

**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**SAVUNMA VE HAVACILIK SANAYİSİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ
KARAR VERME TEMELLİ YENİ BİR PROSES TİPİ HATA TÜRÜ
VE ETKİLERİ ANALİZİ YAKLAŞIMININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

TUĞÇE USLU

ANKARA - 2020



**BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ENDÜSTRİ MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI**

**SAVUNMA VE HAVACILIK SANAYİSİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ
KARAR VERME TEMELLİ YENİ BİR PROSES TİPİ HATA TÜRÜ
VE ETKİLERİ ANALİZİ YAKLAŞIMININ GELİŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HAZIRLAYAN

TUĞÇE USLU

TEZ DANIŞMANI

DOÇ. DR. GÜLİN FERYAL CAN

ANKARA - 2020

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı çerçevesinde Tuğçe Uslu tarafından hazırlanan bu çalışma, aşağıdaki jüri tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Savunma Tarihi: 23/01/2020

Tez Adı: Savunma ve Havacılık Sanayisi için Çok Kriterli Karar Verme Temelli Yeni Bir Proses Tipi Hata Türü ve Etkileri Analizi Yaklaşımının Geliştirilmesi

Tez Jüri Üyeleri (Ünvanı, Adı - Soyadı, Kurumu)	İmza
Doç.Dr.Babek ERDEBİLLİ
Doç.Dr.Gülin Feryal CAN
Dr.Öğr.Üyesi Pelin TOKTAŞ

ONAY

Prof. Dr. Ömer Faruk ELALDI
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

Tarih: ... / ... /

BAŞKENT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ
YÜKSEK LİSANS TEZ ÇALIŞMASI ORJİNALLİK RAPORU

Tarih: ... / ... / 20...

Öğrencinin Adı, Soyadı : Tuğçe USLU

Öğrencinin Numarası : 21420215

Anabilim Dalı : Endüstri Mühendisliği

Programı : Endüstri Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

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

Tez Başlığı : Savunma ve Havacılık Sanayisi için Çok Kriterli Karar Verme Temelli

Yeni Bir Proses Tipi Hata Türü ve Etkileri Analizi Yaklaşımının Geliştirilmesi

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

Uygulanan filtrelemeler:

1. Kaynakça hariç
2. Alıntılar hariç
3. Beş (5) kelimeden 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

... / ... / 20...

Öğrenci Danışmanı Ünvan, Adı, Soyadı,
Doç.Dr.Gülin Feryal CAN

TEŐEKKÜR

Tez danışmanım, Sayın Doç. Dr. Gülin Feyal CAN'a, çalıőmam süresince yol gösterdiği, mesai saati gözetmeksizin destek ve önerilerini esirgemediği ve çalıőmaya olan inancıyla manevi desteğini her zaman hissettirdiği için, iten teőekkürlerimi sunarım.

Küçükpazarlı Havacılık firması, Kalite Güvence Müdürü Sayın Halis TEKGÖZ'e ve Sertifikasyon Kalite Yönetim Sistemi Sorumlusu Sayın Aylin ŐENGÜL'e, firmayla ortak gerçekleştirilen çalışmada yol gösterdikleri ve veri sağlama konusunda ki yardımlarından dolayı teőekkür ederim.

Son olarak, Annem Burcu USLU'ya her zaman yanımda olduğu ve manevi desteğini esirgemediği için Őukranlarımı sunarım.

ÖZET

Tuğçe USLU

SAVUNMA VE HAVACILIK SANAYİSİ İÇİN ÇOK KRİTERLİ KARAR VERME TEMELLİ YENİ BİR PROSES TİPİ HATA TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİ YAKLAŞIMININ GELİŞTİRİLMESİ

Başkent Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı

2020

Savunma ve havacılık sanayisi, ülkelerin politik ve askeri gücünü belirleyen, ticari değeri yüksek bir sektördür. Türkiye'nin jeopolitik konumu; doğal kaynaklarının korunması ve terör faaliyetlerinin önlenmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Ayrıca sektörde imal edilen ürünler, yüksek teknoloji ve hassasiyette üretim gerektirmekte, bu gereklilikte ürünlerin ticari değerini arttırmaktadır. Bu sebepler nedeniyle, tez çalışmasında ülkemiz için yüksek önem arz eden savunma ve havacılık sanayisine yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir.

Savunma ve havacılık sanayisinde mevcut ve potansiyel proses temelli hataların tespit edilmesi büyük önem taşımaktadır. Çünkü, bu sektörde üretilen ürünler genellikle ülkelerin savunma ve hava taşımacılığını gerçekleştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Söz konusu ürünlerin odak noktası insan olduğu için, herhangi bir hatanın ortaya çıkması mümkün olduğunca erken bir aşamada engellenmelidir. Bunu gerçekleştirmek için sektöre özgü, etkin hata tanımlama ve önleme yaklaşımlarının geliştirilmesi gerekmektedir.

Literatürde en çok kullanılan yöntemlerden biri olan Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), güçlü bir risk analizi yöntemidir ancak geliştirilmesi gereken yönleri de bulunmaktadır. Buna göre çalışmada, geleneksel HTEA'da dikkate alınan kısıtlı sayıdaki risk kriterleri, savunma ve havacılık sektörü gereklilikleri kapsamında genişletilmiştir. Geliştirilen yaklaşım ile; risk kriterleri, birbirleri arasındaki ilişkiler dikkate alınarak ağırlıklandırılmış ve buna göre hata türleri de, birbirleri arasındaki ilişkiler göz önünde bulundurularak, önlem önceliklerine göre sıralandırılmışlardır. Çözüm sürecine, birden fazla kriterin karar verme amacıyla dahil edilmesi nedeniyle, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) teknikleri kullanımının faydalı olacağı değerlendirilmiştir. Bu kapsamda

önerilen yaklaşımın ilk aşaması olan kriterlerin ağırlıklandırılması aşamasında; Entropi, Tercih Seçim İndeksi (Preference Selection Index-PSI) ve Kriterler arası Korelasyon Yoluyla Kriterlerin Önem Tespiti (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation-CRITIC) yöntemleri kullanılmıştır. Söz konusu üç farklı kriter ağırlıklandırma yönteminden elde edilen farklı kriter ağırlık sıralamaları önerilen geometrik ortalamaya dayalı birleştirme yaklaşımı ile tek bir kriter ağırlık sıralamasına dönüştürülmüştür. İkinci aşamada ise; Ortalama Çözüm Uzaklığına Göre Değerlendirme (Evaluation based on Distance from Average Solution-EDAS), Birleştirilebilir Uzaklık Tabanlı Değerlendirme (Combinative Distance-based Assessment-CODAS), Karmaşık Orantılı Değerlendirme (Complex Proportional Assessment-COPRAS) yöntemleri kullanılarak hata türleri önem önceliklerine göre sıralanmışlardır. Aynı şekilde, üç farklı alternatif sıralama yönteminden elde edilen farklı alternatif sıralamaları, Kesin Tercih Sıralama Tekniği (Technique of Precise Order-TPOP) yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Önerilen bütünleşik yaklaşım, savunma ve havacılık sanayisinde talaşlı imalat gerçekleştiren bir firmada uygulanmış ve alternatif sıralamaları, Spearman Sıralama Korelasyon Katsayısı kullanılarak tartışılmıştır.

ANAHTAR KELİMELER: HTEA, Savunma, Havacılık, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV), Entropi, CRITIC, EDAS, PSI, CODAS, COPRAS, TPOP.

ABSTRACT

Tuğçe USLU

**DEVELOPING A NEW PROCESS TYPE FAILURE MODES AND EFFECTS
ANALYSIS APPROACH FOR DEFENSE AND AEROSPACE INDUSTRY
BASED ON MULTI-CRITERIA DECISION MAKING**

Baskent University Institute of Science and Engineering

Department of Industrial Engineering

2020

The defense and aerospace industry is a sector which has high commercial value that determines the political and military power of countries. Turkey's geopolitical position; creates need of protection of natural resources and prevention of terrorist activities. In addition, products manufactured in this sector, require high technology and precision production. This situation increases the commercial value of the products. Because of these reasons, a study has been carried out for the defense and aviation industry which has high importance for our country.

In the defense and aerospace industry, it is important to identify existing and potential process based failures. Because the products produced in this industry are generally used for the defense and air transportation of the countries. Since the focus of these products is human, any error should be prevented early as much as possible. To achieve this, sector-specific, effective failure identification and prevention approaches are need to be developed.

One of the most widely used methods in the literature; Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) is a powerful risk analysis method, but there are also aspects that need to be developed. Accordingly, a limited number of risk criteria considered in the traditional FMEA have been extended to the requirements of the defense and aviation sector. With the developed approach; risk criteria were weighted by considering the relationships between each other and accordingly, the failures modes were ranked according to their priorities, considering the relationships between each other. Because of multiple criteria are considered in solution process for decision making, it was evaluated that implementing Multi-Criteria Decision Making (MCDM) techniques may be beneficial. In the weighting phase of the criteria, which is the first stage of the proposed

method; Entropy, Preference Selection Index (PSI) and Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC) methods were used. The different criteria weight rankings obtained from these three different criteria weighting methods were converted into a single weight rank with a proposed combining approach based on geometric mean. In the second stage; by performing Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS), Combinative Distance-based Assessment (CODAS) and Complex Proportional Assessment (COPRAS) methods, failure modes were ranked according to their priority. Similarly, different alternative rankings obtained from three different alternative ranking methods were combined by using the Technique of Precise Order (TPOP) method. The proposed method has been applied at a company which carrying out machining in the defense and aerospace industry, alternative rankings have been discussed by using the Spearman Ranking Correlation Coefficient method.

KEYWORDS: FMEA, Defence, Aerospace, MCDM, Entropy, CRITIC, EDAS, PSI, CODAS, COPRAS, TPOP.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET	i
ABSTRACT	iii
İÇİNDEKİLER	v
TABLolar LİSTESİ	vii
ŞEKİLLER LİSTESİ	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	x
1. GİRİŞ	1
1.1. Motivasyon	2
1.2. Literatür Araştırması	7
2. HATA TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİ (HTEA)	18
2.1. Hata Türü ve Etkileri Analizi'nin Sınıflandırılması	24
2.2. Proses Tipi Hata Türü ve Etkileri Analizi (P-HTEA)	25
2.3. Çok Kriterli Karar Verme-ÇKKV Yöntemleri (Multi Criteri Decision Making-MCDM Methods)	28
2.4. PSI Yöntemi	28
2.5. Entropi Yöntemi	30
2.6. CRITIC Yöntemi	31
2.7. EDAS Yöntemi	33
2.8. CODAS Yöntemi	36
2.9. COPRAS Yöntemi	38
2.10. TPOP Yöntemi	39
2.11. Spearman Sıralamalı Kolerelasyon Katsayısı	43
3. ÖNERİLEN YAKLAŞIMIN SAVUNMA VE HAVACILIK SANAYİSİNDE FAALİYET GÖSTEREN BİR FİRMADA UYGULANMASI	44
3.1. Problem Tanımı	44
3.2. Firma Tanıtımı	44
3.3. Önerilen Bütünleşik HTEA Yaklaşımı	45
3.4. Uygulama	46

3.4.1. Entropi-PSI-CRITIC yöntemleri kullanılarak önerilen bütünleşik ağırlıklandırma yöntemiyle kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesi.....	46
3.4.2. EDAS-CODAS-COPRAS yöntemleri ile alternatiflerin sıralanması ve TPOP kullanılarak nihai alternatif sıralamasının elde edilmesi.....	59
4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR.....	86
EKLER	
EK 1: Yöntemlere Göre HTEA Çalışma Sayısı	
EK 2: Görelî Değerler Matrisi [Ra]	

TABLolar LİSTESİ

	Sayfa
Tablo 2.1. Şiddet skalası.....	22
Tablo 2.2. Olasılık skalası.....	22
Tablo 2.3. Keşfedilebilirlik skalası.....	23
Tablo 3.1. Başlangıç karar matrisi.....	47
Tablo 3.2. Maliyet kriterleri için normalize değerler.....	49
Tablo 3.3. Normalize başlangıç karar matrisi	51
Tablo 3.4. Kriterlere ait E_j değerleri.....	52
Tablo 3.5. Her bir kritere ait d_j değerleri.....	52
Tablo 3.6. Her bir kritere ait w_j^{en} değerleri.....	53
Tablo 3.7. Normalize karar matrisi $[N]$	54
Tablo 3.8. Her bir kritere ait \bar{x}_j^* değerleri.....	55
Tablo 3.9. Her bir kritere ait PV_j değerleri.....	55
Tablo 3.10. Her kritere ait \emptyset_j değerleri.....	56
Tablo 3.11. Kriterlere ait w_j^p değerleri.....	56
Tablo 3.12. Kriterlere ait σ_j değerleri.....	57
Tablo 3.13. Kriterlere ait $Cov(jt)$ değerleri.....	57
Tablo 3.14. Kriterler için r_{jt} değerleri.....	58
Tablo 3.15. Kriterlere ait C_j değerleri.....	58
Tablo 3.16. Kriterlere ait w_j^c değerleri.....	59
Tablo 3.17. Kriterlere ait nihai w_j^c değerleri.....	59
Tablo 3.18. Ortalama değerler matrisi $[AV]$	60
Tablo 3.19. Ortalamadan pozitif uzaklık matrisi $[PDA]$	60
Tablo 3.20. Ortalamadan negatif uzaklık matrisi $[NDA]$	62
Tablo 3.21. Toplam pozitif ve negatif değerler	63
Tablo 3.22. Normalize Toplam pozitif ve negatif değerler.....	64
Tablo 3.23. Alternatiflere ait sıralama puanları.....	65
Tablo 3.24. Ağırlıklandırılmış karar matrisi $[R]$	66
Tablo 3.25. Negatif ideal çözüm (nokta) değerleri.....	67
Tablo 3.26. Alternatiflerin negatif-ideal çözümden Öklid ve Taksicab uzaklıkları.....	68

Tablo 3.27. Alternatiflerin sıralama ağırlıkları.....	69
Tablo 3.28. Normalize karar matrisi $[N]$	70
Tablo 3.29. Ağırlıklandırılmış karar matrisi $[R]$	71
Tablo 3.30. Alternatif değerleri.....	73
Tablo 3.31. Alternatiflerin göreceli önem değerleri	73
Tablo 3.32. Alternatiflerin performans indeksi değerleri.....	74
Tablo 3.33. Alternatiflerin normalize sıralama ağırlık değerleri.....	75
Tablo 3.34. Alternatiflerin normalize sıralama ağırlık değerleri.....	76
Tablo 3.35. Alternatif sıralama ağırlıklarına ait entropi değerleri.....	77
Tablo 3.36. Her bir ÇKKV yaklaşımı için ağırlık değerleri.....	77
Tablo 3.37. Her bir ÇKKV yaklaşımı için g'_b değerleri.....	77
Tablo 3.38. ÇKKV yaklaşımları için w_b^* değerleri.....	77
Tablo 3.39. Final sıralama ağırlık değerlerinin normalizasyonu.....	78
Tablo 3.40. Ekponansiyel ağırlıklı normalize final sıralama ağırlıkları ve alternatifler için nihai sıralama ağırlıkları.....	79
Tablo 3.41. Alternatiflerin sıralanması.....	80
Tablo 3.42. Entropi, PSI, CRITIC ve bütünleşik ağırlıklandırma yöntemlerinden elde edilen kriter sıralamaları.....	81
Tablo 3.43. Kriter sıralamaları arasındaki korelasyon katsayısı değerleri.....	82
Tablo 3.44. EDAS, CODAS, COPRAS, TPOP yöntemlerinden elde edilen alternatif sıralamaları.....	83
Tablo 3.45. Alternatif sıralamaları arasındaki korelasyon katsayısı değerleri.....	84

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa
Şekil 1.1. Yıllara göre HTEA uygulayan çalışmaların frekansları.....	15
Şekil 1.2. Sektör ve konularına göre HTEA çalışmalarının frekansları.....	16
Şekil 1.3. HTEA türlerine göre HTEA çalışmalarının frekansları.....	17
Şekil 2.1. HTEA'nın kapsamı.....	19
Şekil 2.2. Kalite sisteminde HTEA'nın rolü.....	21
Şekil 2.3. HTEA çeşitleri	24

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

AHP	Analytical Hierarchy Process
CODAS	Combinative Distance-based Assessment
COPRAS	Complex Proportional Assessment
CRITIC	Criteria Importance Through Intercriteria Correlation
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme
EDAS	Evaluation based on Distance from Average Solution
FMEA	Failure Modes and Effects Analysis
HTEA	Hata Türü ve Etkileri Analizi
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
NDA	Negative Distance from Avarage
PDA	Positive Distance from Avarage
P-HTEA	Proses Tipi Hata Türü ve Etkileri Analizi
PSI	Preference Selection Index
RÖD	Risk öncelik değeri
RÖP	Risk Öncelik Puanı
TPOP	Technique of Precise Order Preference

1. GİRİŞ

Türkiye'nin jeopolitik konumu, doğal kaynaklarının korunması ve terör faaliyetlerinin önlenmesi ihtiyacını doğurmakta bu nedenle, savunma ve havacılık sanayi Ülkemiz için yüksek önem taşımaktadır.

