

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**RİSK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN ÜÇ AŞAMALI SEZGİSEL
BULANIK BİR YAKLAŞIM ÖNERİSİ**

YELDA AYRIM

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
2017**

**RİSK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN ÜÇ AŞAMALI SEZGİSEL
BULANIK BİR YAKLAŞIM ÖNERİSİ**

**AN INTUITINIOISTIC FUZZY THREE STAGE APPROACH
PROPOSAL FOR RISK EVALUATION**

YELDA AYRIM

Başkent Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin
ENDÜSTRİ Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak hazırlanmıştır.

2017

“Risk Değerlendirmesi İçin Üç Aşamalı Sezgisel Bulanık Bir Yaklaşım Önerisi” başlıklı bu çalışma, jürimiz tarafından, 14/07/2017 tarihinde, **ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİğİ ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Başkan

Prof.Dr.Ergün ERASLAN

Üye (Danışman)

Yrd.Doç.Dr.Gülin Feryal CAN

Üye

Doç.Dr.Kumru Didem ATALAY

ONAY

..../07/2017

Prof. Dr. Emin AKATA
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü



BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: 20 / 07 / 2017

Öğrencinin Adı, Soyadı : Yelda AYRIM

Öğrencinin Numarası : 21520175

Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Programı : Yüksek Lisans

Danışmanın Unvanı/Adı, Soyadı : Yrd. Doç. Dr. Gülin Feryal CAN

Tez Başlığı : Risk Değerlendirmesinde Üç Aşamalı Sezgisel Bulanık Bir Yaklaşım

Yukarıda başlığı belirtilen Yüksek Lisans tez çalışmamın; Giriş, Ana Bölümler ve Sonuç Bölümünden oluşan, toplam 113 sayfalık kısmına ilişkin, 20 / 07 / 2017 tarihinde şahsım tarafından Turnitin adlı intihal tespit programından aşağıda belirtilen filtrelemeler uygulanarak alınmış olan orijinallik raporuna göre, tezimin benzerlik oranı % 18’dir.

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimedenden daha az örtüşme içeren metin kısımları hariç

“Başkent Üniversitesi Enstitüleri Tez Çalışması Orijinallik Raporu Alınması ve Kullanılması Usul ve Esaslarını” inceledim ve bu uygulama esaslarında belirtilen azami benzerlik oranlarına tez çalışmamın herhangi bir intihal içermediğini; aksinin tespit edileceği muhtemel durumda doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi ve yukarıda vermiş olduğum bilgilerin doğru olduğunu beyan ederim.

Öğrenci İmzası:

Onay

21 / 07 / 2017

Öğrenci Danışmanı

Yrd. Doç.Dr. Gülin Feryal CAN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca yardımlarını hiç esirgemeyen, fikir ve yönlendirmeleriyle akademik kariyerime büyük katkısı olan tez danışmanım Sayın Yrd.Doç.Dr.Gülin Feryal CAN'a saygılarımı sunar ve sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

Başkent Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü öğretim üyeleri ve araştırma görevlisi arkadaşlarıma çok teşekkür ederim.

Son olarak hayatımın her döneminde olduğu gibi tez çalışmamın da her aşamasında manevi destekleriyle yanımda olan desteklerini esirgemeyen eşime ve aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.



ÖZ

RİSK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN ÜÇ AŞAMALI SEZGİSEL BULANIK BİR YAKLAŞIM ÖNERİSİ

Yelda AYRIM

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

Risk değerlendirme, işletmelerde var olan ya da oluşabilecek tehlikelerin belirlenmesi, bu tehlikelere yol açan faktörler ile tehlikelerden kaynaklanan risklerin derecelendirilmesi ve kontrol tedbirlerinin planlanması amacıyla yapılan çalışmalardır. Literatürde risk değerlendirme amacıyla kullanılan bir çok yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar arasında en yaygın kullanılanlardan birisi Hata Türleri ve Etkileri Analizi (HTEA)'dir. Ancak HTEA'nın etkinliğinin artırılması için geliştirilmesi gereken yönleri bulunmaktadır. Ayrıca, risk değerlendirmede hata türlerini önlemek için sıralamakla birlikte işletmelerin sermaye, zaman gibi gerçekçi kısıtlarını da dikkate alan önlem planlarının yapılması da önemlidir. Bu amaçla tez çalışmasında HTEA'nın geliştirilmesi gereken yönlerini de dikkate alan üç aşamalı bir risk değerlendirme yaklaşımı önerilmiştir. Birinci aşamada risk faktörleri arasında yaratabilecekleri risk seviyeleri açısından benzerlikleri dikkate alan bir ağırlıklandırma yöntemi kullanılarak faktörlere ilişkin önem ağırlıkları belirlenmiştir. İkinci aşamada ise hata türleri arasındaki etkileşimi de yansıtan geliştirilmiş Çok Ölçütlü Sınır Yaklaşım Alanı Kıyaslaması (MABAC) yöntemi ile hata türleri sıralanmıştır. Üçüncü aşamada ise öncelikle önlenmesi gereken hata türlerini belirlemek için işletmenin gerçekçi kısıtlarını yansıtan matematiksel bir model kurulmuştur. Önerilen yaklaşım bulanık sezgisel küme teorisi ile birleştirilerek risk değerlendirme sürecindeki belirsizlik ve elde edilen bilgilerdeki şüphe düzeyleri de çözüm sürecine katılmıştır.

ANAHTAR SÖZCÜKLER: risk değerlendirme, sezgisel bulanık küme, HTEA.

Danışman: Yrd.Doç.Dr. Gülin Feryal CAN, Başkent Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü.

ABSTRACT

AN INTUITINIOISTIC FUZZY THREE STAGE APPROACH PROPOSAL FOR RISK EVALUATION

Yelda AYRIM

Baskent University Institute of Science and Engineering

Industrial Engineering Anabilim Dalı

Risk assessment refers to the identification of the hazards that exists or could exist in the enterprises, the grading of the risks arising from the hazards with the factors that cause these hazards, and the planning of the control measures. There are many approaches in the literature used for risk assessment. Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) is one of the most widespread among this. However, there are aspects of FMEA that needs to be improved in order for it to be a more efficient risk assessment tool. Moreover it is also important to make corrective and preventive action plans that take into account realistic constraints such as capital, time, etc. as well as ranking in order to prevent risk types in risk assessment. Therefore, a three-step risk assessment approach has been proposed for the thesis study. In the first stage, weights were assigned to the factors by using a weighting method that considers similarities accorting to risk levels that could be created among the risk factors. In the second stage, risk modes is ranked with MABAC method that represents also interaction between risk modes. Based on aspect that needs to be improved of FMEA weights and ranking system is developed in first and second stage. In third and last stage mathematical model that consider realistic constraint of enterprises is established to determine the modes of risks that should be prevented. The proposed approach is combined with the intuitinioistic fuzzy set theory, and the uncertainty in the risk assessment process and the level of suspicion in the obtained information have also been incorporated into the solution process.

KEYWORDS: risk assessment, intuitinioistic fuzzy set, FMEA.

Danışman: Ass. Prof. Gülin Feryal CAN, Baskent University, Industrial Engineering Department.

İÇİNDEKİLER LİSTESİ

Sayfa

ÖZ	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER LİSTESİ	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	v
ÇİZELGELER LİSTESİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	ix
1. GİRİŞ.....	1
2. RİSK DEĞERLENDİRMESİ	6
2.1. Temel Kavramlar	6
2.2. Risk Değerlendirme Aşamaları	8
3. HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (HTEA)	12
3.1. HTEA Tanımı	12
3.2. Geleneksel HTEA'nın İşleyişi.....	15
3.3. HTEA Çeşitleri	19
3.4. HTEA Aşamaları	21
3.5. HTEA'ne İlişkin Literatür Araştırması	23
3.6. HTEA'nin Geliştirilmesi Gereken Yönleri.....	27
4. ÇOK ÖLÇÜTLÜ SINIR YAKLAŞIM ALANI KIYASLAMASI (THE MULTIATTRİBUTİVE BORDER APPROXİMATION AREA COMPARİSON (MABAC)) YÖNTEMİ.....	29
5. SEZGİSEL BULANIK KÜME (SBK) TEORİSİ	32
5.1. Sezgisel Bulanık Küme Kavramı.....	32
5.2. Sezgisel Bulanık Kümelerde Aritmetik Operatörler	34
5.3. Sezgisel Bulanık Kümelerde Birleştirme Operatörleri	35
5.4. Sezgisel Bulanık Sayı (SBS).....	36
5.4.1. Üçgensel sezgisel bulanık sayı	36

5.4.2. Üçgensel bulanık sayılarda aritmetik operatörler	37
6. SEZGİSEL BULANIK OPTİMİZASYON.....	39
7. RİSK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN ÖNERİLEN ÜÇ AŞAMALI SEZGİSEL BULANIK BİR YAKLAŞIM	45
8. UYGULAMA	60
9. SONUÇ VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR LİSTESİ	90
EKLER LİSTESİ	98



ŞEKİLLER LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1 Beş adımda risk değerlendirmesi.....	9
Şekil 5.1 \tilde{a} sayısının gösterimi	34
Şekil 7.1 Geliştirilen sezgisel bulanık yaklaşım.....	46



ÇİZELGELER LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1	Risk değerlendirme yöntemlerinin karşılaştırılması.....	3
Çizelge 3.1	Olasılık için kullanılan değerlendirme skalası.....	16
Çizelge 3.2	Şiddet için kullanılan değerlendirme skalası.....	16
Çizelge 3.3	Fark Edilebilirlik için kullanılan değerlendirme skalası.....	17
Çizelge 7.1	B_k değerleri için sezgisel bulanık skala.....	47
Çizelge 7.2	Sezgisel Bulanık Risk Skalası.....	47
Çizelge 7.3	RI değerleri.....	49
Çizelge 7.4	Alternatifleri Değerlendirme Skalası.....	52
Çizelge 7.5	Etki Skalası.....	53
Çizelge 8.1	Belirlenen hata türleri.....	60
Çizelge 8.2	KV_1 için ana kriterlere ait ikili karşılaştırma matrisi.....	62
Çizelge 8.3	KV_1 için AK_1 'e ait ikili karşılaştırma matrisi.....	62
Çizelge 8.4	KV_1 için AK_2 'ye ait ikili karşılaştırma matrisi.....	62
Çizelge 8.5	KV_1 için AK_3 'e ait ikili karşılaştırma matrisi.....	63
Çizelge 8.6	KV_1 için AK_4 'e ait ikili karşılaştırma matrisi.....	63
Çizelge 8.7	KV_1 için ana kritere ait tutarlılık.....	63
Çizelge 8.8	KV_1 için ana kriterlere ait birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi...	64
Çizelge 8.9	KV_1 için AK_1 'e ait birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi.....	64
Çizelge 8.10	KV_1 için AK_2 'ye ait birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi.....	64
Çizelge 8.11	KV_1 için AK_3 'e ait birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi.....	64
Çizelge 8.12	KV_1 için AK_4 'e ait birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi.....	64
Çizelge 8.13	KV_1 için ana kriterlere ait benzerlik matrisi.....	65
Çizelge 8.14	KV_1 için AK_1 için benzerlik matrisi.....	65
Çizelge 8.15	KV_1 için AK_2 için benzerlik matrisi.....	65
Çizelge 8.16	KV_1 için AK_3 için benzerlik matrisi.....	65
Çizelge 8.17	KV_1 için AK_4 için benzerlik matrisi.....	66
Çizelge 8.18	KV_1 'e ait ana kriterler için normalize benzerlik matrisi.....	66
Çizelge 8.19	KV_1 'e ait AK_1 için normalize benzerlik matrisi.....	66
Çizelge 8.20	KV_1 'e ait AK_2 için normalize benzerlik matrisi.....	66
Çizelge 8.21	KV_1 'e ait AK_3 için normalize benzerlik matrisi.....	67

Çizelge 8.22	KV_1 'e ait AK_4 için normalize benzerlik matrisi.....	67
Çizelge 8.23	KV_1 için ana kriterler toplam benzerlik ikili karşılaştırma matrisi...	67
Çizelge 8.24	KV_1 için AK_1 toplam benzerlik ikili karşılaştırma matrisi.....	67
Çizelge 8.25	KV_1 için AK_2 toplam benzerlik ikili karşılaştırma matrisi.....	68
Çizelge 8.26	KV_1 için toplam benzerlik AK_3 ikili karşılaştırma matrisi.....	68
Çizelge 8.27	KV_1 için toplam benzerlik AK_4 ikili karşılaştırma matrisi.....	68
Çizelge 8.28	ANK_1 için $[T]_{AK}$ matrisi.....	68
Çizelge 8.29	AK_1 için $[T]_{AK}$ matrisi.....	69
Çizelge 8.30	AK_2 için $[T]_{AK}$ matrisi.....	69
Çizelge 8.31	AK_3 için $[T]_{AK}$ matrisi.....	69
Çizelge 8.32	AK_4 için $[T]_{AK}$ matrisi.....	69
Çizelge 8.33	W_{jt}^* değerleri.....	70
Çizelge 8.34	UUÇD değerlendirme skalası.....	71
Çizelge 8.35	GS değerlendirme skalası.....	71
Çizelge 8.36	İTD değerlendirme skalası.....	72
Çizelge 8.37	A değerlendirme skalası.....	72
Çizelge 8.38	EK değerlendirme skalası.....	72
Çizelge 8.39	İSGPK değerlendirme skalası.....	73
Çizelge 8.40	PBO değerlendirme skalası.....	73
Çizelge 8.41	MKK değerlendirme skalası.....	74
Çizelge 8.42	KKK değerlendirme skalası.....	74
Çizelge 8.43	O değerlendirme skalası.....	74
Çizelge 8.44	Ş değerlendirme skalası.....	75
Çizelge 8.45	F değerlendirme skalası.....	75
Çizelge 8.46	SGE değerlendirme skalası.....	75
Çizelge 8.47	HM değerlendirme skalası.....	76
Çizelge 8.48	ÖM değerlendirme skalası.....	76
Çizelge 8.49	KV_1 için ANK_1 performans matrisi.....	77
Çizelge 8.50	KV_1 için ANK_2 performans matrisi.....	77
Çizelge 8.51	KV_1 için ANK_3 performans matrisi.....	77
Çizelge 8.52	KV_1 için ANK_4 performans matrisi.....	78
Çizelge 8.53	ANK_1 performans matrisi.....	78
Çizelge 8.54	ANK_2 performans matrisi.....	79

Çizelge 8.55	ANK_3 performans matrisi.....	79
Çizelge 8.56	ANK_4 performans matrisi.....	80
Çizelge 8.57	ANK_1 için $[\tilde{E}]$ matrisi.....	80
Çizelge 8.58	ANK_2 için $[\tilde{E}]$ matrisi.....	81
Çizelge 8.59	ANK_3 için $[\tilde{E}]$ matrisi.....	81
Çizelge 8.60	ANK_4 için $[\tilde{E}]$ matrisi.....	82
Çizelge 8.61	ANK_1 için $[\tilde{L}]$ matrisi.....	82
Çizelge 8.62	ANK_2 için $[\tilde{L}]$ matrisi.....	83
Çizelge 8.63	ANK_3 için $[\tilde{L}]$ matrisi.....	83
Çizelge 8.64	ANK_4 için $[\tilde{L}]$ matrisi.....	83
Çizelge 8.65	ANK_1 için \tilde{G}_{jt} alan vektörü.....	84
Çizelge 8.66	ANK_2 için \tilde{G}_{jt} alan vektörü.....	84
Çizelge 8.67	ANK_3 için \tilde{G}_{jt} alan vektörü.....	84
Çizelge 8.68	ANK_4 için \tilde{G}_{jt} alan vektörü.....	84
Çizelge 8.69	ANK_1 için $[U]$ matrisi.....	85
Çizelge 8.70	ANK_2 için $[U]$ matrisi.....	85
Çizelge 8.71	ANK_3 için $[U]$ matrisi.....	85
Çizelge 8.72	ANK_4 için $[U]$ matrisi.....	86
Çizelge 8.73	CC_i değerleri.....	86

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

İSG	İş Sağlığı Ve Güvenliği
NASA	Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration)
PHA	Başlangıç Tehlike Analizi (Preliminary Hazard Analysis)
JSA	İş Güvenlik Analizi (Job Safety Analysis)
HAZOP	Tehlike ve İşletilebilme Çalışması Metodolojisi (Hazard and Operability Studies)
HTEA	Hata Türü ve Etkileri Analizi (Failure Modes and Effets Analysis–FMEA)
FTA	Hata ağacı metodolojisi (Fault Tree Analysis)
ETA	Olay Ağacı analizi (Event Tree Analysis)
RÖP	Risk Öncelik Puanı
GRA	Gri İlişki Analizi (Grey Relation Analysis)
AHP	Analitik Hiyerarşi Prosesi (Analytic Hierarchy Process)
DEMATEL	Decision Making Trial and Evaluation Laboratory
OWGA	Sıralı Ağırlıklandırılmış Geometrik Ortalama Operatörü (Ordered Weighted Geometric Average)
TOPSIS	Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution
OWA	Sıralı Ağırlıklandırılmış Ortalama (Ordered Weighted Average)
ANP	Analitik Ağ Süreci (Analytic Network Process)
VIKOR	Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje
COPRAS-G	Grey COMplex PROportional ASsessment
FWA	Bulanık Ağırlıklı Ortalama (Fuzzy Wighted Average)
KV	Karar Verici
WASPAS	The Weighted Aggregated Sum Product Assessment
MABAC	Çok Ölçütlü Sınır Yaklaşım Alanı Kıyaslaması (The Multiattributive Border Approximation Area Comparison)
ÇÖKV	Çok Ölçütlü Karar Verme
BK	Bulanık Küme
SBK	Sezgisel Bulanık Küme
IFWA	Ağırlıklandırılmış Aritmetik Ortalama Operatörü (Intuitinioistic Fuzyy Weighted Average)

IFWG	Ağırlıklandırılmış Geometrik Ortalama Operatörü (Intuitivistic Fuzzy Weighted Geometric)
SBS	Sezgisel Bulanık Sayı
UOÇD	Uygun olmayan çalışma duruşları
GS	Gürültü seviyesi
İTD	İşyeri temizlik ve düzeni
A	Aydınlatma
EK	El aletlerinin kullanılabilirliği
İSGPK	İş sağlığı ve güvenliği prosedürlerinin kullanımı
PBO	Planlı bakım ve onarım
MKK	Makine koruyucuları kullanımı
KKK	Kişisel koruyucu kullanımı
O	Olasılık
Ş	Şiddet
F	Fark edilebilirlik
SGE	Sistem güvenilirliğine etkisi
HM	Hatanın maliyeti
ÖM	Önlem maliyeti

1. GİRİŞ

Risk değerlendirmesi iş sağlığı ve güvenliği (İSG) yönetim sisteminin vazgeçilmez bir parçasıdır. Bu konuyla ilgili bir çok çalışma risk değerlendirmesinin ne kadar önemli bir faaliyet olduğunu ortaya koymuştur [1; 2].

Risk değerlendirmesi ortaya çıkması muhtemel tehlikelerin tespit edilerek önlemler alınmasını sağlayan bir araçtır. Risk değerlendirmesinde, sistem analizlerinin iyi yapılmış olması, gözlemlerin doğru bir şekilde raporlanmış olması ve planlı bir çalışmanın yürütülmüş olması gerekmektedir. Sistematik bir şekilde yapılmayan risk değerlendirme çalışması, yanlış sonuçların elde edilmesine, asıl önlenmesi gereken hataların göz ardı edilmesine, zaman kaybı oluşmasına ve farklı hasar ya da zararlarla sonuçlanan olumsuz durumların yaşanmasına sebep olur. Buna göre risk değerlendirme amacıyla kullanılan yaklaşımın yeterli olup olmadığını belirlemek gereklidir. Kullanılan risk değerlendirme yaklaşımının kapsamlı, hassas sonuçlar üreten ve sistematik bir risk değerlendirme yöntemi olması önem taşımaktadır.

Dünya genelinde kullanılan risk değerlendirme metodolojilerine ve standartlara bakıldığında 150'den fazla yöntem bulunduğu görülmektedir. Bu yöntemlerin bir çoğu ihtiyaçtan doğmuştur, özellikle de sigorta şirketleri, niversiteler, enstitüler ile Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (National Aeronautics and Space Administration-NASA)'nin bu yöntemlerin çeşitlenmesinde büyük rolleri olmuştur. Endüstriyel fabrikaları sigortalayan şirketler bu fabrikalardaki İSG'yi ilgilendiren tehlikeler, yangın, patlama, deprem, sel, evre felaketi vb. konulardaki risklerin net olarak tayin edilmesini istemiş ve birçok yöntemin geliştirilmesinde öncülük yapmışlardır [1]. Örneğin Zürih Sigortanın geliştirdiği Zürih Tehlike Analizi, DOW Chemical Co.'nun geliştirdiği DOW F&EI indeksi bunlara örnek olarak verilmektedir.

Risk değerlendirme yöntemlerini birbirinden ayıran en önemli fark, risk derecesini bulmak için kullandıkları prosedürleridir. "Olursa Ne olur?" (What if ?) metodu soru sorarak riske ilişkin bilgilere sahip olmaya çalışmaktadır. Başlangıç Tehlike Analizi (Preliminary Hazard Analysis-PHA)'nde, olası tehlikeler önce tanımlanır daha sonra ayrı ayrı çözümlenir. Her bir tehlike için, alınabilecek önlemler formüle edilir. İş Güvenlik Analizi (Job Safety Analysis-JSA), bir işletme veya fabrikada kişi veya gruplar tarafından gerçekleştirilen iş görevleri üzerinde yoğunlaşır. İşler ve

görevler iyi tanımlanmışsa bu metodolojinin kullanılması uygundur. Kontrol listeleri (Check List), sistemde veya prosesteki potansiyel tehlikeleri tespit ederek bunlara ilişkin kaza ihtimallerini belirlemektedir. Kontrol listelerini kullanan bir analist, tehlikeli durumları gösteren bu listelere güvenerek analizi yapar. Tehlike ve İşletilebilme Çalışması Metodolojisi (Hazard and Operability Studies-HAZOP), belirli anahtar ve kılavuz kelimeler kullanarak yapılan sistemli bir beyin fırtınası çalışmasıdır. Çalışmaya katılanlara, belirli bir yapıya sahip sorular sorulup, tehlikeli olayların olması veya olmaması halinde ne gibi sonuçların ortaya çıkacağı belirlenir. Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA) (Failure Modes and Effects Analysis–FMEA) riskleri tahmin ederek hataları önlemeye yönelik güçlü bir analiz tekniğidir. Hatanın ortaya çıkması ile doğacak problemin müşteri gibi algılanması prensibine dayanır. Hata ağacı metodolojisi (Fault Tree Analysis–FTA), sistemde tehlike olarak kendini gösteren olası tüm problem veya hataların tanımlanmasında ve analizinde kullanılan sistematik bir yolu temsil eder. FTA her düzeyde tehlike oluşturan hataların analizini yapar ve bir mantık diyagramı aracılığı ile en büyük olayı (kayı) yaratan hataların ve problemlerin olası tüm kombinasyonlarını gösterir. Bu metot, tümdengelim mantığına dayanan bir tekniktir. Olay Ağacı Analizi (Event Tree Analysis–ETA), başlangıçta seçilen bir olayın meydana gelmesinden sonra ortaya çıkabilecek sonuçların akışını diyagram ile gösteren bir yöntemdir. Hata ağacı analizinden farklı olarak bu metodoloji tümevarım mantığını kullanır. Neden-Sonuç Analizi (Cause-Consequence Analysis), Hata Ağacı Analizi ile Olay Ağacı Analizi'nin karışımıdır. Bu metodoloji, neden analizi ile sonuç analizini birleştirir ve bu nedenle de hem tümdengelim hem de tümevarım mantığını kullanarak analiz yapar [22].

Risk değerlendirme yöntemlerine baktığımızda iki temel yaklaşım bulunmaktadır. Bunlar, nitel ve nicel yaklaşımlardır.

Nitel risk analizi, riskin büyüklüğünü belirlerken sayısal değerleri kullanır. Nicel risk analizi ise riski belirlerken “yüksek”, “çok yüksek” gibi sözel değerler kullanır. Aşağıda Çizelge 1.1’de bazı risk değerlendirme yöntemleri karşılaştırma amacıyla verilmiştir [7].

Çizelge 1.1 Risk Analiz Yöntemlerinin Karşılaştırılması

Kriterler Yöntemler	Döküman İhtiyacı	Takım Çalışması	Takım Liderinin Tecrübesi	Nitel - Nicel	Özel Bransa Yönelik	Başarı Oranı
Olursa Ne olur?	Çok Az	Analist ile Yapılabilir	Orta Düzey Deneyim	Nitel	Basit Prosedürlü İşler	Tek Başına Yeterli değildir
Başlangıç Tehlike Analizi	Orta	Analist ile Yapılabilir	Orta Düzey Deneyim	Nitel	Her Sektöre Uyar	Tek Başına Yeterli değildir
İş Güvenlik Analizi	Çok fazla	Takım Çalışması	Çok Fazla Deneyim	Nitel	Her Sektöre Uyar	Kişilerin Görev Tanımı Yapılmışsa Başarı Sağlanabilir
Kontrol Listeleri	Orta	Takım Çalışması	Orta Düzey Deneyim	Nitel	Her Sektöre Uyar	Başarı Oranı Çalışmayı Hazırlayana Göre Değişiklik Gösterebilir
Tehlike ve İşletilebilme Çalışması Metodolojisi	Çok fazla	Takım Çalışması	Çok Fazla Deneyim	Nitel	Kimya Endüstrisi	Oldukça Zor Bir Yöntem Olduğu için Yüksek Performans Gerektirir
Hata Türü ve Etkileri Analizi	Çok fazla	Takım Çalışması	Çok Fazla Deneyim	Nitel / Nicel	Elektrik Makine Hizmet	Analiz öncesi FTA Başarı Oranını Yükseltir
Hata Ağacı Analizi	Çok fazla	Takım Çalışması	Çok Fazla Deneyim	Nitel / Nicel	Her Sektöre Uyar	Yüksek Tecrübe Gerektirir, Risk Analizinde Çok Etkilidir
Olay Ağacı Analizi	Çok fazla	Takım Çalışması	Çok Fazla Deneyim	Nitel / Nicel	Her Sektöre Uyar	Yüksek Tecrübe Gerektirir, Risk Analizinde Çok Etkilidir
Neden Sonuç Analizi	Çok fazla	Takım Çalışması	Çok Fazla Deneyim	Nitel / Nicel	Her Sektöre Uyar, (Kimya sektörü)	Yüksek Tecrübe Gerektirir

Bunlar arasında en çok kullanılan yaklaşım HTEA'dır. HTEA, risk tespiti için güçlü bir tekniktir ve potansiyel risk türlerini önceden belirleyerek risklere ilişkin önlem önceliklerini tanımlar. Ancak bu yaklaşımın da geliştirilmesi gereken yönleri

bulunmaktadır. Özetle bahsedilecek olunursa, bütün risk değerlendirme yöntemlerinde olduğu gibi HTEA'da da risk faktörleri arasındaki benzerlik ilişkisi ve hata türleri arasındaki etkileşim dikkate alınmamaktadır. Bununla birlikte sınırlı sayıda risk faktörüne göre risk dereceleri belirlenmekte ve uzman bilgisi içindeki şüphe derecesi çözüm sürecine katılmamaktadır. Tez çalışmasının ilerleyen bölümlerinde yaklaşımın geliştirilmesi gereken yönlerinden ayrıntılı bir şekilde bahsedilecektir.

Bununla birlikte risk değerlendirmede risk türlerine ait önceliklerin belirlenmesinin yanı sıra işletmenin sermaye, zaman, işgücü gibi gerçekçi kısıtlarını da dikkate alan bir önlem planı geliştirmek zorunludur. Sonuç olarak hayatın kaybedilmesi gibi büyük problemler yaratabilecek risk türleri dışında yumuşak doku zedelenmesi, kırık, çatlak veya küçük çaplı makine arızaları gibi sonuçlar yaratabilecek risk türlerinin önceliklendirilmesi işletme için üretim kaynaklarından tasarruf sağlayacaktır. Buna göre risk değerlendirme yöntemlerinin konuyu bu açıdan da ele alabilecek şekilde geliştirilmesi gereklidir.

Risk analizi ile ilgili ilk çalışmalar askeri alanda başlamıştır [3; 4]. Sivil alandaki ilk sistematik çalışmaların Ford şirketinde olduğu görülmektedir [5]. İngiltere İş Güvenliği ve Sağlığı Teşkilatı (British Directorate General of Occupational Health and Safety), sözleşmelerle belirlenen çalışma koşulları 1999 yılında hazırladığı rehberde, riskin sonucunun ve şiddetinin tanımını yapmış ve insanlara dönük riskler, parasal riskler, çevre riskleri ve şirketin saygınlığına dönük riskler olmak üzere dört temel başlıkta riskleri incelemiştir. Riskleri sıralarken en düşük riske 0 ve en yüksek riske 5 olacak şekilde bir sıralama yapılmış ve her sıralama için tanımlar verilmiştir. ABD Enerji Bakanlığı için 1993 yılında hazırlanan bir raporda bakanlığın talimatı kullanılmış, riskler için 1-4 arasında değişen önem sırası belirlenmiş ve buna karşılık gelen kaza olasılıkları tanımlanmıştır. Hazırladıkları ölçek, risklerin insan sağlığına, çevreye ve programa (projeye) etkilerine göre bir şiddet skalasında sunulmaktadır. Avustralya ve Yeni Zelanda AS/NZS 4360 nolu Risk Yönetimi Standardında kazalar sonucu ortaya çıkabilecek riskleri 1 ile 5 arasında puanlamış ve bunlar için sözel ifadeler ve tanımlar kullanmıştır [5].

Literatürde risk değerlendirmesi ile ilgili yapılan birçok çalışma bulunmaktadır. Aşağıda bu çalışmalara ilişkin bilgiler verilmiştir.

Karwowski and Mital, güvenlik mühendisliği uygulamaları için bulanık küme teorisi kullanmışlardır [105]. McCauley–Bell and Badiru, farklı işçiler ve işler için risk seviyeleri tanımlayan bulanık mantığa dayalı uzman bir sistem geliştirmişlerdir [106]. Grassi et al., klasik risk değerlendirme yöntemlerinin dezavantajlarını ortadan kaldırmaya yönelik yeni bir risk değerlendirme yöntemi önermişlerdir [107]. Jeong et al., nükleer tesis işçilerinin maruz kalabileceği nükleer ve nükleer olmayan risklerin bulanık mantığa dayalı risk matrisi yaklaşımı değerlendirilmiştir [108]. Marhavilas et al. tarafından çalışma koşulları açısından kesin sonuçlar ortaya koyan bir nicel risk değerlendirme metodu geliştirilmiştir [109]. Beriha et al., ölümcül olmayan farklı kazaların tahmininde bulanık mantık kullanmışlardır [110]. Güranlı and Müngen (2009) tarafından bulanık tabanlı bir risk analiz yöntemi kullanarak tünel inşaatında çalışan işçiler tarafından karşılaşılan riskler değerlendirilmiştir [111].

Literatürden de görüldüğü gibi risk faktörlerini yaratabilecekleri risk seviyesi açısından değerlendiren, hata türleri arasındaki etkileşimi dikkate alan ve işletmelerin gerçek kısıtlarına göre önlem planlamasını belirleyen herhangi bir çalışma bulunmamaktadır. Bu kapsamda, tez çalışmasında, üç aşamalı bir risk değerlendirme yaklaşımı önerilmiştir. Yaklaşımın birinci aşamasında HTEA temel alınarak, çok sayıda risk faktörünün kullanılmasıyla bu faktörler arasındaki yaratabilecekleri risk seviyesi açısından benzerlik ilişkilerini dikkate alan bir ağırlıklandırma yaklaşımı geliştirilmiştir. İkinci aşamasında hata türleri arasındaki etkileşimi de kapsayan bir sıralama yöntemi önerilmiştir. Bu kapsamda geliştirilmiş MABAC yöntemi kullanılmıştır. Üçüncü aşamada ise işletmenin gerçekçi kısıtlarını da çözüm sürecine dahil eden iki farklı matematiksel model risk önceliklendirme amacıyla kurulmuş ve her iki modelden elde edilen sıralama sonuçları karşılaştırılmıştır. Geliştirilen üç aşamalı risk değerlendirme yaklaşımı sezgisel bulanık küme teorisi ile birleştirilerek risk değerlendirme sürecindeki belirsizlik ve elde edilen bilgilerdeki şüphe düzeyi de çözüm sürecine katılmıştır. Önerilen yaklaşımın uygulaması elektromekanik sektöründe hizmet veren bir işletmede gerçekleştirilmiştir.

