (%75,76) kaza türü 5 ile sonuçlandığı yine kaza türü 5 için GF2'nin önemli olduğu Şekil 2.12'de görülmektedir. Kazazedenin mesleği MES7: Elişi çalışanları; kaba inşaat ve ilgili işlerde çalışan sanatkarlar; sanatkarlar ve ilgili işlerde çalışanlar; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer meslek mensupları olduğunda 242.537 kazadan 21.897'sinin (%74,54) kaza türü 4 ile sonuçlandığı, kaza türü 4 için MES7'nin önemli bir role sahip olduğu, Şekil 2.13'de sunulmuştur. Ulaşılan literatür kapsamında imalat sanayii için iş kazaları karar ağaç modeline rastlanmamıştır. Sanmiquel vd. [16] İspanya'da madencilik sektöründe yaşanan kazalar için kaza türü ve kayıp iş günü bakımından karar ağacı oluşturmuştur. Sanmiquel vd. [16] tanımladığı 6 kaza türünün 5'inde 10 - 29 iş günü kaybı yaşandığını, 1.tip kazalarda ise 1 - 9 gün iş günü kaybı olduğunu belirlemiştir. Nenonen [99] Finlandiya'da kayma, tökezleme, düşme nedeniyle yaşanan kazalar için ağaç modeli oluşturmuş, hareket bozukluğu nedeniyle yaşanan kazaların %56'sının, 30 günden fazla iş günü kaybına neden olan kazaların %74'ünün, 4 - 30 iş günü kaybı ile sonuçlanan kazalar için en yüksek oranla, 55 yaş ve üzeri çalışanların %67'sinin, menajer-yönetici-büro işi meslek grubundakilerin de %61'i kayma-tökezleme-düşme nedeniyle iş kazalarına maruz kaldığını ifade etmiştir. Nenonen [99] kayma- tökezleme-düşme nedeniyle yaşanan kazalar için çalışanın fiziksel aktivitesi, iş günü kaybı, mesleği ve yaşının önemli faktörler olduğunu belirlemiştir.



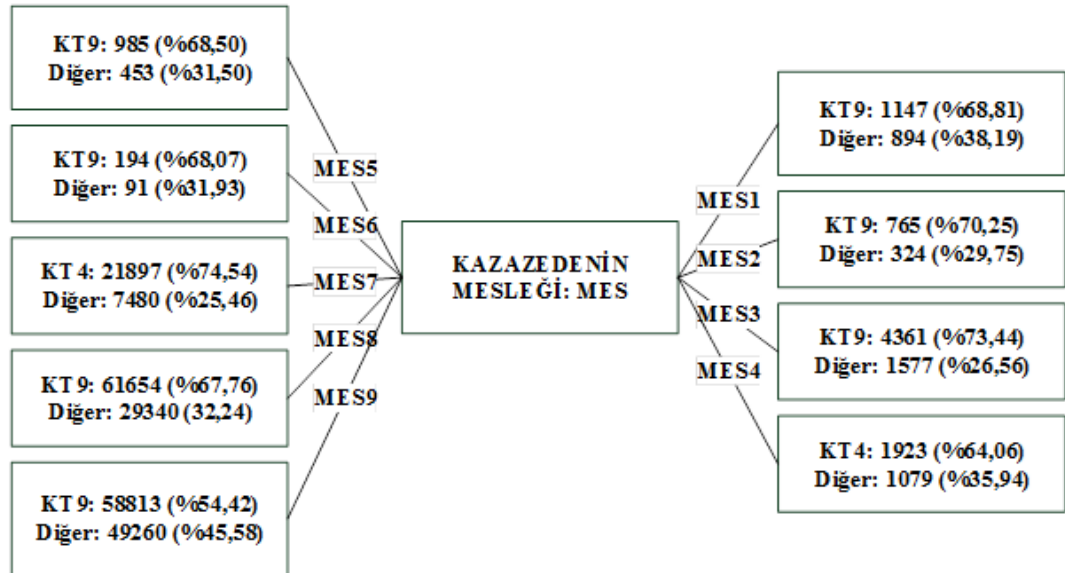
Şekil 2.10 Kaza anında kullanılan malzeme, araç, gereç: MAG bakımından kaza tiplerinin ağaç modeli (J48).



Şekil 2.11 Özel Faaliyet bakımından kaza tiplerinin ağaç modeli (J48).



Şekil 2.12 Genel Faaliyet bakımından kaza tipleri ağaç modeli (J48).



Şekil 2.13 Kazazedenin mesleği (MES) bakımından kaza tiplerinin ağaç modeli (Random Tree).

2.4.5 İlişkilendirme Kuralları Madenciliği

Veri madenciliğinin önemli yöntemlerinden biri olan ilişkilendirme kuralları madenciliği temelde, bir ögenin diğeri ile birlikte ortaya çıkma olasılığıyla ilgilidir. Daha karmaşık analizlerde ise meydana gelme miktarı, meydana gelme sırası, maliyet dikkate alınmaktadır. Veri madenciliği yolu ile ilişkilendirme kuralları analizinde aşağıdaki adımlar izlenmektedir [74].

Adım 1: İlişkilendirme kuralları algoritmasının kullanacağı formata veriler dönüştürülür.

Adım 2: İlişkilendirme algoritması en sık ortaya çıkan öğeleri analiz etme ile sınırlıdır. Bu nedenle bir sonraki adımda, ortaya çıkarılan kurallar daha anlamlı hale gelmektedir.

Adım 3: Son olarak öge kümelerinden ilginçlik ölçütüne dayanarak kurallar oluşturulur.

İlişkilendirme kuralları ile elde edilen kuralın ilginçliği, sırasıyla keşfedilen kuralların kullanışlılığı ve kesinliğini destek (support) ve güven (confidence) değerlerinden anlaşılmaktadır. Bir ögenin destek değeri ise işlem kümesinde belirlenen öncül ögenin sonuç değişkeni ile birlikte görülme olasılığının ifadesidir. Güven (confidence) değeri ise kural sonucunun doğruluğunun bir ölçüsü olup, öncül özelliğın gerçekleşmesinden sonra sonuç özelliğın ortaya çıkma olasılığıdır. Kuralın yüksek güven (confidence) ve destek (support) değeri olması güçlü olduğunu gösterir ancak bu kural her zaman için geçerli olmayabilir. Bu durumda lift değerine de bakılmaktadır [74]. Lift değeri öncül ve sonuç değişkenlerinin birlikte gerçekleşme olasılığının, öncül ve sonuç değişkeninin bağımlı olarak gerçekleşme olasılıklarına oranıdır ve lift değerinin 1’den büyük olması öncül ve sonuç değişkeni arasında pozitif yönlü bir ilişki olduğu anlamına gelmektedir [115]. $A \Rightarrow B$ kuralı için destek (support) değeri eşitlik 2.2, güven (confidence) değeri eşitlik 2.3 ve lift değeri eşitlik 2.4’e göre hesaplanmaktadır [99].

$$\text{Support } (A \Rightarrow B) = P(A \cup B) \quad (2.2)$$

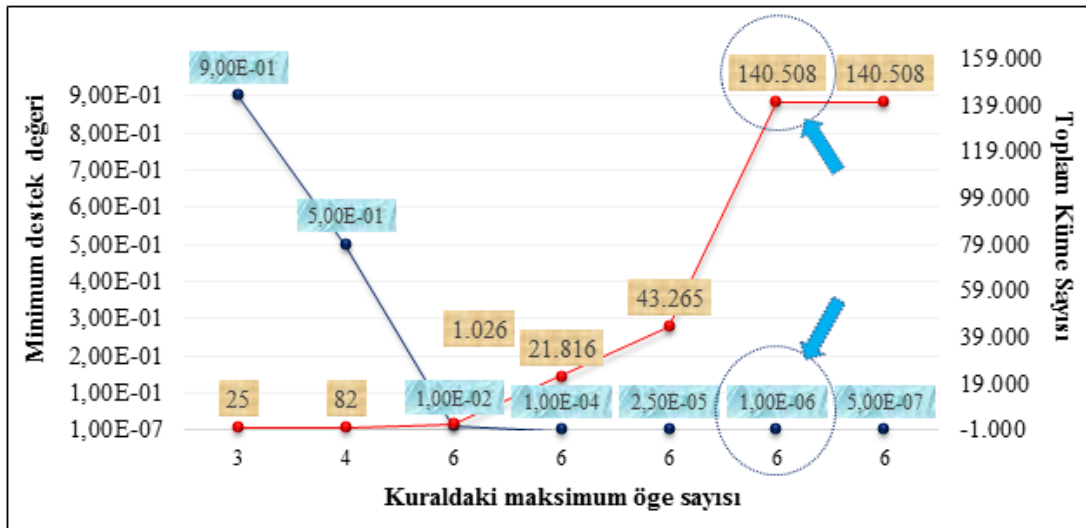
$$\text{Confidence } (A \Rightarrow B) = P(A \setminus B) = P(A \cup B) / P(A) \quad (2.3)$$

$$\text{Lift } (A \Rightarrow B) = P(B \setminus A) / (P(B)) \quad (2.4)$$

Daha önceki çalışmalarda iş kazalarının analiz edilmesinde ilişkilendirme kurallarının yapıldığı (örneğin:[83, 97, 101]), sınıflandırma madenciliği ve ilişkilendirme kural madenciliği analizlerinin yapıldığı (örneğin: [16, 20, 99]) çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmamızda ilişkilendirme kuralları uygulamak için RapidMiner Studio v.9.0 programı kullanılmıştır. Kural çıkarımı için ise FP-Growth (Frequent Pattern-Growth)

algoritması kullanılmıştır. FP-Growth algoritması, veri setinin FP-Tree isimli özel bir grafik yapısına dönüştürmekte, işlem kayıtlarının sıkıştırılması ile sık kullanılan öğeyi hesaplayan, alternatif bir yol izlemektedir [74].

FP-Growth algoritma metriklerinden biri olan min destek (support) değerini belirlemek için standart bir yöntem bulunmamaktadır. Çalışmamızda min destek (support) değerini belirlemek için çeşitli destek (support) değerleri için toplam kural sayısı ve kuraldaki en yüksek öğe sayısının maksimum olması durumu incelenmiştir (bakınız: Şekil 2.14). Bu çalışmada, min destek (support) değeri 1.10^{-6} olduğunda, en çok kural sayısı 140.508 ve kuraldaki en çok öğe sayısı 6 olmakta ve çalışma kapsamında dikkate alınan kaza tiplerinin tümü incelenebilmektedir. Min destek (support) değeri $2,5.10^{-5}$ olduğunda da kuraldaki en çok öğe sayısı 6 olmaktadır ancak, toplam kural sayısı 43.265 olduğundan bu min destek (support) değeri seçilmemiştir. Bu çalışmada min destek (support) değeri 1.10^{-6} kullanılmıştır. Min güven (confidence) değerini belirlemek için sırasıyla min güven (confidence) = 0,7; 0,8; 0,9 değerleri ile elde edilen toplam kural sayıları incelenmiş ve sırasıyla 152.726; 140.224; 127.150 adet kural oluşmuştur. Yüksek doğruluk düzeyli kurallar elde etmek için yüksek düzeyli güven (confidence) ve destek (support) değerlerinin kullanılması önemlidir [116]. Bu yüzden yüksek güven (confidence) düzeyinde elde edilen kural sayısının da maksimum olduğu 0.7 değeri min güven (confidence) değeri olarak seçilmiştir.



Şekil 2.14 Çeşitli minimum destek (support) değerleri için elde edilen kural sayısı ve kuraldaki en yüksek öğe sayısı.

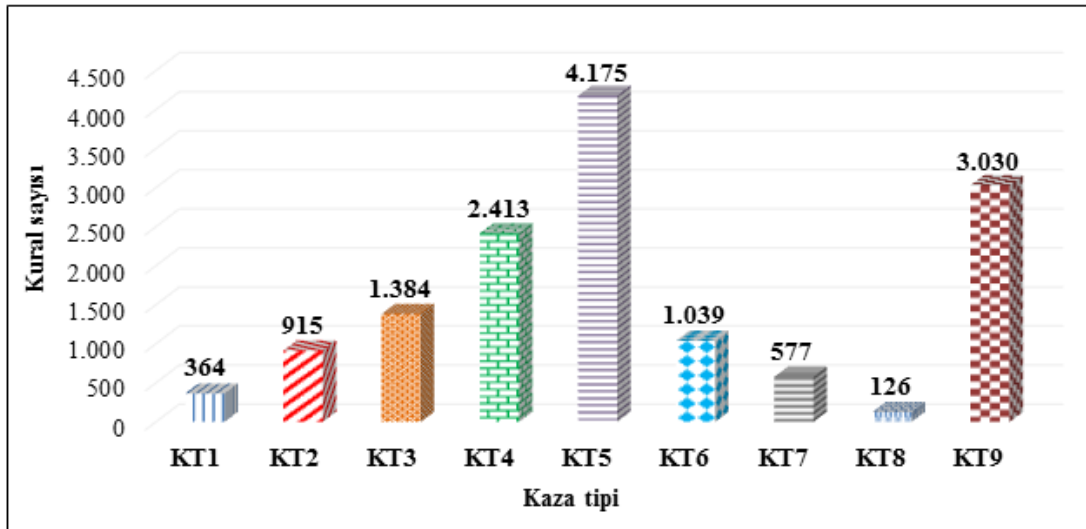
Sonuç değişkeni kaza türü olan 14.023 adet kural elde edilmiştir. Kaza tipleri bakımından elde edilen kural sayılarının dağılımı Şekil 2.15'de verilmiştir. Analiz sonucu elde edilen kurallar her bir kaza türü için destek (support) değeri en yüksek

ilk 10 kural Tablo 2.7 - 2.15’de sunulmuştur. Elde edilen bulguların detayları ilişkilendirme kural analizi ve değerlendirmeler başlığı altında verilmiştir.

Tablo 2.7’de verilen aşağıdaki ilk ilişkilendirme kuralını göz önünde bulunduralım:

$$MES1, MAG17 \rightarrow KT1$$

Meslek ISC08 Kodu (MES) MES1 ise (çeşitli alanlarda hizmet veren kurumların yöneticileri; işletme hizmetleri ve yönetim yöneticileri; profesyonel hizmet yöneticileri; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer yöneticiler) ve kaza sırasında kullanılan malzeme, araç, gereç (MAG) MAG17 (Enerji iletim ve depolama sistemleri (mekanik, basınçlı, hidrolik, elektrik, akü ve akümülatörler dahil); motorlar, jeneratörler (termal, elektrik, radyasyon); bununla ilgili bilinen diğer motorlar, enerji iletim ve depolama sistemleri ile ilgilidir), olduğunda, imalat sisteminde KT1 kazası (elektrik kesintisi nedeniyle elektrikle doğrudan temas; patlama; yangın, ateşleme; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer sapmalar) yaşanmaktadır. Destek (support) değeri, ilişkilendirme kuralının iş kaza kayıtlarında ne sıklıkta görüldüğünün bir göstergesidir. Güven değeri ise, MES1 ve MAG17’nin imalat sisteminde meydana gelmesi durumunda KT1 kazalarının meydana gelme ihtimalini vermektedir.



Şekil 2.15 Kaza tipleri bakımından elde edilen kural sayıları.

2.4.5.1 İlişkilendirme Kural Analizi ve Değerlendirmeler

Literatürde iş kazalarının ilişkilendirme kural madenciliği ile analiz edildiği çalışmalarda, destek (support) ve güven (confidence) [83, 101], Confidence [16, 20, 97], lift ve güven (Confidence) [31], Suport, güven (Confidence) ve lift değerleri ile

[99] kuralların sunulduğu çalışmalar yürütülmüştür. Çalışmamızda ise elde edilen kurallar destek (support), güven (Confidence) ve lift değerleri ile sunulmuştur.

Tablo 2.7 Kaza türü 1 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.

Kural	Nitelikler->Sonuç	Destek (Support)	Güven (Confidence)	Lift
Kural 1	MES1, MAG17->KT1	0,0000165	0,800	97,896
Kural 2	GYB1, MES1, MAG17->KT1	0,0000165	0,800	97,896
Kural 3	GF1, MES1, MAG17->KT1	0,0000165	0,800	97,896
Kural 4	GYB1, GF1, MES1, MAG17->KT1	0,0000165	0,800	97,896
Kural 5	GYB, ÖF7, MES3, MAG17->KT1	0,0000165	0,800	97,896
Kural 6	GF1, MES7, ÖF7, MAG17->KT1	0,0000165	0,800	97,896
Kural 7	GYB1, GF1, MES7, ÖF7, MAG17->KT1	0,0000165	0,800	97,896
Kural 8	ÖF6, MES1, MAG17->KT1	0,0000082	1,000	122,370
Kural 9	ÖF7, MAG21, GYB4->KT1	0,0000082	1,000	122,370
Kural 10	GYB1, ÖF6, MES1, MAG17->KT1	0,0000082	1,000	122,370

Tablo 2.8 Kaza türü 2 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.

Kural	Nitelikler->Sonuç	Destek (Support)	Güven (Confidence)	Lift
Kural 1	MES7, ÖF7, MAG8->KT2	0,000111	0,750	18,273
Kural 2	GYB1, MES7, ÖF7, MAG8->KT2	0,000103	0,758	18,457
Kural 3	GF1, MES7, ÖF7, MAG8->KT2	0,000095	0,793	19,323
Kural 4	MES9, GF5, MAG8->KT2	0,000087	0,750	18,273
Kural 5	GYB1, GF1, MES7, ÖF7, MAG8->KT2	0,000087	0,778	18,949
Kural 6	GYB1, MES9, GF5, MAG8->KT2	0,000078	0,760	18,516
Kural 7	GYB1, MES5, MAG0->KT2	0,000037	0,750	18,273
Kural 8	MES9, ÖF4, GF5, MAG8->KT2	0,000037	0,900	21,927
Kural 9	GYB1, MES9, ÖF4, GF5, MAG8->KT2	0,000037	0,900	21,927
Kural 10	ÖF7, GF5, MAG8->KT2	0,000025	0,857	20,883

Tablo 2.9 Kaza türü 3 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.

Kural	Nitelikle->Sonuç	Destek (Support)	Güven (Confidence)	Lift
Kural 1	MAG7, ÖF7, GF2, GYB2->KT3	0,000033	0,800	8,043
Kural 2	MES9, MAG7, ÖF7, GF2, GYB2->KT3	0,000021	1,000	10,054
Kural 3	MES9, ÖF5, MAG4, GYB3->KT3	0,000016	0,800	8,043
Kural 4	MAG7, MES7, ÖF7, GYB2->KT3	0,000016	0,800	8,043
Kural 5	ÖF2, MES7, GF2, GYB6->KT3	0,000016	1,000	10,054
Kural 6	ÖF2, GYB10->KT3	0,000012	0,750	7,540
Kural 7	MES9, MAG10, GF4->KT3	0,000012	0,750	7,540
Kural 8	GF7, MAG7, GYB3->KT3	0,000012	0,750	7,540
Kural 9	GF7, GYB2, MAG12->KT3	0,000012	0,750	7,540
Kural 10	MAG7, ÖF3, GYB2, MAG12->KT3	0,000012	0,750	7,540

Tablo 2.10 Kaza türü 4 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.

Kural	Nitelikle→Sonuç	Destek (Support)	Güven (Confidence)	Lift
Kural 1	MAG5, GF6, GYB6→KT4	0,000499	0,733	3,777
Kural 2	ÖF3, GF6, GYB6→KT4	0,000359	0,750	3,863
Kural 3	ÖF3, MAG5, GF6, GYB6→KT4	0,000334	0,802	4,131
Kural 4	GYB1, ÖF2, MES7, MAG18, GF5→KT4	0,000305	0,747	3,850
Kural 5	MES8, MAG5, GF6, GYB6→KT4	0,000219	0,757	3,900
Kural 6	MES8, ÖF3, GF6, GYB6→KT4	0,000214	0,788	4,058
Kural 7	MES8, ÖF3, MAG5, GF6, GYB6→KT4	0,000198	0,873	4,495
Kural 8	MES9, MAG5, GF6, GYB6→KT4	0,000099	0,774	3,988
Kural 9	MAG19, GYB3→KT4	0,000095	0,742	3,822
Kural 10	MES8, ÖF2, MAG19, GF5→KT4	0,000095	0,767	3,949

Tablo 2.11 Kaza türü 5 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.

Kural	Nitelikler→Sonuç	Destek (Support)	Güven (Confidence)	Lift
Kural 1	GYB1, GF1, MAG13→KT5	0,003059	0,731	6,325
Kural 2	ÖF6, MAG1→KT5	0,002791	0,744	6,437
Kural 3	GYB1, ÖF6, MAG1→KT5	0,002453	0,742	6,419
Kural 4	MES9, MAG13→KT5	0,002128	0,748	6,471
Kural 5	ÖF6, MAG13→KT5	0,001991	0,784	6,784
Kural 6	GF1, ÖF6, MAG1→KT5	0,001789	0,742	6,419
Kural 7	GYB1, ÖF6, MAG13→KT5	0,001740	0,784	6,787
Kural 8	GYB1, GF1, ÖF6, MAG1→KT5	0,001711	0,744	6,435
Kural 9	GYB1, MES9, MAG13→KT5	0,001703	0,751	6,497
Kural 10	GF1, MES9, MAG13→KT5	0,001344	0,749	6,484

Tablo 2.12 Kaza türü 6 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.

Kural	Nitelikler→Sonuç	Destek (Support)	Güven (Confidence)	Lift
Kural 1	ÖF1, GF7, MAG10→KT6	0,0000206	0,833	7,090
Kural 2	ÖF5, MAG18, MES2→KT6	0,0000165	0,800	6,807
Kural 3	GYB1, ÖF5, MAG18, MES2→KT6	0,0000165	0,800	6,807
Kural 4	GF1, ÖF5, MAG18, MES2→KT6	0,0000165	0,800	6,807
Kural 5	GYB1, GF1, ÖF5, MAG18, MES2→KT6	0,0000165	0,800	6,807
Kural 6	GYB1, ÖF1, GF7, MAG10→KT6	0,0000165	1,000	8,508
Kural 7	ÖF8, MAG7, MES6→KT6	0,0000124	0,750	6,381
Kural 8	GYB1, ÖF8, MES3, MAG10→KT6	0,0000124	0,750	6,381
Kural 9	GF1, MES7, ÖF6, MAG11→KT6	0,0000124	0,750	6,381
Kural 10	GF1, MES7, MAG2, GYB6→KT6	0,0000124	0,750	6,381

Tablo 2.13 Kaza türü 7 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.

Kural	Nitelikler →Sonuç	Destek (Support)	Güven (Confidence)	Lift
Kural 1	ÖF5, MAG10, GF6→KT7	0,0000124	1,000	20,191
Kural 2	MES8, ÖF8, MAG2, GYB8→KT7	0,0000124	1,000	20,191
Kural 3	MES8, ÖF8, MAG2, GF6, GYB8→KT7	0,0000124	1,000	20,191
Kural 4	GF1, MES9, GYB10→KT7	0,0000082	1,000	20,191
Kural 5	MES8, MAG14, GF4→KT7	0,0000082	1,000	20,191
Kural 6	ÖF5, MES3, GYB9→KT7	0,0000082	1,000	20,191
Kural 7	MES9, ÖF6, GYB6, MAG14→KT7	0,0000082	1,000	20,191
Kural 8	MAG7, GYB5→KT7	0,0000041	1,000	20,191
Kural 9	MAG18, GYB9→KT7	0,0000041	1,000	20,191
Kural 10	ÖF3, GYB5→KT7	0,0000041	1,000	20,191

Tablo 2.14 Kaza türü 8 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.

Kural	Nitelikler→Sonuç	Destek (Support)	Güven (Confidence)	Lift
Kural 1	ÖF3, GYB6, MAG11→KT8	0,0000247	1,000	604,830
Kural 2	MES8, ÖF3, GYB6, MAG11→KT8	0,0000247	1,000	604,830
Kural 3	MES9, GF7, GYB6, MAG11→KT8	0,0000165	0,800	483,864
Kural 4	MES8, ÖF3, GF6, MAG11→KT8	0,0000165	0,800	483,864
Kural 5	ÖF8, GF7, GYB6, MAG11→KT8	0,0000165	0,800	483,864
Kural 6	MES9, ÖF8, GF7, GYB6, MAG11→KT8	0,0000165	0,800	483,864
Kural 7	GF6, GYB6, MAG11→KT8	0,0000165	1,000	604,830
Kural 8	MES8, GF6, GYB6, MAG11→KT8	0,0000165	1,000	604,830
Kural 9	ÖF3, GF6, GYB6, MAG11→KT8	0,0000165	1,000	604,830
Kural 10	MES8, ÖF3, GF6, GYB6, MAG11→KT8	0,0000165	1,000	604,830

Tablo 2.15 Kaza türü 9 sonuç değişkeni için en iyi 10 kural.

Kural	Nitelikler→Sonuç	Destek (Support)	Güven (Confidence)	Lift
Kural 1	ÖF8, MAG22→KT9	0,136816	0,826	2,216
Kural 2	MES9, MAG22→KT9	0,132565	0,775	2,078
Kural 3	MAG22, GF7→KT9	0,094336	0,837	2,243
Kural 4	MES9, ÖF8, MAG22→KT9	0,092328	0,855	2,294
Kural 5	GYB1, ÖF8, MAG22→KT9	0,090192	0,806	2,161
Kural 6	ÖF8, GF7→KT9	0,088725	0,777	2,085
Kural 7	GYB1, MES9, MAG22→KT9	0,084197	0,732	1,964
Kural 8	MES9, GF7→KT9	0,078763	0,740	1,985
Kural 9	ÖF8, MAG22, GF7→KT9	0,074838	0,883	2,369
Kural 10	MES9, MAG22, GF7→KT9	0,065759	0,877	2,353

İlişkilendirme kural madenciliği ile elde edilen sonuçlardan bazıları şu şekildedir: Kaza türü 1 için elde edilen kural 1'e göre: analiz edilen tüm işlemlerin % 165.10^{-2} ' sinde sonuç değişkeni kaza türü 1 olan kaza esnasında kullanılan malzeme-araç-gereç: MAG17 ve kazazedenin mesleğinin MES1'in birlikte görüldüğü, MAG17 ve MES1'in birlikte olduğu durumların %80'ünde kaza türü 1'in görüldüğü anlaşılmaktadır. Bunun yanında lift değerinin 1'den büyük olması kaza türü 1'in gerçekleşmesini MAG17 ve MES1'in olumlu yönde etkilediği anlaşılmaktadır. Tablo 2.10'daki kural 1'e göre: analiz edilen tüm işlemlerin %0,049'unda sonuç değişkeni kaza türü=KT4, kazanın gerçekleştiği yer-bölüm=GYB6, genel faaliyet=GF6, malzeme-araç-gereç=MAG5'in birlikte görüldüğü, GYB6, GF6, MAG5'in birlikte olduğu işlemlerin %73,3'ünün sonuç değişkeninin kaza türü 4 olduğu ve lift değerinin 1'den büyük olması da kaza türü 4'ün ortaya çıkması durumunu GYB6, GF6 ve MAG5'in pozitif yönlü etkilediği anlamına gelmektedir.

Her bir kaza türü için elde edilen ilişkilendirme kurallarında görünen özelliklerin sayısı Tablo 2.16'de verilmiştir. En çok ve en az gözlenen alt nitelikler ve mutlak yüzdeleri ise Tablo 2.17'de görülmektedir.

Tablo 2.16 Her bir kaza türü için elde edilen ilişkilendirme kurallarında gözlenen niteliklerin sayısı.

Nitelik	KT1	KT2	KT3	KT4	KT5	KT6	KT7	KT8	KT9
GYB	6	5	9	9	5	5	8	9	2
Derece	3	4	1	1	4	4	2	1	5
MES	9	9	5	6	3	8	6	6	5
Derece	1	1	4	3	5	2	3	3	4
MAG	10	10	9	8	10	10	7	10	8
Derece	1	1	2	3	1	1	4	1	3
GF	4	7	6	9	4	6	4	8	5
Derece	6	3	4	1	6	4	6	2	5
ÖF	6	7	7	6	5	9	6	7	5
Derece	3	2	2	3	4	1	3	2	4

Kaza türleri üzerinde 16 nitelikten 5'inin % 92,4 düzeyinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Bu bölümde, kaza türleri için en iyi 10 ilişkilendirme kuralı Tablo 2.7 - 2.15'de verilmiştir. Bu kuralları göstermek için, Şekil 2.16, Şekil 2.17 ve Şekil 2.18 eklenmiştir. Bu şekillerde kullanılan renkler, bir kaza türü için niteliğin tekrar sayısını gösterir ve kaza türü kuralında görünen nitelikler çoktan aza sırasıyla “koyu kırmızı”> “**kırmızı**” > “**turuncu**”, > “**yeşil**”, > “**sarı**” > “altın sarı”> ve “**pembe**” renkte gösterilmiştir.

Tablo 2.17 Kurallarda en çok ve en az gözlenen alt nitelikler ve mutlak yüzdeleri.

En çok/ En az	Nitelik	Mutlak %	Nitelik	Mutlak %	Nitelik	Mutlak %
En çok	GYB1	24,44	MES9	22,22	ÖF7	13,33
	GYB6	21,11	MES7	12,22	ÖF8	12,22
	GYB2	5,56	MES8	12,22	ÖF6	11,11
	GF1	16,67	MAG11	12,22		
	GF6	15,56	MAG17	10,00		
	GF7	13,33	MAG8	10,00		
En az	GYB8	2,22	MES2	4,44	ÖF2	2,22
	GYB9	2,22	MES3	3,33	ÖF4	2,22
	GYB4	1,11	MES5	1,11	ÖF1	1,11
	GF5	7,78	MAG21	1,11		
	GF2	4,44	MAG4	1,11		
	GF4	2,22	MAG0	1,11		

2.5 Sonuçlar

Bu bölümde, Türkiye’de 2013 - 2016 yıllarında imalat sektöründe yaşanan 242.537 iş kaza kaydı analiz edilmiştir. Çalışmada esas amaç, kaza türü üzerinde etkili faktörleri tanımlamak, bu faktörlerin kaza tipleri bakımından ağaç modellerini oluşturmak ve faktörler bakımından kaza türü sonuç değişkeni olan kurallar elde etmek ve imalat sanayii’nde yaşanan iş kaza sıklıklarının azaltılması için çalışmada elde edilen bulguların risk analiz ve değerlendirme süreçlerinde kullanılmasının faydalı olacağına dikkat çekmektir. Çalışmamızda elde edilen bulgulara göre, kaza türü üzerinde 16 faktörden 5’inin %92,40 düzeyinde etkili olduğu ve bu faktörlerin: kaza esnasında kullanılan malzeme-araç-gereç (MAG), Özel faaliyet (ÖF), Genel faaliyet (GF), Kazanın gerçekleştiği yer-bölüm (GYB), Meslek (MES) olduğu belirlenmiştir.

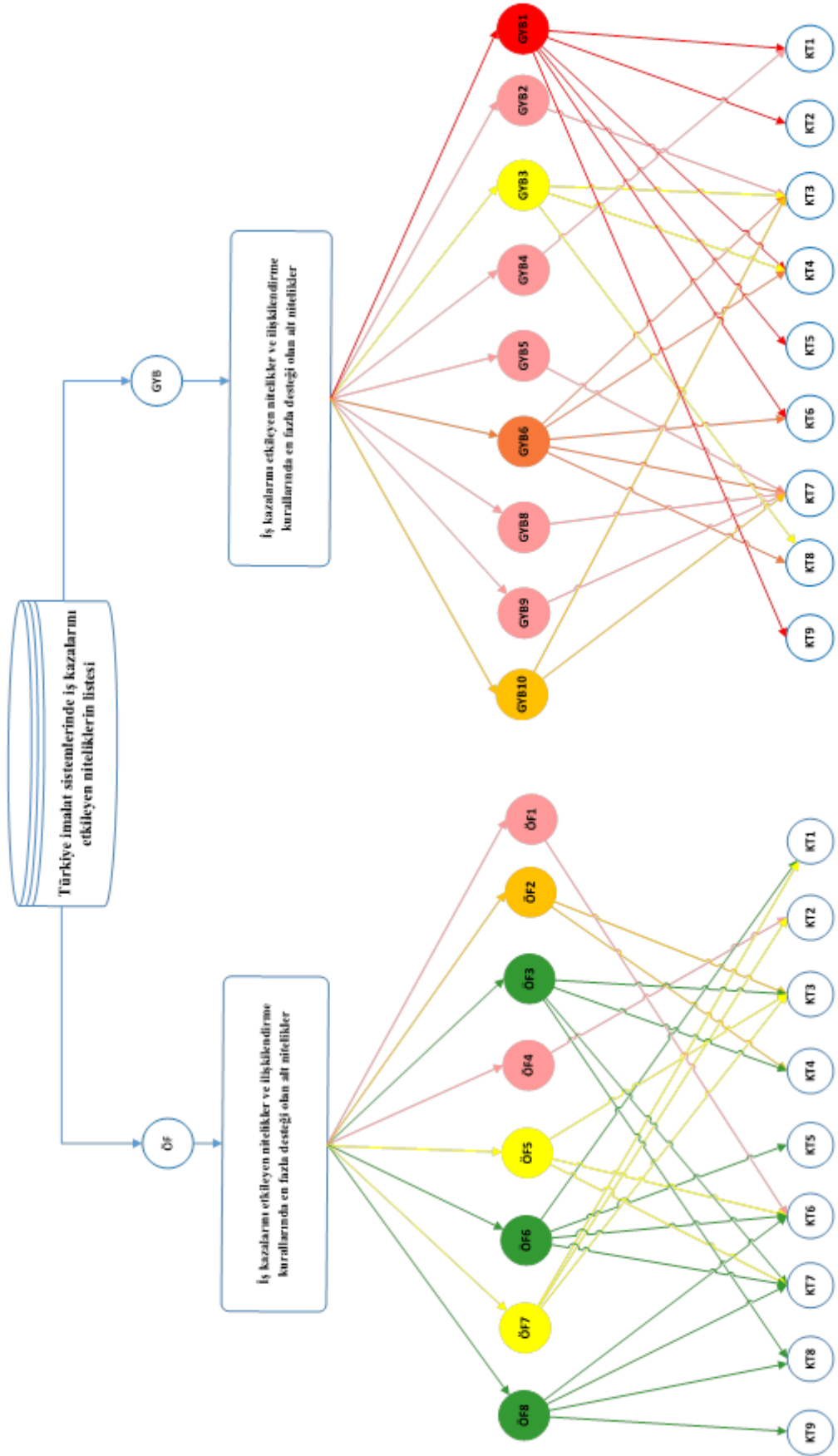
Bu çalışmada, her bir kaza türü için destek (support) değeri en büyük ilk 10 kural analiz ile belirlenmiştir. Kaza tipleri bakımından frekansı en çok olan ilk üç kaza türü sırasıyla kaza türü 9, kaza türü 4 ve kaza türü 6’dır. Bunun yanında, kurallar arasında destek (support) değeri en büyük olan kaza türü 9 için belirlenen kural 1’dir. Söz konusu kural şu şekildedir: özel faaliyet: ÖF8, kaza esnasında kullanılan malzeme araç gereç MAG22 olduğunda kaza türü 9 olmaktadır (destek (support)=0,13681624; conf.=0,826; lift=2,216). Dokuz kaza türü için ifade edilen toplam 90 kural içinde, sıklığı 15 ve üzeri olan nitelikler sırasıyla MES9 (21 tanesinde), GYB1 (20 tanesinde), GF7 (15 tanesinde), ÖF7 (15 tanesinde) içeren kurallar elde edilmiştir.

Kaza türü 1 için elde edilen kurallar içerisinde bulunan kaza esnasında kullanılan malzeme-araç-gereç MAG17 olduğunda kazaların %72,41’i kaza türü 1 ile sonuçlandığı, kaza türü 3 için elde edilen kurallar içinde bulunan faktörlerden kazanın

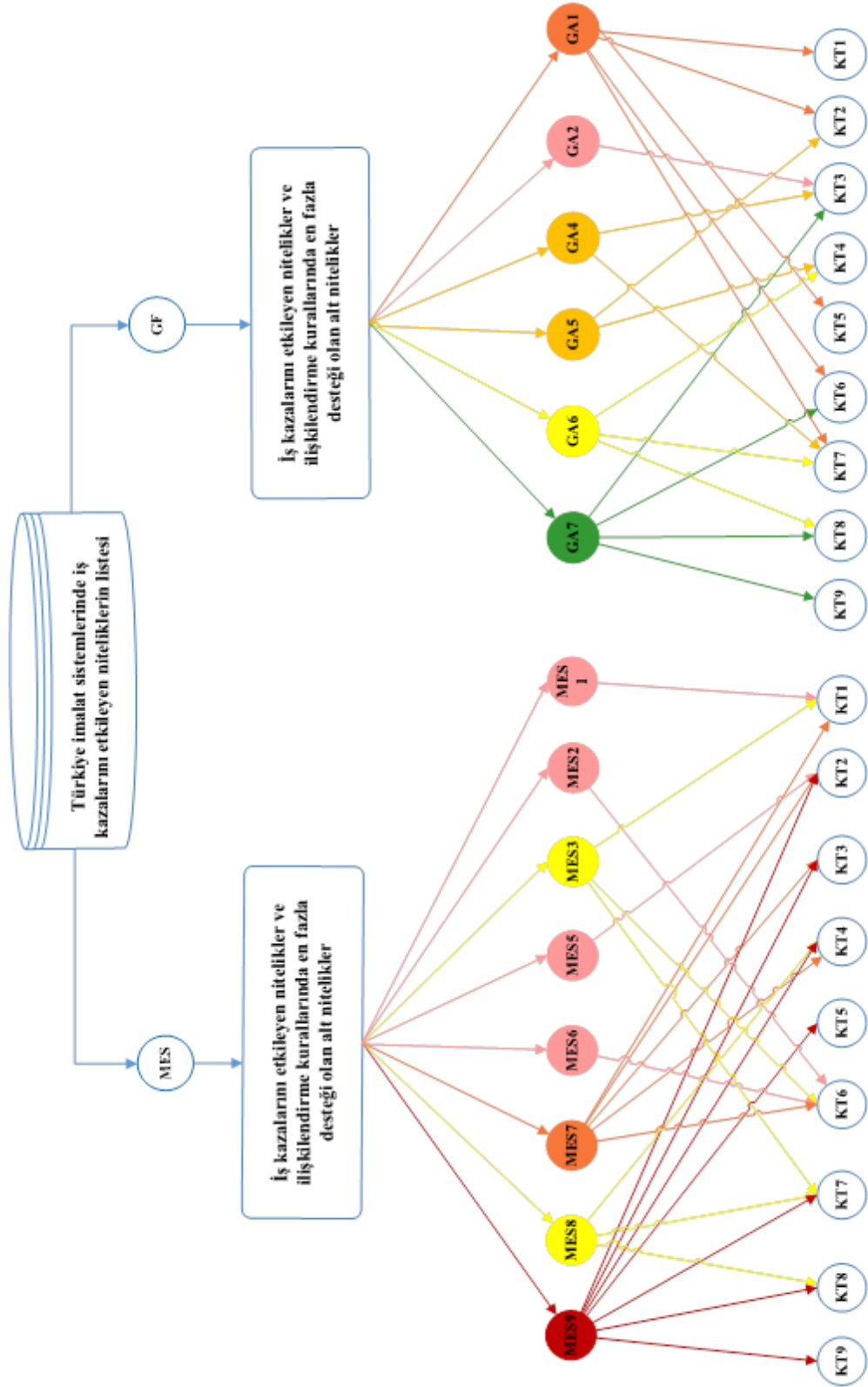
gerçekleştiği yer-bölüm GYB10 olduğunda kazaların %69,57'sinin kaza türü 3 ile sonuçlandığı, kaza türü 4 için elde edilen kurallar içinde bulunan faktörlerden genel faaliyet GF3 olduğunda kazaların %74,14'ü, özel faaliyet ÖF2 olduğunda kazaların %64,14'ü, ve MAG: MAG19 olduğunda kazaların %49,15'i kaza türü 4 ile sonuçlandığı karar ağaç modelinden anlaşılmıştır. Kaza türü 9 için elde edilen kurallarda bulunan faktörlerden kazanın gerçekleştiği yer-bölüm GYB1 olduğunda kazaların %66,57'si, GYB99 olduğunda kazaların %32,72'si, genel faaliyet GF1 olduğunda kazaların %68,63'ü, GF7 olduğunda kazaların %32,21'i, MES9 olduğunda kazaların %54,42'si, MAG22 olduğunda ise kazaların %27,92'si kaza türü 9 ile sonuçlandığı karar ağaç modelinde ortaya konmuştur.

Elde edilen sonuçların kaza önlemek için strateji geliştirilmesinde, kazanın gerçekleştiği yer-bölüm, genel faaliyet, özel faaliyet, kaza esnasında kullanılan malzeme-araç-gereç ve mesleğin dikkate alınarak risk analiz ve değerlendirme uygulamalarının yapılmasında ve bu faktörlerin iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinde vurgulanmasında kullanmak üzere, imalat sanayii'nde çalışan iş sağlığı ve güvenliği profesyonelleri için önemli pratik bilgiler olduğu düşünülmektedir.

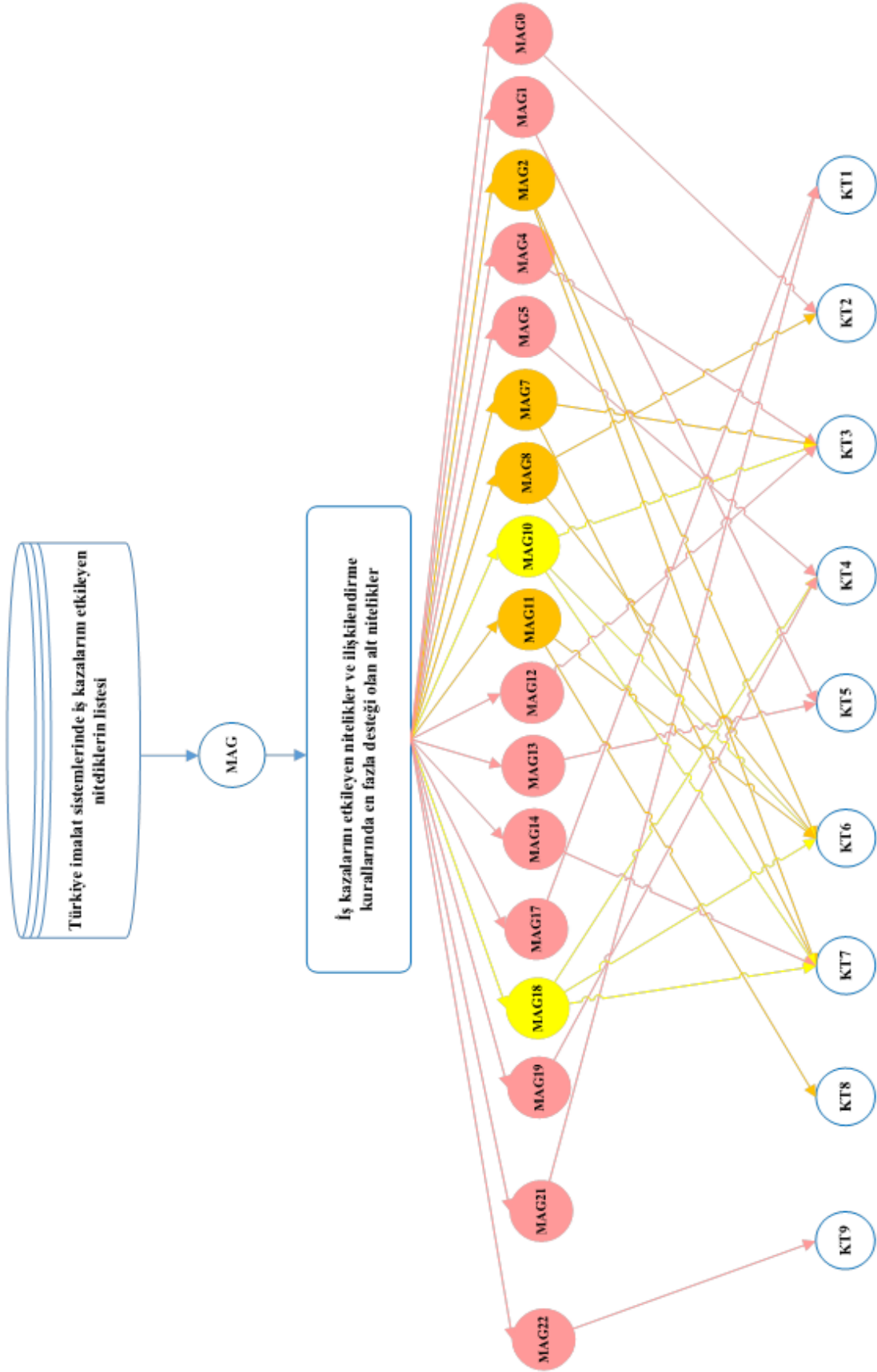
Kaza sırasında kullanılan malzeme, araç, gereç, özel faaliyet, genel faaliyet, kazanın gerçekleştiği yer-bölüm ve mesleğin imalat sistemlerindeki mesleki riskleri etkileyen en önemli kaza nitelikleridir. İş Ekipmanı Kullanımında Sağlık ve Güvenlik Şartları (İEKSGŞ) yönetmeliğinde de belirtildiği gibi [117], özel risk taşıyan iş ekipmanı, iş sağlığı ve ergonomisi, çalışanları bilgilendirmek ve çalışanların eğitimi gözden geçirilmelidir. Malzeme, araç, ekipmanla ilgili tehlikelerden kaynaklanan risklerden kaçınmak için bu hususlar daha dikkatli yürütülmelidir. Buna ek olarak, karar vericiler, genel faaliyetler ve çalışanın yürüttüğü spesifik faaliyetler nedeniyle ortaya çıkabilecek tehlikeli durumları ortadan kaldırmalı ve çalışanları tehlikeli durumlar hakkında bilgilendirmelidir.



Şekil 2.16 En güçlü 90 kurala göre SA ve PD etki faktörlerinin kaza tiplerinde görülme durumları.



Şekil 2.17 En güçlü 90 kurala göre MES ve GF etki faktörlerinin kaza tiplerinde görülme durumları.



Şekil 2.18 En güçlü 90 kurala göre MAG etki faktörünün kaza tiplerinde görülme durumları.

İş Sağlığı ve Güvenliği için FMEA-FTA-BIFPET Yöntemlerine Dayanan Bir Risk Analiz Yaklaşımı: Tekstil Sektöründe Uygulama

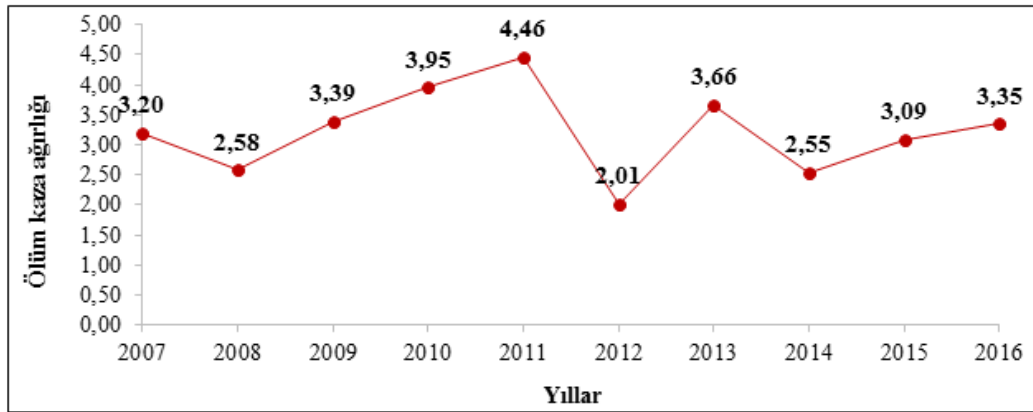
3.1 Özet

Üretim sistemlerinde çalışan sağlık ve güvenliğini tehdit eden risklerin tanımlanması ve kontrol altına alınması, organizasyonların sürekliliği için hayati önem taşımaktadır. Riskleri doğru bir şekilde analiz etmek ve değerlendirmek için çeşitli araçlar kullanılmaktadır. Bu araçlardan en sık tercih edilenlerden birisi, Hata Türleri ve Etkileri Analiz yöntemidir (Failure Mode and Effect analysis: FMEA). Yöntem sıklıkla farklı endüstride uygulanmaktadır. Ancak literatürde yöntem ile ilgili haklı eleştiriler ortaya atılmıştır. Bu bölümde, FMEA yönteminin analiz ve değerlendirme performansını geliştirmek için Hata Ağacı Analiz (Fault Tree Analysis: FTA) yöntemi ve Zamanın Bulanık Olasılık Tahmininde İnanç (Belief In Fuzzy Probability Estimation of Time: BIFPET) algoritmasının avantajından yararlanılarak üç yöntemi aralarında bilgi akışı sağlayacak şekilde bir arada kullanan bir yaklaşım önerilmiştir. Önerilen yöntemin gerçek hayat problemlerinde uygulanabilirliğini göstermek amacıyla, Tekstil sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin, kumaş boyama işletmesinde gerçekleştirilen Apre işlemi için bir uygulama yürütülmüştür. FMEA-FTA-BIFPET yönteminin performansını ise FMEA-FTA ve FMEA-FTA-Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme (Program Evaluation and Review Technique: PERT) dağılımı bütünsel yöntemlerden elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşımın hem pratikte uygulanabilirliğini hem de gerçek hayat dinamiklerini risk değerlendirme sürecine daha iyi yansıtılabileceğini göstermiştir.

3.2 Giriş

Teknolojinin gelişmesi insanlık için önemli değişimlere neden olmuştur. Bu gelişim, hayatı kolaylaştırdığı gibi diğer taraftan yeni ekonomik, sosyal, politik, çevresel, çalışan sağlık ve güvenliği ile ilgili mühendislik problemlerini de beraberinde getirmiştir. Teknolojinin gelişmesi ile birlikte sanayileşme ve makineleşmedeki artan eğilim, çalışma hayatında iş kazaları ve meslek hastalıklarının da artmasına neden olmuştur. SGK istatistik yıllığı (2007-2016)'na göre her yıl ülkemizde 1000'den fazla çalışan, makine ve araçların güvenli kullanım talimatlarına uymamaları, güvensiz çalışma koşulları, çalışanın kişisel kusurları veya bilinmeyen nedenlerden ötürü iş kazası geçirmektedir (bakınız: Şekil 3.1). Kazalar nadir yaşanmış olsalar da etkileri sakat kalma, hatta çalışanın yaşamını yitirmesi gibi son derece ciddi boyutlarda etkisini hissettirmektedir. İş kaza bedelini çalışan canı ile, işveren mal ve itibar kaybı ile ve bunların tamamı için tüm toplum ağır bir bedel ödenmektedir. Şekil 3.1'de verildiği gibi 2007-2015 yılları için iş kazaları ölüm ağırlığı değişimi, iş sağlığı ve güvenliği probleminin Türkiye için son derece ciddi bir konu olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışma hayatında; iş kazası ve meslek hastalıklarını, üretim kayıplarını, şirket itibarının zedelenmesi gibi durumları önlemek ve etkilerini en aza indirmek için risk analiz ve değerlendirme çalışmaları yürütülmektedir. 2012 yılında yayınlanan 6331 sayılı İSG kanunu işverenleri risk analizi yapması veya yaptırmasını zorunlu tutmuştur. Bununla birlikte, 28512 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Risk değerlendirme yönetmeliği ile de risk değerlendirme uygulama esasları 2012 yılında bildirilmiştir. İş Sağlığı ve



Şekil 3.1 Türkiye için yıllara göre iş kazaları ölüm ağırlığı dağılımı [118].

Güvenliği Risk Değerlendirme Yönetmeliğinde “risk: tehlikeden kaynaklanacak kayıp, yaralanma ya da başka zararlı sonuç meydana gelme ihtimali” olarak tanımlanmıştır. Rowe [119] ise riski, istenmeyen olaylar ve olumsuz sonuçlara neden olan olayın potansiyeli olarak ifade etmiştir. Tanımlardan da anlaşılacağı gibi risk analiz ve değerlendirme uygulamasındaki amaç, üretim ve servis sistemlerindeki potansiyel

tehlikeleri tanımlamak, olası etkilerinden korunmak için mevcut uyarıcı sistemler ve güvenlik tedbirlerini gözden geçirmek, tedbirleri uygulanmak ve takip edilmesini sağlamaktır. Bununla birlikte en önemli husus, hangi riskli durumdan başlanması gerektiğine karar vermek yani en öncelikli olan riski belirlemektir. Chen [120] çalışmasında, düzeltici eylemlerin birbirine bağlı uygulamalar olabileceğini, bu yüzden düzeltici faaliyet uygulamalarının doğru sırada uygulanması ile iyileştirme etkisinin en üst düzeyde, en kısa sürede ve en az maliyetle olumlu sonuç alınabileceğini ifade etmiştir. Risklerin derecelendirilmesinde birçok risk analiz ve değerlendirme yöntemi kullanılmaktadır. En sık tercih edilenlerden birisi de Hata Türleri ve Etkileri Analiz yöntemidir. FMEA proaktif ve nicel olmanın yanında hatanın önceden saptanabilirliğini de dikkate alması bakımından diğer yöntemlere göre üstünlük sağlamaktadır. İfade edilen avantajlarının yanında geliştirmeye açık kısımları da bulunmaktadır. FMEA yönteminin pratikte geliştirilmeye açık yönleri bulunmaktadır. Bu çalışmada, FMEA yönteminin sağlamlığını artırmak için FMEA yöntemine FTA ve BIFPET algoritmasının entegre edilmesi hipotezini test etmek için yürütülmüştür. Endüstride kullanım esnekliğine sahip olan ancak geliştirilmeye ihtiyacı olan bu yöntem çalışmada kullanılmıştır. Yöntem performansını geliştirmek için ise BIFPET algoritmasından ve FTA yöntemi avantajlarından yararlanılmıştır. Gerçek hayatta uygulanabilirliğini göstermek için ise tekstil sektöründen faaliyet gösteren bir firmanın kumaş boyama işletmesinde gerçekleştirilen Apre işlemi için uygulanmıştır.

Bu bölümde tanıtılan yaklaşım ile FMEA yöntemi için ileri sürülen aşağıdaki eleştirilerde iyileşme sağlandığı değerlendirilmektedir.

- O, S ve D'yi net olarak belirlemenin zor olması,
- O, S ve D'nin farklı kombinasyonları ile aynı Risk Öncelik Sayısı (Risk Priority Number: RPN) değerinin elde edilmesi,
- RPN değerlerinin tekrar etmesi,
- RPN değerlerinin kesikli değerlere sahip olması nedeniyle çok sayıda ara değer analiz sonuçlarında elde edilemediği,
- RPN skalasının sezgisel olmayan istatistiksel özelliğe sahip olması.

Devam eden bölümlerde sırasıyla, önerilen yöntemin kapsamı ve FTA, FMEA ve BIFPET algoritmasının bütünleştirilmesi, önerilen yöntemin uygulaması gösterilmiş ve sonuçlar FMEA-FTA, FMEA-FTA-BIFPET, FMEA-FTA-PERT dağılımı ile karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

3.3 Literatür Özeti

Risk analizi, üretim ve servis sistemlerinde olası tehlikelere karşı önlem almak, iş kazalarını azaltmak ve sistemin güvenilirliğini artırmak için uygulanmaktadır. Pham [31], risk analizi ile riskin doğası ve derecesi hakkında bilgi sahibi olmaya yarayan bir yöntem olduğunu ifade etmiş, risk analizinde izlenen adımların ise başlıca; tehdit ve tehlikeleri tanımlama, maruziyet ve zayıf noktalar dahil olmak üzere sebep - sonuç analizleri ve riskin açıklanması olarak tanımlamıştır.