Düşük maliyet ve yüksek hassasiyette üretim gerçekleştirebilme kabiliyeti, Türkiye'yi dünyada Boeing, Airbus gibi şirketlerin gözünde çekici kılmış ve yüksek bütçeli projelere dahil olmasını sağlamıştır. Böylece, sektöre yönelik yüksek hacimde gerçekleştirilen üretimle birlikte Türkiye, yüksek sektörel bilgi birikimine sahip olmuş ve tecrübe düzeyi artmış ve giderek büyüyen pazarda kendisine yer edinmiştir. Türkiye İhracatçılar Meclisi (TİM)'in verilerine göre (<https://www.defenceturk.net/turkiyenin-ihracatinda-savunma-ve-havacilik-sektoru-2018-2019>) savunma ve havacılık sektöründe Türkiye'nin gerçekleştirdiği ihracat 2019 yılında; 2018 yılına göre %37,75 oranında, rekor seviyede artmıştır. 2018 yılı için 2017 yılına göre bu oran %20'dir. Bu bilgiler ışığında, önümüzdeki yıllarda sektöre yönelik ürün talebi artışının süreceği, bu bağlamda sektöre yönelik yatırımların da artacağı söylenebilir.

Savunma ve havacılık sanayi ticari öneminin yanı sıra, ulusal güvenlik ve politik güç açısından da önemlidir. Çünkü bir ülkenin ulusal güvenliği ve politik gücünü büyük oranda, güçlü bir ordu ve güçlü bir savunma sanayi belirlemektedir. Bu sebeple, Türkiye'nin Stratejik Vizyonu 2023 Projesinde [1] belirtilen 10 stratejik lokomotif sektör arasında, güvenlik ve savunma sanayi 2'nci sırada yer almaktadır. Türkiye'nin Stratejik Vizyonu 2023 Projesinde [1, s. 1], Türkiye'nin 2023 savunma sanayii vizyonu:

“Geliştirdiği teknolojiler ile ürettiği silah ve askerî araç-gereç ve mühimmatı büyük çapta ihraç eden ve bunu ciddi bir ekonomik değere dönüştüren ülkelerden biri olmaktadır.”

şeklinde açıklanmıştır.

Yukarıda ele alınan hususlar, ulusal güvenlik ve ticari önemi bakımından savunma ve havacılık sanayisinin, Türkiye'deki önemini vurgulamaktadır. Bu sebeple Türkiye'de, yüksek teknolojik gelişmelere önderlik yapan savunma ve havacılık sanayisinde gerçekleştirilen üretim faaliyetleri önem arz etmektedir. Sektörde, savunma ve hava taşımacılığının gerçekleştirilmesiyle devreye giren insan faktörü, yurt içinde ve uluslar arası bağlamda sektördeki rekabet; yüksek teknolojide üretim, üretimde hassasiyet ve doğruluk, kalitede artış ve maliyetin düşürülmesi gereksinimlerini doğurmaktadır. Bu sebeple, ilk seferde doğru üretimin yapılması gerekli hale gelmekte, böylece; ortaya çıkabilecek

hataların önceden belirlenmesi ve önlenmesi yaklaşımı önem kazanmaktadır. Söz konusu yaklaşım, üretim proseslerinin etkin bir şekilde yönetilmesini beraberinde getirecektir. Bu amaçla, kalite yönetim sistemleri kapsamında kullanılan ve prosesteki kalite problemlerini belirleyen yaklaşımların uygulanması gereklidir.

1.1. Motivasyon

Diğer sektörlerle göre savunma ve havacılık sanayisinde mevcut ve potansiyel proses temelli hataların tespit edilmesi daha büyük önem taşımaktadır. Çünkü, bu sanayide üretilen ürünler genellikle ülkelerin savunma ve hava taşımacılığını gerçekleştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Söz konusu ürünlerin odak noktası insan olduğu için, herhangi bir hatanın ortaya çıkması mümkün olduğunca erken bir aşamada engellenmelidir. Bunu gerçekleştirmek için sektöre özgü, etkin hata tanımlama ve önleme yaklaşımlarının geliştirilmesi gerekmektedir.

Havacılık, uzay ve savunma sanayisine özgü kalite yönetim sistemi standartı olan AS/EN/JISQ 9100:2016 standartında da, sektöre yönelik faaliyet gösteren firmalar tarafından, yürütülmekte olan üretim, satın alma gibi süreçlere özgü risklerin analiz edilmesi, ayrıca operasyonel riskler, ürün güvenliğine yönelik riskler ve tasarım riskleri gibi pek konuda risk analizi, uygulanabilir olduğu durumlarda zorunlu tutulmuştur.

Literatürde gerçekleştirilen çalışmalara bakıldığında, pek çok sektörde uygulanan, 150'den fazla risk analizi metodunun bulunduğu görülmektedir [2]. Risk analizi metotları, Tixier et al., [3] tarafından özelliklerine göre iki ana gruba ayrılmaktadır: ilk grup, tanımlayıcı, olasılıksal ve bu iki özelliğin kombinasyonu, diğer grup, nitel, nicel ve bu iki özelliğin kombinasyonundan oluşmaktadır.

Tanımlayıcı metotlar; ürün, ekipman, insan ve çevre güvenliği gibi hedeflere yönelik risklerin değerlendirilmesinde kullanılan risk analizi yöntemleridir. Olasılıksal metotlar; bir ekipman veya bileşen üzerinde ortaya çıkabilecek hata olasılığına odaklanan risk analizi yöntemleridir. Kombine tanımlayıcı ve olasılıksal risk analizi metotları; endüstriyel bir firmanın tüm faaliyetlerini analiz etmek amacıyla kullanılan risk analizi yöntemleridir [3]. Nitel ve nicel metotlar ise; risk değerinin elde edilmesinde, kullanılan nitel (sayısal) kriterler, nicel (sözel/dilsel) kriterler veya ikisinin kombine şekilde kullanılmasına göre sınıflandırılan risk analizi yöntemleridir. Bu gruplara giren ve literatürde en sık kullanılan risk analizi metotları aşağıda verilmiştir [4].

- Olursa Ne Olur? (What If?)
- Başlangıç Tehlike Analizi (Preliminary Hazard Analysis - PHA)
- Hata Türleri ve Etki Analizi HTEA (Failure Modes and Effects Analysis - FMEA)
- Hızlı Derecelendirme Malzeme Faktörü (Rapid Ranking Material Factor)
- İş Güvenlik Analizi (Job Safety Analysis - JSA)
- Kontrol Listeleri Kullanılarak Birincil Risk Analizi (Preliminary Analysis (PRA)

Using Checklists)

- Birincil Risk Analizi (Preliminary Risk Analysis - PRA)
- Tehlike Derecelendirme İndeksi (DOW index, MOND index, NFPA index)
- Olay Ağacı Analizi (Event Tree Analysis - ETA)
- Hata Ağacı Analizi Metodolojisi - HAA (Fault Tree Analysis - FTA)
- Hata Türü, Etkileri ve Kritikliği Analizi (Failure Mode Effects and Criticality Analysis - FMECA)
- Risk Değerlendirme Karar Matrisi Metodolojisi (Risk Assessment Decision Matrix)
 - L Tipi Matris
 - X Tipi Matris
- Tehlike ve İşletilebilirlik Çalışması (Hazard and Operability Studies - HAZOP)
- Neden-Sonuç Analizi (Cause-Consequence Analysis)
- Güvenlik Denetimi (Safety Audit)

Bu metodlar arasında en çok kullanılan yöntem, HTEA'dır ve ilk olarak ABD ordusunda geliştirilmiş bir yöntemdir. Yöntem, kullanıldığı yere göre bir ürün, proses, sistem veya hizmette ortaya çıkabilecek potansiyel hataları tanımlama, değerlendirme ve ortaya çıkmasını önlemeye yönelik aksiyonların belirlendiği ve dokümanite edildiği sistematik bir mühendislik tekniğidir. Yönteme göre hataların ortaya çıkmadan belirlenmesi ve önlenmesinin yanı sıra, alınan aksiyonlar sonrası riskler tekrar değerlendirilmekte, böylece ilgili ürün, proses, sistem veya hizmette sürekli iyileştirme amaçlanmaktadır. Bu yönleriyle güçlü bir risk analizi metodu olan HTEA, tez çalışmasında kullanılmak üzere seçilmiştir ve metodun sağladığı faydalardan bazıları aşağıda belirtilmiştir [5].

- Ürün değişikliklerinde harcanan zaman ve maliyetin azaltılması,
- Ürün ve proseslerdeki zayıflıkların giderilmesi,
- Risklerin azaltılması için alınan aksiyonların dokümantasyonu ve takibinin sağlanması,
- Kontrol planlarının oluşturulmasına yardımcı olması,

- Kritik ve önemli ürün karakteristiklerinin belirlenmesine yardımcı olması,
- Üretim maliyetlerinin düşürülmesi,
- Ürünlerin kalite, güvenilirlik ve emniyetinin artırılması,
- Ürünlerin hata sebebiyle geri çağırılma riskinin azaltılması,
- Ürün geliştirme, üretim ve kullanım aşamalarında hataların azaltılması,
- Müşteri gerekliliklerinin sağlanması ve müşteri memnuniyetinin artırılması,
- Hatların önüne geçilmesi veya tekrarlanmasının önlenmesi,
- Organizasyondaki sürekli iyileştirme yaklaşımını desteklemesi.

Yukarıda belirtildiği gibi, HTEA uygulaması beraberinde birçok avantajı da getirmektedir. Ancak bununla birlikte, yöneme ilişkin geliştirilmesi gereken yönler de bulunmaktadır. HTEA'nın geliştirilmesi gereken yönleri aşağıda belirtilmiştir [2].

- HTEA'da, dikkate alınan risk kriterlerinin eşit önem ağırlığına sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu sebeple, risk kriterlerinin farklı değerleri için aynı sonuç elde edilebilmektedir.

- Risk büyüklüğünü belirleyen kriterler arasındaki doğrudan veya dolaylı ilişkiler göz ardı edilmektedir.

- Risk kriterleri, HTEA ekibinde bulunan farklı üyelerce değerlendirilmekte, bu değerlendirme ekip üyelerince farklılık gösterebilmektedir. Ancak bu durum, HTEA'ya yansıtılamamaktadır.

- Risk kriterlerinin değerlerinin belirlenmesi, kesikli skalalara göre gerçekleştirilmektedir.

- Risk Öncelik Değeri (RÖD) sürekli değerlere sahip değildir.

- HTEA'da hesaplanan RÖD, üç kriterin çarpılmasıyla elde edilmektedir ve matematiksel değişikliklere karşı duyarlıdır.

- RÖD yaklaşımı, sadece risk açısından değerlendirme gerçekleştirmekte, düzeltici ve önleyici faaliyetlerin etkinliğini dikate almamaktadır.

- RÖD'nin hesaplanmasında kullanılan risk kriterlerinin belirlenmesinde, genellikle dilsel değişkenler kullanılmaktadır. Bu nedenle, özellikle potansiyel hatalar ve hata türlerinin değerlendirilmesi ve geleceğe yönelik yapılan tahminler belirsizlik içermektedir.

- Risk kriterlerinin, ortaya çıkarabilecekleri riskin büyüklüğü açısından benzerlikleri dikkate alınmamaktadır.

- Hata türlerinin birbirleri üzerindeki etkisi göz önünde bulundurulmamaktadır. Oysa ki, gerçek sistemlerde bir hata türünün ortaya çıkması, diğer bir hata türünün ortaya çıkmasını beraberinde getirebilir.

- Belirli ve sınırlı sayıda kriter kullanılarak riskler değerlendirilmektedir.
- Ayrıca, sektörel bazda değişebilecek olan risk kriterleri göz ardı edilmektedir.

Bu kapsamda tez çalışmasında, savunma ve havacılık sanayisinde üretilen ürünler için proses temelli hataların tanımlanması ve bu hataların önleme önceliklerinin belirlenmesi amacıyla yeni bir proses tipi HTEA yaklaşımının geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Buna göre çalışmada, geleneksel HTEA'da dikkate alınan kısıtlı sayıdaki risk kriterleri, savunma ve havacılık sektörü gereklilikleri kapsamında genişletilmiştir. Geliştirilen yaklaşım ile; risk kriterleri, birbirleri arasındaki ilişkiler dikkate alınarak ağırlıklandırılmış ve buna göre hata türleri, birbirleri arasındaki ilişkiler dikkate alınarak, önlem önceliklerine göre sıralandırılmışlardır. Ayrıca, savunma ve havacılık sanayisine özgü proseslerde ortaya çıkabilecek hatalar gruplandırılmış ve hata türlerinin dikkate alınan kriterler açısından nicel değerleri kullanılarak uygulama yapılmıştır. Bu nedenle, hiçbir karar verici etkisi olmadan ve subjektifliği ortadan kaldıran bir HTEA yaklaşımı önerilmiştir.

Önerilen yaklaşım; kriterlerin ağırlıklandırılması ve hata türlerinin sıralanması olmak üzere iki aşamadan oluşmaktadır. Burada, birden fazla kriterin karar verme işleminde göz önünde bulundurulması gerektiği için çalışmada, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yapısından faydalanılmıştır.

Kullanılacak ÇKKV yöntemlerinin belirlenmesinde, literatürde mevcut, kabul görmüş yöntemler araştırılmış ve aşağıda belirtilen kıstaslar dikkate alınarak kullanılacak yöntemler belirlenmiştir.

- Hesaplama kolaylığı,
- İçerdiği istatistiksel prosedürler,
- Fayda ve maliyet türü kriterler dikkate alınarak uygulanabilme,
- Farklı yöntemlerin alternatif bakış açılarını alternatif sıralamalarına yansıtabilme,
- Nicel değerlerle çalışabilme.

Buna göre, kriter ağırlıklarının hesaplanması aşamasında; ÇKKV yöntemlerinden Tercih Seçim İndeksi (Preference Selection Index - PSI), Entropi ve Kriterler arası Korelasyon Yoluyla Kriterlerin Önem Tespiti (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation - CRITIC) yöntemleri uygulanmış ve daha sonra bu üç yöntem tarafından elde edilen ağırlıklar geometrik ortalama temelli bir yaklaşım kullanılarak birleştirilmiştir.

Sonraki aşama olan alternatiflerin sıralanmasında ise; Ortalama Çözüm Uzaklığına Göre Değerlendirme (Evaluation based on Distance from Average Solution - EDAS), Birleştirilebilir Uzaklık Tabanlı Değerlendirme (Combinative Distance-based Assessment - CODAS) ve Karmaşık Orantılı Değerlendirme (Complex Proportional Assessment - COPRAS) yöntemleri ile hata türleri sıralanmıştır. Üç farklı yöntemden elde edilen alternatif sıralamaları, Kesin Tercih Sıralama Tekniği (Technique of Precise Order - TPOP) ile birleştirilerek nihai hata türü sıralaması elde edilmiştir.