2. RİSK DEĞERLENDİRMESİ

2.1. Temel Kavramlar

Risk değerlendirmesi kavramı mevzuata yeni girmiş olmakla birlikte içeriği ve kullanılan yöntemler yeni değildir. Risk Değerlendirmesi kavramı 20. Yüzyılın başlarında güvenilirlik teoreminin oluşturulması ve kullanılmaya başlanması sonrasında telaffuz edilmeye başlanmıştır. İlk defa NASA tarafından geliştirilen MIL-STD-882 nolu standart bu alandaki gelişmelerin önünü açan ilk sistemli belge olmuştur. Ünlü analist Peter F. Drucker'ın yöneticilere vermiş olduğu bir konferansta 18., 19. ve 20.yüzyıllarda Batı ekonomisinin ilerlemesinde teşebbüs, girişim, çabuk ve doğru karar verme yeteneği kadar risk yönetiminin de önemli bir yere sahip olduğunu vurgulamıştır. Drucker'a göre riskleri yönetme ve önlem alma çalışmaları gelişmiş ülkeler ve gelişmekte olan ülkeler arasındaki en önemli farktır [8].

Özellikle 20. yüzyıl başlarından itibaren tehlikeli maddelerin artan üretimi, kullanımı ve depolanması yüzünden endüstriyel kaza olasılığı büyük oranlarda artmıştır. Dolayısıyla tüm halkın, çalışan kesimin ve çevrenin korunması gereği doğmuş, büyük endüstriyel kazaların önlenmesi için sistematik bir yaklaşım ihtiyacı belirmiştir. Üç Mil Adası'ndaki ve Çernobil' deki nükleer kazalardan sonra otoriteler nükleer tesislerin güvenli bir şekilde işletilmesi için birçok çalışma yürütmüştür. Ancak endüstriye ilişkin risk değerlendirme çalışmalarının hızla başlamasında İtalya Sevesso'daki büyük endüstriyel kaza dönüm noktası olmuştur [8].

Tehlike ve risk genel olarak birbiriyile karıştırılan ve birbiri yerine kullanılan iki kavramdır. Tehlike, çalışma alanının fiziki kusurları ve insanların hatalı davranışları gibi, çalışma ortam ve koşullarında var olan, ya da dışarıdan gelebilecek kapsamı belirlenmemiş durumların kişilere, işyerine ve çevreye zarar ya da hasar verme potansiyelini ifade eder. Diğer bir ifadeyle tehlike, bir unsurun veya bir kimsenin varlığını tehdit eden ya da kaygı uyandıran bir durumdur. Dünya Sağlık Örgütü (1950) (World Health Organization-WHO) ise tehlikeyi; bir nesne ya da belli koşulların, etkenlerin insan sağlığı ve çevre için olumsuzluk içermesi şeklinde tanımlamıştır [9]. Risk, herhangi bir tehlikeli olayın meydana gelme olasılığı ile bu olayın sonuçlarının ortaya çıkardığı zarar ve hasarın şiddetinin bileşkesidir [10]. WHO tarafından risk, sonucun olumsuz olma ihtimali veya bu olasılığı ortaya

çıkaran faktör olarak ifade edilmiştir. Okuyama ve Chang (2004), Coburn ve Spence (1992) ise genel anlamda riski, herhangi bir tehlikenin meydana gelme olasılığı ile bu tehlikenin neden olacağı sonuçların bileşkesi olarak tarif etmektedirler. Başka bir deyişle risk düzeyinin, tehlikenin büyüklüğü ve etkilenen elemanların savunmasızlığıyla orantılı olduğunu ifade etmektedirler [11; 12].

Genel olarak, çevreyi yada insanı hedef alan tehditlerin yada zararların muhtemel kaynaklarının belirmesiyle, risk sorunu ortaya çıkar. Buna göre, sorun kaynaklarını engellemek ve istenmeyen sonuçlarını en aza indirmek için gerekli önlemlerin önceden düşünülmüş ve uygulanıyor olması gerekir. Risk, belirsiz olan bir durumu, gözle görülür, gerçek bir zarara dönüştüren etkenlerdir. Bu anlamda risk ile belirsizlik iç içe geçmiş iki kavramdır. Çalışanlar açısından risk ise mesleki risk olarak ifade edilebilir. Mesleki risk, bir tehlikeye maruziyet sonucu bir yaralanma ya da bir hastalığın meydana gelme olasılığının ve şiddetinin bileşkesine işaret eder.

Risk değerlendirmesi, işyerinde var olan ya da dışarıdan gelebilecek tehlikelerin belirlenmesi, bu tehlikelerin riske dönüşmesine yol açan faktörler ile tehlikelerden kaynaklanan risklerin analiz edilerek derecelendirilmesi ve kontrol tedbirlerinin kararlaştırılması amacıyla yapılması gerekli çalışmaları ifade eder.

İşyerinde risk değerlendirmesi yapmak 6331 sayılı İş Sağlığı ve Güvenliği Kanunu gereği zorunlu olduğu gibi, işletmenin ve ülkenin geleceği açısından da oldukça önemlidir. İşyerlerinde meydana gelen iş kazaları ve meslek hastalıkları sonucunda büyük maddi kayıplar meydana gelmektedir. Ancak, gerek iş kazaları gerekse meslek hastalıkları, nedenleri önceden belirlenerek alınacak tedbirlerle önlenebilecek vakalardır. Bu bağlamda risk değerlendirmesi, çalışma ortamı, şartları ya da çevrede var olan tehlikelerden kaynaklanan riskleri, sistematik bir yolla ortaya çıkarmak, yok etmek veya kabul edilebilir seviyeye indirmek için, nitel ve nicel yöntemler kullanılarak yapılan çalışmalardır.

Risk yönetimi, yönetimin hedeflerine ulaşabilmek için her seviyede risklerini belirli bir yöntemle sistematik olarak, tespit etmesi, değerlendirmesi, risklerin etkilerini azaltmak için önlemler alması ve bu sürecin etkin işlemlerini sağlayacak şekilde izlemesidir. Risk yönetiminin amacı, işletmenin kararlılık içerisinde faaliyetine devamı için gerekli düzenlemeleri sağlamak ve organizasyondaki mal ve kişilerin korunması ile işletmenin kazanma gücünü korumaktır. Böylece risk yönetimi,

organizasyonda oluşabilecek beklenmeyen kayıpların en düşük maliyetle kontrol altına alınması için gerekli kaynakların ve faaliyetlerinin planlanması, organizasyonu, yönetilmesi ve kontrol edilmesi olarak tanımlanabilir [13]. Risk değerlendirmesi belirlenen risklerin ortadan kaldırılması veya kabul edilebilir seviyelere indirilmesi faaliyetlerini içerirken risk yönetimi hem tehlikelerin tanımlanması hem de çözümünü faaliyetlerini içerir.

Risk değerlendirmesi yapılarak çalışanların sağlığının korunması, fiziksel ve psikolojik iş güvenliklerinin sağlanması amaçlanır. Üretimde verimlilik ve kalite artırılır. Çalışma ortamı ile ilgili alınması gereken önlemler belirlenir. Riskler önceliklerine göre sıralanır. Hangi çalışanların risk altında olduğu daha net bir şekilde görülebilir. İşletmede İSG bilincinin yerleşmesi sağlanır ve İSG uygulamalarının etkinlik derecesi gözden geçirilir. İşletmenin tedavi ve tazminat giderleri azalır ve prestiji artar.

2.2. Risk Değerlendirme Aşamaları

Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı tarafından risk değerlendirme aşamaları aşağıdaki gibi tanımlanmış ve “Beş Adımda Risk Değerlendirmesi” olarak ifade edilmiştir [10];

Birinci Adım: Tehlikelerin ve Risk Altında Olanların Belirlenmesi

Bu adımda, işyerinde çalışanlara, ürünlere ve iş ekipmanlarına nelerin zarar verebileceği belirlenir.

İkinci Adım: Tehlikelere İlişkin Risklerin Değerlendirilmesi

Birinci adımda belirlenen tehlikeler değerlendirilerek bunlara ilişkin riskler belirlenir ve hangileri için ne tür önlemler alınacağı planlanır.

Üçüncü Adım: Risklerin Derecelendirilmesi ve Önleyici Faaliyetlere Karar Verilmesi

Tehlikelerin her biri için ayrı ayrı risk dereceleri hesaplanarak riskler önceliklendirilir.

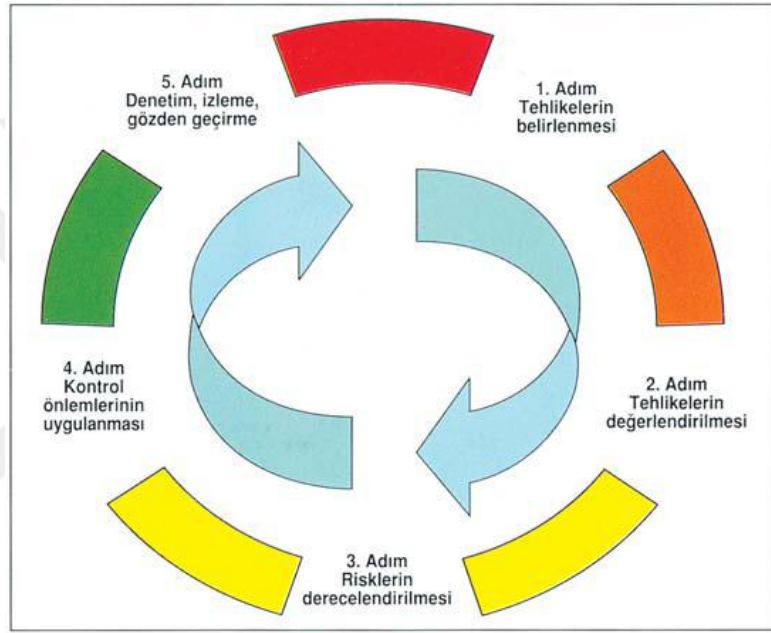
Dördüncü Adım: Kontrol Önlemlerinin Uygulanması

Üçüncü adımda belirlenen risk öncelik sırasına göre önlemler uygulanmaya başlanır ve aynı riskin tekrar ortaya çıkmaması için uygun bir kontrol periyodu belirlenir. Öncelik sırasında arkalarda yer alan riskler için alınacak önlemlere ait uygulama planı yapılır.

Beşinci Adım: Denetim, İzleme ve Gözden Geçirme

Gerçekleştirilen risk yönetiminin tüm aşamaları düzenli olarak denetlenir.

Bu beş aşamanın görsel gösterimi aşağıda Şekil 2.1.'de sunulmuştur.



Şekil 2.1 Beş Adımda Risk Değerlendirmesi

Beş adımda risk değerlendirme sürecinde genellikle karşılaşılabilecek sorunlar ise planlama ve değerlendirme aşamasında olmak üzere iki başlık altında toplanmaktadır [14].

Planlama aşamasında;

- Herhangi bir ekibin ya da değerlendirilen işlem/aktivite konusunda uygulamalı bilgiye sahip olan çalışanların değerlendirmeye dâhil edilmemesi,
- Risk değerlendirmesinin, yeterliliği olmayan kişilere verilmesi,
- İşyerini tanımayan uzmanların risk değerlendirmesi sürecine dahil edilmesi.

Risk değerlendirmesinin gerçekleştirilmesi aşamasında;

Değerlendirme aşamasında yaşanan sorunlar ise yukarıda sözü edilen “Beş Adımda Risk Değerlendirme” adımlarında karşılaşılan sorunları içermektedir.

1. Adım: Tehlikelerin ve risk altında olanların belirlenmesi

- Muhtemel risk kategorilerinin göz ardı edilmesi,
- Sağlığı tehdit eden uzun vadeli tehlikelerin göz ardı edilmesi,
- Yalnızca çalışma talimatlarına bakmak ve çalışanları dahil etmemek,
- Kontrol listesinin katı bir şekilde uygulanması,
- Önemli bir tehlikenin önemsiz olduğu düşüncesiyle göz ardı edilmesi,
- İkincil işlerin göz ardı edilmesi,
- Taşeron ve işyerindeki ziyaretçiler gibi diğer kişilerin, yardımcı işlerde çalışanlarının olası varlığının göz ardı edilmesi,
- İşverenler ve taşeronlar arasında koordinasyonun sağlanmaması,
- Özellikle risk altında olabilecek çalışan gruplarının dahil edilmemesi,
- Sadece özel durumlarda kullanılan ekipmanların kayıt altına alınmaması,
- Kazaların ve hastalıkların kaydedilmemesi.

2. Adım: Tehlikelerden kaynaklanan risklerin değerlendirilmesi

- Risklerin tamamen değerlendirilmemesi,
- Yanlış bir güvenlik hissinin yaratılması,
- Riske ilişkin etki, maruziyet sıklığı ve olasılık tahmini sırasında bütüncül bir değerlendirme yapılmaması.

3. Adım: Risklerin derecelendirilmesi ve önleyici faaliyetlere karar verilmesi

- Önlemede sıralamayı göz ardı etme,
- Önleyici faaliyetler hakkındaki kararlarda çalışanlara danışılmaması ya da çalışanların bu sürece dâhil edilmemesi,
- Riskin transferi.

4. Adım: Kontrol önlemlerinin uygulanması

- Önleyici tedbirlerin uygulamasına yönelik öncelik sırasının belirlenmemesi,
- Çalışanların dâhil edilmemesi.

5. Adım: Denetim, izleme ve gözden geçirme

- Risk değerlendirmesinin bir kereye mahsus bir zorunluluk olarak ele alınması,
- Önlemlerin etkinliğinin yeterli şekilde takip edilmemesi,
- Risk değerlendirmesinin kağıda dökülmesi,
- Değerlendirmenin kayıt altına alınmaması.



3. HATA TÜRLERİ VE ETKİLERİ ANALİZİ (HTEA)

3.1. HTEA Tanımı

HTEA, en yaygın kullanılan risk değerlendirme yöntemlerinden birisidir. 1960'lı yıllarda uzay endüstrisinde tasarım metodolojisi olarak geliştirilmiştir. HTEA, bilinen veya potansiyel hataların sebeplerini, sistemde veya son kullanıcıda söz konusu hataların oluşturabileceği etkileri dikkate alarak hatalarla ilişkili risklerin değerlendirilmesi ve bunların önlenmesi için öncelik sırasının belirlenmesi amacıyla geliştirilmiş sistematik bir yaklaşımdır. HTEA; bir sistemin potansiyel hata türlerini analiz etmek için hataları risk dereceleri açısından benzerliklerine göre sınıflandıran bir ürün geliştirme ve operasyon yönetim yaklaşımıdır. HTEA'da amaçlanan hataları önceden tanımlayarak gerekli önlemleri almak ve tasarım aşamasından itibaren hataların olası nedenlerini belirlemektir [15].

1980 yılında bu konuda yayınlanmış ilk standartlardan biri olan MIL-STD 1629A (Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi Uygulaması için Prosedür)'da HTEA'nın genel tanımı "Sistemdeki her bir olası hata türünün, sistemdeki sonuçlarını veya etkilerini belirlemek ve önemlerine göre her bir hata türünü sınıflandırmak için analiz edildiği bir prosedürdür." şeklinde verilmektedir. Stamatis ise HTEA tanımını genişletmekte ve "HTEA tasarım, proses, sistem ve hizmet ile ilgili bilinen ve/veya olası hataları, yanlışları ve problemleri kullanıcıya ulaşmadan belirlemeyi, tanımlamayı ve ortadan kaldırmayı hedefleyen mühendislik tekniğidir." şeklinde tanımlamaktadır [7].

Diğer taraftan, HTEA ürün ve süreçlerin zayıf taraflarını tespit edip engellemek ve bunların varlığını önlemek için kullanılan bir araçtır. Bu yöntem, ürün ya da sürecin kalitesini ve dayanıklılığını artırır, müşteri memnuniyetini ve güvenliğini yükseltir, potansiyel ürün veya süreç hata biçimlerinin erken teşhis edilmesini ve eleme yapılmasını sağlar. Bunlara ek olarak gelişim için ürün veya süreç eksikliklerini önceliklendirir, mühendislik veya organizasyon bilgisi elde edilmesini sağlar, problemlerden korunmaya önem verir, riskleri ve yapılan aksiyonları, oluşabilecek riskleri azaltmak için dökümanete eder, gelişim için odaklanma sağlar, geç değişimleri, süreç değişim zamanlarını ve maliyeti azaltır, fonksiyonlar arası takım çalışması ve fikir değişimleri için kataliz görevi görür ve herşeyin kayıt altına alınmasını sağlar [16]. HTEA günümüzde otomotiv sektörü ağırlıklı olmak üzere

gıda, metal, deniz taşıtları imalatı, yazılım, nükleer tasarımlar gibi birçok alanda kullanılmaktadır [17].

Bir HTEA çalışmasına başlamanın en önemli nedeni gelişme ihtiyacıdır. Başarılı bir HTEA çalışması pek çok olumlu değişimi beraberinde getirecektir. Yöntemin uygulanması sırasındaki temel hedef, olası hatanın sebebinin, dolayısıyla hatanın etkisinin minimuma indirilmesidir [18]. Toplam kalite yönetiminde kalite yöneticileri “ilk defada doğruyu yapma” veya “en azından son üretimde daha iyiyi sağlama” amacını gerçekleştirirken sorumlu kişilerin bilgi, deneyim ve öngörülerinden yararlanırlar. HTEA bu deneyim ve düşünceleri;

- Sorun ne olabilir?
- Sorunun nedenleri neler olabilir?
- Sorunun etkileri neler olabilir?

sorularına aldığı yanıtlarla değerlendiren ve belgeleyen bir metottur [19].

HTEA uygulaması için öncelikle belli başlı kavramların anlaşılması gerekmektedir. Aşağıda bu kavramlara ilişkin tanımlamalar yer almaktadır.

Müşteri: Ürün veya hizmetin ulaştığı son kişi ya da ara departmanlardır. Müşteri, nihai ürünün ulaştığı son yer olabileceği gibi yarı mamülün ulaştığı ara duraklar da olabilmektedir. Bir işletmeden çıkan mamülün piyasada ulaştığı nokta dış müşteri olarak tanımlanırken işletmeye bağlı birimler arasında dolaştığı süreçte, her birim bir önceki birimin müşterisi olmakta ve bu noktadaki müşteri de iç müşteri olarak tanımlanmaktadır. HTEA çalışması içinde müşteri, oluşabilecek herhangi bir hatadan etkilenen kişi ya da birimler olarak görülmektedir [16].

Hata ve Hata Türü: Hata, “Bir ürün ya da sürecin, bu ürün ya da süreçten beklenen fonksiyonları yerine getirememesi” olarak tanımlanmaktadır [19].

İç ve dış müşterinin ihtiyaç, istek ve beklentileri ile örtüşmeyen; bir ürün veya prosesin arzulan fonksiyonunun gereği gibi veya hiç yerine getirilmemesidir. Sistemlerde arıza veya hatalara neden olan şeyler rastgele veya doğal olaylar olabilir. Örneğin; bir bilgisayarın değişik ünitelerindeki hafıza, disk driver veya klavyede vb. hatalar olabilir. Hataları mekanizmalara veya sebep olan parçalara göre ayrı ayrı ele almak ve sonra hataların bağımsız olması koşuluyla, sistemin

güvenirliğini genellemek, parça hatalarına göre inceleyip, önlem almak olasıdır. Bunlara hata türleri denilmekte ve hata sebepleri ile karıştırılmaması gerekmektedir. Beş adımda risk değerlendirmesi yöntemi ile ilişkilendirildiğinde hata türleri tehlike kaynaklarını oluşturmaktadır.

Olası hata türleri saptanırken cevap aranan sorulardan bazıları şöyle sıralanabilir [20]:

- Sistem, tasarım proses veya servis ile ilgili olası sorunlar nelerdir?
- Parçanın belirlenen şartları karşılayamadığı durumlar nelerdir?
- Öngörülen mühendislik özelliklerini hiç göz önüne almadan, müşterinin itiraz edebileceği düşünülen herhangi bir unsur var mıdır?
- Bir sonraki veya daha sonraki operatör neyi kötü olarak değerlendirecektir?
- Son kullanıcı (müşteri) neyi kabul edilemez olarak tanımlayacaktır?

Hata Nedeni: Tasarım veya sürecin belli bir elemanının hata oluşumunu tetikleyen ve hata türü ile sonuçlanmasına yol açan unsurdur. Bir hataya birden çok unsur neden olabilmektedir. HTEA çalışması içinde hata nedenleri incelenirken kök sebeplere inilmesi gerekmektedir [16].

HTEA'da hata önceliklerini belirlerken üç ana faktör dikkate alınmaktadır. Bunlar olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik faktörleridir [22]. Olasılık faktörü, hatanın ortaya çıkma sıklığını, şiddet faktörü hatanın ciddiyetini (etkisini), farkedilebilirlik faktörü hatanın ürün müşteriye ulaşmadan tespit edilebilme durumunu gösterir [20]. Olasılık, hata nedeninin oluşması ve ürünün beklenen ömrü içinde kullanımı sırasında hata türüne yol açmasının ihtimalidir [21].

Şiddet, hata türü önlenmediğinde veya düzeltilmediğinde, hatanın son ürün üzerindeki etkisi/sonucudur. Müşterinin neyi fark edebileceği veya müşterinin başına ne gelebileceğinin tanımlanmasıdır. Gerçekleşmesi olası hatalar üzerinde çalışarak, hata veya hataların üretim, servis veya diğer parçalara yansımaları ve tümünün performansı üzerindeki etkisi belirlenir. Etki belirlenirken, benzer özellik taşıyan ürünlerin sonuçları ve geçmişteki hata türleri dikkate alınmalıdır [23]. Şiddet, hatanın oluşuktan sonra müşteriye göre ciddiyetini temsil eden faktördür. Hatanın şiddetini belirlemek için [21];

- Müşteri anketlerinden,

- Geri dönen ürünlerle ilgili tutulan kayıtlardan,
- Geçmiş dönemlerde benzer ürün veya sistemler için tutulan kayıtlardan,
- Laboratuvar deneyleri veya simülasyon çalışmaları sonuçlarından,
- HTEA takımında bulunan kişilerin deneyimlerinden yararlanılır.

Şiddet analizinin amacı, hata türlerinin doğurabileceği sonuçları, niteliksel bir ölçü ile değerlendirebilmektir. Sonuç olarak her bir hata türü doğurabileceği kayıplara göre sınıflandırılmış olur. Kayıplar sistemin hasar görmesi, fonksiyonunu yitirmesi, can kaybı, yaralanma şeklinde ortaya çıkar. Kayıp miktar ve çeşitleri, hata etkisinin derecesini belirler [24].

Fark edilebilirlik ya da saptama, mevcut kontrollerin hatanın bulunarak müşteriye ulaşmasını engelleme derecesidir. Olası hata türünün, bir sonraki aşamada veya son müşterinin kullanımı esnasında ortaya çıkacağı varsayıldığından, öngörülen saptama önlemlerinden geçmiş olması gerekir. Bu nedenle, saptama ile ilgili olasılık değeri, ortaya çıktığı varsayılan hata nedeninin ya da şeklinin müşteriye ulaşabilme olasılığı olarak tanımlanır [20].

Saptama değeri,

- Analiz edilen birimlerin benzerlerinden,
- Geçmiş dönem verilerinden,
- Ürün iç denetlemelerinden,
- Somut veri olmayan durumlarda grup üyelerinin deneyimlerinden yararlanılarak bulunur [21].

3.2. Geleneksel HTEA'nın İşleyişi

HTEA'da Risk Öncelik Puanı (RÖP) hesaplanarak hata türlerine ilişkin kritiklik seviyesi belirlenir. RÖP her bir hata türü için olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik risk faktörleri esas alınarak Eşitlik (3.1)'deki gibi belirlenen bir sayısal değerdir. RÖP değerinin hesaplanmasında, sözel veya olasılık olarak tanımlanan risk faktörlerinin belirli bir sayı aralığında atanan değerleri alınır. RÖP ile her bir hata türü için risk derecesi tanımlandığından en büyük RÖP'ye sahip olan hata türünden başlayarak uzun dönemde ortadan kaldırılması, kısa dönemde en aza indirilmesi gereken

hata türleri için alınacak düzeltici önlemler belirlenir [22]. RÖP değerlerine göre hata türleri ve bunlara ilişkin alınacak önlemler sıralanır.

$$RÖP = O * \text{Ş} * F \quad (3.1)$$

Burada;

O: Her bir hata türünün oluşma olasılığını,

Ş: Her bir hata türünün şiddet değerini,

F: Her bir hata türünün farkedilebilirlik değerini göstermektedir.

RÖP hesaplamasında olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik risk faktörleri için kullanılan skalalar sırasıyla Çizelge (3.1), Çizelge (3.2) ve Çizelge (3.3)'te verimiştir.

Çizelge 3.1 Olasılık için kullanılan değerlendirme skalası

HATA OLASILIĞI	HATA KÜMÜLATİF SAYISI	DERECE
Aşırı Derecede Yüksek	½'den fazla	10
Çok Yüksek	1/3	9
Tekrarlanan Hata	1/8	8
Yüksek	1/20	7
Kısmen Orta	1/80	6
Orta	1/400	5
Nispeten Az	1/2000	4
Az	1/15000	3
Çok Az	1/150000	2
Olası Olmayan Hata	1/1500000'den düşük	1

Çizelge 3.2 Şiddet için kullanılan değerlendirme skalası

ETKİ	ŞİDDETİN ETKİSİ	DERECE
Uyarısız Gelen Tehlike	Felakete yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	10
Uyarısız Gelen Tehlike	Yüksek hasara ve toplu ölümlere yol açabilecek etkiye sahip ve uyarısız gelen potansiyel hata	9
Çok Yüksek	Sistemin tamamen hasar görmesini sağlayan yıkıcı etkiye sahip ağır yaralanmalara, 3.derece yanık, ölüm vb. etkiye sahip hata	8

Çizelge 3.2 devam ediyor

Yüksek	Ekipmanı tamamen hasar görmesine sebep olan ve ölüme, zehirlenme, 3.derece yanık, akut ölümcül hastalık vb. etkiye sahip hata	7
Orta	Sistemin performansını etkileyen, uzuv ve organ kaybı, ağır yaralanma, kanser vb. yol açan hata	6
Düşük	Kırık, kalıcı küçük iş görmemezlik, 2.derece yanık, beyin sarsıntısı vb. etkiye sahip hata	5
Çok Düşük	İncinme, küçük kesik ve sıyrıklar, ezilmeler vb. hafif yaralanmalar ile kısa süreli rahatsızlıklara neden olan hata	4
Küçük	Sistemin çalışmasını yavaşlatan hata	3
Çok Küçük	Sistemin çalışmasında kargaşaya yol açan hata	2
Yok	Etki yok	1

Çizelge 3.3 Fark Edilebilirlik için kullanılan değerlendirme skalası

FARK EDİLEBİLİRLİK	FARK EDİLEBİLİRLİK OLASILIĞI	DERECE
Tespit edilemez	Olası hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği mümkün değil	10
Çok Az	Olası hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği çok uzak	9
Az	Olası hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği uzak	8
Çok Düşük	Olası hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği çok düşük	7

Çizelge 3.3 devam ediyor

Düşük	Olası hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği düşük	6
Orta	Olası hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği çok orta	5
Yüksek Ortalama	Olası hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği yüksek ortalama	4
Yüksek	Olası hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği yüksek	3
Çok Yüksek	Olası hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği çok yüksek	2
Hemen Hemen Kesin	Olası hatanın nedeninin ve takip eden hatanın keşfedilebilirliği hemen hemen kesin	1

Çizelge (3.3)'ten de görüldüğü gibi herhangi bir hata türünün fark edilebilirliği zorlaştıkça bu risk faktöründen aldığı puan artmakta fark edilebilirliği kolaylaştıkça hata türünün bu faktörden aldığı puan azalmaktadır. Bu faktöre ilişkin değerlendirmeler ters orantılı bir şekilde yürütülmektedir.

HTEA'nın uygulanması ile firma seviyesinde ve disiplinler üstü yararlar elde edilebilmektedir. Söz konusu yararlar aşağıda sunulmuştur:

- Ürün/ proses ve hizmet kalitesi, güvenilirliği ve emniyetinin artırılması,
- Firmanın rekabet yeteneğinin artırılması,
- Firma imajının desteklenmesi,
- Müşteri tatmininin artırılması,
- Garanti maliyetlerinin azaltılması,
- Mühendislik ve organizasyon bilgisinin artırılması,
- Olası risklerin önceliklerine göre sıralandırılması,
- Geç kalınmış değişikliklerin ve buna bağlı maliyetlerin azaltılması,

- Yapılan çalışmaların dokümente edilerek; gelecekteki projeler için bir referans bilgi kaynağı oluşturulması,
- Ekip çalışması ruhu ve fonksiyonlar arası iletişimin güçlendirilmesi,
- Sürekli gelişme bilincinin hem firma hem de tedarik zinciri içerisinde yaygınlaştırılması [7],
- Ürünün, tasarım, güvenilirlik, imalat teknolojisi ve emniyet alanlarındaki eksik, zayıf ve yetersiz noktalarını belirlenmesi,
- Iskartaların azaltılması,
- Ürün sorumluluğu konusunda riskin azaltılması,
- Kontrol/test süreçlerinin belirlenmesinde yardımcı olması,
- Düzeltici faaliyetleri tanımlaması,
- Gelecekteki saha hatalarının, tasarım, süreç ve servis değişikliklerinde yardımcı olmak üzere dokümantasyon ve arşiv bilgilerin sağlaması,
- Ürün değişiklikleri için harcanan zaman ve maliyetlerin azaltılması,
- Güçlü kontrol planlarının oluşturulması için yardımcı olması,
- Mümkün hataların tespit edilmesi ve bu hata etkilerine ait şiddet derecelerinin değerlendirilmesi,
- Kritik ve önemli ürün karakteristiklerinin belirlenmesinde yardımcı bir araç olması,
- Tekrarlanan hataların devre dışı bırakılmasını veya tekrarlanmasının önlenmesi.

HTEA uygulamasının başarılı olması için gerekli olan en önemli şartlardan birisi de zamanında uygulanmasıdır. HTEA ürün veya proses geliştirmenin en erken evrelerinde uygulanmalıdır [25]. Hatalar ortaya çıktıktan sonra HTEA'nın uygulanması fayda sağlamayacaktır veya çok sınırlı olacaktır. Böylece HTEA uygulaması ile ileride gerekecek bir değişiklik ihtimalini azaltmakta veya önlemektedir. Her bir değişiklik kendi içerisinde büyük riskler taşır veya başka problemlerin oluşmasına neden olabilir [26].

3.3. HTEA Çeşitleri

HTEA'nın farklı türleri bulunmaktadır. Bunlardan bazıları yoğun olarak kullanılırken bazılarının kullanımı da, sektörel bazda ve/veya firma bazında sınırlı kalmaktadır. Yaygın olarak kullanılan HTEA türleri aşağıda belirtilmektedir.

Sistem Hata Türü ve Etkileri Analizi (Sistem HTEA)

Genel sistem fonksiyonlarına odaklanır. Özellikle sistemin, alt sistemlerle olan etkileşimlerini inceler. Çalışmalar Sistem Mühendisliği liderliğinde yürütülür. Konsept tasarım aşamasında uygulanır ve alt sistem/bileşenlerin Tasarım Hata Türü ve Etkileri Analizi'ne girdi sağlar.

Tasarım Hata Türü ve Etkileri Analizi (Tasarım HTEA)

Alt sistem ve bileşenlerin tasarım fonksiyonlarına odaklanır. Belirlenmiş olan tasarımı detaylı olarak inceler. Çalışmalar Tasarım Mühendisliği liderliğinde yürütülür. Proses Hata Türü ve Etkileri Analizi'ne girdi sağlar.