Literatürde, risk analiz ve değerlendirme yönteminin geliştirildiği ve uygulandığı birçok çalışma bulunmaktadır. Risk analiz ve değerlendirmesinin uygulandığı çalışmalar arasında: Kjellen ve Sklet [11] iş kazalarını önlemeye yönelik uygulanan risk analiz çalışmalarında, dikkate alınan ölçütler ile kaza nedenleri arasındaki tutarlılık incelenmiş ve özellikle kıyı endüstrisinde uygulanan risk analiz yöntemlerinin geliştirilmeye ihtiyacı olduğunu ifade etmişlerdir. Willquista ve Törner [121]'de gıda üretim endüstrisinde iş kazalarına neden olan riskleri değerlendirmek için kullanılan güvenlik analiz metodlarını incelemiş ve yöntemleri; yanlı reaktif, tarafsız proaktif, yanlı proaktif olarak sınıflandırmıştır. Stave ve Törner [122] gıda sektörü için üretim sistemlerinde, operasyon aşamasında kazaya neden olan faktörleri görünür ve görünmez risk faktörleri olarak kategorize etmiştir. Zafra-Cabeza vd. [123] ise kojenerasyon sistemindeki belirsiz/olası durumları tanımlayarak düzeltici eylem planı oluşturup kayıpları engellemek üzeri bir çalışma yürütmüştür.

Yukarıda özetlenen çalışmalara ek olarak, Kuşan ve Özdemir [124] inşaat sektöründe proje yönetimi için risk analizinde kullanılan yazılımları incelemiş ve risk analizinde kullanılan yazılımları @Risk, CRIMS, Decision Pro, Crystal Ball, iDecide, Monte Carlo, Precision Tree, Predic Risk Analyser, Risk+, Open Plan Professional, REMIS, Ris3Risgen olarak ifade etmişlerdir. Bunun yanında fayda analizi, karar analizi, olasılık ağacı analizi, duyarlılık analizi, Monte Carlo benzetimi teknikleri inşaat mühendisliği uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanıldığı belirlemiştir. Grassi vd. [125] Fuzzy TOPSIS metodu ile riskleri derecelendirmek için kullanmıştır. Grassi vd. [125]'un önerdiği yöntemde kazanın olasılığı ve şiddetinin yanında, insan davranışları ile çevrenin, risk seviyesi üzerine etkisi de risk değerlendirme sürecine dahil edilmiştir. Aneziris vd. [126] alüminyum endüstrisindeki mesleki riskleri değerlendirmek için Çalışma Grubu İş Riski Modelini (WORM) kullanmıştır ve tehlike düzeyinde risk, faaliyet düzeyinde risk, meslek seviyesinde risk ve şirket seviyesinde risk olmak üzere riskleri dört sınıfta tanımlamıştır. Marhaviyas vd. [127], 2000 - 2009 yıllarında bilimsel literatüre sunulmuş risk analiz ve değerlendirme yöntemlerini, kalitatif, kantitatif ve yarı kantitatif olarak sınıflandırmıştır. Tablo 3.1'de Marhaviyas vd. [32] tarafından yapılan risk analiz ve değerlendirme yöntemlerini sınıflandırması

verilmiştir. Marhaviyas vd. [32] dört farklı aşamadan oluşan yeni bir hibrid risk değerlendirme metodu geliştirmiştir. Geliştirilen metodu iş kaza kayıtlarını kullanarak uygulamıştır. Hauke vd. [128] iş sağlığı ve güvenliğinde riskler üzerine literatür incelemesi yapmışlardır. Bu çalışmaların yanında, Mahdevari [129] kömür madeni çalışanlarının sağlık ve güvenliğini etkileyen risk faktörlerini Fuzzy TOPSIS yöntemini kullanarak değerlendirmişlerdir. TOPSIS yöntemi ile her bir risk tipinde tanımlanan risk faktörlerinin olasılık ve büyüklük değerleri önce Fuzzy yöntemi ile dilsel ifadelere dönüştürülmüş daha sonra fuzzy sayılar yardımıyla risk değeri hesaplamışlardır. Son olarak, her bir risk için tanımlanan fuzzy sayılar kullanılarak risklerin yakınlık katsayısı olarak “C” değeri hesaplanmıştır. C değerine göre derecelendirilen risklerin 0.5’den büyük olanları için acil önlem alınması gereken riskler olduğunu ifade etmişlerdir. Esmaili vd. [130] inşaat sektöründe yaşanan iş kazaları üzerinde etkili olan faktörlere dayanan bir risk analizi yaklaşımı önermiştir. Esmaili vd. [131] kaza türlerini tahmin etmek için doğrusal bir modele dayanan özellik tabanlı güvenlik risk değerlendirme yaklaşımı geliştirmiştir. Debnath vd. [132] inşaat sektöründe risk değerlendirmesinde kullanılan verilerin yetersiz veya belirsiz olduğunu, güvenlik önlemlerini tanımlamak için geleneksel kantitatif yaklaşımların yetersiz kaldığını ifade etmiştir. Bu boşluğu gidermek için AHP ve ANFIS yöntemlerini (Artificial Neuron Fuzzy Inference System) kullanarak bir risk değerlendirme modeli önermiştir. Wang vd. [133] MULTIMOORA (The Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis) ve choquet integralini kullanarak Fine Kinney yönteminin mesleki risk değerlendirme yeteneğini geliştirmiştir. Adem vd. [134] rüzgar türbininin yaşam döngüsü boyunca ortaya çıkan iş güvenliği risklerini değerlendirmek için SWOT analizi ve kararsız bulanık bir yaklaşım (hesitant fuzzy approach) kullanmıştır. Braglia vd. [135] risk analizinde çalışan davranışlarının dikkate alınması gerektiğine dikkat çekmiştir ve insan davranışını da dikkate alan Kalite Fonksiyon Yayılımına (Quality Function Deployment: QFD) ve AHP (Analytic Hierarchy Process) dayalı yeni bir risk analizi yaklaşımı önermiştir.

Goerlandt vd. [33] risk analiz süreci için nicel risk analiz yöntemlerinin geçerlilik ve doğruluğunu belirlemeye yönelik yapılan çalışmaların az olduğuna dikkat çekmiş ve mevcut çalışmaları incelemiştir. Pluess vd. [136] eğitimsiz personelin riskleri tanımlaması ve önem düzeyine göre sıralamasını sağlayan Laboratuvar Değerlendirmesi ve Risk Analizi (LARA) yöntemini geliştirmişlerdir. Yöntemin farklı ortamlarda bütüncül bir risk yönetim tekniği olarak kullanılabilmesi ve sonuçların diğer iyi tasarlanmış risk analiz teknikleriyle karşılaştırılmasında karşılaşılan farklılıkları değerlendirmiştir. Akyildiz ve Mentis [40] yük gemisi kazaları ile ilgili riskleri değerlendirmek için Fuzzy AHP ve Fuzzy TOPSIS yöntemlerini kullanmışlardır. Zwirgmaier vd. [137] ise muhtemel başarısızlık senaryolarını,

bunlara karşılık gelen olumsuz sonuçlar ve başarısızlık senaryolarının olasılıklarını anlamayı sağlayan, İnsan Güvenilirliği Analizi (Human Reliability Analysis: HRA) de Olasılıklı Risk Değerlendirme (Probabilistic Risk Assessment: PRA) yönteminin bir parçası olarak kullanılan ve insan hatalarını sayısallaştırmaya yardım eden bir yöntem kullanılmış ve Bayes ağı yöntemini de insan hatalarının bilişsel nedenlerini belirlemek için kullanılmıştır. Mutlu ve Altuntaş [6] çalışmalarında, Türkiye’de yürütülen iş sağlığı ve güvenliği temalı lisansüstü tezleri incelemiş ve tezlerde en sık kullanılan ilk üç risk analiz yönteminin; L tipi matris metodu, Fine Kinney yöntemi ve FMEA yöntemi olduğunu ifade etmiştir.

Literatürde, risk analiz ve değerlendirme uygulamalarının yürütüldüğü çalışmaların yanında yöntem önerilerinin yapıldığı çalışmalar da yürütülmüştür. Ancak, üretim sistemlerinin güvenli hale getirilmesi, iş kazaları ve meslek hastalıklarının önlenmesi için, risk analiz ve değerlendirme yöntemlerinin daha fazla geliştirilmesi

Tablo 3.1 Risk analiz ve değerlendirme yöntemleri [32]

Kalitatif Teknikler	
Chek List	Kontrol Listesi
What if Analysis	Olursa ne olur Analizi
Safety Audits	Güvenlik Denetimi
Task Analysis	Görev Analizi
STEP	The Sequentially Timed Event Plotting (STEP): Ardışık Zamanlı Olay Çizim Tekniği
HAZOP	Hazard and Operability Study: Tehlike ve İşletilebilirlik Analizi
Kantitatif Teknikler	
PRAT	Proportional Risk-Assessment: Oransal Risk Değerlendirme Tekniği
DMRA	Decision Matrix Risk-Assessment (DMRA): Karar Matrisi Risk Değerlendirme
Societal risk	Karar Matrisi Risk Değerlendirme
QRA	Toplumsal Risk
CREA	Quantitative Risk-Assessment: Kantitatif Risk Değerlendirme Tekniği
PEA	Clinical Risk and Error Analysis: Klinik Risk ve Hata Analizi
WRA	Predictive, Epistemic Approach:
	Weighted Risk Analysis: Ağırlıklandırılmış Risk Analizi
Hibrid Teknikler	
HEAT/HFEA	Human Error Analysis Techniques/ Human Factor Event Analysis
FTA	Fault Tree Analysis: Hata Ağacı Analizi
ETA	Event Tree Analysis: Olay Ağacı Analizi
RBM	Risk-Based Maintenance: Risk Temelli Bakım

gerektiğine dikkat çekilmiştir [11, 33, 34, 128]. Risk analiz ve değerlendirme sürecinde geliştirilmesi gereken başlıca iki problem dikkat çekmektedir. Analiz sürecinde ihtiyaç duyulan bilgilerin eksik oluşu diğer bir deyişle doğru bilgiye ulaşımın zorluğu ile elde edilen sonuçların karar vericilerin görüşlerinden etkileniyor olması ve gerçek durumu yansıtmamasıdır.

Eduljee [73]'de risk değerlendirmelerinde karar aşamasındaki problemlerin çözümüne yönelik ilgili uzman ve paydaş görüşlerine dayanan uzlaşma bir çözüm geliştirilmesi gerektiğini vurgulamıştır. Gürcanlı ve Müngen [41], Debnath vd. [132]'de İnşaat sektörü için yapılan risk değerlendirmesinde ihtiyaç duyulan bilgilerin yetersiz ve belirsiz olduğuna dikkat çekerek, güvenlik önlemlerini tanımlamak için geleneksel kantitatif yaklaşımların yetersiz kaldığını ifade etmiş, bu boşluğu gidermek için bulanık mantık yaklaşımı bir risk değerlendirme modeli önermiştir.

Yukarıda literatür bilgisine dayanılarak ifade edilen eksiklikleri gidermek maksadıyla, bu çalışmada, üretim sistemlerini oluşturan, üretim süreçlerinin etkinliğinin artırılması aynı zamanda iş sağlığı ve güvenliğinin geliştirilmesi için Hata Türü ve Etkileri Analiz (Failure Mode and Effect Analysis: FMEA) yöntemi, Zamanın Bulanık Olasılık Tahmininde İnanç (The Belief in Fuzzy Probability Estimations of Time: BIFPET) algoritması ve Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis: FTA) yöntemleri arasında bilgi akışının sağlanarak bütünleştirildiği bir risk analiz ve değerlendirme yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntem ile çeşitli seviyelerde bulunan karar vericilerin bilgilerinin risk değerlendirme sürecinde dikkate alındığı ve böylece gerçek hayat pratiklerine ve uygulamalarına daha yakın sonuçların elde edileceği düşünülmektedir. Bu bölümde önerilen risk analiz ve değerlendirme yaklaşımına, ulaşılan literatür kapsamında rastlanmamıştır.

3.4 Kullanılan Yöntemler

3.4.1 Hata Ağacı Analizi- Fault Tree Analysis (FTA)

Hata Ağacı Analizi (FTA), tanımlanmış istenmeyen bir üst olayın meydana gelmesine katkı sunan potansiyel nedenlerin, koşulların ve faktörlerin tanımlanması ve analiz edilmesine olanak sağlayan tümdengelimli bir analiz yöntemidir [138]. FTA yöntemi, sistem güvenilirliğini, kullanılabilirliğini olumsuz etkileyecek potansiyel olay veya durumların hiyerarşik akışını analiz etmek, değerlendirmek ve grafik olarak göstermek için kullanılmaktadır [139].

FTA yönteminin çok sayıda kullanım amacı bulunmaktadır, bunlardan bazıları aşağıda verilmiştir [139]:

- Tanımlanmış bir üst olayın meydana gelmesine katkı sağlayan alt olayların mantıksal kombinasyonlarını ve üst olayı azaltmada alınacak önlemler için alt olayların önceliklerini belirlemek,
- Bir sistemi geliştirme sürecinde istenmeyen olayların nedenlerini belirlemek,
- Bir sistemi analiz etmek, güvenilirliğini tehdit eden bileşenleri belirlemek ve bu yönde tasarım değişikliği vb. durumlara karar vermek,
- Olasılıksal risk değerlendirme sürecine yardımcı olmaktır.

Literatürde, FTA yöntemi güvenilirlik analiz yöntemlerinden biri olan Hata Türü ve Etkileri Analiz Yöntemi (FMEA) ile birlikte kullanımı önerilmektedir. FTA yöntemi yukarıdan aşağıya doğru tündengelim bir hata analizi gerçekleştirirken FMEA yöntemi aşağıdan yukarıya doğru tümevarımsal hata analiz yaklaşım izlemektedir ve bu iki yaklaşımın birleştirilmesinin analiz sonuçlarının güvenilirliğini artıracak bir argüman sağlamaktadır [139].

Literatürde FTA ve FMEA yöntemlerinin birlikte kullanıldığı çalışmalar da yürütülmüştür. Li ve Gao [138] radikal bakımı dikkate alan güvenilirlik merkezli bakım kapsamında bakım operasyonlarına karar verebilmek için sistemdeki potansiyel kök nedenlerinin bilinmesi ve kritiklik analizinin yapılması gerekliliğine dikkat çekmiş ve FTA, Hata Türleri ve Etkileri Kritiklik Analizi (Failure Mode Effect and Criticality Analysis: FMECA) yöntemlerini kullanmıştır. Bunun yanında, hata analizi yapılan sistemin güvenilirliğinin belirlenmesinde de FTA yaklaşımını kullanılmaktadır. Labib ve Read [140] felaketler olarak tanımlanan, ciddi kayıpların yaşandığı olaylar ortaya çıkmadan önce yaşanan alt olaylar ve bunların kök nedenlerini analiz etmek ve sistem güvenilirliğini belirlemek üzere FTA aracını kullanmış, çalışma kapsamında incelenen felaketler için güvenilirlik blok diyagramlarını oluşturmuştur.

3.4.2 Hata Türü ve Etkileri Analiz Yöntemi-Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Hata türü ve etkileri analiz yöntemi (Failure Mode and Effect Analysis “FMEA”) bir sistemin, tasarım, süreç ve hizmet yapısında var olan veya olabilecek hata veya problemleri meydana gelmeden önce tanımlamak ve gerekli önlemleri alarak, istenmeyen durumların müşteriye ulaşmasını önlemek, çalışanların iş kazaları ve meslek hastalıklarına yakalanmalarına engel olmak için kullanılan bir mühendislik tekniğidir [141]. FMEA yöntemi ile analiz edilen sistemdeki potansiyel hata türlerinin şiddetleri tanımlanmakta ve riskleri azaltıcı önlem almak için karar vericilere bir argüman sağlamaktadır [48].

FMEA çalışması, analiz edilecek kapsam ile ilgili uzmanlardan oluşan bir takım ile yürütülmektedir. Yöntem, olayların nedenleri ve olayı tetikleyen şartları incelemektedir. Çalışanın işini yürütürken kullandığı ekipman veya bileşenlerini analiz etmeyi, bileşenlerin koşullarını, parçası oldukları sistem koşullarıyla ilişkilendirmektedir. FMEA analizini yürütmedeki amaç aşağıdaki gibi özetlenebilir [48]:

- Bir sistemin düzgün bir şekilde çalışmasını olumsuz yönde etkileyecek arıza veya hataları tanımlayarak, bu hataların etkilerini en az seviyeye indirmek,
- Bir müşterinin taleplerine, en yüksek memnuniyet düzeyinde cevap verebilmek,
- Bir sistemin güvenliğini veya güvenilirliğini geliştirmek için zayıf hususların sistem üzerindeki etkileri ve olasılıkları belirlemek,
- Bir sistemin sürekli iyileşmesine olanak sağlamaktır.

FMEA yöntemi aynı zamanda, değerlendirilen ürün ve proseslerin kalitesini ve güvenilirliğini geliştirmeye, ürünün yeniden tasarlanması gerektiği zamanın belirlenmesine, maliyetlerin azaltılmasına, risklerin ve etkilerinin kabul edilebilir düzeye indirmeye ve risk kontrol planlarının oluşturulmasına, mühendislerin öncelikle ortadan kaldırmak için hangi riske odaklanması gerektiği yönünde kararların alınmasına ve müşteri memnuniyetinin artmasına katkı sunması gibi faydalar sağlamaktadır [48]. Literatürde de ifade edilen amaçları gerçekleştirmek maksadıyla, FMEA yaklaşımı risk analiz sürecinde sıkça kullanılmakta ve iyi bilinmektedir [136, 142–149]. Ancak, FMEA'nın gerçek endüstri uygulamalarında ihtiyacı karşılamadığı, önemli zayıflıklarının olduğu yönünde eleştiriler yapılmıştır [150–156]. Liu vd. [45] ve Liu [49] FMEA yöntemi ile ilgili literatürde yürütülmüş çalışmalarda, ifade edilen eleştirilere dikkat çekmiştir. FMEA yönteminde eleştirilen hususlar IEC 60812 [48], Liu vd. [45] ve Liu [49] ile çeşitli yazarların çalışmalarından yararlanılarak Tablo 3.2'de özetlemiştir.

FMEA'yı iyileştirmek için uzmanların bulanık kural çerçevesinde riskleri, dilsel ifadeler ile değerlendirmelerinin daha doğru bir yaklaşım olduğu, bu yaklaşım sayesinde RPN'nin daha esnek bir yapı kazandığı, niteliksel verilerin niceliklere dönüştürüldüğü ve uzman görüşlerinin daha tutarlı bir hal aldığı ileri sürülmüştür. FMEA yönteminin bulanık mantık yaklaşımı ile yeniden yorumlandığı çalışmalar da literatürde mevcuttur (örneğin: [34, 47, 146, 147, 157–159]). Buna karşın, bulanık kurallı yaklaşımların gerçek endüstrilerde uygulanabilirliği ile ilgili şüpheler bulunmakta, daha fazla araştırma yapılması da önerilmektedir [155].

Eduljee [73], Yang vd. [160] ve Liu vd. [45] FMEA performansını geliştirmek için önerilmiş çeşitli risk önceliklendirme modelleri ile ilgili incelemeler yapmış ve FMEA yöntemdeki zayıflıkların bir karar verme problemi olduğunu ifade etmişlerdir. Risk analiz ve değerlendirme yöntemleri ile birlikte karar probleminin çözümüne yönelik kullanılan çok kriterli karar verme yöntemleri de literatürde yoğunlukla kullanılmıştır [161–172]. Risk analiz yöntemlerinden FMEA yöntemi indüktif analiz yöntemi olarak bilinmektedir ve tümdengelim yaklaşımlı FTA yöntemi FMEA yöntemini tamamlayıcı olarak, hata türleri ve bunların potansiyel kök nedenlerinin en alt düzeye kadar analiz edebilmek için kullanılabilmektedir [139]. Literatürde, FMEA ve FTA yöntemlerinin bütünleşik kullanıldığı çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalardan, de Queiroz Souza ve Alvares [173] güvenilirlik merkezli bakım kapsamında, güç üreten bir sistemin hidrolik tribün ve yağ sirkülasyon sistemi için hata türleri kök nedenlerini FTA yöntemi ile belirleyip FMEA yöntemi ile risk skorlarını hesaplamış ve riskleri derecelendirmiştir. Khaiyum ve Kumaraswamy [174], otomatik gaz sızdırma sistem güvenliğini geliştirmek için hata türlerini ve çeşitli kök sebeplerini FTA yardımı ile belirlenmiş ve FMEA yöntemi ile de riskleri kantitatif olarak analiz etmiştir. Khaiyum ve Kumaraswamy [175] yazılım endüstrisinde gerçek zamanlı bütünleşik bir projenin güvenliğini, verimliliğini ve sürdürülebilirliğini artırmak için ihtiyaç duyulan stratejileri elde etmek için FMEA ve FTA yöntemlerini entegre ederek sistemi analiz etmişlerdir. Zhang vd. [176] paletli araçların hatalarını incelemek için FTA ve FMEA yöntemlerini entegre ederek kullanmışlardır. FTA ile ana hatadan başlayarak kök nedenlerin analiz edip, hatalar aralarındaki ilişkileri de belirlemişlerdir. FTA ile belirlenen potansiyel kök nedenlerinin risk derecelerini FMEA yöntemi ile hesaplamıştır. Martins ve Gorschek [177] ise kritik bir sistem için FMEA uygulaması yapıp sistemdeki en kritik hatalar için FTA uygulamasını yürütmüştür.

Literatürde FMEA yönteminin bulanık mantık ve çeşitli çok kriterli karar verme yöntemleri ile bütünleştirildiği çalışmalar da yürütölmüş ancak önerilen yöntemlerin gerçek endüstri uygulamaları için yeterli olmadığına ve geliştirilmesi gerektiğine dikkat çekilmiştir [125]. Çalışmamızda, FMEA yönteminin [48] analiz gücünü geliştirmek ve gerçek hayatta karşılaşılan birden fazla karar vericinin etikisini hesaplama sürecine dahil etmek için FTA yöntemi [139] ve BIFPET (Belief in Fuzzy Probability Estimation of Time) algoritmasının avantajlarından yararlanılmıştır.

Literatürde risk alma davranışları [188], çinli kömür madeni işçilerinin karşılaştığı ergonomik risk faktörleri [189], kas-iskelet sistemi yaralanmalarında risk faktörleri [190], kişisel etkileşimler kaynaklı mesleki risk faktörleri [191], iş sağlığı ve güvenliği sürecinde dijital insan modellemesi [192] ve görsel ergonomi [193] ile ilgili çalışmalar da yapılmıştır.

Tablo 3.2 FMEA yönteminde eleştirilen hususlar (IEC 60812 [48], Liu vd. [45] ve Liu [49] çalışmalarına dayanılarak ve geliştirilerek hazırlanmıştır).

Eleştirilen Husus	Referanslar
FMEA'da O, S ve D'nin eşit ağırlıkta alınması,göreceli önemin dikkate alınmaması değerlerinin göreceli önemleri dikkate alınmaz.	[44, 153, 178], [179–181]
O, S ve D'nin farklı kombinasyonu ile aynı RPN değeri elde edilebilmektedir. Bu durum kaynak ve zaman israfına neden olabileceği gibi bazı yüksek riskli durumların gözden kaçmasına da neden olabilmektedir.	[46, 48, 154]
O , S ve D'nin tam olarak belirlenmek oldukça zordur (değerlendiricinin tecrübesi ile uzmanlık alanı değişebilmektedir). FMEA'daki birçok bilgi genellikle belirsizlik içermektedir	[164, 182, 183]
RPN'yi hesaplamak için neden O, S ve D'nin çarpılması gerektiği konusunda herhangi bir bilimsel dayanağı bulunmamaktadır ve kullanılan matematiksel formül tartışmalıdır.	[164, 183]
O değerlendirme tablolarında “olabilirlik” ile “derece” ve S değerlendirme tablolarında “derece”ile “şiddet” arasında aynı yönlü bir ilişki varken, D değerlendirme tablosunda ise “derece” ile “saptanabilirlik” ifadeleri arasında zıt yönlü bir ilişki vardır. Ayrıca O değerlendirme tablosunda Olasılık derecesi ile olabilirlik değerleri arasında doğrusal bir ilişki bulunmamaktadır.	[44, 46, 48] [163]
RPN değeri düzeltici eylemlerin etkinliğini ölçmemektedir.	[43, 120, 160]
O , S ve D değerlerin çarpımı ile 120 farklı RPN değeri elde edilmektedir. RPN değeri sürekli değerlere sahip değildir. 1-1000 aralığındaki birçok sayı görmezden gelinmektedir.	[48, 162, 163], [164, 178]
Hata türleri ve etkileri arasındaki karşılıklı ilişkiler dikkate kullanılmaz.	[48, 161, 178], [184, 185]
RPN hesaplamasında kullanılan matematiksel formül,risk faktörü değerlendirmelerindeki değişime karşı oldukça duyarlıdır. Değerlendirmedeki küçük bir değişim RPN değerinde çok farklı etkilere yol açabilir.	[48, 164, 165], [183]
Farklı hata türleri için aynı RPN değerlerinin elde edilebilmektedir.	[48, 162, 163], [178, 186]
RPN, sadece üç risk faktörünü esas alarak güvenlik açısından değerlendiriyor. Hatanın ekonomik yönü gibi diğer önemli risk faktörleri dikkate alınmaz.	[160, 162, 183]
RPN skalası sezgisel olmayan istatistiksel özelliklere sahiptir.	[154, 162, 187]

3.4.3 Zamanın Bulanık Olasılık Tahmininde İnaç - Belief in Fuzzy Probability Estimation of Time (BIFPET) Algoritması

BIFPET algoritması Shipley vd. [77] tarafından önerilmiştir. Yöntem, temelde proje tamamlanma süresinin belirlenmesinde kullanılan bir algoritmadır. Söz konusu algoritma, proje tamamlanma süresini hesaplarken, uzman görüşleri ile karar vericilerin inançlarını göz önünde bulundurmakta ve bulanık mantık yaklaşımını kullanmaktadır. Bu sayede proje tamamlanma süresinin tarafsız ve gerçeğe en yakın değerinin hesaplanmasına olanak sunmaktadır. BIFPET yönteminin uygulaması literatürde oldukça sınırlıdır. Shipley vd. [194] karar verme sürecindeki belirsizlikleri ele almak ve projedeki her aktivite için, öngörülen tamamlanma süresinin minimum ve maksimum değerler atanması ile BIFPET algoritmasını genişletmiştir. Sanal vd. [195] çizelgeleme problem için BIFPET algoritmasını modifiye ederek kullanmıştır. Shipley ve Stading [196] ise tedarikçi seçim problemi çözüm sürecinde BIFPET algoritmasından yararlanmıştır. Bunlarla birlikte, Altuntas vd. [197] ise yatırım projelerinin inovasyon kapasitesini ölçmek için BIFPET algoritmasını kullanmışlardır.

Çok seviyeli bilgi, doğru sonuca ulaşma gereksinimine katkı sağlamaktadır [197]. Risk analiz sürecinde de belirsizlik ortamı ve güvenilir bilgiye ihtiyaç vardır. Güvenilir bir risk değerlendirmesi için uzman, mühendis, çalışan ve işveren gibi birden fazla karar vericinin bilgi ve görüşleri dikkate alınmalıdır. Sözü edilen süreç, çok seviyeli bilgi girişinin olduğu bir süreçtir. Güvenilir bir risk değerlendirme süreci için, bu çalışmada, Altuntas vd. [197]' in yatırım projelerinin inovasyon yeteneğinin belirlenmesi ile ilgili çalışmasında olduğu gibi, tüm karar vericilerin görüşlerinin dikkate alan BIFPET algoritmasının avantajından yararlanılmıştır. Sözü edilen algoritma uzman, mühendis, işveren, çalışandan oluşan karar vericileri dahil eden çoklu bir perspektif ile risk değerlendirmesinin gerçekleştirilmesine olanak sağlamakta ve karar vericilerin bilgi ve tecrübelerine bağlı belirsizliğin etkisini azaltmak için katkı sunmaktadır. Yöntemde risk analiz ve değerlendirme sürecinde seçilen karar vericiler iş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirme yönetmeliğinin 6. Maddesinde ifade edilen prosedürler ile uyum içerisindedir [80]. Bu çalışmada, FMEA, FTA ve BIFPET metoduna dayanan bir risk değerlendirme yöntemi önerilmekte ve gerçek bir üretim sisteminde uygulaması yapılmaktadır. Elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır.

BIFPET yönteminde izlenen adımlar aşağıda ifade edildiği gibidir [77].

1. Her bir faaliyet (A_i) için iyimser (t_{1i}), en olası (t_{2i}) ve kötümser (t_{3i}) süre ataması yapılır ve faaliyet tamamlanma süresi (t_{Ai}) eşitlik 3.1'de ifade edildiği

gibi hesaplanır.

$$t_{Ai} = \sum_k \tau_{ki} / t_{ki} \quad (3.1)$$

Tüm faaliyetler (A_i) için $\tau_{ki} = 1'$ dir, ($i = 1, 2, \dots, m$ ve $k = 1, 2, 3$).

- Her faaliyetin A_i 'nin t_{ki} değeri için bulanik olasılık (Q_{A1k}) değeri tanımlanır. Tüm t_{ki} değerleri için bulanik olasılık değerleri eşitlik 3.2' de ifade edildiği gibi hesaplanır.

$$Q_{A1k} = \sum_j \alpha_{kij} / a_{kij} \quad (3.2)$$

Burada, (A_i) için tamamlanma süresi t_{ki} ($k = 1, 2, 3; i = 1, 2, \dots, m$ ve $j = 1, 2, \dots, n$) olma durumunun olasılığını a_{kij} ve α_{kij} ise inanç değerini temsil etmektedir.

- k 'nın H kümesinin için $\sum_{k \in H} a_{kij} = 1$ olduğu tüm a_{kij} 'ler için göz önünde bulundurulmalıdır. $k \notin H$ ise $a_{kij} = 0'$ dir.
- (b_{il}) değeri eşitlik 3.3'de ile hesaplanmaktadır.

$$b_{il} = \begin{cases} \sum_k a_{kij} t_{ki}, & \sum_k a_{kij} = 1 \\ 0, & \text{aksi durumda} \end{cases} \quad (3.3)$$

Burada, ($k = 1, 2, 3$) ve $p =$ farklı sayı $\sum_k a_{kij} = 1, 1 \leq l \leq p$.

- Beklenen değere b_{il} olan inanç derecesi $c_{il} = \min \{ \tau_{ki}, \alpha_{kij} \}$ 'dir. $c_{il}, \alpha_{kij} \neq 0$ için belirlenmektedir.
- Faaliyetin beklenen süresi için durulaştırma işlemi eşitlik (3.4)'de ifade edilmiştir.

$$E(t_{Ai}) = \sum_l c_{il} b_{il} / \sum_l c_{il} \quad (3.4)$$

3.4.4 Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği: Program Evaluation and Review Technique (PERT) Dağılımı

PERT dağılımı, uzman kararlarının modellenmesinde sıklıkla kullanılan beta dağılımının bir versiyonudur [198, 199]. PERT ağlarında görevlerin tamamlanma süresi PERT dağılımına uymaktadır [200]. Program Değerlendirme ve Gözden Geçirme Tekniği (PERT: Program Evaluation and Review Technique) projelerin zaman kontrolünü sağlamak için kullanılan bir yöntemdir ve bir projenin minimum tamamlanma süresini hesaplamak için kullanılmaktadır [201]. Literatürde PERT yönetimi sıklıkla kullanılmaktadır. Bu çalışmalardan, Mishakova vd. [202] proje tamamlanma süresinin kontrolü için PERT tekniğinden yararlanmıştır. Klingel [203]

çalışmasında bir proje yöneticisinin projenin öngörülen sürede tamamlayabilme olasılığına dikkat çekmiştir ve PERT tekniği ile yanlı sonuçlar elde edildiği konusunda eleştiride bulunmuştur. Agyei [204] ise projenin minimum tamamlanma süresi ve maliyeti arasında dengeli bir ilişkinin oluşması üzerine bir çalışma yürütmüştür ve PERT ile Kritik Yol Analizi (Criticaly Path Method: CPM) yöntemlerini kullanmıştır. PERT yönteminde faaliyet tamamlanma süresi dikkate alınmaktadır. Ancak bu çalışma kapsamında FMEA yönteminde kullanılan her bir hatanın olasılık, şiddet ve saptanabilirlik olmak üzere risk parametreleri dikkate alınarak PERT dağılımı ile FMEA ve FTA yöntemlerinin bütünleşik uygulaması da yapılmıştır. FMEA-FTA-PERT dağılımının bütünleştirilerek risk analiz ve değerlendirme uygulamasının yürütüldüğü bir çalışmaya ulaşılan literatür kapsamında karşılaşılmamıştır. Bu yöntem ile elde edilen sonuçlar ise FMEA-FTA-BIFPET yöntem performansını değerlendirmek için karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Program değerlendirme ve gözden geçirme tekniği (PERT) dağılımı ile bir projenin yaklaşık olarak tamamlanma süresi hesaplanmaktadır. Bir projede n tane faaliyet olsun ve i 'nci faaliyetin tamamlanma süresi için (a_i) (iyimser), (c_i) (en büyük olasılıklı) ve (b_i) (kötümser) olmak üzere üç parametre tanımlanmaktadır. i 'nci etkinliğin süresi genellikle (a_i, b_i) beta dağılımını takip etmektedir ve i 'nci faaliyetin ortalama tamamlanma süresi m_i ile gösterilmektedir ve (m_i) değeri ve varyans (σ^2) eşitlik (3.5) ve (3.6) yardımı ile hesaplanmaktadır [198, 199].

$$m_i = \frac{a_i + 4 * c_i + b_i}{6} \quad (3.5)$$

$$\sigma^2 = \frac{(b_i - a_i)^2}{36} \quad (3.6)$$

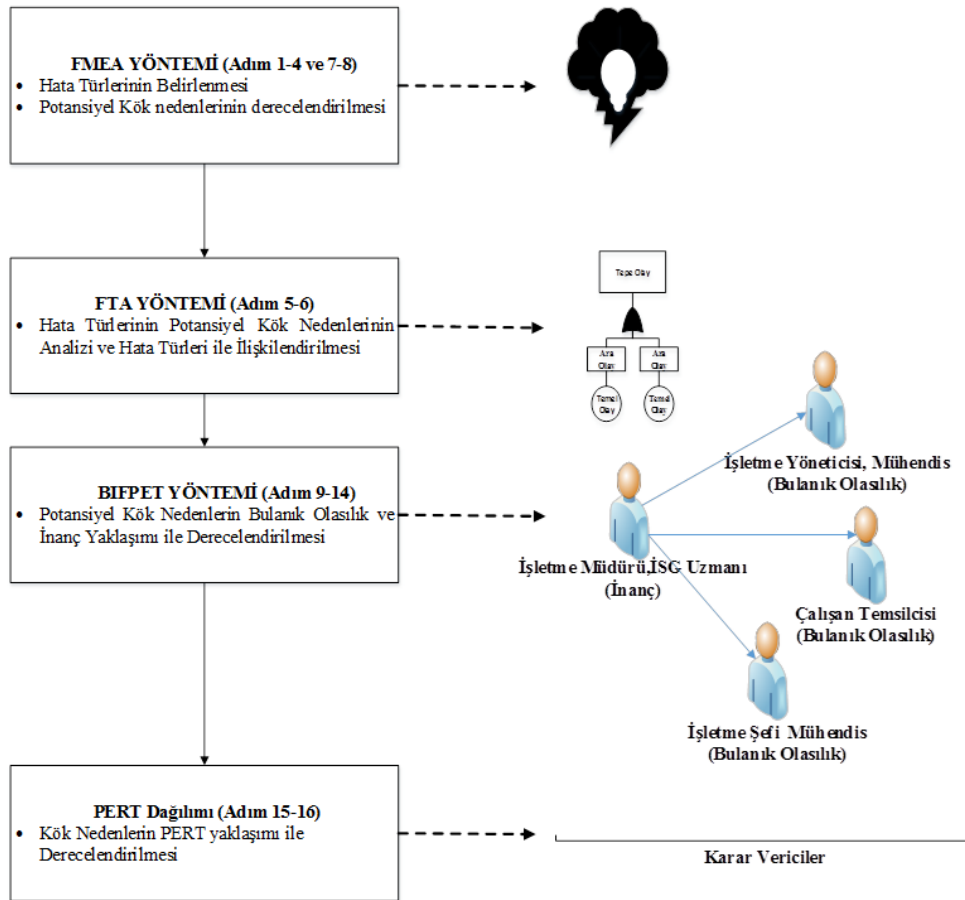
3.5 Önerilen Yöntem

Hata Türü ve Etkileri Analiz yöntemi literatürde sıkça kullanılan ve iyi bilinen bir risk analiz ve değerlendirme aracıdır. Yöntemin avantajları olduğu gibi eleştirilen yönleri de bulunmaktadır. Yöntemin analiz yeteneğini geliştirmek için bu çalışma kapsamında, Belief in Fuzzy Probability Estimation of Time (BIFPET) ve Hata Ağacı Analiz Yöntemlerinin (Fault Tree Analysis, "FTA") avantajlarından yararlanılarak bütünleşik bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin uygulama adımları Şekil 3.2 bilgi akışı ise Şekil 3.3'de verilmiştir.

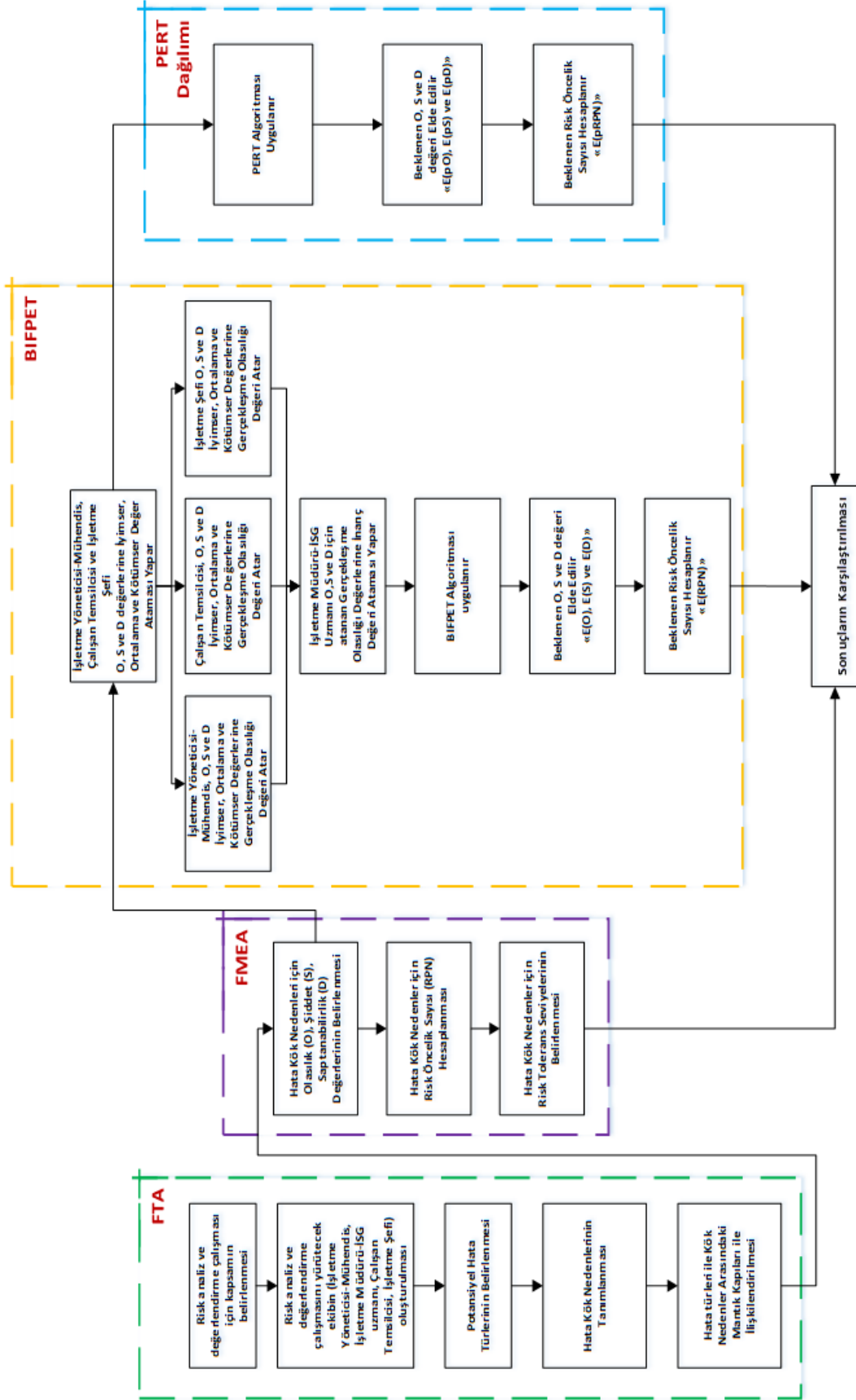
3.6 FMEA-FTA-BIFPET, FMEA-FTA-PERT Dağılımının Bütünleştirilmesi ve Gerçek Bir Endüstride Uygulanması

3.6.1 Problemin Tanımlanması

Bu çalışmada önerilen yaklaşımın uygulaması tekstil sektöründe faaliyet gösteren entegre bir işletmede yapılmıştır. İşletmede open-end ve ring iplik üretimi, örme, iplik ve kumaş boyama işlemleri yapılmaktadır. İşletme üç vardiya çalışmaktadır. İşletmenin nihai ürünleri, iplik, boyanmış iplik, boyanmış kumaştır. Risk analiz ve değerlendirme çalışmasına başlamadan önce tüm işletmeden sorumlu işletme müdürü ile görüşme yapılmış ve işletmeyi hem iş sağlığı ve güvenliği hem de üretim hataları açısından en fazla zora sokan bölüm hakkında bilgi alınmıştır. Söz konusu işletme için en büyük problemin, müşteri taleplerini karşılamayan ürünün, paketlenerek müşteriye iletilmesi olduğu anlaşılmıştır. Bu problemin çözümüne yönelik kilit rol oynayan bölüm ise işletmedeki Boyama bölümüdür. Bu nedenle hata türlerinin tanımlanması ve kök nedenlerin belirlenmesi çalışması boyama işletmesi için verilmiştir (bakınız: Tablo 3.3).



Şekil 3.2 Önerilen yaklaşım.



şekil 3.3 önerilen yaklaşımdaki bilgi akışı.

3.6.2 Uygulama

Bu bölümde, çalışma kapsamında önerilen yöntemin Tekstil Sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin, kumaş boyama bölümündeki Apre işlemi için uygulaması verilmiştir. Boyama işletmesini oluşturan tüm alt işletmeler için FMEA-FTA çalışması yürütülmüştür. Her bir alt işletmenin toplam risk yükü değeri ve ortalama risk öncelik sayısı hesaplanmıştır. En yüksek ortalama risk yükü değerli iş süreci “Kumaş Hazırlama” olduğu belirlenmiştir (Ortalama RPN=437,33; potansiyel kök neden sayısı=3), Apre işlemi için ise (Ortalama RPN=226,40; potansiyel kök neden sayısı=15) olarak belirlenmiştir (bakınız: Tablo 3.11). FMEA ekibine göre Kumaş Hazırlama işlemindeki hatalar yönetimsel iyileştirme çalışmaları ile önlenilecek düzeydedir. Ancak Apre işlemi için tanımlanan potansiyel kök nedenlerini kontrol altına almanın daha güç olduğu hususunda FMEA ekibi fikir birliğine varmıştır. Bu nedenle, önerilen FMEA-FTA-BIFPET bütünleşik risk analiz ve değerlendirme yöntemi,

Tablo 3.3 Boyama işletmesi ve iş süreçleri.

İş öncelik sırası	İş Süreci	Kısa Açıklama
1	Planlama	Müşterinin istediği ürün özelliklerinin açıklandığı sipariş formunun hazırlanması işlemi gerçekleştirilir.
2	Ham Depo	Ham depoda boyama yapılmamış ham kumaşlar bulunmaktadır.
3	Kumaş Hazırlama	Müşterinin talep ettiği, rulolar halindeki ham kumaşların uç uca dikilmesi işlemi gerçekleştirilmektedir.
4	Laboratuvar	Müşterinin istediği kumaş özellikleri dikkate alınarak kumaş renk analizi çalışması yapılmaktadır.
5	Kumaş Boyama	Tekstil liflerinin şekil vb. yapısal özelliklerine göre mekanik ve kimyasal yöntemler kullanılarak renklendirme işlemlerinin yapılmasıdır. Boyama teknesinde belli bir süre kumaşın bekletilmesi ile boyar maddenin kumaşa bağlanması sağlanmaktadır.
6	Apre	Son bitirme işlemidir. Ön işlemler ve boyama işleminden sonra kumaşa istenen yapı ve görünüm özelliklerini kazandırmak için uygulanan işlemler bütünüdür.
7	Kalite Kontrol	Nihai halini alan kumaşların sevkiyat öncesi son kalite kontrol işlemleri gerçekleştirilmektedir.
8	Sevkiyat	Nihai ürününü müşteriye gönderilmektedir.

boyama işletmesinin en öncelikli ikinci işlemi olan Apre işlemi için uygulanmıştır (bakınız: Tablo 3.12, 3.13, 3.14 ve 3.15).

Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için FMEA-FTA ve FMEA-FTA-PERT dağılımından elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.

Önerilen yöntemde izlenen adımlar (bakınız: Şekil 3.2) ve uygulamaları: Adım1-7’de FMEA-FTA yöntemlerinin bütünleştirilmesi ve uygulanması, Adım 8-13’de FMEA-FTA yöntemine BIFPET algoritmasının entegre edilmesi ve uygulanması, Adım 14-15’de ise FMEA-FTA yöntemi ile PERT dağılımının bütünleştirilmesi ve uygulanması verilmiştir.

Adım 1: Risk analiz ve değerlendirmesi yapılacak sistem / iş süreci belirlenmiştir. Burada, analiz edilecek süreç, Kumaş Boyama işlemlerinin yürütüldüğü Boyama İşletmesi’dir.

Adım 2: Risk analiz ve değerlendirme ekibi oluşturulmuştur. Oluşturulan ekipte, Boyama İşletme Yöneticisi-Mühendis, Apre Bölümü İşletme Şefi, Apre Bölümü-Çalışan temsilcisi, Tesis Müdürü ve iş güvenliği uzmanı (İGU) yer almaktadır. Tablo 3.4’de boyama işletmesinde gerçekleştirilen Apre işlemi için FMEA ekibine ilişkin bilgiler verilmiştir.

Adım 3: FMEA yöntemi kapsamında Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerlendirme tabloları ile risk kabul edilebilirlik tablosu uygulamanın gerçekleştirildiği işletmede oluşturulan FMEA ekibinin ortak kararı ile işletmeye özgü olarak oluşturulmuş ve Tablo 3.5, 3.6, 3.7 ve 3.8’de verilmiştir.

Adım 4: Potansiyel hata türleri tanımlanmıştır. Bu aşamada geçmiş arıza/hata kayıtlarından, risk analiz ve değerlendirme ekibinin görüşlerinden yararlanılmıştır.

Adım 5: Hata türleri için potansiyel kök nedenleri tanımlanmıştır.

Adım 6: Hata türleri ile bunların kök nedenleri mantık kapıları ile ilişkilendirilmiştir.

Tablo 3.4 Boyama işletmesi için FMEA ekibi.

Karar verici	İşletmedeki pozisyonu	Sorumlu olduğu birim	Tecrübe (Yıl)
1	Makine mühendisi	İşletme yöneticisi	8
2	Tekstil mühendisi	Kalite kontrol sorumlusu	12
3	Kimyager (Çalışan temsilcisi)	İşletme yönetici yardımcısı	3
4	Kimyager (İGU)	Genel müdürü	10

İ sınıfındaki bir hata türünün j sınıfından bir kök nedeni HT_i^j ($i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$) olarak ifade edilmiştir. Örneğin, Kumaş gramaj hata türünün potansiyel kök nedeni: HT_{18}^1 : Ram’da gramaj ayar hatasıdır.

Adım 7: Belirlenen potansiyel kök nedenlerin ortaya çıkma Olasılığı (O_i^j), potansiyel etki Şiddeti (S_i^j) ve Saptanabilirlik (D_i^j) değerlerine, Tablo 3.5, 3.6 ve 3.7 yardımıyla

FMEA ekibi tarafından ortak karar verilmiştir.

Adım 8: Potansiyel kök nedenler için risk öncelik sayısı (RPN) hesaplanmıştır.

$$RPN_i^j = (O_i^j) * (S_i^j) * (D_i^j) \quad (3.7)$$

$$RPN_{18}^1 = (9) * (6) * (3) = 162$$

BIFPET Algoritması İş Adımları ve Uygulaması (Shipley vd. [36] çalışması FMEA'ya göre yeniden yorumlanmıştır).

Adım 9: Her bir hata türü potansiyel kök nedeni için $O_i^{j_r}, (O_i^{j_1}, O_i^{j_2}, O_i^{j_3}), S_i^{j_r} (S_i^{j_1}), S_i^{j_2}, S_i^{j_3})$ ve $D_i^{j_r} (D_i^{j_1}, D_i^{j_2}, D_i^{j_3})$ değerlerine FMEA ekibi tarafından iyimser (r=1), ortalama (r=2) ve kötümser (r=3) olmak üzere üçer değer ataması yapılmıştır.

Her hata türü kök nedeni için $O_i^{j_r}, S_i^{j_r}$ ve $D_i^{j_r}$ değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır. Burada, $O_i^{j_r}, S_i^{j_r}$ ve $D_i^{j_r}$ olası değerlerinin üyelik derecesi maksimum yani 1 olarak kabul edilir. Bu yüzden: $\tau O_i^{j_r}, \tau S_i^{j_r}$ ve $\tau D_i^{j_r}$ değerleri 1'e eşittir.

$$OHT_i^{j_r} = \sum \tau O_i^{j_r} / O_i^{j_r}, \text{ burada tüm } HT_i^j \text{ ler için } \tau O_i^{j_r} = 1' \text{ dir} \quad (3.8)$$

$$SHT_i^{j_r} = \sum \tau S_i^{j_r} / S_i^{j_r}, \text{ burada tüm } HT_i^j \text{ ler için } \tau S_i^{j_r} = 1' \text{ dir} \quad (3.9)$$

$$DHT_i^{j_r} = \sum \tau D_i^{j_r} / D_i^{j_r}, \text{ burada tüm } HT_i^j \text{ ler için } \tau D_i^{j_r} = 1' \text{ dir} \quad (3.10)$$

Adım 10: Her bir hata türü kök nedenin $O_i^{j_r}, S_i^{j_r}$ ve $D_i^{j_r}$ değerleri için Bulanık Olasılık $Q_{OHT_i^{j_r}}, Q_{SHT_i^{j_r}}$ ve $Q_{DHT_i^{j_r}}$ değerleri tanımlanmıştır. Karar vericiler d (d=1: İşletme yöneticisi, d=2: Kalite kontrol sorumlusu, d=3: İşletme yönetici yardımcısı, d=4: Genel Müdür ve İş güvenliği uzmanı) ile ifade edilmiştir. $O_i^{j_r}, S_i^{j_r}$ ve $D_i^{j_r}$ için [0,

Tablo 3.5 Olasılık değerlendirme skalası.

Derece	Hata olasılığı	Sıklık	Olabilirlik
10	Çok Yüksek: Kaçınılmaz Hata	Her bin işlemde, >100 hata	$>10^{-1}$
9	Çok Yüksek: Kaçınılmaz Hata	Her bin işlemde, 50 hata	$5 * 10^{-2}$
8	Çok Yüksek: Kaçınılmaz Hata	Her bin işlemde, 20 hata	$2 * 10^{-2}$
7	Çok Yüksek: Kaçınılmaz Hata	Her bin işlemde, 10 hata	$1 * 10^{-2}$
6	Orta: Ara Sıra Olan Hata	Her bin işlemde, 2 hata	$2 * 10^{-3}$
5	Orta: Ara Sıra Olan Hata	Her bin işlemde, 0,5 hata	$5 * 10^{-4}$
4	Düşük: Nispeten Az Olan Hata	Her bin işlemde, 0,1 hata	$1 * 10^{-4}$
3	Düşük: Nispeten Az Olan Hata	Her bin işlemde, 0,01 hata	$1 * 10^{-5}$
2	Pek Az: Olası olmayan Hata	Her bin işlemde, 0,001 hata	$1 * 10^{-6}$
1	Pek Az: Olası olmayan Hata	Her bin işlemde, <0,001 hata	$<1 * 10^{-6}$

Tablo 3.6 Şiddet değerlendirme skalası.

Derece	Şiddet	Açıklama
10	Uyarısız Gelen Tehlike	Potansiyel hata durumu herhangi bir işaret vermeksizin operatör, bakım personeli güvenliğini etkiler veya yasal gereklilikleri karşılamaz
9	Uyarı ile Gelen Tehlike	Potansiyel hata durumunu işaret vererek operatör bakım personeli güvenliğini etkiler veya yasal gereklilikleri karşılamaz
8	Çok Yüksek	Ürün %100 hurda. Hat durur, sevkiyat yapılamaz.
7	Yüksek	Ürünün bir kısmı hurda. Hat hızı yavaşlaması ya da ek iş gücü gereksinimi
6	Orta	Ürünün %100'ü hat dışında tamir ve onay
5	Düşük	Ürünün bir kısmı hat dışında tamir ve onay
4	Çok Düşük	Ürünün %100'ü hatta tamir
3	Küçük	Ürünün bir kısmı hatta tamir
2	Çok Küçük	Proses, operasyon veya operatöre düşük etki
1	Yok	Farkedilir etki mevcut değil

1] aralığında, olasılık değerleri $\alpha O_i^{j^d}$, $\alpha S_i^{j^d}$ ve $\alpha D_i^{j^d}$ 1., 2. ve 3. karar vericiler tarafından atanmıştır. 4'ncü karar verici olan Genel Müdür (İş Güvenliği Uzmanı: İGU) ise $\alpha O_i^{j^d}$, $\alpha S_i^{j^d}$ ve $\alpha D_i^{j^d}$ değerlerine [0,1] aralığında inanç değerleri olan: $\alpha O_i^{j^d}$, $\alpha S_i^{j^d}$, $\alpha D_i^{j^d}$ ataması yapmıştır.

Bulanık olasılık Değeri:

$$Q_{OHT_i^{j_r}} = \sum \alpha O_i^{j^d} / \alpha O_j^{j^d} \quad (3.11)$$

$$Q_{SHT_i^{j_r}} = \sum \alpha S_i^{j^d} / \alpha S_j^{j^d} \quad (3.12)$$

$$Q_{DHT_i^{j_r}} = \sum \alpha D_i^{j^d} / \alpha D_j^{j^d} \quad (3.13)$$

Örneğin: HT_{18}^1 'in $O_i^{j_r}$ değerleri için olasılık αO_i^{jrk} ve olasılık değerine atanan inanç değerleri ile O_i^{jrk} bulanık olasılık değerleri $QOHT_i^{j_r}$ oluşturulur.

$$\begin{array}{lll} \alpha O_{18}^{1^1} = 0,4 & \alpha O_{18}^{1^2} = 0,7 & \alpha O_{18}^{1^3} = 0,6 \\ \alpha O_{18}^{2^1} = 0,2 & \alpha O_{18}^{2^2} = 0,7 & \alpha O_{18}^{2^3} = 0,8 \\ \alpha O_{18}^{3^1} = 0,4 & \alpha O_{18}^{3^2} = 0,8 & \alpha O_{18}^{3^3} = 0,6 \\ \alpha O_{18}^{4^1} = 0,6 & \alpha O_{18}^{4^2} = 0,1 & \alpha O_{18}^{4^3} = 0,4 \\ \alpha O_{18}^{5^1} = 0,3 & \alpha O_{18}^{5^2} = 0,3 & \alpha O_{18}^{5^3} = 0,3 \\ \alpha O_{18}^{6^1} = 0,1 & \alpha O_{18}^{6^2} = 0,6 & \alpha O_{18}^{6^3} = 0,3 \end{array}$$

Tablo 3.7 Saptanabilirlik değerlendirme skalası.