PSI yöntemi, istatistik kavramına dayanmakta ve sonuçlar, az sayıda ve basit hesaplamalar ile elde edilmektedir. Ayrıca bu yöntemde, kriterlerin alternatiflere göre aldıkları nicel değerlerden hareketle kriter önem ağırlıkları hesaplanmaktadır. Bununla birlikte PSI, alternatiflerin sıralanmasında ayrı bir kriter ağırlıklandırma yaklaşımına ihtiyaç duymamaktadır. Ayrıca, kriter sayısına bağlı olmaksızın kullanılabilir. Yöntemde, kriterler arasında göreceli bir önem değeri atanması gerekli değildir. Buna göre, kriterler arasındaki göreceli önem değerlerinin karşılaştırılmasında, fikir ayrılığı olduğu durumlarda avantajlıdır [6]. Entropi yöntemi ise, farklı karar verme problemlerinde kullanılabilen, ayrıca, bir veri setindeki yararlı bilgi miktarının ölçülmesinde etkili bir yöntemdir. Bilgi ölçümü için oldukça güvenilirdir ve ağırlık belirleme problemlerinde yüksek doğruluk sağlar. Karar verme ortamından elde edilen bilginin sayısı veya kalitesi, karar verme probleminin doğruluğu ve güvenilirliği üzerinde etkilidir görüşüne dayanır [7]. Yine Entropi yöntemi de, alternatifleri sıralamak için ayrı bir kriter ağırlık yöntemine ihtiyaç duymaz. Bir diğer yöntem olan CRITIC ise, ÇKKV problemleri için kriter ağırlıklarının objektif olarak belirlendiği bir yaklaşımdır ve karar vericiye kriterlerin göreceli önemini ifade etmede kolaylık sağlamaktadır. Yöntemde, alternatiflerin performans değerleri arasındaki korelasyon ve değişkenlik miktarına odaklanılarak kriter ağırlıkları elde edilmektedir. Böylece kriterlerin ağırlıklandırılmasında, baskın olmayan öznelilikleri bulundurmamaktadır. Ayrıca, kendi içinde hem kriter ağırlıklandırması hem de alternatif sıralaması yapabilen bir yöntemdir. Bu sebeplerden dolayı tez çalışmasının kriter ağırlıklandırma aşamasında bu üç yöntemin kullanılmasına karar verilmiştir. Tez çalışmasında söz konusu kriter ağırlıklandırma yöntemlerinin kullanılmasındaki ortak amaç, nicel değerlere dayanarak, öznelikten arındırılmış bir şekilde kriter ağırlıklarının hesaplanması isteğidir.

EDAS yöntemi, alternatiflerin değerlendirilmesinde ortalama çözümü göz önünde bulunduran bir yöntemdir. Bu sebeple alternatiflerin sıralanmasında, Ortalamadan Pozitif Uzaklık (Positive Distance from Average - PDA) ve Ortalamadan Negatif Uzaklık (Negative Distance from Average - NDA) olmak üzere iki farklı sıralama ölçütü kullanılmakta, bu da

EDAS yönteminden elde edilen sonuçların hassasiyetini arttırmaktadır. COPRAS yöntemi ise, diğer Analitik Hiyerarşi Prosesi (Analytical Hierarchy Proces - AHP), İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralama Tekniği (Technique For Order Preference By Similarity To Ideal Solution - TOPSIS) gibi ÇKKV yöntemlerine kıyasla hesaplama süresi düşük, uygulanması kolay bir yöntemdir. Ayrıca alternatiflerin yüzde olarak gösterilen performans indeksi sayesinde, bir alternatifin diğer alternatiften ne kadar iyi veya kötü olduğu belirlenebilmektedir [8]. Diğer bir yöntem olan CODAS yöntemi ise, 2016 yılında, Ghorabae et al., [9] tarafından geliştirilmiş ve geçerliliği kanıtlanmış güncel yöntemlerden biridir. Yönteme göre, alternatiflerin sıralanmasında, negatif ideal çözümden Öklid uzaklıkları ve Taksicab uzaklıkları kullanılmaktadır. İki farklı ölçüt kullanılarak alternatif sıralaması yapıldığı için daha hassas sonuçlar üretebildiği değerlendirilmektedir. Literatürde CODAS yönteminin, EDAS ve COPRAS yöntemleriyle entegre edildiği bir çalışma bulunmamaktadır. Bu sebeplerden dolayı tez çalışmasında alternatiflerin sıralanması aşamasında bu üç yöntemin kullanılmasına karar verilmiştir.

TPOP yöntemi, birden çok ÇKKV yönteminin kullanılması durumunda, alternatifler için elde edilen farklı sıralamaların, karar verme aşamasında oluşturacağı karışıklığı ortadan kaldıran, yöntemde kullanılan hesaplamaların basit olduğu ve uygulanması kolay bir yöntemdir. TPOP ile birden çok ÇKKV yönteminden elde edilen alternatif sıralamaları her bir yöntemin etkisini yansıtacak şekilde tek bir sıralamaya dönüştürülebilmektedir [10]. Bu sebeple, yukarıda belirtilen CODAS, COPRAS ve EDAS yöntemlerinden elde edilen alternatif sıralamalarının birleştirilerek, nihai bir sıralama elde edilmesi için TPOP yöntemi kullanılmıştır.

Tez çalışmasında önerilen yaklaşım, savunma ve havacılık sanayisinde faaliyet gösteren bir firmada uygulanmıştır. Tez çalışmasının son aşamasında ise; önerilen yaklaşımın uygulanmasıyla, her bir ÇKKV yönteminden elde edilen sıralamalar, TPOP ile birleştirilen sıralamalarla ilişkilendirilmiş ve bu amaçla Spearman Sıralama Korelasyon Katsayısı kullanılarak sonuçlar tartışılmıştır.

1.2. Literatür Araştırması

Bu bölümde, 2013-2020 yılları arasında literatürde HTEA kullanılarak gerçekleştirilen çalışmalar hakkında özet bilgi verilmiştir. Söz konusu yıl aralığının seçilme nedeni, güncel çalışmalara odaklanılmak istenmesidir.

Braaksma et al., [11] altı farklı üretim firması için bakım yönetimine yönelik çalışmaların önceliklendirilmesi amacıyla HTEA uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Aksu et al., [12] ramipril tabletlerin (yüksek tansiyon tedavisinde veya kalp krizi geçiren hastalarda kullanılan bir ilaç), kritik kalite özellikleri ve kritik proses parametrelerinin belirlenmesi için HTEA yöntemi uygulamışlar ve optimizasyon için deney tasarımı kullanmışlardır. Chen [13], yarı iletken malzeme üretimi gerçekleştiren bir firmanın üretim maliyetlerini azaltmak, çalışan ve ekipman verimliliğini artırmak hedeflerine ulaşabilmesi amacıyla Toplam Verimli Bakım (Total Productive Maintenance-TPM) sistemini kurmak için Kök Neden Analizi (Root Cause Analysis-RCA) ve HTEA tekniklerini kullanmıştır. Song et al. [14], bir nükleer ısıtıcı valf sisteminde, Bulanık TOPSIS (Fuzzy TOPSIS - FTOPSIS) ile entegre, yeni bir bulanık HTEA yöntemi geliştirmişlerdir. Liu et al. [15], Sezgisel Bulanık Hibrit Ağırlıklandırılmış Öklid Uzaklık Operatörünü (Intuitionistic Fuzzy Hybrid Weighted Euclidean Distance Operator) kullanarak, geleneksel HTEA'nın etkinliğinin artırılması amacıyla yeni bir risk değerlendirme yaklaşımı geliştirmişlerdir. Yeh et al. [16], yarı-iletken wafer (yarı iletken teknolojisinde, entegre devreler ve güneş paneli hücrelerinin yapımı için kullanılan saf silisyum içeren dairesel plaka) imalat işlemlerinde verimliliğe etki eden faktörleri değerlendirmek için dilbilimsel bulanık değişkenlerin kullanıldığı yeni bir HTEA yaklaşımı geliştirmişlerdir. Apreada et al. [17] tarafından, inovasyon faaliyetleri sonucu önerilen bir teknolojinin, politikacıları ve kamuoyunu olumsuz yönde etkileyebilecek problemler yaratmasının engellenmesi amacıyla, vaatlere odaklanmak yerine, tüm olası hatalarının tespit edilmesi ve ölçülmesi kapsamında, Fonksiyonel Analiz (Functional Analysis-FA) ve Hata Türü, Etkileri ve Kritikliği Analizi (Failure Modes, Effects and Criticality Analysis - FMECA) yöntemlerinin kullanıldığı bir metodoloji geliştirilmiştir. Alyani et al. [18], bir konteynır limanında, tehlikeli durumların kritikliğinin değerlendirilmesi için, Bulanık Kural Temelli Bayes Ağları (Fuzzy Rule-Based Bayesian Networks-FRBN) ve HTEA yöntemlerini birleştirerek yeni bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Yörükoğlu [19] tarafından, yenilenebilir enerji kaynaklarına ilişkin risklerin tespiti, giderilmesi ve iyileştirilmesi amacıyla HTEA ve bulanık HTEA kullanılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Fakoya [20] tarafından, öğrencilerin potansiyel başarısızlık modelini belirlemek üzere, tündengelem temelli yeni bir HTEA yaklaşımı önerilmiştir. Zaman et al., [21] tarafından gemilerin çarpışma tehlikesine yönelik risklerin değerlendirilmesi amacıyla HTEA uygulanmıştır. Lin et al. [22], düşük karbon salımlı ürünlere yönelik ürün geliştirme çalışması kapsamında; bulanık HTEA yaklaşımını geliştirmek için Bulanık Yorumlayıcı Yapısal Modelleme (Fuzzy Interpretive Structural Modelling - FISM), Kalite Fonksiyon

Yayımlı (Quality Function Deployment - QFD) ve Bulanık Analitik Ağ Süreci (Fuzzy Analytic Network Process - FANP) metotlarını kullanmışlardır ve kriter sıralamalarını önerilen entegre yaklaşım ile elde etmişlerdir. Wang et al. [23], Naproxen yüklü çekirdeklere ilişkin tasarım ile kalite (Quality by Design - QbD) çalışması kapsamında balık kılıcı diyagramı ve HTEA uygulayarak, geçmiş çalışmalar ve bilgi birikimini bir araya getirmişlerdir. Değerlendirmede, Plackett-Burman tasarımı ile potansiyel risk faktörleri belirlenmiş, kritik kalite özellikleri (critical quality attribute - CQA) ve değişkenler arası ilişkinin belirlenmesi için Box-Behnken Tasarımını (Box-Behnken Design - BBD) kullanmışlardır. Nepal and Yadav [24], ilaç dağıtım sektöründe faaliyet gösteren bir firmada, tedarikçi seçimi üzerine HTEA ve Bayes İnanç Ağı (Bayes Belief Network - BBN) yöntemlerinin uygulandığı bir çalışma gerçekleştirmiştir. Altunbey [25] tarafından, HTEA'da uzman görüşlerinin kullanılmasından kaynaklanan belirsizliklerin, verilerdeki değişkenliğin, geleneksel HTEA modelinin formülasyonundan kaynaklanan hataların engellenmesi amacıyla Ağırlıklandırılmış Aralık Tip 2 Bulanık Kural Tabanlı Sistem (Interval Type 2 Fuzzy Rule Base System - IT2FS) temelinde yeni bir model geliştirilmiştir. Okumuş [26] tarafından, taş yünü üreten bir tesiste, üretim sırasında oluşan hata türleri HTEA ile tespit edilmiş, Taguchi Deneysel Tasarımı ve AHP yardımıyla, minimum sayıda deney yapılarak bulunan iki hata faktörü için ortak ideal seviye belirlenmiştir. Son aşamada, belirlenen ideal faktör seviyelerine göre üretilmiş ürünler ile rastgele seçilen ürünler kıyaslanarak yöntemin başarısı test edilmiştir. Chang [27] tarafından, bir notebook modülü tasarımının geliştirmesinde TOPSIS ve HTEA yöntemleri kullanılmıştır. Çakmak [28] tarafından, demir çelik şekillendirme süreçlerinin gerçekleştirildiği bir haddehanede bulanık HTEA uygulamasıyla risk değerlendirmesi yapılmıştır. Kara [29] tarafından, savunma ve havacılık sektöründe faaliyet gösteren bir firmada, yeni ürün geliştirme süreçlerinde ortaya çıkabilecek risklerle ilgili öngörüle bulunmuş, HTEA uygulanarak projelere etkisi önemli görülen riskleri azaltmak için öneriler geliştirilmiştir. Luo and Lee [30] tarafından, farklı sektörlerde yer alan 11 firmada, bilgi yönetimindeki başarısızlık sebeplerini önlemek amacıyla HTEA uygulanmıştır. Stavrou and Ventikos, [31] yağ ve yağ ürünlerinin gemiyle transferi sırasında ortaya çıkabilecek risklerin değerlendirilmesi için proses tipi HTEA çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Liu et al. [32], fotoelektrik endüstrisindeki ince film transistör-likit kristal ekran (TFT-LCD) modüllerine yönelik, müşteri gereksinimlerini hedeflere dönüştürerek risk planlaması yapmak, olası hataları önlemek ve belirsizliği azaltmak için QFD ve Tasarım HTEA yaklaşımlarını uygulamışlardır. Huang et al., [33] tarafından bir tıp merkezinde, ekipman sterilizasyonu sürecinin değerlendirmesi için sağlık

tipi HTEA gerçekleştirilmiştir. Potansiyel hata türlerini ve iyileştirilmesi gereken faktörleri belirlemek için tehlike analizi ve karar ağacı yöntemleri kullanılmıştır. Erten [34] tarafından, Fine-Kinney ve HTEA yöntemleri ile ilaç lojistiği alanında hizmet veren bir firmanın riskleri değerlendirilmiştir. Akyüz vd. [35], denizcilik sektöründe güvenlik analizi için bulanık HTEA uygulamışlardır. Liu et al. [36], ELECTRE (Fransızca – “Elimination Et Choix Traduisant la Réalité”) yöntemini temel alarak, hata türlerinin sıralandığı bir HTEA yaklaşımı önermişlerdir. Pergher et al. [37], kanser hastalığına yönelik verilen sağlık hizmetinde, düşük servis hızı nedenlerinin belirlenmesi ve nedenleri ortadan kaldırmak için uygulanacak aksiyonların önceliklendirilmesinde, proses tipi HTEA ve Mevcut Gerçeklik Ağacı (Current Reality Tree - CRT) yöntemlerini entegre etmişlerdir. Rezaian [38] tarafından, İran'ın güneyinde bir yerleşim bölgesinden geçen yüksek voltajlı elektrik hatlarının neden olduğu riskleri belirlemek ve değerlendirmek için çevresel HTEA uygulanmıştır. Zhou et al. [39], uzman değerlendirmelerindeki belirsizliğin etkisini dikkate alan yeni bir HTEA yöntemi geliştirmiştir. HTEA'da kullanılan üç risk kriteri dilsel değişkenlerle derecelendirilmiş ve Dilsel Ağırlıklandırılmış Geometrik (Linguistic Weighted Geometric - LWG) operatör kullanarak, dönüşüm sürecindeki bilgi kayıplarının önüne geçmişlerdir. Uzman değerlendirmelerinin ağırlıklarını hesaplarken, bulanık önceliklendirme yöntemini uygulamışlar ve grup değerlendirmesinden farklı görüşte olan uzmanlar için düşük ağırlıklar atamışlardır. Böylece, bazı uzmanların değerlendirme üzerindeki yönlendirici etkisini azaltmışlardır. Lux et al. [40], tarafından otomobil endüstrisine yönelik üretim ekipmanı tasarımlarının değerlendirilmesinde, ekipmanların çalışma durumunu dikkate alan bir HTEA uygulaması gerçekleştirilmiştir. Hajiagha et al. [41], Tahran metrosundaki gecikme nedenlerinin sıralanması için HTEA uygulamışlardır. Değerlendirmelerdeki belirsizliğin, Bulanık İnanç Yapıları (Fuzzy Belief Structure-FBS) ile modellendiği Çok Kriterli Optimizasyon ve Uzlaşık Çözüm (Sırpça “Viekriterijumsko Kompromisno Rangiranje”-VIKOR) yöntemini kullanmışlardır. Ahmadi et al. [42], tarafından karayolu inşaat projelerindeki risklerin değerlendirilmesi amacıyla, bulanık HTEA ve bulanık AHP (Fuzzy AHP - FAHP) yöntemleri birleştirilerek uygulanmıştır. Romdhane et al. [43] tarafından, KOBİ'lerde, 6 Sigma uygulamasını kolaylaştırmak amacıyla, İstatistiksel Proses Kontrol - İPK (Statistical Process Control - SPC) ile sistem kabiliyetlerinin belirlendiği, AHP ve HTEA yöntemleri kullanılarak iyileştirme faaliyetlerinin önceliklendirildiği yeni bir model önerilmiştir. Meekhof and Bailey [44], makine tarafından okunabilir kataloglama (machine readable cataloging) sürecinde, kayıt oluştururken ortaya çıkabilecek hata türlerini belirlemek için HTEA kullanmışlar ve