Proses Hata Türü ve Etkileri Analizi (Proses HTEA)

Alt sistem ve bileşenlerin üretim fonksiyonlarına odaklanır. Belirlenmiş olan prosesi detaylı olarak inceler. Çalışmalar Üretim Mühendisliği liderliğinde yürütülür.

Hizmet Hata Türü ve Etkileri Analizi (Hizmet HTEA)

Hizmet fonksiyonları üzerine odaklanır.

Yazılım Hata Türü ve Etkileri Analizi (Yazılım HTEA)

Bilgisayar yazılımlarının fonksiyonları üzerine odaklanır.

Ekipman Hata Türü ve Etkileri Analizi (Ekipman HTEA)

Proseste kullanılan ekipmanlar üzerine odaklanır. Özellikle "7 Büyük Kayıp" incelenir; büyük arızalar, küçük arıza ve durmalar, makine ayarları, kapasite düşüklüğü, başlangıç kayıpları, hatalı parçalar ve takımlandırma. Proses Hata Türü ve Etkileri Analizi'ni desteklemek amacı ile kullanılır.

Çevre Hata Türü ve Etkileri Analizi (Çevre HTEA)–Ford firmasına özel

Ürün, proses ve ekipmanların çevresel etkileri üzerine odaklanır. Hammadde üretiminden, ürünün kullanım ömrü sonuna kadar geçen tüm yaşam çevrimi incelenir. Özellikle ömrünü tamamlamış olan araçlar ile ilgili olarak yayınlanan uluslararası direktifler (End of Life Vehicle-ELV gibi) bu analiz türünün ortaya çıkmasına neden olmuştur. Minimum enerji ve doğal kaynak kullanımı, minimum

ağır metal kullanımı, en iyi geri dönüşüm performansı ve en iyi yakıt ekonomisinin sağlanması gibi temel amaçları vardır [20].

3.4. HTEA Aşamaları

HTEA altı adımdan oluşmaktadır. Aşağıda bu aşamalara ilişkin bilgiler yer almaktadır.

Adım 1: HTEA kapsamı belirlenir.

Çalışmanın başında HTEA'nın amacı tam olarak belirlenmelidir. Bunun için yazılı bir doküman hazırlanarak incelenecek sistem, tasarım, proses veya servis hakkında bilgiler verilebilir. Kapsam belirlenirken ayrıca HTEA takımının sorumlulukları da ortaya konmalıdır. FMEA takımı oluşturulduktan sonra da HTEA kapsamı ile ilgili değişikliklere gidilebilir [27].

Adım 2: Alanında uzman bir ekip kurulur.

HTEA bir takım çalışmasıdır ve tek başına gerçekleştirilemez. HTEA sürecini koordine etmek için bir kişi sorumlu olsa da uygulama bir takım tarafından gerçekleştirilmektedir. Yöntemin grup yerine tek bir kişi tarafından uygulanması durumunda, analizin tamamlanabilmesine rağmen değerlendirmelerde yanlışlık ortaya çıkabileceğinden kabul edilmez. Her HTEA çalışması için takımlar özel olarak belirlenir. Takımlar çapraz fonksiyonlu ve çok disiplinli olmalıdır. HTEA takımı oluşturulurken çok çeşitli bakış açıları ve tecrübelerin bir araya getirilmesi amaçlanır [27; 28].

Adım 3. Beyin fırtınası yapılarak üründe, hizmette veya sistemde ortaya çıkabilecek tüm olası hata türleri tanımlanır.

Bu aşama aslında çoğu zaman inceleme kısmı ile iç içe girmiş durumdadır. Daha sonraki aşamalara önemli ölçüde etki etmesi nedeniyle bu aşama titizlikle ele alınmalıdır [2]. Daha önce de belirtildiği üzere olası hata türü iç ve dış müşterinin ihtiyaç, istek ve beklentileri ile örtüşmeyen; bir ürün veya prosesin arzulan fonksiyonunun gereği gibi veya hiç yerine getirilmemesidir. Olası hata türü, genellikle hatanın ortaya çıkma türü ve sistemin çalışmasındaki etkisinin tanımını içerir [2].

HTEA takımı olası hata türlerini belirlemek için ürün veya sistemin performans, bütünlük, istenildiği zaman kullanıma hazır olma, güvenilirlik, dayanıklılık, faydalı ömür, estetik gibi özelliklerin birkaçına veya hepsine sahip olma durumu gerçekleşip gerçekleşmediğini inceler. Olması istenen ancak gerçekleşmeyen özellik hatayı gösterecektir.

Adım 4. Olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik risk faktörlerini dikkate alarak hata türlerine ait RÖP hesaplanır.

RÖP, belirlenen olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik risk faktörlerine ait değerleri kullanarak elde edilen bir değerdir. RÖP hata türlerinin kritiklik derecesini gösterir ve hata türlerini öncelik sırasına koymak için kullanılır [22].

Adım 5: RÖP değerlerine göre hata türleri ve önlemler sıralanır.

RÖP değerleri bulunduğundan sonra hatalar bu değere göre büyükten küçüğe doğru sıralanır. Böylece, hatalar kritiklik derecelerine göre sıralanmış olur. RÖP değerleri belirlenip hata türleri buna göre sıralandıktan sonra cevap verilmesi gereken soru "Öncelikleri belirlenmiş bu hatalardan hangileri için önlem alınmalıdır?" sorusudur. Bu amaçla uygulanan bir yöntemlerden bir tanesi RÖP değerleri için sınıf aralıkları oluşturarak bu sınıflar için bir histogram çizmektir. Böylelikle RÖP değerlerinin hangi aralıklarda yoğunlaştığı ve RÖP değerlerinin ayrıldığı noktalar belirlenebilir. Daha sonra bu ayrımlara göre öncelikli olarak önlem alınması gereken hata türleri saptanır.

HTEA çalışması sonucu alınacak önlemlerde amaç RÖP değerini azaltmaktır. Bunun içinde risk faktörlerinin derecelerini küçültecek önlemler alınır.

Olasılık derecesini küçültecek önlemler arasında [2],

- Planlar, şartnameler,
- Üretim yöntemleri, üretim akış yöntemleri,
- Organizasyon,
- Tasarımlar,
- Çevre ve koruma koşullarında değişiklikler yapmak sayılabilir.

Şiddet faktörü için belirlenen belirlenen dereceyi küçültmek için:

- İSG prensiplerine dayalı tasarımlar artırılır,
- Çalışanın sistem ile ilgili bilgileri artırılır,
- Periyodik kontrollere önem verilir.

Fark edilebilirlik faktörü için belirlenen dereceyi küçültmek için de şunlar yapılabilir [2]:

- Kontrol sıklıkları arttırılır,
- Kontrol yönteminin güvenilirliği artırılır,
- Uygun olmayan parçaların bir sonraki müşteriye ulaşmasını önleyecek fiziksel olanaklar sağlanır.

Adım 6: İyileştirme sonrası yeni RÖP değerleri hesaplanır.

Önlemlerin uygulamaya konması, HTEA'nın dinamik aşamasını oluşturur. Öncelikle önlemleri uygulayacak kişiler ve bunları ne kadar sürede uygulamaya koyacakları belirlenir. Daha sonra öngörülen önlemlerin yeterli etkinlikte uygulamaya alınıp alınmadıkları belirlenir. Önlemlerin devreye alınması çok önemlidir. Bu aşamada kritik RÖP değerleri ortadan kaldırılıncaya kadar çözümler incelenir ve değerlendirilir. RÖP değerinin istenilen düzeylere düşürülmesi hedefine ulaşıldığında yeni RÖP değerlerini bulmak, bazı durumlarda da ortaya çıkabilecek yeni hata türlerini saptamak için yeni bir HTEA uygulamasına başlanabilir.

Belirlenen önlemlerin uygulanmasından sonra HTEA başında belirlenen potansiyel hatalar için yeni bir RÖP değeri hesaplanır. Aynı hatalar için yeni değer, öncekinin ne kadar altında olduğu belirlenir. Yeni değer istenilen seviyeye inmiş ise uygulanan önlemler başarı ile sonuçlanmış demektir. İstenilen seviye için belirli bir limit yoktur. Bu tamamen takımın kararına bağlıdır. Eğer önlemler sonucu istenilen değere ulaşamadıysa yeni önlemler kararlaştırılmalıdır. Gerekli ise yeni bir HTEA uygulaması başlatılmalıdır [19].

3.5. HTEA'ne İlişkin Literatür Araştırması

Literatürde HTEA kullanılarak gerçekleştirilen birçok risk değerlendirme çalışması bulunmaktadır. Bu çalışmalara aşağıda değinilmiştir.

Chang et al., bulanık RÖP değerlerini hesaplayarak risk önceliklerini belirlemek için Gri İlişki Analizi (Grey Relation Analysis-GRA) yöntemini kullanmışlardır [29]. Braglia, buzdolabı üretimi yapan bir şirkette HTEA analizi ile AHP yöntemini birleştirerek uygulamışlardır [30]. Chang et al., ürün tasarımı ve süreç planlaması için GRA yönteminden faydalanmışlar ve sonuçları geleneksel HTEA ile elde edilen sonuçlarla karşılaştırmışlardır [31]. Braglia et al., ev cihazları üreten bir şirkette hata türlerini önceliklendirmek için bulanık TOPSIS yaklaşımını uygulamışlar ve sonuçlara dayalı duyarlılık analizlerini gerçekleştirmişlerdir [32]. Seyed-Hosseini et al., hataların önceliklendirilmesinde DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) yöntemini kullanmışlardır [33]. Chang, hata türlerinin önceliklendirilmesi için sıralı ağırlıklandırılmış geometrik ortalama operatörü (Ordered Weighted Geometric Average-OWGA) ile DEMATEL yöntemini birleştiren bir yaklaşım önermişlerdir [15]. Sachdeva et al., olasılık, tespit edilemezlik, sürdürülebilirlik, yedek parça, güvenlik ve maliyet gibi çok sayıda kriteri entropi yöntemi ile ağırlıklandırarak yeni bir HTEA yaklaşımı geliştirmişler ve hata türlerini TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi ile sıralamışlardır [34]. Chang and Cheng, silah tedarik sisteminde hataları önceliklendirmek için sezgisel bulanık küme teorisini kullanan yeni bir yaklaşım önermiş ve sonuçları kesin RÖP ve bulanık RÖP çıktılarıyla karşılaştırmışlardır [35]. Carmignan, FMEA için maliyet tabanlı yeni bir model önermiş ve otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firma için AHP yöntemiyle risk faktörlerini ağırlıklandırarak hatalar arasından en öncelikli olanın seçilmesini ele almıştır [36]. Hu et al., tehlikeli maddeler için geliştirilen risk değerlendirmesinde bulanık AHP ile risk faktörlerini ağırlıklandırarak geliştirilen GC-AHP (Green Component-Yeşil bileşenli ürün) ile yeni bir RÖP hesabı yapmışlardır [37]. Chang and Cheng, hataların önceliklendirilmesi için sezgisel bulanık sayılar ve DEMATEL (IFS-DEMATEL) yöntemini birleştiren bir risk tanımlama ve tahmin metodolojisi önermişler ve geleneksel HTEA, DEMATEL ve geliştirilen IFS-DEMATEL yöntemlerine ait sonuçları kıyaslamışlardır [38]. Abdelgawad and Fayek, geleneksel HTEA ile bulanık uzman sistemler ve bulanık AHP yöntemlerini birleştirmiştir [39]. Chang ve Cheng, sıralı ağırlıklandırılmış ortalama (Ordered Weighted Average- OWA) ve DEMATEL kullanarak hata türlerinin önceliklendirilmesini sağlayan bir yaklaşım önermişlerdir [40]. Geum et al., HTEA ve GRA yöntemlerini entegre ederek hata türlerini değerlendirmişlerdir [41].

Zammori and Gabrielli, hataların önceliklendirilmesi için hataların nedenleri arasındaki etkileşimi dikkate alan Analitik Ağ Süreci (Analytic Network Process-ANP) yöntemiyle RÖP hesabının yapıldığı bir HTEA yaklaşımı geliştirmişlerdir [42]. Li et al., HTEA metodolojisini sezgisel bulanık sayılar ile DEMATEL yaklaşımını kullanarak geliştirmişlerdir [43]. Kutlu ve Ekmekçioğlu, bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yaklaşımlarını birlikte kullanılarak hata türlerinin değerlendirilmesi yapmışlardır [44]. Liu et al., tanımlanan medikal hataların risk önceliklerinin belirlenebilmesi için bulanık VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) yaklaşımını kullanmışlardır [45]. Ekmekçioğlu ve Kutlu, delme süreci için bulanık AHP ve bulanık TOPSIS yaklaşımlarını kullanarak hataların önceliklendirmesini ele almışlardır [46]. Chang et al., GRA ve DEMATEL yöntemlerini birleştirilerek hücreyel imalata ilişkin hata türlerini değerlendirmişlerdir [47]. Song et al. tarafından nükleer yeniden ısıtma valf sisteminde oluşan hatalar için HTEA ile bulanık TOPSIS yöntemi birleştirilmiştir [48]. Hsu et al., malzeme sorunlarını değerlendirmek amacıyla risk faktörlerinin ağırlıklarını ANP kullanarak belirlemişler ve hataları önceliklendirmişlerdir [49]. Liu et al., yeni doğan kayıplarını önlemek için oluşan hataları önceliklendirmede bulanık küme teorisi ve MULTIMOORA yaklaşımlarını kullanarak bir risk öncelik modeli önermişlerdir [50]. Liu et al., sezgisel bulanık hibrid ağırlıklı öklit uzaklığı (Intuitionistic fuzzy hybrid weighted Euclidean distance (IFHWED)) operatorü kullanarak hata türlerini önceliklendirmişlerdir [51]. Liu et al., aralık çiftli ağırlıklandırılmış hibrid uzaklık ölçümü (Interval 2-tuple hybrid weighted distance measure) kullanarak sağlık hizmeti içerisinde oluşabilecek hata türlerini değerlendirmişler ve geleneksel HTEA ve bulanık VIKOR yöntemleriyle kıyaslamışlardır [52]. Chang et al. tarafından plaka halkaları üretimde oluşabilecek hata türlerinin önceliklendirilmesi için DEMATEL ve TOPSIS yaklaşımları kullanılmış ve sonuçlar geleneksel HTEA ve DEMATEL ile kıyaslanmıştır [53]. Helvacioğlu ve Ozen, HTEA'nın eksikliklerini ortadan kaldırabilmek amacıyla bulanık TOPSIS ile riskleri önceliklendirmişlerdir [54]. Song et al. tarafından belirsizlik ortamında buhar valfi için geliştirilmiş TOPSIS (rough TOPSIS) yaklaşımı ile risk faktörlerinin ağırlıkları belirlenmiş ve hata türleri sıralanmıştır [55]. Ilangkumaran et al., kağıt endüstrisinde bakım personeline yönelik HTEA ve bulanık AHP yöntemine dayalı bir risk değerlendirme modeli geliştirmişlerdir [56]. Adhikary et al., kömürle çalışan termik santrallerdeki risk faktörlerinin ağırlıkları için Shannon'un entropi yaklaşımı kullanmış ve hata

türlerinin sıralamasını Grey COmplex PROportional ASsessment (COPRAS-G) yöntemi ile yapmışlardır [57]. Du et al., hata türlerinin sıralanması için HTEA ile TOPSIS yöntemini birleştirmiştir [58]. Chang, ileri teknoloji endüstrisinde oluşacak süreç hatalarında yeni şeffaf küme (soft-set) sıralama tekniği uygulamasını yaparak sonuçların, geleneksel RÖP ve DEMATEL yöntemlerinin sonuçları ile kıyaslamasını içeren bir çalışma gerçekleştirmiştir [59]. Liu et al., X-ray makinesi için FMEA, GRA ve aralık çiftli (interval 2-tuple) dilsel değişkenleri birleştiren yeni bir yaklaşım önermişlerdir [60]. Benzer şekilde Liu et al., anestezi sürecindeki genel riskleri belirlemek için bulanık AHP ile entropi yöntemlerini birlikte kullanarak risk faktörlerinin ağırlıklarını belirlemiş; risk önceliklendirmesini ise bulanık VIKOR yöntemi ile gerçekleştirmişlerdir [61]. Liu et al., hata türlerinin önceliklerini belirlemek için sezgisel bulanık TOPSIS yaklaşımını geliştirmişlerdir [62]. Liu et al., dizel motor turbo şarj sistemi için hata türlerinin VIKOR metodu ile harmanlamış yeni bir yöntem önermişlerdir. Risk faktörleri önem ağırlıkları ve öncelik sırası için entropi tabanlı AHP kullanılmış ve hata türlerine ilişkin öncelik sırası elde edilmiştir [63]. Liu et al., hata türlerini bulanık ağırlıklı ortalama (Fuzzy Wighted Average-FWA) ve bulanık DEMATEL yöntemi ile sıralamışlar ve geleneksel HTEA sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır [64]. Emovon et al., deniz makine sistemlerinde oluşan hataları VIKOR tekniği ile önceliklendirmişler ve sonuçları uzlaşık programlama (Compromise Programming) ve TOPSIS sonuçları ile karşılaştırmışlardır [65]. Chang, dizüstü bilgisayar modülünde risk değerlendirmesi için TOPSIS yaklaşımını kullanmış ve sonuçları geleneksel HTEA ile kıyaslamışlardır [66]. Vahdani et al., çelik üretim sürecinde risk değerlendirmesi için bulanık TOPSIS yaklaşımını kullanmışlardır [67]. Wang et al. tarafından sağlık hizmetlerinde oluşacak hataları önceliklendirmede, değer aralıklı ANP (Interval Valued Analitic Network Process) ile üç risk faktörü ağırlıklandırılmış; değer aralıklı COPRAS (Interval Valued COPRAS) ile de hata türleri sıralanmıştır [68]. Safari et al., kurumsal mimari risklerinin önlenmesi için bulanık VIKOR yaklaşımı kullanmışlardır [69]. Chang, elektronik endüstrisinde risk değerlendirmesi için AHP ve çiftli sayı ile gösterim (2-tuple representation) metodunun kullanılmasıyla hata türlerini sıralanmışlardır [70]. Zhao et al., HTEA'da kullanılan üç risk faktörü için önem ağırlıklarını aralık değerli ağırlıklandırılmış sürekli sezgisel bulanık entropi (interval-valued intuitionistic fuzzy continuous weighted entropy) ile belirlemişler ve en yüksek önceliğe sahip hata türünü bulmak için ise değer aralıklı sezgisel

bulanık MULTIMOORA kullanılmıştır [71]. Elde edilen sonuçlar geleneksel HTEA, MULTIMOORA, Bulanık TOPSIS, değer aralıklı The Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) ve değer aralıklı TOPSIS sonuçları karşılaştırılmıştır. Wang et al., entropi ve DEMATEL yöntemlerini kullanarak hataların önceliklendirilmesini gerçekleştirmişlerdir [72].

3.6. HTEA'nin Geliştirilmesi Gereken Yönleri

Her ne kadar kabul görmüş sistematik bir yaklaşım olsa da geleneksel HTEA prosedürünün geliştirilmesi gereken birçok yönü bulunmaktadır. Bunlar aşağıda verildiği gibidir:

HTEA'da olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik risk faktörlerinin eşit önem ağırlığına sahip olduğu varsayılmaktadır.

Olasılık, şiddet ve farkedilebilirlik risk faktörlerinin farklı değerleri için aynı RÖP değerleri elde edilebilmektedir.

HTEA ekip üyeleri tarafından üç risk faktörü için yapılan değerlendirmeler farklılaşmaktadır. Ancak bu farklılaşma RÖP'na yansıtılamamaktadır.

Üç risk faktörünün çarpımıyla elde edilen RÖP matematiksel olarak değişimlere karşı duyarlıdır.

Hata türlerinin risk düzeyini belirleyen faktörler arasındaki doğrudan veya dolaylı ilişkiler göz ardı edilmektedir.

Üç risk faktörünün ölçümünde kesikli skalalara göre değerlendirmeler yapılmaktadır.

RÖP hesabında sadece üç risk faktörü göz önünde bulundurulmuştur. Oysaki hata türüne ait riskin büyüklüğü başka faktörlere de bağlıdır.

RÖP sürekli değerlere sahip değildir.

RÖP yaklaşımı, düzeltici eylemlerin önemini ihmal ederek sadece risk açısından duruma bakmaktadır. Bu nedenle önleyici ve düzeltici önlemlerin etkinliğini ölçmemektedir.

Hata türlerinin önceliklendirilmesinde gerçekçi kısıtları dikkate almamaktadır.

Hata türü önceliklerinin belirlenmesinde genel olarak dilsel değişkenler kullanılmakta ve özellikle potansiyel hata türleri değerlendirilirken geleceğe yönelik yapılan yorumlar belirsizlik içermektedir.

Hata türlerinin birbirleri üzerindeki etkisini dikkate almamaktadır. Oysaki gerçek sistemlerde bir hata türünün ortaya çıkması diğer bir hata türünün ortaya çıkmasını beraberinde getirebilir.

Risk faktörlerinin ortaya çıkarabilecekleri riskin büyüklüğü açısından benzerlikleri dikkate alınmamaktadır.

Sürece farklı karar verici kararları yansıtılmamaktadır.

Tez çalışmasında geliştirilen yaklaşımla, sadece üç risk faktörünü dikkate alınmayarak daha fazla risk faktörü ile çalışan, risk faktörlerine ait önem ağırlıklarını hesaplarken aralarındaki benzerlikleri dikkate alan, aynı RÖP değerleri elde etmeye ve matematiksel çarpımdan doğan aşırı duyarlılığa izin vermeyen, kesikli skala kullanmayan, farklı karar verici fikirlerinin sürece dahil edildiği ve değerlendirmeleri için kullanılan skalaların gelecekle ilgili belirsizliği gösterebildiği, hata türleri arasındaki etkileşimi modelleyen ve uygulanan işletme açısından gerçekçi kısıtları göz önüne alan bir yöntem elde edilmiştir.

4. ÇOK ÖLÇÜTLÜ SINIR YAKLAŞIM ALANI KIYASLAMASI (THE MULTİATTRİBUTİVE BORDER APPROXİMATION AREA COMPARIŞON (MABAC)) YÖNTEMİ

MABAC, Pamučar ve Ćirović tarafından Belgrad'da bulunan University of Defence'de geliştirilmiştir [73]. Pamučar and Ćirović (2015), forklift seçimi için DEMATEL ve MABAC yöntemlerini kullanmış ve üç aşamada duyarlılık analizi yapmışlardır. İlk aşamada kriter ağırlıklarındaki değişime dayalı olarak MABAC yöntemi aracılığıyla elde edilen sonuçların tutarlılığını analiz etmişlerdir. Karşılaştırma için kullanılan diğer metotların bu değişimlere daha duyarlı olduğu tespit edilmiştir. İkinci aşamada tutarlılık(consistency) analizi yapılmış ve bu analiz iki aşamaya ayrılmıştır. İlk olarak değerlendirme kullanılan skala değerleri değiştirilmiş ve diğer Çok Ölçütlü Karar Verme (ÇÖKV) yöntemleri üzerinde denenmiştir. Elde edilen sonuçta MABAC yönteminin skala değerlerine bağımlı olmadığı ve sonuçların değişmediği görülmüştür. Ardından kriter tanımlamada oluşabilecek farklılıklardan etkilenme durumu değerlendirilmiştir. Diğer bir ifadeyle, sistem ele alındığında fayda temelli kriter maliyet temelli de düşünülebileceğinden her iki durumda da sonuçların bağımsız olması yani sonuçların etkilenmemesi gerektiği düşünüldüğünden bu durum 3 farklı senaryoyla değerlendirilmiştir. Bu üç durum için de MABAC tutarlı sonuçlar sağlayan ve rasyonel karar vermede güvenilir bir araç olarak değerlendirilmiştir.

Ürettiği sonuçların tutarlılığına dayanarak yeni geliştirilen bir yöntem olmasına rağmen birçok çalışmada kullanılmıştır. Božanić et al., askeri alanda kullanmak amacıyla mevzi yer seçimi için bulanık AHP-MABAC yaklaşımı geliştirmişlerdir [74]. Cao et al., alternatiflerin değerlendirilmesinde stokastik değer aralıklı sezgisel bulanık MABAC yöntemini kullanmışlardır [75]. Xue et al., malzeme seçiminde değer aralıklı sezgisel bulanık kümeye dayalı MABAC yaklaşımı geliştirmişlerdir [76]. Peng ve Yang, Pisagor (Pythagorean) Bulanık Choquet integral ortalaması (PFCIA) operatörü ve MABAC yöntemini kullanarak yeni bir yaklaşım önermişlerdir [77]. Yöntemin uygulanışına ilişkin adımlar aşağıda belirtilmiştir.

Adım 1: Başlangıç Karar Matrisini Oluştur.

Her bir kriter $C_j; j = 1, \dots, n$ için her bir alternatif $A_i; (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ değerlendirilir. Alternatiflerin kriterlere göre değerlendirme matrisi $[X] = [x_{ij}]$ Eşitlik (4.1)'dedir.

$$[X] = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & x_{13} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & x_{23} & \dots & x_{2n} \\ x_{31} & x_{32} & x_{33} & \dots & x_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & x_{m3} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Adım 2: Normalize Matrisi Oluştur.

Fayda ve maliyet olarak iki farklı normalizasyon yapılır ve $[N] = [n_{ij}]$ matrisi Eşitlik (4.2)'deki gibi oluşturulur. Fayda temelli maliyetler için Eşitlik (4.3); maliyet temelli kriterler için Eşitlik (4.4) kullanılır.

$$[N] = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} n_{11} & n_{12} & n_{13} & \dots & n_{1n} \\ n_{21} & n_{22} & n_{23} & \dots & n_{2n} \\ n_{31} & n_{32} & n_{33} & \dots & n_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{m1} & n_{m2} & n_{m3} & \dots & n_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

$$n_{ij} = \frac{x_{ij} - x_i^-}{x_i^+ - x_i^-} \quad (4.3)$$

$$n_{ij} = \frac{x_i^- - x_{ij}}{x_i^- - x_i^+} \quad (4.4)$$

Burada,

$x_i^+ = \max(x_1, x_2, \dots, x_m)$ olmak üzere kriter bazında gözlemlenen en büyük değeri,

$x_i^- = \min(x_1, x_2, \dots, x_m)$ olmak üzere kriter bazında gözlemlenen en küçük değeri ifade etmektedir.

Adım 3: Ağırlıklandırılmış Normalize Matrisi Oluştur.

Ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi $[V]$ Eşitlik (4.5) oluşturulur ve $[V] = [v_{ij}]$ Eşitlik (4.6)'daki gibi elde edilir.

$$v_{ij} = w_i(n_{ij} + 1) \quad (4.5)$$

$$[V] = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & \dots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & \dots & v_{2n} \\ v_{31} & v_{32} & v_{33} & \dots & v_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & v_{m3} & \dots & v_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Adım 4: Sınır Yaklaşım Alanı Vektörü Tanımla.

Sınır yaklaşım alanı Eşitlik (4.7) ile elde edilir. Her bir kriter için g_i hesaplandıktan sonra $n \times 1$ boyutunda matris olarak sınır yaklaşım alan vektörü G Eşitlik (4.8)'deki gibi gösterilir.

$$g_i = \left(\prod_{j=1}^m v_{ij} \right)^{1/m} \quad (4.7)$$

$$G = [g_1 \quad g_2 \quad \dots \quad g_n] \quad (4.8)$$

Adım 5: Uzaklık Matrisini Oluştur.

Her bir alternatifin sınır yaklaşım alanına olan uzaklığı (q_{ij}), ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi $[V]$ ile sınır yaklaşım alanı (G) arasındaki farkı ifade etmek için bulunur. Böylece uzaklık matrisi $[Q]$ Eşitlik (4.9)'daki gibi elde edilir.

$$[Q] = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} q_{11} & q_{12} & q_{13} & \dots & q_{1n} \\ q_{21} & q_{22} & q_{23} & \dots & q_{2n} \\ q_{31} & q_{32} & q_{33} & \dots & q_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{m1} & q_{m2} & q_{m3} & \dots & q_{mn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{11} - g_1 & v_{12} - g_2 & v_{13} - g_3 & \dots & v_{1n} - g_n \\ v_{21} - g_1 & v_{22} - g_2 & v_{23} - g_3 & \dots & v_{2n} - g_n \\ v_{31} - g_1 & v_{32} - g_2 & v_{33} - g_3 & \dots & v_{3n} - g_n \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} - g_1 & v_{m2} - g_2 & v_{m3} - g_3 & \dots & v_{mn} - g_n \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Alternatif A_i , sınır yaklaşım alanı (G), üst yaklaşım alanı (G^+) veya alt yaklaşım alanı (G^-) içerisinde yer alabilir. Üst yaklaşım alanı (G^+) ideal alternatifleri (A^+) barındırırken; alt yaklaşım alanı (G^-) ideal olmayan alternatifleri (A^-) içermektedir. A_i 'nin konumu ise Eşitlik (4.10)'a bağlıdır.

$$A_i \in \begin{cases} G^+, & q_{ij} > 0 \\ G, & q_{ij} = 0 \\ G^-, & q_{ij} < 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Adım 6: Alternatifleri Sırala.

Alternatiflerin kriterlere göre aldıkları değer yakınlık katsayısı S_i ile hesaplanır. S_i , $[Q]$ uzaklık matrisinde yer alan satır elemanlarının toplanması ile Eşitlik (4.11)'deki gibi hesaplanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n q_{ij}, \quad j = 1, \dots, n, i = 1, \dots, m \quad (4.11)$$

5. SEZGİSEL BULANIK KÜME (SBK) TEORİSİ

Bulanık Küme (BK) Teorisi, 1965 yılında Zadeh tarafından geliştirilmiştir. Zadeh, klasik küme kavramının, gerçek dünyada karşılaşılan problemlerde, özellikle insan yargı ve düşüncelerini içeren karmaşık sistemlerle uğraşırken yetersiz kalması nedeniyle, niteliklerin (küme elemanlarının) ikili üyelik fonksiyonuyla ifade edilen klasik kümeler yerine, dereceli üyelik fonksiyonlarıyla ifade edildiği bulanık kümelerle tanımlamasını önermiştir [79]. Bulanık kümenin mantığı kümenin elemanlarına $[0, 1]$ arasında değişen üyelik derecesi atamaktır. Bulanık A kümesinde bir elemanın kümeye ait olma derecesi μ_A iken ait olmama derecesi ise $(1 - \mu_A)$ olarak ifade edilir. Böylece ait olma derecesi ve ait olmama derecelerinin toplamı 1'e eşit olur. Fakat bu yaklaşım gerçek hayatta karşılaşılan uygulamalardaki belirsizliği ele almakta etkin bir yöntem değildir. Çünkü ait olma ve ait olmama derecelerinin toplamı birden küçük olabilmektedir. Atanassov yaptığı çalışmalarda, gerçek hayatta insan deneyimlerine göre belirlenen bir kümenin gerçek üyelik değerinin tam olarak bilinemeyeceğini bu nedenle, sonucun öngörüldüğü gibi olamayacağını belirtmektedir. Bu problemin çözümü için, Zadeh'in bulanık mantık küme teoremine ek olarak sezgisel bulanık indisi ya da tereddüt derecesi olarak adlandırılan π_A katsayısını tanımlamıştır. Atanassov bir elemanın bir kümeye üye olma derecesi, üye olmama derecesi ve tereddüt derecesi (belirlenemezlik derecesi) ile ifade edilen ve BK'nin genelleştirilmiş bir şekli olan Sezgisel Bulanık Küme (SBK) teorisini geliştirilmiştir [78].

SBK'lerin, nesnelerin bulanıklığı ve belirsizliğinin tanımlanmada BK'lere göre daha kullanışlı olduğu kanıtlanmıştır [80; 84]. SBK, karar verme, tıbbi teşhis, örüntü tanıma gibi çok çeşitli alanlara başarılı bir şekilde uygulanmıştır.