Saptanabilirlik (Derece)	Saptanabilirlik Olasılığı (Saptama Yöntemi)
Saptanamaz (10)	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği mümkün değil (Tespit ve kontrol edilemez)
Çok Az (9)	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok uzak (Dolaylı ve rastgele kontroller)
Az (8)	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği uzak (Görsel/işitsel kontroller)
Çok Düşük (7)	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği düşük (Görsel/işitsel kontroller ya da niteliksel kontroller)
Düşük (6)	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği düşük (Hatta çeşitli cihaz kontrolleri ya da niteliksel kontroller)
Orta (5)	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği orta (İstasyonda otomatik kontrol, operatöre uyarı ikazı)
Yüksek Ortalama (4)	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği yüksek ortalama (Sonraki operasyonda otomatik uyarı, hatalı ürünü durdurma)
Yüksek (3)	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği yüksek (Hatta otomatik kontrol, hatalı ürünü durdurma)
Çok Yüksek (2)	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği çok yüksek (Ürün yapılmadan önce hatta otomatik kontrolle tespit)
Hemen hemen Kesin (1)	Potansiyel hatanın nedeninin ve takip eden hatanın saptanabilirliği hemen hemen kesin (Hata önleyici sistem, makine vb. araç ile tespit)

Tablo 3.8 Risk kabul edilebilirlik seviyeleri.

Risk Kabul Edilebilirliği	Risk Öncelik Sayısı (RPN)
Katlanılamaz	>201
Yüksek	101-200
Orta	51-100
Katlanılabilir	1-50

Tablo 3.9 HT_{18}^1 potansiyel kök nedenin, O, S ve D değerleri

Hata türü kök nedeni HT_i^j		
HT_{18}^1		
O_{18}^1	S_{18}^1	D_{18}^1
9	6	3

Tablo 3.10 HT_{18}^1 potansiyel kök nedenin O, S ve D değerleri için İyimser, Ortalama ve Kötümser değerler

Hata Türü Kök Nedeni (HT_i^j)	$HT_i^{j_r}$	Olasılık $O_i^{j_r}$	Şiddet $S_i^{j_r}$	Saptanabilirlik $D_i^{j_r}$
(HT_{18}^1)	$HT_{18}^{1_1}$: İyimser	$O_{18}^{1_1}=7$	$S_{18}^{1_1}=4$	$D_{18}^{1_1}=3$
	$HT_{18}^{1_2}$: Ortalama	$O_{18}^{1_2}=8$	$S_{18}^{1_2}=5$	$D_{18}^{1_2}=5$
	$HT_{18}^{1_3}$: Kötümser	$O_{18}^{1_3}=9$	$S_{18}^{1_3}=6$	$S_{18}^{1_3}=7$

$$\begin{array}{llllll}
 \alpha O_{18}^{1_1} = 0,4 & \alpha O_{18}^{1_2} = 0,7 & \alpha O_{18}^{1_3} = 0,6 & \alpha O_{18}^{1_1} = 0,6 & \alpha O_{18}^{1_2} = 0,1 & \alpha O_{18}^{1_3} = 0,4 \\
 \alpha O_{18}^{1_2} = 0,2 & \alpha O_{18}^{1_2} = 0,7 & \alpha O_{18}^{1_2} = 0,8 & \alpha O_{18}^{1_2} = 0,3 & \alpha O_{18}^{1_2} = 0,3 & \alpha O_{18}^{1_2} = 0,3 \\
 \alpha O_{18}^{1_3} = 0,4 & \alpha O_{18}^{1_3} = 0,8 & \alpha O_{18}^{1_3} = 0,6 & \alpha O_{18}^{1_3} = 0,1 & \alpha O_{18}^{1_3} = 0,6 & \alpha O_{18}^{1_3} = 0,3
 \end{array}$$

Adım 11: Her bir hata türü kök nedeninin olasılık değerleri $\alpha O_i^{j_r^d}$, $\alpha S_i^{j_r^d}$ ve $\alpha D_i^{j_r^d}$ için $\sum_{k \in H} \alpha O_{i_k}^{j_r^d} = 1$, $\sum_{k \in H} \alpha S_{i_k}^{j_r^d} = 1$ ve $\sum_{k \in H} \alpha D_{i_k}^{j_r^d} = 1$ şartının sağlandığı tüm olası durumlar oluşturulur. Öyle ki, bu kombinasyonlar her k'nın H kümesi için geçerlidir. $k \notin H$ ise $\alpha O_i^{j_r^d} = 0$, $\alpha S_i^{j_r^d} = 0$ ve $\alpha D_i^{j_r^d} = 0$ 'dr.

Adım 11'in OHT_1^{18} için hesaplamaları aşağıdaki gibidir.

$$\begin{aligned}
 \alpha O_{18}^{1_1} + \alpha O_{18}^{1_2} + \alpha O_{18}^{1_3} &= 0.6 + 0.3 + 0.1 = 1 \\
 \alpha O_{18}^{1_2} + \alpha O_{18}^{1_2} + \alpha O_{18}^{1_3} &= 0.1 + 0.3 + 0.6 = 1 \\
 \alpha O_{18}^{1_3} + \alpha O_{18}^{1_2} + \alpha O_{18}^{1_3} &= 0.4 + 0.3 + 0.3 = 1 \\
 \alpha O_{18}^{1_1} + \alpha O_{18}^{1_3} &= 0.6 + 0.4 = 1
 \end{aligned}$$

Adım 12: Bulanık olasılık, ortalama fayda $E(QOHT_i^{j_r})$, $E(QSHT_i^{j_r})$ ve $E(QDHT_i^{j_r})$ ile ilişkilidir. Burada, $bO_i^{j_l}$, $bS_i^{j_l}$, $bD_i^{j_l}$ değerleri $O_i^{j_r}$, $S_i^{j_r}$, $D_i^{j_r}$ nin beklenen değerleridir ve $cO_i^{j_l}$, $cS_i^{j_l}$, $cD_i^{j_l}$ ise beklenen değerlere olan inancın derecesini göstermektedir. Bulanık fayda değerleri ve $bO_i^{j_l}$, $bS_i^{j_l}$, $bD_i^{j_l}$ değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$bO_i^{j_l} = \begin{cases} \sum_k \alpha O_{i_k}^{j_r^d} * O_i^{j_r}, & \sum_k \alpha O_{i_k}^{j_r^d} = 1 \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.14)$$

$$bS_i^{j_l} = \begin{cases} \sum_k \alpha S_{i_k}^{j_r^d} * S_i^{j_r}, & \sum_k \alpha S_{i_k}^{j_r^d} = 1 \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.15)$$

$$bD_i^{jl} = \begin{cases} \sum_k aD_{i_k}^{j_r^d} * D_i^{j_r}, & \sum_k aD_{i_k}^{j_r^d} = 1 \\ 0 & \text{aksi takdirde} \end{cases} \quad (3.16)$$

Burada, $\sum_k aO_{i_k}^{j_r^d} = 1, \sum_k aS_{i_k}^{j_r^d} = 1, \sum_k aD_{i_k}^{j_r^d} = 1$ ise l=a sayısı belirlenir. $1 \leq l \leq p$ ve $\alpha O_i^{j_r^d} \neq 0, \alpha S_i^{j_r^d} \neq 0, \alpha D_i^{j_r^d} \neq 0$ şartının sağlanması durumunda $cO_i^{jl} = \min \{ \tau O_i^{j_r}, \alpha O_i^{j_r^d} \}, cS_i^{jl} = \min \{ \tau S_i^{j_r}, \alpha S_i^{j_r^d} \}, cD_i^{jl} = \min \{ \tau D_i^{j_r}, \alpha D_i^{j_r^d} \}$ olarak belirlenir.

$$E(Q_{OHT_i^{j_r}}) = \sum cO_i^{jl} / bO_i^{jl} \quad (3.17)$$

$$E(Q_{SHT_i^{j_r}}) = \sum cS_i^{jl} / bS_i^{jl} \quad (3.18)$$

$$E(Q_{DHT_i^{j_r}}) = \sum cD_i^{jl} / bD_i^{jl} \quad (3.19)$$

Adm 12’de ifade edilen HT_{18}^1 için bO_{18}^1 değerinin hesabı aşağıda gösterilmiştir.

$$bO_{18}^{11} = (aO_{18}^{1_1^1}) * (O_{18}^{1_1}) + (aO_{18}^{1_2^1}) * (O_{18}^{1_2}) + (aO_{18}^{1_3^1}) * (O_{18}^{1_3}) = (7) * (0, 6) + (8) * (0, 3) + (9) * (0, 1) = 7, 5$$

$$bO_{18}^{12} = (aO_{18}^{1_1^2}) * (O_{18}^{1_1}) + (aO_{18}^{1_2^2}) * (O_{18}^{1_2}) + (aO_{18}^{1_3^2}) * (O_{18}^{1_3}) = (7) * (0, 1) + (8) * (0, 3) + (9) * (0, 6) = 8, 5$$

$$bO_{18}^{13} = (aO_{18}^{1_1^3}) * (O_{18}^{1_1}) + (aO_{18}^{1_2^3}) * (O_{18}^{1_2}) + (aO_{18}^{1_3^3}) * (O_{18}^{1_3}) = (7) * (0, 4) + (8) * (0, 3) + (9) * (0, 3) = 7, 9$$

$$bO_{18}^{14} = (aO_{18}^{1_1^4}) * (O_{18}^{1_1}) + (aO_{18}^{1_3^4}) * (O_{18}^{1_3}) = (7) * (0, 4) + (9) * (0, 6) = 8, 2$$

$$cO_{18}^{1_1} = \min\{0, 4, 1; 0, 2, 1; 0, 4, 1\} = 0, 2$$

$$cO_{18}^{1_2} = \min\{0, 7, 1; 0, 8, 1; 0, 8, 1\} = 0, 7$$

$$cO_{18}^{1_3} = \min\{0, 6, 1; 0, 8, 1; 0, 6, 1\} = 0, 6$$

$$cO_{18}^{1_4} = \min\{0, 6, 1; 0, 0, 1; 0, 8, 1\} = 0, 0$$

Adım 13: Beklenen OHT_i^j , SHT_i^j ve DHT_i^j değerleri için durulaştırma işlemi yapılmıştır ve $E(OHT_i^j)$, $E(SHT_i^j)$ ve $E(DHT_i^j)$ değerleri aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$E(OHT_i^j) = \sum_1 cO_i^{jl} bO_i^j / \sum_1 cO_i^{jl} \quad (3.20)$$

$$E(SHT_i^j) = \sum_1 cS_i^{jl} bS_i^j / \sum_1 cS_i^{jl} \quad (3.21)$$

$$E(DHT_i^j) = \sum_1 cD_i^{jl} bD_i^j / \sum_1 cD_i^{jl} \quad (3.22)$$

$$E(OHT_{18}^1) = [7,5*0,2+8,5*0,7+7,9*0,6+8,2*0,0]/(0,2+0,7+0,6+0,0) = 8,3$$

$$E(SHT_{18}^1) = 5,12$$

$$E(DHT_{18}^1) = 5,33$$

Adım 14: Her bir hata türünün potansiyel kök nedeni için Beklenen Risk Öncelik Sayısı $E(RPN_i^j)$ değeri aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$E(RPN_i^j) = E(OHT_i^j) * E(SHT_i^j) * E(DHT_i^j) \quad (3.23)$$

Adım 14'ün uygulaması aşağıda gösterilmiştir:

$$E(RPN_{18}^1) = 8,30*5,12*5,33 = 221,81$$

PERT dağılımı iş adımları ve uygulaması:

Adım 15: Her bir hata türünün potansiyel kök nedeni için PERT dağılımı ile beklenen Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerleri sırasıyla: $E(pOHT_i^j)$, $E(pSHT_i^j)$ ve $E(pDHT_i^j)$ aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$E(pOHT_i^j) = \frac{O_i^{j1} + 4 * O_i^{j2} + O_i^{j3}}{6} \quad (3.24)$$

$$E(pSHT_i^j) = \frac{S_i^{j1} + 4 * S_i^{j2} + S_i^{j3}}{6} \quad (3.25)$$

$$E(pDHT_i^j) = \frac{D_i^{j1} + 4 * D_i^{j2} + D_i^{j3}}{6} \quad (3.26)$$

Adım 15'in uygulaması şu şekildedir:

$$E(pOHT_{18}^1) = [7 + (4)x(8) + 9]/6 = 8$$

$$E(pSHT_{18}^1) = [4 + (4)x(5) + 6]/6 = 5$$

$$E(pDHT_{18}^1) = [3 + (4)x(5) + 7]/6 = 5$$

Adım 16: PERT dağılımı ile elde edilen $E(pOHT_i^j)$, $E(pSHT_i^j)$, $E(pDHT_i^j)$ değerleri kullanılarak beklenen risk öncelik sayısı $E(pRPN_i^j)$ aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$E(pRPN_i^j) = E(pOHT_i^j) * E(pSHT_i^j) * E(pDHT_i^j) \quad (3.27)$$

Adım 16'nın uygulaması ise:

$$E(pRPN_{18}^1) = 8 * 5 * 5 = 200$$

Adım 17: Adım 8’da hesaplanan (RPN_i^j) ’nin, Adım 14’de hesaplanan $E(RPN_i^j)$ ve Adım 16’da hesaplanan $E(pRPN_{18}^1)$ değerlerinin karşılaştırmalı olarak sunulması.

3.7 Bulgular

Önerilen risk analiz ve değerlendirme yönteminin uygulaması tekstil sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın, kumaş boyama işletmesinde yapılan “Apre” süreci için gerçekleştirilmiştir. Tekstil işletmesinde boyama işlemiyle ilgili olası hataları tanımlamak için 8 ayrı süreçten oluşan proses akış şeması kullanılmıştır. İnsan, makine ve çevre ile ilgili hatalar FMEA ekibi tarafından belirlenmiştir. Beyin fırtınası yaklaşımı ile olası hataların belirlenmesi sağlanmıştır. Boyama işletmesindeki tüm iş süreçleri için FMEA-FTA çalışması yürütülmüştür. Her bir sürecin toplam risk yükü değeri ve ortalama risk puanları hesaplanmıştır. Boyama işletmesinin başarısızlığına en büyük katkı sağlayan, en yüksek ortalama risk yükü değeri “kumaş hazırlama” süreci olduğu anlaşılmıştır (bakınız: Tablo 3.11). Kumaş hazırlama sürecindeki hata sayısı az ancak risk kabul edilebilirlik düzeyinin çok üzerindedir. FMEA ekibine göre kumaş hazırlama sürecinde yaşanan hatalar yönetimsel iyileştirme çalışmaları ile önlenilecek kapsamdadır. Boyama işletmesinin güvenilirliğini ikinci derecede tehdit eden Apre işlemindeki hataların neden olduğu hususunda FMEA ekibi fikir birliğine varmıştır. Bu nedenle, önerilen FMEA-FTA-BIFPET bütünleşik risk analiz ve değerlendirme yöntemi, boyama işletmesindeki Apre süreci için uygulanmıştır. Önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için, FMEA-FTA ve FMEA-FTA-PERT dağılımı ile elde edilen RPN değerleri, O, S ve D değerleri bakımından karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Boyama işletmesini oluşturan iş süreçleri ve öncelik sıraları Tablo 3.11’de verilmiştir. Boyama işletmesinde toplam 8 ana iş süreci için yürütülen FMEA-FTA çalışması sonucu 67 potansiyel kök nedeni tanımlanmış ve Tablo 3.12, 3.13, 3.14 ve 3.15’de verilmiştir. Boyama işletmesi için hata türleri ve kök nedenlerin mantıksal hiyerarşik ilişkilerinin gösterildiği hata ağacı analizi ise Şekil 3.4’de verilmiştir. Tanımlanan 67 potansiyel kök nedenler FMEA yaklaşımı ile derecelendirilmiştir ve RPN’in 27-504 arasında değiştiği görülmüştür (bakınız: Tablo 3.16). Apre iş süreci için FMEA-FTA yöntemlerine BIFPET yönteminin birleştirilmesi ile elde edilen risk analiz yaklaşımında, Bulanık Olasılık ve Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik’in beklenen değerleri hesaplanmıştır ve bu değerler Tablo 3.17, 3.18, 3.19 ve 3.20’de verilmiştir. FMEA-FTA-PERT dağılımı ile elde edilen Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerleri ise Tablo 3.21, 3.22, 3.23, 3.24’de ifade edilmiştir. Potansiyel hata türlerinin risk düzeyini

değerlendirilmesinde, riskin kabul edilebilirliğine ve kabul edilemez düzeydeki hata türlerinin hangi sıra ile azarlatılması gerektiğine karar verilirken risk öncelik sayısına başvurulmaktadır ve potansiyel kök nedenler için risk öncelik sayısının aynı olduğu durumlarda hata türü için potansiyel potansiyel kök nedenlerin şiddet değeri dikkate alınmaktadır [48]. Çalışmamızda, üç yöntemden de elde edilen risk öncelik sayıları, potansiyel kök nedenlerin risk dereceleri, şiddet dereceleri ve risk kabul edilebilirlik seviyelerine ilişkin karşılaştırmalı değerler Tablo 3.25, 3.26 ve 3.27’de sunulmuştur. Bunun yanında, her bir yöntem ile elde edilen risk öncelik sayısı, Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerler ise Şekil 3. 5 - 3. 8’de verilmiştir.

Tablo 3.11 Boyama işletmesindeki iş süreçleri için toplam ve ortalama risk yükleri.

Öncelik sırası	İş süreci	Potansiyel kök neden sayısı	Toplam RPN değeri	Ortalama RPN değeri
1	Planlama	7	1.536	219,43
2	Ham Depo	4	526	131,50
3	Kumaş Hazırlama	3	1.312	437,33
4	Laboratuvar	13	1.512	116,31
5	Kumaş Boyama	14	3.012	215,14
6	Apre	15	3.396	226,40
7	Kalite Kontrol	9	488	54,22
8	Sevkiyat	2	147	73,50
	Toplam	67	11.929	178,04

3.8 Değerlendirme

Bu bölümde, FMEA-FTA-BIFPET yöntemlerinin aralarında anlamlı şekilde veri akışı sağlanarak geliştirilen bir yaklaşım tanıtılmıştır. Elde edilen sonuçlar Klasik FMEA-FTA ve FMEA-FTA-PERT dağılımı bütünleşik yöntemler ile kıyaslanmıştır. Elde edilen sonuçlara ilişkin değerlendirmeler aşağıda verilmiştir. Klasik FMEA-FTA yönteminde, karar vericilerin ortak görüşü ile kök nedenler için Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerleri Tablo 3.5, 3.6 ve 3.7 ’de ifade edilen değerlendirme skalaları kullanılarak atanmış ve O, S, D değerleri için herhangi bir ağırlıklandırma yapılmamıştır. FMEA-FTA, FMEA-FTA-BIFPET ve FMEA-FTA-PERT dağılımı ile 15 potansiyel kök neden için elde edilen sonuçlar Tablo 3.29’de özetlenmiştir. Elde edilen sonuçların ayrıntıları, FMEA-FTA yöntemi için Tablo 3.16, FMEA-FTA-BIFPET yöntemi için Tablo 3.17-3.20 ve FMEA-FTA-PERT dağılımı için Tablo 3.21-3.24’de verilmiştir. Potansiyel kök nedenlerin risk kabul edilebilirlik seviyeleri değerlendirildiğinde, Klasik FMEA-FTA yönteminde 4 potansiyel kök neden “Yüksek” olarak değerlendirilirken FMEA-FTA-BIFPET yönteminde aynı hata türleri

Tablo 3.12 Boyama işletmesi, hata türleri ve potansiyel kök sebepler.

İş Süreci	Hata Türü (HT_i)	Potansiyel Kök Nedeni	HT_i^j
Planlama	İş emrine uyulmaması sonucu uygun olmayan kumaş üretimi	Siparişe uygun olmayan kumaşın iletilmesi	HT_1^1
		Çalışan bilgi ve tecrübe eksikliği	HT_1^2
		Siparişin planlamaya eksik iletilmesi	HT_1^3
		Siparişe uygun olmayan renk kodunun girilmesi	HT_1^4
		Siparişe uygun olmayan kumaşın üretime iletilmesi	HT_1^5
		İstenen kalite parametrelerinin talimatlara yansıtılmaması	HT_1^6
Ham Depo	Refakat kartına hatalı kumaş miktarı yazılması nedeniyle ham depo bölümüne yanlış bilginin iletilmesi.	Fazla veya eksik sıfır, virgöl hatası	HT_2^1
	Ham depoda uygun olmayan iş emrinin gerçekleştirilmesi	Refakat kartında belirtilen özelliklerdeki kumaşın boyama departmanına verilmemesi	HT_3^1
		Lot karışıklığı	HT_3^2
		Paletlerin içinde yanlış kumaş bulunması	HT_3^3
		Tüp/maylı karışıklık hatası	HT_3^4
Kumaş Hazırlama	Kumaş hazırlama bölümünde uygun olmayan iş emrinin gerçekleştirilmesi	Kumaş hazırlarken yanlış kumaşın açılması	HT_4^1
		Kumaş hazırlarken açılan kumaşın tartımının yapılmaması	HT_4^2
		Kumaş hazırlarken kumaşın göz başına düşen metrajının ayarlanmaması	HT_4^3
		Kumaş seçme hatası	HT_5^1
Laboratuvar	Hatalı renk çalışması (boyanacak numune hazırlama hatası)	Kumaş tarma hatası	HT_5^2
		Boya ve kimyasal seçim hatası	HT_5^3
		Boya ve kimyasal oran hatası	HT_6^1
	Hatalı renk çalışması (pipetleme makinesine reçete yükleme hatası)	Çözmede kullanılan boya ve çözücü oran hatası	HT_6^2
		Boya makinesinde personelin hatalı işlem yapması	HT_6^3

Tablo 3.13 Boyama işletmesi, hata türleri ve potansiyel kök sebepler, (Devamı-1).

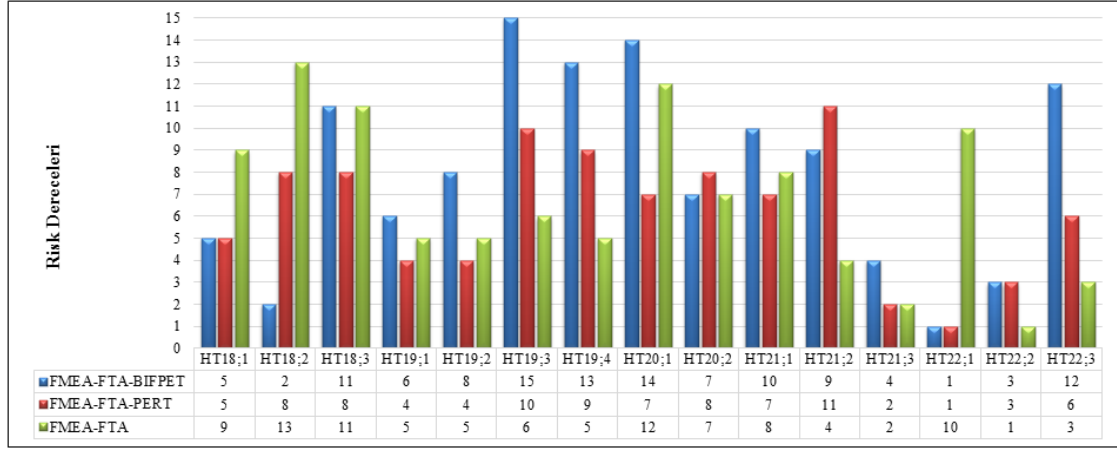
İş Süreci	Hata Türü (HT _i)	Potansiyel Kök Nedeni	HT _i ^j
Laboratuvar	Hatalı renk çalışması (boyama hatası)	Temiz olmayan tüp seçimi	HT ₇ ¹
		Makine uygun olmayan ısı hatası	HT ₇ ²
		Kumaşların yanlış tüplere konulması	HT ₇ ³
		Boyama proses seçim hatası	HT ₇ ⁴
	Hatalı renk boyanması	Onaylanmış renk çalışmasının boya ve kimyasal oranlarının yanlış girilmesi	HT ₈ ¹
		Müşteriye aynı renk çalışmasından iki kez gönderilmesi	HT ₈ ²
Kumaş Boyama	Uygun olmayan reçete hazırlanması	Müşteriye iletilen numune kodunun sisteme yanlış girilmesi	HT ₈ ³
		Laboratuvardan alınan bilgilerin yanlış işlenmesi	HT ₉ ¹
	Uygun olmayan boya ve kimyasal hazırlanması	Laboratuvarın dosyaya yanlış bilgi işleyerek göndermesi	HT ₉ ²
		Boya mutfakçısının yanlış boya tartımı	HT ₁₀ ¹
	Kazana yükelenen kumaşların gözler arası miktar (kilogram) farkının oluşması	Boya işlemi için otomasyondan yanlış kimyasal talebi	HT ₁₀ ²
		Kumaş hazırlayan personelin göz kg ayarlaması yapmaması	HT ₁₁ ¹
	Uygun olmayan pH ayarı	Boyamada pH ayarlamasının yapılmaması	HT ₁₂ ¹
		Yıkamada pH ayarlama hatası	HT ₁₂ ²
		Kazan çıkış pH ayarlama hatası	HT ₁₂ ³
	Uygun olmayan prosesin seçilmesi	Operatörün sisteme yanlış proses girmesi	HT ₁₃ ¹
	Seçilen proste iş emrine uyulmaması	Operatörün uygulanması gereken prosesi kısaltması veya uzatması	HT ₁₄ ¹
	Makine arızası	Boya kabı mikser arızası	HT ₁₅ ¹
		Dozaj vana arızası	HT ₁₅ ²
	Çalışan yetersizliği	Plansız rapor ve izin kullanımı	HT ₁₆ ¹
	Sistemin durması	Elektrik kesintisi	HT ₁₇ ¹

Tablo 3.14 Boyama işletmesi, hata türleri ve potansiyel kök sebepler, (Devamı-2).

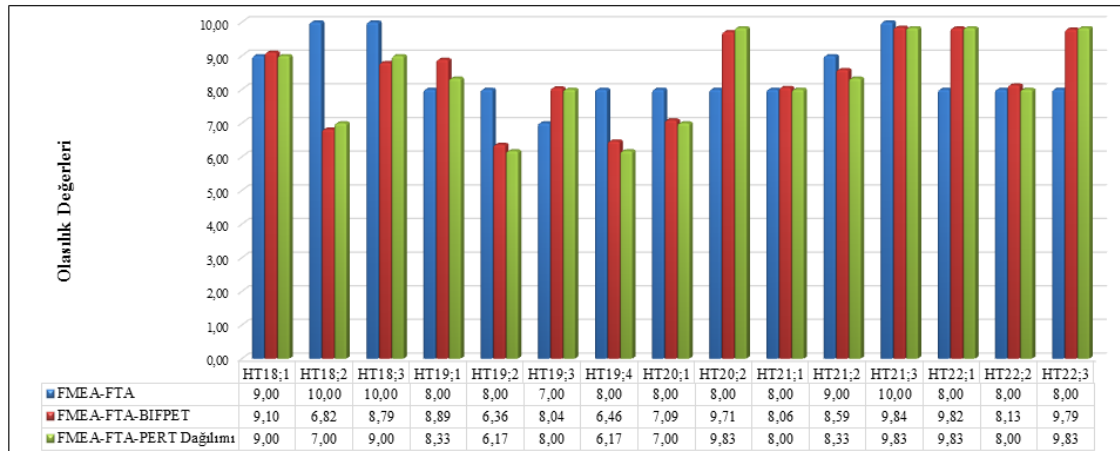
İş Süreci	Hata Türü (HT _i)	Potansiyel Kök Nedeni	HT _i ^j
Apre	Kumaş gramaj hatası	Ram da gramaj ve en ayar hatası	HT ₁₈ ¹
		Örgüde pus fayn ve iplik uzunluk hatası	HT ₁₈ ²
		Kumaş gramaj ayar hatası	HT ₁₈ ³
	Kumaş tuşe hatası	Çalışan kaynaklı tuşe ayar hatası (silikon miktar hatası)	HT ₁₉ ¹
		Toplar arası tuşe farkı hatası (pH kontrol hatası)	HT ₁₉ ²
		Toplar arası tuşe farkı hatası (fular dozu hatası)	HT ₁₉ ³
		Tuşe hatası (silikon silindir baskı ayar hatası)	HT ₁₉ ⁴
	Uygun olmayan kumaş eni elde edilmesi	Hatalı fikseye bağlı toplar arası en fark hatası	HT ₂₀ ¹
		Örgü makinesi kumaş en ayar hatası	HT ₂₀ ²
	Uygun olmayan kumaş çekmezliği	Fikse'de sıcaklık ve hız ayar hatası	HT ₂₁ ¹
		Pus, fayn ve iplik uzunluk ayar hatası	HT ₂₁ ²
		Ram'a kumaş besleme hız ayar hatası	HT ₂₁ ³
	Fire hatası	Ram da kumaş kenar kesim ayar hatası	HT ₂₂ ¹
		Fazla enzim bağlı gramaj düşme hatası	HT ₂₂ ²
		Fireye çıkan kumaşın tekrar tamire dönmesi hatası	HT ₂₂ ³
Kalite Kontrol	Uygun olmayan kalitede kumaşın müşteriye ulaşması	İstenilen özellikte olmayan ürünün onay hatası	HT ₂₃ ¹
		Çekmezliği ve dönme değerleri uygun olmayan ürünün onaylanması	HT ₂₃ ²
		Rengi uygun olmayan ürünün onaylanması	HT ₂₃ ³
		Bozuk en-gramaj olan ürün onaylanması	HT ₂₃ ⁴
		Hatalı prosesle üretilen ürünün onaylanması	HT ₂₃ ⁵

Tablo 3.15 Boyama işletmesi, hata türleri ve potansiyel kök sebepler, (Devamı-3).

İş Süreci	Hata Türü (HT _i)	Potansiyel Kök Nedeni	HT _i ^j
Kalite Kontrol	Uygun olmayan kalitede kumaşın müşteriye ulaşması	Yüzeyi bozuk ürünün onaylanması	HT ₂₃ ⁶
		Kanat farkı olan ürünün onaylanması	HT ₂₃ ⁷
		Haslık sorunu olan ürünün onaylanması	HT ₂₃ ⁸
		Çözümlerin gecikmesi	HT ₂₃ ⁹
Sevkiyat	Müşteriye siparişin belirlenen sürede ulaştırılamaması	Ürün kalite kontrol işleminin gecikmesi	HT ₂₄ ¹
		Kontrolde geçmiş hazır ürünün izinsiz alınması	HT ₂₄ ²



Şekil 3.5 Risk derecelerinin karşılaştırılması.



Şekil 3.6 Olasılık değerlerinin karşılaştırılması.

Tablo 3.16 Boyama işletmesi için FMEA-FTA'dan elde edilen sonuçlar.

HT_i^j	O_i^j	S_i^j	D_i^j	RPN_i^j	HT_i^j	O_i^j	S_i^j	D_i^j	RPN_i^j
HT_{11}^1	3	10	6	180	HT_{12}^3	7	8	9	504
HT_{12}^2	3	10	8	240	HT_{13}^1	2	8	3	48
HT_{13}^3	7	3	10	210	HT_{14}^1	7	8	9	504
HT_{14}^4	5	6	5	150	HT_{15}^1	8	8	3	192
HT_{15}^5	5	6	5	150	HT_{16}^2	8	8	6	384
HT_{16}^6	6	5	4	120	HT_{17}^1	3	6	7	126
HT_{17}^1	6	9	9	486	HT_{18}^1	7	6	3	126
HT_{18}^3	3	8	6	144	HT_{19}^1	9	6	3	162
HT_{19}^2	8	5	4	160	HT_{20}^2	10	4	3	120
HT_{20}^3	8	7	3	168	HT_{21}^3	10	5	3	150
HT_{21}^4	3	3	6	54	HT_{22}^1	8	6	5	240
HT_{22}^1	8	8	7	448	HT_{23}^2	8	6	5	240
HT_{23}^2	6	8	9	432	HT_{24}^3	7	6	5	210
HT_{24}^3	6	8	9	432	HT_{25}^4	8	6	5	240
HT_{25}^1	3	8	2	48	HT_{26}^1	8	6	3	144
HT_{26}^2	3	8	9	216	HT_{27}^2	8	6	4	192
HT_{27}^3	3	8	2	48	HT_{28}^2	8	7	3	168
HT_{28}^1	3	8	2	48	HT_{29}^2	9	7	4	252
HT_{29}^2	3	8	2	48	HT_{30}^3	10	7	5	350
HT_{30}^3	3	8	2	48	HT_{31}^1	8	10	2	160
HT_{31}^1	3	8	2	48	HT_{32}^2	8	8	8	512
HT_{32}^2	3	8	2	48	HT_{33}^3	8	8	4	256
HT_{33}^3	3	8	2	48	HT_{34}^1	7	6	1	42
HT_{34}^4	3	8	2	48	HT_{35}^2	6	6	1	36
HT_{35}^1	4	8	9	288	HT_{36}^3	6	6	2	72
HT_{36}^2	4	8	9	288	HT_{37}^4	6	6	2	72
HT_{37}^3	4	8	9	288	HT_{38}^5	5	6	1	30
HT_{38}^1	3	8	3	72	HT_{39}^6	6	6	1	36
HT_{39}^2	4	8	3	96	HT_{40}^7	6	6	2	72
HT_{40}^1	6	8	4	192	HT_{41}^8	6	6	2	72
HT_{41}^2	4	8	10	320	HT_{42}^9	7	4	2	56
HT_{42}^1	5	8	4	160	HT_{43}^1	3	3	3	27
HT_{43}^1	6	8	3	144	HT_{44}^2	6	5	4	120
HT_{44}^2	6	8	3	144					

Tablo 3.17 Apre iş süreci için potansiyel kök nedenlerinin “FMEA-FTA-BIFPET yöntemi” ile oluşturulan Bulanık Olasılık değerleri ile hesaplanan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerleri.

HT_i^j	OHT_i^j SHT_i^j DHT_i^j	$O_i^{j1}, O_i^{j2}, O_i^{j3}$ $S_i^{j1}, S_i^{j2}, S_i^{j3}$ $D_i^{j1}, D_i^{j2}, D_i^{j3}$	Değer	Bulanık Olasılık Değerleri	
				$Q_{OHT_i^j}$ $Q_{SHT_i^j}$ $Q_{DHT_i^j}$	$E(OHT_i^j)$ $E(SHT_i^j)$ $E(DHT_i^j)$
HT_{18}^1	O_{18}^1	İyimser	7,00	0,4/0,6+0,7/0,1+0,6/0,4	8,13
		Ortalama	8,00	0,2/0,3+0,8/0,3+0,8/0,3	
		Kötümser	9,00	0,4/0,1+0,8/0,6+0,6/0,3	
	S_{18}^1	İyimser	4,00	0,6/0,2+0,8/0,2+0,7/0,3	5,12
		Ortalama	5,00	0,5/0,6+0,7/0,3+0,8/0,4	
		Kötümser	6,00	0,4/0,2+0,9/0,5+0,6/0,3	
	D_{18}^1	İyimser	3,00	0,3/0,6+0,8/0,7+0,4/0,2	5,33
		Ortalama	5,00	0,6/0,3+0,8/0,2+0,5/0,4	
		Kötümser	7,00	0,7/0,1+0,8/0,1+0,3/0,4	
HT_{18}^2	O_{18}^2	İyimser	9,00	0,3/0,2+0,6/0,1+0,2/0,3	9,84
		Ortalama	10,00	0,3/0,4+0,4/0,1+0,1/0,2	
		Kötümser	10,00	0,2/0,4+0,5/0,8+0,3/0,5	
	S_{18}^2	İyimser	4,00	0,6/0,2+0,9/0,7+0,2/0,3	5,17
		Ortalama	6,00	0,3/0,5+0,7/0,2+0,4/0,4	
		Kötümser	7,00	0,6/0,3+0,9/0,1+0,6/0,3	
	D_{18}^2	İyimser	3,00	0,3/0,4+0,7/0,6+0,8/0,2	5,75
		Ortalama	3,00	0,3/0,4+0,8/0,2+0,3/0,4	
		Kötümser	4,00	0,4/0,2+0,5/0,2+0,3/0,4	
HT_{18}^3	O_{18}^3	İyimser	9,00	0,2/0,6+0,7/0,1+0,4/0,3	9,79
		Ortalama	10,00	0,6/0,2+0,9/0,4+0,5/0,2	
		Kötümser	10,00	0,6/0,2+0,9/0,5+0,8/0,5	
	S_{18}^3	İyimser	4,00	0,3/0,2+0,8/0,4+0,7/0,3	5,65
		Ortalama	6,00	0,6/0,5+0,7/0,3+0,8/0,4	
		Kötümser	7,00	0,5/0,3+0,6/0,3+0,4/0,3	
	D_{18}^3	İyimser	3,00	0,6/0,4+0,7/0,4+0,5/0,4	3,23
		Ortalama	3,00	0,5/0,4+0,7/0,4+0,6/0,3	
		Kötümser	4,00	0,7/0,2+0,8/0,2+0,7/0,3	
HT_{19}^1	O_{19}^1	İyimser	8,00	0,4/0,2+0,7/0,4+0,5/0,3	8,59
		Ortalama	8,00	0,6/0,3+0,8/0,4+0,9/0,4	
		Kötümser	10,00	0,3/0,5+0,7/0,2+0,8/0,3	
	S_{19}^1	İyimser	4,00	0,3/0,6+0,8/0,3+0,6/0,2	5,05
		Ortalama	5,00	0,6/0,3+0,7/0,3+0,6/0,4	
		Kötümser	6,00	0,3/0,1+0,8/0,4+0,6/0,4	
	D_{19}^1	İyimser	4,00	0,4/0,2+0,6/0,2+0,5/0,3	4,77
		Ortalama	5,00	0,6/0,4+0,7/0,4+0,8/0,2	
		Kötümser	5,00	0,5/0,4+0,6/0,4+0,4/0,5	

“Katlanılamaz” olarak değerlendirilmiştir (bakınız: Tablo 3.26). Klasik FMEA-FTA yönteminde 5 potansiyel kök neden için “Katlanılamaz” sonucu elde edilirken bu

Tablo 3.18 Apre iş süreci için potansiyel kök nedenlerinin “FMEA-FTA-BIFPET yöntemi” ile oluşturulan Bulanık Olasılık Değerleri ile hesaplanan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerleri (Devamı-1)

HT_i^j	OHT_i^j SHT_i^j DHT_i^j	$O_i^{j1}, O_i^{j2}, O_i^{j3}$ $S_i^{j1}, S_i^{j2}, S_i^{j3}$ $D_i^{j1}, D_i^{j2}, D_i^{j3}$	Değer	Bulanık Olasılık Değerleri	
				$Q_{OHT_i^j}$ $Q_{SHT_i^j}$ $Q_{DHT_i^j}$	$E(OHT_i^j)$ $E(SHT_i^j)$ $E(DHT_i^j)$
HT_{19}^2	O_{19}^2	İyimser	8,00	0,6/0,2+0,5/0,4+0,4/0,2	8,89
		Ortalama	8,00	0,6/0,2+0,4/0,4+0,6/0,4	
		Kötümser	10,00	0,8/0,6+0,3/0,2+0,5/0,4	
	S_{19}^2	İyimser	4,00	0,9/0,2+0,4/0,4+0,6/0,3	4,98
		Ortalama	5,00	0,7/0,6+0,4/0,4+0,3/0,2	
		Kötümser	6,00	0,6/0,2+0,5/0,2+0,5/0,5	
	D_{19}^2	İyimser	4,00	0,6/0,2+0,6/0,2+0,8/0,3	4,35
		Ortalama	5,00	0,7/0,2+0,5/0,4+0,3/0,4	
		Kötümser	5,00	0,9/0,4+0,9/0,4+0,7/0,3	
HT_{19}^3	O_{19}^3	İyimser	6,00	0,7/0,4+0,8/0,3+0,6/0,2	6,36
		Ortalama	6,00	0,6/0,4+0,7/0,3+0,5/0,4	
		Kötümser	7,00	0,5/0,2+0,8/0,4+0,7/0,4	
	S_{19}^3	İyimser	4,00	0,7/0,2+0,8/0,2+0,5/0,3	5,20
		Ortalama	5,00	0,3/0,6+0,5/0,2+0,7/0,2	
		Kötümser	6,00	0,5/0,2+0,3/0,6+0,8/0,5	
	D_{19}^3	İyimser	4,00	0,7/0,2+0,8/0,2+0,6/0,3	4,77
		Ortalama	5,00	0,6/0,4+0,7/0,4+0,6/0,4	
		Kötümser	5,00	0,6/0,4+0,7/0,4+0,6/0,3	
HT_{19}^4	D_{19}^4	İyimser	6,00	0,3/0,2+0,8/0,3+0,5/0,2	6,46
		Ortalama	6,00	0,5/0,2+0,9/0,3+0,4/0,4	
		Kötümser	7,00	0,4/0,6+0,7/0,4+0,3/0,4	
	S_{19}^4	İyimser	4,00	0,3/0,2+0,6/0,2+0,5/0,3	5,20
		Ortalama	5,00	0,3/0,6+0,7/0,3+0,6/0,2	
		Kötümser	6,00	0,4/0,2+0,8/0,5+0,3/0,5	
	D_{19}^4	İyimser	4,00	0,6/0,2+0,9/0,2+0,6/0,2	5,15
		Ortalama	5,00	0,5/0,2+0,7/0,6+0,5/0,4	
		Kötümser	6,00	0,3/0,6+0,6/0,2+0,3/0,4	
HT_{20}^1	O_{20}^1	İyimser	7,00	0,4/0,2+0,5/0,2+0,6/0,3	8,04
		Ortalama	8,00	0,3/0,6+0,4/0,5+0,2/0,2	
		Kötümser	9,00	0,3/0,2+0,4/0,3+0,2/0,5	
	S_{20}^1	İyimser	5,00	0,4/0,2+0,5/0,2+0,6/0,3	6,05
		Ortalama	6,00	0,4/0,6+0,8/0,6+0,7/0,2	
		Kötümser	7,00	0,5/0,2+0,7/0,2+0,3/0,5	
	D_{20}^1	İyimser	3,00	0,2/0,6+0,9/0,8+0,3/0,3	3,51
		Ortalama	4,00	0,4/0,3+0,7/0,1+0,6/0,4	
		Kötümser	5,00	0,8/0,1+0,7/0,1+0,8/0,3	

Tablo 3.19 Apre iş süreci için potansiyel kök nedenlerinin “FMEA-FTA-BIFPET yöntemi” ile oluşturulan Bulanık Olasılık Değerleri ile hesaplanan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerleri (Devamı-2)

HT_i^j	OHT_i^j SHT_i^j DHT_i^j	$O_i^{j1}, O_i^{j2}, O_i^{j3}$ $S_i^{j1}, S_i^{j2}, S_i^{j3}$ $D_i^{j1}, D_i^{j2}, D_i^{j3}$	Değer	Bulanık Olasılık Değerleri	
				$Q_{OHT_i^j}$ $Q_{SHT_i^j}$ $Q_{DHT_i^j}$	$E(OHT_i^j)$ $E(SHT_i^j)$ $E(DHT_i^j)$
HT_{20}^2	O_{20}^2	İyimser	9,00	0,4/0,2+0,5/0,6+0,7/0,2	9,71
		Ortalama	10,00	0,3/0,4+0,6/0,2+0,8/0,4	
		Kötümser	10,00	0,5/0,4+0,7/0,2+0,8/0,4	
	S_{20}^2	İyimser	4,00	0,4/0,3+0,4/0,1+0,6/0,2	5,94
		Ortalama	6,00	0,3/0,4+0,4/0,7+0,5/0,4	
		Kötümser	7,00	0,4/0,3+0,5/0,2+0,4/0,4	
	D_{20}^2	İyimser	3,00	0,3/0,4+0,7/0,1+0,3/0,3	3,52
		Ortalama	3,00	0,5/0,4+0,6/0,2+0,7/0,2	
		Kötümser	4,00	0,4/0,2+0,7/0,7+0,5/0,5	
HT_{21}^1	O_{21}^1	İyimser	7,00	0,5/0,2+0,6/0,3+0,4/0,2	8,06
		Ortalama	8,00	0,6/0,6+0,7/0,5+0,8/0,4	
		Kötümser	9,00	0,3/0,2+0,5/0,2+0,7/0,4	
	S_{21}^1	İyimser	5,00	0,5/0,6+0,8/0,1+0,4/0,3	6,25
		Ortalama	6,00	0,4/0,3+0,7/0,2+0,6/0,2	
		Kötümser	7,00	0,3/0,1+0,8/0,7+0,4/0,5	
	D_{21}^1	İyimser	3,00	0,5/0,5+0,6/0,6+0,2/0,3	3,70
		Ortalama	4,00	0,5/0,3+0,7/0,4+0,4/0,4	
		Kötümser	5,00	0,7/0,2+0,8/0,2+0,7/0,3	
HT_{21}^2	O_{21}^2	İyimser	8,00	0,8/0,2+0,9/0,2+0,9/0,2	9,10
		Ortalama	9,00	0,7/0,6+0,8/0,6+0,6/0,4	
		Kötümser	10,00	0,5/0,2+0,7/0,2+0,7/0,4	
	S_{21}^2	İyimser	3,00	0,3/0,5+0,5/0,1+0,2/0,3	5,31
		Ortalama	4,00	0,5/0,3+0,7/0,2+0,3/0,2	
		Kötümser	5,00	0,4/0,2+0,8/0,7+0,5/0,5	
	D_{212}	İyimser	3,00	0,5/0,6+0,9/0,1+0,8/0,3	3,96
		Ortalama	4,00	0,3/0,3+0,8/0,6+0,7/0,4	
		Kötümser	5,00	0,3/0,1+0,7/0,3+0,6/0,3	
HT_{21}^3	O_{21}^3	İyimser	9,00	0,2/0,6+0,8/0,1+0,6/0,2	9,82
		Ortalama	10,00	0,4/0,2+0,6/0,4+0,6/0,4	
		Kötümser	10,00	0,2/0,2+0,7/0,5+0,5/0,4	
	S_{21}^3	İyimser	4,00	0,7/0,6+0,8/0,7+0,6/0,3	4,86
		Ortalama	5,00	0,3/0,3+0,7/0,2+0,4/0,2	
		Kötümser	7,00	0,7/0,1+0,8/0,1+0,8/0,5	
	D_{21}^3	İyimser	4,00	0,5/0,6+0,7/0,2+0,3/0,2	4,91
		Ortalama	5,00	0,4/0,3+0,6/0,6+0,7/0,4	
		Kötümser	6,00	0,7/0,1+0,8/0,2+0,6/0,4	

Tablo 3.20 Apre iş süreci için potansiyel kök nedenlerinin “FMEA-FTA-BIFPET yöntemi” ile oluşturulan Bulanık Olasılık Değerleri ile hesaplanan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik değerleri (Devamı-3)

HT_i^j	OHT_i^j SHT_i^j DHT_i^j	$O_i^{j1}, O_i^{j2}, O_i^{j3}$ $S_i^{j1}, S_i^{j2}, S_i^{j3}$ $D_i^{j1}, D_i^{j2}, D_i^{j3}$	Değer	Bulanık Olasılık Değerleri	
				$Q_{OHT_i^j}$ $Q_{SHT_i^j}$ $Q_{DHT_i^j}$	$E(OHT_i^j)$ $E(SHT_i^j)$ $E(DHT_i^j)$
HT_{22}^1	O_{22}^1	İyimser	8,00	0,6/0,2+0,7/0,6+0,5/0,3	8,79
		Ortalama	9,00	0,4/0,6+0,8/0,3+0,3/0,2	
		Kötümser	10,00	0,5/0,2+0,7/0,1+0,4/0,5	
	S_{22}^1	İyimser	7,00	0,2/0,3+0,6/0,1+0,3/0,3	6,99
		Ortalama	7,00	0,3/0,3+0,7/0,2+0,4/0,2	
		Kötümser	7,00	0,4/0,3+0,8/0,7+0,5/0,5	
	D_{22}^1	İyimser	7,00	0,5/0,3+0,7/0,1+0,6/0,3	6,97
		Ortalama	7,00	0,6/0,3+0,8/0,1+0,3/0,4	
		Kötümser	7,00	0,5/0,3+0,3/0,8+0,7/0,3	
HT_{22}^2	O_{22}^2	İyimser	6,00	0,6/0,6+0,5/0,1+0,8/0,2	7,09
		Ortalama	7,00	0,5/0,3+0,4/0,2+0,8/0,4	
		Kötümser	8,00	0,7/0,1+0,6/0,7+0,8/0,4	
	S_{22}^2	İyimser	6,00	0,6/0,1+0,8/0,1+0,8/0,3	7,20
		Ortalama	7,00	0,4/0,3+0,7/0,8+0,6/0,2	
		Kötümser	8,00	0,5/0,6+0,6/0,1+0,7/0,5	
	D_{22}^2	İyimser	4,00	0,7/0,3+0,6/0,1+0,8/0,3	5,05
		Ortalama	5,00	0,8/0,6+0,5/0,3+0,9/0,4	
		Kötümser	6,00	0,6/0,1+0,4/0,6+0,7/0,3	
HT_{22}^3	O_{22}^3	İyimser	6,00	0,5/0,6+0,7/0,6+0,8/0,2	6,82
		Ortalama	7,00	0,5/0,3+0,6/0,2+0,7/0,4	
		Kötümser	8,00	0,6/0,1+0,5/0,2+0,8/0,4	
	S_{22}^3	İyimser	6,00	0,7/0,6+0,5/0,7+0,8/0,3	6,79
		Ortalama	7,00	0,6/0,2+0,6/0,3+0,7/0,2	
		Kötümser	8,00	0,5/0,2+0,7/0,1+0,8/0,5	
	D_{22}^3	İyimser	3,00	0,4/0,2+0,8/0,6+0,7/0,3	3,81
		Ortalama	4,00	0,5/0,6+0,7/0,3+0,8/0,4	
		Kötümser	5,00	0,3/0,2+0,6/0,1+0,7/0,3	

Tablo 3.21 Apre iş süreci için potansiyel kök nedenlerin “FMEA-FTA-PERT dağılımı” ile hesaplan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik Değerleri.

HT_i^j	OHT_i^j SHT_i^j DHT_i^j	$O_i^{j1}, O_i^{j2}, O_i^{j3}$ $S_i^{j1}, S_i^{j2}, S_i^{j3}$ $D_i^{j1}, D_i^{j2}, D_i^{j3}$	Değeri	$E(pOHT_i^j)$ $E(pSHT_i^j)$ $E(pDHT_i^j)$
HT_{18}^1	O_{18}^1	İyimsen	7,00	8,00
		Ortalama	8,00	
		Kötümser	9,00	
	S_{18}^1	İyimsen	4,00	5,00
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	6,00	
	D_{18}^1	İyimsen	3,00	5,00
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	7,00	
HT_{18}^2	O_{18}^2	İyimsen	9,00	9,83
		Ortalama	10,00	
		Kötümser	10,00	
	S_{18}^2	İyimsen	4,00	5,83
		Ortalama	6,00	
		Kötümser	7,00	
	D_{18}^2	İyimsen	3,00	3,17
		Ortalama	3,00	
		Kötümser	4,00	
HT_{18}^3	O_{18}^3	İyimsen	9,00	9,83
		Ortalama	10,00	
		Kötümser	10,00	
	S_{18}^3	İyimsen	4,00	5,83
		Ortalama	6,00	
		Kötümser	7,00	
	D_{18}^3	İyimsen	3,00	3,17
		Ortalama	3,00	
		Kötümser	4,00	
HT_{19}^1	O_{19}^1	İyimsen	8,00	8,33
		Ortalama	8,00	
		Kötümser	10,00	
	S_{19}^1	İyimsen	4,00	5,00
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	6,00	
	D_{19}^1	İyimsen	4,00	4,83
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	5,00	

Tablo 3.22 Apre iş süreci için potansiyel kök nedenlerin “FMEA-FTA-PERT dağılımı” ile hesaplan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik Değerleri (Devamı-1).

HT_i^j	OHT_i^j SHT_i^j DHT_i^j	$O_i^{j1}, O_i^{j2}, O_i^{j3}$ $S_i^{j1}, S_i^{j2}, S_i^{j3}$ $D_i^{j1}, D_i^{j2}, D_i^{j3}$	Değeri	$E(pOHT_i^j)$ $E(pSHT_i^j)$ $E(pDHT_i^j)$
HT_{19}^2	O_{19}^2	İyimsen	8,00	8,33
		Ortalama	8,00	
		Kötümser	10,00	
	S_{19}^2	İyimsen	4,00	5,00
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	6,00	
	D_{19}^2	İyimsen	4,00	4,83
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	5,00	
HT_{19}^3	O_{19}^3	İyimsen	6,00	6,17
		Ortalama	6,00	
		Kötümser	7,00	
	S_{19}^3	İyimsen	4,00	5,00
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	6,00	
	D_{19}^3	İyimsen	4,00	4,83
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	5,00	
HT_{19}^4	O_{19}^4	İyimsen	6,00	6,17
		Ortalama	6,00	
		Kötümser	7,00	
	S_{19}^4	İyimsen	4,00	5,00
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	6,00	
	D_{19}^4	İyimsen	4,00	5,00
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	6,00	
HT_{20}^1	O_{20}^1	İyimsen	7,00	8,00
		Ortalama	8,00	
		Kötümser	9,00	
	S_{20}^1	İyimsen	5,00	6,00
		Ortalama	6,00	
		Kötümser	7,00	
	D_{20}^1	İyimsen	3,000	4,00
		Ortalama	4,00	
		Kötümser	5,00	

Tablo 3.23 Apre iş süreci için potansiyel kök nedenlerin “FMEA-FTA-PERT dağılımı” ile hesaplan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik Değerleri (Devamı-2).

HT_i^j	OHT_i^j SHT_i^j DHT_i^j	$O_i^{j1}, O_i^{j2}, O_i^{j3}$ $S_i^{j1}, S_i^{j2}, S_i^{j3}$ $D_i^{j1}, D_i^{j2}, D_i^{j3}$	Değeri	$E(pOHT_i^j)$ $E(pSHT_i^j)$ $E(pDHT_i^j)$
HT_{20}^2	O_{20}^2	İyimser	9,00	9,83
		Ortalama	10,00	
		Kötümser	10,00	
	S_{20}^2	İyimser	4,00	5,83
		Ortalama	6,00	
		Kötümser	7,00	
	D_{20}^2	İyimser	3,000	3,17
		Ortalama	3,000	
		Kötümser	4,00	
HT_{21}^1	O_{21}^1	İyimser	7,00	8,00
		Ortalama	8,00	
		Kötümser	9,00	
	S_{21}^1	İyimser	5,00	6,00
		Ortalama	6,00	
		Kötümser	7,00	
	D_{21}^1	İyimser	3,000	4,00
		Ortalama	4,00	
		Kötümser	5,00	
HT_{21}^2	O_{21}^2	İyimser	8,00	9,00
		Ortalama	9,00	
		Kötümser	10,00	
	S_{21}^2	İyimser	3,000	4,00
		Ortalama	4,00	
		Kötümser	5,00	
	D_{21}^2	İyimser	3,000	4,00
		Ortalama	4,00	
		Kötümser	5,00	
HT_{21}^3	O_{21}^3	İyimser	9,00	9,83
		Ortalama	10,00	
		Kötümser	10,00	
	S_{21}^3	İyimser	4,00	5,17
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	7,00	
	D_{21}^3	İyimser	4,00	5,00
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	6,00	

Tablo 3.24 Apre iş süreci için potansiyel kök nedenlerin “FMEA-FTA-PERT dağılımı” ile hesaplan Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik Değerleri (Devamı-3).