katologlama için HTEA'nın farklı çevrelerde nasıl daha etkin kullanılabileceğini göz önünde bulunduran, genel bir bakış açısı sunmuşlardır. Liu et al. [45] tarafından, Bulut Modeli Teorisi (Cloud Model Theory) ve Gri İlişkisel Analiz (Grey Relational Analysis - GRA) yöntemleri entegre edilerek yeni bir HTEA yöntemi geliştirilmiştir. Pazireh et al. [46], bir konfeksiyon firmasında proses tipi HTEA uygulamış ve üretim verimliliğini, simülasyon tabanlı optimizasyon tekniği kullanarak analiz etmiştir. Özdemir vd. [47] tarafından, tehlikeli atıkların yönetimine yönelik 5S, HTEA, IIT2FSs, AHP ve VIKOR yöntemlerinin entegre edilerek uygulandığı bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Jiang et al. [48], bir uçak türbininin rotor kanatları için, Z Sayıları (Z numbers)'nı, bulanık ağırlıklı ortalama yöntemiyle entegre ederek yeni bir HTEA metodu geliştirmiştir. Perisic et al. [49], İş Süreçleri Modeli ve Notasyon (Business Process Model and Notation - BPMN) yaklaşımını kullanarak; bir üretim sürecinin modelini oluşturmuşlar ve sürecin risk değerlendirmesi için HTEA uygulamışlardır. Gül ve Çelik [50], İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) yönetimi için, Fine-Kinney yöntemi ve bulanık kurallara dayalı bir uzman sistemi entegre ederek yeni bir HTEA geliştirmişlerdir. Cure et al. [51], sağlık sektöründe farklı aşamalardaki kesintilerin (plansız olarak ortaya yeni bir görevin çıkması gibi durumlarda iş performansında meydana gelen duruşlar) risk, iş etkinliği ve hasta memnuniyeti açısından değerlendirildiği bir HTEA önermiştir. Casian et al. [52] tarafından, ilaç sektörüne yönelik risk yönetimi stratejileri ve Deney Tasarımı (Design of Experiment - DoE) entegre edilerek bir QbD yaklaşımı önerilmiş, kritik kimyasal ilaç formülasyonu ve süreç parametrelerini belirlemek için HTEA uygulanmıştır. Formülasyondaki nitel ve nicel değişkenlerin etkisini araştırmak için tarama ve optimizasyon amacıyla D-optimal tasarımlar kullanılmıştır. Parand et al. [53], evde gayri resmi bakıcılar tarafından yapılan olası ilaç uygulama hatalarına yönelik riskleri belirlemek ve analiz etmek amacıyla HTEA, Sistemik İnsan Hatalarının Azaltılması ve Tahmini Analizi (Systematic Human Error Reduction and Prediction Analysis - SHEPRA) ve Sistemler-Teorik Kaza Modeli ve Süreçleri (Systems-Theoretic Accident Model and Processes - STAMP) yöntemlerini uygulamışlardır. Chiu et al. [54] tarafından, sistematik ve eksiksiz bir ürün-servis sisteminin (Product-service system - PSS) geliştirilmesi için HTEA ile Önem Performansı Analizi (Importance-Performance Analysis - IPA) entegre edilmiş, düzeltilmesi gereken öncelikli hata türleri belirlenmiş ve GRA yöntemiyle servis alternatifleri değerlendirilmiştir. Kokangül vd. [55] tarafından, ISO 14001 kapsamındaki zorunluluklar dikkate alınarak, 10 ana ve 32 alt kategoriden oluşan çevresel etki değerlendirme yapısına sahip, üretim veya hizmet sektöründe yer alan herhangi bir firmaya uygulanabilecek genel bir HTEA yaklaşımı geliştirilerek, bir firmanın imalat ve boyama

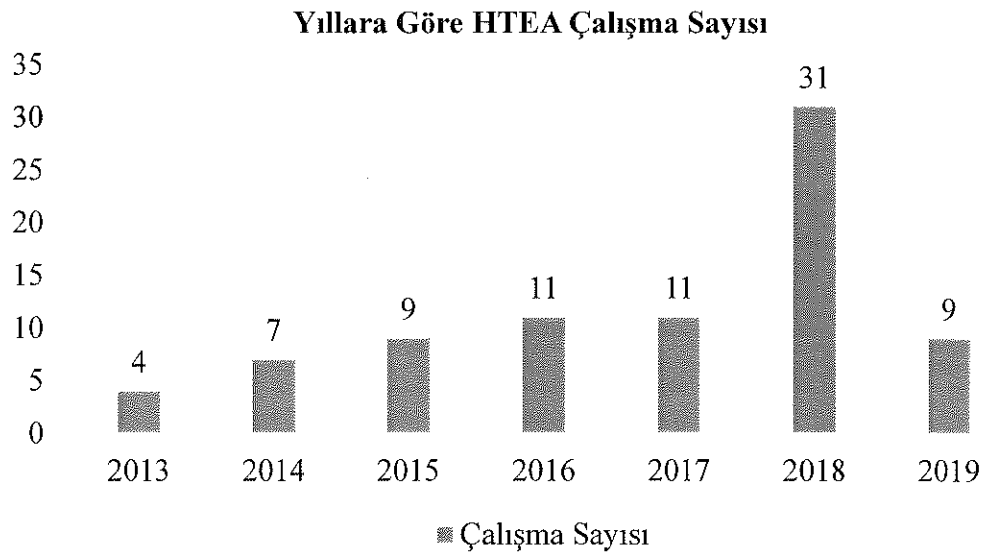
birimlerinin analizi için uygulanmıştır. Ayaz [56] tarafından, bilgisayar veri günlükleri uygulama alanı olarak seçilerek; HTEA adımlarının otomatikleştirilmesi ve böylece hem subjektifliğin ortadan kaldırılması hem de analizin daha kolay yapılması amaçlanmıştır. Hata türleri, veri setinden otomatik olarak elde edilmiş, bu hata türlerini değerlendirmek için veri tabanlı objektif risk metrikleri önerilmiştir. GRA, TOPSIS, VIKOR yöntemleri ve geleneksel HTEA tabanlı alternatif bir yöntem ile risk sıralamaları yapılarak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Liu et al. [57], küme analizi ve olasılık teorisini kullanarak, büyük uzman grupları tarafından uygulanabilecek yeni bir HTEA yaklaşımı geliştirmişlerdir. Risk faktörlerinin objektif olarak ağırlıklarının belirlenmesi için Entropi yöntemini kullanmışlardır. Kumar and Parameshwaran [58] tarafından, yalın üretim uygulamasında, kritik kaynakların önceliklendirilmesi için QFD ve risklerin değerlendirilmesi için bulanık HTEA kullanılmıştır. Chudiwal et al. [59], bir ilaç firmasında tablet formülasyonunun belirlenmesinde, balık kılçığı diyagramı ve HTEA yöntemleriyle risk faktörlerini belirlemiş, Plackett-Burman tasarımı ve Box-Behnken tasarımlarıyla optimizasyon çalışması gerçekleştirmişlerdir. Bialy and Ruzbarsky [60], jant üretimi yapan bir firmada, HTEA yöntemini, balık kılçığı diyagramı ve pareto diyagramı ile birlikte uygulamıştır. Chen et al. [61], otomotiv sektöründe faaliyet gösteren bir firmanın valf süspansiyonu hatalarına yönelik, ayrıntılı bir süspansiyon pnömatik modeli kullanarak, HTEA uygulamışlardır. Khare et al. [62] tarafından, enerji sektöründe faaliyet gösteren bir firmadaki Okyanus Termal Enerji Dönüşümü (Ocean Thermal Energy Conversion - OTEC) sürecinde kullanılan akışkan için gereken özellikler tartışılmış, ÇKKV yapısında HTEA uygulanarak hata türleri analiz edilmiştir. Böylece, OTEC'de kullanılacak sıvı seçimi sırasında en önemli faktörler belirlenmiş, çalışılacak akışkan özelliklerine dair öncelikli bir liste elde edilmiştir. Alsyouf et al. [63], havaalanlarında bulunan bagaj taşıma sistemleri için Yalın Altı Sigma (Lean Six Sigma - LSS) metodolojisini uygulamış, kritik problemlerin belirlenmesi ve kritikliğin derecesine göre sıralanması için HTEA ve FMECA tekniklerini birlikte kullanmışlardır. Putra and Wang [64] tarafından, ISO/IEC 17025 standartına uygun tedarikçi seçiminde, QFD ve HTEA entegrasyonu önerilmiştir. Garg et al. [65] tarafından, ilaç sektöründe QbD'ye yönelik formülasyon geliştirme kapsamında, ürün profili kalite hedefi (Quality Target Product Profile - QTPP) tanımlanmış ve kritik kalite özellikleri (CQAs) belirlenerek HTEA ile risk değerlendirmesi gerçekleştirilmiştir. Beg et al. [66], QbD temelli, ilaç formülasyonu geliştirmişler, QTPP tanımlamışlar ve CQAs'leri belirlemişlerdir. CQA'lar üzerinde kritik etkiye sahip yüksek riskli faktörleri belirlemek için HTEA uygulamışlardır. Sonrasında, yüksek risk taşıyan faktörlere, Temel Bileşenler Analizi (Principal Component

Analysis - PCA) uygulayarak, kritik malzeme özelliklerinin optimizasyonu için yüz merkezli kübik bir tasarım önermişlerdir. Oh et al. [67] tarafından, ilaç sektörüne yönelik QbD yaklaşımıyla, kalite hedef ürün profili ve CQAs'ler belirlenmiş, ilacın çözünmesi ve safsızlık düzeyinin riskli CQA'lar olduğu tahmin edilmiştir. Risklerin tam aralığını ve nedenini belirlemek için, risk değerlendirme araçları olan Ön Risk Analizi (Preliminary Risk Analysis-PRA) ve HTEA kullanılmıştır. Tasarım alanının aralığı, yüz merkezli merkezi kompozit tasarım kullanılarak optimize edilmiştir. Trakulsunti et al. [68], hastanelerde ilaç hatalarını azaltmak için LSS hakkında literatürde gerçekleştirilen çalışmaları incelemişler, LSS araçlarından birisi olan HTEA'ya dair ilaç hatalarının analizinde gerçekleştirilen çalışmaları bu incelemeye dahil etmişlerdir. Prashar [69], KOBİ'lere yönelik üç bölümden oluşan LSS yaklaşımı geliştirmiş, önerilen yaklaşımı bir KOBİ'de uygulayarak üretim sürecinin aşamalarına yönelik olası başarısızlık nedenlerini önceliklendirmek için HTEA kullanmıştır. Lazakisa et al. [70], kritik gemi makine sistemlerini/bileşenlerini ve izlenecek parametrelerini tanımlamak için Hata Ağacı Analizi (Fault Tree Analysis - FTA) ile HTEA'yı entegre etmiş, gelecekteki değerleri izlemek ve tahmin etmek için, Dinamik Zaman Serisi Sinir Ağlarını (Dynamic Time Series Neural Network) kullanmıştır. Karasana et al. [71] tarafından, Pisagor bulanık kümeleriyle genişletilmiş, Güvenlik ve Kritik Etki Analizi (Safety and Critical Effect Analysis - SCEA) yöntemi geliştirilerek; elde edilen sonuçlar, HTEA ve Fine Kinney yöntemleriyle karşılaştırılmıştır. Liua et al. [72], gaz istasyonları için tedarik zinciri sisteminin güvenliğini etkin bir şekilde analiz etmek amacıyla HTEA'yı uygulamış, hata türü nedenlerinin değerlendirilmesi için Entropi ağırlıklandırma yöntemini kullanmışlardır. Santosa et al. [73], film ve televizyon endüstrisinde, yeni ürünlerin (dizi, film gibi) piyasaya çıkarılma sürecindeki, kazalara neden olabilecek ve ekiplerin sağlığını ve güvenliğini etkileyebilecek riskleri analiz etmek için HTEA kullanmışlardır. Fattahi and Khalilzadeh [74], kriter önem ağırlıklarının ve hata türü önceliklerinin sırasıyla FAHP ve Bulanık Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon (Fuzzy Multiple Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis-FMULTIMOORA) yöntemleri ile hesaplandığı, HTEA için yeni bir bulanık hibrit model önermişlerdir. Yousefia et al. [75], İSG'de risk analizine yönelik, HTEA yönteminde RÖD puanlama sisteminin dezavantajlarını engellemek için bütünlük bir Sağlam Veri Zarflama Analizi (Robust Data Envelopment Analysis - RDEA) temelinde HTEA yaklaşımı önermişlerdir. İlbahara et al. [76] tarafından, İSG alanında risk değerlendirmesi için, Fine Kinney, Pisagor Bulanık AHP ve bulanık bir çıkarım sistemi içeren yeni bir entegre yaklaşım olan Pisagor Bulanık Orantılı Risk Değerlendirmesi (Pythagorean Fuzzy Proportional Risk Assessment - PFPPRA)

yaklaşımı kullanılmıştır. Kumar et al. [77], bir gaz ikmal istasyonu için, Bulanık HTEA ile GRA yöntemlerini uygulamışlardır. Wang et al. [78], HTEA'da risk faktörlerinin önem ağırlıklarının değerlendirilmesinde İhtimal Teorisini (Prospect Theory), risk faktörleri arasındaki etkileşime yönelik bulanık ölçümleri ve Choquet İntegral'i uygulamışlardır. RÖD hesaplanması aşamasında ise, Entropi ağırlıklandırma metodunun kullanıldığı hibrit bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Bubbico et al. [79] tarafından, lityum iyon şarj edilebilir pil kullanımına yönelik risklerin değerlendirildiği HTEA uygulaması gerçekleştirilmiştir. Renjith et al. [80] tarafından, HTEA kapsamında bulanık RÖD hesaplaması geliştirilmiştir. Nie et al. [81] tarafından, atık su gazlaştırma sistemine yönelik risk değerlendirmesi amacıyla HTEA uygulanmış; uzman görüşlerinin alınmasında, çok parçalı dil bilimsel terim kümeleri (Multi-granular Linguistic Term Set), risk faktörleri ağırlıklarının belirlenmesinde ise En İyi-En Kötü metodu (Best-Worst Method) ve Maksimize Türetme Yöntemi (Maximizing Derivation Method), hata türü risk seviyelerinin sıralandırılmasında da COPRAS kullanılmıştır. Catelani et al. [82], FMECA ve Hata Türü, Mekanizmaları ve Etkileri Analizi (Failure Modes, Mechanisms and Effect Analysis-FMMEA) yöntemlerini entegre etmişlerdir. Arabsheybani et al. [83], tedarikçi performansını değerlendirmek için FMOORA temelli, bulanık çok amaçlı bir optimizasyon modeli kurarak, riskleri HTEA yöntemiyle belirlemişlerdir. Liu et al. [84], hata türlerinin değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesi için ÇKKV yaklaşımlarının kullanıldığı, 1998-2018 yıllarına ait 169 adet HTEA çalışmasını kapsamlı bir şekilde incelemişlerdir. Wang et al. [85], Etkileşimli ve Çok Kriterli Karar Verme Metodunu (Interactive Multi-criteria Decision Making-Portekizce kısaltması: TODIM) ve Choquet İntegral yöntemini bütünleştiren karma bir HTEA geliştirmiştir. Polat [86] tarafından, bir tekstil fabrikasında olası kalite hatalarının belirlenmesine yönelik HTEA uygulanmış; MATLAB'de bulanık mantık kapsamında kodlama yapılarak kriterler önceliklendirilmiştir. Mutlu ve Altuntaş [87] tarafından, tekstil endüstrisine yönelik FTA ve HTEA yöntemlerinin entegre edildiği bir risk analizi yaklaşımı sunulmuştur. Mete [88] tarafından, bir doğal gaz boru hattı inşaat projesinde risklerin değerlendirilmesi için; Pisagor bulanık kümelerinin kullanıldığı, HTEA merkezli AHP-MOORA entegre yaklaşımı önerilmiştir. Olivos et al. [89], satın alma departmanına yönelik, HTEA ve AHP yöntemlerini kullanarak risk analizi gerçekleştirmişlerdir. Hecht and Baum [90], SysML (sistem modelleme dili) kullanarak, bilgisayar destekli bir HTEA yazılımı geliştirmişlerdir. Böylece, kolay uygulanabilen ve sistem tasarımını değerlendirmek, zayıflıklarını tespit etmek ve düzeltici aksiyonlar almak için sürekli kullanılabilir bir yapı geliştirmelerinin yanı sıra, güvenliği ve siber güvenliği desteklemek için kullanılacak

önemli ek analiz sonuçlarını sağlayan Hata Yayılımı'nı (Failure Propagation) da modellemişlerdir. Geramian et al. [91], Taguchi'nin Güçlü Parametre Tasarımı (Robust Parameter Design - RPD) metodunu uygulayarak, bulanık bir HTEA yaklaşımı önermişlerdir. Dadsena et al. [92], taşıt endüstrisinde risk azaltma stratejisi seçiminde kullanmak amacıyla, bütünleşik bir HTEA yaklaşımı önermişlerdir.