5.1. Sezgisel Bulanık Küme Kavramı

SBK kavramı aşağıdaki gibi tanımlanabilir [78]:

Tanım 5.1. $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ sonlu bir evrensel küme olsun. X kümesindeki bir sezgisel bulanık küme \tilde{A} :

$$\tilde{A} = \{(\langle x, \mu_{\tilde{A}}(x), \nu_{\tilde{A}}(x) \rangle | x \in X)\} \quad (5.1)$$

şeklinde tanımlanır ve $\mu_{\tilde{A}}: X \rightarrow [0, 1]$ ve $v_{\tilde{A}}: X \rightarrow [0, 1]$ fonksiyonları sırasıyla x elemanının \tilde{A} kümesine üye olma ve üye olmama derecesini gösterir [78]. Buradaki her bir üyelik fonksiyonu bir klasik evrensel kümenin elemanlarını $[0, 1]$ aralığındaki bir sayıya karşılık getiren bir fonksiyondur. Her $x \in X$ için:

$$0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) + v_{\tilde{A}}(x) \leq 1 \quad (5.2)$$

koşulu geçerlidir ve $\pi_{\tilde{A}}(x) = 1 - \mu_{\tilde{A}}(x) - v_{\tilde{A}}(x)$ değeri, x elemanının \tilde{A} kümesine ilişkin tereddütlük, belirlenemezlik veya şühe indeksini ifade etmektedir. Tereddütlük indeksi herhangi bir x elemanının \tilde{A} kümesine ait olup olmamasının tereddütlük düzeyini belirtmektedir. Buradan hareketle, tereddütlük indeksi her $x \in X$ için $[0, 1]$ arasında değişmektedir.

$$0 \leq \pi_{\tilde{A}}(x) \leq 1 \quad (5.3)$$

Tereddütlük indeksi bilgi eksikliği veya kişisel hataları en aza indirmek için tercih edilen bir kavramdır. Eğer $\pi_{\tilde{A}}(x)$ değeri küçükse x elemanı hakkındaki bilgi göreceli olarak daha kesindir. Eğer $\pi_{\tilde{A}}(x)$ değeri büyükse x elemanı hakkındaki bilgi göreceli olarak daha belirsizdir. $\pi_{\tilde{A}}(x)$ değeri 0'a eşit olduğunda x elemanı hakkındaki bilgi kesindir. Bu durumda SBK bulanık BK'ye dönüşmektedir.

Tereddütlük indeksi belirli bir konu hakkında, bir uzmanın kararsızlığını ya da bilgi eksikliğini yansıtır. Bu nedenle, SBK'lerde bilginin ifade edilmesi BK'lere göre daha kolaydır.

Tanım 5.2. X boş olmayan bir küme ve $\tilde{A}, \tilde{B} \in SBS(X)$ kümeleri sırasıyla

$$\tilde{A} = \{ \langle (x, \mu_{\tilde{A}}(x), v_{\tilde{A}}(x)) \mid x \in X \rangle \} \quad \tilde{B} = \{ \langle (x, \mu_{\tilde{B}}(x), v_{\tilde{B}}(x)) \mid x \in X \rangle \}$$

$$0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x) + v_{\tilde{A}}(x) \leq 1$$

$$0 \leq \mu_{\tilde{B}}(x) + v_{\tilde{B}}(x) \leq 1$$

$\mu_{\tilde{A}}: X \rightarrow [0, 1]$ $v_{\tilde{A}}: X \rightarrow [0, 1]$, $\mu_{\tilde{B}}: X \rightarrow [0, 1]$ $v_{\tilde{B}}: X \rightarrow [0, 1]$ şeklinde gösterilsin. Buna göre SBK'lerde işlemler aşağıdaki gibi gerçekleştirilir.

$$\begin{aligned} A \cup B &= \{ \langle (x, \mu_{\tilde{A}}(x) \vee \mu_{\tilde{B}}(x), v_{\tilde{A}}(x) \wedge v_{\tilde{B}}(x)) \mid x \in X \rangle \} \\ &= \{ \langle (x, \max(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)), \min(v_{\tilde{A}}(x), v_{\tilde{B}}(x))) \mid x \in X \rangle \} \end{aligned} \quad (5.4)$$

$$A \cap B = \{\langle x, \mu_{\tilde{A}}(x) \wedge \mu_{\tilde{B}}(x), v_{\tilde{A}}(x) \vee v_{\tilde{B}}(x) \rangle | x \in X\}$$

$$= \{\langle x, \min(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)), \max(v_{\tilde{A}}(x), v_{\tilde{B}}(x)) \rangle | x \in X\} \quad (5.5)$$

$$\tilde{A} \subset \tilde{B} \Leftrightarrow \forall x \in X \text{ için } \mu_{\tilde{A}}(x) \leq \mu_{\tilde{B}}(x), v_{\tilde{A}}(x) \geq v_{\tilde{B}}(x) \quad (5.6)$$

$$\tilde{A} = \tilde{B} \Leftrightarrow \forall x \in X \text{ için } \mu_{\tilde{A}}(x) = \mu_{\tilde{B}}(x), v_{\tilde{A}}(x) = v_{\tilde{B}}(x) \quad (5.7)$$

$$\tilde{\tilde{A}} = \{\langle x, v_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{A}}(x) \rangle | x \in X\} \quad (5.8)$$

Tanım 5.3: $\tilde{A} = \{\langle x, \mu_{\tilde{A}}(x), v_{\tilde{A}}(x) \rangle | x \in X\}$ $\tilde{B} = \{\langle x, \mu_{\tilde{B}}(x), v_{\tilde{B}}(x) \rangle | x \in X\}$ iki sezgisel bulanık küme olsun. $S(\tilde{A})$ ve $S(\tilde{B})$ sırasıyla \tilde{A} ve \tilde{B} kümelerine ait skor değerleridir.

$$S(\tilde{A}) = \mu_{\tilde{A}}(x) - v_{\tilde{A}}(x) \quad (5.9)$$

$$S(\tilde{B}) = \mu_{\tilde{B}}(x) - v_{\tilde{B}}(x) \quad (5.10)$$

Eğer,

- i. $S(\tilde{A}) > S(\tilde{B})$ ise $\tilde{A} \geq \tilde{B}$
- ii. $S(\tilde{A}) = S(\tilde{B})$ ise
 - a. $H(\tilde{A}) \geq H(\tilde{B})$ ise $\tilde{A} \geq \tilde{B}$
 - b. $H(\tilde{A}) = H(\tilde{B})$ ise $\tilde{A} = \tilde{B}$

Burada $H(\tilde{A})$ ve $H(\tilde{B})$ sezgisel bulanık kümeye ait kesinlik fonksiyonudur ve Eşitlik (5.11) ve Eşitlik (5.12) ile hesaplanır.

$$H(\tilde{A}) = \mu_{\tilde{A}}(x) + v_{\tilde{A}}(x) \quad (5.11)$$

$$H(\tilde{B}) = \mu_{\tilde{B}}(x) + v_{\tilde{B}}(x) \quad (5.12)$$

5.2. Sezgisel Bulanık Kümelerde Aritmetik Operatörler

İki sezgisel bulanık küme $A = \{\langle x, \mu_A(x), v_A(x) \rangle | x \in X\}$ $B = \{\langle x, \mu_B(x), v_B(x) \rangle | x \in X\}$ ve $\tilde{a}_j = (\mu_j, v_j)$ olarak tanımlanmış olsun. Buna göre aşağıdaki aritmetik operasyonlar gerçekleştirilir [83].

$$\tilde{A} + \tilde{B} = \{\langle x, \mu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(x), v_{\tilde{A}}(x) \cdot v_{\tilde{B}}(x) \rangle | x \in X\} \quad (5.13)$$

$$\tilde{A} \cdot \tilde{B} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x) \cdot \mu_{\tilde{B}}(x), \nu_{\tilde{A}}(x) + \mu_{\tilde{B}}(x) - \nu_{\tilde{A}}(x) \cdot \nu_{\tilde{B}}(x)) | x \in X\} \quad (5.14)$$

5.3. Sezgisel Bulanık Kümelerde Birleştirme Operatörleri

Birleştirme operatörü, bir sayı kümesini tek bir temsilciye veya anlamlı bir sayıya indirgeyen bir fonksiyondur. Birleştirme operatörü, bileşenleri belli bir kümeden alınan n boyutlu bir vektörü, bu kümeden bir elemana götürür. Böylelikle birçok kaynaktan alınan bilgi parçaları aynı anda kullanılmış olur [80].

Xu ve Yager, geometrik ortalama operatörünü sezgisel bulanık kümelere genişleterek sezgisel bulanık ağırlıklı geometrik ortalama, sezgisel bulanık sıralı ağırlıklı geometrik ortalama ve sezgisel bulanık hibrit ortalama operatörlerini tanımlamışlardır [81]. Xu, yaptığı çalışmada sezgisel bulanık kümelerde ağırlıklı ortalama, sıralı ağırlıklı ortalama ve hibrit ortalama operatörlerini tanımlamışlardır [82].

Bu operatörlerden sezgisel bulanık ağırlıklı ortalama ve sezgisel bulanık geometrik ortalama operatörleri aşağıda Tanım (5.4) ve Tanım (5.5)'te verilmiştir [83].

Tanım 5.4: Ağırlıklandırılmış Aritmetik Ortalama Operatörü (Intuitionistic Fuzzy Weighted Average-IFWA)

$\tilde{a}_j = (\mu_j, \nu_j), j = 1, 2, \dots, n$ sezgisel bulanık sayılar olsun. Bu sayılara ilişkin IFWA operatörü Eşitlik (5.15)'de verildiği gibidir.

IFWA: $\Omega^n \rightarrow \Omega$

$$IFWA_w = (\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) = \sum_{j=1}^n w_j \tilde{a}_j = [1 - \prod_{j=1}^n (1 - \mu_j)^{w_j}, \prod_{j=1}^n \nu_j^{w_j}] \quad (5.15)$$

Burada,

Ω , sezgisel bulanık evrensel kümesidir.

$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ ağırlık vektörünü temsil etmektedir ve $w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$ ve $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 'dir.

Tanım 5.5: Ağırlıklandırılmış Geometrik Ortalama Operatörü (Intuitionistic Fuzzy Weighted Geometric-IFWG)

$\tilde{a}_j = (\mu_j, \nu_j), j = 1, 2, \dots, n$ sezgisel bulanık sayılar olsun. Bu sayılara ilişkin IFWA operatörü Eşitlik (5.16)'de verildiği gibidir.

$IFWG: \Omega^n \rightarrow \Omega$

$$IFWG_w = (\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) = a_1^{w_1} \otimes a_2^{w_2} \otimes \dots \otimes a_n^{w_n} \\ [\prod_{j=1}^n \mu_j^{w_j}, 1 - \prod_{j=1}^n (1 - \nu_j)^{w_j}] \quad (5.16)$$

Burada;

Ω , sezgisel bulanık evrensel kümesidir.

$W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ ağırlık vektörünü temsil etmektedir ve $w_j \geq 0, j = 1, 2, \dots, n$ ve $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 'dir.

5.4. Sezgisel Bulanık Sayı (SBS)

5.4.1. Üçgensel sezgisel bulanık sayı

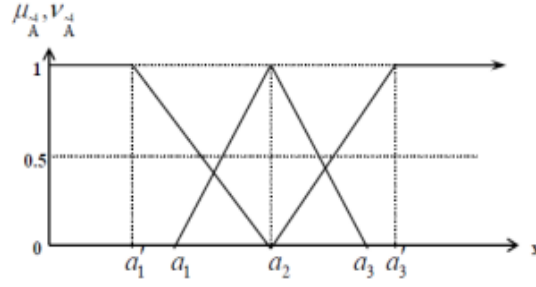
Sezgisel bulanık sayıların özel bir çeşidi olan üçgensel bulanık sayı, $(a_1, a_2, a_3)(a'_1, a_2, a'_3)$ olmak üzere beş tane gerçek sayıdan oluşan parametre ile tanımlanır. Bu parametreler sırasıyla üye olmalara ilişkin en küçük olası değeri, en olası değeri ve en büyük olası ve üye olmamalara ilişkin en küçük olası değeri, en olası değeri ve en büyük olası değeri ifade eder. $\tilde{a} = (a_1, a_2, a_3)(a'_1, a_2, a'_3)$ üçgensel sezgisel bulanık bir sayı olmak üzere, üyelik fonksiyonu Eşitlik (5.17)'teki ve üye olmama fonksiyonları Eşitlik (5.18)'teki gibi tanımlanır.

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{x-a_1}{a_2-a_1}, & a_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{a_3-x}{a_3-a_2}, & a_2 \leq x \leq a_3 \\ 0 & \text{dd.} \end{cases} \quad (5.17)$$

$$\nu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} \frac{a_2-x}{a_2-a'_1}, & a'_1 \leq x \leq a_2 \\ \frac{x-a_2}{a'_3-a_2}, & a_2 \leq x \leq a'_3 \\ 1 & \text{dd.} \end{cases} \quad (5.18)$$

$\tilde{a} = (a_1, a_2, a_3; a'_1, a_2, a'_3)$ bir sezgisel bulanık sayı olmak üzere Eşitlik (5.19)'daki koşulları sağlamak zorundadır ve Şekil (5.1)'deki gibi gösterilir.

$$a'_1 \leq a_1 \leq a_2 \leq a_3 \leq a'_3 \quad (5.19)$$



Şekil 5.1 \tilde{a} sayısının gösterimi

5.4.2. Üçgensel bulanık sayılarda aritmetik operatörler

$\tilde{a} = (a_1, a_2, a_3)(a'_1, a_2, a'_3)$ ve $\tilde{b} = (b_1, b_2, b_3)(b'_1, b_2, b'_3)$ iki pozitif sezgisel bulanık sayı olmak üzere aşağıda verilen aritmetik işlemler gerçekleştirilebilir (Li ve Yang, 2004).

$$\tilde{a} + \tilde{b} = (a_1 + b_1, a_2 + b_2, a_3 + b_3)(a'_1 + b'_1, a_2 + b_2, a'_3 + b'_3) \quad (5.20)$$

$$\tilde{a} - \tilde{b} = (a_1 - b_3, a_2 - b_2, a_3 - b_1)(a'_1 - b'_3, a_2 - b_2, a'_3 - b'_1) \quad (5.21)$$

$$\tilde{a} \times \tilde{b} = (a_1 b_1, a_2 b_2, a_3 b_3)(a'_1 b'_1, a_2 b_2, a'_3 b'_3) \quad (5.22)$$

$$\tilde{a} \times k = (a_1 k, a_2 k, a_3 k)(b'_1 k, a_2 k, b'_3 k), k \geq 0 \quad (5.23)$$

$$\tilde{a} \times k = (a_3 k, a_2 k, a_1 k)(b'_3 k, a_2 k, b'_1 k), k \leq 0 \quad (5.24)$$

$$\lambda a = \left(1 - (1 - \mu_A(x))^\lambda, v_A(x)^\lambda\right), \lambda \geq 0 \quad (5.25)$$

$$a^\lambda = (\mu_A(x)^\lambda, 1 - (1 - v_A(x))^\lambda), \lambda \geq 0 \quad (5.26)$$

Tanım 5.6: Üçgensel sezgisel bulanık sayılara ilişkin durulaştırma Eşitlik (5.27)'deki gibi gerçekleştirilir.

$$\mathcal{R}(\tilde{a}) = \frac{1}{3} \left[\frac{(a'_3 - a'_1)(a_2 - 2a'_3 - 2a'_1) + (a_3 - a_1)(a_1 + a_2 + a_3) + 3(a_3'^2 - a_1'^2)}{a_3' - a_1' + a_3 - a_1} \right] \quad (5.27)$$

Tez çalışması kapsamında ağırlıklandırılmış geometrik ortalama operatörü kullanılmıştır. Çünkü ikili karşılaştırmalarda iki yönlü karşılaştırmada tutarlılığı sağlayabilmek için geometrik ortalamayla birleştirmenin yapılması doğru bir

yaklaşımıdır. Ayrıca, Eşitlik (5.27)'de verilen durulaştırma sezgisel bulanık matematiksel modelde doğruluğu ispatlanmış ve kullanılan bir yaklaşımıdır.



6. SEZGİSEL BULANIK OPTİMİZASYON

Deterministik optimizasyon, çok fazla tercih edilse de gerçek hayat problemlerini yansıtamadığı durumlar ortaya çıkabilmektedir. Kesin ilişkilerle optimizasyon probleminin kısıtlarını tanımlamak oldukça zordur. Pratik olarak belirli bir kısıtın küçük ihlalleri kabul edilebilir ve problemin daha etkili bir çözümüne ulaşılması sağlanabilir [85; 89]. Deterministik optimizasyonda, amaç fonksiyonu, verilen herhangi bir fonksiyon değerinin muhtemel etkisinin sübjektif tahminini temsil eder. Bu sebeple, uzun yıllardır optimizasyon problemleri bulanık küme teorisi açısından araştırılmaktadır [86;87,88]. Bulanık optimizasyon, daha esnek ve gerçek hayat problemine uygun çözüm bulmaya izin veren bir yaklaşımdır. Bulanık optimizasyon geliştirilerek farklı yaklaşımlar ortaya atılmıştır. Bunlardan birisi de sezgisel bulanık optimizasyondur [78]. Sezgisel bulanık optimizasyonda, üye olma derecesi kabul etme derecesini gösterirken, üye olmama derecesi reddetme derecesini ifade etmektedir. Bu tür modellemelerde, kabul edilemez amaç değerleri ve kısıtların reddetme dereceleri kullanarak optimizasyon problemini yeniden formüle etmek mümkündür. Kabul ve reddetme derecelerinin toplamı 1'e eşit veya küçük olmak koşulu ile kabul ve reddetme dereceleri herhangi bir değer alabilir.

Genel olarak, optimizasyon problemi Eşitlik (6.1)'de gösterildiği gibi amaç ve kısıtlardan oluşmaktadır.

$$f_i(x) \rightarrow \min, i = 1, \dots, p$$

$$\text{kısıtları altında } g_j(x) \leq 0, j = 1, \dots, q \quad (6.1)$$

Burada;

x , karar değişkeni; $f_i(x)$ amaç fonksiyonu; $g_j(x)$ kısıtlar; p amaç fonksiyonu sayısı ve q kısıt sayısını ifade etmektedir.

Bulanık optimizasyon probleminde ise amaç(lar), ve/veya kısıtlar veya parametreler ve ilişkiler Eşitlik (6.2)'de verildiği gibi bulanık küme aracılığıyla modellenmektedir. Bu tür optimizasyon problemlerinin çözümü tüm sınırlamaları sağlar ve amaç ve kısıtların sağlanma derecelerinin en yüklenmesi istenir.

$$f_i(x) \rightarrow \tilde{\min}, i = 1, \dots, p$$

$$\text{kısıtları altında } g_j(x) \lesssim 0, j = 1, \dots, q \quad (6.2)$$

Burada;

\tilde{min} , bulanık en küçüklemeyi,

\lesssim , bulanık eşitsizliği ifade etmektedir.

Eşitlik (6.2)'de gösterilen genel bulanık optimizasyon modeli Bellman-Zadeh yaklaşımı kullanılarak Eşitlik (6.3)'teki optimizasyon problemine dönüşür [88]. Bu yaklaşım, ilgili bulanık kümeye, amaç(lar)ın ve kısıtların üyelik (kabul) derecelerinin en büyüklenmesini amaçlamaktadır.

$$\max \mu_i(x) \quad x \in R^n, i = 1, \dots, p + q$$

$$\text{kısıtları altında } 0 \leq \mu_i(x) \leq 1 \quad (6.3)$$

Burada;

$\mu_i(x)$, x 'in ilgili bulanık kümeye ait olma derecesini ifade etmektedir.

Sezgisel bulanık modellemede ise amaç(lar)ın ve kısıtların üye olma derecelerinin (kabul derecesi) en büyüklenmesi ele alınırken; üye olmama derecelerinin (red etme derecesi) en küçüklenmesi sağlanır. Sezgisel bulanık optimizasyon literatürde sınırlı sayıda çalışmada kullanılmıştır. Bu çalışmalardan aşağıda bahsedilmiştir.

Chakraborty et al., ulaştırma maliyeti, talep ve arzların belirsizliğini üçgensel sezgisel bulanık sayılarla ifade ettikleri ulaştırma problemini ele almışlardır [92]. Dubey et al., sezgisel bulanık sayıları kullanarak çok amaçlı esnek doğrusal programlama (The Multi-Objective Flexible Linear Programming-MOFLP) geliştirmiştir ve MOFLP için yeni bir Pareto optimal çözüm ele etmişlerdir [93]. Dey and Roy, çok amaçlı doğrusal olmayan programlama için yeni bir çok amaçlı sezgisel bulanık hedef programlama yaklaşımı önermişlerdir [94]. Sezgisel Bulanık modelleme kapsamında en sık kullanılan modeller Angelov ve Pramanik ve Roy tarafından geliştirilmiştir. Aşağıda bu modellere yer verilmiştir.

Angelov'un Modeli [90]

Bu model Angelov tarafından 1997 yılında geliştirilmiştir. Aşağıda Eşitlik (6.4) ile söz konusu modele yer verilmiştir.

$$\max_x \{\mu_i(x)\}, x \in R^n, i = 1, \dots, p + q$$

$$\min_x \{v_i(x)\}, i = 1, \dots, p + q$$

$$\text{kısıtları altında } v_i(x) \geq 0, i = 1, \dots, p + q$$

$$\mu_i(x) \geq v_i(x), i = 1, \dots, p + q$$

$$\mu_i(x) + v_i(x) \leq 1, i = 1, \dots, p + q \quad (6.4)$$

Bu modelin çözülebilmesi için Eşitlik (6.5) ile verilen koşulların sağlanması gereklidir.

$$\alpha \leq \mu_i(x), i = 1, \dots, p + q$$

$$\beta \geq v_i(x), i = 1, \dots, p + q$$

$$\alpha \geq \beta, \alpha \geq 0, \beta \geq 0, \alpha + \beta \leq 1 \quad (6.5)$$

Eşitlik (6.5) ile verilen model Eşitlik (6.6)'daki modele dönüştürülerek sezgisel bulanık modelden kesin modele çevrilmektedir.

$$(\alpha - \beta) \rightarrow \max$$

$$\text{koşulları altında } \alpha \leq \mu_i(x), i = 1, \dots, p + q$$

$$\beta \geq v_i(x), i = 1, \dots, p + q$$

$$\alpha \geq \beta, \beta \geq 0, \alpha + \beta \leq 1 \quad (6.6)$$

Burada;

α , amaç ve kısıtlara ait en küçük üye olma derecesini,

β ise amaç ve kısıtlara ait en büyük üye olmama derecesini göstermektedir.

Pramanik Ve Roy'un Modeli [91]

Pramanik ve Roy tarafından üye olma ve üye olmama derecelerinden sapmayı dikkate alan Sezgisel Bulanık Hedef Programlama (Intuitionistic Fuzzy Goal

Programming - IFGP) modeli Angelov (1997) tarafından önerilen model temel alınarak 2005 yılında geliştirilmiştir.

Bilindiği gibi doğrusal çok amaçlı model aşağıda Eşitlik (6.7)'de gösterildiği gibidir.

$$\text{Min } Z = C X, \quad i = 1, \dots, m$$

$$\text{kısıtları altında } g_j(x) \leq 0, j = 1, \dots, n \quad (6.7)$$

Burada;

$Z = (Z_1, Z_2, \dots, Z_m)$ amaç fonksiyonu vektörünü,

C kısıtlara ait $m \times k$ boyutlu matrisi,

$g_j(x)$ kısıtları,

X ise $k \times 1$ boyutunda karar değişkeni vektörünü,

m amaç sayısını,

n kısıt sayısını ifade etmektedir.

Genel bir bulanık optimizasyon probleminde ise kısıtların ve amaçların sağlanma dereceleri Eşitlik (6.8)'de görüldüğü gibi en büyüklenmeye çalışılır.

$$\tilde{\text{Min}} Z$$

$$\text{kısıtları altında } g_j(x) \lesseqgtr 0, j = 1, \dots, n \quad (6.8)$$

Burada;

$\tilde{\text{min}}$, bulanık en küçüklemeyi,

\lesseqgtr , bulanık eşitsizliği ifade etmektedir.

Pramanik ve Roy tarafından kısıtların ve amaçların sağlanma derecelerinin en büyüklenmesi için negatif sapma değişkenlerinin en küçüklenmesini dikkate alan bulanık hedef programa modeli Eşitlik (6.9)'da verildiği gibi geliştirilmiştir [91].

$$\text{Min } \gamma = \sum_{i=1}^{m+n} D_i^-$$

$$\mu_i(X) + D_i^- \geq 1, \quad i = 1, 2, \dots, m + n$$

$$0 \leq \mu_i(X) \leq 1$$

$$D_i^- \geq 0$$

$$X \geq 0 \tag{6.9}$$

Burada;

D_i^- , negatif sapma değişkenlerini,

γ , sapma değerlerinin toplamını,

$\mu_i(X)$ ise X 'in ilgili bulanık kümeye üyelik derecesini ifade etmektedir.

Angelov (1995)'un geliştirdiği modele dayanarak Pramanik ve Roy 2005 yılında Eşitlik (6.9)'da yer alan yine kendilerinin geliştirdiği bulanık hedef programlamadan yola çıkarak amaç ve kısıtların kabul derecelerinin en büyüklendiği; reddetme derecelerinin ise en küçüklendiği Eşitlik (6.10)'da verilen sezgisel bulanık bir model önermişlerdir.

$$\text{Min } \gamma = \sum_{i=1}^{m+n} D_{i1}^- + D_{i2}^+$$

$$\text{kısıtları altında } \mu_i(\bar{X}) + D_{i1}^- \geq 1$$

$$v_i(X) - D_{i2}^+ \leq 0$$

$$\gamma \geq D_{i1}^-$$

$$\gamma \geq D_{i2}^+$$

$$v_i(X) \geq 0$$

$$\mu_i(X) \geq v_i(X)$$

$$\mu_i(X) + v_i(X) \leq 1$$

$$D_{i1}^- \geq 0, D_{i2}^+ \geq 0$$

$$X \geq 0 \tag{6.10}$$

Burada;

γ , pozitif ve negatif sapmaların toplamını, D_{i1}^- ve D_{i2}^+ sırasıyla üye olma (kabul) derecesi negatif ve üye olmama (red) derecesinden pozitif sapmayı ifade etmektedir.

Tez çalışmasında, Angelov ve Pramanik ve Rov'un modeli kesin kısıtlar da her iki modele eklenerek geliştirilmiştir ve her iki modelin sonuçları karşılaştırılmıştır.



7. RİSK DEĞERLENDİRMESİ İÇİN ÖNERİLEN ÜÇ AŞAMALI SEZGİSEL BULANIK BİR YAKLAŞIM

Önerilen üç aşamalı sezgisel bulanık risk değerlendirme yaklaşımında HTEA'nın geliştirilmesi gereken yönlerinden yola çıkılmıştır. Bu kapsamda, birinci aşamada sezgisel bulanık küme teorisi kullanılarak risk faktörleri arasındaki yaratabilecekleri risk düzeyleri açısından benzerliklerini dikkate alan bir ağırlıklandırma sistemi oluşturulmuştur. İkinci aşamada ise hata türleri arasındaki etkileşimi de yansıtan sezgisel bulanık MABAC yönteminde hata türleri arasındaki farklılaşma farklı bir uzaklık fonksiyonu ile belirlenerek hata türleri sıralanmıştır. Üçüncü aşamada ise, ikinci aşamadan elde edilen ağırlıklar da kullanılarak gerçekçi kısıtları da dikkate alan iki farklı bulanık sezgisel matematiksel model geliştirilmiş ve bu modeller ile öncelikle önlenmesi gereken hata türleri belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Aşağıda geliştirilen yaklaşımın adımları verilmekte ve bu adımlar Şekil (7.1)'de gösterilmektedir.

Birinci aşama: Kriter Önem Ağırlıklarının Bulunması

Adım 1: Karar Probleminin Amacını Belirle.

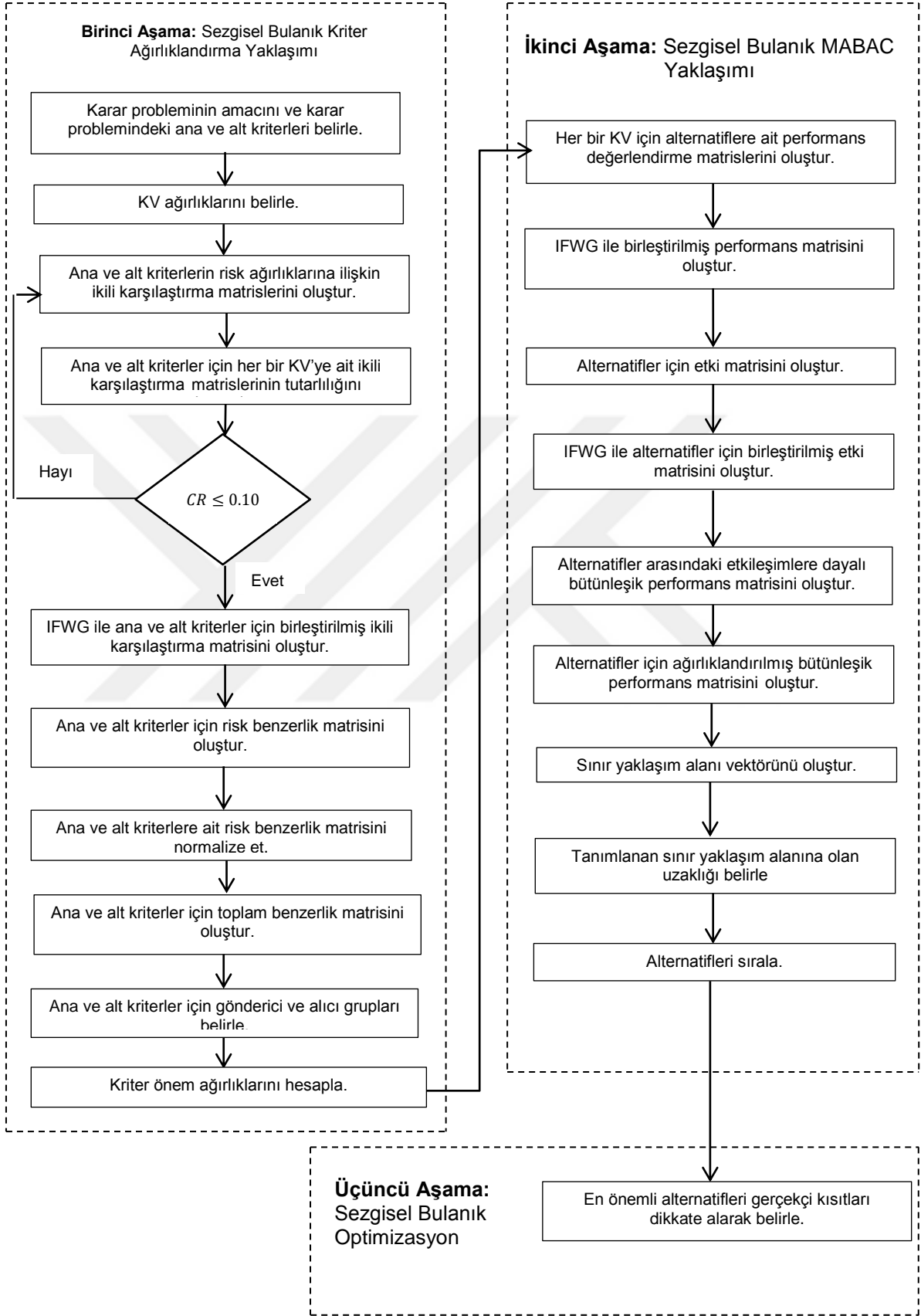
Karar konusuyla ilgili hedeflenen durum belirlenir.

Adım 2. Karar Problemindeki Ana ve Alt Kriterleri Belirle.

Ana kriterler $ANK_j = \{ANK_1, ANK_2, \dots, ANK_n\}$, ($j = 1, \dots, n$). olarak, alt kriterler $AK_{jt} = \{AK_{11}, AK_{12}, \dots, AK_{nv}\}$; ($j = 1, \dots, n$) ($t = 1, \dots, v$) şeklinde tanımlanır. Alternatifler ise $A_i = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$, ($i = 1, \dots, m$) ile ifade edilir.

Adım 3: Karar Verici Ağırlıklarını Belirle.

k uzman KV_k ; ($k = 1, \dots, l$) karar verici (KV) grubunu oluşturur. Her bir KV'nin ağırlığı $\beta_k = (\mu_k, v_k, \pi_k)$; ($k = 1, \dots, l$); ($\beta_k > 0$) olarak $\sum_{k=1}^l \beta_k = 1$ koşulunu sağlayacak şekilde belirlenir. β_k değerleri Çizelge 7.1'de verilen sezgisel bulanık skala kullanılarak atanır. Bu değerler, KV'lerin konuyla ilgili deneyim ve tecrübelerine göre değişkenlik gösterir. β_k sezgisel bulanık sayısı (SBS) Eşitlik (7.1) kullanılarak hesaplanır [84].