HT_i^j	OHT_i^j SHT_i^j DHT_i^j	$O_i^{j1}, O_i^{j2}, O_i^{j3}$ $S_i^{j1}, S_i^{j2}, S_i^{j3}$ $D_i^{j1}, D_i^{j2}, D_i^{j3}$	Değeri	$E(pOHT_i^j)$ $E(pSHT_i^j)$ $E(pDHT_i^j)$
HT_{22}^1	O_{22}^1	İyimsen	8,00	9,00
		Ortalama	9,00	
		Kötümser	10,00	
	S_{22}^1	İyimsen	7,00	7,00
		Ortalama	7,00	
		Kötümser	7,00	
	D_{22}^1	İyimsen	7,00	7,00
		Ortalama	7,00	
		Kötümser	7,00	
HT_{22}^2	O_{22}^2	İyimsen	6,00	7,00
		Ortalama	7,00	
		Kötümser	8,00	
	S_{22}^2	İyimsen	6,00	7,00
		Ortalama	7,00	
		Kötümser	8,00	
	D_{22}^2	İyimsen	4,00	5,00
		Ortalama	5,00	
		Kötümser	6,00	
HT_{22}^3	O_{22}^3	İyimsen	6,00	7,00
		Ortalama	7,00	
		Kötümser	8,00	
	S_{22}^3	İyimsen	6,00	7,00
		Ortalama	7,00	
		Kötümser	8,00	
	D_{22}^3	İyimsen	3,00	4,00
		Ortalama	4,00	
		Kötümser	5,00	

Tablo 3.25 FMEA-FTA; FMEA-FTA-BIFPET; FMEA-FTA-PERT dağılımı ile elde edilen Risk Öncelik Sayıları ve Risk Dereceleri.

HT_i^j	FMEA-FTA-BIFPET		FMEA-FTA-PERT Dağılımı		FMEA-FTA	
	$E(RPN_i^j)$	Risk Derecesi	$E(pRPN^j)$	Risk Derecesi	RPN_i^j	Risk Derecesi
HT_{18}^1	221,86	5	200,00	5	162,00	9
HT_{18}^2	292,51	2	181,66	8	120,00	13
HT_{18}^3	178,66	11	181,66	8	150,00	11
HT_{19}^1	206,92	6	201,16	4	240,00	5
HT_{19}^2	191,25	9	201,16	4	240,00	5
HT_{19}^3	157,75	15	149,00	10	210,00	6
HT_{19}^4	172,99	13	154,25	9	240,00	5
HT_{20}^1	170,73	14	192,00	7	144,00	12
HT_{20}^2	203,02	7	181,66	8	192,00	7
HT_{21}^1	186,38	10	192,00	7	168,00	8
HT_{21}^2	191,35	8	144,00	11	252,00	4
HT_{21}^3	234,33	4	254,10	2	350,00	2
HT_{22}^1	428,25	1	441,00	1	160,00	10
HT_{22}^2	257,79	3	245,00	3	512,00	1
HT_{22}^3	176,43	12	196,00	6	256,00	3

Tablo 3.26 Hata türü potansiyel kök nedenler için kabul edilebilirlik düzeylerinin karşılaştırılması.

HT_j^i	FMEA-FTA-BIFPET	FMEA-FTA-PERT dağılımı	FMEA-FTA
HT_{18}^1	Katlanılamaz	Yüksek	Yüksek
HT_{18}^2	Katlanılamaz	Yüksek	Yüksek
HT_{18}^3	Yüksek	Yüksek	Yüksek
HT_{19}^1	Katlanılamaz	Katlanılamaz	Katlanılamaz
HT_{19}^2	Yüksek	Katlanılamaz	Katlanılamaz
HT_{19}^3	Yüksek	Yüksek	Katlanılamaz
HT_{19}^4	Yüksek	Yüksek	Katlanılamaz
HT_{20}^1	Yüksek	Yüksek	Yüksek
HT_{20}^2	Katlanılamaz	Yüksek	Yüksek
HT_{21}^1	Yüksek	Yüksek	Yüksek
HT_{21}^2	Yüksek	Yüksek	Katlanılamaz
HT_{21}^3	Katlanılamaz	Katlanılamaz	Katlanılamaz
HT_{22}^1	Katlanılamaz	Katlanılamaz	Yüksek
HT_{22}^2	Katlanılamaz	Katlanılamaz	Katlanılamaz
HT_{22}^3	Yüksek	Yüksek	Katlanılamaz

Tablo 3.27 FMEA’da eleştirilen ve gelişme sağlanan hususlar için yöntemlerin karşılaştırılması.

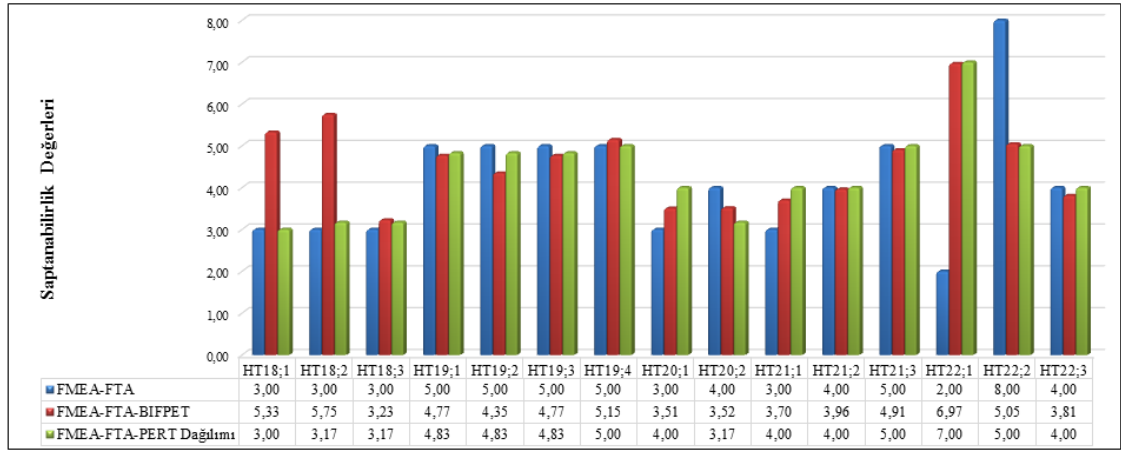
Eleştirilen husus	FMEA-FTA-BIFPET	FMEA-FTA-PERT dağılımı	FMEA-FTA
O, S ve D’yi net olarak belirlemenin zor olması	HAYIR	HAYIR	EVET
O, S ve D’nin farklı kombinasyonları ile aynı RPN’nin elde edilmesi	HAYIR	KISMEN HAYIR	EVET
RPN değerlerinin tekrar etmesi	HAYIR	KISMEN HAYIR	EVET
RPN değerlerinin kesikli değerlere sahip olması nedeniyle çok sayıda ara değerlerin elde edilememesi	HAYIR	KISMEN HAYIR	EVET
RPN skalasının sezgisel olmayan istatistiksel özelliğe sahip olması	HAYIR	HAYIR	EVET



Şekil 3.7 Şiddet değerlerinin karşılaştırılması.

potansiyel kök nedenler için FMEA-FTA-BIFPET yönteminde “Yüksek” düzeyli risk değerlendirmesi sonucuna ulaşılmıştır. Benzer şekilde FMEA-FTA-PERT dağılımı ile elde edilen sonuçlara göre 3 hata türü potansiyel kök neden “Yüksek” düzeyli sonucu elde edilmiş, aynı potansiyel kök nedenler için FMEA-FTA-BIFPET yönteminde “Katlanılamaz” olarak değerlendirilmiştir (bakınız: Tablo 3.26). Önerilen yöntem sayesinde, risk potansiyeli daha yüksek düzeyde olan potansiyel kök nedenlerin öncelikli olarak dikkate alınmaları ve önceliği daha az olan hatalar için kaynak ve zaman israfına uğranmaması açısından önemli bir sonuç elde edildiği söylenilebilir.

Önerilen risk analiz yaklaşımı ile elde edilen sonuçlara göre, klasik FMEA’nın eleştirilen



Şekil 3.8 Saptanabilirlik değerlerinin karşılaştırılması.

hususlar ile ilgili: O, S ve D'yi net olarak belirlemenin zor olduğu [164, 182, 183], O, S ve D'nin farklı kombinasyonları ile aynı RPN değerinin elde edilmesi [46, 48, 154], RPN değerlerinin tekrar etmesi [48, 162, 163, 178, 186], RPN değerlerinin kesikli değerlere sahip olması nedeniyle çok sayıda ara değer analiz sonuçlarında elde edilemediği [48, 162–164, 178], RPN skalasının sezgisel olmayan istatistiksel özelliğe sahip olmasında [154, 162, 187] iyileşme sağlanmıştır.

Tablo 3.28 Yöntemler ve 15 potansiyel kök neden için elde edilen sonuçlar

Parametre	Yöntem 1: FMEA-FTA
Olasılık	7-10 arasında, 4 farklı kesikli değer
Şiddet	4-10 arasında, 6 farklı kesikli değer
Saptanabilirlik	2-8 arasında, 5 farklı kesikli değer
RPN	120-512 arasında, 13 farklı kesikli değer
Parametre	Yöntem 2: FMEA-FTA-BIFPET
Olasılık	6,36-9,84 arasında, 15 farklı sürekli değer
Şiddet	4,86-7,20 arasında, 14 farklı sürekli değer
Saptanabilirlik	3,23-9,84 arasında, 14 farklı sürekli değer
E(RPN)	157,74-428,11 arasında, 15 farklı sürekli değer
Parametre	Yöntem 3: FMEA-FTA-PERT Dağılımı
Olasılık	6,17-9,83 arasında, 6 farklı sürekli değer
Şiddet	4-7 arasında, 6 farklı kesikli değer
Saptanabilirlik	3-7 arasında, 2 farklı sürekli, 4 farklı kesikli değer
E(pRPN)	144-441 arasında, 7 farklı kesikli, 4 farklı sürekli değer

3.9 Sonuçlar

Üretim sistemlerinde çalışan sağlık ve güvenliğini, üretim sistemindeki iş süreçlerinin etkinliğini tehdit eden hataları değerlendirmek ve kontrol altına almak için endüstride birçok risk analiz ve değerlendirme yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntemlerden en

sık tercih edilenlerden birisi de FMEA yöntemidir. Ancak FMEA yöntemi ile ilgili hem FMEA standardında [48] hem de literatürde çeşitli haklı eleştiriler ortaya atılmıştır (bakınız: Tablo 3.2). Bu çalışmada FMEA yönteminin performansını geliştirmek için FTA yöntemi ile BIFPET algoritması avantajlarından yararlanılarak bütünleşik bir yöntem önerilmiştir. Uygulama Tekstil sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin, Kumaş boyama işletmesinde gerçekleştirilmiştir. Kumaş boyama işletmesindeki sekiz iş süreci dikkate alınarak FMEA-FTA çalışması yürütülmüş, toplam 67 hata kök neden belirlenmiştir. Bu çalışmada önerilen risk analiz yaklaşımının uygulaması ise kumaş boyama işletmesinin başarısını ikinci sırada en çok tehdit eden Apre iş süreci için gerçekleştirilmiştir. Önerilen yaklaşımın performansını değerlendirmek için Apre iş sürecinde FMEA-FTA'dan ve daha önce literatürde yürütülmediği bilinen FMEA-FTA-PERT dağılımından elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Bu çalışmada önerilen FMEA-FTA-BIFPET risk analiz yaklaşımında, tüme varım özellikli FMEA yöntemi ile tümdengelim özellikli FTA yaklaşımlarının bütünleştirilmesi ile analiz sonucunun güvenilirliğinin artması sağlanmıştır. Bunun yanında BIFPET algoritmasına göre analiz sürecinde, Mühendisler ve Çalışan Temsilcisinden oluşan karar vericiler potansiyel kök nedenlerin Olasılık, Şiddet ve Saptanabilirlik (iyimser-ortalama-kötümser) değerleri için gerçekleşme olasılık değeri atamakta, işletme müdürü ve iş güvenliği uzmanı pozisyonunda görev yapan FMEA ekip üyesinin ise gerçekleşme olasılık değerlerine, inanç değeri vermekte ve bulanık mantık yaklaşımı kullanılmaktadır. Bu sayede, hata türlerinin potansiyel kök nedenleri için gerçek durumu en güvenilir şekilde yansıtan risk derecelerinin elde edildiği düşünülmektedir.

Bu çalışmada yürütülen yöntemlerin performans dereceleri Tablo 3.27'de ifade edilen eleştirilerde sağlanan gelişme bakımından FMEA-FTA-BIFPET>FMEA-FTA-PERT dağılımı>FMEA-FTA olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

İş Sağlığı ve Güvenliğinde Çoklu Risk Analizi için Duyarlı Öncelik Sıralama Tekniği: Endüstriyel Vaka Çalışmaları

4.1 Özet

Risk analizi ve değerlendirme, iş sağlığı ve güvenliğini temin etmek için çok önemlidir. İş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek, iş kazalarını ve meslek hastalıklarını önlemek ile potansiyel tehlikelerin doğru bir şekilde tanımlanması ve değerlendirilmesi arasında güçlü bir ilişki vardır. Söz konusu tehlikelerin tanımlanması ve değerlendirilmesi de karar vericilerin tecrübeleri ve ilgili standartlara uyulması ile yakından ilişkilidir. Literatürde birçok risk analiz ve değerlendirme yaklaşımı önerilmiştir ve her biri avantaj ve zayıflıklara sahiptir. Yazarlar, zayıflıkların bir kısmının üstesinden gelmek için yöntemleri geliştirme yoluna gitmiştir. Geliştirilen yaklaşımlar ve klasik yaklaşımlar ile aynı hata türleri için farklı risk öncelik sıra düzeni elde edilebilmektedir ve sonuçlar tutarsız olabilmektedir. Bu durum, en riskli hata türlerine karar verme aşamasında karar vericiler için kafa karışıklığına neden olmaktadır. Bu bölümde, söz konusu probleme ilişkin literatürdeki boşluğu gidermek amacıyla duyarlı öncelik sıralama tekniğinin (Technique of Precise Order Preference: TPOP) iş sağlığı ve güvenliği alanında risk analiz ve değerlendirmesi için uygulanması önerilmiştir. Bu sayede, farklı yöntemler ile elde edilen avantajların kullanılması sağlanmakta, karar vericiler için elverişli bir risk öncelik sırası elde edilmektedir.

4.2 Giriş

Sanayi devrimleri ve teknolojinin gelişmesi ile birlikte bir taraftan toplumsal refahın artması beklenirken diğer taraftan iş kazaları ve meslek hastalıklarının görülme sıklığı korkutucu düzeylere ulaşmıştır. Tesis kaynaklarını ve insanları korumak için iş sağlığı ve güvenliği kaçınılmaz hale gelmiştir. Bir diğer taraftan, söz konusu problemler yasal düzenlemelerin, standartların ve akademik araştırmaların

yürütülmesi için itici güç olmuştur. Sanayi devrimi öncesinde, Hipokrat ve İtalyan Bernardino Ramazzini'nin bilimsel çalışmaları iş sağlığının temeli olarak görülmekte iken, sanayi devriminin başladığı İngiltere'de ilk iş sağlığı ve güvenliğine ilişkin düzenlemelerin yapıldığı bilinmektedir [205]. 1919 yılında Cenevre'de ILO (International Labour Organization)'nun kurulması [206], 1948 yılında Birleşmiş Milletler Tüzüğü kapsamında WHO [207]'nin kurulması, Amerika'da 1970 yılında OSHA [208]'nin kurulması ve ilk Güvenlik ve Sağlık Yönetim Rehberinin [209] 1989 yılında yayınlaması iş sağlığı ve güvenliğinin tarihsel gelişiminde önemli rol oynamıştır.

İş sağlığı ve güvenliği, her hangi bir endüstride veya iş yerinde çalışanların işlerini yürütmeleri esnasında onları korumayı amaçlayan bir kavramdır [210]. Literatürde, iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yasal düzenlemeler ve standartlar [211–213], tehlikeler ve tehlikeleri kontrol altında tutulması, insan faktörü, güvenlik performansı-çalışan tutumları, kurallar ve eğitimler, ergonomi, sağlık ve güvenlik yönetimi, risk yönetimi [214] ve değerlendirilmesi, sistem güvenliği gibi konuların ele alınmaktadır. Her bir çalışmanın amacı iş sağlığı ve güvenliğinin gelişmesine katkı sunmaktadır.

İş sağlığı ve güvenliğinin en kritik hedeflerinden birisi de risklerin analizi ve değerlendirilmesidir. Risk değerlendirmesi ve yönetiminin geçmişi ise 30-40 yıldan fazla olmayan bir bilimsel alan olarak kurulmuştur ve bu nedenle de gelişmekte olan bir alanıdır [215]. İş sağlığı ve güvenliğinin en kritik amaçlarından birisi risklerin analiz edilmesi ve değerlendirilmesidir. Risk analizi ve değerlendirmenin başarılı olması, iş güvenliği profesyoneli olan karar vericilerin tecrübesi, ilgili standartlara, yasal düzenlemelere uyulması arasında güçlü bir ilişki vardır. İş güvenliği profesyonelleri, iş yerlerindeki tehlikelerin tanımlanması, çalışanların bu tehlikeler hakkında eğitilmesi ve çalışanların işlerini doğru bir şekilde yürütmelerine rehberlik etmek sorumlulukları arasındadır [216]. Standartlar arasında en dikkat çekenlerden biri olan, ISO 45001'de iş yaralanmaları ve meslek hastalıklarını önlemeye yönelik proaktif bir bakış açısı ile iş sağlığı ve güvenliğinin sürekli iyileştirilmesi, yasal gerekliliklerin yerine getirilmesi ve iş sağlığı ve güvenliği hedeflerine ulaşılması, ürün kayıplarının engellenmesi için yardımcı bir rehber niteliği taşımaktadır [217]. Bununla birlikte, ISO 31000 numaralı kurumsal risk yönetim standardı da iş yerlerinin iş sağlığı ve güvenliğine uygun olması için kullanılmaktadır [218].

Risk değerlendirmesindeki esas amaç, riskleri anlamak, tehlikeleri derinlemesine ve sistematik bir şekilde analiz ederek iş kazalarını önlemektir [219]. Risk analizi ve risklerin derecelendirilmesi konusu, üretim duruşlarına neden olan risklerin tanımlanması, makine-ekipman bakım risklerinin analiz edilmesi [220–224] ürün kalitesini olumsuz etkileyen tehlikelerin değerlendirilmesi, arz-talep bozulmalarına

bağlı işletmenin karşı karşıya kaldığı risklerin tanımlanması, montaj sürecinde stokta bulunmama risklerinin analiz edilmesi bakımından çok geniş bir perspektifte imalat sanayi kapsamında da önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir [225–229].

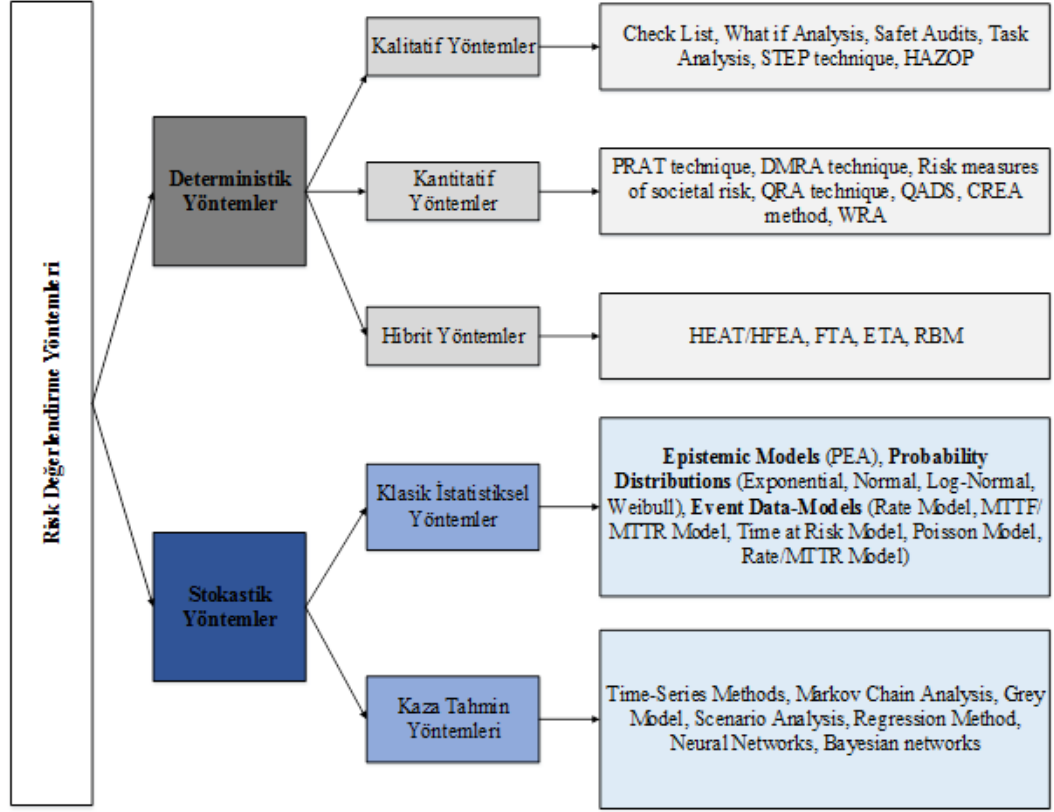
Literatürden anlaşılabacağı üzere, hem iş sağlığı ve güvenliğinin geliştirilmesi hem de üretim ve hizmet süreçlerinin iyileştirilmesi için risklerin analiz edilmesi ve en uygun risk öncelik sıralamasına dayanarak önlemlerin alınması önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir. Literatürde, riskler için en uygun sıralama düzenini elde etmeye yönelik çokça yöntem bulunmakla birlikte, en uygun yöntemin hangisi olduğuna karar verme konusu daha önce ele alınmamış bir problemidir. Bu çalışmada söz konusu problemin üstesinde gelmek için duyarlı öncelik sıralama tekniğinin (Technique of Precise Order Preference: TPOP) avantajlarından yararlanılmıştır. Bu çalışmanın esas yeniliği, daha önce geliştirilmiş olan TPOP yaklaşımının risk analizi bağlamında hata türlerine öncelik vermek için kullanılmasıdır. TPOP yaklaşımının uygulamasını göstermek maksadıyla üretim sistemleri ile ilgili iki vaka çalışması yürütülmüştür. Çalışma sonucunda, iş sağlığı ve güvenliği alanında tanımlanan riskler için duyarlı risk öncelik sıralaması elde edilmiştir. Bu sayede karar vericilerin yaşadığı kafa karışıklığının, kaynak ve zaman israfının önlenildiği ve literatüre katkı salandığı düşünülmektedir.

4.3 Literatür İncelemesi

Mesleki tehlikelerin değerlendirilmesi iş sağlığı ve güvenliği yönetiminin önemli bir parçasıdır [230]. Ayrıca risk değerlendirme kavramı, iş yerlerindeki tehlikelere yönelik yeterli önleyici tedbir alınıp alınmadığını ve olası tehlikelin neden olabileceği zararları ortadan kaldırmak için ilave önlemlere ihtiyaç olma durumunun tespit edilmesi ve güvenliğin geliştirilmesi için kullanılan bir kavramdır [54, 231]. Fattahi vd. [208]'de risk değerlendirmesini, nitel olarak risklerin belirlenmesi ve nicel olarak değerlendirilerek olası sonuçlarını araştırmak için kullanılan bir yöntem olduğunu ifade etmiştir.

Geleneksel risk değerlendirme araçları belirli bir alandaki belirli bir üretim sürecindeki güvenlik risklerini değerlendirmeye yarayan ön tehlike analizi ve kontrol listelerinin oluşturulmasını sağlamaktadır [42, 232]. Bunun yanında, risk değerlendirmesi, olası kazalara neden olabilecek potansiyel tehlikeleri tanımlamak, kazaların olasılığını ve etkisini azaltmaya yönelik önlemler almak için de önemli bir araçtır [233]. Risk değerlendirme yöntemlerinin çok kriterli karar verme yöntemleri ve bulanık mantık yaklaşımlarının kullanılarak geliştirildiği çalışmaların yürütüldüğü bilinmektedir. Gul [42] iş sağlığı ve güvenliği alanında kullanılan, çok kriterli karar verme (Multiple

Criteria Decision Making: MCDM) yaklaşımları ile ve onların bulanık mantık ile bütünleştirildiği risk değerlendirme yöntemlerini incelemiştir ve toplam 40 yöntem listelemiştir. Marhavalas ve Koulouriotis [234] genel olarak, risk değerlendirme yaklaşımlarını deterministik ve stokastik yaklaşımlar olarak başlıca iki sınıfta ifade etmiştir (bakınız: Şekil 4.1).



Şekil 4.1 Risk değerlendirme yöntemleri [234].

Literatürde, geleneksel risk değerlendirme yaklaşımların geliştirilmeye ihtiyacı olduğuna dikkat çeken, bunun yanında sektöre, yürütülen işin doğasına uygun yeni risk değerlendirme yaklaşımlarının önerildiği çalışmalar yürütülmüştür. Bu çalışmalar arasında, Can ve Toktaş [235] geleneksel risk değerlendirme yöntemlerinde, riskteki belirsizliği ve önleyici eylem planlarının öncelik sıralarının dikkate alınmadığına, risk faktörlerinin eşit ağırlıkta kabul edildiğine dikkat çekmiştir ve söz konusu problemlerin üstesinde gelmek için bulanık DEMATEL (Fuzzy Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory: F-DEMATEL) ve bulanık MABAC (Fuzzy Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison: F-MABAC)'a dayanan dinamik risk değerlendirme yaklaşımı önermiştir. Li vd. [233] klasik iş güvenliği analizinde rutin olmayan işlerin doğasındaki dinamiklik ve belirsizliğin dikkate alınmamasından dolayı risklerin artabileceğini ifade etmiştir. Söz konusu risklerin etkilerini azaltmak için riskleri, zaman sırasını dikkate alan Petri ağları ile mesleki güvenlik analizi (Job

safety analysis: JSA)'ne dayanan bir risk analiz yaklaşımı sunmuştur. Önerdiği yaklaşımın uygulamasını gaz iletimi başlatma işlemi için göstermiştir. Riskleri sıralamak için risk matrisinden yararlanmıştır. Önerdiği risk analiz yaklaşımı ile tehlikelere ilişkin zaman sırlamasını dikkate alan sezgisel ve mantıksal bir risk değerlendirme aracı olduğunu ifade etmiştir. Elde ettiği sonuçlara göre rutin olmayan işlerin risklerini analiz etmek için denetçilere ve çalışanlar için bir rehber sunduklarını ifade etmiştir. Karasan vd. [236] birçok risk analiz yaklaşımında, risk faktörlerinden yalnızca olasılık ve şiddet parametrelerinin kullanıldığına dikkat çekerek çalışmasında, olasılık şiddet, farkedilebilirlik ve frekans faktörlerinin dikkate alan, Güvenlik ve Kritik Etki Analizi (Safety and Critical Effect Analysis: SCEA) ve Pisagor bulanık kümeleri birlikte kullanan bir risk analiz yaklaşımı önermiştir. Önerdikleri yaklaşım ile elde ettikleri sonuçları Fine Kinney ve FMEA yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırmalı olarak sunmuştur. Önerdiği risk analiz yaklaşımı ile ilgili risk parametrelerinin tamamının dikkate alınması nedeniyle daha güvenilir sonuçların elde edildiğini ifade etmiştir. Fattahi vd. [237] geleneksel FMEA yaklaşımı ile bazı hata türleri arasındaki farkın ayırt etmenin zor olduğuna dikkat çekmiştir ve bulanık AHP ve bulanık MULTIMOORA yöntemleri ile FMEA yöntemini genişleten yeni hibrid bir risk analiz ve değerlendirme yaklaşımı önermiştir. Önerdiği yaklaşımın uygulamasını çelik endüstrisinde yaşanan kaza türleri için göstermiştir ve önerdiği yaklaşım ile geleneksel yaklaşımlara göre daha makul sonuçlar elde edilebileceğini, hata türlerinin daha kesin olarak değerlendirilebileceğini ifade etmiştir. Wang vd. [238] madencilikte toz patlamalarına ilişkin tehlikeleri analiz etmek için Visual Basic (VB) ile hata ağacı analiz yaklaşımını birlikte kullanmıştır. Belirlediği tehlikelerin olasılık değerlerini belirlemek için bulanık üçgen sayılardan yararlanmıştır. Suhardi vd. [239]'de çalışmasında üretim sürecinde güvenliği geliştirmeye odaklanmıştır ve kazalara neden olan tehlikeleri tanımlamak için tehlike tanımlama değerlendirme ve kontrol tekniğini (hazard identification, risk assessment and risk control: HIRARC) tanıtmıştır. Kök nedenleri belirlemek için hata analizi tekniğinden yararlanmıştır ve tehlikeleri yüksek riskli ve düşük riskli olarak iki sınıfta ifade etmiştir. Rosa vd. [232]'de çalışmasında inşaat sektöründeki riskleri analiz etmeye odaklanmıştır ve söz konusu sektör için işlevsel rezonans yöntemine (Functional Resonance Analysis Method: FRAM) ve AHP yöntemine dayanan risk analizi uygulaması yürütmüştür. Önerdiği FRAM ve AHP yaklaşımı ile risk değerlendirme uygulamasında birçok uzmanın farklı analiz adımlarına katılımını sağladığını ve bu sayede risk analiz ve değerlendirme sonucunun özneliliğinin azaldığını ifade etmiştir. Kutlu ve Ekmekçioğlu [165] çalışmasında, sistem, tasarım, proses ve hizmet sistemlerindeki potansiyel hataları analiz etmek için yaygın bir şekilde kullanılan FMEA yönteminin bazı zayıf yönlerini geliştirmek için bulanık TOPSIS ve bulanık AHP ile FMEA yönteminin bütünleştirilmesini önermiştir. Önerdiği yaklaşımın uygulamasını otomotiv sektörü

için göstermiştir. Çok kriterli karar verme tekniklerinden ELECTRE, bulanık PROMETHEE veya bulanık VIKOR ile sonuçların karşılaştırılmasını önermiştir. Vaurio [223] sistem ve bakım operasyonlarının güvenliğini temin etmek için risk bilgisine dayanarak sistem bileşenlerin kritikliklerini derecelendirmiş ve önlem faaliyetleri tanımlamıştır. Nordgård ve Sand [240] ise elektrik dağıtım tesislerinde riskleri analiz etmek için bayesian ağlarına dayanan bir yaklaşım önermiştir. Sachdeva vd. [241] kağıt hamuru çürütücü sistemler için bakım operasyonlarını için önemli olan hata türlerinin güvenilir bir şekilde analiz edilmesi, kesin bir risk sıralaması ortaya konulabilmesi için FMECA yöntemi ile TOPSIS yöntemlerinin birlikte kullanılmasını önermiştir. Geleneksel FMEA yaklaşımında kullanılan olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik faktörlerinin yanında yedek parça, bakım yapılabilirlik, ekonomik maliyet, ekonomik güvenlik bakımından değerlendirilmesini önermiştir. Önerdikleri yaklaşım ile bakım stratejilere karar vermek için daha doğru ve kesin bir risk sıralaması elde edildiğinin altını çizmiştir. Braglia [242] çalışmasında, riskleri değerlendirmek için olasılık şiddet ve farkedilebilirlik faktörlerinin yanında hatanın beklenen maliyetini de dikkate alan FMECA ile AHP yöntemlerinin kullanımına dayanan çok nitelikli-hata türü analizi (Multi Attribute-Failure Mode Analysis: MAFMA) yaklaşımı önermiştir. Önerdiği yaklaşımın uygulamasını İtalya'da faaliyet gösteren bir buzdolabı imalat şirketini dikkate alarak göstermiştir. MAFMA ile güvenilirlik çalışmasında tanımlanan hataları önceliklendirme için güçlü bir araç gibi görüldüğünü ifade etmiştir. Başka bir çalışmada, Xu vd. [185] motor sistemler için bulanık mantık tabanlı FMEA'yı kullanmıştır. Peeters vd. [243] FMEA'nın hata analiz gücünü artırmak için FTA ve FMEA'yı entegre etmeyi önermiştir.

Önerilen risk analiz ve değerlendirme yaklaşımlarının performansını test etmek için farklı yaklaşımlar ile elde edilen sonuçları karşılaştırmalı olarak sunan çalışmalar da yürütülmüştür. Bu çalışmalardan, Gul ve Ak [54] pisagor bulanık AHP (Pythagorean fuzzy analytic hierarchy process: PFAHP), 5x5 risk matris yöntemi ve bulanık TOPSIS yöntemlerine dayanan yeni bir risk analiz yaklaşımı önermiştir. Önerdikleri yaklaşımın uygulamasını yer altı bakır ve çinko madeni için gerçekleştirmiştir. Elde ettiği sonuçları FAHP-FVIKOR yöntemi ile karşılaştırdığında, tehlikeler için belirlenen sıra derecelerinin bazılarının tutarlı bazılarının ise tutarsız olduğu anlaşılmıştır. Liu vd. [56] risk analiz ve değerlendirme sürecinde karar vericilerin ve tehlikenin doğasındaki bulanıklık ve rassallık ile başa çıkmak için bulut modelini, PROMETHEE ve FMEA yönteminin birlikte kullanılmasına dayanan bütünlük bir karar verme çerçevesi önermiştir. Önerdikleri risk önceliklendirme yöntemini uygulamasını hastane acil servis sistemi için gerçekleştirmiştir. Önerdikleri yaklaşım ile elde ettikleri hata türü öncelik sıralaması ile geleneksel FMEA ile elde edilen hata türü öncelik sıralamasının uyuşmadığını ancak önerilen yaklaşım ile hata türleri öncelik sıralamasının, bulanık

VIKOR, IF-TOPSIS, IVIF-MULTIMOORA ve ITL-GRA yöntemleriyle elde edilenlerle büyük benzerlik gösterdiğini ifade etmiştir. Ancak, kullanılan 5 risk analiz yaklaşımı ile de farklı risk öncelik sıralamaları elde edildiğine, sıralamalarda tutarsızlıklar olduğuna dikkat çekmiş ve önerdiği yaklaşım ile daha makul ve güvenilir bir risk öncelik sıralaması elde edildiğini ifade etmiştir. Liu vd. [55] geleneksel FMEA'da risk faktörlerini ağırlıklandırma ve hata türlerini sıralama hususlarında zayıflıklar bulunduğunu ve söz konusu zayıflıkların üstesinden gelmek için grey ilişki analizi (grey relational analysis: GRA) ve bulut model teorisi ile FMEA yöntemini genişletmeyi önermiştir. Önerdiği risk analiz yaklaşımının avantajlı özelliklerini göstermek için Bulanık GRA, TOPSIS-entropi yaklaşımları ile elde ettiği sonuçları karşılaştırıldığında risk sıra derecelerinin büyük bir çoğunluğunun benzer olduğunu, bunun yanında bazı hata türleri için risk sıra derecelerinde tutarsızlık olduğuna dikkat çekmiştir. Önerdiği yaklaşım ile FMEA'nın bazı zayıflıklarının üstesinden geldiğini ve hata türleri için daha doğru bir risk sıralaması elde edildiğini ifade etmiştir. Song vd. [244] çalışmasında üretim süreçlerinde risk değerlendirmek için ağırlıklı bulanık TOPSIS ile FMEA yöntemini entegre eden yeni bir risk analiz ve değerlendirme yaklaşımı önermiştir. Önerdiği yöntemin uygulamasını nükleer yeniden ısıtma valf sistemi için gerçekleştirmiştir. Elde ettiği sonuçları, geleneksel FMEA, Fuzzy TOPSIS-Fuzzy AHP-FMEA, FMECA-TOPSIS yöntemleri ile elde edilen sonuçla ile karşılatırmıştır. Dört yöntem ile elde edilen risk sıralamasının bazı hata türleri için farklı olduğu anlaşılmıştır. Ancak, önerdiği yöntem ile hata türleri için daha kesin bir hata öncelik sıralamasının elde edilmiş olabileceğini ifade etmiştir.

Risk değerlendirme temelli yürütülen çalışmalarından anlaşılacağı üzere tehlikeli durumları tanımlamak, potansiyel tehlikelerin etkilerini en aza indirecek önlemleri almak amacıyla tehlikeleri risk derecesine göre sıralamak üzerine odaklanıldığı anlaşılmıştır. Yazarlar önerdikleri yeni risk analizi ve değerlendirme yaklaşımı ile daha doğru risk sıralaması elde edildiğini ifade ederken bir diğer yazarın önerdiği yöntem ile kendi önerdikleri yöntem sonucunu karşılaştırdıklarında elde edilen risk derece sıralamalarında benzerlikler olduğu gibi tutarsızlıkların olduğunu da ifade etmişlerdir [241, 242, 244]. Söz konusu çalışmalardan anlaşılacağı üzere, iş sağlığı ve güvenliği alanında risk analiz ve değerlendirme uygulamalarında çoklu risk analizi ve değerlendirme yaklaşımları ile elde edilen risk derecelerindeki tutarsızlıklar, karar vericiler için belirsizlik ve kafa karışıklığı problemine neden olmaktadır. Bunun yanında, riskleri doğru bir şekilde önceliklendirilmesi ile doğru sıralama ile güvenlik önlemlerinin uygulanması, kısıtlı bütçenin tahsis edilmesi ve zaman kayıplarının önüne geçilmesi açısından son derece önemli bir işleve sahip olduğu bilinmektedir [245]. Daha önce yürütülen çalışmalardan anlaşılacağı üzere, çok kriterli karar verme yöntemleri ile bulanık çok kriterli karar verme yöntemlerinin risk analizi

yöntemleri ile entegre edilerek kullanıldıkları anlaşılmıştır. Aynı zamanda, benzer risk analiz ve değerlendirme problemleri için bir çok yöntemin kullanılabildiği görülmüştür. Burada, karar vericiler için en doğru risk öncelik sırlamasının hangi yöntem ile elde edileceği sorunu doğmaktadır. Bunun yanında, birden fazla yöntem ile yapılan değerlendirmeler sonucunda, tutarlı olmayan risk öncelik sırlama düzeni nedeniyle de hangi sonucun dikkate alınması gerektiği önemli ikinci bir problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Literatürde, aynı risk analiz ve değerlendirme problemi için farklı yaklaşımlar kullanılarak sonuçların karşılaştırıldığı çalışmalar da yürütülmüştür. Ancak yürütülen çalışmalarda, yöntemlerin avantajlarını birleştirerek tek bir sıralamanın elde edildiği çalışmaya da rastlanmamıştır. Bu bölümde amaç, aynı hata türleri için farklı risk değerlendirme yöntemleri ile elde edilen farklı risk öncelik sırlaması nedeniyle karar vericilerde oluşan kafa karışıklığına ve belirsizliğine bir çözüm yaklaşımı sunmaktır. Bu amaçla literatürde daha önce önerilmiş olan Duyarlı Tercih Sıralama Tekniği (Technique of Precise Order Preference: TPOP) kullanılması önerilmiştir [57]. Bairagi vd. [57] çalışmasında, çok kriterli karar verme problemlerinde çoklu geleneksel yaklaşımlar ile elde edilen tercih sıralamalarındaki farklılıklar nedeniyle karar vericiler için ortaya çıkan belirsizlik ve kafa karışıklığı probleminin üstesinden gelmek için TPOP yaklaşımını geliştirmiştir. TPOP yaklaşımı ile her birçok kriterli karar verme yönteminin avantajları dikkate alınarak tek bir tercih sırasının belirlenmesini sağlamaktadır. Yeni bir çok kriterli karar verme yaklaşımı olarak göreceli olarak tanımlanan TPOP tekniğinin avantajları şunlardır: hesaplamada basit, uygulamada basit, anlaşılması kolay ve geleneksel yöntemlerin son seçim faktörlerinin değerlerine dayanmaktadır ve Böylece veri işlemede gereksiz karmaşıklıktan kaçınılır [57]. Çalışmada TPOP yaklaşımını önermek için bir başka önemli neden, geleneksel entropi yönteminin mantıksal uzantısı olan gelişmiş entropi ağırlıklandırma yöntemi ile nihai seçim değerlerinin önemini / ağırlıklarını göz önünde bulundurmasıdır (metodoloji bölümündeki 7. adıma bakınız). Benzer şekilde iş sağlığı ve güvenliği alanında çoklu risk analiz ve değerlendirme uygulamaları ile elde edilen risk öncelik sırlamamalarındaki farklılıklar, her bir yöntemin avantajının kullanılması ile tek bir risk öncelik sırlamasının elde edilmesi planlanmıştır. Önerilen çalışma ile literatürdeki boşluğun giderileceği, iş güvenliği profesyonellerine güvenlik önlemlerini tanımlama aşaması için bir rehber ortaya konulduğu düşünülmektedir.

4.4 Metodoloji

4.4.1 Duyarlı Öncelik Sıralama Tekniği (Technique of Precise Order Preference: TPOP)

Bu bölümde, Bairagi vd. [57] çalışmasında önerdiği duyarlı öncelik sıralama tekniğinin (Technique of Precise Order Preference: TPOP) iş sağlığı ve güvenliği alanında, risk analiz ve değerlendirme sürecindeki kullanımı önerilmiştir. Bairagi vd. [57]. seçim probleminin aynı olmasına rağmen farklı MCDM (Multi Criteria Decision Making) yaklaşımları ile farklı sıralamaların elde edildiğini, hangi MCDM ile elde edilen sıralamanın daha iyi olduğu konusunda fikir sahibi olamama nedeniyle karar vericiler için kafa karışıklığı ve belirsizliğin yaşandığına dikkat çekmiştir. Söz konusu problemin üstesinden gelmek için TPOP yaklaşımını önermiştir. Literatürde, sıralama/önceliklendirme problemlerinde kullanılmak üzere çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Karar vericiler aynı sıralama problemi için farklı yöntemler ile farklı sıralama düzeni elde etmektedir. Kullanılan her yöntem, problemin çözümünde farklı avantajlar sağlamakta ve her yöntemin yürütülmesinde kullanılan adımların farklı olması nedeniyle karar vericiler için birden fazla sıralama elde edilmektedir. Buradaki temel problem, sıralamalar arasındaki tutarsızlıklar ve hangi sıralamanın daha doğru olduğunun belirlenmesidir. Bu çalışmada, iş sağlığı ve güvenliği alanında riskleri önceliklendirme için farklı yaklaşımlar sonucu farklı öncelik sıralama düzeni nedeniyle yaşanan problemin çözümünde kullanmak üzere TPOP yaklaşımı önerilmiştir. TPOP ile önceliklendirme problemlerinde birden fazla yöntem ile elde edilen farklı sıralamalarına ait veriler, bütünleşik kullanarak tek bir sıralama elde edilmektedir. Böylece, birden fazla yöntem ile elde edilen sıralamalardan sağlanan avantajlar, bilgi kaybı olmadan tek bir sıralamaya dönüştürülmektedir. TPOP yaklaşımının uygulaması için aşağıda verilen 11 adım tanımlanmıştır [57].

$$S = \begin{matrix} & A_1 & \left| \begin{array}{cccccc} f_{11} & \cdots & f_{1j} & \cdots & f_{1t} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \cdots \\ f_{i1} & \cdots & f_{ij} & \cdots & f_{it} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \cdots \\ A_m & f_{m1} & \cdots & f_{mj} & \cdots & f_{mt} \end{array} \right. \end{matrix} \quad (4.1)$$

Adım 1: Alternatifler için MCDM yaklaşımları ile elde edilen nihai seçim değerleri ile karar matrisi oluşturulur. Burada $i = 1, 2, \dots, m$ ve $j = 1, 2, \dots, t$ 'dir. A_i , i 'nci alternatifi, f_{ij} , A_i için j 'nci MCDM yaklaşımı ile elde edilen nihai seçim değerlerini temsil etmektedir.

Adım 2: Farklı MCDM yöntemleri ile elde edilen nihai seçim değerleri oldukça

geniş bir aralıkta değişmektedir. Yakınlık katsayıları 0-1 aralığında değerler alırken, kullanım derecesi 0-100 aralığında değerler alabilmektedir. Bir diğer taraftan MOORA ve ELECTRE gibi yöntemler ile negatif seçim değerleri hesaplanabilmektedir [37]. Tüm bu değerleri bir arada değerlendirebilmek için j tane farklı MCDM yöntemi ile elde edilen nihai seçim değerlerinin normalize edilmiş değerini τ_{ij} ve i'nci alternatifin j'nci yaklaşım ile elde edilen nihai seçim değerinin mutlak değeri, $|f_{ij}|$ ile ifade edilmektedir. $\tau_{ij}, 0 \leq \tau_{ij} \leq 1$ aralığında değerler alabilmektedir. Normalizasyon için eşitlik 4.2 kullanılmaktadır.

$$\tau_{ij} = \frac{|f_{ij}|}{\sum_{i=1}^m |f_{ij}|} \quad (4.2)$$

Adım 3: Her bir MCDM yaklaşımı için nihai seçim değerlerinin normalize edilmiş değerleri kullanılarak entropi değerleri hesaplanır. Entropi değerini hesaplamak için eşitlik 4.3 kullanılmaktadır.

$$e_j = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m |\tau_{ij} * \ln \tau_{ij}| \quad (4.3)$$

Adım 4: j'nci yaklaşımın görünür ağırlık s_j değerini hesaplamak için eşitlik 4.4 kullanılır.

$$s_j = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^t (1 - e_j)} \quad (4.4)$$

Buraya kadarki adımlar ile klasik entropi hesabı yapılmış oldu. Adım 5-7'de ise Baigai vd. (2015)'nin önerdiği gelişmiş entropi yaklaşımının tanıtılmaktadır.

Adım 5: Burada, $0 \leq s_j \leq 1$ 'dir s_j , minimum 0, maksimum 1 değerini almaktadır. Maksimum s_j 'nin minimum s_j değerini oranı sonsuz olabilmekte ve nitelikler karşılaştırıldıklarında bazılarının önemsiz olması sorununa neden olabilmektedir. Bu istenmeyen bir durumdur ve problemin üstesinden gelmek için s_j değerinden yararlanılarak, s'_j değeri eşitlik 4.5 yardımı ile hesaplanmaktadır. Bu sayede, $1 \leq s'_j \leq 2$ olur ve maksimum s'_j 'nin minimum s'_j 'e oranı $2/1=2$ olur. Bu değer kabul edilebilir sınır değer olarak dikkate alınmaktadır.

$$s'_j = (1 + \sqrt{s_j}) \quad (4.5)$$

Adım 6: Her bir MCDM yöntemi için hesaplanan s'_j değerleri toplanarak S'_j değeri elde

edilir (: eşitlik 4.6). Burada, $1 \leq s'_j \leq 2$ aralığındadır ve $t \leq S'_j \leq 2$ aralığı ile kısıtlıdır. s'_j ve S'_j gerçek sayılar olup, boyutsuzlardır. Geleneksel seçim yöntemlerinin sayısının t olduğuna ve $2 \leq t$ olduğuna dikkat edilmelidir.

$$S'_j = \sum_{j=1}^t s'_j = \sum_{j=1}^t (1 + \sqrt{s_j}) \quad (4.6)$$

Adım 7: j'nci yaklaşım ile belirlenmiş nihai seçim değerinin kesin ağırlığı w_j , s'_j 'nin S'_j 'e oranlaması ile elde edilir. w_j eşitlik 4.7 ile hesaplanmaktadır.

$$w_j = \frac{s'_j}{S'_j} = \frac{1 + \sqrt{s_j}}{t + \sum_{j=1}^t \sqrt{s_j}} \quad (4.7)$$

Adım 8: Alternatiflerin değerlendirilmesi için nihai seçim değerleri normalize edilir. Normalize ederken eşitlik 4.9 kullanılmaktadır. Burada, g_{ij} , f_{ij} 'nin normalize edilmiş değerlerini göstermektedir ve $0 \leq g_{ij} \leq 1$ 'dir. $(f_j)_{\max}$, j'nci yaklaşım ile belirlenen maksimum seçim değerini, $(f_j)_{\min}$ ise j'nci yaklaşım ile belirlenen minimum seçim değerini temsil eder. $f_{ij} \in L$ H'de f_{ij} 'nin en büyük değeri aldığı durum için formül ve $f_{ij} \in L$ 'de f_{ij} 'nin en küçük değeri aldığında kullanılması arzu edilen formül eşitlik 4.8'de gösterilmiştir. En düşük g_{ij} değerli alternatifin optimum çözüme en yakın olduğu anlamına gelmektedir.

$$g_{ij} = \begin{cases} \frac{(f_j)_{\max} - f_{ij}}{(f_j)_{\max} - (f_j)_{\min}}, & f_{ij} \in H \\ \frac{f_{ij} - (f_j)_{\min}}{(f_j)_{\max} - (f_j)_{\min}}, & f_{ij} \in L \end{cases} \quad (4.8)$$

Adım 9: i'nci alternatif için j'nci yaklaşım ile elde edilen nihai seçim değerinin ağırlıklandırılmış ve normalize edilmiş nihai seçim değerinin üssü h_{ij} eşitlik 4.9 ile hesaplanmaktadır.

$$h_{ij} = \exp(w_j + g_{ij}) \quad (4.9)$$

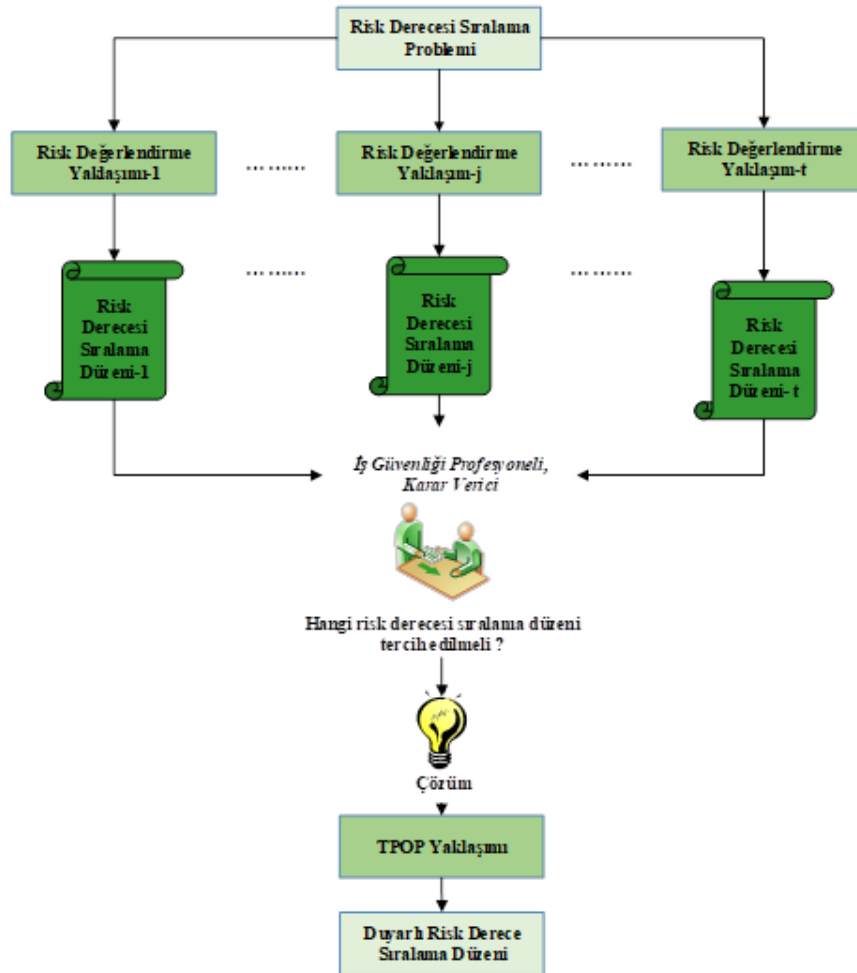
Adım 10: Her bir alternatif için duyarlı seçim indeksi PSI_i (Precise selection index: PSI) eşitlik 4.10 yardımı ile hesaplanır.

$$PSI_i = \sum_{j=1}^t h_{ij} = \sum_{j=1}^t \exp(w_j + g_{ij}) \quad (4.10)$$

Adım 11: Alternatifler, PSI değerleri artan biçimde sıralanır. En küçük PSI değerine sahip olan alternatifin derecesine 1 verilir, kendisinden sonraki sıradaki alternatifi derecesine ise 2 verilir. Bu şekilde, en sonda yer alan en büyük PSI değerli alternatif en kötü alternatif olarak değerlendirilmektedir.

4.5 Uygulama

Bu bölümde, TPOP yönteminin iş sağlığı ve güvenliği alanında, risk analiz ve değerlendirme süreci için uygulanabilirliği gösterilmiştir. Çalışmamızda üretim sistemlerinde karşılaşılan iki farklı vaka için farklı risk analiz yaklaşımları ile elde edilen nihai risk değerleri kullanılmıştır. Ele alınan problem ve çözüm yaklaşımı akışı Şekil 4.2’de verilmiştir. Devam eden bölümlerde, vaka çalışması 1 ve 2 dikkate alınarak TPOP yaklaşımının uygulaması ve elde edilen sonuçlar ifade edilmiştir.



Şekil 4.2 Çalışmada ele alınan problem ve çözüm yaklaşımı.

4.5.1 Vaka Çalışması 1

Birinci vakada, Song vd. [244] çalışmasında nükleer yeniden ısıtma valf sistemi için tanımladığı sekiz hata türü dikkate alınmıştır (bakınız: Tablo 4.1). Hata türleri için bulanık TOPSIS temelli ağırlıklandırılmış FMEA yaklaşımı [244], TOPSIS yaklaşımı [241], bulanık TOPSIS-bulanık AHP-bulanık FMEA yaklaşımı [165] ve klasik FMEA yaklaşımları ile elde edilen nihai risk değerlerine ait bilgiler Tablo 4.2’de verilmiştir. Burada $x=1, 2, \dots, 20$ ve $y=1, 2, 3, 4$ ’dür. RS_{xy} , HT_x için y ’nci risk analiz yaklaşımı ile elde edilen nihai risk skoru değerlerini temsil etmektedir.

Tablo 4.1 Nükleer yeniden ısıtma valf sistemi için hata türleri ve şiddet (S), olasılık (O), saptanabilirlik (D) değerleri [244].

HT_x	Hata Türü	S	O	D
HT_1	Vana çok uzun sürede kapanması veya hiç kapanmaması	9	4	7
HT_2	Vananın sıkıca kapatılamaması	3	4	4
HT_3	Vana milinde büyük sızıntı	4	6	4
HT_4	Vanada dalgalanmalar olması	6	4	4
HT_5	Vanayı açarken veya kapatırken vananın sıkışması	9	4	4
HT_6	Vana milinin kırılması	10	4	3
HT_7	Supap mili destek yatağı imalat hatası	8	7	2
HT_8	Vana sisteminin aşırı gürültülü çalışması	6	6	5

Tablo 4.2 Hata türleri için 4 farklı yaklaşım ile elde edilen nihai risk değerleri [244].

HT_x	Sachdeva vd. [241]		Kutlu ve Ekmekçioğlu [165]		Song vd. [244]		Klasik FMEA	
	CC_i^*	Derece (Sıra)	CC_i	Derece (Sıra)	CC_i	Derece (Sıra)	RPN**	Derece (Sıra)
HT_1	0,794	1	0,253	1	0,2379	1	252	1
HT_2	0,210	8	0,124	8	0,1324	8	48	7
HT_3	0,300	7	0,159	6	0,1721	6	96	6
HT_4	0,438	6	0,155	7	0,1465	7	96	6
HT_5	0,650	2	0,202	2	0,1941	3	144	3
HT_6	0,623	3	0,194	4	0,1770	5	120	4
HT_7	0,534	5	0,197	3	0,1955	2	112	5
HT_8	0,544	4	0,189	5	0,1991	4	180	2

* CC_i : Yakınlık katsayısı (Closeness coefficient),

** RPN: Risk öncelik sayısı (Risk priority number)

Adım 1: Her bir hata türü HT_x için her bir risk analiz yaklaşımı ile belirlenen nihai risk skorları RS_{xy} kullanılarak sırasıyla S^1 karar matrisi eşitlik 4.1 kullanılarak oluşturulur. Burada $x=1,2,\dots,8$ ve $y=1,2,3,4$ ’dür. RS_{xy} , HT_x için y ’nci risk analiz yaklaşımı ile elde edilen nihai risk skoru değerlerini temsil etmektedir.