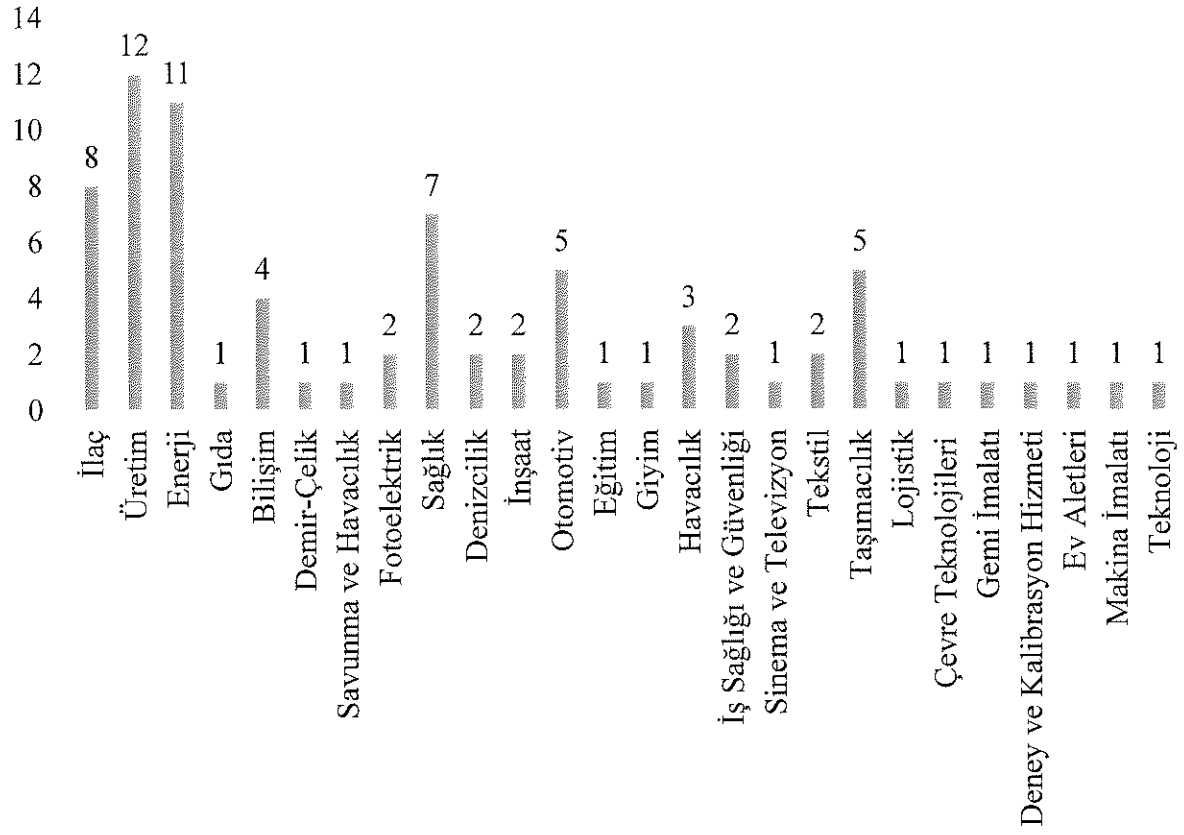
Yukarıda özetle değinilen ve HTEA kapsamında gerçekleştirilen çalışmalara ait istatistiksel bilgiler ise aşağıda yer almaktadır. Şekil 1.1.'de söz konusu çalışmaların yıllara göre frekans dağılımı görülmektedir.



Şekil 1.1. Yıllara göre HTEA uygulayan çalışmaların frekansları.

Şekil 1.1.'den de görüldüğü gibi, HTEA uygulamasının yapıldığı en fazla çalışma 2018 yılında gerçekleştirilmiştir. Şekil 1.2.'de ise, ilgili sektör veya konularına göre HTEA çalışmalarının frekansları görülmektedir.

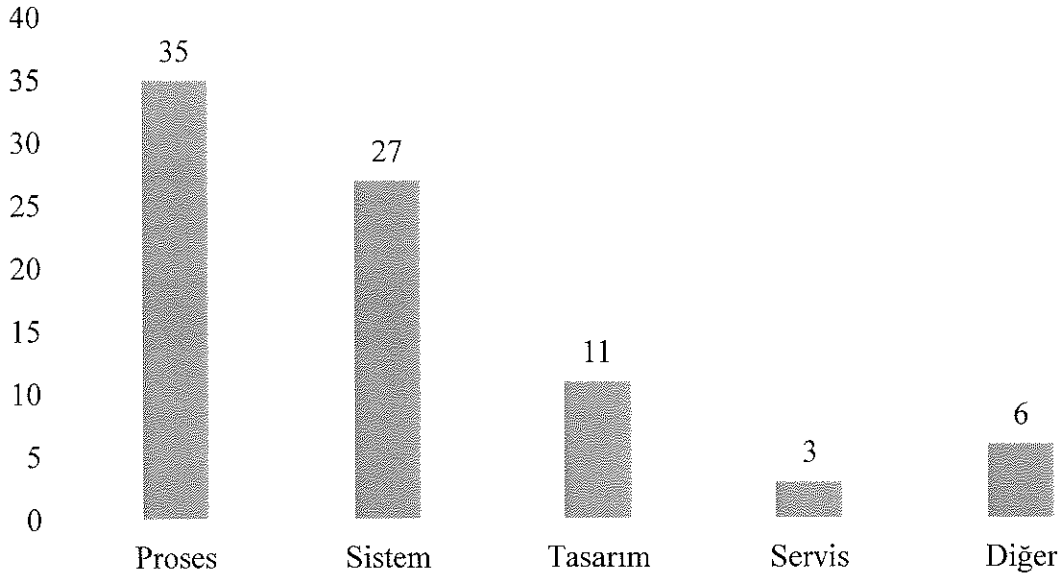
Sektörlere ve Konularına Göre HTEA Çalışma Sayısı



Şekil 1.2. Sektör ve konularına göre HTEA çalışmalarının frekansları.

Şekil 1.2.'den de görüldüğü gibi, en fazla üretim sektöründe HTEA uygulamasını konu alan çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunu, ilaç ve sağlık sektörleri izlemektedirler. Tez çalışmasının gerçekleştirildiği savunma ve havacılık sektörü için bir, havacılık sektörü için ise 3 adet çalışma gerçekleştirilmiştir. Literatür araştırması kapsamında incelenen ancak herhangi bir sektöre yönelik gerçekleştirilmeyen çalışmalar (toplamda 4 adet çalışma) Şekil 1.2.'ye yansıtılmamıştır. Şekil 1.3.'te ise uygulana HTEA türlerine göre çalışmaların frekans dağılımları verilmiştir.

HTEA Türleri ve HTEA Çalışma Sayısı



Şekil 1.3. HTEA türlerine göre HTEA çalışmalarının frekansları.

Şekil 1.3.'ten de görüldüğü gibi, en fazla proses türü HTEA uygulamasının yapıldığı çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Bunu, sistem ve tasarım HTEA türleri izlemektedirler. İncelenen çalışmalarda, bu dört HTEA türü dışında yeni bir HTEA'nın geliştirildiği çalışmalar, şekilde "Diğer" başlığı altında sınıflandırılmıştır.

(Ek 1)'de, kullanılan yöntemlere göre HTEA çalışmalarının sıklıkları görülmektedir. (Ek 1)'den de görüldüğü gibi, HTEA ile birlikte en çok kullanılan yöntemler Balık Kılçığı ve AHP yöntemleridir.

2. HATA TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİ (HTEA)

HTEA, ilk kez ABD ordusu tarafından geliştirilen bir yöntemdir ve 9 Kasım 1949 tarihinde yönetime dair ilk prosedür “Procedures for Performing a Failure Mode, Effects and Criticality Analysis” (Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi Uygulaması için Prosedür) olarak adlandırılan Askeri Prosedür (Military Procedure) MIL-P-1629 yayınlanmıştır. Yöntemin uygulanması, sistem ve ekipman hatalarının değerlendirilmesi üzerine gerçekleştirilmiştir [5]. Günümüzde; uzay, havacılık, savunma ve otomotiv sektörü başta olmak üzere pek çok sektörde, bilinen veya potansiyel hataları tanımlamak, ortadan kaldırmak veya yönetmek için yaygın olarak kullanılmaktadır.

1980 yılında, HTEA’ya yönelik yayınlanmış ilk standartlardan biri olan Hata Türü, Etkileri ve Kritiklik Analizi Uygulaması için Prosedür olarak adlandırılan Askeri Standart (Military Standard) MIL -STD 1629A’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 verilmiştir [5]. Omdahl 1988 yılında bu tanımı daha da genişleterek “HTEA tasarım, proses, sistem ve hizmet ile ilgili bilinen ve/veya olası hataları, yanlışları ve problemleri müşteriye ulaşmadan belirlemeyi, tanımlamayı ve ortadan kaldırmayı amaçlayan mühendislik tekniğidir” şeklinde belirtmiştir [104].

Stamatis’e göre [104, s. 22] HTEA ile:

“Hataların müşteriye ulaşmasını önlemek için gereken düzeltici faaliyetler belirlenecek, böylece bir ürün veya hizmette mümkün olan en yüksek devamlılık, kalite ve güvenilirlik sağlanacaktır.”

Buna göre, doğru uygulanan bir HTEA ile bilinen ve olası hata türleri tanımlanır, bunların sebep ve etkileri belirlenir, hesaplanan RÖD’ye göre hata türleri önceliklendirilir ve hatanın veya olasılığının ortadan kaldırılması/etkilerinin azaltılmasına yönelik aksiyonlar belirlenerek takip edilmesi sağlanır [104]. HTEA’da kullanılan kavramlar ise aşağıda açıklanmıştır.

Müşteri: HTEA’da müşteri, herhangi bir hata ortaya çıktığında, bunun doğuracağı sonuçlardan etkilenen departmanlar, kişiler ve proseslerdir. İç ve dış müşteri olarak ikiye ayrılmaktadır. Dış müşteri; bir işletmede çıkan nihai ürün veya hizmetin piyasada ulaştığı son noktadır. İç müşteri kavramına göre ise; bir ürün veya hizmetin, o işletme içerisinde dolaştığı süreçte, her departman, bir önceki departmanın iç müşterisi olarak görülmektedir [101].

Hata ve Hata Türü: Bir sistem, alt sistem, tasarım, hizmet veya sürecin, işlevini, belirlenen amaca uygun şekilde gerçekleştirememesidir. Burada belirlenen amaç, genellikle iç ve dış müşteri istek, ihtiyaç ve beklentileri doğrultusunda gerçekleştirilen analiz ve değerlendirmelerden elde edilmektedir [104]. Hata türü, hataların sınıflandırılması/kategorize edilmesiyle belirlenmektedir. Hata tipi/hata kategorisi olarak da ifade edilmektedir [19]. Hataya örnek; kırılma, yıpranma, paslanma olarak verilebilir. Hata türüne örnek; eksik delik, tolerans üstü/altı ölçü, uygun olmayan yüzey pürüzlülüğü olarak verilebilir.

Hata Nedeni: Hatanın oluşmasına sebep olan unsurdur. Bir hatanın birden çok nedeni olabilmektedir [101]. HTEA'nın en önemli noktalarından biridir ve HTEA'da, düzeltici ve/veya önleyici faaliyetlerin belirlenmesine temel oluşturan, kök nedenlerin araştırılması gereken aşamadır [104].

Hata Etkisi: Hata ve/veya hata türü önlenmediğinde veya düzeltilmediğinde, ortaya çıkaracağı etkisi/sonucudur. HTEA'da, iç ve dış müşterinin neyi fark edebileceği veya müşterinin başına ne gelebileceği düşünülerek tanımlanmaktadır. Mevcut ve/veya potansiyel hatalar, hata türleri, değerlendirilmekte, servis veya diğer parçalara yansımaları ve tümünün performansı üzerindeki etkisi belirlenmektedir. Ayrıca ilgili veya benzer hatalar ve ürün/hizmetlere dair geçmiş veriler dikkate alınmaktadır [19].

Mevcut Kontroller: Bir ürün, yarı mamul veya hizmetin, işlevlerini belirlenmiş amacına uygun şekilde gerçekleştirip gerçekleştirmediğini kontrol etmek için yapılan işlemlerdir. Bu kontrollerin, hata oluştuğundan sonra tespit edilmesinden çok; hata oluşmadan önce, oluşmasını önlemek amacıyla gerçekleştirilmesi amaçlanmalıdır.

HTEA, farklı bölümlerden bilgi ve deneyim sahibi kişilerin bir araya gelmesini gerektirdiği için bir takım çalışması eşliğinde uygulanır. Takımda, HTEA konusunda uzman, takımı koordine etmekten sorumlu bir lider olmalıdır. Bu bölümler, tasarım, proses testleri, üretim, montaj, kalite, bakım, satın alma gibi bölümler olabilir. Oluşturulan HTEA takımı ile yöntemin uygulanmasında; mevcut ve potansiyel hatalar/hata türleri belirlenmekte, bunların olasılık, etki ve keşfedilebilirliğine dair mevcut kontroller değerlendirilmektedir. Böylece, RÖD veya Risk Öncelik Puanı (RÖP) hesaplanmakta, bunun azaltılmasına yönelik faaliyetler belirlenmektedir. HTEA'nın kapsamı Şekil 2.1.'de verilmiştir.

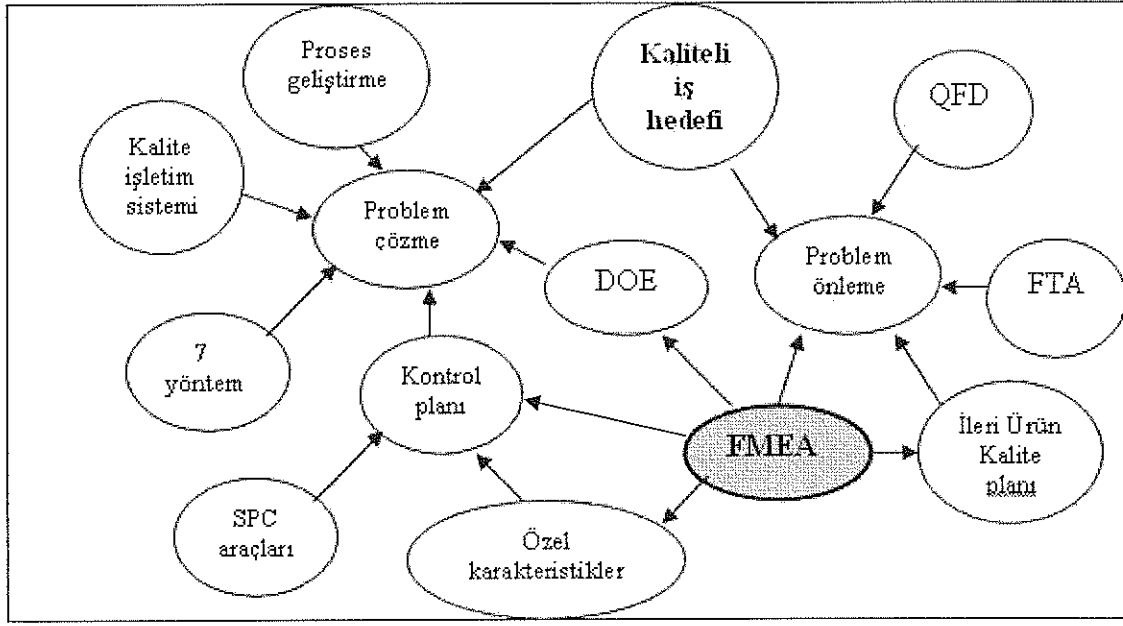


Şekil 2.1. HTEA'nın kapsamı.