Şekil 7.1 Geliştirilen sezgisel bulanık yaklaşım

$$\beta_k = \frac{\left(\mu_k + \pi_k \left(\frac{\mu_k}{\mu_k + v_k} \right) \right)}{\sum_{k=1}^l \left(\mu_k + \pi_k \left(\frac{\mu_k}{\mu_k + v_k} \right) \right)} \quad (7.1)$$

Çizelge 7.1 B_k değerleri için sezgisel bulanık skala [84]

Dilsel Değişken	β_k
	(μ_k, v_k, π_k)
Çok deneyimli	(0.90, 0.05, 0.05)
Deneyimli	(0.70, 0.20, 0.05)
Orta	(0.50, 0.40, 0.10)
Deneyimsiz	(0.25, 0.60, 0.15)
Çok deneyimsiz	(0.10, 0.80, 0.10)

Adım 4. Ana ve Alt Kriterlerin Risk Ağırlıklarını Belirle ve Her Bir KV İçin Ana ve Alt Kriterlere Ait İkili Karşılaştırma Matrisini Oluştur.

Her bir KV, Çizelge (7.2) ile verilen Sezgisel Bulanık Risk Skalasını kullanarak ana ve alt kriterleri değerlendirir. Bu değerlendirme sonucunda her bir KV için ana kriterlere ait ikili karşılaştırma matrisi $[\tilde{P}_k]_{ANK}$ Eşitlik (7.2)'deki gibi elde edilir. $[\tilde{P}_k]_{ANK}$ 'nın her bir elemanı ve $\tilde{p}_{jz}^k = (\mu_{jz}^k, v_{jz}^k, \pi_{jz}^k)$ ($z = 1, \dots, n$) olarak tanımlanır. Aynı şekilde her bir KV için alt kriterlere ait ikili karşılaştırma matrisi $[\tilde{P}_k]_{AK}$ oluşturulur. Sırasıyla $[\tilde{P}_k]_{ANK}$ ve $[\tilde{P}_k]_{AK}$ matrisleri Eşitlik (7.2) ve Eşitlik (7.3)'te verilmiş olup her bir elemanı $\tilde{p}_{jzs}^k = (\mu_{jzs}^k, v_{jzs}^k, \pi_{jzs}^k)$ ($s = 1, \dots, v$) olarak ifade edilir.

Çizelge 7.2 Sezgisel Bulanık Risk Skalasını [95]

Tanım	Risk		
	Ölçeği	SBS	Karşıt SBS
Eşit derecede risk yaratır.	1	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.02, 0.18, 0.80)
Ara değer	2	(0.06, 0.23, 0.70)	(0.06, 0.23, 0.70)
Biraz daha fazla risk yaratır.	3	(0.13, 0.27, 0.60)	(0.13, 0.27, 0.60)
Ara değer	4	(0.22, 0.28, 0.50)	(0.22, 0.28, 0.50)

Çizelge 7.2 devam ediyor

Fazla risk yaratır.	5	(0.33, 0.27, 0.40)	(0.33, 0.27, 0.40)
Ara değer	6	(0.47, 0.23, 0.30)	(0.47, 0.23, 0.30)
Çok fazla risk yaratır.	7	(0.62, 0.18, 0.20)	(0.62, 0.18, 0.20)
Ara değer	8	(0.80, 0.10, 0.10)	(0.80, 0.10, 0.10)
Aşırı derecede risk yaratır.	9	(1.00, 0.00, 0.00)	(1.00, 0.00, 0.00)

$$[\tilde{P}_k]_{ANK} = \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \vdots \\ C_n \end{matrix} \begin{bmatrix} \widetilde{p}_{11}^k & \widetilde{p}_{12}^k & \widetilde{p}_{13}^k & \dots & \widetilde{p}_{1n}^k \\ \widetilde{p}_{21}^k & \widetilde{p}_{22}^k & \widetilde{p}_{23}^k & \dots & \widetilde{p}_{2n}^k \\ \widetilde{p}_{31}^k & \widetilde{p}_{32}^k & \widetilde{p}_{33}^k & \dots & \widetilde{p}_{3n}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widetilde{p}_{n1}^k & \widetilde{p}_{n2}^k & \widetilde{p}_{n3}^k & \dots & \widetilde{p}_{nn}^k \end{bmatrix} \quad (7.2)$$

$$[\tilde{P}_k]_{AK} = \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ \vdots \\ C_n \end{matrix} \begin{bmatrix} \widetilde{p}_{111}^k & \widetilde{p}_{112}^k & \widetilde{p}_{113}^k & \dots & \widetilde{p}_{11n}^k \\ \widetilde{p}_{121}^k & \widetilde{p}_{122}^k & \widetilde{p}_{123}^k & \dots & \widetilde{p}_{12n}^k \\ \widetilde{p}_{131}^k & \widetilde{p}_{132}^k & \widetilde{p}_{133}^k & \dots & \widetilde{p}_{13n}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widetilde{p}_{1n1}^k & \widetilde{p}_{1n2}^k & \widetilde{p}_{1n3}^k & \dots & \widetilde{p}_{1nn}^k \end{bmatrix} \quad (7.3)$$

Adım 5. Ana ve Alt Kriterler İçin Her Bir KV'ye Ait İkili Karşılaştırma Matrisinin Tutarlılığını Hesapla.

KV'lerin ikili karşılaştırma matrislerindeki değerlendirmelerin kontrol edilmesi amacıyla Eşitlik (7.4)'te verilen tutarlılık oranı (Consistency Ratio-CR) hesaplanır [95; 96]. $CR < 0,10$ ise ikili karşılaştırmaların tutarlı olduğu kabul edilir, $CR > 0,10$ ise ikili karşılaştırmaların tutarsız olduğu belirlenir. Tutarsız olduğu belirlenen değerlendirmelerin düzeltilmesi gerekir.

$$CR = \frac{(\lambda_{maks} - n)/(n-1)}{RI} \quad (7.4)$$

Burada,

$(\lambda_{maks} - n)$, her bir KV'ye ait ikili karşılaştırma matrisindeki $\pi_{(x)}$ değerlerinin ortalamasıdır [97]. λ_{maks} , en büyük öz değeri ifade eder. Ağırlık vektörünün ilgili görece önem değerine bölünmesiyle elde edilir.

RI rastgelelik indeksini tanımlar. Bu indeks, n değerine göre değişkenlik gösterir. Aşağıda yer alan Çizelge (7.3)'te 1-15 arasındaki kriter sayısına göre değişen *RI* değerleri yer almaktadır.

Çizelge 7.3 *RI* değerleri

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
<i>RI</i>	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51	1.48	1.56	1.57	1.59

Adım 6. Ana ve Alt Kriterler İçin Birleştirilmiş İkili Karşılaştırma Matrisini Oluştur.

Her bir KV_k için oluşturulan $[\tilde{P}]_{ANK}$ ve $[\tilde{P}]_{AK}$ Eşitlik (7.5)'te verilen Sezgisel Bulanık Ağırlıklandırılmış Geometrik Ortalama (Intuitionistic Fuzzy Weighted Geometric Operator-IFWG) operatörü kullanılarak birleştirilir ve Eşitlik (7.6)'da verildiği gibi ana kriterler için Birleştirilmiş İkili Karşılaştırma Matrisi $[\tilde{P}]_{ANK}$ ve Eşitlik (7.7)'de verildiği gibi alt kriterler için Birleştirilmiş İkili Karşılaştırma Matrisi $[\tilde{P}]_{AK}$ elde edilir [98]. $[\tilde{P}]_{ANK}$ 'nin her bir elemanı $\tilde{p}_{jz} = (\mu_{jz}, v_{jz}, \pi_{jz})$ ile gösterilir. $[\tilde{P}]_{AK}$ 'nin her bir elemanı ise $\tilde{p}_{jzs} = (\mu_{jzs}, v_{jzs}, \pi_{jzs})$ ile ifade edilir.

$$IFWG_{\beta}(\tilde{p}_1, \tilde{p}_2, \dots, \tilde{p}_j) = \prod_{j=1}^k p_j^{\beta_k} = (\prod_{j=1}^k \mu_j^{\beta_k}, 1 - \prod_{j=1}^k (1 - v_j)^{\beta_k}) \quad (7.5)$$

$$[\tilde{P}]_{ANK} = \begin{matrix} ANK_1 \\ ANK_2 \\ ANK_3 \\ \vdots \\ ANK_n \end{matrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_{11} & \tilde{p}_{12} & \tilde{p}_{13} & \dots & \tilde{p}_{1n} \\ \tilde{p}_{21} & \tilde{p}_{22} & \tilde{p}_{23} & \dots & \tilde{p}_{2n} \\ \tilde{p}_{31} & \tilde{p}_{32} & \tilde{p}_{33} & \dots & \tilde{p}_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{p}_{n1} & \tilde{p}_{n2} & \tilde{p}_{n3} & \dots & \tilde{p}_{nn} \end{bmatrix} \quad (7.6)$$

$$[\tilde{P}]_{AK} = \begin{matrix} AK_1 \\ AK_2 \\ AK_3 \\ \vdots \\ AK_n \end{matrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_{111} & \tilde{p}_{112} & \tilde{p}_{113} & \dots & \tilde{p}_{11n} \\ \tilde{p}_{121} & \tilde{p}_{122} & \tilde{p}_{123} & \dots & \tilde{p}_{12n} \\ \tilde{p}_{131} & \tilde{p}_{132} & \tilde{p}_{133} & \dots & \tilde{p}_{13n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{p}_{1n1} & \tilde{p}_{1n2} & \tilde{p}_{1n3} & \dots & \tilde{p}_{1nn} \end{bmatrix} \quad (7.7)$$

Adım 7. Ana ve Alt Kriterler Arasındaki Benzerliği Hesapla.

$[\tilde{P}]_{ANK}$ ve $[\tilde{P}]_{AK}$ 'da yer alan en fazla risk yaratabilecek olan kriter belirlenerek diğer kriterlerin yaratabilecekleri risk düzeyi açısından bu kriter ile benzerlik derecesi belirlenir. Ana kriterler için en yüksek risk düzeyi $\tilde{p}_{jz}^* = (\mu_{jz}^*, v_{jz}^*, \pi_{jz}^*)$ olarak tanımlanır. Aynı ana kriter içindeki alt kriterler için en yüksek risk düzeyi $\tilde{p}_{jzs}^* = (\mu_{jzs}^*, v_{jzs}^*, \pi_{jzs}^*)$ şeklinde ifade edilir. Ana kriterler için benzerlik değeri

Eşitlik (7.8)'deki gibi hesaplanır ve $0 \leq r(\tilde{p}_{jz}, \tilde{p}_{jz}^*) \leq 1$ koşulunu sağlar. $r(\tilde{p}_{jz}, \tilde{p}_{jz}^*)$ değerleri kullanılarak Eşitlik (7.12)'de verilen ana kriterler arasındaki benzerliği gösteren $[R]$ matrisi oluşturulur [99]. Aynı işlemler alt kriterler için de tekrar edilerek alt kriterler için benzerlik matrisi $[R]_{AK}$ oluşturulur.

$$r(\tilde{p}_{jz}, \tilde{p}_{jz}^*) = \frac{C_{SBS}(\tilde{p}_{jz}, \tilde{p}_{jz}^*)}{\sqrt{C_{SBS}(\tilde{p}_{jz}, \tilde{p}_{jz}) * C_{SBS}(\tilde{p}_{jz}^*, \tilde{p}_{jz}^*)}} \quad (7.8)$$

Burada [100];

$$C_{SBS}(\tilde{p}_{jz}, \tilde{p}_{jz}^*) = \sum_{d=1}^n \left(\mu_{\tilde{p}_{jz}}(x_d) \mu_{\tilde{p}_{jz}^*}(x_d) + v_{\tilde{p}_{jz}}(x_d) v_{\tilde{p}_{jz}^*}(x_d) \right) \quad (7.9)$$

$$C_{SBS}(\tilde{p}_{jz}, \tilde{p}_{jz}) = \sum_{d=1}^n (\mu_{\tilde{p}_{jz}}^2(x_d) + v_{\tilde{p}_{jz}}^2(x_d)) \quad (7.10)$$

$$C_{SBS}(\tilde{p}_{jz}^*, \tilde{p}_{jz}^*) = \sum_{d=1}^n (\mu_{\tilde{p}_{jz}^*}^2(x_d) + v_{\tilde{p}_{jz}^*}^2(x_d)) \quad (7.11)$$

olarak hesaplanır.

$$[R]_{ANK} = \begin{matrix} ANK_1 \\ ANK_2 \\ ANK_3 \\ \vdots \\ ANK_n \end{matrix} \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & \dots & r_{2n} \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & \dots & r_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & \dots & r_{nn} \end{bmatrix} \quad (7.12)$$

Adım 8. Ana ve Alt Kriterlere Ait Benzerlik Matrisini Normalize Et.

$[R]_{ANK}$ ve $[R]_{AK}$ matrislerinde yer alan bütün benzerlik değerleri kullanılarak sütun ve satır toplamı alınır. Sütun ve satır toplamlarının her biri için maksimum değer belirlenir ve Eşitlik (7.13) kullanılarak y değeri hesaplanır. Daha sonra satır ve sütundaki en küçük y değeri ile $[R]_{ANK}$ ve $[R]_{AK}$ Eşitlik (7.14)'teki gibi çarpılarak ana kriterler ve alt kriterler için sırasıyla normalize benzerlik matrisleri $[Z]_{ANK} = [z_{jz}]_{n \times n}$ ve $[Z]_{AK} = [z_{jzs}]_{n \times n}$ elde edilir [101].

$$y = \min \left(\frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |r_{jz}|}, \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |r_{ji}|} \right), j, z \in \{1, 2, 3, \dots, n\} \quad (7.13)$$

$$[Z]_{ANK} = y * [R]_{ANK} \quad (7.14)$$

Adım 9: Ana ve alt kriterler için Toplam Benzerlik Matrisini oluştur.

$[Z]_{ANK}$ ve $[Z]_{AK}$ matrisleri kullanılarak Eşitlik (7.15)'teki gibi ana ve alt kriterler için sırasıyla Toplam Benzerlik Matrisi $[T]_{ANK} = [t_{jz}]_{n \times n}$ ve $[T]_{AK} = [t_{jzs}]_{n \times n}$ oluşturulur.

$$[T]_{ANK} = Z_{ANK}^1 + Z_{ANK}^2 + \dots = \sum_{j=1}^{\infty} Z_{ANK}^j = Z_{ANK}(I - Z_{ANK})^{-1} \quad (7.15)$$

Adım 10. Ana Ve Alt Kriterler İçin Gönderici ve Alıcı Grupları Belirle.

$[T]_{ANK}$ ve $[T]_{AK}$ matrislerinde satır toplamları D Eşitlik (6.16) kullanılarak, sütun toplamları R ise Eşitlik (6.17) kullanılarak hesaplanır.

$$D = \sum_{i=1}^n t_{jz} \quad (7.16)$$

$$R = \sum_{j=1}^n t_{jz} \quad (7.17)$$

Her bir ana ve alt kriter için, $(D - R)$ ve $(D + R)$ değerleri hesaplanır. $(D - R)$ değerleri pozitif olanlar gönderici grubu oluşturur ve bu tür ana ve alt kriterlerin yüksek önceliğe sahip oldukları kabul edilir. $(D - R)$ değeri negatif olan ana ve alt kriter ise alıcı grubu oluşturmakla birlikte bu tür kriterlerin diğer kriterlere göre daha düşük önceliğe sahip olduğu kabul edilir. Diğer taraftan $(D + R)$ değerleri her bir kriterin diğer kriterlerle benzerlik açısından ilişkisini gösterir. $(D + R)$ değeri yüksek olan ana ve alt kriterler diğer kriterler ile benzerlik açısından daha çok ilişkilidir. $(D + R)$ değeri düşük olan ana ve alt kriterlerin ise diğer kriterlerle ilişkisi benzerlik açısından daha azdır.

Adım 11. Ana Ve Alt Kriterin Ağırlıklarını Bul.

Ana kriterlerin önem ağırlığı W_j Eşitlik (7.18) ve (7.19) kullanılarak, alt kriterlerin önem ağırlığı W_{jt}^* ise Eşitlik (7.20), (7.21) ve (7.22) kullanılarak bulunur.

$$w_j = \sqrt{(D + R)_j^2 + (D - R)_j^2}, (j = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (7.18)$$

$$W_j = \frac{w_j}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (7.19)$$

$$w_{jt} = \sqrt{(D + R)_{jt}^2 + (D - R)_{jt}^2}, (j = 1, 2, 3, \dots, n), (t = 1, 2, 3, \dots, v) \quad (7.20)$$

$$W_{jt} = \frac{w_{jt}}{\sum_{j=1}^n w_{jt}} \quad (7.21)$$

$$W_{jt}^* = W_j \times W_{jt} \quad (7.22)$$

İkinci Aşama: Alternatiflerin Sıralanması

Adım 12: Her Bir Kriter İçin MABAC Yöntemini Kullanarak Alternatifleri Değerlendirir.

Her bir KV Çizelge 7.4'te verilen değerlendirme skalasını kullanarak her bir kritere göre alternatiflerin performanslarını değerlendirilir. Böylece Her bir KV için alternatiflere ait performans matrisi $[\tilde{X}_k]$ Eşitlik (7.23)'teki gibi oluşturulur. $[\tilde{X}_k]$ 'nin her bir elemanı $\tilde{x}_{ijt}^k = (\mu_{ijt}^k, \nu_{ijt}^k, \pi_{ijt}^k)$ sezgisel bulanık sayısı ile ifade edilir.

Çizelge 7.4 Alternatifleri Değerlendirme Skalası

Dilsel Değişken	\tilde{x}_{ijt}^k
	$(\mu_{ijt}^k, \nu_{ijt}^k, \pi_{ijt}^k)$
Çok yüksek	(0.90, 0.05, 0.05)
Yüksek	(0.70, 0.20, 0.05)
Orta	(0.50, 0.40, 0.10)
Düşük	(0.25, 0.60, 0.15)
Çok düşük	(0.10, 0.80, 0.10)

$$[\tilde{X}_k] = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_{111}^k & \tilde{x}_{112}^k & \tilde{x}_{113}^k & \dots & \tilde{x}_{11n}^k \\ \tilde{x}_{211}^k & \tilde{x}_{212}^k & \tilde{x}_{213}^k & \dots & \tilde{x}_{21n}^k \\ \tilde{x}_{311}^k & \tilde{x}_{312}^k & \tilde{x}_{313}^k & \dots & \tilde{x}_{31n}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{x}_{m11}^k & \tilde{x}_{m12}^k & \tilde{x}_{m13}^k & \dots & \tilde{x}_{m1n}^k \end{bmatrix} \quad (7.23)$$

Adım 13. Alternatifler için Birleştirilmiş Performans Matrisini oluştur.

l adet karar verici KV_k ; ($k = 1, \dots, l$) için elde edilen $[\tilde{X}_k]$ matrisleri Eşitlik (7.5)'te verilen IFWG yaklaşımı ile birleştirilir ve Birleştirilmiş Performans Matrisi Eşitlik (7.24)'teki gibi $[\tilde{X}] = [\tilde{x}_{ijt}]_{m \times n}$ oluşturulur.

$$[\tilde{X}] = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} \widetilde{x}_{111} & \widetilde{x}_{112} & \widetilde{x}_{113} & \cdots & \widetilde{x}_{11n} \\ \widetilde{x}_{211} & \widetilde{x}_{212} & \widetilde{x}_{213} & \cdots & \widetilde{x}_{21n} \\ \widetilde{x}_{311} & \widetilde{x}_{312} & \widetilde{x}_{313} & \cdots & \widetilde{x}_{31n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widetilde{x}_{m11} & \widetilde{x}_{m12} & \widetilde{x}_{m13} & \cdots & \widetilde{x}_{m1n} \end{bmatrix} \quad (7.24)$$

Adım 14. Alternatifler için Etki Matrisini Oluştur.

Alternatifler arasında oluşabilecek etkileşimin karar sürecine yansıtılması amacıyla etki matrisi oluşturulur. Risk değerlendirme sistemlerinde alternatif olarak dikkate alınan hata türleri birbirini etkileyebilir özetle bir hata türünün ortaya çıkması diğer bir hata türünün ortaya çıkmasına sebep olabilir. Bu etkileşimin dikkate alınmasıyla karar süreci sonunda elde edilecek olan sıralamada diğer alternatifler üzerinde en çok etkisi olan alternatifin önceliklendirilmesi sağlanır.

Buna göre her bir KV alternatifler arasındaki etkileşim düzeyini belirlemek için Çizelge 7.5'te verilen etki skalasını kullanır. Bu değerlendirmeler sonucunda her bir KV için etki matrisi $[\tilde{Y}_k]$ Eşitlik (7.25)'teki gibi oluşturulur. $[\tilde{Y}_k]$ 'nin her bir elemanı $\widetilde{y}_{ib}^k = (\mu_{ib}^k, v_{ib}^k, \pi_{ib}^k)$; $(b = 1, \dots, m)$ sezgisel bulanık sayısı ile ifade edilir.

Çizelge 7.5 Etki Skalası

Tanım	\widetilde{y}_{ib}^k
	$(\mu_{ib}^k, v_{ib}^k, \pi_{ib}^k)$
Çok etkili	(0.90, 0.05, 0.05)
Etkili	(0.70, 0.20, 0.05)
Orta düzeyde etkili	(0.50, 0.40, 0.10)
Biraz etkili	(0.25, 0.60, 0.15)
Etki yok	(0.10, 0.80, 0.10)

$$[\tilde{Y}_k] = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} \widetilde{y}_{11}^k & \widetilde{y}_{12}^k & \widetilde{y}_{13}^k & \cdots & \widetilde{y}_{1m}^k \\ \widetilde{y}_{21}^k & \widetilde{y}_{22}^k & \widetilde{y}_{23}^k & \cdots & \widetilde{y}_{2m}^k \\ \widetilde{y}_{31}^k & \widetilde{y}_{32}^k & \widetilde{y}_{33}^k & \cdots & \widetilde{y}_{3m}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widetilde{y}_{m1}^k & \widetilde{y}_{m2}^k & \widetilde{y}_{m3}^k & \cdots & \widetilde{y}_{mm}^k \end{bmatrix} \quad (7.25)$$

Adım 15. Alternatifler için birleştirilmiş etki matrisini oluştur.

$[\tilde{Y}_k]$ matrisleri Eşitlik (7.5)'te verilen IFWG yaklaşımı ile birleştirilir ve Birleştirilmiş Etki Matrisi $[\tilde{Y}] = [\widetilde{y}_{ib}]_{m \times m}$ Eşitlik (7.26)'daki gibi oluşturulur.

$$[\tilde{Y}] = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} \widetilde{y}_{11} & \widetilde{y}_{12} & \widetilde{y}_{13} & \cdots & \widetilde{y}_{1m} \\ \widetilde{y}_{21} & \widetilde{y}_{22} & \widetilde{y}_{23} & \cdots & \widetilde{y}_{2m} \\ \widetilde{y}_{31} & \widetilde{y}_{32} & \widetilde{y}_{33} & \cdots & \widetilde{y}_{3m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widetilde{y}_{m1} & \widetilde{y}_{m2} & \widetilde{y}_{m3} & \cdots & \widetilde{y}_{mm} \end{bmatrix} \quad (7.26)$$

Adım 16. Alternatifler için bütünleşik performans matrisini oluştur.

Bütünleşik performans matrisini $[\tilde{E}] = [\widetilde{e}_{i,t}]_{m \times n}$ oluşturmak için alternatiflere ait birleştirilmiş performans matrisi $[\tilde{X}]$ ile birleştirilmiş etki matrisi $[\tilde{Y}]$ Eşitlik (7.27)'deki gibi çarpılır.

$$[\tilde{E}] = [\tilde{X}]^T * [\tilde{Y}] \quad (7.27)$$

Adım 17: Ağırlıklandırılmış Bütünleşik Performans Matrisini oluştur.

$[\tilde{E}]^T$ matrisi, Adım 11'de belirlenen alt kriter ağırlıkları ile çarpılarak Eşitlik (7.28)'de verilen ağırlıklandırılmış bütünleşik performans matrisi $[\tilde{L}] = [\widetilde{l}_{i,t}]_{m \times n}$ elde edilir [102].

$$[\tilde{L}] = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \begin{bmatrix} \widetilde{l}_{111} & \widetilde{l}_{112} & \widetilde{l}_{113} & \cdots & \widetilde{l}_{11n} \\ \widetilde{l}_{211} & \widetilde{l}_{212} & \widetilde{l}_{213} & \cdots & \widetilde{l}_{21n} \\ \widetilde{l}_{311} & \widetilde{l}_{312} & \widetilde{l}_{313} & \cdots & \widetilde{l}_{31n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \widetilde{l}_{m11} & \widetilde{l}_{m12} & \widetilde{l}_{m13} & \cdots & \widetilde{l}_{m1n} \end{bmatrix} \quad (7.28)$$

Adım 18. Sınır Yaklaşım Alanı Vektörünü Oluştur.

Her bir $AK_{jt}; j = 1, \dots, n; t = 1, \dots, v$ için sınır yaklaşım alanı vektörü $\tilde{G}_{jt} = [\tilde{g}_{11}, \tilde{g}_{12}, \dots, \tilde{g}_{4v}]$ tanımlanır ve \tilde{G}_{jt} değerleri Eşitlik (7.5)'te verilen IFWG yaklaşımı ile birleştirilir.

Adım 19. Uzaklık Matrisini Oluştur ve Sınır Yaklaşım Alanını Tanımla.

Uzaklık matrisi $[U] = [u_{ijt}]_{m \times n}$ matrisini oluşturabilmek için Eşitlik (7.29) kullanılarak Genişletilmiş Hausdorff uzaklığı ile her bir alternatifin \tilde{G}_{jt} sınır yaklaşım alanına olan uzaklığı bulunur [103].

$$u_c(\tilde{l}_{ijt}, g_{jt}) = \sqrt{\max\left\{\left(\mu_{l_{ijt}} - \mu_{g_{jt}}\right)^2, \left(v_{l_{ijt}} - v_{g_{jt}}\right)^2, \left(\pi_{l_{ijt}} - \pi_{g_{jt}}\right)^2\right\}} \quad (7.29)$$

u_{ijt} aşağıda Eşitlik (7.30) ile verilen işaret koşullarına göre değerler almaktadır. \tilde{l}_{ijt} ile \tilde{g}_{jt} arasındaki büyük olma durumu Eşitlik 5.9'da verilen hesaplamalar sonucu elde edilir.

$$u_{ijt} = \begin{cases} -u_c(\tilde{l}_{ijt}, \tilde{g}_{jt}), & \tilde{l}_{ijt} < \tilde{g}_{jt} \\ u_c(\tilde{l}_{ijt}, \tilde{g}_{jt}), & \tilde{l}_{ijt} \geq \tilde{g}_{jt} \end{cases} \quad (7.30)$$

$\tilde{G}_{jt} = [\tilde{g}_{11}, \tilde{g}_{12}, \dots, \tilde{g}_{4v}]$ kullanılarak sınır yaklaşım alanı $[G]$ oluşturulur. Eğer $A_i; (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ için $u_{ijt} = 0$ ise $\tilde{G}_{jt} = [\tilde{g}_{11}, \tilde{g}_{12}, \dots, \tilde{g}_{4v}]$ sınır yaklaşım alanındadır. $u_{ijt} \geq 0$ ise A_i üst yaklaşım alanı (G^+) içindedir; $u_{ijt} \leq 0$ A_i alt yaklaşım alanı (G^-) içindedir. Üst yaklaşım alanı ideal alternatifleri içerirken; alt yaklaşım alanı ideal olmayan alternatiflerden oluşmaktadır. Buna göre, yüksek önceliğe sahip alternatifi belirleyebilmek için üst yaklaşım alanına ait olan alternatifler arasından seçim yapılmalıdır.

Adım 20. Alternatifleri sırala.

$A_i; (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ için uzaklık değeri $u_{ijt} \in G^+$ içinde ise ilgili alternatifin ideal çözüme eşit veya en yakın olduğu anlaşılır. Benzer şekilde $A_i; (i = 1, 2, 3, \dots, m)$ için uzaklık değeri $u_{ij} \in G^-$ ise söz konusu alternatifin ideal olmayan çözüme eşit veya en yakın olduğu belirlenmektedir.

Bu nedenle, alternatiflerin kriterlere göre elde edilen uzaklık değerleri, her bir alternatifin sınır yaklaşım vektörüne olan yakınlık katsayısı CC_i olarak tanımlanır. $CC_i, [U]$ uzaklık matrisinde yer alan satır elemanlarının toplanması ile Eşitlik (7.31)'deki gibi hesaplanır.

$$CC_i = \sum_{j=1}^n u_{ijt} \quad (7.31)$$

Her bir alternatif, CC_i değerlerine göre küçükten büyüğe doğru sıralanır ve en büyük CC_i değerine sahip olan alternatif en iyi alternatif olarak seçilir [73].

Üçüncü Aşama: En Önemli Alternatifleri Gerçekçi Kısıtları Dikkate Alarak Belirle.

Tez çalışmasında literatürde yer alan iki farklı sezgisel optimizasyon modeli temel alınarak iki farklı yeni optimizasyon modeli kurulmuştur. Temel alınan modellerden birisi Angelov (1997) tarafından diğeri ise Pramanik ve Roy (2005) tarafından geliştirilmiştir. Aşağıda tez kapsamında önerilen modeller anlatılmaktadır.

Birinci Model

Bu model, Angelov (1997)'un modeli temel alınarak geliştirilmiştir. Angelov (1997)'un modelinde amaç ve kısıtlara ait en küçük üye olma derecesi ile amaç ve kısıtlara ait en büyük üye olmama derecesi arasındaki farkın en büyüklenmesi sezgisel bulanık kısıtlar altında amaçlanmaktadır. Geliştirilen birinci modelin Angelov (1997)'un modelinden farkı modelde sezgisel bulanık kısıtların yanı sıra kesin kısıtların da dikkate alınmasıdır. Böylece, kesin kısıtlar ile sezgisel bulanık kısıtlar arasındaki ilişkilerin korunması hedeflenmiştir. Aynı zamanda kesin kısıtlardaki hedeften olan sapmaların da en küçüklenmesi sağlanmış olur. Aşağıda geliştirilen birinci modele yer verilmektedir.

$$Enb (\alpha - \beta - d_{sp}^+ - d_{sp}^-) \quad (7.32)$$

kısıtları altında

$$Bx + d_{sp}^+ + d_{sp}^- = 1 \quad (7.33)$$

$$\alpha \leq \mu_a(x), a = 1, \dots, d + h \quad (7.34)$$

$$\rho \geq v_a(x), a = 1, \dots, d + h \quad (7.35)$$

$$\alpha \geq \rho \quad (7.36)$$

$$\alpha + \rho \leq 1 \quad (7.37)$$

$$\rho \geq 0 \quad (7.38)$$

$$x \geq 0 \quad (7.39)$$

Burada;

α , amaç ve kısıtlara ait en küçük üyelik derecesini,

ρ , amaç ve kısıtlara ait en büyük üye olmama derecesini,

B , çok ölçütlü karar verme sürecinden elde edilen alternatif ağırlık değerleri,

x , karar değişkenlerini,

d_{sp}^+ , d_{sp}^- , kesin kısıtlar için hedeften pozitif ve negatif sapma değerlerini göstermektedir.