Adım 2:Farklı risk analiz yaklaşımları ile elde edilen risk skorları 0,124 ile 1.048

arasında değişmektedir. Hata türleri için her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorlarını birlikte değerlendirebilmek için bu değerler eşitlik (2) kullanılarak normalize edilir (bakınız: Tablo 4.3).

$$S^1 = \begin{matrix} HT_1 \\ HT_2 \\ HT_3 \\ HT_4 \\ HT_5 \\ HT_6 \\ HT_7 \\ HT_8 \end{matrix} \begin{bmatrix} 0,794 & 0,253 & 0,2379 & 252 \\ 0,210 & 0,124 & 0,1324 & 48 \\ 0,300 & 0,159 & 0,1721 & 96 \\ 0,438 & 0,155 & 0,1465 & 96 \\ 0,650 & 0,202 & 0,1941 & 144 \\ 0,623 & 0,194 & 0,1770 & 120 \\ 0,534 & 0,197 & 0,1955 & 112 \\ 0,544 & 0,189 & 0,1991 & 180 \end{bmatrix}$$

Tablo 4.3 Normalize edilmiş risk skoru değerleri (birinci vaka).

HT_x	Sachdeva vd. [241]		Kutlu ve Ekmekçioğlu [165]		Song vd. [244]		Klasik FMEA	
HT_1	τ_{11}	0,1940	τ_{12}	0,1718	τ_{13}	0,1635	τ_{14}	0,2405
HT_2	τ_{21}	0,0513	τ_{22}	0,0842	τ_{23}	0,0910	τ_{24}	0,0458
HT_3	τ_{31}	0,0733	τ_{32}	0,1079	τ_{33}	0,1183	τ_{34}	0,0916
HT_4	τ_{41}	0,1070	τ_{42}	0,1052	τ_{43}	0,1007	τ_{44}	0,0916
HT_5	τ_{51}	0,1588	τ_{52}	0,1371	τ_{53}	0,1334	τ_{54}	0,1374
HT_6	τ_{61}	0,1522	τ_{62}	0,1317	τ_{63}	0,1217	τ_{64}	0,1145
HT_7	τ_{71}	0,1305	τ_{72}	0,1337	τ_{73}	0,1344	τ_{74}	0,1069
HT_8	τ_{81}	0,1329	τ_{82}	0,1283	τ_{83}	0,1369	τ_{84}	0,1718
Toplam		1,000		1,000		1,000		1,000

Adım 3-7: Her iki vakada riskleri önceliklendirmede kullanılan yaklaşımlar için sırasıyla e_j değeri eşitlik 4.3, s_j değeri eşitlik 4.4, s_j' değeri eşitlik 4.5, S_j' değeri eşitlik 4.6 ve w_j değeri eşitlik 4.7 yardımı ile elde edilir (bakınız: Tablo 4.4).

Tablo 4.4 Her bir risk analiz yaklaşımı için e_y , s_y , s_y' , S_y' ve w_y değerleri (birinci vaka).

Risk Analiz Yaklaşımı	e_y	s_y	s_y'	S_y'	w_y
Sachdeva vd. [217]	0,9685	0,3370	1,5805	5,8678	0,2694
Kutlu ve Ekmekçioğlu [140]	0,9907	0,0994	1,3152		0,2241
Song vd. [220]	0,9931	0,0743	1,2725		0,2169
Klasik FMEA	0,9542	0,4893	1,6995		0,2896

Adım 8: Her bir risk analiz yöntemi ile her bir hata türü için hesaplanan nihai risk, eşitlik 4.8 kullanılarak normalize edilir (bakınız: Tablo 4.5).

Tablo 4.5 Her bir hata türü için her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorunun g_{xy} değerleri (birinci vaka).

HT_x	Sachdeva vd. [241]		Kutlu ve Ekmekçioğlu [165]		Song vd. [244]]		Klasik FMEA	
HT_1	g_{11}	0,0000	g_{12}	0,0000	g_{13}	0,0000	g_{14}	0,0000
HT_2	g_{21}	1,0000	g_{22}	1,0000	g_{23}	1,0000	g_{24}	1,0000
HT_3	g_{31}	0,8459	g_{32}	0,7287	g_{33}	0,6237	g_{34}	0,7647
HT_4	g_{41}	0,6096	g_{42}	0,7597	g_{43}	0,8664	g_{44}	0,7647
HT_5	g_{51}	0,2466	g_{52}	0,3953	g_{53}	0,4152	g_{54}	0,5294
HT_6	g_{61}	0,2928	g_{62}	0,4574	g_{63}	0,5773	g_{64}	0,6471
HT_7	g_{71}	0,4452	g_{72}	0,4341	g_{73}	0,4019	g_{74}	0,6863
HT_8	g_{81}	0,4281	g_{82}	0,4961	g_{83}	0,3677	g_{84}	0,3529

Adım 9: Her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorlarının h_{ij} değerleri eşitlik (9) kullanılarak hesaplanır (bakınız: Tablo 4.6).

Adım 10-11: Sırasıyla her bir hata türü için PSI_i duyarlı seçim indeksi eşitlik 4.10 kullanılarak hesaplanır ve PSI_i değerleri artan şekilde sıralanarak derece tayin edilir. Tablo 4.7’de diğer risk analiz ve değerlendirme yaklaşımları ve TPOP yöntemi ile elde edilen sırlama sonuçları verilmiştir. 8 hata türü için duyarlı risk öncelik sırası, Şekil 4.3’de verilmiştir.

Tablo 4.6 Her bir hata türü için her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorunun h_{xy} değerleri (birinci vaka).

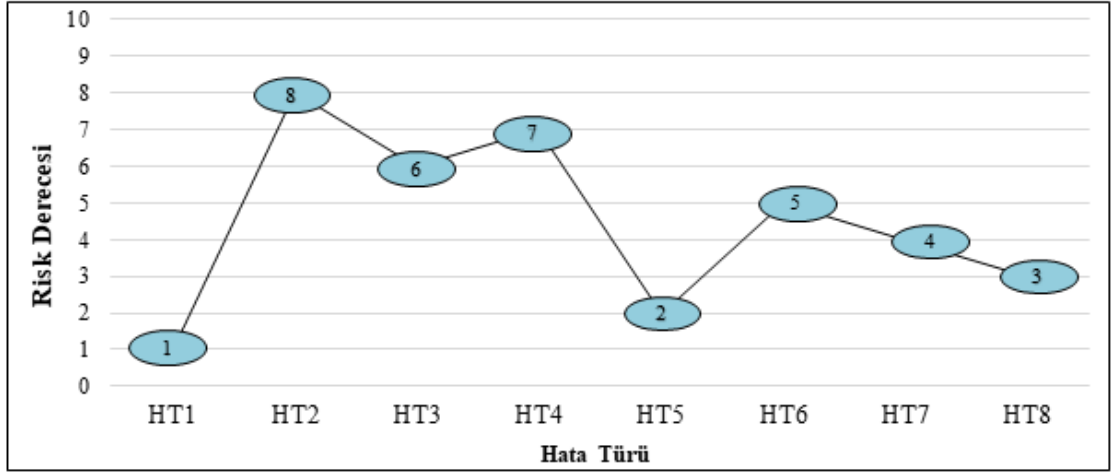
HT_x	Sachdeva vd. [217]		Kutlu ve Ekmekçioğlu [140]		Song vd. [220]		Klasik FMEA	
HT_1	h_{11}	1,3091	h_{12}	1,2512	h_{13}	1,2422	h_{14}	1,3359
HT_2	h_{21}	3,5586	h_{22}	3,4012	h_{23}	3,3766	h_{24}	3,6315
HT_3	h_{31}	3,0503	h_{32}	2,5930	h_{33}	2,3177	h_{34}	2,8701
HT_4	h_{41}	2,4084	h_{42}	2,6747	h_{43}	2,9542	h_{44}	2,8701
HT_5	h_{51}	1,6752	h_{52}	1,8580	h_{53}	1,8814	h_{54}	2,2683
HT_6	h_{61}	1,7545	h_{62}	1,9768	h_{63}	2,2125	h_{64}	2,5515
HT_7	h_{71}	2,0433	h_{72}	1,9314	h_{73}	1,8566	h_{74}	2,6536
HT_8	h_{81}	2,0086	h_{82}	2,0550	h_{83}	1,7942	h_{84}	1,9014

4.5.2 Vaka Çalışması 2

TPOP uygulaması için dikkate alınan ikinci vakada, Lo vd. [246] çalışmasında takım tezgahları için tanımladığı güvenlik riskleri kullanılmıştır (bakınız: Tablo 4.8). Lo vd. [246] çalışmasında bir takım tezgâhındaki güvenlik risklerini tanımlamıştır ve riskleri derecelendirmek için FMEA yönteminin Rough Best-Worst (R-BWM) ve Rough TOPSIS (R-TOPSIS) yöntemleri ile genişletilmesini önermiştir. Tanımladığı 20 hata türü için

Tablo 4.7 Birinci vakada her bir hata türü için her bir risk analiz yöntemine göre risk dereceleri ve TPOP ile elde edilen risk dereceleri.

HT_x	Sachdeva vd. [217]	Kutlu ve Ekmekçioğlu [140]	Song vd. [220]	Klasik FMEA	TPOP	
	Derece	Derece	Derece	Derece	PSI_x	Derece
HT_1	1	1	1	1	5,1385	1
HT_2	8	8	8	7	13,9679	8
HT_3	7	6	6	6	10,8311	6
HT_4	6	7	7	6	10,9073	7
HT_5	2	2	3	3	7,6829	2
HT_6	3	4	5	4	8,4953	5
HT_7	5	3	2	5	8,4849	4
HT_8	4	5	4	2	7,7591	3



Şekil 4.3 Nükleer yeniden ısıtma valf sistemindeki hata türleri için duyarlı sıralama düzeni (birinci vaka).

R-BWM+R-TOPSIS, BWM-TOPSIS ve klasik FMEA ile elde edilen nihai risk değerleri Tablo 4.9’da verilmiştir.

Adım 1: Her bir hata türü HT_x için her bir risk analiz yaklaşımı ile belirlenen nihai risk skorları RS_{xy} kullanılarak sırasıyla S^2 karar matrisi eşitlik 4.1 kullanılarak oluşturulur.

Adım 2: Farklı risk analiz yaklaşımları ile elde edilen risk skorları -0,0149 ile 175,5310 arasında değişmektedir. Hata türleri için her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorlarını birlikte değerlendirebilmek için bu değerler eşitlik 4.2 kullanılarak normalize edilir (bakınız: Tablo 4.10).

Tablo 4.8 Takım tezgahı için tanımlanan hata türleri [246].

HT_x	Hata Türü
HT_1	İndeksleme doğruluğun tolerans standardını aşması
HT_2	Tekrarlanabilir doğruluğun tolerans standardını aşması
HT_3	İleri/geri dönme boşluğunun tolerans standardını aşması
HT_4	Motor gürültüsü
HT_5	Takım tezgahı çerçevesi altında titreşim
HT_6	Takım tezgahı masa üstünün paslı veya kusurlu olması
HT_7	Boya kaybindan makine görünümünün etkilenmesi
HT_8	Etiketin kaybolması
HT_9	Yakınlık anahtarında anormallikler oluşması
HT_{10}	Ana noktaya veya konuma geri dönülememesi
HT_{11}	Kelepçe çalışma basıncında anormallikler oluşması
HT_{12}	Programın yürütme uyarısı vermesi
HT_{13}	Takım tezgahı çerçevesi altından yağ sızması
HT_{14}	Masa üstünden yağ sızması
HT_{15}	Motor kabininden yağ sızması
HT_{16}	Zayıf su yalıtımı
HT_{17}	Masa üstüne yatay olan toplam yüksekliğin tolerans standardını aşması
HT_{18}	Masa üstüne dikey olan merkez yüksekliğinin tolerans standardını aşması
HT_{19}	Masa tablasına paralel alt çerçevenin tolerans standardını aşması
HT_{20}	Masa üstünün dönme dalgalanması tolerans standardını aşması

Tablo 4.9 Hata türlerinin 3 farklı yaklaşım ile elde edilen nihai risk değerleri [246].

HT_x	BWM+TOPSIS		R-BWM+R-TOPSIS		Klasik FMEA	
	CC_h^*	Derece	CC_h^*	Derece	RPN*	Derece
HT_1	0,0076	4	0,0079	6	66,122	11
HT_2	0,0078	3	0,0072	7	54,857	13
HT_3	0,0082	2	0,0081	5	68,571	9
HT_4	0,0072	5	0,0115	2	112,886	4
HT_5	0,0108	1	0,0140	1	169,714	2
HT_6	-0,0008	10	0,0019	9	143,878	3
HT_7	-0,0099	18	-0,0073	17	75,102	7
HT_8	-0,0013	13	-0,0036	12	68,327	10
HT_9	-0,0107	19	-0,0133	19	37,172	17
HT_{10}	0,0027	7	0,0027	8	104,163	6
HT_{11}	-0,0019	15	-0,0026	10	69,388	8
HT_{12}	-0,0033	16	-0,0060	16	38,857	16
HT_{13}	0,0065	6	0,0085	4	175,531	1
HT_{14}	-0,0079	17	-0,0080	18	61,959	12
HT_{15}	-0,0121	20	-0,0149	20	26,857	20
HT_{16}	0,0013	8	0,0112	3	109,286	5
HT_{17}	-0,0017	14	-0,0054	15	45,350	14
HT_{18}	-0,0004	9	-0,0035	11	35,213	18
HT_{19}	-0,0009	11	-0,0044	14	31,300	19
HT_{20}	-0,0011	12	-0,0042	13	39,837	15

$$S^2 = \begin{matrix} HT_1 \\ HT_2 \\ HT_3 \\ HT_4 \\ HT_5 \\ HT_6 \\ HT_7 \\ HT_8 \\ HT_9 \\ HT_{10} \\ HT_{11} \\ HT_{12} \\ HT_{13} \\ HT_{14} \\ HT_{15} \\ HT_{16} \\ HT_{17} \\ HT_{18} \\ HT_{19} \\ HT_{20} \end{matrix} \begin{bmatrix} 0,0076 & 0,0079 & 66,122 \\ 0,0078 & 0,0072 & 54,857 \\ 0,0082 & 0,0081 & 68,571 \\ 0,0072 & 0,0115 & 112,886 \\ 0,0108 & 0,0140 & 169,714 \\ -0,0008 & 0,0019 & 143,878 \\ -0,0099 & -0,0073 & 75,102 \\ -0,0013 & -0,0036 & 68,327 \\ -0,0107 & -0,0133 & 37,172 \\ 0,0027 & 0,0027 & 104,163 \\ -0,0019 & -0,0026 & 69,388 \\ -0,0033 & -0,0060 & 38,857 \\ 0,0006 & 0,0085 & 175,531 \\ -0,0079 & -0,008 & 61,959 \\ -0,0121 & -0,0149 & 26,857 \\ 0,0013 & 0,0112 & 109,286 \\ -0,0017 & -0,0054 & 45,350 \\ -0,0004 & -0,0035 & 35,213 \\ -0,0009 & 0,0044 & 31,300 \\ -0,0011 & -0,0042 & 139,837 \end{bmatrix}$$

Adım 3-7: Riskleri önceliklendirmede kullanılan yaklaşımlar için sırasıyla e_j değeri eşitlik 4.3, s_y değeri eşitlik 4.4, $s_y/$ değeri eşitlik 4.5, $S_y/$ değeri eşitlik 4.6 ve w_j değeri eşitlik 4.7 yardımı ile elde edilir (bakınız: Tablo 4.11).

Adım 8: Her bir risk analiz yöntemi ile her bir hata türü için hesaplanan nihai risk, eşitlik 4.8 kullanılarak normalize edilir (bakınız: Tablo 4.12).

Adım 9: Her bir hata türü için her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorlarının h_{ij} değerleri eşitlik 4.9 kullanılarak hesaplanır (bakınız: Tablo 4.13).

Adım 10-11: Sırasıyla her bir hata türü için PSI_x , duyarlı seçim indeksi eşitlik 4.10 kullanılarak hesaplanır ve PSI_x değerleri artan şekilde sıralanarak hata türlerine derece tayin edilir. Tablo 4.14'de diğer risk analiz ve değerlendirme yaklaşımları ve TPOP yöntemi ile elde edilen sıralama sonuçları verilmiştir. Şekil 4.4'de ise tanımlanan 20 hata türü için duyarlı risk öncelik sıra düzeni verilmiştir.

Tablo 4.10 Normalize edilmiş risk skoru değerleri (ikinci vaka).

HT _x	BWM+TOPSIS	R-BWM+R-TOPSIS	Klasik FMEA
HT ₁	τ_{11} 0,0730	τ_{12} 0,0540	τ_{13} 0,0431
HT ₂	τ_{21} 0,0749	τ_{22} 0,0492	τ_{23} 0,0358
HT ₃	τ_{31} 0,0788	τ_{32} 0,0554	τ_{33} 0,0447
HT ₄	τ_{41} 0,0692	τ_{42} 0,0787	τ_{43} 0,0736
HT ₅	τ_{51} 0,1037	τ_{52} 0,0958	τ_{53} 0,1106
HT ₆	τ_{61} 0,0077	τ_{62} 0,0130	τ_{63} 0,0938
HT ₇	τ_{71} 0,0951	τ_{72} 0,0499	τ_{73} 0,0489
HT ₈	τ_{81} 0,0125	τ_{82} 0,0246	τ_{83} 0,0445
HT ₉	τ_{91} 0,0259	τ_{92} 0,0185	τ_{93} 0,0679
HT ₁₀	τ_{101} 0,1028	τ_{102} 0,0910	τ_{103} 0,0242
HT ₁₁	τ_{111} 0,0183	τ_{112} 0,0178	τ_{113} 0,0452
HT ₁₂	τ_{121} 0,0317	τ_{122} 0,0410	τ_{123} 0,0253
HT ₁₃	τ_{131} 0,0624	τ_{132} 0,0581	τ_{133} 0,1144
HT ₁₄	τ_{141} 0,0759	τ_{142} 0,0547	τ_{143} 0,0404
HT ₁₅	τ_{151} 0,1162	τ_{152} 0,1019	τ_{153} 0,0175
HT ₁₆	τ_{161} 0,0125	τ_{162} 0,0766	τ_{163} 0,0712
HT ₁₇	τ_{171} 0,0163	τ_{172} 0,0369	τ_{173} 0,0296
HT ₁₈	τ_{181} 0,0038	τ_{182} 0,0239	τ_{183} 0,0229
HT ₁₉	τ_{191} 0,0086	τ_{192} 0,0301	τ_{193} 0,0204
HT ₂₀	τ_{201} 0,0106	τ_{202} 0,0287	τ_{203} 0,0260

Tablo 4.11 Her bir risk analiz yaklaşımı için e_y , s_y , s_y' , S_y' ve w_y değerleri (birinci vaka).

Risk Analiz Yaklaşımı	e_y	s_y	s_y'	S_y'	w_y
BWM+TOPSIS	0,8958	0,5169	1,7189		0,3656
R-BWM+R-TOPSIS	0,9531	0,2327	1,4824	4,7018	0,3153
Klasik FMEA	0,9495	0,2504	1,5004		0,3191

4.6 Tartışma ve Değerlendirme

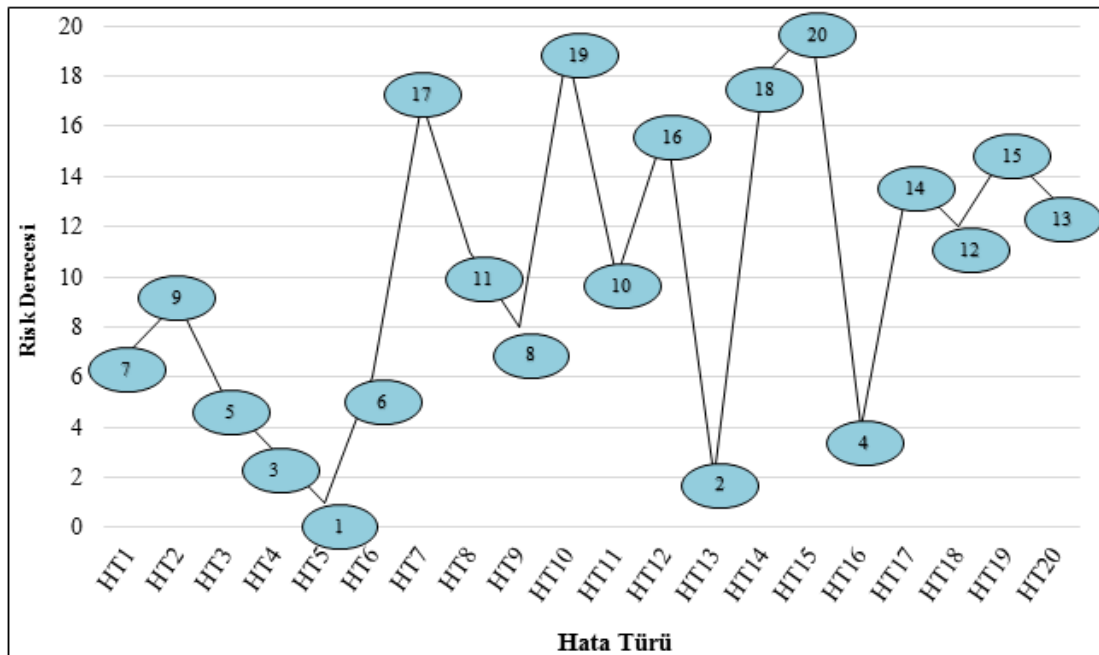
Bu bölümde, nükleer yeniden ısıtma valf sistemi ve takım tezgahların olmak üzere iki vaka için güvenlik tehditlerinin analiz edildiği sistemler dikkate alınmıştır. Çalışmada dikkate alınan her iki vakada, hata türleri için farklı risk analiz ve değerlendirme yaklaşımları ile hesaplanan nihai risk skorları kullanılmıştır. TPOP yaklaşımı farklı yöntemleri birleştirirken, her bir yöntem ile elde edilen nihai risk skorlarına dayanarak hesapladığı, yöntemlerin önem ağırlığını da dikkate almaktadır. Farklı yöntemler ile elde edilen nihai risk skorları TPOP yaklaşımı Adım 1-11 ile yeniden analiz edilmiştir ve her bir vakaya ait hata türleri için yeni bir risk sıralama düzeni belirlenmiştir.

Nükleer yeniden ısıtma valf sistemi için tanımlanan 8 hata türü için farklı yazalar tarafından önerilen dört risk analiz ve değerlendirme yaklaşımı ile farklı 4 farklı risk sıralama düzeni elde edilmektedir. Söz konusu durum, hangi risk öncelik sıralama

düzenine göre iş güvenliği profesyonellerinin önlem alması gerektiği konusunda kafa karışıklığına ve hangi sıralama düzeninin doğru olduğu ile ilgili belirsizliğe neden olmaktadır. Çalışmada, söz konusu problemin çözümü için önerilen TPOP yaklaşımı

Tablo 4.12 Her bir hata türü için her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorunun g_{xy} değerler (ikinci vaka).

HT _x	BWM+TOPSIS	R-BWM+R-TOPSIS	Klasik FMEA
HT ₁	g_{11} 0,1397	g_{12} 0,2111	g_{13} 0,7359
HT ₂	g_{21} 0,1310	g_{22} 0,2353	g_{23} 0,8117
HT ₃	g_{31} 0,1135	g_{32} 0,2042	g_{33} 0,7194
HT ₄	g_{41} 0,1572	g_{42} 0,0865	g_{43} 0,4214
HT ₅	g_{51} 0,0000	g_{52} 0,0000	g_{53} 0,0391
HT ₆	g_{61} 0,5066	g_{62} 0,4187	g_{63} 0,2129
HT ₇	g_{71} 0,9039	g_{72} 0,7370	g_{73} 0,6755
HT ₈	g_{81} 0,5284	g_{82} 0,6090	g_{83} 0,7211
HT ₉	g_{91} 0,3537	g_{92} 0,3910	g_{93} 0,4800
HT ₁₀	g_{101} 0,9389	g_{102} 0,9446	g_{103} 0,9306
HT ₁₁	g_{111} 0,5546	g_{112} 0,5744	g_{113} 0,7139
HT ₁₂	g_{121} 0,6157	g_{122} 0,6920	g_{123} 0,9193
HT ₁₃	g_{131} 0,1878	g_{132} 0,1903	g_{133} 0,0000
HT ₁₄	g_{141} 0,8166	g_{142} 0,7612	g_{143} 0,7639
HT ₁₅	g_{151} 1,0000	g_{152} 1,0000	g_{153} 1,0000
HT ₁₆	g_{161} 0,4148	g_{162} 0,0969	g_{163} 0,4456
HT ₁₇	g_{171} 0,5459	g_{172} 0,6713	g_{173} 0,8756
HT ₁₈	g_{181} 0,4891	g_{182} 0,6055	g_{183} 0,9438
HT ₁₉	g_{191} 0,5109	g_{192} 0,6367	g_{193} 0,9701
HT ₂₀	g_{201} 0,5197	g_{202} 0,6298	g_{203} 0,9127



Şekil 4.4 Takım tezgahı hata türleri için duyarlı sıralama düzeni (ikinci vaka).

Tablo 4.13 İkinci vakada her bir hata türü için her bir risk analiz yöntemi ile elde edilen nihai risk skorunun h_{xy} değerleri.

HT_x	BWM+TOPSIS		R-BWM+R-TOPSIS		Klasik FMEA	
HT_1	h_{11}	1,6575	h_{12}	1,6928	h_{13}	2,8720
HT_2	h_{21}	1,6431	h_{22}	1,7343	h_{23}	3,0981
HT_3	h_{31}	1,6147	h_{32}	1,6811	h_{33}	2,8251
HT_4	h_{41}	1,6867	h_{42}	1,4945	h_{43}	2,0969
HT_5	h_{51}	1,4414	h_{52}	1,3706	h_{53}	1,4308
HT_6	h_{61}	2,3920	h_{62}	2,0833	h_{63}	1,7024
HT_7	h_{71}	3,5592	h_{72}	2,8643	h_{73}	2,7037
HT_8	h_{81}	2,4448	h_{82}	2,5201	h_{83}	2,8297
HT_9	h_{91}	2,0530	h_{92}	2,0265	h_{93}	2,2236
HT_{10}	h_{101}	3,6857	h_{102}	3,5251	h_{103}	3,4894
HT_{11}	h_{111}	2,5097	h_{112}	2,4343	h_{113}	2,8096
HT_{12}	h_{121}	2,6680	h_{122}	2,7383	h_{123}	3,4501
HT_{13}	h_{131}	1,7391	h_{132}	1,6580	h_{133}	1,3759
HT_{14}	h_{141}	3,2615	h_{142}	2,9345	h_{143}	2,9536
HT_{15}	h_{151}	3,9181	h_{152}	3,7258	h_{153}	3,7401
HT_{16}	h_{161}	2,1824	h_{162}	1,5101	h_{163}	2,1483
HT_{17}	h_{171}	2,4879	h_{172}	2,682	h_{173}	3,3027
HT_{18}	h_{181}	2,3506	h_{182}	2,5113	h_{183}	3,5357
HT_{19}	h_{191}	2,4025	h_{192}	2,5908	h_{193}	3,6300
HT_{20}	h_{201}	2,4236	h_{202}	2,5729	h_{203}	3,4274

ile nükleer yeniden ısıtma valf sistemi için tanımlanan 8 hata türü için dört farklı risk analiz ve değerlendirme yaklaşımının avantajlarının bütünleştirilmesi ile tek bir duyarlı risk öncelik sıralama düzeni elde edilmiştir (bakınız: Şekil 4.3). Elde edilen sonuçlara göre 8 hata türünden HT_6 ve HT_7 için daha önceki risk öncelik sıra derecelerinden farklı risk sıra derecesi elde edilmiştir (bakınız: Tablo 4.7).

Risk öncelik sırası, yönetsel uygulamaların tasarlanmasında önemlidir [247–249]. Bu bölümde tanıtılan çalışmanın sonuçları, güvenlik mühendislerini ve iş güvenliği profesyonellerini öncelikle hangi riskleri almaları gerektiğine odaklamak ve bu risklerin etkilerini azaltmak için gereken yönetsel uygulamaları geliştirmek konusunda rehberlik etmektedir.

Çalışmada ele alınan ikinci vakada ise takım tezgahı için tanımlanmış 20 güvenlik riski için üç farklı risk analiz ve değerlendirme yaklaşımı ile elde edilen nihai risk skorları TPOP yaklaşımı Adım 1-11 ile yeniden analiz edilmiştir ve hata türleri için tek bir risk sıra düzeni elde edilmiştir (bakınız: Şekil 4.4). Takım tezgahı için tanımlanmış 20 hata türü için, TPOP yaklaşımı ile elde edilen risk öncelik sıra düzeninde, HT_1 , HT_2 , HT_4 , HT_6 , HT_8 , HT_{13} , HT_{16} , HT_{18} ve HT_{19} için yeni risk dereceleri elde edilmiştir (bakınız: Tablo 4.14).

Sonuçlar değerlendirildiğinde, elde edilen sıralamalar arasındaki tutarsızlıkların ortadan kaldırıldığı, risk analiz ve değerlendirme yöntemlerinden elde edilen sıralamaların ve avantajların bütünleştirilerek tek bir sıralama haline getirilmesini sağlayan TPOP yaklaşımının, gerçek hayat problemlerini çözebileceği görülmüştür.

4.7 Sonuçlar

Bu bölümde, daha önce literatürde dikkate alınmamış olan aynı hata türleri için farklı risk analiz ve değerlendirme yaklaşımları ile farklı risk derece sıralamaları kaynaklı yaşanan kafa karışıklığı problemi ele alınmıştır. Söz konusu problem nedeniyle, iş güvenliği profesyonelleri hangi risk öncelik sıralama düzeni ile önleyici eylem planlarını organize etmeleri gerektiğine karar verme aşamasında kafa karışıklığı yaşamakta, kaynak ve zaman israfına neden olmaktadır. Bu çalışmada söz konusu problemin üstesinden gelmek için, duyarlı öncelik sıralama tekniğinin (Technique of Precise Order Preference: TPOP) kullanımı önerilmiştir. Önerilen yaklaşımın iş sağlığı ve güvenliği, risk analiz ve değerlendirme süreci ile ilgili gerçek hayat problemlerinin çözümünde kullanılabilirliğini göstermek için üretim sistemlerinde karşılaşılan iki

Tablo 4.14 Her bir hata türünün, her bir risk analiz yöntemine göre risk dereceleri ve TPOP ile elde edilen risk dereceleri (ikinci vaka).

HT _x	BWM+TOPSIS	R-BWM+R-TOPSIS	Klasik FMEA	TPOP	
	Derece	Derece	Derece	PSI _i	Derece
HT ₁	4	6	11	6,2223	7
HT ₂	3	7	13	6,4755	9
HT ₃	2	5	9	6,1209	5
HT ₄	5	2	4	5,2782	3
HT ₅	1	1	2	4,2428	1
HT ₆	10	9	3	6,1777	6
HT ₇	18	17	7	9,1271	17
HT ₈	13	12	10	7,7946	11
HT ₉	7	8	6	6,3031	8
HT ₁₀	19	19	17	10,7003	19
HT ₁₁	15	10	8	7,7537	10
HT ₁₂	16	16	16	8,8563	16
HT ₁₃	6	4	1	4,7730	2
HT ₁₄	17	18	12	9,1496	18
HT ₁₅	20	20	20	11,384	20
HT ₁₆	8	3	5	5,8409	4
HT ₁₇	14	15	14	8,4726	14
HT ₁₈	9	11	18	8,3977	12
HT ₁₉	11	14	19	8,6233	15
HT ₂₀	12	13	15	8,4239	13

vaka dikkate alınmıştır. Çalışmamızda, Song vd. [244] çalışmasında nükleer yeniden ısıtma valf sistemi için tanımladığı 8 hata türü için farklı yazarlar tarafından önerilen dört farklı risk analiz ve değerlendirme yaklaşımı ile hesaplanan nihai risk skorları birinci vaka kapsamında kullanılmıştır. Lo vd. [246]'nın takım tezgahı güvenliği için tanımladığı, üç farklı risk analiz ve değerlendirme yaklaşımı ile 20 hata türü için belirlediği nihai risk skorları ise ikinci vaka kapsamında dikkate alınmıştır. Yazarlar, her iki vakada da farklı risk analiz ve değerlendirme yaklaşımları ile farklı risk öncelik sıra düzeni elde etmiştir (bakınız: Tablo 4.2 ve Tablo 4.9). Söz konusu sonuçlar birbiri ile örtüşmemekte ve tutarsızlık içermektedir. Çalışmamızda, her iki vaka için de TPOP yaklaşımı ile tek bir risk öncelik sıralama düzeni elde edilirken, birinci vakada 8 hata türü için 8 farklı risk öncelik derecesi, ikinci vakada 20 hata türü için 20 farklı risk öncelik derecesi elde edilmiştir (bakınız: Şekil 4.3 ve Şekil 4.4).

Bu çalışmanın sonucunda ortaya çıkan ana gelişme, farklı yöntemler ile elde edilen farklı risk derece sıralaması nedeniyle yaşanan kafa karışıklığını önleyerek farklı yöntemlerin avantajlarının tek bir sıralama elde edecek bir biçimde toplanmasının önerilmesidir. İş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için en uygun risk öncelik sıralamasının dikkate alınması ile hızlı, etkili ve verimli bir şekilde önleyici eylemlerin planlanabileceği söylenebilir. Bunun yanında, daha öncelikli olan hata türlerinin dikkate alınması ile riskinin azaltılabileceği değerlendirilmektedir.

İstatistiksel Kontrol Grafikleri ile İş Sağlığı ve Güvenliği Alanındaki Güvenlik Teknolojilerinin Değişiminin İzlenmesi

5.1 Özet

Günümüzde, teknolojinin gelişme ve değişme hızı takip edilemez boyutlara ulaşmıştır. Üretim ve hizmet sistemlerinde teknolojik araçların kullanılması ile hata oranlarının azalması, verimin artması, güvenli iş yerlerinin oluşması, müşteri tatmininin garanti edilmesi, kalitenin artması beklenen etkilerden bazılarıdır. Üretim ve hizmet sistemlerinde çalışanın sağlık ve güvenliğini temin etmeye yönelik geliştirilen teknolojilerin, izlenmesi ve tahmin edilmesi de bu alanda geliştirilmeye ihtiyaç duyulan teknolojiler için bir ilham kaynağı olacaktır. Teknoloji geliştirme ve teknolojiye yatırım yapma aşamalarının bel kemiğini teknoloji tahmini oluşturmaktadır. Teknolojinin hızlı bir şekilde geliştiği ve büyüdüğü dinamik bir çevrede, tek bir tahmin modelinin kullanılabilirliğini denetlenme ihtiyacı önemli bir araştırma konusu ve pratik bir ihtiyaç olarak karşımıza çıkmaktadır. Ulaşılan literatür kapsamında da bu konuda yürütülen çalışma sayısı oldukça sınırlı düzeydedir. Güvenlik teknolojileri ile ilgili gelişmeler ve bu alanda alınan patentler dikkat çekici bir düzeye ulaşmıştır. Bu çalışmada, güvenlik teknolojileri ile ilgili patentler kullanılarak istatistiksel kalite kontrol grafikleri ile teknolojilerin gelişiminin izlenmesi amaçlanmıştır. Sırasıyla, patent verileri kullanılarak zaman serisi tahmin modelleme yapılmış, model artık değerlerine dayanarak I-MR kontrol grafikleri oluşturulmuştur. Elde edilen I-MR grafikleri ile önemli sapmalar izlenmiştir. Patent sayıları için de S-eğrisi oluşturulmuştur. Patent verileri için model parametrelerinin güncellenmesi gereken yılların sırasıyla 1989 ve 2013 yılları olduğu, 1947 - 1988 ve 1988 - 2011 yılları için Single exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters) modelinin, 2011 - 2018 yılları için ise Quadratic time series modelinin en uygun tahmin modeli olduğu belirlenmiştir. Bununla birlikte, güvenlik teknolojileri için S-eğrisi oluşturulmuştur ve yatırımcılar için büyüme potansiyeli olan cazip bir teknoloji alanı

olduğu belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre uzun zaman içerisinde tek bir teknoloji tahmin modeli kullanmak yanıltıcıdır. İş sağlığı ve güvenliği teknolojileri geliştirmekte olan bir teknoloji alanı olup, yatırımcılar için cazip bir alan, politika yapımcılar ve güvenlik mühendisleri için kaynak ayırma konusunda teşvik edici özellikte görünmektedir.

5.2 Giriş

Küreselleşme ile birlikte dünyanın bir ucunda yaşanan teknolojik gelişmeler, dünyanın diğer ucunu etkiler hale gelmiştir. Söz konusu gelişmeler iş çevrelerinde rekabetçi çevresel koşulları artırmış ve işletmelerin teknoloji çağına ayak uydurmalarını kaçınılmaz kılmıştır [250–253]. Küreselleşmenin bir sonucu olarak gittikçe şiddetlenen rekabetçi çevresel koşullar bir taraftan işletmeleri ürün çeşitliliğinde, miktarında, kalitesinde artışa teşvik ederken diğer taraftan çalışan sağlık ve güvenliğini dikkate almadan işçileri aşırı iş yükü gibi yeni tehlikelere maruz kalmasına neden olmaktadır [254–256].

Endüstride teknoloji kullanım düzeyinin artması, kalite artışı ve hata oranlarının azalması açısından oldukça önemlidir [257]. Ancak, söz konusu teknolojilerin iş sağlığı ve güvenliği üzerindeki etkileri önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir. Teknolojik gelişmeler toplumların gelişmesi açısından önemli olmakla birlikte, çalışan güvenliği için birçok tehlikeler barındırdığı da bilinmektedir [58, 59]. Bununla birlikte, Fernández ve Pérez [258]’de endüstride dijitalleşmenin artmasına karşın çalışanların ve işverenlerin tecrübesizliğine dikkat çekmiştir ve iş sağlığı ve güvenliğinin göz ardı edildiğini eleştirmiştir. Song ve Suh [66] endüstride dijitalleşmeye karşın iş sağlığı ve güvenliğinin ihmal edildiği, güvenlik teknolojilerinin yetersiz kaldığını belirtmiştir. Çağımızın gereği olarak hızlı bir şekilde değişim ve gelişim gösteren çalışma koşullarında, kaza ve riskleri azaltmak için mevzuat güncellemelerinin yetersiz kaldığı, ilgili standart ve yasal prosedürlerin günümüz ve gelecek teknolojilere uygun hale getirilmesi gerektiği su götürmez bir gerçektir [250]. Bununla birlikte, işletmelerin iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için teknolojik araçlardan fayda sağlamaları kaçınılmaz hale gelmiştir [259].

Teknolojik gelişmelerin en önemli göstergelerinden birisi patentlerdir [68–70]. Patentler, şirketler için potansiyel olarak rekabet üstünlüğü sağlayabilecekleri ticari ve finansal varlıklar olup, iş stratejilerini tanımlamak ve kuruluşların stratejik karar vermelerini desteklemek için oldukça önemlidir [260, 261]. Bunun yanında patentler, yasal ve teknik değeri olan eşsiz belgeler olarak kabul edilmektedir [262]. Patent dokümanları, atıf, patent yaşı, uluslararası patent sınıflama kodu (IPC),

ipucu, patentin alındığı ülke gibi bilgiler içermektedir [263]. Patent verilerinin analiz edilmesi ile geçmişteki teknoloji trendleri hakkında ve teknoloji yaşam döngüleri ile gelecekte faaliyetlerine devam edip etmeyecekleri hakkında kullanışlı bilgiler sağlanmaktadır [264]. Patent verilerinin analiz edilmesi ile işletmelerin stratejik avantaj sağlayabilecekleri önemli bir rekabetçi zeka kaynağı olduğu kabul edilmektedir [252]. Bununla birlikte, Jun [265] patentlerin, geliştirilen teknolojilerin bir sonucu olduğunu, etkin patent yönetimi için patent analizinin son derece önemli olduğuna dikkat çekmiştir.

Teknoloji kullanma düzeyi giderek artan ve gittikçe karmaşık sistemler haline gelen endüstriler için iş sağlığı ve güvenliği problemlerinin yaşanması kaçınılmaz görünmektedir. Bu nedenle, iş sağlığı ve güvenliği alanındaki güvenlik teknolojilerinin izlenmesi ile mevcut güvenlik teknolojilerinin iş sağlığı ve güvenliği alanında kullanılmaları, ihtiyaç duyulan teknolojilerin geliştirilmesi için araştırma geliştirme kaynaklarının planlanması açısından hayati düzeyde önemli hale gelmiştir.

Literatürde iş sağlığı ve güvenliği alanında teknolojik araçların kullanımı ve geliştirilmesi ile ilgili çalışmalar yürütülmüştür [266–271]. Ancak, iş sağlığı ve güvenliği alanındaki patentlerin analiz edildiği çok az sayıda araştırmaya ulaşılmıştır [65, 67].

Bu çalışmada, daha önce Durmusoglu [71] tarafından önerilen teknoloji tahmin modeli izleme yaklaşımı ile İSG alanındaki teknoloji göstergeleri olan patentler için uygulanmıştır. Ayrıca patent bilgileri dikkate alınarak S-eğrisi oluşturulmuştur. Daha önce İSG alanındaki teknolojilere odaklanan çalışma sayısının sınırlı sayıda olup, uygulanan yöntem ilk kez İSG alanındaki güvenlik teknolojiler için kullanılmış olması nedeniyle çalışma özgün niteliktedir. Yürütülen çalışma ile sırasıyla,

- İş sağlığı ve güvenliği alanındaki güvenlik teknolojileri izlenmektedir. Yıkıcı teknolojilerin etkisinin giderek arttığı günümüzde, güvenlik teknolojilerinin zaman içerisindeki önemli değişimlerin izlenmesi ve bu değişimler için itici güç olan faktörlerin araştırılması için bir fırsat sunulmaktadır.
- Teknoloji tahmin modelinin güncellenmesi gereken zaman belirlenmektedir. Bu sayede gelecek için güvenilir tahminler üretilecek, kaynak planlama sürecinde karar vericilerin hata yapma riski azaltılmış olacaktır.
- İSG alanındaki güvenlik teknolojilerinin büyüme potansiyeli S-eğrisi ile ortaya konulmaktadır. Bu bilgi sayesinde üretici, yönetici ve politika yapıcılara yatırım kaynaklarını planlama sürecinde destek olacak bilgiler sağlanmaktadır.

- Daha önce İSG alanındaki güvenlik teknolojilerini dikkate alan ve patent analizi yürüten çalışmalardan farklı olarak zaman serisi ile tahmin modelinin oluşturulmuştur ve modelin zaman içerisindeki geçerliliğinin izlenmesinde istatistiksel kontrol grafiklerinin kullanılmıştır.

Bu çalışmanın takip eden bölümleri şu şekilde organize edilmiştir. İş sağlığı ve güvenliği teknolojileri, patent analizi, zaman seri ile teknoloji tahmin modelleme ve istatistiksel kontrol grafiklerinin kullanımı hakkında genel bilgiler ve ilgili literatür ikinci bölümde verilmiştir. Çalışmada kullanılan metodoloji üçüncü bölümde sunulmuştur. Yürütülen uygulama ise dördüncü kısımda verilmiştir. Sonuçlar, tartışma ve değerlendirme ise beşinci bölümde verilmiştir.

5.3 Literatür İncelemesi

5.3.1 İş Sağlığı ve Güvenliği için Teknolojilerin Kullanımı ve Geliştirilmesi

İş sağlığı ve güvenliği alanında yeni teknolojilerin geliştirilebilmesi için geliştirilmiş teknolojiler yol gösterici özelliktedir. Teknoloji göstergesi olan patentlerin analiz edilmesi ile teknolojinin gelişme seviyesi belirlenebilmekte, araştırma yapılabilecek teknoloji alanları keşfedilebilmektedir. Literatürde iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için teknolojik çözümlerin hayata geçirilmesi ve üretim sistemlerinde uygulanmasına ilişkin daha önce yürütülmüş bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

İş sağlığı ve güvenliği alanındaki güvenlik teknolojilerinin uygulanması ve etkilerinin araştırılmasına ilişkin çalışmalar arasında, Antwi-Afari [60] 1996-2017 yıllarında inşaat sektöründe İSG izleme ve yönetimi için algılama ve uyarı tabanlı teknolojilerin kullanımına ilişkin 87 makaleyi incelemiştir. Söz konusu teknolojilerin kullanımları ile ilgili mevcut eğilimleri, geliştirilebilecek potansiyel teknolojileri belirlemeye çalışmıştır. McAleenan vd. [272] ise giyilebilir teknolojiler sayesinde çalışanların fiziksel ve psikolojik stres durumları hakkında bilgi toplanabileceğini ve bu bilgileri, çalışanların verimliliğini artırmak için yöntem geliştirme sürecinde kullanılabileceğini ifade etmiştir. Bununla birlikte çalışmada, giyilebilir teknolojilerin kullanımlarında etik ve ahlaki değerlerin dikkate alınma durumlarını ve kurum üzerine etkilerini değerlendirmiştir. Holte vd. [61]'da 'da tarım sektöründe yaşanan yaralanmalara dikkat çekerek, sosyoteknik sistem teorisi perspektifinde otomatik süt sağım sisteminin iş organizasyonunda iş sağlığı ve güvenliğini nasıl tanımladıklarını belirlemeye çalışmıştır. Otomatik süt sağım sistemlerinde fiziksel iş taleplerinin azalmasına karşın bilişsel iş taleplerinin arttığını, çiftçilerin gelişen teknolojilere işverenlere göre daha az duyarlı olduklarını belirlemiştir. Sepúlveda [273] teknoloji kaynaklı güvenlik risklerinin iş ve çevre güvenlik yönetim sistemleri için de bir risk olabileceğini

ifade ederek, bilgi teknolojilerinin güvenliğini artırmak için kullanılan teknolojilerin iş ve çevre güvenliği yönetim sistemine de entegre edilmesi gerektiğine dikkat çekmiştir. Gao vd. [62] inşaat sektöründe iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinin etkinliğini incelemek için bilgisayar destekli teknolojiler kullanılarak verilen eğitimler ile geleneksel yöntemler ile verilen eğitimleri karşılaştırmıştır. Elde ettiği sonuçlara göre, bilgisayar destekli teknolojilerin İSG eğitimi için daha faydalı olduğunu belirlemiştir. Bir başka çalışmada, Badri vd. [250] endüstri 4.0 ile birlikte endüstrilerde yaygınlaşan ve iş sağlığı ve güvenliği alanında da kullanılan teknolojileri büyük veri, nesnelerin interneti, siber fiziksel sistemler, cobotics, yapay zeka ve simülasyon olmak üzere 6 kategoride ifade ederek bunların avantaj ve dezavantajlarını sıralamıştır. Grabowski vd. [274] kritik sistemlerin güvenliği artırmak için giyilebilir artırılmış gerçeklik (WIAR) teknolojilerinin kullanımını incelemiştir. Yavuz [269] iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için uygulanan faaliyetlerin etkinliğini, çalışanların rutin ve rutin olmayan işleri yürütmeleri esnasında yangın vakasındaki tepkilerini göz hareketlerini izleme teknolojisini kullanarak analiz etmiştir. Yavuz [269] çalışmasında önlemlerin etkinliğini değerlendirmek için çalışanların alarm butonu, yangın hortumu, yangın söndürme tüpüne odaklanma sürelerini ölçmüştür. Awolusi vd. [64] inşaat sektöründe çalışanların güvenliğini izlemek için kullanılan giyilebilir teknolojik araçları incelemiştir ve diğer sektörlerde kullanılmakta olan giyilebilir teknolojilerin inşaat sektöründe de güvenlik performansını izlemek için kullanılabileceğine dikkat çekmiştir. Choi vd. [275] inşaat sektöründe iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için kullanıcıların giyilebilir teknolojiler hakkında bilinçli olmaları gerektiğine dikkat çekmiştir ve inşaat sektörü çalışanlarının GPS teknoloji ile akıllı yelek, fizyolojik sensörlü akıllı bileklik kullanımlarında algılanan fayda, sosyal etki, gizlilik riskinin çalışanların giyilebilir teknolojileri benimsemeleri üzerinde etkili faktörler olduğunu belirlemiştir. Darabont vd. [276] 'da yaptıkları çalışmada ise yeni teknolojilerin endüstride yaygınlaşması, bilimsel araştırmalardaki gelişmeler nedeniyle sosyal-kamu alanındaki algıların farklılaşması ile iş sağlığı ve güvenliği açısından yeni risklerin ortaya çıktığına dikkat çekmiştir. Farklı bir çalışmada ise Burtan vd. [277] iş kazalarını en aza indirmek ve etkilerini azaltmak için insan yaşamının her alanında eğitimin gerekliliğine ve önemine vurgu yapmıştır. Weidman vd. [278] iş güvenliğini geliştirme sürecinde ekipman, araç, gereç ve yöntemlerin güvenli tasarlanması gerekliliğine dikkat çekmiş ve inşaat sektöründe kullanılan, yenilikçi bakış açısı ile tasarlanmış ekipmanların kullanıcı deneyimlerini anket yöntemi ile belirlemek üzere bir araştırma yürütülmüştür. Çalışanların yeniliği benimseme durumlarının olumlu ve anlamlı düzeyde olduğunu ortaya koymuştur. Mattsson vd. [279] çalışanların sezgi, muhakeme ve fiziksel yük altında iken gerçek zamanlı fizyolojik verilerinin ölçülmesi ve takip edilmesi ile iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek için nesnelerin interneti ve büyük veri teknolojilerinin

kullanılabilirliğini incelemiştir. Kaivo-Oja vd. [280] ise yeni teknolojilerin verimlilik, sağlık ve güvenliği artırıcı bilgiler elde etme fırsatı sunduğuna dikkat çekmiş ve nesnelerin interneti, büyük veri ile işletmelerde var olan bilgi teknolojileri, yönetim ve organizasyon süreçlerine olası yansımalarını değerlendirmiştir. Koivisto vd. [281] çalışmasında, gelecek teknolojilerin analizinde kullanılan yaklaşımların risk değerlendirme metotlarına benzerliğine dikkat çekerek, teknoloji analizi ile risk analiz metotlarının entegre edilebilme potansiyelini incelemiştir. Diğer bir çalışmada ise Myers [59] yeni teknolojilerin faydaları olduğu gibi tehlikeler de barındırdığına dikkat çekmiş ve güvenli tasarımlar ile kaza ve yaralanmaların önlenebileceğini belirtmiştir. Yeni teknolojilerin güvenli tasarımı sürecinde, iş sağlığı ve güvenliği açısından faydaları ve tehlikeleri tanımlanması (1), yeni teknoloji kaynaklı fiziksel, kimyasal ve biyolojik ajanlara maruziyet değerlendirilmesi (2), doz-yanıt analizi yapılması (3), risk-fayda karakterizasyonu yürütülmesi (4) ve yeni teknoloji hakkında bilinenler ışığında fayda-risk tahminlerinin ortaya konulması gerektiğini ifade etmiştir. Blank vd. [282] maden sektörün yaşanan iş kazaları ile teknolojik gelişmeler arasındaki ilişkiyi incelemiştir ve kaza frekanslarındaki değişimleri açıklamak için teknolojik değişimlerin tek başına yeterli olmayacağını ifade etmiştir. Matsuda vd. [283] Vietnam'da iş sağlığı ve güvenliği alanında yaşanan teknoloji transferini değerlendirmiştir ve yeni teknolojilerin kullanılması ile gürültü, toz, ısı gibi tehlikelere maruziyetin azaldığını, teknolojik araçların iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmede etkili olduğunu bildirmiştir. Yukarıdaki çalışmalara ek olarak, güvenlik teknolojilerinin geliştirilmesine ilişkin girişimlerde bulunan araştırmalar da yürütülmüştür. Tang vd. [63] inşaat sektöründe çalışanların güvenliğini ve güvenlik kültürlerini artırmak için GPS ve bulut bilişim sistem tabanlı teknolojileri kullanarak kişiselleştirilmiş güvenlik talimatları yönetim sistemini geliştirmiştir. Wu ve Li [266] iş güvenliğini geliştirmek için teknolojik araçları ve ekipmanlar ile bilgi toplanması ve analiz edilmesine dayanan bir yaklaşım önermiştir. Niu vd. [267] inşaat sektöründe iş güvenliği geliştirmek için 3. dalga uygulamalar olarak tanımladığı yapay zeka ile tasarlanan akıllı inşaat nesneleri (smart constructuin object: SCO) destekli iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemi geliştirmiştir. Isaev ve Astasheva [284] iş sağlığı ve güvenliği eğitimlerinde bilgi teknolojilerinin kullanımının önemine dikkat çekmiş ve elektronik iş sağlığı ve güvenliği el kitabı için temel gereklilikleri belirleyerek örnek bir el kitabı sunmuştur. Zhou vd. [285] çalışmasında kömür madenciliğinde iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemi, risklerin tanımlanması ve değerlendirilmesi, risklerin dinamik olarak izlenmesi ve erken uyarı sistemleri kapsamında kullanılan teknolojileri inceleyerek, mevcut kömür madeni iş sağlığı ve güvenliği yönetimi ve risklerin kontrolü için bir yazılım geliştirmeyi önermiştir. Dündar [259] kişisel koruyucu donanımlara, radyo frekanslı tanımlama teknolojisinin entegre edilmesini önermiştir. Bu sayede, çalışanların sahaya eksiksiz kişisel koruyucu donanımlarile

çıkmalarının sağlanabileceği ve kolay bir şekilde takip edilebileceğini belirtmiştir. Tatić ve Tešić [65] ise endüstrilerde eğitimsizlik ve tecrübe eksikliği nedeniyle iş kazalarının ve yaralanmaların yaşandığının altını çizerek artırılmış gerçeklik teknolojileri ile kaza ve yaralanmaları önleyecek bir sistem sunmuştur. Sistemin çalışma esası, çalışanlara iş güvenliği ve iş talimatlarının iletilmesi, talimatları gerçekleştirdiklerini onaylamaları ve bu sayede yeni iş talimatları alarak işlerini yürütmeye devam edebilmelerine dayanmaktadır. Talimatları yerine getiren çalışanların iş kazaları ve yaralanmalara uğramalarının önüne geçileceği savunmuştur. Podgorski vd. [286] çalışmalarında, çevresel zeka, nesnelerin interneti, siber-fiziksel sistemlerin iş sağlığı ve güvenliğinde, çözüm araçları olarak kullanımlarının giderek arttığını bununla birlikte iş sağlığı ve güvenliği açısından dinamik bir çevre oluştuğuna dikkat çekerek, yeni dinamik iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemi önermiştir. Özen [271]'da yaptığı çalışmada, internet erişiminin olmadığı alanlarda, iş güvenliği uzmanlarının ve iş yeri hekimlerinin, uygunsuzlukları bir otomasyon sistemine aktararak bildirim için mobil yazılım geliştirmiştir. Eryüksel [270] iş sağlığı ve güvenliğinde bilgi-belge yönetiminin önemine dikkat çekerek, karekod tabanlı doküman yönetimi, karekod ve NFC teknolojilerini kullanarak etiket ve yaka kartı uygulaması ile çalışanların almış olduğu eğitim ve iş talimatları gibi birçok bilginin takip edilmesini sağlamıştır. Fernández ve Pérez [258] çalışmasında ileri imalat sistemlerinde Avrupa Birliği-OSHA'nın tanımladığı yeni riskleri analiz etmeyi ve nitel olarak modellemeyi önermiştir. Grabowski ve Jankowski [287] maden sektöründe iş güvenliğini iyileştirmek için sanal gerçeklik teknolojisinin eğitim uygulamalarında kullanılmasını önermiştir ve uygulama sonucunda olumlu sonuçlar elde etmiştir. Gisbert vd. [288] ise güvenli ve sağlıklı fabrika projesi kapsamında, işçi sağlık ve güvenliğini tehdit eden riskleri ortadan kaldırmak için kablosuz iletişim teknolojilerin ve mobil sensörlerin kullanımına dayanan bir izleme aracı tasarlamıştır. Ruff ve Holden [289] madenlerin kör noktalarında bulunan araçlara operatörlerin, araçların ve diğer ekipmanların çarpmasını engellemek için GPS teknolojisi ve yakınlık uyarı sisteminin kullanılmasını önermiştir.