1980'li yıllardan beri, kalite anlayışı, bir ürünün gerçekleştirilmesi veya hizmetin sağlanmasında, her aşamada ortaya çıkabilecek problemlerin belirlenerek, bunların ortadan kaldırılması ve kalitenin artırılmasına odaklanmıştır. Bu kapsamda, sürekli iyileştirme anlayışı gelişmiş, ortaya çıkan hataların değerlendirilerek tekrarlanmaması, aynı zamanda gelecekte oluşacak hataların önlenmesi önem kazanmıştır. HTEA'da, bu amaca hizmet eden bir metottur ve Toplam Kalite Yöntemi'nde önemli bir yere sahiptir. Toplam Kalite Yönetimi'nde, kalitenin sağlanması hedefi ve bu hedefe ulaşmada hatanın ortaya çıktıktan sonra yakalanmasına odaklanan kontrol yöntemleri yerine, hatanın oluşmasının önüne geçilmesi amaçlanır. Bu sebeple HTEA, Toplam Kalite Yönetimi'nde kullanılan önemli tekniklerden biridir [107].

HTEA aynı zamanda, Uluslararası Standardizasyon Örgütü (International Organization for Standardization-ISO) tarafından yayınlanan, ISO 9001 Kalite Yönetim Sistemi ve buna yönelik sektörel bazda geliştirilen (Havacılık, Uzay ve Savunma Sanayisi için Kalite Yönetim Sistemi Standardı AS9100 gibi) Kalite Yönetim Sistemlerinde de kullanılmaktadır. HTEA'nın kalite sistemindeki yeri ve görevi Şekil 2.2.'de sunulmuştur. Buna göre, şekilde yer alan yöntemlerden bazıları ile HTEA'nın ilişkisi aşağıda açıklanmaktadır:

FTA, bir sistemde meydana gelen hatalı ve normal olası olayların yaratacağı etkilerin, çeşitli kombinasyonlarını, mantıksal ve grafiksel olarak temsil eden bir modeldir. Hata ağacı kurulduktan sonra, hatalara dair kök nedenler belirlenmekte ve bunları önlemek için gerekli düzeltici/önleyici faaliyetler belirlenmektedir. Bu yönüyle FTA, hata nedenleri ve olasılıkların tespitinde, HTEA'yı destekleyici bir yöntem olarak kullanılabilir [104].



Şekil 2.2. Kalite sisteminde HTEA'nın rolü ([108]'den değiştirilerek).

DOE metodunda, bir sistem, proseste mevcut, bağımlı ve bağımsız değişkenler tanımlanarak, belirlenmiş bir planla, bağımsız değişkenler üzerinde değişiklikler gerçekleştirilir. Böylece, bağımlı değişken üzerindeki etkiler belirlenir. HTEA'da bu yöntem, hata üzerinde etkili faktörlerin belirlenerek, hata nedenlerinin tespit edilmesinde kullanılabilir [104].

Özel karakteristikler (significant characteristics), HTEA ekibi, tasarımcı, müşteri ve tedarikçinin ortak fikriyle tanımlanan, verilerinin toplanması gereken, bir proses, ürün veya hizmete dair kalite özellikleridir. HTEA, bir proses, ürün ve hizmete dair özel karakteristiklerin tanımlanmasında kullanılabilir [104].

Kontrol planı (control plan), bir ürün üzerinde gerçekleştirilmesi planlanan kalite kontrol faaliyetlerinin dokümanede edilmiş özetidir. Kontrol planı, müşteri için önemli olan ve özel kalite planlama faaliyetleri gerektiren proses parametreleri ve tasarım özelliklerini listeler. HTEA aracılığıyla kritik ve özel karakteristiklerin belirlenmesi, kontrol planı için girdi oluşturmaktadır [104].

HTEA'da olasılık (O), şiddet (Ş) ve keşfedilebilirlik (K) kriterleri kullanılarak hata türlerinin risk dereceleri belirlenir. Şiddet kriteri, bir hata ya da hata türünün ortaya çıkması durumunda yaratacağı zararın miktarı olarak tanımlanır. Aşağıda, Tablo 2.1.'de şiddet kriterine ait değerlendirme skalası yer almaktadır.

Tablo 2.1. Şiddet skalası [104]

Etki	Şiddetin Etkisi	Değer
Tehlikeli	Hata tehlikeye yol açmaktadır. Güvenlikle ilgili, aniden ortaya çıkan, beklenmedik hatalardır. Yasal gerekliliklerin dışına çıkılmasına sebep olur.	10
Ciddi	Hata potansiyel tehlike yaratmaktadır. Tehlike ortaya çıkmadan önce, zamana bağlı olmaksızın, ürün durdurabilir. Yasal gerekliliklerin dışına çıkılması söz konusudur.	9
Şiddetli	Müşteri yüksek derecede memnuniyetsizdir. Ürün çalışmaz ama güvenli durumdadır. Sistem çalışmaz durumdadır.	8
Büyük	Müşteri memnuniyetsizdir. Ürün performansı ciddi şekilde etkilenmiştir ancak ürün işlevsel ve güvenlidir. Sistem zarar görmüştür.	7
Önemli	Müşteri hata sebebiyle sorunlar yaşar. Hata sebebiyle ürün performansı düşmüş, ancak ürün çalışır durumda ve güvenlidir. Sistem kısmi zarar görmüş ancak işler durumdadır.	6
Orta	Müşteri hata sebebiyle bazı memnuniyetsizlikler yaşar. Hata, ürün veya sistem performansını orta düzeyde etkiler.	5
Düşük	Müşteri hatadan düşük düzeyde rahatsızlık duyar. Hata, ürün veya sistem performansını düşük düzeyde etkiler.	4
Hafif	Müşteri hatadan hafif düzeyde etkilenir. Hata, ürün veya sistem performansını hafif düzeyde etkiler.	3
Çok Hafif	Müşteri hatadan etkilenmez. Hata, ürün veya sistem performansını çok hafif düzeyde etkiler.	2
Yok	Hata etkiye sahip değildir.	1

Olasılık kriterinde ise, potansiyel gerçekleşme sebebine bağlı olarak; hatanın hangi durumlarda ortaya çıkabileceği ya da hatanın gerçekleşme sıklığı değerlendirilir. Tablo 2.2.'de olasılık kriterine ait değerlendirme skalası yer almaktadır.

Tablo 2.2. Olasılık skalası [104]

Hata Olasılığı	Hata Kümülatif Sayısı/1000	Değer
Neredeyse Kesin	>316	10
Çok Yüksek	316	9
Yüksek	134	8
Orta Derecede Yüksek	46	7
Orta	12,4	6
Küçük	2,7	5
Zayıf	0,46	4
Çok Zayıf	0,0063	3
Uzak	0,0068	2
Neredeyse hiç	<0,00058	1

Keşfedilebilirlik kriteri, hata müşteriye iletilmeden, ortaya çıkarılabilmek kabiliyetidir. Bir sistemde mevcut kontroller ve bunların gerçekleştirildiği aşamalar, hatanın keşfedilebilirliğini etkilemektedir. Tablo 2.3.'te keşfedilebilirlik kriterine ait, değerlendirme skalası yer almaktadır.

Tablo 2.3. Keşfedilebilirlik skalası [104]

Keşfedilebilirlik	Keşfedilebilirlik Olasılığı	Değer
Neredeyse İmkansız	Herhangi bir teknik bulunmamaktadır.	10
Çok Az	Kanıtlanmamış veya güvenlik olmayan teknik(ler) mevcuttur.	9
Az	Kurulmuş sistem bileşenleri ile birlikte, ürünler üzerinde testler mevcuttur.	8
Çok Düşük	Kurulmuş sistem bileşenleri ile birlikte, ürün prototipleri üzerinde testler mevcuttur.	7
Düşük	Benzer sistem bileşenleri üzerinde testler mevcuttur.	6
Orta	Üretim öncesi sistem bileşenleri üzerinde testler mevcuttur.	5
Orta Derecede Yüksek	Erken aşamalarda, prototip sistem elemanları üzerinde testler mevcuttur.	4
Yüksek	Erken aşamalarda simülasyon ve/veya modelleme mevcuttur.	3
Çok Yüksek	Erken tasarım aşamasında kanıtlanmış bilgisayar destekli analizler mevcuttur.	2
Hemen Hemen Kesin	Konsept aşamasında kanıtlanmış tespit yöntemleri mevcuttur.	1

Yukarıda değerlendirme skalaları verilen şiddet, olasılık ve keşfedilebilirlik kriterlerine atanan puanlar dikkate alınarak; Eşitlik (2.1)'deki gibi her bir hata türü için RÖD hesaplanır ve bu değer ilgili problemlerin önem önceliklerinin sıralanmasında kullanılır.

$$RÖD = \text{Ş} \times O \times K \quad (2.1)$$

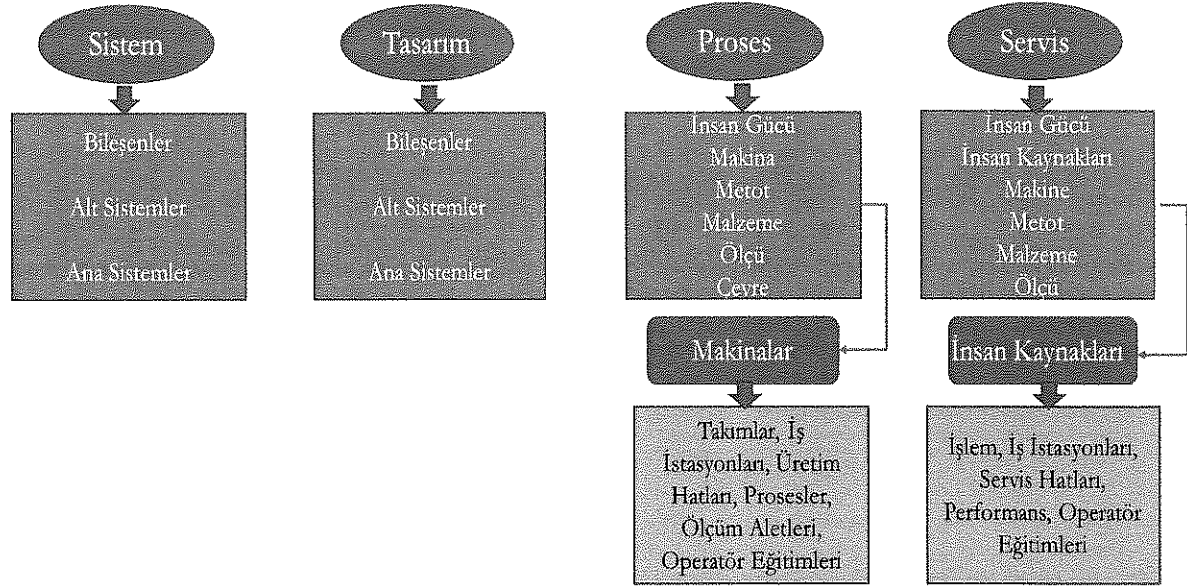
RÖD belirlendikten sonra riskin büyüklüğüne göre değerlendirilir. Genellikle bu risk HTEA ekibi tarafından küçük, orta, yüksek ve kritik olarak tanımlanır. Risk tanımı, farklı durumları yansıtacak şekilde değiştirilebilir. Buna göre [104]:

- Küçük risk altında, herhangi bir işlem yapılmaz.
- Orta derecede risk altında, bazı önlemler alınabilir.
- Yüksek risk altında, aksiyon alınması gerekmektedir. (Aksiyon, doğrulama ve değerlendirme gerektirebilir.)

- Kritik risk altında, aksiyonlar alınmalı ve bu aksiyonlar kapsamında ilgili sistem, tasarım, ürün, süreç ve/veya hizmette kapsamlı değişiklikler yapılması gerekmektedir.

2.1. Hata Türü ve Etkileri Analizi'nin Sınıflandırılması

Şekil 2.3.'te görüldüğü üzere HTEA, ilgili odak ve hedeflerine göre dört grupta sınıflandırılmaktadır.



Şekil 2.3. HTEA çeşitleri [104].

Sistem HTEA (S-HTEA): Konsept HTEA olarak da adlandırılmaktadır. Sistem ve alt sistemlerin tasarım ve konseptlerinin belirlenmesi aşamasında kullanılan HTEA türüdür. Sistem HTEA, sistem hataları sebebiyle sistem fonksiyonlarında oluşabilecek potansiyel hatalar ve hata türlerine odaklanır. Sistem ve sistem elemanları arasındaki etkileşimler kapsamında gerçekleştirilir [104].

Tasarım HTEA (T-HTEA): Üretim öncesinde, ürünlerin tasarım aşamasında gerçekleştirilen HTEA türüdür. Üründe ortaya çıkabilecek tasarım kaynaklı hata ve hata türlerine odaklanır. Sistem ve sistem elemanları arasındaki etkileşimler kapsamında gerçekleştirilir [104].

Proses HTEA (P-HTEA): Üretim ve montaj aşamasında yer alan prosesleri analiz etmede kullanılan HTEA türüdür. Üretim ve montaj kaynaklı hata ve hata türlerine odaklanır [104].

Servis HTEA (SR-HTEA): Hizmetin müşteriye ulaşmadan önce analiz edilmesi için kullanılan HTEA türüdür. Servis HTEA, ilgili servis ve süreç hatalarından kaynaklanan hata ve hata türlerine odaklanır [104].

Tez çalışmasında, savunma ve havacılık sanayisine yönelik gerçekleştirilen üretim süreçlerinde ortaya çıkan hata ve hata türlerine odaklanılmıştır. Bu sebeple, yukarıda belirtilen HTEA türlerinden P-HTEA'nın uygulanmasına karar verilmiştir.

2.2. Proses Tipi Hata Türü ve Etkileri Analizi (P-HTEA)

P-HTEA, ürünün imalat süreçlerindeki yetersizliklerden kaynaklanan hata türleri üzerine odaklanır. Her bir proseste kullanılan makinalar, aletler, çalışanlar ve tedarikçiler gibi ürünün kalitesine etki edecek unsurları analiz eder ve bu bileşenlerdeki eksiklere odaklanarak iyileştirme çalışmalarına yardımcı olur. P-HTEA'da amaç, kusursuz ürünler üretip bu kusursuzluğun devamını sağlamaktır. P-HTEA'da kullanılan girdiler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Process Flow Chart-Akış Haritaları,
- Kontrol planları,
- Uygunsuzluk kayıtları ve kalite geçmişi,
- Mevcut HTEA çalışmaları,
- Ürün kritik karakteristikleri.

P-HTEA'nın uygulanması, on bir adımdan oluşmaktadır. Aşağıda, bu on bir adıma ait detaylar verilmiştir.

Adım 1: P-HTEA'nın gerçekleştirilmesi kararlaştırılan prosese ait operasyon adımları belirlenir. Bu aşamada, genellikle proses akış diyagramlarından yararlanılmaktadır. Bu adım, sonraki adımlara temel oluşturacağı için, proses iyi analiz edilmeli, hiç bir proses operasyonu atlanmamalıdır.

Adım 2: Bir önceki adımda belirlenen operasyonlara ait, mevcut ve/veya potansiyel hata ve hata türleri belirlenir. Belirlenen hatalar ve hata türleri, önceden tanımlanan olasılık skalası (bkz. Tablo 2.2.) yoluyla değerlendirilerek bir ve on arasında puanlandırılır. Bir değeri, hatanın oluşma olasılığının en az olduğu, on değeri ise hatanın oluşma olasılığının en yüksek olduğu durumunu belirtmektedir. Bir ekip çalışması olarak gerçekleştirilen P-HTEA'nın bu aşamasında, beyin fırtınası yönteminden faydalanılmaktadır. Ayrıca, geçmişte ortaya çıkan hatalara ait kayıtlar analize dahil edilmelidir.

Adım 3: Bir önceki adımda tanımlanan hata ve hata türlerinin etkileri belirlenir. Bu etkiler önceden belirlenen şiddet skalası (bkz. Tablo 2.1.) yoluyla değerlendirilerek bir ve on arasında puanlandırılır. Bir değeri, hatanın ortaya çıkması durumunda vereceği en az zararı, on değeri ise en yüksek zararı belirtmektedir. Puanlandırma skalasının aralığı ve değerlendirme kriterleri, P-HTEA'nın gerçekleştirildiği süreç ve kapsamına bağlı olarak belirlenebilmektedir.

Adım 4: Adım 2'de tanımlanan hata ve hata türlerinin nedenleri belirlenir. Bu aşamada, beyin fırtınası ve kök neden analizi gibi yöntemlerden faydalanılmaktadır. P-HTEA'nın ilerleyen aşamalarında gerçekleştirilecek iyileştirme faaliyetleri, bu nedenlerin ortadan kaldırılmasına yönelik olarak belirlenecektir.