Geliştirilen birinci modelde, Eşitlik (7.32) ile verilen amaç fonksiyonu ile amaç ve kısıtlara ait en küçük üye olma derecesi ile en büyük üye olmama derecesi ve kesin kısıtlar için ortaya çıkan sapma değerlerinin farkı en büyüklenmeye çalışılmaktadır. İkinci aşamadan elde edilen alternatif ağırlıklarına ilişkin kesin değerler içeren kısıtlar için sapma değerleri Eşitlik (7.33) ile dikkate alınmaktadır. x , karar değişkeninin ilgili sezgisel bulanık kümeye üye olma derecesinin en küçük değerinin en büyüklenmesini sağlamak için Eşitlik (7.34)'te verilen kısıt kullanılmaktadır. Bu modelde x karar değişkeni önerilen algoritmada dikkate alınan alternatifleri (A_i) göstermektedir. x , karar değişkeninin ilgili sezgisel bulanık kümeye üye olmama derecesinin en büyük değerinin en küçüklenmesini sağlamak için Eşitlik (7.35)'te verilen kısıt kullanılmaktadır. Amaç ve kısıtlara ait en küçük üyelik olma derecesinin, amaç ve kısıtlara ait en büyük üye olmama derecesinden büyük olması Eşitlik (7.36)'da verilen kısıt ile gerçekleştirilmektedir. Sezgisel bulanık küme teorisinde ön koşul olarak belirlenen üye olma ve üye olmama derecelerinin toplamınının 1'i geçemeyeceği şartını ise Eşitlik (7.37)'de görülen kısıt yansıtmaktadır. Eşitlik (7.38) ve (7.39)'da yer alan kısıtlar ise karar değişkenlerinin negatif olmama koşulunu sağlar. Başka bir deyişle, söz konusu iki kısıta karar değişkenlerine ait işaret kısıtları denilir.

İkinci Model

Bu model, Pramanik ve Roy (2005)'un modeli temel alınarak geliştirilmiştir. Pramanik ve Roy (2005)'un modelinde sezgisel bulanık kısıtlara ait üye olma derecesinden negatif sapmayı, üye olmama derecesinden pozitif sapmayı en küçüklemek amaçlanmaktadır. Geliştirilen ikinci model de ise Pramanik ve Roy

(2005)'un modelinden farklı olarak kesin kısıtlardaki negatif ve pozitif sapmaların da en küçüklenmesi sağlanmıştır. Geliştirilen ikinci model aşağıda verilmektedir.

$$\text{Min } \gamma = \sum_{i=1}^{m+n} (D_i^- + D_i^+) + d_{sp}^+ + d_{sp}^- \quad (7.40)$$

kısıtları altında

$$Cx + d_{sp}^+ + d_{sp}^- = 1 \quad (7.41)$$

$$\mu_i(X) + D_{i1}^- \geq 1 \quad (7.42)$$

$$v_i(X) - D_{i2}^+ \leq 0 \quad (7.43)$$

$$\gamma \geq D_{i1}^- \quad (7.44)$$

$$\gamma \geq D_{i2}^+ \quad (7.45)$$

$$v_i(X) \geq 0 \quad (7.46)$$

$$\mu_i(X) \geq v_i(X) \quad (7.47)$$

$$\mu_i(X) + v_i(X) \leq 1 \quad (7.48)$$

$$D_{i1}^- \geq 0, D_{i2}^+ \geq 0 \quad (7.49)$$

$$X \geq 0 \quad (7.50)$$

Burada;

x , karar değişkenlerini,

d_{sp}^+, d_{sp}^- , kesin kısıtlar için hedeften pozitif ve negatif sapma değerlerini,

C , çok ölçütlü karar verme sürecinden elde edilen alternatif ağırlık değerleri,

D_{i1}^- , ilgili sezgisel bulanık kısıta ait üye olma derecelerinden negatif sapma değerini,

D_{i2}^+ ise ilgili sezgisel bulanık kısıta ait üye olmama derecelerinden pozitif sapma değerini göstermektedir

Geliştirilen ikinci modelde, Eşitlik (7.40) ile verilen amaç fonksiyonu ile kısıtların üye olma derecelerine ait negatif sapmanın ve üye olmama derecelerine ait pozitif

sapmanın en küçüklenmesi ele alınmıştır. Ancak model kesin kısıtlarda içerebileceğinden kesin kısıtlara ait sapmaların da dahil edilerek kesin ve sezgisel bulanık kısıtlar arasındaki mevcut ilişkilerin korunduğu bir en küçükleme yapısı oluşturulmuştur. İkinci aşamadan elde edilen alternatif ağırlıklarına ilişkin kesin değerler içeren kısıtlar için sapma değerlerinin sürece katılması Eşitlik (7.41) ile sağlanmaktadır. x , karar değişkeninin ilgili sezgisel bulanık kümeye üye olma derecesine ait negatif sapma değeri Eşitlik (7.42)'de verilen kısıt ile sağlanmaktadır. x , karar değişkeninin ilgili sezgisel bulanık kümeye üye olmama derecesinden ortaya çıkabilecek pozitif sapma değerini Eşitlik (7.43) ile verilen kısıt göstermektedir. Eşitlik (7.44) ve (7.45)'te yer alan kısıtlar, ayrı ayrı sezgisel bulanık kısıtlara ait pozitif ve negatif sapmaların, üye olma ve üye olmama derecelerine ait negatif ve pozitif sapmalarının toplamını aşamayacağını belirtmektedir. Eşitlik (7.46), (7.47) ve (7.48) ile verilen kısıtlar sezgisel bulanık küme tanımından kaynaklı olup sırasıyla üye olmama derecesinin 0'dan büyük olması gerektiğini, üye olma derecesinin üye olmama derecesinden büyük olması gerektiğini ve üye olma ve üye olmama derecelerinin toplamının 1'i aşmaması gerektiğini yansıtmaktadır. Bu kısıtlar ayrıca üye olma derecesinin 0'dan büyük olması gerekliliğini de ifade etme ihtiyacını ortadan kaldırmış olur. Eşitlik (7.49) ve (7.50)'de yer alan kısıtlar ise karar değişkenlerinin negatif olmama koşulunu sağlar. Başka bir deyişle, karar değişkenlerine ait işaret kısıtlarıdır.

8. UYGULAMA

Çalışmada önerilen yaklaşım, elektromekanik sektöründe faaliyet gösteren bir firmada gerçekleştirilmiştir. Firma, hava ve gaz yalıtımlı anahtarlama, kontrol düzenleri, orta gerilim/alçak gerilim kesici/yük ayırıcılarının dağıtımı, transformatör merkezlerinin tasarımı, üretimi ve satışını gerçekleştirmektedir.

Geliştirilen yaklaşım firmanın hava yalıtımlı metal korumalı hücrelerin üretildiği montaj alanında risk değerlendirmesinin yapılması amacıyla kullanılmıştır.

Birinci Aşama: Kriter Önem Ağırlıklarının Bulunması

Adım 1: Karar Probleminin Amacını Belirle.

Firmadaki ilgili montaj hattında Çizelge (8.1)'de belirtilen 9 hata türü tespit edilmiştir. Bu hata türleri geliştirilen yaklaşım ile değerlendirilmiştir.

Çizelge 8.1 Belirlenen hata türleri

Sıra No	Hata Türleri	Açıklama
1	A_1	Dar alanda çalışma
2	A_2	Hat çevresinde düzensiz yerleşim
3	A_3	Ağır yüklerin elle taşınması
4	A_4	İş tanımlarının eksik yapılmış olması
5	A_5	Yıpranmış el aletlerinin kullanılması
6	A_6	Gürültülü montaj alanı
7	A_7	Montaj alanındaki aydınlatmanın yetersizliği
8	A_8	Titreşime maruziyet
9	A_9	Tanımlanmamış malzeme transfer yolları

Adım 2. Karar Problemindeki Ana ve Alt Kriterleri Belirle.

Ana kriterler çevresel faktörler (ANK_1), yönetsel faktörler (ANK_2), risk yapısına ilişkin faktörler (ANK_3) ve maliyet (ANK_4) olmak üzere 4 başlık altında toplanmıştır. Her bir ana kritere ait alt kriterler ise;

Çevresel Faktörler (ANK_1),

- Uygun olmayan çalışma duruşları (AK_{11}),

- Gürültü seviyeleri (AK_{12}),
- İşyeri temizliği ve düzeni (AK_{13}),
- Aydınlatma (AK_{14}),
- El aletlerinin kullanılabilirliği (AK_{15}).

Yönetimsel Faktörler (ANK_2)

- İş sağlığı ve güvenliği fonksiyonlarının kullanımı (AK_{21}),
- Planlı bakım ve onarım (AK_{22}),
- Makine koruyucuları kullanımı (AK_{23}),
- Kişisel koruyucu kullanımı (AK_{24}).

Risk Yapısına İlişkin Faktörler (ANK_3)

- Olasılık (AK_{31}),
- Şiddet (AK_{32}),
- Fark edilebilirlik (AK_{33}),
- Sistem güvenilirliğine etkisi (AK_{34}).

Maliyet (ANK_4)

- Hata maliyeti (AK_{41}),
- Önlem maliyeti (AK_{42}).

şeklinde belirlenir.

Adım 3: Karar Verici Ağırlıklarını Belirle.

Dört KV'ye, $KV_k; (k = 1, \dots, 4)$ $\sum_{k=1}^4 \beta_k = 1$ koşulunu sağlayacak şekilde Çizelge (6.1)'de verilen sezgisel bulanık skala kullanılarak β_k değerleri atanır. Söz konusu dört KV'ye ait bilgiler aşağıda yer almaktadır.

- Birinci KV, A grubu iş sağlığı ve güvenliği sertifikasına sahip 10 yıldır firmada çalışan bir iş sağlığı ve güvenliği uzmanıdır.
- İkinci KV, hattın sorumlu ve 15 yıldır elektromekanik sektöründe çalışan bir elektrik-elektronik mühendisidir.
- Üçüncü KV, B grubu iş sağlığı ve güvenliği sertifikasına sahip 5 yıldır firmada çalışan bir iş sağlığı ve güvenliği uzmandır.

- Dördüncü KV, hava yalıtımlı metal korumalı hücrelerin üretiminden sorumlu olan ve firmada 10 yıldır çalışan üretim müdürüdür.

β_k sezgisel bulanık sayısı Eşitlik (6.1) kullanılarak karar verici önem ağırlıklarına dönüştürülür. KV'lerin önem ağırlıkları sırasıyla $\beta_1 = 0.25$, $\beta_1 = 0.32$, $\beta_1 = 0.18$ ve $\beta_1 = 0.25$ olarak bulunur.

Adım 4. Ana ve Alt Kriterlerin Risk Ağırlıklarını Belirle ve Her Bir KV İçin Ana ve Alt Kriterlere Ait İkili Karşılaştırma Matrisini Oluştur.

Çizelge 7.2' de verilen tanımlamalar kullanılarak KV_1 için ana ve alt kriterlerin risk ağırlıklarına ilişkin $[\tilde{P}_k]_{ANK}$ ve $[\tilde{P}_k]_{AK}$ ikili karşılaştırma matrisleri Çizelge (8.2), (8.3), (8.4), (8.5) ve (8.6)'da verilmiştir.

Çizelge 8.2 KV_1 için ana kriterlere ait ikili karşılaştırma matrisi

	ANK_1	ANK_2	ANK_3	ANK_4
ANK_1	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.18, 0.62, 0.20)	(0.00, 1.00, 0.00)	(0.18, 0.62, 0.20)
ANK_2	(0.62, 0.18, 0.20)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.00, 1.00, 0.00)	(0.10, 0.80, 0.10)
ANK_3	(1.00, 0.00, 0.00)	(1.00, 0.00, 0.00)	(0.02, 0.18, 0.80)	(1.00, 0.00, 0.00)
ANK_4	(0.62, 0.18, 0.20)	(0.80, 0.10, 0.10)	(0.00, 1.00, 0.00)	(0.02, 0.18, 0.80)

Çizelge 8.3 KV_1 için AK_1 'e ait ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}	AK_{15}
AK_{11}	(0.02, 0.18,0,80)	(0.47, 0.23,0.30)	(0.10, 0.80,0.10)	(0.33, 0.27,0.40)	(0.47,0.23,0.30)
AK_{12}	(0.23, 0.47,0,30)	(0.02, 0.18,0.80)	(0.10, 0.80,0.10)	(0.02, 0.18,0.80)	(0.06,0.23,0.70)
AK_{13}	(0.80, 0.10,0,10)	(0.80, 0.10,0.10)	(0.02, 0.18,0.80)	(0.10, 0.80,0.10)	(0.80,0.10,0.10)
AK_{14}	(0.27, 0.33,0.40)	(0.02, 0.18,0.80)	(0.80, 0.10,0.10)	(0.02, 0.18,0.80)	(0.28,0.22,0.50)
AK_{15}	(0.23 ,0.47,0,30)	(0.23, 0.06,0.70)	(0.10, 0.80,0.10)	(0.22, 0.28,0.50)	(0.02,0.18,0.80)

Çizelge 8.4 KV_1 için AK_2 'ye ait ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{21}	AK_{22}	AK_{23}	AK_{24}
AK_{21}	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.62, 0.18, 0.20)	(1.00, 0.00, 0.00)	(1.00, 0.00, 0.00)
AK_{22}	(0.18, 0.62, 0.20)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.80, 0.10, 0.10)	(0.80, 0.10, 0.10)
AK_{23}	(0.00, 1.00, 0.00)	(0.10, 0.80, 0.10)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.33, 0.27, 0.40)
AK_{24}	(0.00, 1.00, 0.00)	(0.10, 0.80, 0.10)	(0.27, 0.33, 0.40)	(0.02, 0.18, 0.80)

Çizelge 8.5 KV_1 için AK_3 'e ait ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{31}	AK_{31}	AK_{33}	AK_{34}
AK_{31}	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.10, 0.80, 0.10)	(0.00, 1.00, 0.00)	(0.00, 1.00, 0.00)
AK_{31}	(0.80, 0.10, 0.10)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.13, 0.27, 0.60)	(0.06, 0.23, 0.70)
AK_{33}	(1.00, 0.00, 0.00)	(0.27, 0.13, 0.60)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.02, 0.18, 0.80)
AK_{34}	(1.00, 0.00, 0.00)	(0.23, 0.06, 0.70)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.02, 0.18, 0.80)

Çizelge 8.6 KV_1 için AK_4 'e ait ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{41}	AK_{42}
AK_{41}	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.27, 0.13, 0.60)
AK_{42}	(0.13, 0.27, 0.60)	(0.02, 0.18, 0.80)

Adım 5. Ana ve Alt Kriterler İçin Her Bir KV'ye Ait İkili Karşılaştırma Matrisinin Tutarlılığını Hesapla.

Eşitlik (7.4) kullanılarak her bir karar vericinin ana ve alt kriterler için oluşturduğu ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlılıkları hesaplanır. Yapılan hesaplamalar sonucunda her matris için tutarlı sonuçlar elde edilmiştir. Çizelge (8.7)' de örnek olarak KV_1 için ana kriter adına oluşturulan başlangıç matrisine ait tutarlılık hesabı verilmiştir.

Çizelge 8.7 KV_1 için ana kritere ait tutarlılık

	Tutarlılık
(0.10,0.50,0.40)	
(0.24,0.39,0.37)	
(1.00,0.00,0.00)	0.10
(0.49,0.23,0.28)	

Adım 6. Ana ve Alt Kriterler İçin Birleştirilmiş İkili Karşılaştırma Matrisini Oluştur.

Eşitlik (7.5) kullanılarak ana ve alt kriterlerin risk ağırlıklarına ilişkin birleştirilmiş $[\tilde{P}]_{ANK}$ ve $[\tilde{P}]_{AK}$ ikili karşılaştırma matrisleri Çizelge (8.8), (8.9), (8.10), (8.11) ve (8.12)'de verilmiştir.

Çizelge 8.8 KV_1 için ana kriterlere ait birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi

	ANK_1	ANK_2	ANK_3	ANK_4
ANK_1	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.19, 0.32, 0.49)	(0.17, 0.66, 0.17)	(0.48, 0.25, 0.28)
ANK_2	(0.61, 0.14, 0.25)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.13, 0.48, 0.38)	(0.09, 0.80, 0.11)
ANK_3	(1.00, 0.00, 0.00)	(1.00, 0.00, 0.00)	(0.02, 0.18, 0.80)	(1.00, 0.00, 0.00)
ANK_4	(0.63, 0.22, 0.15)	(1.00, 0.00, 0.00)	(0.16, 0.44, 0.40)	(0.02, 0.18, 0.80)

Çizelge 8.9 KV_1 için AK_1 'e ait birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}	AK_{15}
AK_{11}	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.37, 0.25, 0.38)	(0.10, 0.80, 0.10)	(0.44, 0.23, 0.33)	(0.63, 0.17, 0.20)
AK_{12}	(0.25, 0.34, 0.41)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.03, 0.94, 0.03)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.14, 0.26, 0.60)
AK_{13}	(0.80, 0.10, 0.10)	(1.00, 0.00, 0.00)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.43, 0.26, 0.31)	(0.67, 0.14, 0.19)
AK_{14}	(0.23, 0.37, 0.40)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.44, 0.18, 0.38)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.22, 0.15, 0.63)
AK_{15}	(0.18, 0.60, 0.22)	(0.27, 0.11, 0.62)	(0.16, 0.48, 0.36)	(0.18, 0.21, 0.61)	(0.02, 0.18, 0.80)

Çizelge 8.10 KV_1 için AK_2 'ye ait birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{21}	AK_{22}	AK_{23}	AK_{24}
AK_{21}	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.72, 0.14, 0.14)	(1.00, 0.00, 0.00)	(1.00, 0.00, 0.00)
AK_{22}	(0.14, 0.70, 0.16)	(0.02, 0.18, 0.80)	(1.00, 0.00, 0.00)	(0.71, 0.14, 0.15)
AK_{23}	(0.02, 0.96, 0.02)	(0.07, 0.86, 0.07)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.42, 0.23, 0.36)
AK_{24}	(0.16, 0.73, 0.11)	(0.15, 0.69, 0.16)	(0.23, 0.38, 0.39)	(0.02, 0.18, 0.80)

Çizelge 8.11 KV_1 için AK_3 'e ait birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{31}	AK_{31}	AK_{33}	AK_{34}
AK_{31}	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.16, 0.61, 0.23)	(0.00, 1.00, 0.00)	(1.00, 0.00, 0.00)
AK_{31}	(0.69, 0.14, 0.16)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.22, 0.22, 0.56)	(0.15, 0.27, 0.57)
AK_{33}	(1.00, 0.00, 0.00)	(0.28, 0.21, 0.51)	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.16, 0.33, 0.51)
AK_{34}	(1.00, 0.00, 0.00)	(0.27, 0.16, 0.57)	(0.47, 0.18, 0.35)	(0.02, 0.18, 0.80)

Çizelge 8.12 KV_1 için AK_4 'e ait birleştirilmiş ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{41}	AK_{42}
AK_{41}	(0.02, 0.18, 0.80)	(0.28, 0.13, 0.60)

Çizelge 8.12 devam ediyor

AK_{42}	(0.12, 0.28, 0.61)	(0.02, 0.18, 0.80)
-----------	--------------------	--------------------

Adım 7. Ana ve Alt Kriterler Arasındaki Benzerliği Hesapla.

Eşitlik (7.8) kullanılarak $[R]_{ANK}$ ve $[R]_{AK}$ Çizelge (8.13), (8.14), (8.15), (8.16) ve (8.17)'deki gibi oluşturulur.

Çizelge 8.13 KV_1 için ana kriterlere ait benzerlik matrisi

	ANK_1	ANK_2	ANK_3	ANK_4
ANK_1	0,11	0,51	1,00	0,89
ANK_2	0,97	0,11	1,00	0,11
ANK_3	1,00	1,00	0,97	1,00
ANK_4	0,94	1,00	1,00	0,11

Çizelge 8.14 KV_1 için AK_1 için benzerlik matrisi

	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}	AK_{15}
AK_1	0,23	0,83	0,50	1,00	1,00
AK_1	0,69	0,11	0,42	0,55	0,64
AK_1	1,00	1,00	0,49	1,00	1,00
AK_1	0,63	0,11	1,00	0,55	0,92
AK_1	0,40	0,92	0,66	0,93	0,32

Çizelge 8.15 KV_1 için AK_2 için benzerlik matrisi

	AK_{21}	AK_{22}	AK_{23}	AK_{24}
AK_{21}	1,00	1,00	1,00	1,00
AK_{22}	1,00	0,29	1,00	0,98
AK_{23}	0,98	0,26	0,11	0,88
AK_{24}	1,00	0,38	0,51	0,11

Çizelge 8.16 KV_1 için AK_3 için benzerlik matrisi

	AK_{31}	AK_{31}	AK_{33}	AK_{34}
AK_{31}	0,11	0,72	0,35	1,00

Çizelge 8.16 devam ediyor

AK_{31}	0,98	0,61	0,91	0,48
AK_{33}	1,00	1,00	0,46	0,42
AK_{34}	1,00	1,00	1,00	0,05

Çizelge 8.17 KV_1 için AK_4 için benzerlik matrisi

	AK_{41}	AK_{42}
AK_{41}	0,96	1,00
AK_{42}	1,00	0,51

Adım 8. Ana ve Alt Kriterlere Ait Benzerlik Matrisini Normalize Et.

Eşitlik (7.13) ve (7.14) kullanılarak normalize benzerlik matrisleri $[Z]_{ANK}$ ve $[Z]_{AK}$ Çizelge (8.18), (8.19), (8.20), (8.21) ve (8.22)'deki gibi elde edilir.

Çizelge 8.18. KV_1 'e ait ana kriterler için normalize benzerlik matrisi

	ANK_1	ANK_2	ANK_3	ANK_4
ANK_1	0,03	0,14	0,28	0,25
ANK_2	0,27	0,03	0,28	0,03
ANK_3	0,28	0,28	0,27	0,28
ANK_4	0,26	0,28	0,28	0,03

Çizelge 8.19 KV_1 'e ait AK_1 için normalize benzerlik matrisi

	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}	AK_{15}
AK_1	0,05	0,17	0,10	0,21	0,21
AK_1	0,14	0,02	0,09	0,11	0,13
AK_1	0,21	0,21	0,10	0,21	0,21
AK_1	0,13	0,02	0,21	0,11	0,19
AK_1	0,08	0,19	0,14	0,19	0,06

Çizelge 8.20 KV_1 'e ait AK_2 için normalize benzerlik matrisi

	AK_{21}	AK_{22}	AK_{23}	AK_{24}
AK_{21}	0,28	0,28	0,28	0,28

Çizelge 8.20 devam ediyor

AK_{22}	0,28	0,08	0,28	0,27
AK_{23}	0,28	0,07	0,03	0,25
AK_{24}	0,28	0,11	0,14	0,03

Çizelge 8.21 KV_1 'e ait AK_3 için normalize benzerlik matrisi

	AK_{31}	AK_{31}	AK_{33}	AK_{34}
AK_{31}	0,03	0,19	0,09	0,27
AK_{31}	0,26	0,16	0,24	0,13
AK_{33}	0,27	0,27	0,12	0,11
AK_{34}	0,27	0,27	0,27	0,01

Çizelge 8.22 KV_1 'e ait AK_4 için normalize benzerlik matrisi

	AK_{41}	AK_{42}
AK_{41}	0,49	0,51
AK_{42}	0,51	0,26

Adım 9: Ana ve Alt Kriterler İçin Toplam Benzerlik Matrisini Oluştur.

$[T]_{ANK}$ ve $[T]_{AK}$ matrisleri Eşitlik (7.15) kullanılarak oluşturulur. Bu matrisler Çizelge (8.23), (8.24), (8.25), (8.26) ve (8.27)'de verildiği gibidir.

Çizelge 8.23 KV_1 için ana kriterler toplam benzerlik ikili karşılaştırma matrisi

	ANK_1	ANK_2	ANK_3	ANK_4
ANK_1	1,08	1,06	1,60	1,03
ANK_2	1,15	0,84	1,44	0,77
ANK_3	1,78	1,61	2,24	1,45
ANK_4	1,41	1,29	1,79	0,95

Çizelge 8.24 KV_1 için AK_1 toplam benzerlik ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}	AK_{15}
AK_1	0,33	0,44	0,41	0,58	0,56
AK_1	0,34	0,23	0,30	0,39	0,39

Çizelge 8.24 devam ediyor

AK_1	0,55	0,55	0,49	0,69	0,66
AK_1	0,41	0,32	0,50	0,50	0,55
AK_1	0,35	0,43	0,42	0,54	0,41

Çizelge 8.25 KV_1 için AK_2 toplam benzerlik ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{21}	AK_{22}	AK_{23}	AK_{24}
AK_{21}	2,06	1,24	1,48	1,62
AK_{22}	1,72	0,87	1,24	1,34
AK_{23}	1,33	0,66	0,76	1,02
AK_{24}	1,27	0,66	0,82	0,80

Çizelge 8.26 KV_1 için toplam benzerlik AK_3 ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{31}	AK_{31}	AK_{33}	AK_{34}
AK_{31}	0,52	0,70	0,53	0,56
AK_{31}	0,85	0,81	0,76	0,56
AK_{33}	0,83	0,88	0,63	0,53
AK_{34}	0,87	0,92	0,79	0,46

Çizelge 8.27 KV_1 için toplam benzerlik AK_4 ikili karşılaştırma matrisi

	AK_{41}	AK_{42}
AK_{41}	5,25	4,31
AK_{42}	4,31	3,32

Adım 10. Ana ve Alt Kriterler İçin Gönderici ve Alıcı Grupları Belirle.

Eşitlik (7.16) ve (7.17) kullanılarak D ve R değerleri belirlenerek $D + R$ ve $D - R$ değerleri Çizelge (8.28), (8.29), (8.30), (8.31) ve (8.32)'de verilmiştir.

Çizelge 8.28 ANK_1 için $D + R$ ve $D - R$ değerleri

	$D + R$	$D - R$
ANK_1	10,19	-0,65
ANK_2	9,01	-0,61

Çizelge 8.28 devam ediyor

ANK_3	14,15	0,01
ANK_4	9,64	1,24

Çizelge 8.29 AK_1 için $D + R$ ve $D - R$ değerleri

	$D + R$	$D - R$
AK_{11}	4,32	0,35
AK_{12}	3,63	-0,32
AK_{13}	5,06	0,82
AK_{14}	4,96	-0,42
AK_{15}	4,72	-0,43

Çizelge 8.30 AK_2 için $D + R$ ve $D - R$ değerleri

	$D + R$	$D - R$
AK_{21}	12,79	0,02
AK_{22}	8,61	1,73
AK_{23}	8,07	-0,53
AK_{24}	8,33	-1,21

Çizelge 8.31 AK_3 için $D + R$ ve $D - R$ değerleri

	$D + R$	$D - R$
AK_{31}	5,38	-0,77
AK_{31}	6,28	-0,32
AK_{33}	5,59	0,16
AK_{34}	5,15	0,93

Çizelge 8.32 AK_4 için $D + R$ ve $D - R$ değerleri

	$D + R$	$D - R$
AK_{41}	19,12	0,00
AK_{42}	15,26	0,00

Adım 11. Ana ve Alt Kriterin Ağırlıklarını Bul.

Eşitlik (7.18-7.22) kullanılarak W_{jt}^* kriter ağırlıkları değeri Çizelge (8.33)'teki gibi elde edilir.

Çizelge 8.33 W_{jt}^* değerleri

	W_{jt}^*
AK_{11}	0,0449
AK_{12}	0,0379
AK_{13}	0,0622
AK_{14}	0,0517
AK_{15}	0,0492
AK_{21}	0,0706
AK_{22}	0,0485
AK_{23}	0,0447
AK_{24}	0,0456
AK_{31}	0,0791
AK_{32}	0,0916
AK_{33}	0,0814
AK_{34}	0,0762
AK_{41}	0,1255
AK_{42}	0,1001
$\sum AK_{jv}$	1,0000

İkinci Aşama: Alternatiflerin Sıralanması

Adım 12: Her Bir Kriter İçin MABAC Yöntemini Kullanarak Alternatifleri Değerlendir.

Her bir KV için alternatiflere ait performans matrisi $[\tilde{X}_k]$ Eşitlik (7.23)'deki gibi oluşturulması için Çizelge (7.4) kriterlerin tanımlarına göre Çizelge (8.34-8.48) oluşturulmuş ve performans matrisleri bu tablolara dayalı değerlendirilmiştir. Burada, kriterlerin değerlendirme skalası HTEA yönteminde kullanılan mantık çerçevesinde geliştirilmiştir. Hata türlerinin sıralanmasında olasılık, şiddet ve maliyet kriterleri yüksek değerleri aldığı anda ilgili hata daha yüksek önceliğe sahip olurlarken; fark edilebilirlik, iş yeri temizlik ve düzen gibi kriterler için ise düşük

değerleri alan hata türünü yüksek önceliğe taşımaktadır. Buna göre oluşturulan sezgisel bulanık değerlendirme skalaları aşağıda anlatılmıştır.

Uygun olmayan çalışma duruşları (UOÇD): Hat üzerinde işçilerin sergilediği tehlikeli duruşları ifade eder. Çizelge (8.34)'te bu alt kriter için kullanılan sezgisel bulanık skala gösterilmiştir.

Çizelge 8.34 UOÇD değerlendirme skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Tehlikesiz duruş	(0.10, 0.80, 0.10)
Biraz tehlikeli duruş	(0.25, 0.60, 0.15)
Orta derecede tehlikeli duruş	(0.50, 0.40, 0.10)
Tehlikeli duruş	(0.75, 0.20, 0.05)
Çok tehlikeli duruş	(0.90, 0.05, 0.05)

Gürültü seviyesi (GS): Hata türünün ortaya çıkmasında gürültü düzeyi etkisinin ne derece olduğunu tanımlamak için kullanılır. Değerlendirmeye ilişkin tanımlamalar Çizelge (8.35)'te belirtilmiştir.

Çizelge 8.35 GS değerlendirme skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Etkisi çok düşük	(0.10, 0.80, 0.10)
Etkisi düşük	(0.25, 0.60, 0.15)
Orta derecede etkiler	(0.50, 0.40, 0.10)
Etkisi yüksek	(0.75, 0.20, 0.05)
Etkisi çok yüksek	(0.90, 0.05, 0.05)

İşyeri temizlik ve düzeni (İTD): Hata türünün oluşmasında temizlik ve düzenin tanımlayıcı bir unsur olmasından dolayı sürece yansıtılabilmek için Çizelge (8.36)'da verilen değerlendirme skalası kullanılmıştır.

Çizelge 8.36 İTD değerlendirme skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Çok düzensiz	(0.90, 0.05, 0.05)
Düzensiz	(0.75, 0.20, 0.05)
Orta	(0.50, 0.40, 0.10)
Düzenli	(0.25, 0.60, 0.15)
Çok düzenli	(0.10, 0.80, 0.10)

Aydınlatma (A): Hata türünün ortaya çıkmasında etkisinin ne derece olduğunu tanımlamak için kullanılır. Kullanılan skala Çizelge (8.37)'de verilmiştir.

Çizelge 8.37 A değerlendirme skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Etkisi çok düşük	(0.10, 0.80, 0.10)
Etkisi düşük	(0.25, 0.60, 0.15)
Orta derecede etkiler	(0.50, 0.40, 0.10)
Etkisi yüksek	(0.75, 0.20, 0.05)
Etkisi çok yüksek	(0.90, 0.05, 0.05)

El aletlerinin kullanılabilirliği (EK): Hata türleri üzerinde mevcut el aletlerinin kullanılabilirlik derecesi önemli etkiye sahiptir. Çizelge (8.38)'de değerlendirme skalası verilmiştir.

Çizelge 8.38 EK değerlendirme skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Çok yıpranmış	(0.90, 0.05, 0.05)
Kısmen yıpranmış	(0.75, 0.20, 0.05)
Orta	(0.50, 0.40, 0.10)
Yıpranmamış	(0.25, 0.60, 0.15)
Hiç yıpranmamış	(0.10, 0.80, 0.10)

İş sağlığı ve güvenliği prosedürlerinin kullanımı (İSGPK): Hata türlerinin önlenmesi için iş sağlığı ve güvenliği prosedürlerinin uygulanması önemli bir fonksiyondur. Hata türü önceliklendirmesi için ise değerlendirmeye katılması gereken bir kavramdır. Çizelge (8.39)'da kullanılan skala verilmiştir.

Çizelge 8.39 İSGPK değerlendirme skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Hiç önemsenmiyor	(0.90, 0.05, 0.05)
Önemsenmiyor	(0.75, 0.20, 0.05)
Orta	(0.50, 0.40, 0.10)
Önemseniyor	(0.25, 0.60, 0.15)
Çok önemseniyor	(0.10, 0.80, 0.10)

Planlı bakım ve onarım (PBO): Hata türlerinin ortaya çıkmasını engelleyebilmek için düzenli bir şekilde bakım ve onarım faaliyetlerinin yapılması gerekmektedir. Bu çerçevede aşağıda Çizelge (8.40)'ta hata türlerini bu alt kritere göre değerlendirmek için kullanılan skala verilmiştir.