Literatürde iş sağlığı ve güvenliği teknolojilerinin gelişiminin izlenmesi ve yeni teknolojilerin tahmin edilmesinden ziyade daha çok ihtiyaca yönelik teknoloji temelli çözüm araçlarının üretildiği, etkinliklerinin denendiği çalışmaların yürütüldüğü dikkat çekmektedir. Çalışmamızda dikkate alınan İSG alanındaki teknolojiler ile ilgili patentlerin analiz edilmesiyle literatüre katkı sunulacağı düşünülmektedir. Bununla birlikte, kalite kontrol grafiklerinin patent verilerine uygulayan son derece kısıtlı bir literatür bulunmaktadır. Bu nedenle, çalışmanın özgün değeri hem kullanılan yaklaşım hem de uygulamanın yürütüldüğü alan açısından bütünsel olarak oluşturduğu değerlendirilmektedir.

5.3.2 Patent Analizi

Patentler, teknolojik gelişmelerin bir göstergesi olarak kabul edilmektedir [290]. Chen vd. [291]'de patentlerin teknoloji zekâsı için oldukça değerli bir bilgi kaynağı olduğunu ifade etmiştir. Patent analiz sonuçlarının evrenselliği için, patent verilerinin toplanacağı kapsamlı bir veri tabanına ulaşabiliyor olmak önemlidir. Teknoloji yönetimi ve tahmini kapsamında, ulaşılan patentlerin analizinde birçok yöntem kullanılmaktadır. Her bir yöntem ile patent verilerine ilişkin çeşitli zengin bilgiler elde edilebilmektedir. Daha önce yazarlar tarafından patent analiz sürecinde kullanılan yöntemler Tablo 5.1'de özetlenmiştir.

Tablo 5.1 Patent analiz yöntemleri.

Yöntem	Referanslar
Zaman serisi analizi ile trend belirleme ve tahmin modeli oluşturma.	[292–295]
Lineer regresyon, çoklu regresyon analizleri ile analitik modelleme.	[296–298]
Büyüme modelleme (büyüme eğrisi ailesinden; S-curve, Gompertz “mortality”, Fisher-Pry “substitution”, Bass.	[263, 299–301] [302–305] [306–309]
Simülasyon analizi (kantitatif çapraz etki analizi, kantitatif çapraz etki analizi, monte carlo simülasyonu.	[310–312]
Karar ağacı.	[313, 314]
Bayes tahmin metodu.	[315–318]
Bilgi değeri analizi “value of information”.	[319, 320]
Gerçek seçenek analizi “real option analysis”.	[321–324]
Metin madenciliği.	[325–328], [329]
İlişkilendirme kuralları.	[265, 330–332]

Literatürde patent analizlerinin yürütüldüğü çalışmalar, kullanılan yaklaşımlar bakımında üç sınıfa ayrılmıştır. Bunlar sırasıyla; teknoloji tahmin modeli geliştiren ve teknolojilerin olgunlaşma seviyelerini belirlemek için klasik istatistiksel yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar (1), veri madenciliği yöntemleri ile patent analizini yürüten çalışmalar (2) ve klasik istatistiksel yaklaşımlar ile veri madenciliği yöntemlerini birlikte kullanan çalışmalardır (3). Her bir sınıfta yer alan araştırmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir.

Klasik istatistiksel yöntemler ile teknoloji tahmin modeli geliştiren ve teknolojilerin olgunlaşma seviyelerini belirleyen çalışmaları arasında, patentlerin analiz edildiği, patent analiz yöntemlerinin geliştirildiği çalışmalara ilişkin bir inceleme sunulmaktadır. Lokuhitige ve Brown [304] çalışmasında, nesnelerin interneti (IoT) teknolojisinin olgunlaşma seviyesini tahmin etmek için Fisher-Pry ve Gompertz olmak üzere iki tahmin modelini kullanmıştır. IoT teknolojisi ile ilgili bilimsel yayınları ve bir

patent analizi yazılım olan AcclaimIP aracılığı ile elde ettiği patentleri çalışmasında kullanmıştır. IoT teknolojisinin en yaygın olduğu Amerika, Çin, Güney Kore, Hindistan ve Avrupa Birliği olmak üzere 5 ülkede, teknolojinin olgunluk seviyelerinin ülkeler arasındaki farklılıklara dikkat çekerek yorumlamıştır. Sheikh ve Sheikh [305] ise tıbbi teşhis bakım ve nesnelerin interneti uygulamalarında kullanılan biyosensör teknolojileri ile ilgili SCI 'de indekslenen makaleler ile AcclaimIP aracılığı ile USPTO (United States Patent and Trademark Office)'dan elde ettiği patent bilgilerini kullanarak teknoloji tahmini ve teknoloji olgunlaşma seviyesini belirlemek amacıyla Fisher-Pry ve S-eğrisi analizleri yapmıştır. Madvar vd. [307] petrol ve gaz endüstrisinde kullanılan yukarı akış enjeksiyon teknolojilerindeki teknoloji yaşam döngüsünü analiz etmek için S eğrisini kullanmış ve büyüme seviyesini belirlemeye çalışmıştır. Altuntas vd. [263] patent verilerini kullanarak teknoloji başarısını tahmin etmek için teknoloji yaşam döngüsü, yayılma hızı, patent gücü ve genişleme potansiyeli olmak üzere dört kriteri dikkate alan bir yöntem önermiştir. Farklı bir çalışmada ise Haegeman vd. [333] geleceğe yönelik teknoloji analizinde kullanılan verilerin, nitel ve nicel analiz yöntemlerinin entegre edilerek yapılan analizlerin nadir olduğuna vurgu yaparak artması gerektiğini belirtmiştir. Collan ve Heikkilä [324] çalışmasında tahmin kesinliğinde zorlanan ve genellikle belirsizliğin fazla olduğu teknolojilere ilişkin patentlerin analiz edilmesi için geleneksel üç patent değerlendirme yöntemi olan ödeme yöntemi, değer senaryoları ve gerçek seçenekleri düşünme yöntemlerine dayanan pay-off yönteminin kullanılmasını önermiştir. Daim vd. [309] 1976 - 2003 yılları için yakıt hücresi, gıda güvenliği ve optik depolama teknolojileri için topladığı patentleri senaryo analizi, büyüme eğrisi, analoji gibi teknoloji tahmin yöntemlerini patent analizine entegre etmiş ve sistem dinamikleri, teknoloji yayılım modelleri ve teknolojilerin dinamik ekosistemini tahmin etmişlerdir. Önerdiği yöntemlerin, teknoloji tahmini için uygun araçlar olduğunu ifade etmiştir.

Veri madenciliği yaklaşımları ile patent analizi yapan çalışmalardan, Altuntas vd. [330] patent verilerini üç farklı ağırlıklandırılmış ilişkilendirme kuralları algoritmasını kullanarak analiz etmeyi önermiştir. Çalışmasında elde edilen sonuçlar ile üretici, yönetici ve girişimciler için eski teknolojilere yatırım yapılmasının engellediğini, hangi teknolojilerin birbirleri ile ilişkili olduğunu ifade etmiştir. Abbas vd. [327] ise patent analizinde kullanılan teknikleri, metin madenciliği ve görselleştirme teknikleri olarak iki kategoride sınıflandırmış, analizde kullanılan teknikleri taksonomik olarak açıklamış, tekniklerin özelliklerini belirten literatür incelemesi sunmuştur. Shih vd. [252] çalışmasında uzman bilgisi olmadan patent trendlerindeki değişiklikleri tanımlamak için patent trend değişikliği madenciliği (Patent Trend Change Mining: PTCM) tekniğini önermiştir. Önerdiği tekniğin uygulanabilirliğini göstermek için USPTO veri tabanından 2001 - 2004 yılları için temin ettiği Tayvan'ın yarı iletken

malzeme endüstrisi ile ilgili patentleri dikkate almıştır. Elde edilen bulguları, rekabetçi zeka olarak isimlendirilmiştir ve yöneticilerin uygun iş stratejileri geliştirmelerine yardımcı olacağını ifade etmiştir.

İstatistiksel yöntemler ile veri madenciliği yaklaşımlarını birlikte kullanıldığı çalışmalardan bazıları burada özetlenmiştir. Jun ve Park [334] teknoloji ve inovasyon öncüsü Apple'ın inovasyonu üzerine yapılan araştırmaların daha çok uzman görüşlerine dayanan nitel araştırmalar olduğuna dikkat çekmiştir. Çalışmasında, Apple'ın tüm patentlerini 2012 yılında USPTO veri tabanından temin etmiştir ve ilk aşamada, zaman serisi regresyonu ve çoklu lineer regresyon analizleri yaparak istatistiksel bir model oluşturmuş, ikinci aşamada ise kümeleme analizi ile geliştirilmeye açık teknoloji alanlarını belirlemeye çalışmıştır. Jun vd. [335] biyoteknoloji alanında teknoloji tahmini yapmak için ilgili patent verilerini dikkate alarak zaman serisi analizi, ilişkilendirme kural madenciliği ve K-means algoritması ile kümeleme analizi yürütmüştür. Jun vd. [336] ise matris haritalama ve destek vektör kümelemeye dayanan K-medoids kümeleme uygulayarak, ülke bazında geliştirilmeye açık teknoloji alanlarını belirleyerek teknoloji tahmini yapmıştır. Bir başka çalışmada ise Jun ve Lee [337] gelecekte ortaya çıkacak teknolojileri tahmin etmek için hedef teknolojinin uluslararası patent sınıflama kodlarını kullanarak istatistiksel çıkarım ve sinir ağlarına dayanan bir yaklaşım önermiştir. Önerdiği modelin uygulanabilirliğini göstermek için Kore Fikri Mülkiyet Hakları Bilgi Servisi'nden (KIPRIS) edindiği nanoteknoloji ile ilgili 2,482 patent dokümanına uygulamıştır. Park ve Jun [338] yaptığı çalışmada patent verini analiz etmek için zaman serisi analizi, regresyon analizi ve kümeleme yöntemlerine dayanan bir teknoloji tahmini (technology forecasting: TF) yaklaşımı önermiştir. Önerdikleri yaklaşımı test etmek için biyoteknoloji alanındaki patentleri kullanmıştır. Jun [265] çalışmasında uluslararası patent sınıflaması (International Patent Classification: IPC) kodlarını kullanarak, patentler arasındaki örüntüleri belirlemek için ilişkilendirme kural analizi ve haritalandırma yapmıştır. Elde ettikleri sonuçlar ile veri tabanı teorisi ve uygulaması ile ilgili teknolojilerin objektif bir şekilde tahmin edilebildiğini göstermiştir. Tseng vd. [328] çalışmasında patent dokümanlarının çok sayıda metin madenciliği teknikleri ile analiz edilerek metni bölümlendirme, özetini oluşturma, özellik seçme, küme oluşturma, konu tanımlama ve bilgi haritalama yapılabilirliğini açıklamıştır.

Jeon ve Suh [67] güvenlik teknolojileri alanındaki 529 patent dokümanını WIPSON patent veri tabanından elde etmiştir. Söz konusu patent dokümanlarını kullanarak merkezilik analizi, ilişkilendirme kuralı analizi, brokerage ağ analizleri ile güvenlik teknolojilerindeki yakınsama ağlarını belirlemiş, önemli güvenlik alanlarını ortaya koymuştur.

Song ve Suh [66] endüstrilerde karmaşık hale gelen problemlere yeni çözümler üretebilmek, çeşitli endüstriyel sistemlerdeki riskleri önlemek amacıyla geliştirilen teknoloji trendlerini tanımlamak için güvenlik teknolojileri ile ilgili patentleri analiz etmiştir. Patent analizi için USPTO veri tabanından 2007 - 2015 yıllarında yayınlanmış 6.360 patent dokümanını kullanmıştır. Elde ettiği patentler “güçlü yakınsama ağı” ve “zayıf yakınsama ağları” ile ilgili baskın trendlerin teknoloji özelliklerini ortaya koymak için kümeleme analizi yapmıştır.

Teknolojinin en önemli göstergelerinden biri olan patent verilerinin iş sağlığı ve güvenliği alanında dikkate alındığı çalışma sayısı oldukça sınırlı düzeydedir.

5.3.3 Zaman Serisi ile Tahminleme ve Modelleme

Zaman serisi analizi ile başlıca operasyon yönetimi, pazarlama, finans ve risk yönetimi, ekonomi, endüstriyel süreç kontrol, demografi alanları ile ilgili zaman dayalı verilerin gelecekteki değerlerin tahmin edilmesi amaçlanır [339]. Bununla birlikte, zaman serisi analizi ile verilerin zaman içerisinde nasıl değiştiğini gözlemleme fırsatı elde edilmektedir [292, 340].

Birçok zaman serisi analiz yöntemi bulunmaktadır (bakınız: Montgomery vd. [339]). Tahmin modelini değerlendirmek ve veri için en uygun modele karar vermek için ME (Mean Error), MAE (Mean Absolute Error), MAD (Mean Absolute Deviation), MSE (Mean Squared Error), MAPE (Mean Absolute Percent Error), MPE (Mean Percent Error) ve RMSE (Root Mean Square Error) gibi hata ölçütleri kullanılmaktadır [339, 341]. Tahmin modelinin istatistiksel stabilitesi dış kaynaklı olaylar nedeniyle zaman içerisinde azalabilmektedir, performansı izlemek için model hataları (gerçek değer-tahmin değeri=artık veya hata) ile oluşturulan Shewhart kontrol grafikleri kullanışlı bir araç olarak kullanılmaktadır [339]. Tahmin modelinin performansını izlemek, modeli güncelleme gereksinimi ve ekonomi, üretim, yatırım gibi konular için ayrılan kaynakların planlanması açısından önemlidir.

Literatürde zaman serisi analizlerine ilişkin yürütülen çalışmalardan bazıları aşağıda özetlenmiştir. Ahuja [342] zaman serisi ile veri değişimini belirleme, sınıflandırma, tahmin, kümeleme gibi çeşitli kullanım alanlarına sahip olduğunu belirtmiş ve bu konuları dikkate alan literatür incelemesi yürütmüştür. Mudelsee [343]’da iklim değişikliği ile ilgili trendleri, değişiklik zamanını belirlemek ve tahmin modeli önermek üzere bir literatür incelemesi gerçekleştirmiştir. Maçaira vd. [344] ise açıklayıcı değişkenler kullanarak zaman serisi analizi ile korelasyonlu verileri modellemek için kullanılan tahmin yöntemleri üzerine bir literatür incelemesi gerçekleştirmiştir. Maçaira vd. [344] en fazla kullanılan yöntemlerin, regresyon modeli, yapay sinir

ağları ve destek vektör makineleri olduğunu belirlemiştir.

Literatürde, patent dokümanlarını kullanarak zaman serisi analizi uygulayan çalışmalar da yürütülmüştür, bunlardan bazıları özetlenmiştir (bakınız: Tablo 5.1). Durmusoglu [71] çalışmasında, TV ile ilgili patent zaman serisini, veri setinde trendin olduğu mevsimselliğin olmadığı durumda kullanılan Double exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters) ile modellemiş, model artık değerlerine dayanan I-MR grafiği ile teknoloji tahmin modelini güncelleme yaklaşımı önermiştir. Durmuşoğlu [345]'da ise temiz hava yasasının kimyasallar ile ilgili patentler üzerindeki etkisini ve değişimini belirlemek üzere kimya sektörü alanındaki patentleri ARIMA (0,1,1) ile modellemiş, modeldeki sapmaları belirlemek için model artık değerlerini kullanarak, Dixon'un r22 Oran testi gerçekleştirmiştir. Başka bir çalışmada, Smith ve Agrawal [292] patent gruplarını kullanarak Holt Winters Exponential Smoothing (HWES) ve ARIMA yöntemleri ile teknoloji tahmin modeli oluşturmuş ve HWES'nin daha iyi bir tahmin modeli olduğunu ifade etmiştir.

Dikta [293] çalışmasında patent başvurularını tahmin etmek için zaman seri analizi yürütmüştür. Farklı bir çalışmada ise Meade [294] Avrupa patent ofisine yapılan patent başvurularını tahmin etmek için ARIMA ve dinamik lineer modelleme yöntemlerinin tek değişkenli ve çok değişkenli türleri kullanarak tahmin etmeye çalışmıştır.

Paten verilerinin yapısına uygun çeşitli zaman serisi tahmin yöntemlerinin kullanıldığı anlaşılmıştır. Daha önce yürütülen çalışmaların, patent sayısını ve patent başvurularının tahmin etme üzerine odaklandığı görülmektedir.

5.3.4 İstatistiksel Kontrol Grafiklerinin Oluşturulması

İstatistiksel kontrol grafikleri ilk kez Walter A. Shewhart tarafından 1924'de Bell Telefon Laboratuvarında geliştirilmiştir [346]. İstatistiksel kontrol grafikleri ile üretim ve hizmet sistemlerinde süreçlerin izlenmesi, kontrol altında tutulması, kalitenin sürekli geliştirilmesi bakımından birçok farklı alanda kullanım görmüştür [347–352]. İstatistiksel süreç kontrolü (Statistical Process Control: SPC) bir çıktının kalitesini veya sürecin kapasitesini kontrol etmek, yönetmek ve iyileştirmek için süreci veya çıktıları analiz eden istatistiksel araç ve tekniklerin kullanılması olarak tanımlanmaktadır [353].

İstatistiksel kontrol grafikleri, ilgilenilen karakteristiğin ölçülebilir veya ölçülemez olmasına göre sırasıyla niceliksel ölçüler için kontrol grafikleri ve niteliksel ölçüler için düzenlenen kontrol grafikleri olmak üzere iki sınıfta incelenmektedir. Niceliksel

ölçüler için düzenlenmiş olan kontrol grafikleri, değişken için kontrol grafikleri olarak da bilinmektedir ve süreç karakteristiğinin değişkenliğini veya ortalamasını ölçen bir değişken olabilmektedir. Niteliksel ölçüler için düzenlenen kontrol grafiklerinde ise süreç karakteristiği ölçülemez, fakat sayılabilen bir değerdir [354]. Niceliksel ölçüler için kontrol grafikleri sırasıyla değişim aralığı kontrol grafiği, standart sapma kontrol grafiği, ortalama kontrol grafiği, değişim katsayısı kontrol grafiği, birimler kontrol grafiği, medyan kontrol grafiği, hareketli ortalamalar kontrol grafiği, regresyon kontrol grafiği türleri bulunmaktadır [354]. Niteliksel ölçüler için kontrol grafik türleri ise kusurlu oranı kontrol grafiği, kusurlu birim sayısı kontrol grafiği, kusur sayısı kontrol grafiği, birim için kusur sayısı kontrol grafiği olarak sıralanabilir [354]. Aynı zamanda, istatistiksel kontrol grafikleri, belirli bir ölçülebilir değişken için varyasyonu istatistiksel olarak değerlendiren görsel bir grafik sunmaktadır [71].

İstatistiksel kontrol grafiklerinin kullanım amaçları aşağıdaki gibidir [346].

- Verimliliği artırmak,
- Kusurları önlemek,
- Gereksiz süreç ayarlamalarını önlemek,
- Süreç hakkında teşhis bilgisi sağlamak,
- Süreç yeterliliği hakkında bilgi sahibi olmak olarak ifade edilebilir.

Yukarıdaki amaçlara ek olarak, teknoloji tahmin modellerinin güncellenmesi [71] gibi farklı amaçlarla da istatistiksel kalite kontrol grafikleri kullanılmaktadır. Literatürde, çeşitli alanlarda istatistiksel kontrol grafiklerinin kullanıldığı birçok çalışma yürütülmüştür. Bu çalışmalardan, Hadian ve Rahimifard [355] proje performans izlemeye yardımcı olan kazanılan değer yönetim indisinin (earned value management: EVM) sınır değerlerini belirlemek için istatistiksel kontrol grafiklerinden yararlanmıştır. Markiewicz vd. [356] ise ürün kalitesi birçok parametrenin bir bileşimi olarak ortaya çıktığını, kalite üzerinde etkili olan özelliklerin tolerans değerlerini belirlemek için istatistiksel kalite kontrol grafiklerinin kullanımını önermiştir. Ng [353] çalışmasında istatistiksel süreç kontrol tablolarının bilgi teknolojisi için proje yönetim aracı olarak kullanımını incelemiştir. Peralta vd. [357] mısır bitkisi çiminin alım, satım, depolanma alanında gerekli olan nem miktarını optimize etmek için kullanılacak nem sensörünün etkinliğini değerlendirilmesi aşamasında istatistiksel kontrol grafiklerinden yararlanmıştır. Herhangi bir süreçteki sapmaları belirlemek için kullanılan yaklaşımlardan birisi de zaman serisi analizi verilerin modellenmesi ve söz konusu model ile elde edilen bağımsız artık değerlerin

kullanımına dayanan özel neden çizelgesinin (special cause chart), aynı zamanda I-MR grafiği olarak da adlandırılan kontrol grafiklerinin kullanılmasıdır [358, 359]. Durmusoglu [71]'da yürüttüğü çalışmasında ilk kez, teknoloji tahmin modelinin güncellenmesinde I-MR istatistiksel kontrol grafiklerinin kullanımını önermiştir.

Bu çalışmada, pratik bir ihtiyacı karşılamak için başlıca iki bilgi ortaya konulmaktadır. Birincisi, dinamik çevresel koşullar altında iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanındaki teknolojilerdeki değişimlerinin izlenmesi ve tahmin modelinin güncellenme zamanının belirlenmesidir. İşletmeler, iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili yasal prosedürler doğrultusunda işyeri güvenliğini geliştirmek için yeni teknoloji kaynaklı risklerden korunmanın ve güvenlik teknolojilerinden faydalanmanın yollarını aramaktadır. Yeni teknolojileri kullanarak, riskleri, kaza ve yaralanmaları azaltmayı, verimliliği artırmayı beklemektedirler. Teknoloji değişimlerinin izlenmesi ile güvenlik mühendisleri ve iş güvenliği profesyonellerine, değişime neden olan faktörleri araştırmaları ve işletmeleri için faydalı olan güvenlik teknolojilerine odaklanmaları için bir fırsat sunulmaktadır. İkinci bilgi ise İSG alanındaki teknolojilere yatırım yapılmalı mı? sorusuna, patent sayılarına dayanan S-eğrisi ile cevap aranmıştır. Elde edilen bulgular, teknolojilerin gelişmeye açık bir teknoloji alanı olduğu saptanmıştır.

İstatistiksel kontrol grafiklerinin iyi performans göstermesi için verilerin otokorelasyonu olmamalıdır ve normal dağılım gösterdiğine emin olunmalıdır [360, 361]. Zaman serilerinin çoğunlukla otokorelasyona sahip olduğu bilinmektedir. Bu durumda artık değerler kullanılarak istatistiksel kontrol grafiklerinin oluşturulması önerilmektedir [346]. Wardell vd. [362] süreçteki sapmalarını tespit etmek için artık değerleri kullanmıştır. Bu çalışmada da, patent verilerine dayalı zaman serisi için belirlenen en uygun tahmin modeli yardımıyla artık değerler hesaplanmıştır. Daha sonra, artık değerlere dayanan I-MR grafikleri ile İSG alanındaki patentler için değişim izlenmiştir ve zaman içerisindeki önemli sapmalar belirlenmiştir.

5.4 Analiz Yöntemi

Bu çalışmada, iş sağlığı ve güvenliği alanındaki teknolojileri izlenmek ve tahmin modelinin güncellenmesi gereken zamanı belirlemek için Durmusoglu [71]'in önerdiği yaklaşım kullanılmıştır. Söz konusu yöntem, zaman serisi analizi ve istatistiksel kontrol grafiklerinin kullanımına dayanmaktadır. Zaman serisi analizi, I-MR grafiklerinin oluşturulması ve artık değerlerin normal dağılıma uygunluğunun testi için Minitab 19 yazılımı kullanılmıştır. Ayrıca Teknoloji büyüme potansiyelini belirlemek için S-eğrisi oluşturulmuştur.

5.4.1 Zaman Serisi Analizi

Zaman serisi tahmin modellerinin performansı zaman içerisinde dış kaynaklı olaylar nedeniyle düşebilmektedir. Performans değişimini izlemek için tahmin modeli hatası olan artık değerlere dayanan istatistiksel kontrol grafiklerinin oluşturulması önerilmektedir [339]. Öncelikle patent verileri için en uygun tahmin modeline karar verilmektedir. En uygun tahmin modeline karar vermek için ise eşitlik 5.1 ile hesaplanan MAPE değeri kullanılmıştır. MAPE değerinin yorumlanmasında ise Lewis [363] çalışmasından yararlanılmıştır. Lewis [363]'e göre, tahmin modelinin MAPE değeri %10'dan az ise "yüksek doğrulukta tahmin", $11 \leq MAPE \leq 20$ ise "iyi tahmin", $21 \leq MAPE \leq 50$ ise "makul tahmin" ve $51 \leq MAPE$ ise "doğru olmayan tahmin" olarak değerlendirilmektedir.

$$(\text{Mean Absolute Percent Forecast Error}) MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |re_t(1)| \quad (5.1)$$

5.4.2 I-MR Grafiğinin Oluşturulması

Süreçteki değişimlerin izlenmesi için kullanılan örneklem büyüklüğü $n=1$ olduğunda, verilerin üretilme hızı çok yavaş olduğunda, örnekleme yapmanın sakıncalı olması nedeniyle tüm birimler kullanıldığında, her bir verinin tekrar üretilmesinin söz konusu olmadığı durumlarda bireysel kontrol grafiğinin kullanılması önerilmektedir [200]. Patent verileri de bahsedilen özelliklerde olduğundan, patent sayılarındaki değişimin izlenmesi için bireyler kontrol grafiklerinden I-MR grafiği (Individual-Moving Range: I-MR) kullanılmıştır. I-MR grafiklerini oluşturmak için Minitab 19 yazılımından yararlanılmıştır.

I-MR grafiğini oluşturmak amacıyla, patent verileri için en uygun tahmin modeli belirlendikten sonra hesaplanan artık değerler kullanılmıştır. I grafiğini oluşturmak için eşitlik 5.2, MR grafiğini oluşturmak için ise eşitlik 5.3 kullanılmıştır (bakınız: Şekil 5.5). Burada, $MR_i = |x_i - x_{i-1}|$ ile artık değer ise re_t ile gösterilmiştir. Hareketli aralık için kullanılan gözlem sayısı 2 olduğunda, $d_2 = 1,128$, $D_4 = 3,267$, $D_3 = 0$ değerleri alınmaktadır [346].

Bu bölümde de, patent verilerine dayalı zaman serisi için tahmin modelinin güncellenmesi gereken zamanı belirlemek üzere tahmin modelinin performansı hassas bir şekilde izlenmiştir. Değişimleri hassas bir şekilde izlemek amacıyla I-MR grafiği için tanımlanmış sekiz adet Shewhart kontrol kuralları dikkate alınmıştır [346].

$$\begin{aligned}
& \text{(Upper Control Limit) } UCL = \bar{X} + \frac{3}{3} * \frac{\overline{MR}}{d_2} \\
& +2\sigma = \bar{X} + \frac{2}{3} * \frac{\overline{MR}}{d_2} \\
& +1\sigma = \bar{X} + \frac{1}{3} * \frac{\overline{MR}}{d_2} \\
& \text{(Center line) } CL = \bar{X} \\
& -1\sigma = \bar{X} - \frac{1}{3} * \frac{\overline{MR}}{d_2} \\
& -2\sigma = \bar{X} - \frac{2}{3} * \frac{\overline{MR}}{d_2}
\end{aligned} \tag{5.2}$$

$$\begin{aligned}
& \text{(Lower Control Limit) } LCL = \bar{X} - \frac{3}{3} * \frac{\overline{MR}}{d_2} \\
& UCL = D_4 * \frac{3}{3} * \frac{\overline{MR}}{d_2} \\
& +2\sigma = D_4 * \frac{2}{3} * \frac{\overline{MR}}{d_2} \\
& +1\sigma = D_4 * \frac{1}{3} * \frac{\overline{MR}}{d_2} \\
& -1\sigma = \overline{MR} - \frac{1}{3} * (UCL - \overline{MR}) \\
& -2\sigma = LCL = D_3 * \overline{MR}
\end{aligned} \tag{5.3}$$

Durmusoglu [71] çalışmasında yalnızca $+3\sigma$ ve -3σ yani alt kontrol limiti (Lower Control Limit: LCL) ve üst kontrol limiti (Upper control limit: UCL) için kontrol dışı kuralları kullanarak önemli sapmaları tanımlamıştır. Çalışmamızda ise alt ve üst kontrol limitlerine ilaveten $+1\sigma$ ile -1σ ve $+2\sigma$ ile -2σ için kurallar da dikkate alınarak tahmin modelindeki değişimleri daha hassas bir şekilde izleme fırsatı sağlanmıştır. Uygulama aşaması için Şekil 5.1’de ifade edilen süreç takip edilmiştir. Kontrol dışı durum ve uyarı tespiti için dikkate alınan kurallar [346]:

Kural 1: Merkez çizgiden (Center line: CL) $+3\sigma$ veya -3σ ’nın dışında 1 nokta olması.

Kural 2: Ardışık 9 noktanın merkez çizginin bir tarafında olması.

Kural 3: Ardışık 6 noktanın artan veya azalan durumda olması.

Kural 4: Ardışık 14 noktanın dönüşümlü olarak merkez çizginin yukarı veya aşağı yönünde olması.

Kural 5: Ardışık 3 noktadan 2’sinin merkez çizgiden $+2\sigma$ veya -2σ dışında kalmış olması.

Kural 6: Ardışık 5 noktadan 4’ünün merkez çizgiden $+1\sigma$ veya -1σ dışında kalmış

olması.

Kural 7: Ardışık 15 noktanın merkez çizgi ile $+1\sigma$ veya -1σ arasında olması.

Kural 8: Ardışık 9 noktanın merkez çizgiden $+1\sigma$ veya -1σ 'nın dışında olması.

5.4.3 S-eğrisi ile Büyüme Modelleme

S-eğrisi, büyüme eğrisi olarak da bilinmektedir ve teknoloji büyüme potansiyelini değerlendirmek için kullanılmaktadır [304]. S-eğrisi ile ve teknolojik yatırımların uygunluğuna da karar vermek için kullanılabilir. S-eğrisi başlangıç, büyüme ve doyumluk olmak üzere üç aşama içerir ve büyüme aşamasında yatırım yapılması önerilmektedir [263]. S-eğrileri gelişmekte olan teknolojileri gelişimini öngörme sürecinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [299, 364–366].

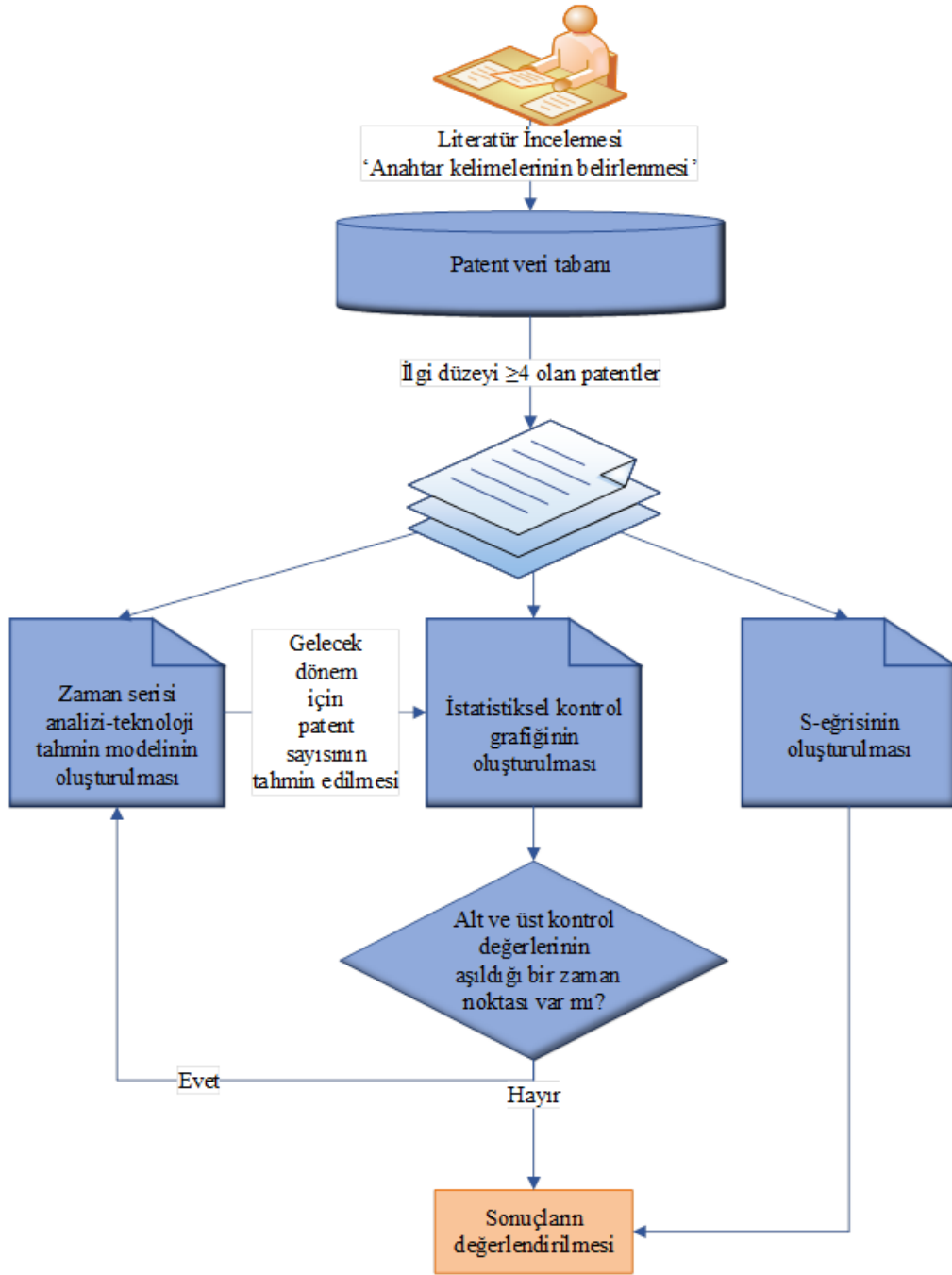
5.5 Verilerin Toplanması, Analizi ve Elde Edilen Bulgular

5.5.1 Patent Dokümanlarının Toplanması

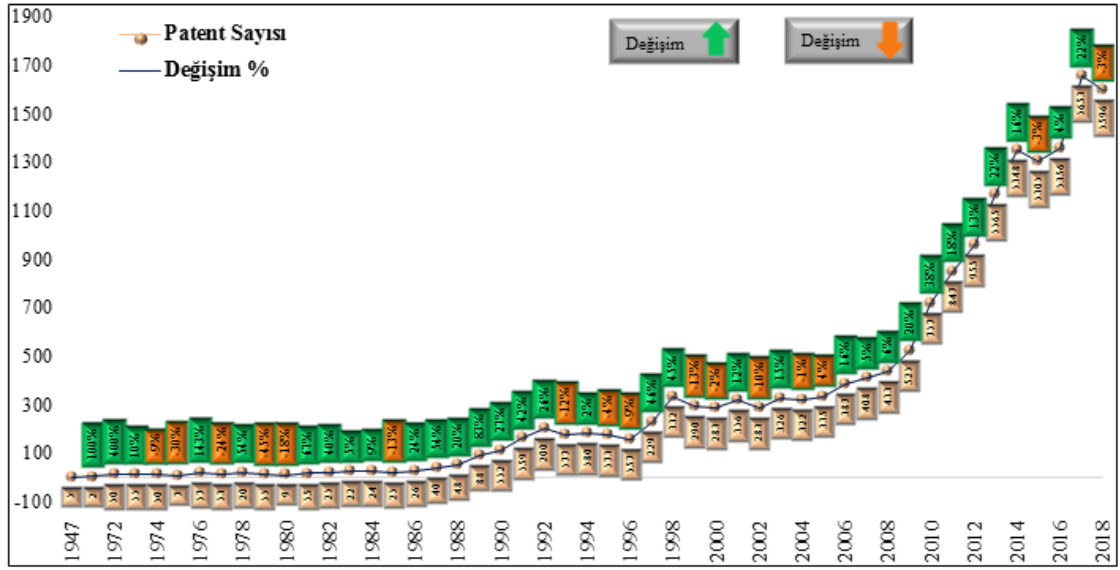
Bu çalışmada, iş sağlığı ve güvenliği ile ilgili patent dokümanlarını toplamak için literatür incelemesi yürütülmüştür ve Song ve Suh [66]'un güvenlik teknolojileri kapsamında belirlediği anahtar kelimeler kullanarak oluşturdukları (safety AND technology) AND (accident OR risk OR hazard OR danger) dizilim kullanılmıştır. AcclaimIP yazılımı yardımı ile USPTO veri tabanından 1940-2019 Mayıs ayının dahil olduğu 90,428 patent verisine ulaşılmıştır. 2019 yılında sadece 5 aylık patent verisi olduğu için 613 patent dokümanı analiz dışında bırakılmıştır. Patent dokümanları, arama yapılan ifade ile ilgili olma gücü bakımından AcclaimIP yazılımında 1 ve 100 arasında değişen skorlara sahiptir. Song ve Suh [66] güvenlik teknolojileri ile ilgili patentlerin analizini yürüttüğü çalışmada yılbaşına patent sayısının 500 ve daha fazla olduğu 2007-2015 yılları için toplam 6,360 patenti analiz ederken çalışmamızda, arama yapılan dizilime ilgi düzeyi 4 ve daha büyük olan 1947-2018 yıllarındaki 16,977 patent dokümanı dikkate alınmıştır. Şekil 5.2'de patent sayıları ve yıllara göre değişimleri verilmiştir. Zaman içerisinde iş sağlığı ve güvenliği alanındaki teknolojilerin çoğunlukla artış gösterdiği anlaşılmıştır.

5.5.2 İş sağlığı ve Güvenliği Alanındaki Güvenlik Teknolojilerindeki Değişimin İzlenmesi ve Elde Edilen Bulgular

İSG teknolojileri ile ilgili 1947 - 2018 yıllarındaki patent sayıları kullanılmıştır. Şekil 5.1'de verilen iş akışı dikkate alınarak iş sağlığı ve güvenliği alanındaki teknolojilerin değişimi izlenmiş, teknoloji tahmin modelinin güncellenmesi gereken zamanları belirlemek için aşağıda verilen Adım 1-10 yürütülmüştür.



Şekil 5.1 Yürütülen çalışmanın akış şeması.



Şekil 5.2 USPTO'dan elde edilen İSG alanındaki teknolojiler ile ilgili patent sayıları ve değişimleri.

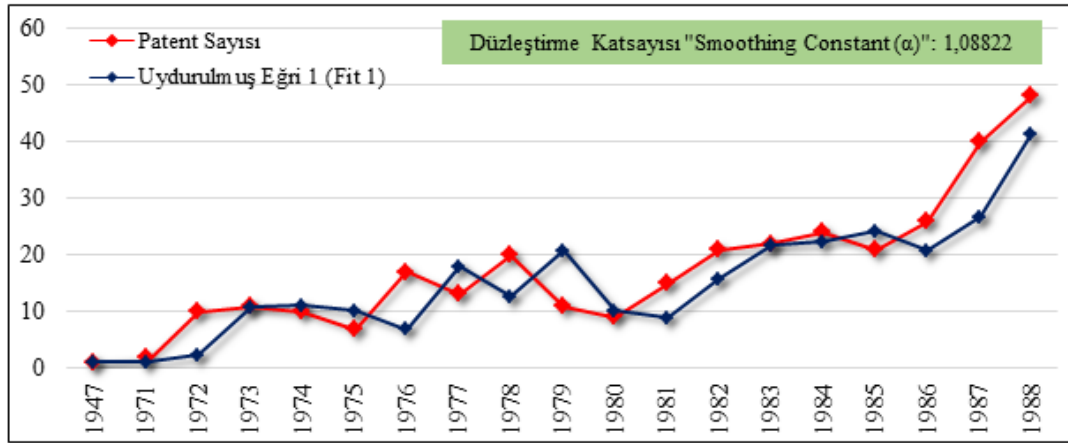
Adım 1: İlk olarak 1947 - 1988 yılları patent sayıları için zaman serisi analizi yapılarak çeşitli modeller denenmiştir. Patent zaman serisi için, MAPE değeri en düşük olan model ile eğri uydurulmuştur (fit edilmiştir) ve model artık değerleri hesaplanmıştır (bakınız: Tablo 5.2). Artık değerlerin normal dağılıma uygunluğunu test etmek için Anderson Darling testi kullanılmıştır. Model artık değerleri normal dağılım göstermektedir ($p=0,791>0,05$). Artık değerler ile I grafiğini oluşturmak için eşitlik 5.2, MR grafiğini oluşturmak için ise eşitlik 5.3 kullanılmıştır (bakınız: Şekil 5.4). I-MR grafiklerindeki Individual Value: ölçülen değerleri temel alan grafiği, Moving Range: iki ölçüm arasındaki sapmaları temel alan grafiği ifade etmektedir.

Tablo 5.2 1947 - 1988 yılları için en düşük MAPE değerini dikkate alan modelleme sonuçları.

Yöntemler	Sıra	MAPE
Linear Trend Analysis	2	31,40
Exponential growth	5	43,95
Quadratic time series	8	65,17
S-curve	6	44,46
Moving average (MA=2)	4	34,74
Moving average (MA=1)	3	32,62
Single exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters)	1	30,66
Double exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters)	7	60,73

Adım 2: Birinci adımda belirlenen Single Exponential Smoothing (with optimal ARIMA parameters) modeli kullanılarak 1989 yılında dahil edilmiş ve Şekil 5.5 oluşturulmuştur. I grafiği ve MR grafiğinde 1989 yılında kural 1 ihlal edilmiştir. 1989

yılında gerçek patent sayısı ile tahmin değeri arasındaki fark Şekil 5.6'da net bir şekilde görülmektedir. Burada, zaman serisi modeli güvenilir tahmin üretemeyecektir, bu nedenle güncellenmelidir.



Şekil 5.3 Başlangıçta uydurulmuş (fit edilmiş) eğri.

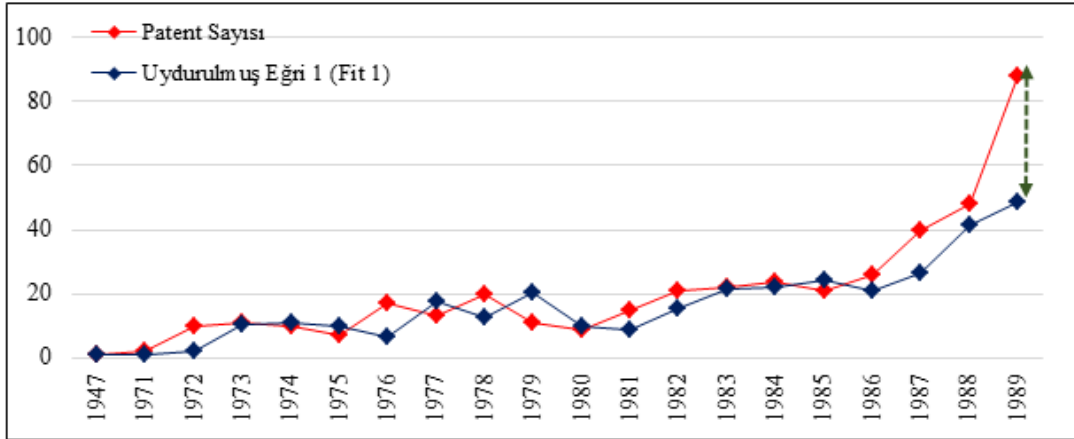


Şekil 5.4 1947 - 1988 yılları için I-MR grafiği.

Adım 3: 1988 yılı, hızlı bir artışın başlangıcı olduğu için zaman serisi modelleme girişiminde 1988 - 2011 yıllarındaki patent sayıları dikkate alınmıştır. 1988 - 2011 yıllarında Single exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters) en uygun model olarak seçilmiştir (bakınız: Tablo 5.3 ve Şekil 5.7). Model artık değerleri normal dağılım gösterdiği için ($p=0,746>0,05$) I-MR grafiği oluşturulmuştur (bakınız: Şekil 5.8). I-MR grafiğine göre kural ihlali söz konusu olmadığı için gelecek yıllardaki patent sayıları tahmin edilmiştir ve model performansı izlenmeye devam edilmiştir.



Şekil 5.5 1947 - 1989 yılları için I-MR grafiği.



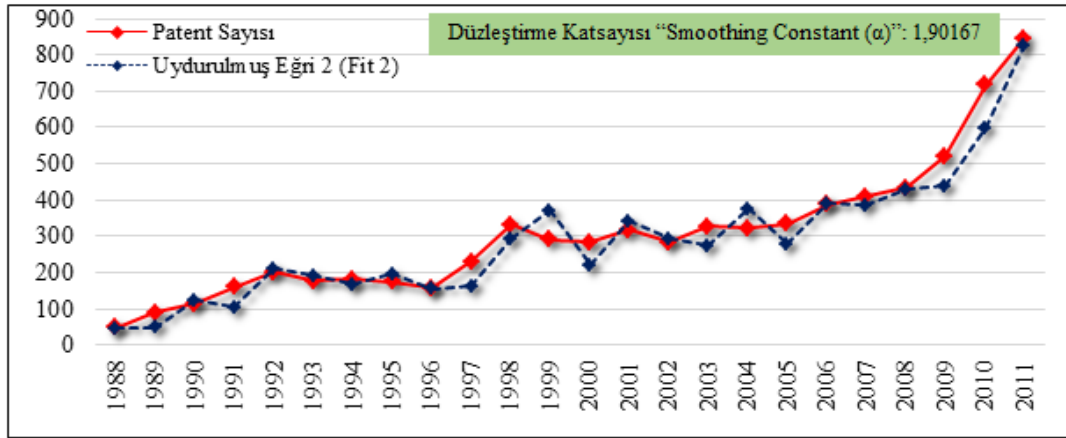
Şekil 5.6 1947 - 1988 yılları için uydurulmuş (fit edilmiş) eğride belirgin bir sapmanın tespit edilmesinden sonraki eğri durumu.

Adım 4: Single exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters) modeli ile 2012 yılı için patent sayısı tahmin edilmiştir ve oluşturulan I-MR grafiğinde kural ihlali söz konusu olmadığı anlaşılmıştır (bakınız: Şekil 5.9).

Adım 5: Single exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters) modeli ile 2013 yılı için patent sayısı tahmin edilmiştir. Artık değerler ile oluşturulan I grafiğinde 2013 yılında kural 1'in ihlal edildiği belirlenmiştir. Model güvenilir tahmin üretemeyeceği için güncellenmesi gerektiğine karar verilmiştir (bakınız: Şekil 5.10 ve 5.11).

Tablo 5.3 1988 - 2011 yılları için en düşük MAPE değerini dikkate alan modelleme sonuçları.

Yöntemler	Sıra	MAPE
Linear Trend Analysis	7	20,80
Exponential growth	6	18,63
Quadratic time series	8	24,17
S-curve	5	17,01
Moving average (MA=2)	4	16,36
Moving average (MA=1)	2	15,20
Single exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters)	1	13,53
Double exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters)	3	16,13

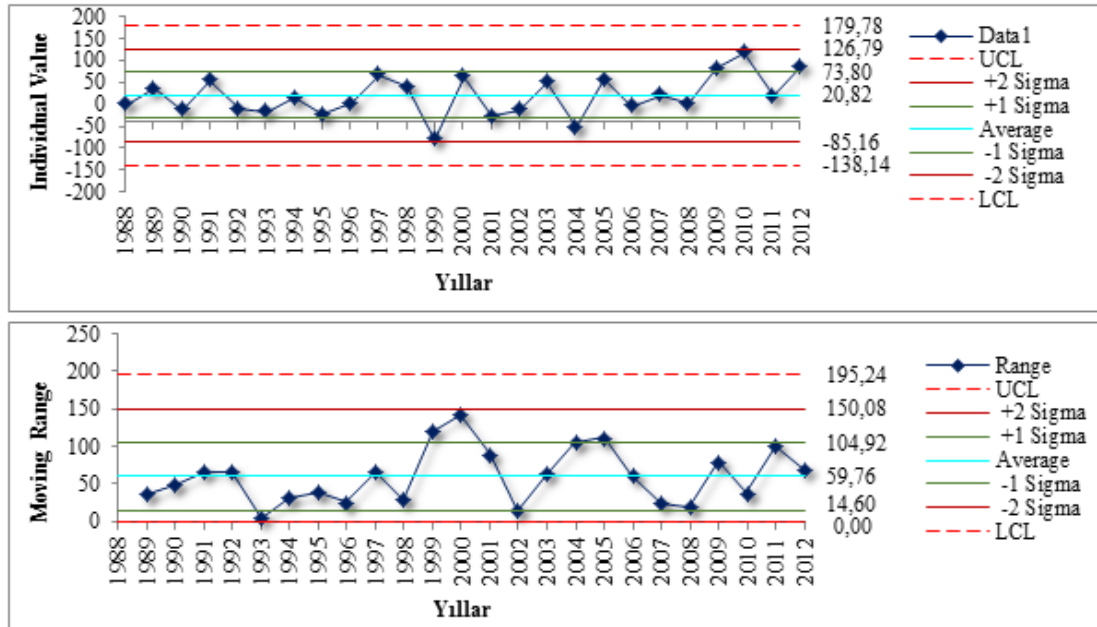


Şekil 5.7 1988 - 2011 yılları için uydurulmuş (fit edilmiş) eğri.

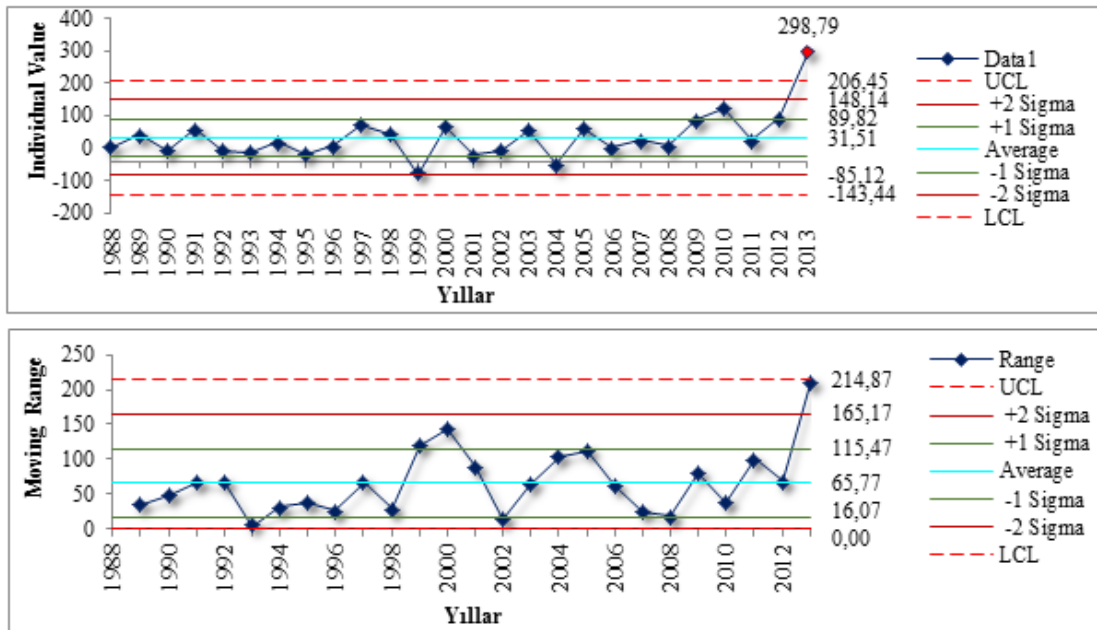


Şekil 5.8 1988 - 2011 yılları için I-MR grafiği.

Adım 6: Patent sayısındaki artışının 2011 yılında başlaması nedeniyle yeni eğri uydurma için 2011 - 2018 yıllarındaki patent sayıları dikkate alınmıştır. MAPE değeri en düşük olan Quadratic time series en uygun zaman serisi tahmin modeli olarak seçilmiştir (bakınız: Tablo 5.4 ve Şekil 5.12 ve 5.13). Modelden elde edilen artık değerler normal dağıldığı belirlenmiştir ($p=0,870>0,05$).



Şekil 5.9 1988 - 2012 yılları için I-MR grafiği.



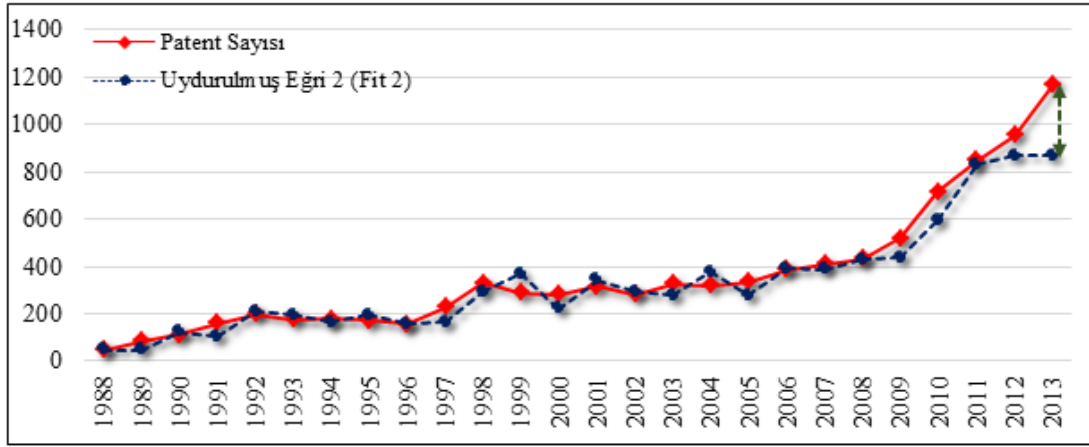
Şekil 5.10 1988 - 2013 yılları için I-MR grafiği.

1947 - 2018 yıllarında iş sağlığı ve güvenliği teknolojileri ile ilgili 16,977 patent kullanılarak teknoloji tahmin modeli geliştirilmiş ve tahmin modelinin güncellenmesi

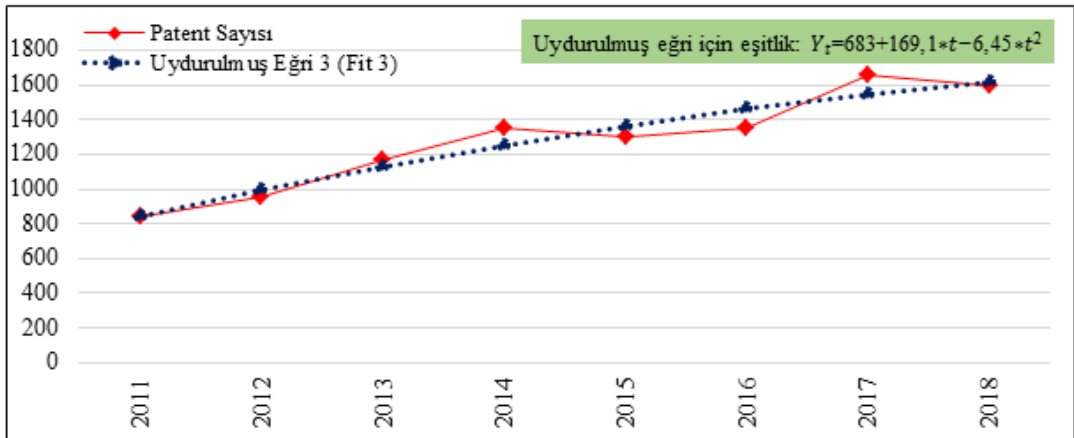
Tablo 5.4 2011 - 2018 yılları için en düşük MAPE değerini dikkate alan modelleme sonuçları.