Adım 5: Adım 2'de tanımlanan hata ve hata türlerine yönelik mevcut kontroller belirlenmektedir. Mevcut kontroller, önceden belirlenen keşfedilebilirlik skalası (bkz. Tablo 2.3.) yoluyla değerlendirilerek bir ve on arasında puanlandırılır. Bir değeri, keşfedilebilirliğin en yüksek, on değeri keşfedilebilirliğin en düşük olduğunu belirtmektedir.

Adım 6: Adım 2, 3 ve 5'te hesaplanan olasılık, şiddet ve keşfedilebilirlik değerlerinin çarpılmasıyla, RÖD elde edilir. Hesaplanan RÖD, riskin tanımına göre değerlendirilerek (genellikle küçük, orta, yüksek ve kritik), risklerin önem öncelikleri belirlenir.

Adım 7: Hata ve hata türlerinin nedenlerini ortadan kaldırmak, etkisini azaltmak veya mevcut kontrolleri arttırmaya yönelik, alınacak düzeltici ve önleyici faaliyetler tanımlanır. Bu faaliyetlerin gerçekleştirilmesinden ve takibinden sorumlu birim ve kişiler belirlenerek, faaliyetler için hedeflenen tamamlanma/geçerlilik tarihleri atanmaktadır.

Adım 8: Adım 7'de tanımlanan düzeltici ve önleyici faaliyetlerin gerçekleştirilmesi durumunda beklenen RÖD hesaplanır. Gerçekleştirilecek düzeltici ve önleyici faaliyetler sonucunda RÖD'nin düşmesi beklenmektedir.

Adım 9: Adım 7'de tanımlanan düzeltici ve önleyici faaliyetler tamamlanarak doğrulanması gerçekleştirilir.

Adım 10: P-HTEA ekibi, tekrar bir araya gelerek, tamamlanan düzeltici ve önleyici faaliyetler doğrultusunda RÖD'leri hesaplayarak P-HTEA'yı günceller.

Adım 11: Sürekli iyileştirme yaklaşımı kapsamında, periyodik olarak P-HTEA gözden geçirilir, Adım-1'e geri dönlür.

2.3. Çok Kriterli Karar Verme-ÇKKV Yöntemleri (Multi Criteri Decision Making-MCDM Methods)

Karar verme, hayatın her safhasında insanların karşılaştığı bir süreçtir. Bir hedefe ulaşmak amacıyla, karar sonucu üzerinde etkili belirli kriterler ve kısıtlar altında, en doğruyu belirleme yöntemidir [109]. ÇKKV yöntemleri de, pek çok kriter ve kısıtların bulunduğu karar verme problemlerinde, karar vericinin en doğruyu seçmesine yardımcı olmak amacıyla geliştirilen yöntemlerdir. Temelde, alternatifler arasında üstünlük ilişkisi kurularak, sıralanmaları gerçekleştirilmektedir.

ÇKKV problemleri, genellikle iki aşamada ele alınmaktadır: ilk aşama, her bir alternatif için kriter ağırlıklarının atanması, diğeri ise, alternatiflerin genel uzlaşmış bir memnuniyet derecesine göre sıralanmasıdır. Kullanılan ÇKKV yöntemleri 4 gruba ayrılmaktadır: üst derecelendirme yöntemleri, değer ve fayda teorisi yaklaşımları, etkileşimli çok amaçlı programlama yöntemleri, grup kararı ve uzlaşmaya dayalı yöntemler [110]. ÇKKV ile ilgili bazı kavramlar aşağıda belirtilmiştir.

Alternatifler: Bir ÇKKV problemindeki tercih seçenekleridir. ÇKKV yöntemlerinin amacı, en iyi tercihin yani alternatifin belirlenmesidir [106].

Kriterler: Karar verici tarafından tanımlanan, alternatiflerin temel özellikleri, kaliteleri veya verimlilik parametreleridirler [106].

Kriter ağırlıkları: ÇKKV problemlerinin çözümünde, her bir kriterin göreceli önemini gösteren bir veriye ihtiyaç duyulur. Kriterlere ait göreceli önem değerlerinin toplamı, genellikle toplamı bir olacak şekilde normalize edilmiş ağırlıklar kümesinden oluşmaktadır [105].

Karar Matrisi: ÇKKV problemlerinde, alternatifler, kriterler ve bunların sonuçlarının gösterildiği matrislerdir. Satırlar, üstünlük derecesine göre sıralanacak olan alternatifleri, sütunlar ise alternatiflerin değerlendirileceği kriterleri ifade etmektedir [106].

Gerçekleştirilen tez çalışmasında, savunma ve havacılık sanayisine yönelik olarak geliştirilecek, yeni P-HTEA yönteminde, kriterlerin ağırlıklandırılması ve alternatiflerin sıralanması aşamalarında ÇKKV yöntemleri kullanılmıştır. Buna göre, kriterlerin ağırlıklandırılması aşamasında PSI, Entropi ve CRITIC yöntemleri, alternatiflerin sıralanması aşamasında ise EDAS, CODAS, COPRAS ve TPOP yöntemleri uygulanmıştır.

2.4. PSI Yöntemi

Tercih Seçim İndeksi (PSI) yöntemi, Maniya and Bhatt [94] tarafından, 2010 yılında ÇKKV problemlerini çözmek için geliştirilmiştir. PSI yönteminin çözüm metodolojisi varyans hesabını içermektedir ve bu yönüyle istatistik bilimine dayanmaktadır. Sonuçlar, az sayıda ve basit hesaplamalar ile elde edilmektedir. Bu yöntem, kriter sayısına bağlı olmaksızın kullanılabilir. Yöntemde, kriterler arasında göreceli bir önem değeri atanması gerekli değildir. Buna göre, kriterler arasındaki göreceli önem değerlerinin karşılaştırılmasında, fikir ayrılığı olduğu durumlarda avantajlıdır [6]. Ayrıca bu yöntemde, kriterlerin alternatiflere göre aldıkları nicel değerlerden hareketle kriter önem ağırlıkları hesaplanmaktadır. Bu sebeple yöntem, ayrı bir kriter ağırlıklandırma yaklaşımına ihtiyaç olmadan alternatifleri sıralayabilmektedir. Çalışmada, söz konusu avantajları sebebiyle, kriterlerin ağırlıklandırılması aşamasında PSI yöntemi kullanılmıştır. PSI yönteminin adımları aşağıda verilmiştir [94].

Adım 1: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması ve normalize edilmesi.

PSI yöntemi, Eşitlik (2.2)'de verilen başlangıç karar matrisi $[X]$ 'in oluşturulması ile başlar. $[X]$ 'in her bir elemanı, x_{ij} olarak ifade edilir. Burada, $i; i = 1, 2, \dots, m$ alternatifleri, $j; j = 1, 2, \dots, n$ kriterleri göstermektedir. Buna göre x_{ij} , i . alternatifin j . kritere göre performans değerini tanımlar. $[X]$ içerisinde, fayda ve maliyet türü olmak üzere iki farklı kriter grubu bulunabilir. Fayda türü kriterlerde, alternatiflerin her zaman yüksek değerler alması istenirken, maliyet türü kriterlerde alternatiflerin düşük değerlere sahip olması beklenir. Bu nedenle $[X]$, Eşitlik (2.3)'teki gibi fayda ve maliyet türü kriterler için ayrı ayrı normalize edilerek; normalize karar matrisi $[N]$ elde edilir.

$$[X] = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{m1} & x_{m2} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \text{fayda kriteri için } x_{ij}^* &= \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} \\ \text{maliyet kriteri için } x_{ij}^* &= \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Burada;

x_{ij}^* : i . alternatifin j . kritere göre normalize performans değerini,

$\max x_{ij}$: j . kriterin bütün alternatifler arasındaki maksimum değerini,

$\min x_{ij}$: j . kriterin bütün alternatifler arasındaki minimum değerini göstermektedir.

Adım 2: Kriterler için ortalama normalize performans değerlerinin hesaplanması.

Her bir kriter için normalize performans değerlerine ait ortalama değer \bar{x}_j^* , Eşitlik (2.4)'teki gibi hesaplanır

$$\bar{x}_j^* = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (2.4)$$

Adım 3: Kriterler için tercih değişkenliği değerlerinin hesaplanması.

Her bir kritere ait tercih değişkenliği değeri PV_j Eşitlik (2.5)'teki gibi hesaplanır.

$$PV_j = \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j^*)^2 \quad (2.5)$$

Adım 4: Kriterler için tercih değerindeki sapmanın hesaplanması.

Her bir kriter için tercih değerindeki sapma ϕ_j , Eşitlik (2.6)'daki gibi hesaplanır.

$$\phi_j = |1 - PV_j| \quad (2.6)$$

Adım 5: Kriter ağırlıklarının hesaplanması.

Her bir kriter için ağırlık değeri w_j^p , Eşitlik (2.7)'deki gibi hesaplanır.

$$w_j^p = \frac{\phi_j}{\sum_{j=1}^n \phi_j} \quad (2.7)$$

Tüm kriterlere ait w_j^p değerlerinin toplamı "1" olmalıdır. Başka bir deyişle, $\sum_{j=1}^n w_j^p = 1$ olarak ifade edilebilir.

Adım 6: Alternatif ağırlıklarının hesaplanması

Son adımda, her bir alternatif için sıralama ağırlık indeksi I_i Eşitlik (2.8)'deki gibi elde edilir.

$$I_i = \sum_{j=1}^n x_{ij}^* \cdot w_j^p \quad (2.8)$$

İndeks değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanarak alternatiflere ilişkin bir sıralama elde edilir. İndeks değeri en yüksek olan alternatif, en iyi alternatif olarak nitelendirilir.

Ancak tez çalışmasında PSI yöntemi, sadece kriter ağırlıklandırması amacıyla kullanılmıştır ve bu nedenle Adım 6 uygulanmamıştır.

2.5. Entropi Yöntemi

Entropi, günümüzde özellikle fizik, matematik ve mühendisliğin bir çok alanında kullanılmaktadır. İlk olarak, 1865 yılında Rudolp Clausius tarafından tanımlanan entropi [83, s. 444]:

“Bir sistemin iş yapma enerjisinin bulunamamasının termodinamikte bir ölçütüdür, ayrıca bir düzensizlik ölçütüdür; entropi arttıkça bozuklukta artar.”

şeklinde tanımlanmıştır. Bilgi entropisi kavramı ise, ilk olarak 1948 yılında, Shannon tarafından belirsizliğin ölçüsü olarak tanımlanmıştır. Bilgi entropisi fikrine göre; karar verme ortamından elde edilen bilginin sayısı veya kalitesi, karar verme probleminin doğruluğu ve güvenilirliği üzerinde etkilidir [7]. Bu nedenle entropi yöntemi, farklı karar verme problemlerinde kullanılabilen, ayrıca, bir veri setindeki yararlı bilgi miktarının ölçülmesinde etkili bir yöntemdir. Bu nedenle çalışmada, kriterlerin ağırlıklandırılması aşamasında entropi yöntemi kullanılmıştır. Entropi yönteminin uygulama adımları aşağıda yer almaktadır [93].

Adım 1: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması ve normalize edilmesi

Entropi yöntemi, Eşitlik (2.2)'de verilen başlangıç karar matrisi $[X]$ 'in oluşturulması ile başlar. $[X]$ 'te birbirinden farklı kriterlerin eşölçülemezlik üzerindeki etkilerini yok etmek amacıyla kriterler, çeşitli yöntemlerle standartlaştırılabilmektedir. Buna göre, fayda ve maliyet türü kriterler Eşitlik (2.3) yardımıyla normalize edilir ve normalize karar matrisi $[N]$ elde edilir.

Adım 2: Farklı ölçü birimlerindeki aykırılıkları yok etmek için normalizasyonun gerçekleştirilmesi

Farklı ölçü birimlerindeki aykırılıkları yok etmek için normalizasyon yapılarak P_{ij} Eşitlik (2.9)'daki gibi hesaplanır.

$$P_{ij} = \frac{\alpha_{ij}}{\sum_{i=1}^n \alpha_{ij}}; \quad \forall j \quad (2.9)$$

Burada;

P_{ij} : i . alternatifin j . kritere göre normalize değerini,

α_{ij} : i . alternatifin j . kritere göre, kriterin fayda veya maliyet türü olmasına göre değişen Adım 1'deki normalizasyon işlemi sonucunda elde edilen normalize değerini göstermektedir.

Adım 3: Kriterler için entropi değerlerinin hesaplanması.

Bu adımda, her bir kriter için entropi E_j Eşitlik (2.10) yardımıyla hesaplanır.

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m [P_{ij} \ln P_{ij}]; \quad \forall j \quad (2.10)$$

Burada,

k : entropi katsayısıdır ve $(\ln(m))^{-1}$ olarak elde edilir.

E_j : j . kritere ait entropi değeridir.

Adım 4: Kriterlere ait entropiden uzaklaşma değerlerinin hesaplanması.

Bu adımda, her bir kriter için d_j entropiden uzaklaşma değeri (The Degree of Divergence), Eşitlik (2.11) yardımıyla hesaplanır.

$$d_j = 1 - E_j; \quad \forall j \quad (2.11)$$

Adım 5: Kriter ağırlıklarının hesaplanması.

Eşitlik (2.12) yardımıyla, j kriterinin önem derecesi olarak; w_j^e ağırlığı hesaplanır.

$$w_j^e = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_j}; \quad \forall j \quad (2.12)$$

Burada;

w_j^e : j . kriterin Entropi yöntemine göre ağırlığını göstermektedir.

d_j : j . kritere ait entropiden uzaklaşma değeridir.

2.6. CRITIC Yöntemi

CRITIC yöntemi ilk kez 1995 yılında Diakoluaki et al. [7] tarafından, ÇKKV problemleri için objektif olarak kriterlerin ağırlıklarını belirleme yaklaşımı olarak geliştirilmiştir. Yönteme göre, karar vericinin olmadığı durumlarda, nesnel ağırlıklandırma yapılabilmektedir. Böylece, karar vericiye kriterlerin görelî önemini ifade etmede kolaylık sağlamaktadır. Ayrıca kriterlerin ağırlıklandırılmasında, baskın olmayan öz nitelikleri bulundurmamaktadır [102].

Yöntemde, alternatiflerin performans değerleri arasındaki korelasyon ve değişkenlik miktarına odaklanılarak kriter ağırlıkları elde edilmektedir. CRITIC yöntemi de, PSI ve

Entopi gibi alternatiflerin sıralanması için başka bir kriter ağırlıklandırma yöntemine ihtiyaç duymamaktadır. CRITIC; standart sapması yüksek, diğer kriterler ile korelasyonu düşük olan kritere daha yüksek ağırlık değeri atamaktadır. CRITIC yönteminin adımları aşağıda verilmiştir [95].

Adım 1: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması.

Eşitlik (2.2)'ye göre başlangıç karar matrisi $[X]$ oluşturulur.

Adım 2: Başlangıç karar matrisinin normalize edilmesi.

Eşitlik (2.3)'e göre, $[X]$, fayda ve maliyet türü kriterler için ayrı ayrı normalize edilerek $[N]$ oluşturulur.

Adım 3: Kriterlere ait standart sapma değerlerinin hesaplanması.

Her bir kriterin alternatiflere göre aldığı değerler kapsamında standart sapmanın hesaplanması için Eşitlik (2.13) kullanılır.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.13)$$

Adım 4: Kriterler arasındaki ilişki düzeyinin belirlenmesi.

$[X]$ 'teki performans değerleri dikkate alınarak; kriterler arasındaki ilişki düzeyi r_{jt} , Eşitlik (2.14) ve (2.15) kullanılarak korelasyon katsayısının elde edilmesi ile belirlenir.

$$Cov(j, t) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_j - \bar{x}_j)(x_t - \bar{x}_t)}{n-1} \quad (2.14)$$

$$r_{jt} = \frac{Cov(jt)}{\sigma_j \sigma_t} \quad (2.15)$$

Burada;

$Cov(j, t)$: j . ve t . kriter arasındaki kovaryans değerini,

\bar{x}_j : j . kriterin alternatiflere göre aldığı değerlerin ortalamasını,

\bar{x}_t : t . kriterin alternatiflere göre aldığı değerlerin ortalamasını,

σ_j : j . kriterin alternatiflere göre aldığı değerler arasındaki standart sapma değerini,

σ_t : t . kriterin alternatiflere göre aldığı değerler arasındaki standart sapma değerini,

n : kriter sayısını göstermektedir.

Adım 5. Her bir kriter için bilgi miktarının hesaplanması.