Çizelge 8.40 PBO değerlendirme skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Çok kötü	(0.90, 0.05, 0.05)
Kötü	(0.75, 0.20, 0.05)
Orta	(0.50, 0.40, 0.10)
İyi	(0.25, 0.60, 0.15)
Çok iyi	(0.10, 0.80, 0.10)

Makine koruyucuları kullanımı (MKK): Sistemin daha güvenilir olabilmesi için etkin önlemlerden biri de makine koruyucularıdır. Bu sebeple Çizelge (8.41)'de verilen değerlendirme skalası kullanılmıştır.

Çizelge 8.41 MKK değerlendirme skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Çok düşük: Kazada hiç bir koruyucu etkisi yok	(0.90, 0.05, 0.05)
Düşük: Çok az koruyucu etkisi var	(0.75, 0.20, 0.05)
Orta: Koruyucu etkisi orta derecede	(0.50, 0.40, 0.10)
Yüksek: Koruyucu etkisi iyi	(0.25, 0.60, 0.15)
Çok yüksek: Zarar görmeyecek şekilde korur	(0.10, 0.80, 0.10)

Kişisel koruyucu kullanımı (KKK): Hata türlerinin etkilerinden koruyacak bir diğer faktör kişisel koruyuculardır. Çizelge (8.42)'de değerlendirme skalası verilmiştir.

Çizelge 8.42 KKK değerlendirme skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Çok düşük: Kazada hiç bir koruyucu etkisi yok	(0.90, 0.05, 0.05)
Düşük: Çok az koruyucu etkisi var	(0.75, 0.20, 0.05)
Orta: Koruyucu etkisi orta derecede	(0.50, 0.40, 0.10)
Yüksek: Koruyuc etkisi iyi	(0.25, 0.60, 0.15)
Çok yüksek: Zarar görmeyecek şekilde korur	(0.10, 0.80, 0.10)

Olasılık (O): Hata türünün ne kadar sıklıkla ortaya çıktığını ifade etmektedir ve hata türü önceliklendirilmesinde dikkate alınması gereken bir faktördür. Çizelge (8.43)'te verilen skala temel alınmıştır.

Çizelge 8.43 O değerlendirme skalası

Açıklama	SBS
	(μ, ν, π)
Kaçınılmaz hata: 1/3'den fazla	(0.90, 0.05, 0.05)
Düşük: 1/20	(0.75, 0.20, 0.05)
Orta: 1/400	(0.50, 0.40, 0.10)
Yüksek: 1/15000	(0.25, 0.60, 0.15)
Çok yüksek: 1/1500000'den düşük	(0.10, 0.80, 0.10)

Siddet (S): Hata türünün sistemde üzerinde oluşturabileceği etkinin tanımlanmasıdır. Çizelge (8.44) kullanılarak sürece dahil edilmiştir.

Çizelge 8.44 S değerlendirmeye skalası

Açıklama	SBS
	(μ, ν, π)
Uyarısız gelen tehlike:Felakete yol açabilen etki	(0.90, 0.05, 0.05)
Yüksek:Ekipmanların tamamen hasar veren etki	(0.75, 0.20, 0.05)
Orta:Sistemin performansını etkileyen etki	(0.50, 0.40, 0.10)
Düşük:Sistemin yavaşlatmasına neden olan etki	(0.25, 0.60, 0.15)
Etki yok: Kargaşaya sebep olan etki	(0.10, 0.80, 0.10)

Fark edilebilirlik (F): Oluşabilecek hatanın daha sistemden çıkmadan tespit edilebilmesi durumudur. Bu faktöre ilişkin skala Çizelge (8.45)'te verilmiştir.

Çizelge 8.45 F değerlendirmeye skalası

Açıklama	SBS
	(μ, ν, π)
Hemen hemen kesin:Hatanın keşfedilebilirliği kesin	(0.10, 0.80, 0.10)
Yüksek: Hatanın keşfedilebilirliği çok yüksek	(0.25, 0.60, 0.15)
Orta : Hatanın keşfedilebilirliği çok orta	(0.50, 0.40, 0.10)
Düşük: Hatanın keşfedilebilirliği düşük	(0.75, 0.20, 0.05)
Tespit edilemez:Hatanın keşfedilebilirliği çok zor	(0.90, 0.05, 0.05)

Sistem güvenilirliğine etkisi (SGE): Hata türü ortaya çıktığında mevcut sistem üzerinde güvenilirliğin kaybını ifade etmek için kullanılır. Çizelge (8.46)'da bu değerlendirmeye ilişkin skala verilmiştir.

Çizelge 8.46 SGE değerlendirmeye skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Sistem üzerinde olumsuz etkisi çok düşük	(0.10, 0.80, 0.10)
Sistem üzerinde olumsuz etkisi düşük	(0.25, 0.60, 0.15)
Sistem üzerinde olumsuz etkisi orta	(0.50, 0.40, 0.10)

Çizelge 8.46 devam ediyor

Sistem üzerinde olumsuz etkisi yüksek	(0.75, 0.20, 0.05)
Sistem üzerinde olumsuz etkisi çok yüksek	(0.90, 0.05, 0.05)

Hatanın maliyeti (HM): Hata türü ortaya çıktığında ne derece bir maliyete sebep olduğunu tanımlamak için Çizelge (8.47)'deki değerlendirmeler kullanılır.

Çizelge 8.47 HM değerlendirme skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Çok düşük	(0.10, 0.80, 0.10)
Düşük	(0.25, 0.60, 0.15)
Orta	(0.50, 0.40, 0.10)
Yüksek	(0.75, 0.20, 0.05)
Çok yüksek	(0.90, 0.05, 0.05)

Önlem maliyeti (ÖM): Hata türü ortaya çıktığında bu hata türünü yok etmek veya etkisinin azaltabilmek için ne kadar bir maliyete katlanması gerektiğinin ifade etmek için kullanılır ve Çizelge (8.48)'de belirtildiği gibi değerlendirilir.

Çizelge 8.48 ÖM değerlendirme skalası

Tanım	SBS
	(μ, ν, π)
Çok düşük	(0.10, 0.80, 0.10)
Düşük	(0.25, 0.60, 0.15)
Orta	(0.50, 0.40, 0.10)
Yüksek	(0.75, 0.20, 0.05)
Çok yüksek	(0.90, 0.05, 0.05)

Her bir hata türü yukarıda anlatılan kriterler bazında değerlendirilerek $[\tilde{X}_k]$ matrisi oluşturulur. Çizelge (8.49), (8.50), (8.51) ve (8.52)'de KV_1 için oluşturulan performans matrisleri verilmiştir.

Çizelge 8.49 KV_1 için ANK_1 performans matrisi

ANK_1	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}	AK_{15}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.90,0.05,0.05)	(0.50,0.40,0.10)	(0.75,0.20,0.05)	(0.75,0.20,0.05)	(0.75,0.20,0.05)
HT_2	(0.50,0.40,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.90,0.05,0.05)	(0.75,0.20,0.05)	(0.75,0.20,0.05)
HT_3	(0.75,0.20,0.05)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)
HT_4	(0.10,0.80,0.10)	(0.75,0.20,0.05)	(0.25,0.60,0.15)	(0.10,0.80,0.10)	(0.50,0.40,0.10)
HT_5	(0.25,0.60,0.15)	(0.50,0.40,0.10)	(0.50,0.40,0.10)	(0.75,0.20,0.05)	(0.90,0.05,0.05)
HT_6	(0.25,0.60,0.15)	(0.90,0.05,0.05)	(0.25,0.60,0.15)	(0.25,0.60,0.15)	(0.10,0.80,0.10)
HT_7	(0.50,0.40,0.10)	(0.50,0.40,0.10)	(0.75,0.20,0.05)	(0.90,0.05,0.05)	(0.10,0.80,0.10)
HT_8	(0.75,0.20,0.05)	(0.75,0.20,0.05)	(0.25,0.60,0.15)	(0.25,0.60,0.15)	(0.90,0.05,0.05)
HT_9	(0.25,0.60,0.15)	(0.25,0.60,0.15)	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)	(0.50,0.40,0.10)

Çizelge 8.50 KV_1 için ANK_2 performans matrisi

ANK_2	AK_{21}	AK_{22}	AK_{23}	AK_{24}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.90,0.05,0.05)	(0.50,0.40,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.75,0.20,0.05)
HT_2	(0.75,0.20,0.05)	(0.50,0.40,0.10)	(0.50,0.40,0.10)	(0.50,0.40,0.10)
HT_3	(0.75,0.20,0.05)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)
HT_4	(0.50,0.40,0.10)	(0.50,0.40,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)
HT_5	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)
HT_6	(0.90,0.05,0.05)	(0.75,0.20,0.05)	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)
HT_7	(0.90,0.05,0.05)	(0.75,0.20,0.05)	(0.50,0.40,0.10)	(0.25,0.60,0.15)
HT_8	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)	(0.75,0.20,0.05)
HT_9	(0.90,0.05,0.05)	(0.75,0.20,0.05)	(0.25,0.60,0.15)	(0.50,0.40,0.10)

Çizelge 8.51 KV_1 için ANK_3 performans matrisi

ANK_3	AK_{31}	AK_{32}	AK_{33}	AK_{34}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.75,0.20,0.05)	(0.50,0.40,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)
HT_2	(0.75,0.20,0.05)	(0.50,0.40,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.75,0.20,0.05)
HT_3	(0.50,0.40,0.10)	(0.90,0.05,0.05)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)

Çizelge 8.51 devam ediyor

HT_4	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)	(0.25,0.60,0.15)	(0.90,0.05,0.05)
HT_5	(0.75,0.20,0.05)	(0.50,0.40,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.50,0.40,0.10)
HT_6	(0.50,0.40,0.10)	(0.75,0.20,0.05)	(0.10,0.80,0.10)	(0.75,0.20,0.05)
HT_7	(0.75,0.20,0.05)	(0.50,0.40,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.75,0.20,0.05)
HT_8	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)
HT_9	(0.90,0.05,0.05)	(0.75,0.20,0.05)	(0.90,0.05,0.05)	(0.75,0.20,0.05)

Çizelge 8.52 KV_1 için ANK_4 performans matrisi

ANK_4	AK_{31}	AK_{32}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.50,0.40,0.10)	(0.90,0.05,0.05)
HT_2	(0.50,0.40,0.10)	(0.75,0.20,0.05)
HT_3	(0.25,0.60,0.15)	(0.10,0.80,0.10)
HT_4	(0.90,0.05,0.05)	(0.75,0.20,0.05)
HT_5	(0.75,0.20,0.05)	(0.75,0.20,0.05)
HT_6	(0.75,0.20,0.05)	(0.90,0.05,0.05)
HT_7	(0.75,0.20,0.05)	(0.75,0.20,0.05)
HT_8	(0.90,0.05,0.05)	(0.75,0.20,0.05)
HT_9	(0.90,0.05,0.05)	(0.90,0.05,0.05)

Adım 13. Alternatifler için Birleştirilmiş Performans Matrisini oluştur.

Eşitlik (7.5) kullanılarak 4 karar vericinin kararı birleştirilir. Eşitlik (7.24)'de elde edilen $[\tilde{X}]$ Çizelge (8.53), (8.54), (8.55) ve (8.56)'da verilmiştir.

Çizelge 8.53 ANK_1 performans matrisi

ANK_1	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}	AK_{15}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.88,0.06,0.05)	(0.30,0.57,0.13)	(0.87,0.07,0.06)	(0.79,0.16,0.06)	(0.83,0.10,0.07)
HT_2	(0.80,0.12,0.08)	(0.25,0.60,0.15)	(0.88,0.06,0.05)	(0.69,0.23,0.08)	(0.75,0.20,0.05)
HT_3	(0.81,0.13,0.06)	(0.10,0.80,0.10)	(0.18,0.70,0.12)	(0.10,0.80,0.10)	(0.19,0.68,0.13)
HT_4	(0.27,0.61,0.12)	(0.85,0.09,0.06)	(0.50,0.40,0.10)	(0.51,0.40,0.09)	(0.46,0.43,0.11)

Çizelge 8.53 devam ediyor

HT₅	(0.45,0.44,0.11)	(0.60,0.32,0.08)	(0.57,0.34,0.09)	(0.48,0.43,0.09)	(0.90,0.05,0.05)
HT₆	(0.25,0.60,0.15)	(0.90,0.05,0.05)	(0.31,0.57,0.12)	(0.21,0.65,0.14)	(0.42,0.48,0.10)
HT₇	(0.51,0.39,0.10)	(0.37,0.50,0.13)	(0.74,0.18,0.08)	(0.90,0.05,0.05)	(0.34,0.54,0.12)
HT₈	(0.75,0.20,0.05)	(0.78,0.15,0.07)	(0.22,0.63,0.15)	(0.19,0.68,0.13)	(0.80,0.14,0.06)
HT₉	(0.45,0.44,0.11)	(0.32,0.54,0.14)	(0.90,0.05,0.05)	(0.87,0.07,0.06)	(0.43,0.45,0.11)

Çizelge 8.54 ANK₂ performans matrisi

ANK₂	AK₂₁	AK₂₂	AK₂₃	AK₂₄
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT₁	(0.85,0.09,0.06)	(0.66,0.27,0.07)	(0.45,0.44,0.11)	(0.59,0.33,0.08)
HT₂	(0.81,0.13,0.06)	(0.58,0.34,0.08)	(0.40,0.48,0.12)	(0.45,0.44,0.11)
HT₃	(0.87,0.07,0.06)	(0.21,0.65,0.14)	(0.10,0.80,0.10)	(0.47,0.42,0.11)
HT₄	(0.57,0.35,0.08)	(0.37,0.51,0.12)	(0.15,0.73,0.12)	(0.14,0.74,0.12)
HT₅	(0.89,0.06,0.05)	(0.89,0.06,0.05)	(0.83,0.11,0.06)	(0.86,0.08,0.06)
HT₆	(0.89,0.06,0.05)	(0.81,0.13,0.06)	(0.87,0.07,0.06)	(0.86,0.08,0.06)
HT₇	(0.89,0.06,0.05)	(0.81,0.13,0.06)	(0.56,0.35,0.09)	(0.38,0.49,0.13)
HT₈	(0.90,0.05,0.05)	(0.87,0.07,0.06)	(0.83,0.11,0.06)	(0.81,0.13,0.06)
HT₉	(0.90,0.05,0.05)	(0.72,0.23,0.05)	(0.38,0.49,0.12)	(0.30,0.57,0.13)

Çizelge 8.55 ANK₃ performans matrisi

ANK₃	AK₃₁	AK₃₂	AK₃₃	AK₃₄
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT₁	(0.59,0.33,0.08)	(0.46,0.43,0.11)	(0.13,0.76,0.11)	(0.40,0.48,0.12)
HT₂	(0.83,0.11,0.06)	(0.60,0.32,0.08)	(0.23,0.65,0.12)	(0.50,0.40,0.10)
HT₃	(0.73,0.19,0.08)	(0.78,0.16,0.06)	(0.17,0.71,0.12)	(0.21,0.66,0.13)
HT₄	(0.74,0.19,0.07)	(0.84,0.10,0.06)	(0.50,0.40,0.10)	(0.88,0.07,0.05)
HT₅	(0.75,0.20,0.05)	(0.60,0.32,0.08)	(0.27,0.60,0.13)	(0.77,0.16,0.07)
HT₆	(0.81,0.12,0.07)	(0.76,0.17,0.07)	(0.29,0.58,0.13)	(0.70,0.24,0.06)
HT₇	(0.66,0.27,0.07)	(0.37,0.51,0.12)	(0.29,0.58,0.13)	(0.59,0.33,0.08)
HT₈	(0.84,0.10,0.06)	(0.90,0.05,0.05)	(0.81,0.12,0.07)	(0.83,0.11,0.06)
HT₉	(0.90,0.05,0.05)	(0.83,0.11,0.06)	(0.84,0.10,0.06)	(0.87,0.07,0.06)

Çizelge 8.56 ANK_4 performans matrisi

ANK_4	AK_{31}	AK_{32}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.50,0.40,0.10)	(0.83,0.10,0.07)
HT_2	(0.50,0.40,0.10)	(0.78,0.15,0.07)
HT_3	(0.21,0.66,0.13)	(0.13,0.76,0.11)
HT_4	(0.88,0.07,0.05)	(0.81,0.13,0.06)
HT_5	(0.69,0.25,0.06)	(0.66,0.27,0.07)
HT_6	(0.63,0.30,0.07)	(0.80,0.14,0.06)
HT_7	(0.63,0.30,0.07)	(0.64,0.29,0.07)
HT_8	(0.87,0.07,0.06)	(0.87,0.07,0.06)
HT_9	(0.80,0.13,0.07)	(0.89,0.06,0.05)

Adım 14. Alternatifler için Etki Matrisini Oluştur.

Her bir hata türü birbirinin ortaya çıkmasını etkileyebileceğinden Eşitlik (7.25)'te verilen $[\tilde{Y}_k]$ matrisi oluşturulur. Ek 1'de KV_1 için oluşturulan etki matrisi verilmiştir.

Adım 15. Alternatifler için Birleştirilmiş Etki Matrisini Oluştur.

Eşitlik (7.5)'te verilen IFWG yaklaşımı ile birleştirilen $[\tilde{Y}_k]$ matrisi Ek 2'de verilmiştir.

Adım 16. Alternatifler İçin Bütünleşik Performans Matrisini Oluştur.

Eşitlik (7.27) kullanılarak $[\tilde{E}]$ matrisleri elde edilir.

Çizelge 8.57 ANK_1 için $[\tilde{E}]$ matrisi

ANK_1	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}	AK_{15}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.72,0.09,0.19)	(0.63,0.13,0.24)	(0.85,0.04,0.11)	(0.82,0.05,0.13)	(0.71,0.10,0.09)
HT_2	(0.81,0.05,0.14)	(0.77,0.07,0.16)	(0.93,0.02,0.05)	(0.93,0.02,0.05)	(0.79,0.06,0.15)
HT_3	(0.65,0.13,0.22)	(0.52,0.19,0.29)	(0.78,0.07,0.15)	(0.75,0.09,0.16)	(0.65,0.13,0.22)
HT_4	(0.75,0.08,0.17)	(0.65,0.13,0.22)	(0.87,0.04,0.09)	(0.85,0.05,0.10)	(0.71,0.10,0.19)
HT_5	(0.80,0.06,0.14)	(0.75,0.08,0.17)	(0.71,0.09,0.20)	(0.68,0.11,0.21)	(0.78,0.07,0.15)
HT_6	(0.93,0.02,0.05)	(0.93,0.02,0.05)	(0.89,0.03,0.08)	(0.86,0.04,0.10)	(0.96,0.01,0.03)

Çizelge 8.57 devam ediyor

HT₇	(0.93,0.02,0.05)	(0.88,0.03,0.09)	(0.98,0.00,0.02)	(0.97,0.01,0.02)	(0.94,0.02,0.04)
HT₈	(0.91,0.02,0.07)	(0.83,0.05,0.12)	(0.87,0.04,0.09)	(0.81,0.06,0.13)	(0.93,0.01,0.05)
HT₉	(0.98,0.00,0.02)	(0.86,0.04,0.10)	(0.98,0.00,0.02)	(0.96,0.01,0.04)	(0.96,0.01,0.03)

Çizelge 8.58 ANK₂ için [\tilde{E}] matrisi

ANK₂	AK₂₁	AK₂₂	AK₂₃	AK₂₄
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT₁	(0.89,0.02,0.09)	(0.80,0.06,0.14)	(0.64,0.13,0.23)	(0.63,0.13,0.24)
HT₂	(0.96,0.01,0.03)	(0.92,0.02,0.06)	(0.80,0.06,0.14)	(0.77,0.07,0.16)
HT₃	(0.83,0.04,0.13)	(0.73,0.09,0.18)	(0.57,0.17,0.26)	(0.57,0.17,0.26)
HT₄	(0.93,0.01,0.06)	(0.84,0.05,0.11)	(0.70,0.11,0.19)	(0.70,0.10,0.20)
HT₅	(0.89,0.02,0.09)	(0.82,0.05,0.13)	(0.73,0.09,0.18)	(0.75,0.08,0.17)
HT₆	(0.98,0.00,0.02)	(0.96,0.01,0.03)	(0.93,0.02,0.05)	(0.94,0.02,0.04)
HT₇	(0.98,0.00,0.02)	(0.94,0.02,0.01)	(0.79,0.07,0.14)	(0.81,0.06,0.13)
HT₈	(0.98,0.00,0.02)	(0.93,0.01,0.06)	(0.89,0.03,0.08)	(0.93,0.02,0.05)
HT₉	(0.99,0.00,0.01)	(0.95,0.01,0.04)	(0.86,0.04,0.10)	(0.90,0.02,0.08)

Çizelge 8.59 ANK₃ için [\tilde{E}] matrisi

ANK₃	AK₃₁	AK₃₂	AK₃₃	AK₃₄
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT₁	(0.88,0.03,0.09)	(0.84,0.05,0.11)	(0.73,0.10,0.17)	(0.84,0.05,0.11)
HT₂	(0.95,0.01,0.04)	(0.91,0.02,0.07)	(0.83,0.06,0.11)	(0.92,0.02,0.06)
HT₃	(0.81,0.05,0.14)	(0.76,0.08,0.16)	(0.65,0.15,0.20)	(0.76,0.08,0.16)
HT₄	(0.92,0.02,0.06)	(0.88,0.03,0.09)	(0.79,0.08,0.13)	(0.87,0.04,0.09)
HT₅	(0.87,0.03,0.10)	(0.86,0.04,0.10)	(0.70,0.11,0.19)	(0.82,0.05,0.13)
HT₆	(0.97,0.00,0.03)	(0.97,0.00,0.03)	(0.89,0.03,0.08)	(0.97,0.01,0.03)
HT₇	(0.98,0.00,0.02)	(0.98,0.00,0.02)	(0.89,0.03,0.08)	(0.97,0.00,0.02)
HT₈	(0.95,0.01,0.04)	(0.95,0.01,0.04)	(0.62,0.14,0.24)	(0.90,0.02,0.08)
HT₉	(0.98,0.00,0.02)	(0.98,0.00,0.02)	(0.72,0.09,0.19)	(0.93,0.01,0.06)

Çizelge 8.60 ANK_4 için $[\tilde{E}]$ matrisi

ANK_4	AK_{31}	AK_{32}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.82,0.05,0.13)	(0.87,0.03,0.09)
HT_2	(0.91,0.02,0.07)	(0.94,0.01,0.05)
HT_3	(0.74,0.09,0.17)	(0.80,0.06,0.14)
HT_4	(0.85,0.04,0.11)	(0.89,0.03,0.08)
HT_5	(0.83,0.05,0.12)	(0.85,0.04,0.11)
HT_6	(0.97,0.01,0.02)	(0.98,0.00,0.02)
HT_7	(0.97,0.01,0.02)	(0.99,0.00,0.01)
HT_8	(0.89,0.03,0.08)	(0.92,0.02,0.06)
HT_9	(0.94,0.01,0.04)	(0.98,0.00,0.02)

Adım 17: Ağırlıklandırılmış Bütünleşik Performans Matrisini oluştur.

Adım11'de belirlenen alt kriter ağırlıkları kullanılarak $[\tilde{L}]$ matrisleri elde edilir.

Çizelge 8.61 ANK_1 için $[\tilde{L}]$ matrisi

ANK_1	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}	AK_{15}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.06,0.90,0.04)	(0.04,0.93,0.03)	(0.11,0.82,0.07)	(0.09,0.86,0.05)	(0.06,0.89,0.05)
HT_2	(0.07,0.88,0.05)	(0.05,0.90,0.05)	(0.16,0.77,0.07)	(0.13,0.81,0.06)	(0.07,0.87,0.06)
HT_3	(0.05,0.91,0.04)	(0.03,0.94,0.03)	(0.09,0.85,0.06)	(0.07,0.88,0.05)	(0.05,0.90,0.05)
HT_4	(0.06,0.89,0.05)	(0.04,0.92,0.04)	(0.12,0.81,0.07)	(0.09,0.85,0.06)	(0.06,0.89,0.05)
HT_5	(0.07,0.88,0.05)	(0.05,0.91,0.04)	(0.07,0.86,0.07)	(0.06,0.89,0.05)	(0.07,0.88,0.05)
HT_6	(0.11,0.83,0.06)	(0.10,0.86,0.04)	(0.13,0.80,0.07)	(0.10,0.85,0.05)	(0.15,0.79,0.06)
HT_7	(0.11,0.83,0.06)	(0.08,0.88,0.04)	(0.22,0.70,0.08)	(0.16,0.78,0.06)	(0.13,0.82,0.05)
HT_8	(0.10,0.84,0.06)	(0.07,0.89,0.04)	(0.12,0.81,0.07)	(0.08,0.86,0.05)	(0.12,0.81,0.07)
HT_9	(0.16,0.77,0.07)	(0.07,0.88,0.05)	(0.22,0.70,0.08)	(0.16,0.78,0.06)	(0.15,0.79,0.06)

Çizelge 8.62 ANK_2 için $[\tilde{L}]$ matrisi

ANK_2	AK_{21}	AK_{22}	AK_{23}	AK_{24}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.14,0.77,0.09)	(0.08,0.87,0.05)	(0.04,0.91,0.05)	(0.04,0.91,0.05)
HT_2	(0.21,0.70,0.09)	(0.12,0.83,0.05)	(0.07,0.88,0.05)	(0.07,0.89,0.04)
HT_3	(0.12,0.80,0.08)	(0.06,0.89,0.05)	(0.04,0.92,0.04)	(0.04,0.92,0.04)
HT_4	(0.17,0.74,0.09)	(0.09,0.86,0.05)	(0.05,0.91,0.04)	(0.05,0.90,0.05)
HT_5	(0.14,0.77,0.09)	(0.08,0.87,0.05)	(0.06,0.90,0.04)	(0.06,0.89,0.05)
HT_6	(0.25,0.65,0.10)	(0.15,0.78,0.07)	(0.11,0.83,0.06)	(0.12,0.83,0.05)
HT_7	(0.26,0.65,0.09)	(0.13,0.82,0.05)	(0.07,0.89,0.04)	(0.07,0.88,0.05)
HT_8	(0.24,0.66,0.10)	(0.12,0.81,0.07)	(0.09,0.86,0.05)	(0.12,0.83,0.05)
HT_9	(0.29,0.61,0.10)	(0.14,0.80,0.06)	(0.08,0.87,0.05)	(0.10,0.84,0.06)

Çizelge 8.63 ANK_3 için $[\tilde{L}]$ matrisi

ANK_3	AK_{31}	AK_{32}	AK_{33}	AK_{34}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.15,0.76,0.09)	(0.15,0.75,0.10)	(0.10,0.83,0.07)	(0.13,0.79,0.08)
HT_2	(0.21,0.70,0.09)	(0.20,0.71,0.09)	(0.13,0.79,0.08)	(0.18,0.74,0.08)
HT_3	(0.12,0.79,0.09)	(0.12,0.79,0.09)	(0.08,0.85,0.07)	(0.10,0.82,0.08)
HT_4	(0.18,0.73,0.09)	(0.18,0.79,0.09)	(0.12,0.81,0.07)	(0.15,0.78,0.07)
HT_5	(0.15,0.76,0.09)	(0.16,0.74,0.10)	(0.09,0.84,0.07)	(0.12,0.80,0.08)
HT_6	(0.25,0.65,0.10)	(0.28,0.61,0.11)	(0.17,0.75,0.08)	(0.23,0.68,0.09)
HT_7	(0.28,0.63,0.09)	(0.28,0.62,0.10)	(0.17,0.76,0.07)	(0.24,0.67,0.09)
HT_8	(0.22,0.69,0.09)	(0.22,0.68,0.10)	(0.08,0.85,0.07)	(0.16,0.75,0.09)
HT_9	(0.27,0.63,0.10)	(0.25,0.64,0.11)	(0.10,0.82,0.08)	(0.19,0.72,0.09)

Çizelge 8.64 ANK_4 için $[\tilde{L}]$ matrisi

ANK_4	AK_{31}	AK_{32}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.19,0.69,0.12)	(0.18,0.71,0.11)
HT_2	(0.26,0.62,0.12)	(0.25,0.64,0.11)
HT_3	(0.16,0.74,0.10)	(0.15,0.75,0.10)

Çizelge 8.64 devam ediyor

HT_4	(0.21,0.68,0.11)	(0.20,0.70,0.10)
HT_5	(0.20,0.68,0.12)	(0.17,0.72,0.11)
HT_6	(0.35,0.52,0.13)	(0.31,0.57,0.12)
HT_7	(0.35,0.53,0.12)	(0.35,0.54,0.11)
HT_8	(0.24,0.64,0.12)	(0.22,0.68,0.10)
HT_9	(0.30,0.58,0.12)	(0.32,0.57,0.11)

Adım 18. Sınır Yaklaşım Alanı Vektörünü oluştur.

Eşitlik (7.5) ile alan vektörü \tilde{G}_{jt} oluşturulur.

Çizelge 8.65 ANK_1 için \tilde{G}_{jt} alan vektörü

	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}	AK_{15}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
\tilde{G}_{1t}	(0.09,0.86,0.05)	(0.06,0.90,0.04)	(0.14,0.79,0.07)	(0.10,0.84,0.06)	(0.10,0.85,0.05)

Çizelge 8.66 ANK_2 için \tilde{G}_{jt} alan vektörü

	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
\tilde{G}_{2t}	(0.20,0.70,0.10)	(0.11,0.84,0.05)	(0.07,0.88,0.05)	(0.07,0.88,0.05)

Çizelge 8.67 ANK_3 için \tilde{G}_{jt} alan vektörü

	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
\tilde{G}_{3t}	(0.20,0.70,0.10)	(0.21,0.70,0.09)	(0.12,0.81,0.07)	(0.17,0.75,0.08)

Çizelge 8.68 ANK_4 için \tilde{G}_{jt} alan vektörü

	AK_{11}	AK_{12}
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
\tilde{G}_{4t}	(0.26,0.63,0.11)	(0.24,0.65,0.11)

Adım 19. Uzaklık Matrisini Oluştur ve Sınır Yaklaşım Alanını Tanımla.

Eşitlik (7.29) kullanılarak $[U]$ matrisleri oluşturulur.

Çizelge 8.69 ANK_1 için $[U]$ matrisi

	AK_{11}	AK_{12}	AK_{13}	AK_{14}	AK_{15}
ANK_1	u_{i11}	u_{i12}	u_{i13}	u_{i14}	u_{i15}
HT_1	-0.04	-0.02	-0.03	-0.02	-0.04
HT_2	-0.02	0.00	0.02	0.03	-0.02
HT_3	-0.05	-0.04	-0.06	-0.04	-0.06
HT_4	-0.03	-0.02	-0.02	-0.01	-0.04
HT_5	-0.02	-0.01	-0.07	-0.05	-0.03
HT_6	0.03	0.04	0.01	0.01	0.06
HT_7	0.03	-0.02	0.09	0.06	0.03
HT_8	0.02	0.01	-0.02	-0.02	0.04
HT_9	0.09	0.02	0.09	0.06	0.02

Çizelge 8.70 ANK_2 için $[U]$ matrisi

	AK_{21}	AK_{22}	AK_{23}	AK_{24}
ANK_2	u_{i21}	u_{i22}	u_{i23}	u_{i24}
HT_1	-0.07	-0.04	-0.03	-0.04
HT_2	0.01	0.01	0.00	-0.01
HT_3	-0.10	-0.05	-0.04	-0.05
HT_4	-0.04	-0.03	-0.02	-0.02
HT_5	-0.06	-0.03	-0.01	-0.02
HT_6	0.05	0.05	0.05	0.05
HT_7	0.05	0.02	0.00	0.00
HT_8	0.04	0.02	0.03	0.05
HT_9	0.09	0.03	0.02	0.03

Çizelge 8.71 ANK_3 için $[U]$ matrisi

	AK_{31}	AK_{32}	AK_{33}	AK_{34}
ANK_3	u_{i31}	u_{i32}	u_{i33}	u_{i34}
HT_1	-0.05	-0.06	-0.02	-0.04

Çizelge 8.71 devam ediyor

HT_2	-0.00	-0.01	0.02	0.01
HT_3	-0.09	-0.09	-0.04	-0.08
HT_4	-0.03	-0.04	0.01	-0.03
HT_5	-0.06	-0.05	-0.03	-0.05
HT_6	0.05	0.08	0.06	0.07
HT_7	0.08	0.07	0.06	0.08
HT_8	0.01	0.01	-0.04	0.00
HT_9	0.07	0.05	-0.02	0.02

Çizelge 8.72 ANK_4 için $[U]$ matrisi

ANK_4	AK_{41}	AK_{42}
	u_{i41}	u_{i42}
HT_1	-0.06	-0.06
HT_2	0.01	0.01
HT_3	-0.11	-0.10
HT_4	-0.05	-0.05
HT_5	-0.06	-0.07
HT_6	0.10	0.08
HT_7	0.10	0.11
HT_8	-0.01	-0.03
HT_9	0.05	0.08

Adım 20. Alternatifleri Sırala.