Yöntemler	Sıra	MAPE
Linear Trend Analysis	2	5,40
Exponential growth	3	6,02
Quadratic time series	1	4,34
S-curve	8	13,50
Moving average (MA=2)	7	12,50
Moving average (MA=1)	6	10,30
Single exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters)	5	9,20
Double exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters)	4	7,40

gereken zamanlar belirlenmiştir. Sırasıyla 1989 ve 2013 yıllarında tahmin modelleri güncellenmiştir. 1947 - 2018 yıllarını içeren uydurulmuş (fit edilmiş) eğriler ve patent sayıları Şekil 5.14’de özetlenmiştir. 1989 yılında uydurulmuş eğri 1’den (Fit



Şekil 5.11 1988 - 2011 yılı için uydurulmuş (fit edilmiş) eğride belirgin bir sapmanın tespit edilmesinden sonraki eğri durumu.



Şekil 5.12 2011 - 2018 yılı için uydurulmuş (fit edilmiş) eğri.

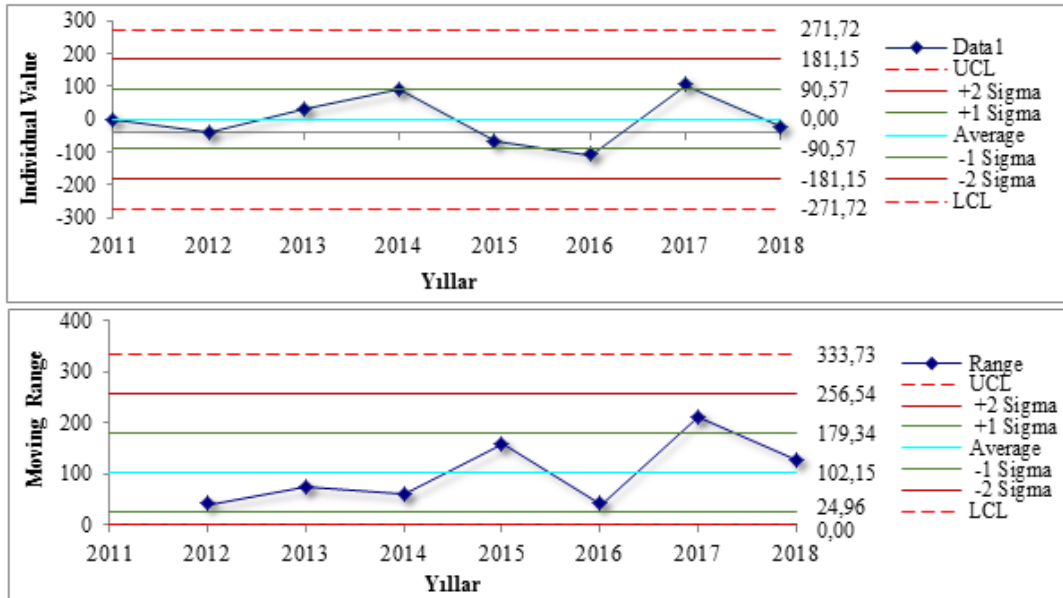
1'den) uydurulmuş eğri 2'e (Fit 2'e). 2013 yılında ise uydurulmuş eğri 2'den (Fit 2'den) uydurulmuş eğri 3'e (Fit 3'e) bir sıçrama olduğu görülmektedir. Patentler yayımlandıktan sonra etkileri ortalama iki yıl sonra ortaya çıkabilmekte, patent alma işlemi ise ortalama on sekiz ay kadar sürdüğü bilinmektedir [327]. Bu nedenle önemli değişimlerin olduğu 1989 ve 2013 yıllarından birer yıl önce ve birer yıl sonraki yıllarda iş sağlığı ve güvenliği alanında yayınlanan yasalar, standartlar, teşvik politikalarının incelenmesi önerilmektedir.

5.5.3 S-eğrisi ile Büyüme Modelleme ve Elde Edilen Bulgular

Çalışmamızda, iş sağlığı ve güvenli alanındaki teknolojilerin büyüme potansiyelini değerlendirmek için S-eğrisi oluşturulmuştur (bakınız: Şekil 5.15). S-eğrisine göre, İSG alanındaki teknolojiler büyüme evresindedir. Bu nedenle, yatırıma açık bir teknoloji alanı olduğu söylenebilir.

5.6 Sonuçlar

İş sağlığı ve güvenliği yasaları, standartları tarihsel olarak baktığımızda reaktif olarak hazırlanmaktadır. Proaktif iş sağlığı ve güvenliği yönetim yapısı oluşturabilmek için alandaki teknolojilerin izlenmesi, tahmin edilmesi son derece hayati öneme sahiptir. Heikkilä vd. [367]'de şirket içinde ve dışında gerçekleşen teknoloji değişikliklerinin sürekli izlenmesi ile güvenlik yönetiminin başarılı olacağını ifade ederek, teknoloji değişiminin izlenmesinin son derece önemli olduğuna dikkat çekmiştir. Teknoloji



Şekil 5.13 2011 - 2018 yılları için I-MR grafiği.

gelişiminin en önemli göstergelerinden birisi de patentlerdir ve teknoloji değişimlerini izlemek için yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [368].

Bu bölümde, iş sağlığı ve güvenliği (İSG) alanındaki teknoloji değişimlerini izlemek, teknoloji tahmin modelinin güncellenmesi gereken zamanı belirlemek ve S-eğrisi oluşturmak için İSG alanındaki teknolojiler ile ilgili 16,977 patent dokümanı USPTO veritabanından edinilmiş ve analiz edilmiştir. Çalışmamızda İSG alanındaki teknolojiler ile ilgili patentlerin analiz etme yaklaşımı, patent verilerini seçme kriteri ve elde edilen bulgular daha önceki çalışmalardan farklılık göstermektedir ve bu açılardan literatüre katkı sunulmaktadır.

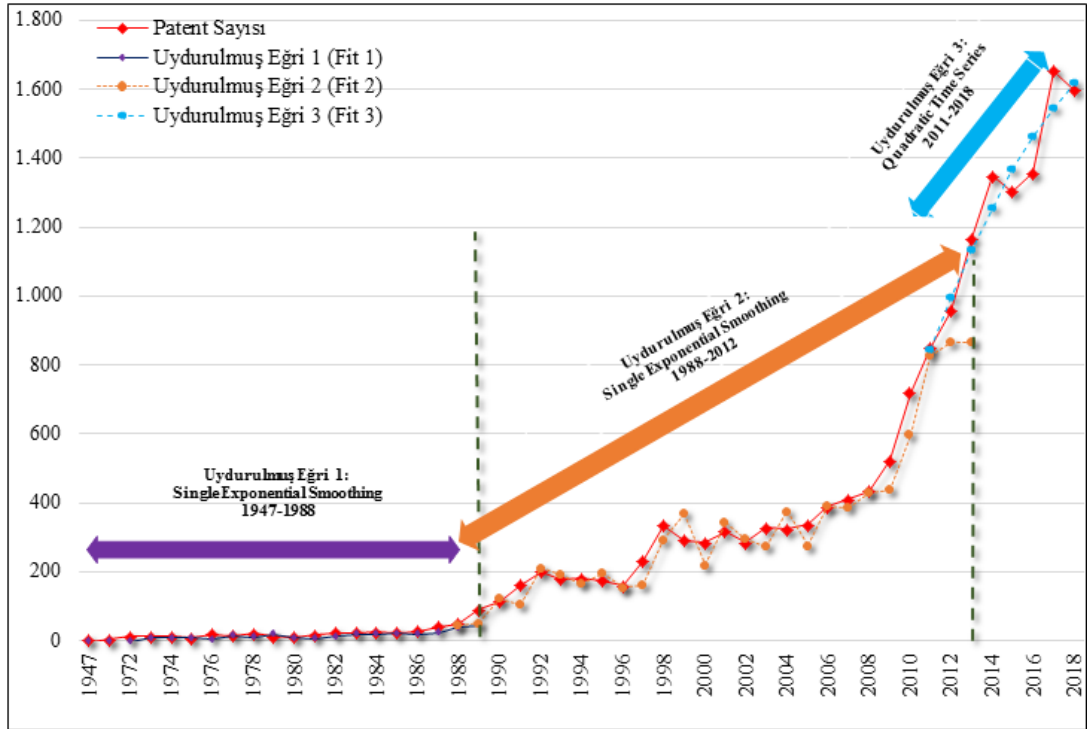
Bu bölümde, İSG alanındaki teknoloji değişimini izlemek için Durmusoglu [71]'nin önerdiği zaman serisi tahmin modelleme ve model performansını ve model artıklarının kullanımına dayanan I-MR grafikleri kullanılmıştır. Bu bölümde yürütülen çalışmada kullanılan yaklaşım ilk kez İSG alanındaki teknolojiler ile ilgili patent dokümanları için uygulanmıştır. Tahmin modeli performansını hassas bir şekilde izlemek için Durmusoglu [71] çalışmasından farklı olarak $+2\sigma$ ile -2σ ve $+1\sigma$ ile -2σ için oluşturulmuş Shewhart kontrol kuralları da çalışmamızda dikkate alınmıştır. Ayrıca patent sayıları için S-eğrisi oluşturulmuştur.

Zaman içerisinde İSG alanındaki teknolojilerde yaşanan önemli gelişmelere bağlı olarak tahmin modelinin istatistiksel istikrarının zayıfladığı, bu nedenle güncellenmesi gerektiği belirlenmiştir. Sırasıyla, 1989 ve 2013 yıllarında önemli değişimler gösterdiği belirlenmiştir. Bu nedenle, 1947 - 2018 yıllarındaki patent verileri için 3 tahmin modeli kullanılmıştır. Sırasıyla, 1947 - 1988 yılları için Single exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters ve smoothing katsayısı=1,08) MAPE=30,66 olup makul kabul edilebilir tahmin modeli, 1988 - 2012 yılları için de Single exponential smoothing (with optimal ARIMA parameters ve smoothing katsayısı=1,90) MAPE=13,53 değeri ile iyi tahmin modeli ve son olarak 2011 - 2018 yılları için Quadratic time series modeli MAPE=4,34 değeri ile yüksek doğrulukta bir tahmin modeli elde edilmiştir.

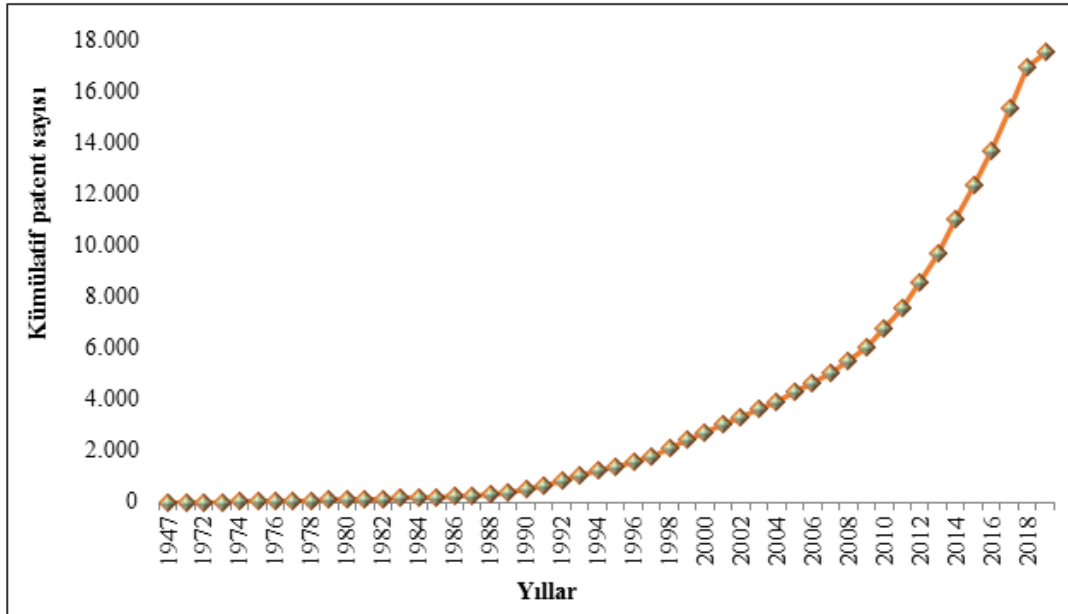
İSG alanındaki teknoloji değişimlerine neden olan itici güçleri araştırmak için patent dokümanlarının başvuru yapıldıktan ortalama 18 ay sonra yayınlandığı ve etkisinin, yaklaşık iki yıl sonra ortaya çıktığı hususu dikkate alınmalıdır [345]. Dolayısıyla, 1989 yılındaki değişimi analiz etmek için 1987 - 1989 yılları araştırılmalı, 2013 yılında yaşanan değişimin nedenlerini araştırmak için ise 2011 - 2013 yıllarındaki yaşanan gelişmeler mercek altına alınmalıdır. Bu bölümde elde edilen diğer bulgu ise İSG teknolojilerinin yatırımcı ve girişimciler için yatırım yapılabiliecek bir teknoloji alanı olduğudur (bakınız: Şekil 5.15).

- Güvenlik mühendisleri ve iş güvenliği profesyonellerine, kaza ve kayıpları önlemelerine destek olması açısından, önemli teknoloji değişimlerinin ortaya çıktığı yılları dikkate alarak yeni risklerin ortaya çıkması veya risklerin azalma durumunu analiz etmeleri önerilmektedir. Bu öneri, iş sağlığı ve güvenliği risk değerlendirme yönetmeliğinin 10. maddesinde belirtilen “risklerin kontrol edilmesi” ile uyumlu bir uygulamadır [80].
- Teknoloji yatırımı yapmak isteyenler için teknoloji tahmin modellerinin iyi performans göstermesi önemlidir. Söz konusu pratik ihtiyacı karşılamak için çalışmamızda elde edilen zaman serisi tahmin model performansı en iyi olacak şekilde, tahmin modeli güncellemesi gereken yıllar belirlenmiştir. Bu çalışmanın, karar vericiler için pratik bir ihtiyacı karşıladığı düşünülmektedir.
- Karar vericilerin ve teknoloji geliştiricilerin, teknoloji gelişiminde önemli değişimlerin yaşandığı yıllara odaklanmaları önerilmektedir. Bu sayede, değişime neden olan itici güçleri kolay bir şekilde analiz etmeleri sağlanacaktır. Söz konusu nedenler dikkate alarak araştırma ve geliştirme çalışmalarını organize edilmesinin önemli bir bulgu olduğu değerlendirilmektedir.
- Teknoloji değişimlerinin izlenmesi ve tahmin edilmesi ile proaktif iş sağlığı ve güvenliği yönetim sistemlerinin, yasalarının ve standartlarının oluşturulması bakımından da önemli olduğu düşünülmektedir.

Gelecek çalışmalarda sektörlere özgü kazalar analiz edilerek, kaza sonuç değişkenleri üzerinde etkili olan faktörler anahtar kelime olarak kullanılarak patent verileri toplanabilir. Söz konusu patentler ile sektöre özgü güvenlik teknolojileri hakkında bilgi sahibi olunabilir, teknoloji tahmin modeli oluşturulabilir ve trend analizler yürütülebilir.



Şekil 5.14 Uydurulmuş (fit edilmiş) eğrilerin karşılaştırılması.



Şekil 5.15 İş sağlığı ve güvenliği teknolojilerinin patent sayıları için S-eğrisi.

6.1 Önemli Sonuçlar

Bu tez çalışmasında, iş sağlığı ve güvenliğinin gelişmesine katkı sağlamak için risklerin izlenmesi ve kontrol edilmesinde kullanılabilecek yeni yaklaşımlardan oluşan bir çerçeve önerilmiştir. Risklerin izlenmesi ve kontrolü için önerilen yaklaşımlar dört bölümden oluşmaktadır. Yeni bilgiler keşfetmeye yarayan her bir yaklaşımın, gerçek hayat problemleri için uygulanabilirliği de gösterilmiştir. Riskleri izleme ve kontrol etmek için önerilen yaklaşımlardan elde edilen önemli bulgular sırasıyla aşağıda özetlenmiştir.

Tez kapsamında yürütülen ilk çalışma, kazalardan öğrenme ile olabilecek kazaları önleyerek iş sağlığı ve güvenliğinin gelişmesine katkı sunmak için organize edilmiştir. İş kaza kayıtları özellik seçme (feature selection), karar ağaç modellemesi (Decision Tree Modeling) ve ilişkilendirme kuralları madenciliği ile analiz edilerek kazalar üzerinde etkili olan aynı zamanda riskli olan faktörler belirlenmiş ve kaza türleri bakımından kaza kuralları elde edilmiştir. Keşfedilen bilgilerin ve kullanılan analiz yaklaşımının iş güvenliği uzmanlarına bir bakış açısı kazandırması ve iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmeye katkı sunması beklenmektedir.

İkinci çalışmada ise, risklerin proaktif ve katılımcı bir bakış açısı ile analiz edilmesi ve değerlendirilmesini sağlayan Hata türü ve etkileri analiz yöntemi (HTEA), hata ağacı analizi (FTA) ve Zamanın Bulanık Olasılık Tahmininde İnanç (Belief In Fuzzy Probability Estimation of Time: BIFPET) algoritmasına dayanan yeni bir yöntem önerilmiştir. Mevcut riskler ile olası risklerin kök nedenlerinin de analiz edilemesini sağlayan yöntemin uygulanması ile kaza ve kayıplarının önüne geçilmesine katkı sağlaması beklenmektedir. Önerilen yöntem, karar verme gereken ve risklerin analiz edilmesine ihtiyaç duyulan tüm süreçler için uygulanabilme özelliğine sahiptir.

Üçüncü çalışmada, risklerin ciddiyet derecesi, önlem alma önceliğini doğrudan etkilediğine ve risk derecesinin doğru tayin edilmesi gerekliliğine dikkat çekilmiştir.

Burada amaç, daha riskli olan durumların dikkatten kaçmaması en riskli olana öncelikle odaklanılması sağlamak üzere duyarlı öncelik sıralama tekniğinin (Technique of Precise Order Preference: TPOP) kullanılması önerilmiştir. Bu sayede, riskler doğru bir şekilde sıralanarak, risklerin izlenmesi ve kontrol edilmesi için etkin aksiyonlar geliştirilmesine rehberlik edildiği düşünülmektedir.

Son olarak, iş sağlığı ve güvenliği alanındaki güvenlik teknolojilerinin gelişim ve değişimlerinin patent verileri kullanılarak zaman serisi analizi ve istatistiksel kontrol grafiklerinin kullanımına dayanan bir yaklaşım önerilmiştir. Güvenlik teknolojilerin gelişmeye açık bir teknoloji alanı olduğu ve 1989 ve 2013 yıllarında önemli değişimler yaşandığı belirlenmiştir. İş güvenliği uzmanlarına riskleri izlemeleri ve kontrol etmelerini sağlayacak güvenlik teknolojilerini endüstrilerine kazandırmak için bir fırsat sunulmuştur.

Bu tezde önerilen yaklaşımların ve elde edilen bilgilerin iş sağlığı ve güvenliğini geliştirmek üzere risklerin izlenmesi ve kontrol edilmesinde önemli roller üstlenmesi beklenmektedir.

6.2 Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışma Önerileri

Önerilen yaklaşımlar ve ortaya konulan bilgiler dikkate alınarak kullanıcı dostu bir arayüz, karar destek sistemi oluşturulabilir. Bu sayede, güvenlik uzmanlarının söz konusu yaklaşımlardan elde ettikleri ipuçlarını etkin bir şekilde kullanması sağlanabilir. Elde edilen bilgiler doğru bir şekilde yorumlanabilirse etkili aksiyonlar geliştirilebilir ve iş sağlığı ve güvenliğinin gelişmesine ciddi düzeyde katkı sağlanabilir. Devam eden bölümde, her bir yaklaşımdaki sınırlılıklar ve gelecek çalışmalar için öneriler verilmiştir.

6.2.1 İkinci Bölüm için Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışma Önerileri

Kaza kayıtlarına girilmeyen bilgiler nedeniyle, çok fazla sayıda veri analizden çıkarılmıştır. Verilerle ilgili üç sınırlama vardır. Birincisi, veriler yalnızca Türkiye’de 2013 ve 2016 yılları arasında meydana gelen iş kazalarını kapsamaktadır. İkincisi, veriler hizmet sistemlerinde meydana gelen iş kazalarını kapsamamaktadır. Bu nedenle, analiz üretim sistemleri ile sınırlıdır. Üçüncüsü, Turkkan ve Pala [53] tarafından da belirtildiği gibi, kaza kayıtları sadece sigortalı çalışanlar hakkında bilgi içermektedir. Bu nedenle, tarım işçileri, serbest meslek sahipleri, denizciler ya da kayıt dışı işçiler hakkında kaza kayıtları bulunmamaktadır.

Gelecekteki çalışmalarda, kümelenme ve sınıflandırma algoritmaları gibi diğer veri

madenciliği temelli yaklaşımların kaza kayıtlarına uygulanması önerilebilir. Bunun yanında, önerilen yaklaşım diğer sektörlerde yaşanan iş kazaları için de uygulanabilir.

6.2.2 Üçüncü Bölüm için Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışma Önerileri

Çalışmada risk analizi ve değerlendirmesi kapsamında ele alınan Apre iş sürecindeki potansiyel kök nedenler birbirlerinden bağımsız olarak gerçekleştiriklerinden birbirleri üzerindeki etkileri dikkate alınmamıştır. Güvenirlik ve başarısızlık analizlerinde sadece bağımsız hataları dikkate almak yeterli olmadığında [114] araştırmacıların tüm potansiyel kök nedenlerin bağımlı olma durumlarını da dikkate almaları önerilmektedir. Bununla birlikte hata türlerinin olası maliyeti, zaman kaybı veya kaynak israfı gibi etkilerinin de analize dahil edilmesi ile risk kapsamının genişletilmesine yardımcı olacağı düşünülmektedir.

Önerilen risk analizi yaklaşımını başarıyla uygulamak için, alanında uzmanların olması gerekmektedir. Gerekli bilgileri toplamak ve yöntemi uygulamak zaman alabilir. Yöntem anlaşılabilir olmakla birlikte hesaplama sürecinde çok azda olsa karmaşıklık vardır.

6.2.3 Dördüncü Bölüm için Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışma Önerileri

TPOP yaklaşımı, çoklu risk analiz ve değerlendirme yöntemlerinin avantajlarını bütünleştirerek tutarsız risk sıra düzeni problemi için önemli bir katkı sunmuş olsada bazı sınırlılıklara sahiptir. İş sağlığı ve güvenliği profesyonelleri, TPOP yöntemini kullanmadan önce farklı risk analiz ve değerlendirme yöntemlerini uygulamak zorundadır. TPOP uygulamasında üstün başarı elde etme koşuluyla en az kaç yöntem ile çalışılması gerektiği bilinmemektedir. Yöntem sayısı arttıkça TPOP performansının nasıl değiştiği ayrı bir keşif konusu olarak araştırmacılara önerilebilir.

Gelecekteki araştırmalarda, iş sağlığı ve güvenliğinde çoklu risk analizi için önerilen yaklaşımlarına veri füzyonuna dayalı yaklaşımlar dahil edilebilir. Ek olarak, iş sağlığı ve güvenliği alanındaki risk analizi ve değerlendirmesi için duyarlı öncelik sıralama tekniğine bulanık mantık yaklaşımı entegre edilerek geliştirilebilir ve hata türlerinin sıralanması için uygulanabilirler.

6.2.4 Beşinci Bölüm için Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışma Önerileri

Gelecek çalışmalarda sektörlere özgü kazalar analiz edilerek, kaza sonuç değişkenleri üzerinde etkili olan faktörler anahtar kelime olarak kullanılarak patent verileri toplanabilir. Söz konusu patentler ile sektöre özgü güvenlik teknolojileri hakkında

bilgi sahibi olunabilir, teknoloji tahmin modeli oluşturulabilir.





Tablo A.1 Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537).

Kazanın gerçekleştiği yer, bölüm (GYB)	Mutlak frekans	%
GYB1: Bakım alanı, onarım atölyesi; depo, yükleme, boşaltma için kullanılan alan; üretim alanı, fabrika, atölye; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer çalışma alanı.	207.342	85,49
GYB2: Açık hava taşocağı, açık hava madeni; yeni inşa edilen bina,yeraltı , yıkılan, onarılan, bakımı yapılan bina, yüksek basınçlı ortam bulunan inşaat mevki; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer çalışma alanı.	2.963	1,22
GYB3: Bahçe, park, botanik bahçe; balık çiftliği alanı, çiftlik alanı,ormancılık alanı; yetiştirme alanı; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer çalışma alanı.	342	0,14
GYB4: Büro, toplantı salonu, kütüphane; küçük veya büyük satış alanı; lokanta, dinlenme, geçici konaklama alanı; öğretim kurumu; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer çalışma alanı	834	0,34
GYB5: Sağlık kurumu, özel hastane, hastane, bakım evi; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer çalışma alanı	37	0,02
GYB6: Kamu alanlarına bağlı olup sadece yetkili kimse-lerin erişimine izin verilen demir yolu hattı,hava yolu pisti, kara yolu banketi; kamu geçişine açık karayolları, yan yollar,park alanları, istasyon veya havaalanı bekleme salonu; kara, hava, deniz ulaşım araçları;bu sınıflandırma kapsamındaki diğer çalışma alanı	1.997	0,82
GYB7: Bir binanın ortak alanı, kişisel aile bahçesi; kişisel ev; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer çalışma alanı	77	0,03
GYB8: Açık spor alanı; kapalı spor alanı; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer çalışma alanı	239	0,10
GYB9: Havada, uçakta; çatı, teras gibi sabit bir yüzeyde yükseltme esnasında; direk, pilon, asılı platform ile yükseltme esnasında; bu sınıflandırma kapsamındaki inşaat şantiyesi dışındaki diğer çalışma alanı	73	0,03
GYB10: Yeraltı kanalizasyon, lağım; maden; yol ve tüp tüneli; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer çalışma alanı	23	0,01
GYB11: Her türlü tekne, platform, gemi, sandal, mavnada; göl, nehir, liman;bu sınıflandırma kapsamındaki diğer çalışma alanı	23	0,01
GYB12: su altı gibi yüksek basınçlı ortamlar; bu sınıflandırma kapsamındaki inşaat şantiyesi dışındaki diğer çalışma alanı	33	0,01
GYB99: Yukarıdaki sınıflandırmada listelenmemiş başka bir çalışma ortamı	28.331	11,68

Tablo A.2 Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537),
(Devamı-1).

Genel faaliyet (GF)	Mutlak frekans	%
GF1: Üretim, imalat, işleme ve depolama faaliyetleri; bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet.	188.466	77,71
GF2: Yeni inşaat-bina-inşaat mühendisliği; alt yapı, yol, köprü, baraj ve liman yapımı, yeni modelleme, onarım, genişletme, bina bakımı, inşaat yıkım faaliyetleri; bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet.	3028	1,25
GF3: Balık çiftçiliği; ormancılık ile ilgili meslek türleri; tarım ile ilgili meslek türleri ile ilgili faaliyetler;bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet.	437	0,18
GF4: Kamu hizmeti; ticari faaliyetler; zihinsel çalışma; bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet.	526	0,22
GF5: Atık yönetimi; bakım, onarım, ayar; iş alanının temizlenmesi, imalat süreçlerinin donanımları olsun veya olmasın izlenmesi,teftiş edilmesi; Kurulum, montaj,yükleme, sökme faaliyetleri; bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet.	3.184	1,31
GF6: Spor, sanatsal faaliyetler; taşıt araçlarının da kullanımı ile yapılan hareketler.	2.618	1,08
GF7: Sınıflandırmada listelenmemiş başka kaza anında kazazedenin yaptığı faaliyet.	44.278	18,26
Özel faaliyet (ÖF)	Mutlak frekans	%
ÖF1: Makinenin beslenmesi, boşaltılması; makinenin çalıştırılıp durdurulması; makinenin izlenmesi, işlenmesi;bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet.	48.291	19,91
ÖF2: Elle ve motorlu el makineleri ile çalışma;bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet.	35.085	14,47
ÖF3: motorlu ve motorsuz bir taşıt aracını sürmek veya donanımı kullanmak; bir taşıt aracının yolcusu olmak;bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet.	5.592	2,31
ÖF4: kutu, paket açmak; bir nesneyi atmak, savurmak; bağlamak, yapıştırmak, vidalamak; ele almak, tutmak, kavramak; asmak; bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet.	23.431	9,66
ÖF5: Bir yükü taşımak; bir nesneyi kaldırmak ve düşey olarak veya yatay olarak taşımak;busınıfta listelenmemiş diğer faaliyet.	26.811	11,05
ÖF6: Atlama, zıplama; çıkma, girme; kalkma,oturma; sürünme, tırmanma; yürüme, koşma,çıkma, girme; yüzme, dalma; bu sınıfta listelenmemiş diğer faaliyet.	21.952	9,05
ÖF7: Bulunma.	9.850	4,06
ÖF8: Yukarıdaki sınıflarda listelenmemiş diğer faaliyet.	71.525	29,49

Tablo A.3 Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537),
(Devamı-2).

Malzeme, Araç ve Gereç (MAG)	Mutlak frekans	%
MAG10: Bilgisayar, büro otomasyonu, röprodüksiyon, iletişim ekipmanları; öğretim, yazma, çizme ekipmanları; ev eşyası türü ekipmanlar; kişisel eşya, giysi; mobilya; müzik aletleri; silahlar; spor ve oyun ekipmanları; sınıflandırılmamış başka bilinen büro ekipmanı, spor ekipmanı, silah ev eşyaları)	558	0,23
MAG11: Ağaç, bitki, mahsul; bulaşıcı mikroplu amiller; evcil veya vahşi hayvanlar; insanlar; mikroorganizmalar; bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bilinen canlılar ve insanlar.	490	0,20
MAG12: Biyolojik, bitki ve hayvan kökenli katı atık, hammadde, ürün madde ve nesne kökenli kütle atık; kimyasal kökenli kütle atık; bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bilinen kütle atık.	760	0,31
MAG13: Yer düzeyinden yukarıdaki bina parçaları - sabit (çatı, teras, kapı ve pencereler, merdiven, iskele); Yer düzeyinden yukarıdaki yapılar, yüzeyler - geçici (geçici yapı iskelesi, bağlar, salıncaklar da dahil olmak üzere), seyyar (yapı iskelesi, seyyar merdiven, beşik, yükseltme platformları da dahil olmak üzere), yüzer (arama platformları, mavna iskeleleri de dahil olmak üzere) yapılar; bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bilinen yer düzeyinden yukarıdaki bina, yapı, yüzeyler.	1.782	0,73
MAG14: Doğal afetler; doğal ve atmosfer unsurları; gürültü radyasyon, ışık gibi fiziki olgu; bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bilinen fiziki olgu ve unsurlar.	1.522	0,63
MAG15: Hafriyat, hendek, kuyu, ocak, eğik yüzey, dehliz; Sualtı ortamlar; yeraltı tüneller; bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bilinen yer düzeyinin altındaki bina, yapı, yüzeyler.	97	0,04
MAG16: Gaz, hava, sıvı, katı malzeme temini ve dağıtım sistemleri, boru ağları-sabit-aksaklıklar da dahil olmak üzere; Kanalizasyon, lağım; Malzeme temini ve dağıtım sistemleri, boru ağları – seyyar; bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bilinen malzeme temini ve dağıtım sistemleri, boru ağları.	756	0,31
MAG17: Enerji iletim ve depolama sistemleri (mekanik, basınçlı, hidrolik, elektrik, pil ve akümülatörler de dahil olmak üzere); Motorlar, jeneratörler (termal, elektrik, radyasyon); bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bilinen motor, enerji iletimi ve depolama sistemleri.	377	0,16
MAG18: Motorsuz el aletleri; bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bilinen motorsuz el aletleri.	16.995	7,01
MAG19: Makineli el aletleri; basınçlı tabancalar; bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bilinen el makineleri veya elle yönlendirilen aletler.	16.564	6,83
MAG20: Güç kaynağı belirtilmeyen el aletleri; bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bilinen güç kaynağı belirtilmeyen el aletleri.	2.706	1,12

Tablo A.4 Kaza analizinde kullanılan değişkenler ve frekansları (n=242.537),
(Devamı-3).

Malzeme, Araç ve Gereç (MAG)	Mutlak frekans	%
MAG21: Taşınabilir veya seyyar makineler; bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bilinen taşınabilir veya seyyar makine ve ekipmanlar.	8.226	3,39
MAG22: Bu sınıflandırmada listelenmemiş başka bir maddi araç.	70.550	29,09
Meslek ISC08 Kodu (MES)	Mutlak frekans	%
MES1: Çeşitli alanlarda hizmet veren kurumların müdürleri;iş hizmetleri ve idaresi müdürleri;profesyonel hizmet müdürleri; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer müdürler.	2.341	0,97
MES2: Eğitim, hukuk, mühendislik, sağlık, veri tabanı ve bilgisayar ağları ile ilgili profesyonel meslek grupları; yazılım ve uygulama geliştirici analistler; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer meslek mensupları.	1.089	0,45
MES3: Düzenleyici devlet ile ilgili alanlardaki yardımcı profesyonel meslek mensupları; fizik ve mühendislik bilimleri teknisyenleri; iş hizmetleri aracıları; işlem kontrol teknisyenleri; sağlıkla ilgili yardımcı profesyonel meslek mensupları; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer meslek mensupları.	5.938	2,45
MES4: Büro destek elemanları; müşteri danışma elemanları; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer meslek mensupları.	3.002	1,24
MES5: Kişisel hizmetlerde çalışanlar;koruma hizmetleri veren elemanlar; sağlık hizmetlerinde kişisel bakım hizmeti veren elemanlar; satış elemanları; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer meslek mensupları.	1.438	0,59
MES6: Hayvan yetiştiricileri; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer meslek mensupları.	285	0,12
MES7: El işi çalışanları; kaba inşaat ve ilgili işlerde çalışan sanatkarlar; sanatkarlar ve ilgili işlerde çalışanlar; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer meslek mensupları.	29.377	12,11
MES8: Montajcılar; sabit tesis ve makine operatörleri; tekstil,kürk ve deri ürünleri makine operatörleri; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer meslek mensupları.	90.994	37,52
MES9: İmalat sektöründe nitelik gerektirmeyen işlerde çalışanlar; bu sınıflandırma kapsamındaki diğer meslek mensupları.	108.073	44,56

- [1] D. Nozer and S. Wilson, "The mathematics of risk and reliability: A select history," *Encyclopedia of quantitative risk analysis and assessment*, pp. 1054–1062, 2008.
- [2] L. David, *Occupational safety and health for technologists, engineers and managers*, 2015.
- [3] C. J. Romer, "The importance of accident and injury prevention," *Ergonomics*, vol. 30, no. 2, pp. 173–179, 1987.
- [4] I. A. Nuwayhid, "Occupational health research in developing countries: A partner for social justice," *American Journal of Public Health*, vol. 94, no. 11, pp. 1916–1921, 2004.
- [5] *Ilostat: 2008-2016*, [https : / / ilostat . ilo . org/](https://ilostat.ilo.org/), Erişim tarihi: 05-08-2018.
- [6] N. G. Mutlu and S. Altuntaş, "Türkiye’de 1974-2016 yıllarında iş sağlığı ve güvenliği alanında yapılan lisansüstü tezlerin profili," *Karaelmas Science and Engineering Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 509–535, 2017.
- [7] F. Aqlan and E. M. Ali, "Integrating lean principles and fuzzy bow-tie analysis for risk assessment in chemical industry," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 29, pp. 39–48, 2014.
- [8] E. Hollnagel, D. D. Woods, and N. Leveson, *Resilience engineering: Concepts and precepts*. Ashgate Publishing, Ltd., 2006.
- [9] M. J. Jafari, A. Barkhordari, D. Eskandari, and Y. Mehrabi, "Relationships between certain individual characteristics and occupational accidents," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 25, no. 1, pp. 61–65, 2019.
- [10] J. Tixier, G. Dusserre, O. Salvi, and D. Gaston, "Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants," *Journal of Loss Prevention in the process industries*, vol. 15, no. 4, pp. 291–303, 2002.
- [11] U. Kjellén and S. Sklet, "Integrating analyses of the risk of occupational accidents into the design process part i: A review of types of acceptance criteria and risk analysis methods," *Safety Science*, vol. 18, no. 3, pp. 215–227, 1995.
- [12] E. Tatsaki, E. Sgourou, P. Katsakiori, I. Konsta, and S. Gerasimou, "The impact of occupational accidents and gross domestic product on the sanctions imposed by the greek osh inspectorate," *Safety science*, vol. 115, pp. 349–352, 2019.

- [13] F. Erdugan and A. H. Türkan, "Üç yönlü kontenjans tablolarında log-lineer model ile iş kazası verilerinin incelenmesi," *Karaelmas Science and Engineering Journal*, vol. 7, no. 2, pp. 462–468, 2017.
- [14] A. Turkkan and K. Pala, "Trends in occupational injuries and fatality in turkey," *International journal of occupational safety and ergonomics*, vol. 22, no. 4, pp. 457–462, 2016.
- [15] F. Salguero-Caparros, M. Suarez-Cebador, J. C. Rubio-Romero, and J. A. Carrillo-Castrillo, "Methodologies for investigating occupational accidents and their use in occupational health and safety research. literature review," *Environmental Engineering & Management Journal (EEMJ)*, vol. 18, no. 3, 2019.
- [16] L. Sanmiquel, J. M. Rossell, and C. Vintró, "Study of spanish mining accidents using data mining techniques," *Safety science*, vol. 75, pp. 49–55, 2015.
- [17] A. Isara and A. Ofili, "Prevalence of occupational accidents/injuries among health care workers in a federal medical centre in southern nigeria," *West African journal of medicine*, vol. 31, no. 1, pp. 47–51, 2012.
- [18] C.-W. Cheng, S.-S. Leu, C.-C. Lin, and C. Fan, "Characteristic analysis of occupational accidents at small construction enterprises," *Safety Science*, vol. 48, no. 6, pp. 698–707, 2010.
- [19] L. Comberti, M. Demichela, and G. Baldissoni, "A combined approach for the analysis of large occupational accident databases to support accident-prevention decision making," *Safety science*, vol. 106, pp. 191–202, 2018.
- [20] B. Altunkaynak, "A statistical study of occupational accidents in the manufacturing industry in turkey," *International journal of industrial ergonomics*, vol. 66, pp. 101–109, 2018.
- [21] L. Sanmiquel, M. Bascompta, J. Rossell, H. Anticoi, and E. Guash, "Analysis of occupational accidents in underground and surface mining in spain using data-mining techniques," *International journal of environmental research and public health*, vol. 15, no. 3, p. 462, 2018.
- [22] G. A. Shirali, M. V. Noroozi, and A. S. Malehi, "Predicting the outcome of occupational accidents by cart and chaid methods at a steel factory in iran," *Journal of public health research*, vol. 7, no. 2, 2018.
- [23] S. Gerassis, J. Martin, J. T. Garcia, A. Saavedra, and J. Taboada, "Bayesian decision tool for the analysis of occupational accidents in the construction of embankments," *Journal of construction engineering and management*, vol. 143, no. 2, p. 04016093, 2016.
- [24] D.-S. Chang and Y.-C. Tsai, "Investigating the long-term change of injury pattern on severity, accident types and sources of injury in taiwan's manufacturing sector between 1996 and 2012," *Safety Science*, vol. 68, pp. 231–242, 2014.
- [25] *Sgk istatistik yillığı: 2013-2017*, http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari, Erişim tarihi: 10-10-2019.

- [26] E. Stemn, "Analysis of injuries in the ghanaian mining industry and priority areas for research," *Safety and health at work*, vol. 10, no. 2, pp. 151–165, 2019.
- [27] V. V. Smirnyakov, V. V. Smirnyakova, D. S. Pekarchuk, and F. A. Orlov, "Analysis of methane and dust explosions in modern coal mines in russia," *statistics*, vol. 27, p. 28,
- [28] B. Vranješ and M. Todić, "A model of analysis of the occupational safety and health system in the production system," *Journal of Applied Engineering Science*, vol. 17, no. 3, pp. 264–272, 2019.
- [29] C. A. Ericson *et al.*, *Hazard analysis techniques for system safety*. John Wiley & Sons, 2005.
- [30] V. V. Khanzode, J. Maiti, and P. K. Ray, "Occupational injury and accident research: A comprehensive review," *Safety Science*, vol. 50, no. 5, pp. 1355–1367, 2012.
- [31] H. Pham, *Safety and risk modeling and its applications*. Springer, 2011.
- [32] P. Marhavilas, D. Koulouriotis, and C. Mitrakas, "On the development of a new hybrid risk assessment process using occupational accidents' data: Application on the greek public electric power provider," *Journal of loss prevention in the process industries*, vol. 24, no. 5, pp. 671–687, 2011.
- [33] F. Goerlandt, N. Khakzad, and G. Reniers, "Validity and validation of safety-related quantitative risk analysis: A review," *Safety Science*, vol. 99, pp. 127–139, 2017.
- [34] O. Mohsen and N. Fereshteh, "An extended vikor method based on entropy measure for the failure modes risk assessment—a case study of the geothermal power plant (gpp)," *Safety science*, vol. 92, pp. 160–172, 2017.
- [35] R. Dabbagh and S. Yousefi, "A hybrid decision-making approach based on fcm and moora for occupational health and safety risk analysis," *Journal of safety research*, vol. 71, pp. 111–123, 2019.
- [36] S. Mete, F. Serin, N. E. Oz, and M. Gul, "A decision-support system based on pythagorean fuzzy vikor for occupational risk assessment of a natural gas pipeline construction," *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, vol. 71, p. 102 979, 2019.
- [37] S. Tepe and İ. Kaya, "A fuzzy-based risk assessment model for evaluations of hazards with a real-case study," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, pp. 1–26, 2019.
- [38] M. Gul, "A fuzzy-based occupational health and safety risk assessment framework and a case study in an international port authority," *Journal of Marine Engineering & Technology*, pp. 1–15, 2019.
- [39] M. Gul, A. Guneri, and M. Baskan, "An occupational risk assessment approach for construction and operation period of wind turbines," *Global Journal of Environmental Science and Management*, vol. 4, no. 3, pp. 281–298, 2018.
- [40] H. Akyildiz and A. Menten, "An integrated risk assessment based on uncertainty analysis for cargo vessel safety," *Safety science*, vol. 92, pp. 34–43, 2017.

- [41] G. E. Gürcanlı and U. Müngen, "An occupational safety risk analysis method at construction sites using fuzzy sets," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 39, no. 2, pp. 371–387, 2009.
- [42] M. Gul, "A review of occupational health and safety risk assessment approaches based on multi-criteria decision-making methods and their fuzzy versions," *Human and ecological risk assessment: an international journal*, vol. 24, no. 7, pp. 1723–1760, 2018.
- [43] A. Pillay and J. Wang, "Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 79, no. 1, pp. 69–85, 2003.
- [44] J. B. Bowles, "An assessment of rpn prioritization in a failure modes effects and criticality analysis," in *Annual Reliability and Maintainability Symposium, 2003.*, IEEE, 2003, pp. 380–386.
- [45] H.-C. Liu, L. Liu, and N. Liu, "Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review," *Expert systems with applications*, vol. 40, no. 2, pp. 828–838, 2013.
- [46] K.-H. Chang, Y.-C. Chang, and P.-T. Lai, "Applying the concept of exponential approach to enhance the assessment capability of fmea," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 25, no. 6, pp. 1413–1427, 2014.
- [47] Q. Zhou and V. V. Thai, "Fuzzy and grey theories in failure mode and effect analysis for tanker equipment failure prediction," *Safety science*, vol. 83, pp. 74–79, 2016.
- [48] *[international electrotechnical commission, iec 60812: 2006, <https://webstore.iec.ch/publication/3571>., Erişim tarihi: 7-01-2018.*
- [49] H.-C. Liu, "Fmea using uncertainty theories and mcdm methods," in *FMEA using uncertainty theories and MCDM methods*, Springer, 2016, pp. 13–27.
- [50] A. Silvestri, F. De Felice, and A. Petrillo, "Multi-criteria risk analysis to improve safety in manufacturing systems," *International Journal of Production Research*, vol. 50, no. 17, pp. 4806–4821, 2012.
- [51] M. Dodsworth, K. Connelly, C. Ellett, and P. Sharratt, "Organizational climate metrics as safety, health and environment performance indicators and an aid to relative risk ranking within industry," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 85, no. 1, pp. 59–69, 2007.
- [52] S. M. Lo, "A fire safety assessment system for existing buildings," *Fire technology*, vol. 35, no. 2, pp. 131–152, 1999.
- [53] D. S. Chang, J. H. Chung, K. L. Sun, and F. C. Yang, "A novel approach for evaluating the risk of health care failure modes," *Journal of medical systems*, vol. 36, no. 6, pp. 3967–3974, 2012.
- [54] M. Gul and M. F. Ak, "A comparative outline for quantifying risk ratings in occupational health and safety risk assessment," *Journal of cleaner production*, vol. 196, pp. 653–664, 2018.

- [55] H.-C. Liu, L.-E. Wang, X.-Y. You, and S.-M. Wu, "Failure mode and effect analysis with extended grey relational analysis method in cloud setting," *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 30, no. 7-8, pp. 745–767, 2019.
- [56] H.-C. Liu, Z. Li, W. Song, and Q. Su, "Failure mode and effect analysis using cloud model theory and promethee method," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 66, no. 4, pp. 1058–1072, 2017.
- [57] B. Bairagi, B. Dey, B. Sarkar, and S. K. Sanyal, "A de novo multi-approaches multi-criteria decision making technique with an application in performance evaluation of material handling device," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 87, pp. 267–282, 2015.
- [58] L. Huang and J. Ren, "The negative impact of emerging technology: A literature review," in *2010 International Conference on E-Business and E-Government*, IEEE, 2010, pp. 2576–2579.
- [59] M. L. Myers, "Anticipation of risks and benefits of emerging technologies: A prospective analysis method," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 13, no. 5, pp. 1042–1052, 2007.
- [60] M. F. Antwi-Afari, H. Li, J. K.-W. Wong, O. T. Oladinrin, J. X. Ge, J. Seo, and A. Y. L. Wong, "Sensing and warning-based technology applications to improve occupational health and safety in the construction industry: A literature review," *Engineering, Construction and Architectural Management*, 2019.
- [61] K. A. Holte, G. Follo, K. Kjestveit, and E. P. Stræte, "Agriculture into the future: New technology, new organisation and new occupational health and safety risks?" In *Congress of the International Ergonomics Association*, Springer, 2018, pp. 404–413.
- [62] Y. Gao, V. A. Gonzalez, and T. W. Yiu, "The effectiveness of traditional tools and computer-aided technologies for health and safety training in the construction sector: A systematic review," *Computers & Education*, vol. 138, pp. 101–115, 2019.
- [63] N. Tang, H. Hu, F. Xu, and F. Zhu, "Personalized safety instruction system for construction site based on internet technology," *Safety science*, vol. 116, pp. 161–169, 2019.
- [64] I. Awolusi, E. Marks, and M. Hallowell, "Wearable technology for personalized construction safety monitoring and trending: Review of applicable devices," *Automation in construction*, vol. 85, pp. 96–106, 2018.
- [65] D. Tatić and B. Tešić, "The application of augmented reality technologies for the improvement of occupational safety in an industrial environment," *Computers in Industry*, vol. 85, pp. 1–10, 2017.
- [66] B. Song and Y. Suh, "Identifying convergence fields and technologies for industrial safety: Lda-based network analysis," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 138, pp. 115–126, 2019.
- [67] J. Jeon and Y. Suh, "Multiple patent network analysis for identifying safety technology convergence," *Data Technologies and Applications*, 2019.

- [68] H. Yakişik and A. Çetin, "Eğitim, sağlık ve teknoloji düzeyinin ekonomik büyüme üzerindeki etkisi: Ardl sınır test yaklaşımı," *Sosyoekonomi*, vol. 21, no. 1, 2014.
- [69] H. Tunç, *Bir yenilik göstergesi olarak patent ve türkiye patent performansı*, Isparta, 2008.
- [70] F. Narin and D. Olivastro, "Technology indicators based on patents and patent citations," in *Handbook of quantitative studies of science and technology*, Elsevier, 1988, pp. 465–507.
- [71] A. Durmusoglu, "Updating technology forecasting models using statistical control charts," *Kybernetes*, vol. 47, no. 4, pp. 672–688, 2018.
- [72] R. Luzzi, S. Passannanti, and M. Patrucco, "Advanced technique for the in-depth analysis of occupational accidents," *Chemical Engineering Transaction*, vol. 43, 2015.
- [73] G. Eduljee, "Trends in risk assessment and risk management," *Science of the Total Environment*, vol. 249, no. 1-3, pp. 13–23, 2000.
- [74] V. Kotu and B. Deshpande, *Predictive analytics and data mining: concepts and practice with rapidminer*. Morgan Kaufmann, 2014.
- [75] J. Quinaln, "C4. 5: Programs for machine learning [m]," *Morgan kuafmann*, 1993.
- [76] Y. Zhao and Y. Zhang, "Comparison of decision tree methods for finding active objects," *Advances in Space Research*, vol. 41, no. 12, pp. 1955–1959, 2008.
- [77] M. F. Shipley, A. De Korvin, and K. Omer, "A fuzzy logic approach for determining expected values: A project management application," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 47, no. 4, pp. 562–569, 1996.
- [78] M. Peciño, "The resilience engineering concept in enterprises with and without occupational safety and health management systems," *Safety science*, vol. 82, pp. 190–198, 2016.
- [79] *İsg kanunu: 2012*, <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/06/20120630.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/06/20120630.htm>, Erişim tarihi: 05-08-2018.
- [80] *İsg risk değerlendirme yönetmeliği:2012*, <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/12/20121229.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2012/12/20121229.htm>, Erişim tarihi: 10-08-2018.
- [81] *Ulusal isg konsey yönetmeliği:2012*, <http://www.resmigazete.gov.tr/main.aspx?home=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/02/20130205.htm&main=http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/02/20130205.htm>, Erişim tarihi: 02-10-2018.
- [82] A. Persona, D. Battini, M. Faccio, M. Bevilacqua, and F. E. Ciarapica, "Classification of occupational injury cases using the regression tree approach," *International journal of reliability, quality and safety engineering*, vol. 13, no. 02, pp. 171–191, 2006.

- [83] C.-W. Cheng, C.-C. Lin, and S.-S. Leu, "Use of association rules to explore cause–effect relationships in occupational accidents in the taiwan construction industry," *Safety science*, vol. 48, no. 4, pp. 436–444, 2010.
- [84] J. Hovden, E. Albrechtsen, and I. A. Herrera, "Is there a need for new theories, models and approaches to occupational accident prevention?" *Safety Science*, vol. 48, no. 8, pp. 950–956, 2010.
- [85] C.-W. Cheng, H.-Q. Yao, and T.-C. Wu, "Applying data mining techniques to analyze the causes of major occupational accidents in the petrochemical industry," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 26, no. 6, pp. 1269–1278, 2013.
- [86] S. Sarkar, S. Vinay, R. Raj, J. Maiti, and P. Mitra, "Application of optimized machine learning techniques for prediction of occupational accidents," *Computers & Operations Research*, vol. 106, pp. 210–224, 2019.
- [87] B. Y. Jeong, "Characteristics of occupational accidents in the manufacturing industry of south korea," *International journal of industrial ergonomics*, vol. 20, no. 4, pp. 301–306, 1997.
- [88] J. Han, J. Pei, and M. Kamber, *Data mining: concepts and techniques*. Elsevier, 2011.
- [89] H. Ceylan, "Türkiye'deki elektrik iletim tesislerinde meydana gelen iş kazalarının analizi," *Ejovoc (Electronic Journal of Vocational Colleges)*, vol. 2, no. 1, pp. 98–109, 2012.
- [90] G. Swaen, L. Van Amelsvoort, U. Bültmann, and I. Kant, "Fatigue as a risk factor for being injured in an occupational accident: Results from the maastricht cohort study," *Occupational and environmental medicine*, vol. 60, no. suppl 1, pp. i88–i92, 2003.
- [91] P. Nag and V. Patel, "Work accidents among shiftworkers in industry," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 21, no. 3-4, pp. 275–281, 1998.
- [92] H. Ceylan and M. Avan, "Türkiye'deki iş kazalarının yapay sinir ağları ile 2025 yılına kadar tahmini," *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 4, no. 1, pp. 46–54, 2012.
- [93] E. C. Marcoulaki, I. A. Papazoglou, and M. Konstandinidou, "Prediction of occupational accident statistics and work time loss distributions using bayesian analysis," *Journal of loss prevention in the process industries*, vol. 25, no. 3, pp. 467–477, 2012.
- [94] F. Ciarapica and G. Giacchetta, "Classification and prediction of occupational injury risk using soft computing techniques: An italian study," *Safety science*, vol. 47, no. 1, pp. 36–49, 2009.
- [95] K. Jilcha and D. Kitaw, "A literature review on global occupational safety and health practice & accidents severity," *International Journal for Quality Research*, vol. 10, no. 2, 2016.
- [96] S. Sarkar, A. Patel, S. Madaan, and J. Maiti, "Prediction of occupational accidents using decision tree approach," in *2016 IEEE Annual India Conference (INDICON)*, IEEE, 2016, pp. 1–6.

- [97] C.-W. Liao, Y.-H. Perng, and T.-L. Chiang, "Discovery of unapparent association rules based on extracted probability," *Decision Support Systems*, vol. 47, no. 4, pp. 354–363, 2009.
- [98] T. Nakata, "Text-mining on incident reports to find knowledge on industrial safety," in *2017 Annual Reliability and Maintainability Symposium (RAMS)*, IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [99] N. Nenonen, "Analysing factors related to slipping, stumbling, and falling accidents at work: Application of data mining methods to finnish occupational accidents and diseases statistics database," *Applied ergonomics*, vol. 44, no. 2, pp. 215–224, 2013.
- [100] C.-W. Cheng, S.-S. Leu, Y.-M. Cheng, T.-C. Wu, and C.-C. Lin, "Applying data mining techniques to explore factors contributing to occupational injuries in taiwan's construction industry," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 48, pp. 214–222, 2012.
- [101] C.-W. Liao and Y.-H. Perng, "Data mining for occupational injuries in the taiwan construction industry," *Safety science*, vol. 46, no. 7, pp. 1091–1102, 2008.
- [102] M. Bevilacqua, F. Ciarapica, and G. Giacchetta, "Industrial and occupational ergonomics in the petrochemical process industry: A regression trees approach," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 40, no. 4, pp. 1468–1479, 2008.
- [103] M. J. Berry and G. S. Linoff, *Data mining techniques: for marketing, sales, and customer relationship management*. John Wiley & Sons, 2004.
- [104] P. Giudici, "Applied data mining: Statistical methods for business and industry, 111–117 john wiley & sons ltd," *The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex*, 2003.
- [105] H. M. Chung and P. Gray, "Data mining," *Journal of management information systems*, vol. 16, no. 1, pp. 11–16, 1999.
- [106] D.-P. Shin, Y.-J. Park, J. Seo, and D.-E. Lee, "Association rules mined from construction accident data," *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 22, no. 4, pp. 1027–1039, 2018.
- [107] S. Sarkar, S. Vinay, and J. Maiti, "Text mining based safety risk assessment and prediction of occupational accidents in a steel plant," in *2016 International Conference on Computational Techniques in Information and Communication Technologies (ICCTICT)*, IEEE, 2016, pp. 439–444.
- [108] P. Berkhout and M. Damen, "Estimating individual occupational risk using registration data," *Safety science*, vol. 82, pp. 95–102, 2016.
- [109] F. Abdat, S. Leclercq, X. Cuny, and C. Tissot, "Extracting recurrent scenarios from narrative texts using a bayesian network: Application to serious occupational accidents with movement disturbance," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 70, pp. 155–166, 2014.
- [110] C.-F. Chi, S.-Z. Lin, and R. S. Dewi, "Graphical fault tree analysis for fatal falls in the construction industry," *Accident Analysis & Prevention*, vol. 72, pp. 359–369, 2014.

- [111] G. Pransky, T. Snyder, A. Dembe, and J. Himmelstein, "Under-reporting of work-related disorders in the workplace: A case study and review of the literature," *Ergonomics*, vol. 42, no. 1, pp. 171–182, 1999.
- [112] N. Bhargava, G. Sharma, R. Bhargava, and M. Mathuria, "Decision tree analysis on j48 algorithm for data mining," *Proceedings of International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*, vol. 3, no. 6, 2013.
- [113] J. R. Quinlan, "Improved use of continuous attributes in c4. 5," *Journal of artificial intelligence research*, vol. 4, pp. 77–90, 1996.
- [114] J. Han and M. Kamber, *Data mining: Concepts and techniques-slides for textbook-chapter 8*, 2001.
- [115] A. M. El-Halees, "Mining students data to analyze e-learning behavior: A case study," *Mining students data to analyze e-Learning behavior: A Case Study*, vol. 29, 2009.
- [116] T. Scheffer, "Finding association rules that trade support optimally against confidence," in *European conference on principles of data mining and knowledge discovery*, Springer, 2001, pp. 424–435.
- [117] *İeksgş yönetmeliği: 2013*, <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/04/20130425-7.htm>, Erişim tarihi: 14-05-2019.
- [118] *Sgk istatistik yıllığı:2007-2016*, http://www.sgk.gov.tr/wps/portal/sgk/tr/kurumsal/istatistik/sgk_istatistik_yilliklari, Erişim tarihi: 10-01-2018.
- [119] W. D. Rowe, *An" Anatomy" of risk*. Environmental Protection Agency, 1975.
- [120] J. K. Chen, "Utility priority number evaluation for fmea," *Journal of failure analysis and Prevention*, vol. 7, no. 5, pp. 321–328, 2007.
- [121] P. Willquist and M. Törner, "Identifying and analysing hazards in manufacturing industry—a review of selected methods and development of a framework for method applicability," *International journal of industrial ergonomics*, vol. 32, no. 3, pp. 165–180, 2003.
- [122] C. Stave and M. Törner, "Exploring the organisational preconditions for occupational accidents in food industry: A qualitative approach," *Safety Science*, vol. 45, no. 3, pp. 355–371, 2007.
- [123] A. Zafra-Cabeza, M. A. Ridao, I. Alvarado, and E. F. Camacho, "Applying risk management to combined heat and power plants," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 23, no. 3, pp. 938–945, 2008.
- [124] H. Kuşan and İ. Özdemir, "İnşaat projelerinde risk yönetimi ve yapay zeka yöntemlerinin kullanımı," *Türkiye Mühendislik Haberleri*, vol. 451, no. 5, pp. 38–43, 2008.
- [125] A. Grassi, R. Gamberini, C. Mora, and B. Rimini, "A fuzzy multi-attribute model for risk evaluation in workplaces," *Safety Science*, vol. 47, no. 5, pp. 707–716, 2009.
- [126] O. Aneziris, I. Papazoglou, and O. Doudakmani, "Assessment of occupational risks in an aluminium processing industry," *International journal of industrial ergonomics*, vol. 40, no. 3, pp. 321–329, 2010.

- [127] P-K. Marhavilas, D. Koulouriotis, and V. Gemeni, "Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 24, no. 5, pp. 477–523, 2011.
- [128] A. Hauke, P. Georgiadou, D. Pinotsi, H. Kallio, S. Lusa, J. Malmelin, *et al.*, "Emergency services: A literature review on occupational safety and health risks," *European Union: European agency for safety and health at work*, 2011.
- [129] S. Mahdevari, K. Shahriar, and A. Esfahanipour, "Human health and safety risks management in underground coal mines using fuzzy topsis," *Science of the Total Environment*, vol. 488, pp. 85–99, 2014.
- [130] B. Esmaeili, M. R. Hallowell, and B. Rajagopalan, "Attribute-based safety risk assessment. 1: Analysis at the fundamental level," *Journal of construction engineering and management*, vol. 141, no. 8, p. 04015021, 2015.
- [131] B. Esmaeili, M. R. Hallowell, and B. Rajagopalan, "Attribute-based safety risk assessment. 11: Predicting safety outcomes using generalized linear models," *Journal of construction engineering and management*, vol. 141, no. 8, p. 04015022, 2015.
- [132] J. Debnath, A. Biswas, P. Sivan, K. N. Sen, and S. Sahu, "Fuzzy inference model for assessing occupational risks in construction sites," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 55, pp. 114–128, 2016.
- [133] W. Wang, X. Liu, and Y. Qin, "A fuzzy fine-kinney-based risk evaluation approach with extended multimooora method based on choquet integral," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 125, pp. 111–123, 2018.
- [134] A. Adem, A. Çolak, and M. Dağdeviren, "An integrated model using swot analysis and hesitant fuzzy linguistic term set for evaluation occupational safety risks in life cycle of wind turbine," *Safety science*, vol. 106, pp. 184–190, 2018.
- [135] M. Braglia, L. Di Donato, R. Gabbrielli, and L. Marrazzini, "The house of safety: A novel method for risk assessment including human misbehaviour," *Safety science*, vol. 110, pp. 249–264, 2018.
- [136] D. Pluess, T. Meyer, J. Masin, P. Mikulasek, and M. Ferjencik, "Joint applicability test of software for laboratory assessment and risk analysis," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 40, pp. 234–240, 2016.
- [137] K. Zwirgmaier, D. Straub, and K. M. Groth, "Capturing cognitive causal paths in human reliability analysis with bayesian network models," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 158, pp. 117–129, 2017.
- [138] D. Li and J. Gao, "Study and application of reliability-centered maintenance considering radical maintenance," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, vol. 23, no. 5, pp. 622–629, 2010.
- [139] *[international electrotechnical commission, iec 61025: 2006, <https://webstore.iec.ch/publication/4311>, Erişim tarihi: 7-01-2018.*
- [140] A. Labib and M. Read, "Not just rearranging the deckchairs on the titanic: Learning from failures through risk and reliability analysis," *Safety science*, vol. 51, no. 1, pp. 397–413, 2013.

- [141] D. H. Stamatis, *Failure mode and effect analysis: FMEA from theory to execution*. ASQ Quality press, 2003.
- [142] K. Meng Tay and C. Peng Lim, "Fuzzy fmea with a guided rules reduction system for prioritization of failures," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 23, no. 8, pp. 1047–1066, 2006.
- [143] B. Almannai, R. Greenough, and J. Kay, "A decision support tool based on qfd and fmea for the selection of manufacturing automation technologies," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 24, no. 4, pp. 501–507, 2008.
- [144] G. A. Keskin and C. Özkan, "An alternative evaluation of fmea: Fuzzy art algorithm," *QQuality and reliability engineering international*, vol. 25, no. 6, pp. 647–661, 2009.
- [145] M. L. Chiozza and C. Ponzetti, "Fmea: A model for reducing medical errors," *Clinica chimica acta*, vol. 404, no. 1, pp. 75–78, 2009.
- [146] M. Abdelgawad and A. R. Fayek, "Risk management in the construction industry using combined fuzzy fmea and fuzzy ahp," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 136, no. 9, pp. 1028–1036, 2010.
- [147] S. Mandal and J. Maiti, "Risk analysis using fmea: Fuzzy similarity value and possibility theory based approach," *Expert Systems with Applications*, vol. 41, no. 7, pp. 3527–3537, 2014.
- [148] J. Trafialek and W. Kolanowski, "Application of failure mode and effect analysis (fmea) for audit of haccp system," *Food Control*, vol. 44, pp. 35–44, 2014.
- [149] M. Mangeli, A. Shahraki, and F. H. Saljooghi, "Improvement of risk assessment in the fmea using nonlinear model, revised fuzzy topsis, and support vector machine," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 69, pp. 209–216, 2019.
- [150] W. Gilchrist, "Modelling failure modes and effects analysis," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 10, no. 5, 1993.
- [151] J. B. Bowles and C. E. Peláez, "Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 50, no. 2, pp. 203–213, 1995.
- [152] M. Ben-Daya and A. Raouf, "A revised failure mode and effects analysis model," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 13, no. 1, pp. 43–47, 1996.
- [153] C.-L. Chang, P.-H. Liu, and C.-C. Wei, "Failure mode and effects analysis using grey theory," *Integrated Manufacturing Systems*, vol. 12, no. 3, pp. 211–216, 2001.
- [154] N. Ravi Sankar and B. S. Prabhu, "Modified approach for prioritization of failures in a system failure mode and effects analysis," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 18, no. 3, pp. 324–336, 2001.
- [155] M. Braglia, M. Frosolini, and R. Montanari, "Fuzzy criticality assessment model for failure modes and effects analysis," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 20, no. 4, pp. 503–524, 2003.

- [156] G. Cassanelli, F. Fantini, G. Serra, and S. Sgatti, "Reliability in automotive electronics: A case study applied to diesel engine control," 2003.
- [157] P. M. Özfirat, "Bulanik önceliklendirme metodu ve hata türü ve etkileri analizini birleştiren yeni bir risk analizi yöntemi," *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 29, no. 4, 2014.
- [158] B. Vahdani, M. Salimi, and M. Charkhchian, "A new fmea method by integrating fuzzy belief structure and topsis to improve risk evaluation process," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 77, no. 1-4, pp. 357–368, 2015.
- [159] C. Dağsuyu, E. Göçmen, M. Narlı, and A. Kokangül, "Classical and fuzzy fmea risk analysis in a sterilization unit," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 101, pp. 286–294, 2016.
- [160] Z. Yang, S. Bonsall, and J. Wang, "Fuzzy rule-based bayesian reasoning approach for prioritization of failures in fmea," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 57, no. 3, pp. 517–528, 2008.
- [161] S. M. Seyed-Hosseini, N. Safaei, and M. Asgharpour, "Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial and evaluation laboratory technique," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 91, no. 8, pp. 872–881, 2006.
- [162] K.-H. Chang and C.-H. Cheng, "A risk assessment methodology using intuitionistic fuzzy set in fmea," *International Journal of Systems Science*, vol. 41, no. 12, pp. 1457–1471, 2010.
- [163] K.-H. Chang and C.-H. Cheng, "Evaluating the risk of failure using the fuzzy owa and dematel method," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 22, no. 2, pp. 113–129, 2011.
- [164] H.-C. Liu, L. Liu, N. Liu, and L.-X. Mao, "Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended vikor method under fuzzy environment," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 17, pp. 12 926–12 934, 2012.
- [165] A. C. Kutlu and M. Ekmekçioğlu, "Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy topsis-based fuzzy ahp," *Expert Systems with Applications*, vol. 39, no. 1, pp. 61–67, 2012.
- [166] K.-H. Chang, Y.-C. Chang, and I.-T. Tsai, "Enhancing fmea assessment by integrating grey relational analysis and the decision making trial and evaluation laboratory approach," *Engineering Failure Analysis*, vol. 31, pp. 211–224, 2013.
- [167] K. Maheswaran and T. Loganathan, "A novel approach for prioritization of failure modes in fmea using mcdm," *International Journal of Engineering Research and Applications*, vol. 3, no. 4, pp. 733–739, 2013.
- [168] K.-H. Chang, Y.-C. Chang, and Y.-T. Lee, "Integrating topsis and dematel methods to rank the risk of failure of fmea," *International Journal of Information Technology & Decision Making*, vol. 13, no. 06, pp. 1229–1257, 2014.
- [169] H.-C. Liu, J.-X. You, Q.-L. Lin, and H. Li, "Risk assessment in system fmea combining fuzzy weighted average with fuzzy decision-making trial and evaluation laboratory," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 28, no. 7, pp. 701–714, 2015.

- [170] H.-C. Liu, J.-X. You, X.-F. Ding, and Q. Su, "Improving risk evaluation in fmea with a hybrid multiple criteria decision making method," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 32, no. 7, pp. 763–782, 2015.
- [171] S. Mandal, K. Singh, R. Behera, S. Sahu, N. Raj, and J. Maiti, "Human error identification and risk prioritization in overhead crane operations using hta, sherpa and fuzzy vikor method," *Expert Systems with Applications*, vol. 42, no. 20, pp. 7195–7206, 2015.
- [172] H. Safari, Z. Faraji, and S. Majidian, "Identifying and evaluating enterprise architecture risks using fmea and fuzzy vikor," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 27, no. 2, pp. 475–486, 2016.
- [173] R. de Queiroz Souza and A. J. Álvares, "Fmea and fta analysis for application of the reliability centered maintenance methodology: Case study on hydraulic turbines," in *ABCM Symposium Series in Mechatronics*, vol. 3, 2008, pp. 803–812.
- [174] S. Khaiyum and Y. Kumaraswamy, "An effective method for the identification of potential failure modes of a system by integrating fta and fmea," in *ICT and Critical Infrastructure: Proceedings of the 48th Annual Convention of Computer Society of India-Vol I*, Springer, 2014, pp. 679–686.
- [175] S. Khaiyum and Y. Kumaraswamy, "Integration of fmea and fta for effective failure management in real time embedded projects," *Integrated Journal of British*, vol. 1, no. 3, pp. 12–25, 2014.
- [176] Y. F. Zhang, R. B. Zhou, J. M. Yang, and Z. Zhang, "Application of fta-fmea method in fault diagnosis of tracked vehicle," in *Advanced Materials Research*, Trans Tech Publ, vol. 940, 2014, pp. 112–115.
- [177] L. E. G. Martins and T. Gorschek, "Requirements engineering for safety-critical systems: Overview and challenges," *IEEE Software*, vol. 34, no. 4, pp. 49–57, 2017.
- [178] D.-S. Chang and K.-L. Paul Sun, "Applying dea to enhance assessment capability of fmea," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 26, no. 6, pp. 629–643, 2009.
- [179] Y.-M. Wang, K.-S. Chin, G. K. K. Poon, and J.-B. Yang, "Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy weighted geometric mean," *Expert systems with applications*, vol. 36, no. 2, pp. 1195–1207, 2009.
- [180] Z. Zhang and X. Chu, "Risk prioritization in failure mode and effects analysis under uncertainty," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 1, pp. 206–214, 2011.
- [181] H.-C. Liu, Y.-Z. Chen, J.-X. You, and H. Li, "Risk evaluation in failure mode and effects analysis using fuzzy digraph and matrix approach," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol. 27, no. 4, pp. 805–816, 2016.
- [182] J. Yang, H.-Z. Huang, L.-P. He, S.-P. Zhu, and D. Wen, "Risk evaluation in failure mode and effects analysis of aircraft turbine rotor blades using dempster-shafer evidence theory under uncertainty," *Engineering Failure Analysis*, vol. 18, no. 8, pp. 2084–2092, 2011.

- [183] H.-C. Liu, L. Liu, Q.-H. Bian, Q.-L. Lin, N. Dong, and P.-C. Xu, "Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory," *Expert Systems with Applications*, vol. 38, no. 4, pp. 4403–4415, 2011.
- [184] B. H. Lee, "Using bayes belief networks in industrial fmea modeling and analysis," in *Annual Reliability and Maintainability Symposium. 2001 Proceedings. International Symposium on Product Quality and Integrity (Cat. No. 01CH37179)*, IEEE, 2001, pp. 7–15.
- [185] K. Xu, L. C. Tang, M. Xie, S. L. Ho, and M. Zhu, "Fuzzy assessment of fmea for engine systems," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 75, no. 1, pp. 17–29, 2002.
- [186] K.-H. Chang, "Evaluate the orderings of risk for failure problems using a more general rpn methodology," *Microelectronics Reliability*, vol. 49, no. 12, pp. 1586–1596, 2009.
- [187] M. Rafie and F. S. Namin, "Prediction of subsidence risk by fmea using artificial neural network and fuzzy inference system," *International Journal of Mining Science and Technology*, vol. 25, no. 4, pp. 655–663, 2015.
- [188] S. Man, A. H. Chan, and H. Wong, "Risk-taking behaviors of hong kong construction workers—a thematic study," *Safety Science*, vol. 98, pp. 25–36, 2017.
- [189] M. Deng, A. H. Chan, F. Wu, and L. Sun, "Depth perception, dark adaptation, vigilance and accident proneness of chinese coal mine workers," *International journal of occupational safety and ergonomics*, vol. 24, no. 3, pp. 450–456, 2018.
- [190] H. Asadi, D. Yu, and J. H. Mott, "Risk factors for musculoskeletal injuries in airline maintenance, repair & overhaul," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 70, pp. 107–115, 2019.
- [191] B. Çakmak and E. Ergül, "Interactions of personal and occupational risk factors on hand grip strength of winter pruners," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 67, pp. 192–200, 2018.
- [192] M. C. Schall Jr, N. B. Fethke, and V. Roemig, "Digital human modeling in the occupational safety and health process: An application in manufacturing," *IIEE transactions on occupational ergonomics and human factors*, vol. 6, no. 2, pp. 64–75, 2018.
- [193] C. Zetterberg, M. Heiden, P. Lindberg, P. Nylén, and H. Hemphälä, "Reliability of a new risk assessment method for visual ergonomics," *International Journal of Industrial Ergonomics*, vol. 72, pp. 71–79, 2019.
- [194] M. F. Shipley, A. de Korvin, and K. Omer, "Bifpet methodology versus pert in project management: Fuzzy probability instead of the beta distribution," *Journal of Engineering and Technology management*, vol. 14, no. 1, pp. 49–65, 1997.
- [195] U. Z. Sanal, "A decision support system for fuzzy scheduling of software projects," in *2000 IEEE Autotestcon Proceedings. IEEE Systems Readiness Technology Conference. Future Sustainment for Military Aerospace (Cat. No. 00CH37057)*, IEEE, 2000, pp. 263–272.

- [196] M. F. Shipley and G. L. Stading, "Supplier selection decisions: A fuzzy logic model based on quality aspects of delivery," in *International Conference on Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based Systems*, Springer, 2012, pp. 1–9.
- [197] S. Altuntas, J. Davis, and T. Dereli, "Predicting the innovation capability of investment projects using the bİfpet algorithm: A framework and case study," *Journal of Engineering Research*, vol. 4, no. 4, 2016.
- [198] D. Vose, *Risk analysis: a quantitative guide*. John Wiley & Sons, 2008.
- [199] R. P. Covert and L. COVARUS, "Analytic method for probabilistic cost and schedule risk analysis," *NASA Office of Program Analysis and Evaluation (PAE) Cost Analysis Division (CAD)*, pp. 186–187, 2013.
- [200] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied statistics and probability for engineers*. John Wiley & Sons, 2010.
- [201] İ. Gür, "Proje yönetiminde pert/cpm'in proses modeli ile simüle edilmesi ve bir uygulama," PhD thesis, Yüksek Lisans Tezi, Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Gebze, 2006.
- [202] A. Mishakova, A. Vakhrushkina, V. Murgul, and T. Sazonova, "Project control based on a mutual application of pert and earned value management methods," *Procedia engineering*, vol. 165, pp. 1812–1817, 2016.
- [203] A. Klingel Jr, "Bias in pert project completion time calculations for a real network," *Management Science*, vol. 13, no. 4, B–194, 1966.
- [204] W. Agyei, "Project planning and scheduling using pert and cpm techniques with linear programming: Case study," *International Journal of Scientific & Technology Research*, vol. 4, no. 8, pp. 222–227, 2015.
- [205] Y. Alper, "Bazı ülkelerde işçi sağlığı işgüvenliği uygulamaları ve türkiye'deki uygulama ile karşılaştırılması," *Sosyal Siyaset Konferansları Dergisi*, no. 37-38, pp. 83–101, 1988.
- [206] *Ilo: 1919*, https://www.ilo.org/public/libdoc/ilo/1920/20B09_18_eng1.pdf, Erişim tarihi: 19-01-2019.
- [207] W. H. Organization *et al.*, "The first ten years of the world health organization," 1958.
- [208] *Osha: 1970*, <https://www.osha.gov/about.html>, Erişim tarihi: 19-01-2019.
- [209] O. Safety, "Health program management guidelines," *US Department of Labor*, 1989.
- [210] B. Bhagawati, "Basics of occupational safety and health," *IOSR J Environ Sci Toxicol Food Technol*, vol. 9, pp. 91–94, 2015.
- [211] S. Inanc and C. Agyürek, "Effects of occupational health and safety law on forestry employees," *APPLIED ECOLOGY AND ENVIRONMENTAL RESEARCH*, vol. 17, no. 2, pp. 4595–4606, 2019.

- [212] A. Hamid, A. Razak, A. Yusof, R. Jaya, R. Zakaria, E. Aminudin, M. Anuar, K. Yahya, Z. Haron, R. Yunus, *et al.*, “Noncompliance of the occupational safety and health legislation in the malaysian construction industry,” in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, IOP Publishing, vol. 220, 2019, p. 012043.
- [213] E. Atusingwize, G. Musinguzi, R. Ndejjo, E. Buregyeya, B. Kayongo, R. Mubeezi, R. K. Mugambe, A. Ali Halage, D. K. Sekimpi, W. Bazeyo, *et al.*, “Occupational safety and health regulations and implementation challenges in uganda,” *Archives of environmental & occupational health*, vol. 74, no. 1-2, pp. 58–65, 2019.
- [214] M. Fargnoli, M. Lombardi, D. Puri, L. Casorri, E. Masciarelli, S. Mandić-Rajčević, and C. Colosio, “The safe use of pesticides: A risk assessment procedure for the enhancement of occupational health and safety (ohs) management,” *International journal of environmental research and public health*, vol. 16, no. 3, p. 310, 2019.
- [215] T. Aven, “Risk assessment and risk management: Review of recent advances on their foundation,” *European Journal of Operational Research*, vol. 253, no. 1, pp. 1–13, 2016.
- [216] M. A. Friend and J. P. Kohn, *Fundamentals of occupational safety and health*. Rowman & Littlefield, 2007.
- [217] *Iso 45001: 2018*, <https://www.iso.org/standard/63787.html>, Erişim tarihi: 05-05-2019.
- [218] *Iso 31000: 2018*, <https://www.iso.org/iso-31000-risk-management.html>, Erişim tarihi: 05-05-2019.
- [219] H. C. Akdağ, K. A. Uysal, and U. Sezgin, “Risk analysis for occupational health and safety and risk improvement: A case study in an electric electronic company,” *Journal of Economics, Business and Management*, vol. 4, no. 9, pp. 515–522, 2016.
- [220] K. Antosz and R. C. Ratnayake, “Spare parts’ criticality assessment and prioritization for enhancing manufacturing systems’ availability and reliability,” *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 50, pp. 212–225, 2019.
- [221] A. Vaysi, A. Rohani, M. Tabasizadeh, F. Kolahan, *et al.*, “Using fuzzy fmea approach to improve decision-making process in cnc machine electrical and control equipment failure prediction,” *International Journal of Industrial Engineering & Production Research*, vol. 29, no. 3, pp. 359–376, 2018.
- [222] M. H. Alencar and A. T. de Almeida, “A multicriteria decision model for assessment of failure consequences in the rcm approach,” *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, 2015.
- [223] J. K. Vaurio, “Importance measures in risk-informed decision making: Ranking, optimisation and configuration control,” *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 96, no. 11, pp. 1426–1436, 2011.
- [224] R. K. Sharma and P. Sharma, “System failure behavior and maintenance decision making using, rca, fmea and fm,” *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, vol. 16, no. 1, pp. 64–88, 2010.

- [225] M. Manzini and M. Urgo, "A risk based approach to support the supplying of components in a mto assembly process," *Journal of manufacturing systems*, vol. 46, pp. 67–78, 2018.
- [226] L. Ocampo, J. G. Masbad, V. M. Noel, and R. S. Omega, "Supply-side inoperability input–output model (sum) for risk analysis in manufacturing systems," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 41, pp. 76–85, 2016.
- [227] B. Bettayeb, S. Bassetto, and M. Sahnoun, "Quality control planning to prevent excessive scrap production," *Journal of Manufacturing Systems*, vol. 33, no. 3, pp. 400–411, 2014.
- [228] A. Pariyani, W. D. Seider, U. G. Oktem, and M. Soroush, "Dynamic risk analysis using alarm databases to improve process safety and product quality: Part 1—data compaction," *AIChE Journal*, vol. 58, no. 3, pp. 812–825, 2012.
- [229] A. Segismundo and P. Augusto Cauchick Miguel, "Failure mode and effects analysis (fmea) in the context of risk management in new product development: A case study in an automotive company," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 25, no. 9, pp. 899–912, 2008.
- [230] D. Huang, J. Zhang, and M. Liu, "Application of a health risk classification method to assessing occupational hazard in china," in *2009 3rd International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering*, IEEE, 2009, pp. 1–5.
- [231] F. H. Van Duijne, D. van Aken, and E. G. Schouten, "Considerations in developing complete and quantified methods for risk assessment," *Safety Science*, vol. 46, no. 2, pp. 245–254, 2008.
- [232] L. V. Rosa, A. N. Haddad, and P. V. R. de Carvalho, "Assessing risk in sustainable construction using the functional resonance analysis method (fram)," *Cognition, Technology & Work*, vol. 17, no. 4, pp. 559–573, 2015.
- [233] W. Li, Q. Cao, M. He, and Y. Sun, "Industrial non-routine operation process risk assessment using job safety analysis (jsa) and a revised petri net," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 117, pp. 533–538, 2018.
- [234] P. Marhavilas and D. Koulouriotis, "Developing a new alternative risk assessment framework in the work sites by including a stochastic and a deterministic process: A case study for the greek public electric power provider," *Safety Science*, vol. 50, no. 3, pp. 448–462, 2012.
- [235] G. F. Can and P. Toktas, "A novel fuzzy risk matrix based risk assessment approach," *Kybernetes*, vol. 47, no. 9, pp. 1721–1751, 2018.
- [236] A. Karasan, E. Ilbahar, S. Cebi, and C. Kahraman, "A new risk assessment approach: Safety and critical effect analysis (scea) and its extension with pythagorean fuzzy sets," *Safety science*, vol. 108, pp. 173–187, 2018.
- [237] R. Fattahi and M. Khalilzadeh, "Risk evaluation using a novel hybrid method based on fmea, extended multimoora, and ahp methods under fuzzy environment," *Safety science*, vol. 102, pp. 290–300, 2018.
- [238] H. Wang, J. Li, D. Wang, and Z. Huang, "A novel method of fuzzy fault tree analysis combined with vb program to identify and assess the risk of coal dust explosions," *PloS one*, vol. 12, no. 8, e0182453, 2017.

- [239] B. Suhardi, A. A. V. Estianto, and P. W. Laksono, "Analysis of potential work accidents using hazard identification, risk assessment and risk control (hirarc) method," in *2016 2nd International Conference of Industrial, Mechanical, Electrical, and Chemical Engineering (ICIMECE)*, IEEE, 2016, pp. 196–200.
- [240] D. E. Nordgård and K. Sand, "Application of bayesian networks for risk analysis of mv air insulated switch operation," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 95, no. 12, pp. 1358–1366, 2010.
- [241] A. Sachdeva, P. Kumar, and D. Kumar, "Maintenance criticality analysis using topsis," in *2009 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, IEEE, 2009, pp. 199–203.
- [242] M. Braglia, "Mafma: Multi-attribute failure mode analysis," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 17, no. 9, pp. 1017–1033, 2000.
- [243] J. Peeters, R. J. Basten, and T. Tinga, "Improving failure analysis efficiency by combining fta and fmea in a recursive manner," *Reliability engineering & system safety*, vol. 172, pp. 36–44, 2018.
- [244] W. Song, X. Ming, Z. Wu, and B. Zhu, "Failure modes and effects analysis using integrated weight-based fuzzy topsis," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 26, no. 12, pp. 1172–1186, 2013.
- [245] G. Koulinas, P. Marhavilas, O. Demesouka, A. Vavatsikos, and D. Koulouriotis, "Risk analysis and assessment in the worksites using the fuzzy-analytical hierarchy process and a quantitative technique—a case study for the greek construction sector," *Safety science*, vol. 112, pp. 96–104, 2019.
- [246] H.-W. Lo, J. J. Liou, C.-N. Huang, and Y.-C. Chuang, "A novel failure mode and effect analysis model for machine tool risk analysis," *Reliability Engineering & System Safety*, vol. 183, pp. 173–183, 2019.
- [247] S. Seker, F. Recal, and H. Basligil, "A combined dematel and grey system theory approach for analyzing occupational risks: A case study in turkish shipbuilding industry," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 23, no. 6, pp. 1340–1372, 2017.
- [248] B. Nepal and O. P. Yadav, "Bayesian belief network-based framework for sourcing risk analysis during supplier selection," *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 20, pp. 6114–6135, 2015.
- [249] P.-T. Chuang, "Incorporating disservice analysis to enhance perceived service quality," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 110, no. 3, pp. 368–391, 2010.
- [250] A. Badri, B. Boudreau-Trudel, and A. S. Souissi, "Occupational health and safety in the industry 4.0 era: A cause for major concern?" *Safety Science*, vol. 109, pp. 403–411, 2018.
- [251] O. Saritas and S. Burmaoglu, "The evolution of the use of foresight methods: A scientometric analysis of global fta research output," *Scientometrics*, vol. 105, no. 1, pp. 497–508, 2015.
- [252] M.-J. Shih, D.-R. Liu, and M.-L. Hsu, "Discovering competitive intelligence by mining changes in patent trends," *Expert Systems with Applications*, vol. 37, no. 4, pp. 2882–2890, 2010.

- [253] F. K. M. TÜRK, “İşletmelerde teknoloji yönetiminin geleceği,” *Niğde Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, vol. 1, no. 1, pp. 59–71, 2008.
- [254] F. Brocal, C. González, and M. Sebastián, “Technique to identify and characterize new and emerging risks: A new tool for application in manufacturing processes,” *Safety science*, vol. 109, pp. 144–156, 2018.
- [255] P. Hämmäläinen, “The effect of globalization on occupational accidents,” *Safety Science*, vol. 47, no. 6, pp. 733–742, 2009.
- [256] N. A. of Sciences, *A smarter national surveillance system for occupational safety and health in the 21st century*. National Academies Press, 2018.
- [257] G. D. Molero, F. E. Santarremigia, S. Poveda-Reyes, M. Mayrhofer, S. Awad-Núñez, and A. Kassabji, “Key factors for the implementation and integration of innovative ict solutions in smes and large companies involved in the multimodal transport of dangerous goods,” *European Transport Research Review*, vol. 11, no. 1, p. 28, 2019.
- [258] F. B. Fernández and M. Á. S. Pérez, “Analysis and modeling of new and emerging occupational risks in the context of advanced manufacturing processes,” *Procedia Engineering*, vol. 100, pp. 1150–1159, 2015.
- [259] T. Dünder, *İş sağlığı ve güvenliği alanında kişisel koruyucu donanımların kullanımını etkinleştirmek için rfid tabanlı sistem önerisi*, İzmir, 2018.
- [260] C.-H. Chen, C.-K. Ting, and Y. Nojima, *Special issue on soft computing for big data and social informatics*, 2017.
- [261] C.-C. Tsao, C.-Y. Fan, and P.-C. Chang, “A patent quality classification model based on artificial immune system,” in *Proceedings of the ASE BigData & SocialInformatics 2015*, ACM, 2015, p. 45.
- [262] P. A. F. Arroyo, “Metric learning for patent similarity,”
- [263] S. Altuntas, T. Dereli, and A. Kusiak, “Forecasting technology success based on patent data,” *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 96, pp. 202–214, 2015.
- [264] G. M. Bacioiu and Z. J. Pasek, “Method of technology analysis based on patent examination and design methodology used to determine the technological progress in blood pressure monitors,” *International Journal of Innovation and Technology Management*, vol. 9, no. 04, p. 1 250 027, 2012.
- [265] S. Jun, “Ipc code analysis of patent documents using association rules and maps–patent analysis of database technology,” in *Database Theory and Application, Bio-Science and Bio-Technology*, Springer, 2011, pp. 21–30.
- [266] D. Wu and Z. Li, “Work safety success theory based on dynamic safety entropy model,” *Safety science*, vol. 113, pp. 438–444, 2019.
- [267] Y. Niu, W. Lu, F. Xue, D. Liu, K. Chen, D. Fang, and C. Anumba, “Towards the “third wave”: An sco-enabled occupational health and safety management system for construction,” *Safety science*, vol. 111, pp. 213–223, 2019.
- [268] M. McNinch, D. Parks, R. Jacksha, and A. Miller, “Leveraging iiot to improve machine safety in the mining industry,” *Mining, Metallurgy & Exploration*, vol. 36, no. 4, pp. 675–681, 2019.

- [269] Ö. Ç. Yavuz, *İş sağlığı ve güvenliği önlemlerinin etkinliklerinin göz izleme cihazı ile belirlenmesi*, Erzurum, 2008.
- [270] M. Eryüksel, *Kablosuz iletişim araçlarının sağlık ve güvenlik alanında kullanılması "karekod ve nfc"*, İstanbul, 2017.
- [271] H. Özen, *İnternet erişimi olmayan alanlarda uygunsuzluk bildirimlerinin iş sağlığı ve güvenliği otomasyon sistemlerine aktarılması için mobil yazılım geliştirilmesi*, İstanbul, 2017.
- [272] P. McAleenan, C. McAleenan, G. Ayers, M. Behm, and Z. Beachem, "The ethics deficit in occupational safety and health monitoring technologies," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Management, Procurement and Law*, vol. 172, no. 3, pp. 93–100, 2018.
- [273] M.-J. Sepúlveda, *Integrating information technologies safety into occupational and environmental safety management systems*, 2019.
- [274] M. Grabowski, A. Rowen, and J.-P. Rancy, "Evaluation of wearable immersive augmented reality technology in safety-critical systems," *Safety science*, vol. 103, pp. 23–32, 2018.
- [275] B. Choi, S. Hwang, and S. Lee, "What drives construction workers' acceptance of wearable technologies in the workplace?: Indoor localization and wearable health devices for occupational safety and health," *Automation in Construction*, vol. 84, pp. 31–41, 2017.
- [276] D.-C. Darabont, R. I. Moraru, A. E. Antonov, and C. Bejinariu, "Managing new and emerging risks in the context of iso 45001 standard," *Calitatea*, vol. 18, no. S1, p. 11, 2017.
- [277] Z. Burtan, M. Kapusta, and D. Nowak-Senderowska, "Teaching occupational safety and health at agh university of science and technology in krakow," *INZYNIERIA MINERALNA-JOURNAL OF THE POLISH MINERAL ENGINEERING SOCIETY*, no. 2, pp. 171–182, 2017.
- [278] J. E. Weidman, D. E. Dickerson, and C. T. Koebel, "Technology champions: A theory-based intervention to improve adoption of occupational safety innovations," *International Journal of Construction Education and Research*, vol. 12, no. 3, pp. 193–207, 2016.
- [279] S. Mattsson, J. Partini, and Å. Fast-Berglund, "Evaluating four devices that present operator emotions in real-time," *Procedia CIRP*, vol. 50, pp. 524–528, 2016.
- [280] J. Kaivo-Oja, P. Virtanen, H. Jalonen, and J. Stenvall, "The effects of the internet of things and big data to organizations and their knowledge management practices," in *International Conference on Knowledge Management in Organizations*, Springer, 2015, pp. 495–513.
- [281] R. Koivisto, N. Wessberg, A. Eerola, T. Ahlqvist, S. Kivisaari, J. Myllyoja, and M. Halonen, "Integrating future-oriented technology analysis and risk assessment methodologies," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 76, no. 9, pp. 1163–1176, 2009.

- [282] V. L. Blank, F. Diderichsen, and R. Andersson, "Technological development and occupational accidents as a conditional relationship: A study of over eighty years in the swedish mining industry," *Journal of Safety Research*, vol. 27, no. 3, pp. 137–146, 1996.
- [283] S. Matsuda, N. A. Luong, H. Jonai, N. Van HOAI, D. H. THUNG, L. Van TRINH, H. M. HIEN, P. H. DAT, D. D. TRI, *et al.*, "A preliminary analysis of technology transfer and occupational safety and health in vietnam," *Journal of Occupational Health*, vol. 38, no. 3, pp. 103–106, 1996.
- [284] V. G. Isaev and N. P. Astasheva, "The use of information technology in teaching occupational health and safety," in *2018 IEEE International Conference" Quality Management, Transport and Information Security, Information Technologies"(IT&QM&IS)*, IEEE, 2018, pp. 212–215.
- [285] L.-j. Zhou, Q.-g. Cao, K. Yu, L.-l. Wang, and H.-b. Wang, "Research on occupational safety, health management and risk control technology in coal mines," *International journal of environmental research and public health*, vol. 15, no. 5, p. 868, 2018.
- [286] D. Podgorski, K. Majchrzycka, A. Dąbrowska, G. Gralewicz, and M. Okrasa, "Towards a conceptual framework of osh risk management in smart working environments based on smart ppe, ambient intelligence and the internet of things technologies," *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 23, no. 1, pp. 1–20, 2017.
- [287] A. Grabowski and J. Jankowski, "Virtual reality-based pilot training for underground coal miners," *Safety science*, vol. 72, pp. 310–314, 2015.
- [288] J. R. Gisbert, C. Palau, M. Uriarte, G. Prieto, J. A. Palazón, M. Esteve, O. López, J. Correas, M. C. Lucas-Estañ, P. Giménez, *et al.*, "Integrated system for control and monitoring industrial wireless networks for labor risk prevention," *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 39, pp. 233–252, 2014.
- [289] T. M. Ruff and T. P. Holden, "Preventing collisions involving surface mining equipment: A gps-based approach," *Journal of safety research*, vol. 34, no. 2, pp. 175–181, 2003.
- [290] J. P. Martino, *Technological forecasting for decision making*. McGraw-Hill, Inc., 1993.
- [291] H. Chen, G. Zhang, D. Zhu, and J. Lu, "A patent time series processing component for technology intelligence by trend identification functionality," *Neural Computing and applications*, vol. 26, no. 2, pp. 345–353, 2015.
- [292] M. Smith and R. Agrawal, "A comparison of time series model forecasting methods on patent groups.," in *MAICS*, 2015, pp. 167–173.
- [293] G. Dikta, "Time series methods to forecast patent filings," in *Forecasting Innovations*, Springer, 2006, pp. 95–124.
- [294] N. Meade, "An assessment of the comparative accuracy of time series forecasts of patent filings: The benefits of disaggregation in space or time," in *Forecasting Innovations*, Springer, 2006, pp. 41–72.
- [295] G. Brunk, "Swarming of innovations, fractal patterns, and the historical time series of us patents," *Scientometrics*, vol. 56, no. 1, pp. 61–80, 2003.

- [296] F. Yoshikane, "Multiple regression analysis of a patent's citation frequency and quantitative characteristics: The case of Japanese patents," *Scientometrics*, vol. 96, no. 1, pp. 365–379, 2013.
- [297] F. Altuntaş and M. K. Yılmaz, "Patent analizi ile teknoloji ağlarının oluşturulması,"
- [298] J.-L. Hou and H.-Y. Lin, "A multiple regression model for patent appraisal," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 106, no. 9, pp. 1304–1332, 2006.
- [299] M. Dehghani Madvar, A. Aslani, M. H. Ahmadi, and N. S. Karbalaie Ghomi, "Current status and future forecasting of biofuels technology development," *International Journal of Energy Research*, vol. 43, no. 3, pp. 1142–1160, 2019.
- [300] A. C. Adamuthe and G. T. Thampi, "Technology forecasting: A case study of computational technologies," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 143, pp. 181–189, 2019.
- [301] J. B. Padilla, J. W. Zartha, V. T. Álvarez, and G. L. Orozco, "Vigilancia tecnológica para la identificación de innovaciones en subproductos de la curtición," *Información tecnológica*, vol. 29, no. 4, pp. 127–142, 2018.
- [302] G. Mao, T. Shi, S. Zhang, J. Crittenden, S. Guo, and H. Du, "Bibliometric analysis of insights into soil remediation," *Journal of soils and sediments*, vol. 18, no. 7, pp. 2520–2534, 2018.
- [303] H. Hamidi and K. Fazeli, "Using internet of things and biosensors technology for health applications," *IET Wireless Sensor Systems*, vol. 8, no. 6, pp. 260–267, 2018.
- [304] S. Lokuhitige and S. Brown, "Forecasting maturity of IoT technologies in top 5 countries using bibliometrics and patent analysis," in *2017 International Conference on Cyber-Enabled Distributed Computing and Knowledge Discovery (CyberC)*, IEEE, 2017, pp. 338–341.
- [305] N. J. Sheikh and O. Sheikh, "Forecasting of biosensor technologies for emerging point of care and medical IoT applications using bibliometrics and patent analysis," in *2016 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, IEEE, 2016, pp. 3082–3093.
- [306] Y. Cho and T. Daim, "Oled tv technology forecasting using technology mining and the fisher-pry diffusion model," *foresight*, vol. 18, no. 2, pp. 117–137, 2016.
- [307] M. D. Madvar, H. Khosropour, A. Khosravanian, M. Mirafshar, A. Azaribeni, M. Rezapour, and B. Nouri, "Patent-based technology life cycle analysis: The case of the petroleum industry," vol. 10, no. 4 (eng), 2016.
- [308] J. Sepúlveda, A. Paternina, and A. Suarez, "Patent applications as source for measuring technological performance," *Scientometrics*, vol. 98, no. 2, pp. 1385–1395, 2014.
- [309] T. U. Daim, G. Rueda, H. Martin, and P. Gerdtsri, "Forecasting emerging technologies: Use of bibliometrics and patent analysis," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 73, no. 8, pp. 981–1012, 2006.

- [310] L. Wu and L. Wu, "Pharmaceutical patent evaluation and licensing using a stochastic model and monte carlo simulations," *Nature biotechnology*, vol. 29, no. 9, p. 798, 2011.
- [311] H. Ernst, S. Legler, and U. Lichtenthaler, "Determinants of patent value: Insights from a simulation analysis," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 77, no. 1, pp. 1–19, 2010.
- [312] P. Wang, I. M. Cockburn, and M. L. Puterman, "Analysis of patent data—a mixed-poisson-regression-model approach," *Journal of Business & Economic Statistics*, vol. 16, no. 1, pp. 27–41, 1998.
- [313] E. Doğanavşargil and M. Fattori, "Decision tree analysis as a tool to optimise patent current awareness bulletins," *World Patent Information*, vol. 30, no. 3, pp. 212–219, 2008.
- [314] P. Beveratos, M. Freire, M. Guglielmi, and S. Lascar, "A tool to support the patent process: The patent decision tree," in *International astronautical federation–56th international astronautical congress*, vol. 8, 2005, pp. 5028–37.
- [315] L. Xiao, G. Wang, and Y. Liu, "Patent text classification based on naive bayesian method," in *2018 11th International Symposium on Computational Intelligence and Design (ISCID)*, IEEE, vol. 1, 2018, pp. 57–60.
- [316] K. Lee, I. Park, and B. Yoon, "An approach for r&d partner selection in alliances between large companies, and small and medium enterprises (smes): Application of bayesian network and patent analysis," *Sustainability*, vol. 8, no. 2, p. 117, 2016.
- [317] S. Choi and S. Jun, "Vacant technology forecasting using new bayesian patent clustering," *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 26, no. 3, pp. 241–251, 2014.
- [318] S. Jun and S.-J. Lee, "Patent analysis using bayesian network models," *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, vol. 7, no. 3, pp. 205–212, 2013.
- [319] K. Lee, D. Go, I. Park, and B. Yoon, "Exploring suitable technology for small and medium-sized enterprises (smes) based on a hidden markov model using patent information and value chain analysis," *Sustainability*, vol. 9, no. 7, p. 1100, 2017.
- [320] M. Grimaldi, L. Cricelli, M. Di Giovanni, and F. Rogo, "The patent portfolio value analysis: A new framework to leverage patent information for strategic technology planning," *Technological forecasting and social change*, vol. 94, pp. 286–302, 2015.
- [321] X. Wang and C. Carlsson, "Patent-related decision-making with fuzzy real option analysis," *International Journal of Mathematics in Operational Research*, vol. 9, no. 4, pp. 467–486, 2016.
- [322] M. Collan, R. Fuller, X. Wang, and J. Mezei, "Numerical patent analysis with the fuzzy pay-off method: Valuing a compound real option," in *2011 Fourth International Conference on Business Intelligence and Financial Engineering*, IEEE, 2011, pp. 405–409.

- [323] C. M. Leung and Y. K. Kwok, "Real options game analysis of sleeping patents," *Decisions in Economics and Finance*, vol. 34, no. 1, pp. 41–65, 2011.
- [324] M. Collan and M. Heikkilä, "Enhancing patent valuation with the pay-off method," 2011.
- [325] M. Huang, M. Zolnoori, J. E. Balls-Berry, T. A. Brockman, C. A. Patten, and L. Yao, "Technological innovations in disease management: Text mining us patent data from 1995 to 2017," *Journal of medical Internet research*, vol. 21, no. 4, e13316, 2019.
- [326] C.-Y. Lai, S.-Y. Hwang, and C.-P. Wei, "On the patent claim eligibility prediction using text mining techniques," 2018.
- [327] A. Abbas, L. Zhang, and S. U. Khan, "A literature review on the state-of-the-art in patent analysis," *World Patent Information*, vol. 37, pp. 3–13, 2014.
- [328] Y.-H. Tseng, C.-J. Lin, and Y.-I. Lin, "Text mining techniques for patent analysis," *Information Processing & Management*, vol. 43, no. 5, pp. 1216–1247, 2007.
- [329] B. Yoon and Y. Park, "A text-mining-based patent network: Analytical tool for high-technology trend," *The Journal of High Technology Management Research*, vol. 15, no. 1, pp. 37–50, 2004.
- [330] S. Altuntas, T. Dereli, and A. Kusiak, "Analysis of patent documents with weighted association rules," *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 92, pp. 249–262, 2015.
- [331] S. Jun, "A new patent analysis using association rule mining and box-jenkins modeling for technology forecasting," *Information-an International Interdisciplinary Journal*, vol. 16, no. 1 B, pp. 555–562, 2013.
- [332] C. He and H. T. Loh, "Pattern-oriented associative rule-based patent classification," *Expert Systems with applications*, vol. 37, no. 3, pp. 2395–2404, 2010.
- [333] K. Haegeman, E. Marinelli, F. Scapolo, A. Ricci, and A. Sokolov, "Quantitative and qualitative approaches in future-oriented technology analysis (fta): From combination to integration?" *Technological Forecasting and Social Change*, vol. 80, no. 3, pp. 386–397, 2013.
- [334] S. Jun and S. Sung Park, "Examining technological innovation of apple using patent analysis," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 113, no. 6, pp. 890–907, 2013.
- [335] S. Jun, S. S. Park, and D. S. Jang, "Patent management for technology forecasting: A case study of the bio-industry," 2012.
- [336] S. Jun, S. Sung Park, and D. Sik Jang, "Technology forecasting using matrix map and patent clustering," *Industrial Management & Data Systems*, vol. 112, no. 5, pp. 786–807, 2012.
- [337] S. Jun and S.-J. Lee, "Emerging technology forecasting using new patent information analysis," *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, vol. 6, no. 3, pp. 107–115, 2012.

- [338] S. Park and S. Jun, "New technology management using time series regression and clustering," *International Journal of Software Engineering and Its Applications*, vol. 6, no. 2, pp. 155–160, 2012.
- [339] D. C. Montgomery, C. L. Jennings, and M. Kulahci, *Introduction to time series analysis and forecasting*. John Wiley & Sons, 2015.
- [340] G. Rose, "Transit passenger response: Short and long term elasticities using time series analysis," *Transportation*, vol. 13, no. 2, pp. 131–141, 1986.
- [341] G. Kirchgässner and J. Wolters, *Introduction to modern time series analysis*. Springer Science & Business Media, 2007.
- [342] S. K. Ahuja, "Analysis of various time series change detection techniques: An empirical review," *International Journal of Recent Technology and Engineering*, vol. 7, no. 6, pp. 559–561, 2019.
- [343] M. Mudelsee, "Trend analysis of climate time series: A review of methods," *Earth-science reviews*, 2018.
- [344] P. M. Maçaira, A. M. T. Thomé, F. L. C. Oliveira, and A. L. C. Ferrer, "Time series analysis with explanatory variables: A systematic literature review," *Environmental modelling & software*, vol. 107, pp. 199–209, 2018.
- [345] A. Durmuşoğlu, "Effects of clean air act on patenting activities in chemical industry: Learning from past experiences," *Sustainability*, vol. 9, no. 5, p. 862, 2017.
- [346] D. C. Montgomery, *Statistical quality control*. Wiley New York, 2009, vol. 7.
- [347] J. W. Yarahuan, A. Billet, and J. D. Hron, "A quality improvement initiative to decrease platelet ordering errors and a proposed model for evaluating clinical decision support effectiveness," *Applied clinical informatics*, vol. 10, no. 03, pp. 505–512, 2019.
- [348] C. A. Phillips, J. Bailer, E. Foster, P. Dogan, P. Flaherty, D. Baniewicz, E. Smith, A. Reilly, and J. Freedman, "Implementation of an automated pediatric malnutrition screen using anthropometric measurements in the electronic health record," *Journal of the Academy of Nutrition and Dietetics*, vol. 119, no. 8, pp. 1243–1249, 2019.
- [349] R. von Hollesen, R. L. Johansen, C. Rørbye, L. Munk, P. Barker, and A. Kjaerbye-Thygesen, "Successfully reducing newborn asphyxia in the labour unit in a large academic medical centre," *Bmj Quality & Safety*, vol. 27, no. 8, pp. 633–642, 2018.
- [350] L. M. Connelly, "Statistical process control," *Medsurg Nursing*, vol. 27, no. 5, pp. 331–332, 2018.
- [351] B. Zwan, "A method for evaluating treatment quality using in vivo epid dosimetry and statistical process control in radiation therapy," 2017.
- [352] R. Godina, J. C. Matias, and S. G. Azevedo, "Quality improvement with statistical process control in the automotive industry," *International Journal of Industrial Engineering and Management (IJIEM)*, vol. 7, no. 1, pp. 1–8, 2016.
- [353] J. J. Ng, "Statistical process control chart as a project management tool," *IEEE Engineering Management Review*, vol. 46, no. 2, pp. 26–28, 2018.

- [354] N. Burnak, *Toplam kalite yönetimi: istatistiksel süreç kontrolü*. Osmangazi Üniversitesi, 1997.
- [355] H. Hadian and A. Rahimifard, "Multivariate statistical control chart and process capability indices for simultaneous monitoring of project duration and cost," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 130, pp. 788–797, 2019.
- [356] M. Markiewicz, E. Bachtia-Radka, S. Dudzińska, and D. Grochala, "Statistical process control using lmc/mmc modifiers and multidimensional control charts," in *International Scientific-Technical Conference MANUFACTURING*, Springer, 2019, pp. 244–253.
- [357] M. Peralta, M. C. Zea, M. R. Bermeo, X. M. Cervantes, R. Aguirre, R. Peralta, J. Reyes, and G. Antúnez, "Innovación tecnológica en la clasificación y almacenamiento de maíz: Incidencia en la alimentación de animales," *RED-VET. Revista Electrónica de Veterinaria*, vol. 18, no. 2, pp. 1–10, 2017.
- [358] A. Tasdemir, "Effect of autocorrelation on the process control charts in monitoring of a coal washing plant.," *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, vol. 48, no. 2, 2012.
- [359] K. Bardhan, I. Mukherjee, and M. K. Pal, "Mcewma control chart to detect small shift for autocorrelated water treatment process responses," in *2011 IEEE International Conference on Quality and Reliability*, IEEE, 2011, pp. 302–306.
- [360] A. Messaoud, C. Weihs, and F. Hering, *Time series analysis, control charts: An industrial application*, 2005.
- [361] L. C. Alwan and H. V. Roberts, "Time-series modeling for statistical process control," *Journal of Business & Economic Statistics*, vol. 6, no. 1, pp. 87–95, 1988.
- [362] D. G. Wardell, H. Moskowitz, and R. D. Plante, "Run-length distributions of special-cause control charts for correlated processes," *Technometrics*, vol. 36, no. 1, pp. 3–17, 1994.
- [363] C. D. Lewis, *Industrial and business forecasting methods: A practical guide to exponential smoothing and curve fitting*. Butterworth-Heinemann, 1982.
- [364] L. Malinin, "Technology selection based on main parameters of value and fuzzy logic," *International Journal of Business Innovation and Research*, vol. 11, no. 3, pp. 431–443, 2016.
- [365] V. Kuikka, J.-P. Nikkarila, and M. Suojanen, "A technology forecasting method for capabilities of a system of systems," in *2015 Portland International Conference on Management of Engineering and Technology (PICMET)*, IEEE, 2015, pp. 2139–2150.
- [366] J. G. Sun, R. Tan, and J. Guo, "Research on ifr of technological evolution bifurcations," *Procedia engineering*, vol. 131, pp. 590–600, 2015.
- [367] M. Heikkilä, A. Rättä, S. Pieskä, and J. Jämsä, "Security challenges in small-and medium-sized manufacturing enterprises," in *2016 International Symposium on Small-scale Intelligent Manufacturing Systems (SIMS)*, IEEE, 2016, pp. 25–30.

- [368] C.-Y. Wong and H.-N. Fung, “Science-technology-industry correlative indicators for policy targeting on emerging technologies: Exploring the core competencies and promising industries of aspirant economies,” *Scientometrics*, vol. 111, no. 2, pp. 841–867, 2017.



İletişim Bilgileri: nazligulummutlu@gmail.com, nzlgmmmtl@gmail.com

Makale

1. Mutlu, N. G., Altuntas, S. (2019). "Assessment of occupational risks in Turkish manufacturing systems with data-driven models". *Journal of Manufacturing Systems*, 53, 169-182. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2019.09.008>.
2. Mutlu, N. G., Altuntas, S. (2019). "Risk analysis for occupational safety and health in the textile industry: Integration of FMEA, FTA, and BIFPET methods". *International Journal of Industrial Ergonomics*, 72, 222-240. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.05.013>.
3. Mutlu, N. G., Altuntas, S. (2019). "Technique of precise order preference for multiple risk analysis in occupational health and safety: Industrial case studies". *Uluslararası bir dergide değerlendirme sürecinde*.
4. Mutlu, N. G., Altuntas, S. (2019). "Monitoring the change of safety technologies in the field of occupational health and safety with statistical control charts". *Uluslararası bir dergide değerlendirme sürecinde*. *
5. Mutlu, N. G., Altuntas, S. (2019). "Developing an integrated conceptual framework for monitoring and controlling risks in occupational health and safety". *Uluslararası bir dergide değerlendirme sürecinde*.

Konferans Bildirisi

1. Mutlu, N. G., Altuntas, S. 2017. İş Sağlığı ve Güvenliği İçin FMEA ve BIFPET Algoritmasına Dayanan Bir Risk Değerlendirme Yöntemi, XVIII. Uluslararası Ekonometri, Yöneylem Araştırması ve İstatistik Sempozyumu. pp. 185.

Proje

1. Üretim Sistemlerinde İş Sağlığı ve Güvenliği İçin Proaktif Bir Risk Değerlendirme Metodunun Geliştirilmesi, Yükseköğretim Kurumları Destekli Proje, Tamamlandı, 2018-2019. ALTUNTAŞ S. (Yürütücü) , MUTLU N. G. (Araştırmacı)