Eşitlik (7.31) kullanılarak yakınlık katsayısı CC_i hesaplanır. Buna ilişkin değerler Çizelge (8.73)'te verilmiştir.

Çizelge 8.73 CC_i değerleri

	CC_i	Sıralama
HT_1	-0,625	8
HT_2	0,057	5

Çizelge 8.74 devam ediyor

<i>HT</i> ₃	-0,999	9
<i>HT</i> ₄	-0,442	6
<i>HT</i> ₅	-0,613	7
<i>HT</i> ₆	0,776	1
<i>HT</i> ₇	0,743	2
<i>HT</i> ₈	0,102	4
<i>HT</i> ₉	0,748	3

Üçüncü Aşama: En Önemli Alternatifi Gerçekçi Kısıtları Dikkate Alarak Belirle.

9 hata türü ikinci aşamada belirli ağırlıklarla önceliklendirilmiştir. Bu bilgiler ışığında gerçekçi kısıtları kullanarak öncelik verilmesi gereken alternatiflerin belirlenmesi hedeflenmiştir. Firmaya ait gerçekçi kısıtlar;

- Maliyet,
- Güvenlik düzeyi,
- ÇÖKV'den elde edilen hata türlerinin önceliklerini belirten ağırlıkları

Hedefler,

- Kullanılacak olan bütçenin en küçüklenmesi,
- Risk indeksinin en küçüklenmesidir.

Amaç fonksiyonu,

- Birinci model için üye olma derecelerinin en büyüklenmesini,
- İkinci model ise karar vericiler tarafından belirlenen hedeflerin toplam sapmalarının en küçüklenmesini içermektedir.

Karar değişkeni, önlenmesi gereken hata türünü belirten sıfır-bir tam sayılı karar değişkenini ifade eder.

Maliyet: Hata türlerinin önlenmesi için işletme finansal imkanlar dahilinde belirli bir miktarda bütçe tahsis edebilmektedir. Problem çerçevesinde ilgilenilen firma riskleri önlemek için yaklaşık 50000 TL kaynak ayırabileceğini ifade etmiştir.

Güvenlik düzeyi: Hata türlerinin önlemdikten sonra mevcut sistemde oluşabilecek güvenlik düzeyini gösteren bir parametredir. Güvenlik düzeyinin kabul edilebilir düzey altında olmaması istenir. Çalışılan firma önlenecek olan hata türleri ile güvenlik düzeyinin yaklaşık %80 olmasını istemektedir.

ÇÖKV'den Elde Edilen ve Hata Türlerinin Önceliklerini Belirten Ağırlıklara İlişkin Hedef: Hata türüne ait ağırlığın ön plana çıktığı tamamlayıcı kısıttır. ÇÖKV'nin verdiği sonuçtan olan sapmanın minimize edilmesidir.

Edinilen bu bilgiler doğrultusunda gerçekçi kısıtların net olarak bilinmemesi ve bilgileri veren kişilerin de verdiği bilgiye ilişkin tereddütlerinin olması nedeni ile sezgisel bulanık modeller kurulmuştur.

Modellemede her bir alternatif ortaya çıktığında oluşan maliyet ve güvenlik düzeyleri Eşitlik (5.27) kullanılarak durulaştırılmıştır.

Birinci Model

Geliştirilen birinci model çözüldüğünde; x_6 , x_7 ve x_9 olarak belirlenen hata türlerinin önlenmesi gerektiği sonucuna varılır. Diğer bir deyişle, gürültülü montaj alanı (A_6), titreşime maruziyet (A_8) ve tanımlanmamış malzeme transfer yollarının (A_9) öncelikli olarak ele alınması gereken hata türleri olduğu tespit edilmiştir.

İkinci Model

Geliştirilen ikinci model çözüldüğünde; x_3 , x_5 , x_6 ve x_7 olarak ifade edilen hata türlerinin önlenmesi gerektiği sonucuna varılır. Diğer bir deyişle, ağır yüklerin elle taşınması (A_3), yıpranmış el aletlerin kullanılması (A_5), gürültülü montaj alanı (A_6) ve aydınlatma yetersizliği (A_7) öncelikli olarak ele alınması gereken hata türleri olduğu tespit edilmiştir

9. SONUÇ VE ÖNERİLER

Geliştirilen yaklaşım klasik risk değerlendirme yaklaşımlarına göre daha detaylı analiz imkanı sağlamaktadır. Risk üzerinde etkili olduğu düşünülen çevresel faktörler, yönetsel faktörler, risk yapısına ilişkin faktörler ve maliyet olmak üzere dört ana faktör belirlenmiş ve bu ana kriterler 15 alt faktöre bölünmüştür. Söz konusu ana ve alt faktörlere ilişkin önem ağırlıkları belirlenirken bunlara arasındaki risk yaratma derecesi açısından benzerlikler dikkate alınmıştır.

Hata önceliklendirilmesi için ise mevcut bir hatanın başka hataları da ortaya çıkarabileceği durumu göz önüne alınarak hata türleri arasındaki etkileşim değerlendirme sürecine katılmıştır. Bir çok ÇÖKV tekniğine göre üstünlüğü kanıtlanmış yeni bir yaklaşım olan MABAC yöntemi hata türleri arasındaki etkileşimin dikkate alınması ve genişletilmiş hausdorff uzaklık ölçütünün kullanılmasıyla geliştirilmiş ve daha hassas sıralama sonuçları elde edilmiştir. Sıralama sonucunda gürültülü montaj alanı (A_6), montaj alanındaki aydınlatmanın yetersizliği (A_7), tanımlanmamış malzeme transfer yolları (A_9) ve titreşime maruziyet (A_8), önceliklendirilirken; gerçekçi kısıtlar dikkate alınarak sezgisel bulanık modellerle değerlendirme yapıldığında birinci modelde gürültülü montaj alanı (A_6), titreşime maruziyet (A_8) ve tanımlanmamış malzeme transfer yolları (A_9) öncelikli olarak ele alınması gereken hata türleri olduğu tespit edilmiştir. İkinci modelde ise ağır yüklerin elle taşınması (A_3), yıpranmış el aletlerin kullanılması (A_5), gürültülü montaj alanı (A_6) ve aydınlatma yetersizliği (A_7) öncelikli olarak ele alınması gereken hata türleri olduğu sonucuna varılmıştır. Her iki modelin sonuçlarına bakıldığında gerçekçi kısıtlar dahil edildiğinde ilk modelin daha uygun sonuçlar verdiği değerlendirilmektedir.

İleride yapılacak olan çalışmalarda farklı gerçekçi kısıtlar sürece dahil edilebilir veya farklı ÇÖKV yöntemleri kullanılabilir.

KAYNAKLAR LİSTESİ

- [1] Özlüoç, Ö., “Büyük endüstriyel kazaları önleme çalışmalarında kritik sistemlerin tespiti ve risk değerlendirme yaklaşım ve yöntemleri”, Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı Bildirisi, Ankara, 22-24 (2009).
- [2] Stamatis D. H., Failure mode and effects analysis: FMEA *from theory to execution*, 2nd ed., ASQC Quality Press, Wisconsin, 2003.
- [3] MIL-STD-1629, 1974, Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis, Navalship Engineering Center, Washington.
- [4] Ford Motor Company, 1988. Potential Failure Mode and Effects Analysis in Design (Design FMECA) and For Manufacturing and Assembly Process (Process FMECA) Instruction Manual. Internal Report –Detroit, USA.
- [5] Güranlı,G.E., Müngen,U., 2006, Bulanık kümeler ile inşaatlarda yeni bir iş güvenliği risk analizi yöntemi, İTÜ Dergisi Mühendislik, 5 (4), 83-94.
- [6] Çakıroğlu, N., 2007, İş Sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemi Kapsamında Risk Analizi, Denetim ve Bir Firma Uygulaması ,Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü,Yüksel Lisans Tezi, İzmir, 123 s.
- [7] Stamatis, D. H., “Failure mode and effects analysis – FMEA from theory to execution”, ASQC Quality Pres, Wisconsin, 28-34 (2003).
- [8] Özkılıç, Ö., Tehlike ve risk kavramları – terminoloji, 5. Uluslararası iş sağlığı ve güvenliği bölgesel konferansı, Sözel bildiri ,İstanbul,2008 http://212.175.131.61/www.isggm.gov.tr/htdocs/article.php?article_id=209 (Erişim tarihi:Haziran 2011)
- [9] WHO The World Health Report (2002) Reducing risks, Promoting Healthy Life, France.
- [10] 5 Adımda Risk Değerlendirmesi, 2007, Çalışma ve sosyal Güvenlik Bakanlığı Yayınları, Genel Yayın No:140, Ankara, 30 s.
- [11] Okuyama, Y., Chang, S.E.,Introduction, pp. 1-10. İn: Modeling Spatial Economic Impacts of Disasters,(Okuyama,Y., Chang, S.E.) , Springer Verlag, Berlin.
- [12] Coburn, A., Spence, R. (1992) Earthquake Protection, London, Wiley.
- [13] Çağırgan, Meriç, (1997), Risk Yönetimi, İstanbul Üniv. Sos. Bil. Enst. Yayınlanmamış Y.Lisans Tezi, İstanbul.
- [14] Gedikli, F.G., 2008, Risk değerlendirme sürecindeki yaygın hatalar (OSHA Yayınının çevirisi), İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi, Sayı 38, 10-17.
- [15] Chang KH (2009) Evaluate the orderings of risk for failure problems using a more general RPN methodology. Microelectron Reliab 49(12):1586–1596.
- [16] Wang M. (2011). A Cost-Based FMEA Decision Tool for Product Quality Design and Management, Sf. 297-302.

- [17] YILMAZ, A., Hata Türü ve Etkileri Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, sf.1-60, İstanbul, 1997.
- [18] BİLGİN, M., Tasarımda Kalite ve FMEA Metodu, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, sf. 1- 61, 1994.
- [19] KARA-ZAITRI, C., KELLER, A., FLEMING, P., A Smart Failure Mode and Effect Analysis Package, Proc. Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp. 414-421, 1992.
- [20] Taşan, K.,2006, Bir Risk Değerlendirme Ve Güvenirlilik Metodu Olarak Hata Türü Ve Etkileri Analizi (HTEA) Yöntemi :Bir Otomotiv Yan Sanayi İşletmesinde Uygulanması Dokuz Eylül Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü Yüksek Lisans Tezi, İzmir, 186 s.
- [21] YILMAZ, A., Hata Türü ve Etkileri Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, sf.1-60, İstanbul, 1997.
- [22] ÖZKILIÇ, Ö., İş sağlığı ve Güvenliği Yönetim Sistemleri ve Risk Değerlendirme Metodolojileri, Ajans-Türk Basın ve Basım A.Ş., sf.36-71, Ankara, 2005.
- [23] WANG, Y.-M., CHIN, K.S., POON, G., YANG, J., Risk Evaluation İn Failure Mode and Effect Analysis Using Fuzzy Weighted Geometric Mean, Expert SystemWith Applications, Volume 36, pp. 1-13, 2009.
- [24] Erginel N. M., Tasarım hata türü ve etkileri analizinin etkinliği için bir model ve uygulaması, *Endüstri Mühendisliği Dergisi*, 1999, **3**, 17- 26.
- [25] VDA, (1996), Quality Management in the Automotive Industry, Quality Assurance Before Series Production, 4(2): 5.
- [26] Schiegg, H., vd., Early, İn-Process FMEA Application, *Qualitätzyverlassigkeit*, 44(7): 879-882,884.
- [27] Vollrath, M. (2000), FMEA requieres Methodical Know-How And Support By The Management, *Qualität und Zuverlässigkeit*, 46(1):65-68.
- [28] Kaiser Permanente “FMEA team instruction guide”, 47-56 (2002).
- [29] Chang CL, Wei CC, Lee YH (1999) Failure mode and effects analysis using fuzzy method and grey theory. *Kybernetes* 28(9):1072–1080.
- [30] Braglia M (2000) MAFMA: Multi-attribute failure mode analysis. *Int J Qual Reliab Manage*, 17(9):1017–1033.
- [31] Chang CL, Liu PH, Wei CC (2001) Failure mode and effects analysis using grey theory. *Integr Manuf Syst* 12(3):211–216.
- [32] Braglia M, Frosolini M, Montanari R (2003) Fuzzy TOPSIS approach for failure mode, effects and criticality analysis. *Qual Reliab Eng Int* 19(5):425–443.
- [33] Seyed-Hosseini SM, Safaei N, Asgharpour MJ (2006) Reprioritization of failures in a system failure mode and effects analysis by decision making trial

and evaluation laboratory technique, *Reliability Engineering & System Safety* 91(8):872–881.

- [34] Sachdeva A, Kumar D, Kumar P (2009) Multi-factor failure mode critically analysis using TOPSIS. *J Indus Eng Int* 5(8):1–9.
- [35] Chang K, Cheng C, ve Chang Y. (2010), Reprioritization of failures in a silane supply system using an intuitionistic fuzzy set ranking technique, *Soft Comput* (2010) 14:285–298.
- [36] Carmignani G (2009) An integrated structural framework to cost-based FMECA: the priority-cost FMECA. *Reliab Eng Syst Saf* 94(4):861–871.
- [37] Hu AH, Hsu CW, Kuo TC, Wu WC (2009) Risk evaluation of green components to hazardous substance using FMEA and FAHP. *Expert Syst Appl* 36(3):7142–7147.
- [38] Chang KH, Cheng CH (2010) A risk assessment methodology using intuitionistic fuzzy set in FMEA. *Int J Syst Sci* 41(12):1457–1471.
- [39] Abdelgawad M, Fayek AR (2010) Risk management in the construction industry using combined fuzzy FMEA and fuzzy AHP. *J Constr Eng Manage* 136(9):1028–1036.
- [40] Chang KH, Cheng CH (2011) Evaluating the risk of failure using the fuzzy OWA and DEMATEL method. *J Intell Manuf* 22(2):113–129.
- [41] Geum Y, Cho Y, Park Y (2011) A systematic approach for diagnosing service failure: service-specific FMEA and grey relational analysis approach. *Math Comput Model* 54(11–12):3126–3142.
- [42] Zammori F, Gabbrielli R (2011) ANP/RPN: A multi criteria evaluation of the risk priority number. *Qual Reliab Eng Int* 28(1):85–104.
- [43] Li Y, Deng Y, Kang B (2012) A risk assessment methodology based on evaluation of group intuitionistic fuzzy set. *J Inf Comput Sci* 9(7):1855–1862.
- [44] Kutlu AC, Ekmekçioğlu M (2012) Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Syst Appl* 39(1):61–67.
- [45] Liu HC, Liu L, Liu N, Mao LX (2012) Risk evaluation in failure mode and effects analysis with extended VIKOR method under fuzzy environment. *Expert Syst Appl* 39(17):12926–12934.
- [46] Ekmekçioğlu M, Kutlu AC (2012) A fuzzy hybrid approach for fuzzy process FMEA: an application to a spindle manufacturing process. *Int J Comput Intell Syst* 5(4):611–626.
- [47] Chang KH, Chang YC, Tsai IT (2013) Enhancing FMEA assessment by integrating grey relational analysis and the decision making trial and evaluation laboratory approach. *Eng Fail Anal* 31:211–224.

- [48] Song W, Ming X, Wu Z, Zhu B (2013) Failure modes and effects analysis using integrated weight-based fuzzy TOPSIS. *Int J Comput Integr Manuf* 26(12):1172–1186.
- [49] Hsu CW, Lee WH, Chao B (2013) Materiality analysis model in sustainability reporting—a case study at Lite-On Technology Company. *J Clean Prod* 57:142–151.
- [50] Liu HC, Fan XJ, Li P, Chen YZ (2014a) Evaluating the risk of failure modes with extended MULTIMOORA method under fuzzy environment. *Eng Appl Artif Intell* 34:168–177.
- [51] Liu HC, Liu L, Li P (2014b) Failure mode and effects analysis using intuitionistic fuzzy hybrid weighted Euclidean distance operator. *Int J Syst Sci* 45(10):2012–2030.
- [52] Liu HC, You JX, You XY (2014c) Evaluating the risk of healthcare failure modes using interval 2-tuple hybrid weighted distance measure. *Comput Ind Eng* 78:249–258.
- [53] Chang KH, Chang YC, Lee YT (2014) Integrating TOPSIS and DEMATEL methods to rank the risk of failure of FMEA. *Int J Inf Technol Decis Making* 13(6):1229–1257.
- [54] Helvacioğlu S, Ozen E (2014) Fuzzy based failure modes and effect analysis for yacht system design. *Ocean Eng* 79:131–141.
- [55] Song W, Ming X, Wu Z, Zhu B (2014) A rough TOPSIS approach for failure mode and effects analysis in uncertain environments. *Qual Reliab Eng Int* 30(4):473–486.
- [56] Ilangkumaran M, Shanmugam P, Sakthivel G, Visagavel K (2014) Failure mode and effect analysis using fuzzy analytic hierarchy process. *Int J Prod Quality Manage* 14(3):296–313.
- [57] Adhikary DD, Bose GK, Bose D, Mitra S (2014) Multi criteria FMECA for coal-fired thermal power plants using COPRAS-G. *Int J Qual Reliab Manage* 31(5):601–614.
- [58] Du Y, Mo H, Deng X, Sadiq R, Deng Y (2014) A new method in failure mode and effects analysis based on evidential reasoning. *Int J Syst Assur Eng Manage* 5(1):1–10.
- [59] Chang KH (2014) A more general risk assessment methodology using a soft set-based ranking technique. *Soft Comput* 18(1):169–183.
- [60] Liu HC, Li P, You JX, Chen YZ (2015a) A novel approach for FMEA: Combination of interval 2-tuple linguistic variables and grey relational analysis. *Qual Reliab Eng Int* 31(5):761–772.
- [61] Liu HC, You JX, Ding XF, Su Q (2015b) Improving risk evaluation in FMEA with a hybrid multiple criteria decision making method. *Int J Qual Reliab Manage* 32(7):763–782.

- [62] Liu HC, You JX, Shan MM, Shao LN (2015c) Failure mode and effects analysis using intuitionistic fuzzy hybrid TOPSIS approach. *Soft Comput* 19(4):1085–1098.
- [63] Liu HC, You JX, You XY, Shan MM (2015d) A novel approach for failure mode and effects analysis using combination weighting and fuzzy VIKOR method. *Appl Soft Comput* 28:579–588.
- [64] Liu HC, You JX, Lin QL, Li H (2015e) Risk assessment in system FMEA combining fuzzy weighted average with fuzzy decision making trial and evaluation laboratory. *Int J Comput Integr Manuf* 28(7):701–714.
- [65] Emovon I, Norman RA, MA J, Pazouki K (2015) An integrated multicriteria decision making methodology using compromise solution methods for prioritising risk of marine machinery systems. *Ocean Eng* 105:92–103.
- [66] Chang KH (2015) A novel general risk assessment method using the soft TOPSIS approach. *J Ind Prod Eng* 32(6):408–421.
- [67] Vahdani B, Salimi M, Charkhchian M (2015) A new FMEA method by integrating fuzzy belief structure and TOPSIS to improve risk evaluation process. *Int J Adv Manuf Technol* 77(1):357–368.
- [68] Wang L , Liu H ve Quan M (2016), Evaluating the risk of failure modes with a hybrid MCDM model under interval-valued intuitionistic fuzzy environments, *Computers & Industrial Engineering* 102 (2016) 175–185.
- [69] Safari H, Faraji Z, Majidian S (2016) Identifying and evaluating enterprise architecture risks using FMEA and fuzzy VIKOR. *J Intell Manuf* 27(2):475–486.
- [70] Chang KH (2016) Generalized multi-attribute failure mode analysis. *Neurocomputing* 175:90–100.
- [71] Zhao H, You JX, Liu HC (2016) Failure mode and effect analysis using MULTIMOORA method with continuous weighted entropy under interval-valued intuitionistic fuzzy environment. *Soft Comput*. doi:10.1007/s00500-016-2118-x
- [72] Wang X, Zhang Y, Shen G (2016) An improved FMECA for feed system of CNC machining center based on ICR and DEMATEL method. *Int J Adv Manuf Technol* 83:43–54.
- [73] Pamucar D.,ve Cirovic G., The selection of transport and handling resources in logistics centers using Multi-Attributive Border Approximation area Comparison (MABAC), *Expert Systems with Applications* 42 (2015) 3016–3028.
- [74] Božanić DI., Pamučar DS., Karović SM (2016), Use Of The Fuzzy Ahp – Mabac Hybrid Model In Ranking Potential Locations For Preparing Laying-Up Positions, *Vojnotehnički Glasnik / Military Technical Courier*, 2016., Vol 64, No 3.

- [75] Cao Y., Zhou H. ve Wang J.(2016), An approach to interval-valued intuitionistic stochastic multi-criteria decision-making using set pair analysis, *Int. J. Mach. Learn. & Cyber.* DOI 10.1007/s13042-016-0589-9.
- [76] Xue Y., You J., Lai X. ve Liu H.(2016), An interval-valued intuitionistic fuzzy MABAC approach for materialselection with incomplete weight information, *Applied Soft Computing* 38 (2016) 703–713.
- [77] Peng X., Yang Y.(2016), Pythagorean Fuzzy Choquet Integral Based MABAC Method for Multiple Attribute Group Decision Making, *International Journal Of Intelligent Systems*, Vol. 31, 989–1020.
- [78] Zadeh, L. A., "Fuzzy sets", *Information and Control*, 8: 338-53 (1965).
- [79] Atanassov, K., "Intuitionistic fuzzy sets", *Fuzzy Sets and Systems*, 20: 87-96 (1986).
- [80] Bustince, H. And Burillo, P., "Vague sets are intuitionistic fuzzy sets", *Fuzzy Sets and Systems*, 79: 403-405 (1996).
- [81] Internet : Detyniecki, M., "Fundamentals on Aggregation Operators" <http://www.spatial.maine.edu/%7Eworboys/SIE565/papers/aggregation%20operators.pdf> (2009).
- [82] Xu, Z.S., and Yager, R.R., "Some geometric aggregation operators based on intuitionistic fuzzy sets", *International Journal of General Systems*, 35(4): 417-433 (2006).
- [83] Xu, Z.H., "Intuitionistic fuzzy aggregation operators", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15(6): 1179-1187 (2007).
- [84] Boran F. E., Genç S., Kurt M., Akay D., A multi-criteria intuitionistic fuzzy group decision making for supplier selection with TOPSIS method, *Expert Systems with Applications* 36 (2009) 11363–11368.
- [85] H.-J. Zimmermann, *Fuzzy mathematical programming*, *Comput. Oper. Res.* 10 (1983) 291 298.
- [86] J. Kacprzyk, A generalization of fuzzy multistage decision making and control via linguistic quantifiers, *Internat. J. Control* 38 (1983) 1249-1270.
- [87] H. Rommelfanger, Inequality relations in fuzzy constraints and its use in linear fuzzy optimization, in: J.L. Verdegay and M. Delgado, Eds., *The Inte@we Between Artificial Intelligence and Operational Research in Fuzz), Environment* (Verlag TUV, Rheinland, Koln, 1989) 195-211.
- [88] H. Tanaka and K. Asai, Fuzzy linear programming problems with fuzzy numbers, *Fuzz)' Sets and Systems* 13 (1984) I 10.
- [89] K. Atanassov, Ideas for intuitionistic fuzzy sets equations, inequalities and optimization, *Notes oll Intuitionistie Fuzzy Sets I* (1995) 17 24.
- [90] Plamen P. Angelov, Optimization in an intuitionistic fuzzy environment, *Fuzzy Sets and Systems* 86 (1997) 299-306.

- [91] Pramanik S. ve Roy T.K. (2005), An Intuitionistic Fuzzy Goal Programming Approach to Vector Optimization Problem, NIFS11 (2005), 5, 1-14.
- [92] Chakraborty D., Jana DK. ve Roy TK., Arithmetic operations on generalized intuitionistic fuzzy number and its applications to transportation problem, OPSEARCH (Jul-Sep 2015) 52(3):431-471.
- [93] Dubey D., Chandra S. and Mehra A., Computing a Pareto-optimal solution for multi-objective flexible linear programming in a bipolar framework, International Journal of General Systems, 2015 Vol. 44, No. 4, 457-470.
- [94] Dey S and Roy TK, Intuitionistic Fuzzy Goal Programming Technique for Solving Non-Linear Multi-objective Structural Problem, Journal of Fuzzy Set Valued Analysis 2015 No.3 (2015) 179-193.
- [95] Abdullah L., ve Najib L., A new preference scale of intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process in multi-criteria decision making problems, Journal of Intelligent & Fuzzy Systems 26 (2014) 1039-1049.
- [96] Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process: Planning priority setting. New York: McGraw Hill.
- [97] Büyüközkan G., Güteryüz S., A new integrated intuitionistic fuzzy group decision making approach for product development partner selection, Computers & Industrial Engineering 102 (2016) 383-395.
- [98] Wei G., Some induced geometric aggregation operators with intuitionistic fuzzy information and their application to group decision making, Applied Soft Computing 10 (2010) 423-431.
- [99] Rajarajeswari P. ve Uma N., Correlation Measure For Intuitionistic Fuzzy Multi Sets, IJRET: International Journal of Research in Engineering and Technology, Volume: 03 Issue: 01.
- [100] Ye J., Fuzzy decision-making method based on the weighted correlation coefficient under intuitionistic fuzzy environment, European Journal of Operational Research 205 (2010) 202-204.
- [101] Aksakal E. ve Dağdeviren M. (2010), Anp Ve Dematel Yöntemleri İle Personel Seçimi Problemine Bütünleşik Bir Yaklaşım, Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 25, No 4, 905-913.
- [102] Xuea Y., Youa J., Laic X. ve Liua H., An interval-valued intuitionistic fuzzy MABAC approach for materialselection with incomplete weight information, Applied Soft Computing 38 (2016) 703-713.
- [103] Yang Y. ve Chiclana F., Consistency of 2D and 3D Distances of Intuitionistic Fuzzy Sets. Expert Systems with Applications. 39(10), 8665-8670, August 2012. doi:10.1016/j.eswa.2012.01.199.
- [104] Kumar P. S. and Hussain R. J., Computationally simple approach for solving fully intuitionistic fuzzy real life transportation problems, Int J Syst Assur Eng Manag (December 2016) 7(Suppl. 1):S90-S101.

- [105] Karwowski W, Mital A. Potential applications of fuzzy sets in industrial safety engineering. *Fuzzy Sets Syst.* 1986;19:105–120.
- [106] Pamela McCauley-Bell MS, Badiru AB. A fuzzy linguistics model for job related injury risk assessment. *Comput Ind Eng.* 1992;23(1–4):209–212.
- [107] Grassi A, Gamberini R, Mora C, et al. A fuzzy multiattribute model for risk evaluation in workplaces. *Saf Sci.* 2009;47(5):707–716.
- [108] Jeong K-S, Lee K-W, Lim H-K. Risk assessment on hazards for decommissioning safety of a nuclear facility. *Ann Nucl Energy.* 2010;37(12):1751–1762.
- [109] Marhavilas PK, Koulouriotis D, Gemeni V. 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. *J Loss Prev Process Ind.* 2011;24(5):477–523. doi:10.1016/j.jlp.2011.03.004.
- [110] Beriha GS, Patnaik B, Mahapatra SS, et al. Assessment of safety performance in Indian industries using fuzzy approach. *Expert Syst Appl.* 2012;39(3):3311–3323.
- [111] Gürçanlı GE, Müngen U. An occupational safety risk analysis method at construction sites using fuzzy sets. *Int J Ind Ergon.* 2009;39(2):371–387.

EKLER LİSTESİ

Ek 1: KV_1 için oluşturulan etki matrisi $[\tilde{Y}_k]$ matrisi aşağıda verilmiştir.

KV_1 için oluşturulan etki matrisi

	HT_1	HT_2	HT_3	HT_4	HT_5	HT_6	HT_7	HT_8	HT_9
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.10,0.80,0.10)	(0.50,0.40,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.75,0.20,0.05)	(0.50,0.40,0.10)	(0.90,0.05,0.25)
HT_2	(0.50,0.40,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.50,0.40,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.75,0.20,0.05)	(0.10,0.80,0.10)	(0.75,0.20,0.05)
HT_3	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.25,0.60,0.15)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.75,0.20,0.05)	(0.50,0.40,0.10)
HT_4	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.50,0.40,0.10)	(0.90,0.05,0.25)	(0.50,0.40,0.10)	(0.75,0.20,0.05)
HT_5	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.25,0.60,0.15)	(0.90,0.05,0.25)	(0.10,0.80,0.10)
HT_6	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.25,0.60,0.15)
HT_7	(0.25,0.60,0.15)	(0.25,0.60,0.15)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.25,0.60,0.15)
HT_8	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.50,0.40,0.10)	(0.75,0.20,0.05)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)
HT_9	(0.50,0.40,0.10)	(0.75,0.20,0.05)	(0.90,0.05,0.25)	(0.25,0.60,0.15)	(0.25,0.60,0.15)	(0.50,0.40,0.10)	(0.75,0.20,0.05)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)

Ek 2: Birleştirilmiş Etki Matrisi $[\tilde{Y}]$ matrisi aşağıda verilmiştir.

$[\tilde{Y}]$ matrisi

	HT_1	HT_2	HT_3	HT_4	HT_5	HT_6	HT_7	HT_8	HT_9
	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)	(μ, ν, π)
HT_1	(0.10,0.80,0.10)	(0.37,0.50,0.13)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.19,0.68,0.13)	(0.38,0.49,0.13)	(0.60,0.32,0.08)	(0.50,0.40,0.10)	(0.84,0.10,0.06)
HT_2	(0.40,0.48,0.12)	(0.10,0.80,0.10)	(0.32,0.54,0.14)	(0.19,0.68,0.13)	(0.27,0.61,0.12)	(0.38,0.49,0.13)	(0.75,0.20,0.05)	(0.21,0.65,0.14)	(0.80,0.14,0.06)
HT_3	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.32,0.58,0.10)	(0.28,0.60,0.12)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.72,0.21,0.07)	(0.60,0.29,0.11)
HT_4	(0.23,0.66,0.12)	(0.21,0.66,0.13)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.32,0.56,0.12)	(0.55,0.36,0.09)	(0.76,0.17,0.07)	(0.29,0.58,0.13)	(0.59,0.33,0.08)
HT_5	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.14,0.74,0.12)	(0.17,0.71,0.12)	(0.10,0.80,0.10)	(0.59,0.33,0.08)	(0.14,0.74,0.12)	(0.83,0.11,0.06)	(0.23,0.67,0.10)
HT_6	(0.17,0.71,0.12)	(0.37,0.50,0.13)	(0.10,0.80,0.10)	(0.27,0.61,0.12)	(0.15,0.73,0.12)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.35,0.54,0.11)	(0.19,0.68,0.13)
HT_7	(0.21,0.65,0.14)	(0.62,0.27,0.11)	(0.13,0.76,0.11)	(0.26,0.62,0.12)	(0.19,0.68,0.13)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.60,0.32,0.08)
HT_8	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.56,0.35,0.09)	(0.87,0.07,0.06)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)
HT_9	(0.67,0.23,0.10)	(0.80,0.14,0.06)	(0.60,0.29,0.11)	(0.79,0.16,0.05)	(0.19,0.68,0.13)	(0.30,0.57,0.13)	(0.85,0.09,0.06)	(0.10,0.80,0.10)	(0.10,0.80,0.10)