Her bir kriterin alternatiflere göre aldığı değerler kapsamında bilgi miktarının hesaplanması için Eşitlik (2.16) kullanılır.

$$C_j = \sigma_j \sum_{t=1}^n (1 - r_{jt}) \quad (2.16)$$

Burada;

C_j : j . kriterin içerdiği bilgi miktarını,

σ_j : j . kritere ait standart sapma değerini,

r_{jt} : j . ve t . ($t = 1, \dots, m$) kriterler arasındaki korelasyon katsayısını göstermektedir.

Adım 6. Her bir kriterin önem ağırlığının hesaplanması.

Her bir kriterin ağırlığını (w_j^c) bulabilmek için, Eşitlik (2.17) uygulanır.

$$w_j^c = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (2.17)$$

Burada;

w_j^c : j . kriterin CRITIC yönteminden elde edilen ağırlığıdır.

2.7. EDAS Yöntemi

EDAS yöntemi 2015 yılında, Ghorabae et al. [101] tarafından, yeni bir ÇKKV metodu olarak geliştirilmiştir ve birbirleriyle çelişen kriterlerin olduğu durumlarda kullanılabilir. VIKOR ve TOPSIS gibi diğer ÇKKV yöntemleriyle karşılaştırıldığında; diğer yöntemlerde alternatiflerin pozitif ve negatif çözümden uzaklıklarının hesaplanmasıyla en iyi çözüm elde edilirken, EDAS yönteminde en iyi çözüm üzerindeki etkilerine göre ortalama çözümden uzaklıklar hesaplanarak en iyi alternatif belirlenmektedir. Aşağıda, alternatiflerin sıralandırılmasında kullanılan EDAS yönteminin adımları verilmiştir [101].

Adım 1: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması.

EDAS'ta ilk adım, Eşitlik (2.2)'deki gibi, başlangıç karar matrisi $[X]$ 'in oluşturulmasıdır.

Adım 2: Ortalama değerler matrisinin oluşturulması.

Bütün kriter değerlerinin ortalaması alınarak; aşağıdaki Eşitlik (2.18)'de gösterildiği gibi ortalama değerler matrisi $[AV]$ elde edilir.

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij}}{m} \quad (2.18)$$

Burada; AV_j , alternatiflerin j . kritere ait performans değerlerinin ortalamasını göstermektedir.

Adım 3: Kriterler için ortalama pozitif uzaklık matrisi ve ortalama negatif uzaklık matrisinin oluşturulması.

Ortalamadan pozitif uzaklık matrisi (Positive Distance From Average-PDA) [PDA] ve ortalamadan negatif uzaklık matrisi (Negative Distance From Average-NDA) [NDA] her bir kriter için hesaplanır. Kriterlerin fayda türü ya da maliyet türü olmasına göre bu değerlerin hesaplanması değişkenlik gösterir.

Fayda türü kriterler için Eşitlik (2.19) ve (2.20)'de verilen denklemler kullanılır.

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (x_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (2.19)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - x_{ij}))}{AV_j} \quad (2.20)$$

Maliyet türü kriterler için Eşitlik (2.21) ve (2.22)'de verilen denklemler kullanılır.

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - x_{ij}))}{AV_j} \quad (2.21)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (x_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (2.22)$$

PDA_{ij} ve NDA_{ij} sırasıyla, i . alternatifin j . kriterdeki ortalama çözüme olan pozitif ve negatif uzaklıklarını göstermektedirler.

Adım 4: Alternatifler için ağırlıklı toplam pozitif ve negatif değerlerin hesaplanması.

Bütün alternatifler için ağırlıklı toplam pozitif ve negatif değerler, Eşitlik (2.23) ve (2.24) kullanılarak hesaplanır.

$$SP_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot PDA_{ij} \quad (2.23)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^n w_j \cdot NDA_{ij} \quad (2.24)$$

Burada;

SP_i : i . alternatifin ağırlıklı toplam pozitif değerini ve

SN_i , i . alternatifin ağırlıklı toplam negatif değerini göstermektedir.

Adım 5: Alternatifler için ağırlıklı toplam pozitif ve negatif değerlerin normalize edilmesi.

Bütün alternatifler için ağırlıklı toplam pozitif ve negatif değerler, Eşitlik (2.25) ve (2.26) kullanılarak normalize edilir.

$$NSP_i = \frac{SP_i}{maks_i(SP_i)} \quad (2.25)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{maks_i(SN_i)} \quad (2.26)$$

Burada;

NSP_i : i . alternatifin normalize edilmiş ağırlıklı toplam pozitif değerini,

NSN_i : i . alternatifin normalize edilmiş ağırlıklı toplam negatif değerini göstermektedir.

Adım 6: Alternatiflerin sıralanması.

Son olarak, her bir alternatif için değerlendirme puanları aşağıdaki Eşitlik (2.27) kullanılarak hesaplanır.

$$AS_i = \frac{1}{2} \times (NSP_i + NSN_i) \quad (2.27)$$

Burada;

AS_i : i . alternatifin değerlendirme puanını göstermektedir ve $0 \leq AS_i \leq 1$ koşulu sağlanmalıdır.

AS_i değerlerine göre alternatifler için sıralama yapılır. En büyük AS_i değerine sahip olan alternatif en iyi alternatif olarak belirlenir.

2.8. CODAS Yöntemi

CODAS yöntemi 2016 yılında, Ghorabae et al. [9] tarafından geliştirilmiştir. Yönteme göre, alternatiflerin sıralanmasında iki ölçütten faydalanılır. Bunlardan ilki, alternatiflerin negatif ideal çözümden Öklid uzaklıkları, ikincisi ise kriter farksızlıklarıyla ilişkili alternatiflere ait Taksicab uzaklıklarıdır. Buna göre, öncelikle Öklid mesafesi dikkate alınarak kıyaslama gerçekleştirilir. Öklid mesafesine göre kıyaslanamayan alternatifler, Taksicab mesafesine göre karşılaştırılır [9]. Yöntemde, alternatiflerin negatif ideal çözüme olan uzaklıkların dikkate alınması sebebiyle, daha uzak mesafelere sahip alternatif daha iyi alternatif olarak değerlendirilmektedir. CODAS yönteminin adımları aşağıda verilmiştir [9].

Adım 1: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması ve normalize edilmesi.

CODAS yöntemi, Eşitlik (2.2)'de verilen başlangıç karar matrisi $[X]$ 'in oluşturulması ile başlar. $[X]$, Eşitlik (2.3) ile fayda ve maliyet türü kriterler için ayrı ayrı normalize edilir ve normalize karar matrisi $[N]$ elde edilir.

Adım 2: Ağırlıklandırılmış karar matrisinin oluşturulması.

Normalize başlangıç karar matrisi $[N]$, Eşitlik (2.28) kullanılarak ağırlıklandırılmış karar matrisi $[R]$ 'ye dönüştürülür. $[R]$ 'nin her bir elemanı r_{ij} olarak ifade edilir.

$$r_{ij} = w_{ij} \cdot x_{ij}^* \quad (2.28)$$

Burada;

x_{ij}^* : i . alternatifin j . kritere göre normalize edilmiş performans değerini göstermektedir.

r_{ij} : i . alternatifin j . kritere göre normalize edilmiş ağırlıklı performans değerini göstermektedir.

w_j : j . kriterin ağırlığını gösterir ve $\sum_{j=1}^n w_j = 1$ 'dir.

Adım 3: Negatif ideal çözümün belirlenmesi.

Negatif ideal çözüm (nokta), Eşitlik (2.29) ve (2.30) kullanılarak belirlenir.

$$ns = [ns_j]_{1 \times n} \quad (2.29)$$

$$ns_j = \min r_{ij} \quad (2.30)$$

Burada;

ns_j : j . kriter için hesaplanan negatif ideal çözüm değeridir.

Adım 4: Alternatifler için negatif ideal çözümden Öklid ve Taksicab uzaklıklarının hesaplanması.

Alternatiflerin negatif-ideal çözümden Öklid ve Taksicab uzaklıkları sırasıyla, Eşitlik (2.31) ve (2.32) kullanılarak hesaplanır.

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - ns_j)^2} \quad (2.31)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^n |r_{ij} - ns_j| \quad (2.32)$$

Burada;

E_i : i . alternatifin negatif çözümden Öklid uzaklığını,

T_i : i . alternatifin negatif çözümden, Taksicab uzaklığını göstermektedir.

Adım 5: Göreli değerlendirme matrisinin oluşturulması.

Göreli değerlendirme matrisi $[Ra]$, Eşitlik (2.33) ve (2.34)'teki gibi oluşturulur.

$$Ra = [h_{ik}]_{m \times n} \quad (2.33)$$

$$h_{ik} = (E_i - E_k) + (\psi(E_i - E_k) * (T_i - T_k)) \quad (2.34)$$

Burada; $k \in \{1, 2, \dots, m\}$ ve ψ , iki alternatifin Öklid uzaklıklarının eşitliğini tanımak için bir eşik fonksiyonunu belirtir ve aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$\psi = \begin{cases} 0, & |x| < \tau \\ 1, & |x| \geq \tau \end{cases} \quad (2.35)$$

Bu fonksiyonda τ , karar verici tarafından belirlenebilen bir eşik parametresidir. Bu parametrenin 0,01 ve 0,05 arasında bir değer alması önerilir. İki alternatifin Öklid uzaklıkları arasındaki fark τ 'dan az ise, bu iki alternatif Taksicab uzaklığı ile karşılaştırılır.

Buna göre τ değeri, iki alternatifin Öklid uzaklıklarının eşitliğini tanımlamak için bir eşik fonksiyonunu belirtmektedir. Bu çalışmada, Öklid uzaklıklarının eşitliğini tanımlamak üzere, geleneksel CODAS yönteminden farklı olarak, Öklid uzaklıkları arasındaki değişkenliğin belirlenmesi kararlaştırılmıştır. Bu amaçla, hesaplanan Öklid uzaklıklarının değişkenliği τ değerini belirlemek için, Öklid uzaklıkları (E_i) değerleri arasındaki varyans (σ_j) değeri, Eşitlik (2.36) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\sigma_j^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (E_i - \bar{E})^2}{n - 1} \quad (2.36)$$

Adım 6: Alternatiflerin sıralanması.

Her bir alternatifin değerlendirme puanı H_i , Eşitlik (2.37) kullanılarak hesaplanır.

$$H_i = \sum_{k=1}^m h_{ik} \quad (2.37)$$

H_i değerleri, büyükten küçüğe doğru sıralanır. Alternatifler arasında en yüksek H_i puanına sahip olan alternatif, en iyi alternatif olarak belirlenir.

2.9. COPRAS Yöntemi

COPRAS yöntemi, 1996 yılında Zavadskas et al. [96] tarafından geliştirilmiştir. ÇKKV problemlerinde, fayda ve maliyet kriterlerinin her ikisi için de kullanılabilir. COPRAS yönteminin avantajları, Mulliner et al. [8] tarafından şu şekilde açıklanmaktadır; yöntem kullanımı kolaydır ve AHP, TOPSIS gibi diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla hesaplama süresi düşüktür. Yöntemde, alternatiflerin performans indeksi yüzde olarak gösterilmektedir. Bu sayede, bir alternatifin diğer alternatiften ne kadar iyi veya kötü olduğu belirlenebilmekte ve alternatif sıralaması daha net bir şekilde elde edilebilmektedir. COPRAS yönteminin uygulama adımları aşağıda verilmiştir [97; 98].

Adım 1: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması.

COPRAS yöntemi, Eşitlik (2.2)'de verilen başlangıç karar matrisi $[X]$ 'in oluşturulması ile başlar.

Adım 2: Karar matrisinin normalize edilmesi.

Normalize edilmiş karar matrisi $[N]$, Eşitlik (2.38) yardımıyla oluşturulur.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad \forall j = 1, 2, \dots, n \quad (2.38)$$

Adım 3: Ağırlıklandırılmış karar matrisinin oluşturulması.

Ağırlıklandırılmış karar matrisi $[R]$; Eşitlik (2.39) kullanılarak normalize edilmiş karar matrisi elemanlarının, kriterlere verilen w_j ağırlık değerleri ile çarpılması sonucu elde edilir.

$$r_{ij} = x_{ij}^* \cdot w_j \quad (2.39)$$

Adım 4: Fayda ve maliyet türü kriterlere göre alternatif değerlerinin hesaplanması.

Fayda türü kriterler için alternatif değerleri S_i^+ ve maliyet türü kriterler için S_i^- Eşitlik (2.40) ve (2.41) yardımıyla hesaplanır.

$$\text{fayda türü kriterlere göre } S_i^+ = \sum_{j=1}^k r_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (2.40)$$

$$\text{maliyet türü kriterlere göre } S_i^- = \sum_{j=k+1}^n r_{ij} \quad i = k + 1, k + 2, \dots, n \quad (2.41)$$

Adım 5: Alternatiflerin göreceli önem değerlerinin hesaplanması.

Alternatiflerin göreceli önem değerleri Q_i ; Eşitlik (2.42) yardımıyla hesaplanır. Hesaplamalar sonucu en yüksek Q_i değerini alan alternatif, en iyi alternatif olarak belirlenir.

$$Q_i = S_i^+ + \frac{\sum_{i=1}^m S_i^-}{S_i^- \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_i^-}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.42)$$

Adım 6: En yüksek göreceli önem değerlerinin hesaplanması.

En yüksek göreceli önem değeri Q_{max} ise, (2.43) numaralı Eşitlik ile bulunmaktadır.

$$Q_{max} = \{Q_i\} \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (2.43)$$

Adım 7: Her bir alternatif için performans indeksi değerlerinin hesaplanması.

Her bir alternatif için performans indeksi P_i , Eşitlik (2.44) yardımıyla hesaplanır.

$$P_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} \cdot 100\% \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (2.44)$$

Bulunan P_i indeksi 100 olan alternatif en iyi alternatiftir. Alternatiflerin tercih sıralaması, performans indeks değerlerinin büyükten küçüğe doğru sıralanmasıyla bulunur.

2.10. TPOP Yöntemi

TPOP yöntemi, 2015 yılında Bairagi et al. [100] tarafından geliştirilmiştir. Birden çok ÇKKV yönteminin kullanılması durumunda, alternatifler için elde edilen farklı sıralamaların, karar verme aşamasında oluşturacağı karışıklığı ortadan kaldırmak üzere geliştirilen sistematik bir ÇKKV yaklaşımıdır. TPOP yönteminde kullanılan hesaplamalar basittir ve uygulanması kolay bir yöntemdir. Ayrıca, baskınlık teorisinde kullanılan

geleneksel yaklaşımlara ait alternatiflerin son sıralamaları yerine, TPOP yönteminde, alternatiflere ait son seçim ağırlıkları kullanılmaktadır. Bu da, hesaplama yöntemini kolaylaştırmakta, gereksiz karışıklığı ortadan kaldırmaktadır [10].

Çalışmada, üç farklı ÇKKV yönteminden elde edilen alternatif sıralamalarını birleştirerek, nihai alternatif sıralamasının belirlenmesinde TPOP yöntemi kullanılmıştır. TPOP yönteminin adımları aşağıda verilmiştir [100].

Adım 1: Alternatif sıralama matrisinin oluşturulması.

Farklı ÇKKV yaklaşımlarına göre bulunan alternatiflerin sıralama ağırlıkları kullanılarak $[S]$ matrisi Eşitlik (2.45)'teki gibi oluşturulur.

$$[S] = \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \dots & s_{1v} \\ s_{21} & s_{22} & \dots & s_{2v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ s_{m1} & s_{m2} & \dots & s_{mv} \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

Burada;

i : alternatifleri ($i = 1, \dots, m$),

b : Kullanılan ÇKKV yaklaşımlarını ($b = 1, \dots, v$),

s_{ib} : i . alternatifin b . geleneksel yaklaşıma göre seçilme değerini (sıralama ağırlığı) göstermektedir ve $[S]$ 'nin her bir elemanını ifade etmektedir.

Adım 2: Alternatif sıralama matrisinin normalize edilmesi.

$[S]$ 'de yer alan alternatif sıralama ağırlıkları, Eşitlik (2.46) ile normalize edilir.

$$J_{ib} = \frac{|s_{ib}|}{\sum_{i=1}^m |s_{ib}|} \quad (2.46)$$

Burada;

J_{ib} : i . alternatifin b . ÇKKV yaklaşımına göre elde edilen sıralama ağırlığının normalize değeridir ve $0 \leq J_{ib} \leq 1$ olmalıdır.

Adım 3: Alternatiflerin sıralama ağırlıklarına ait entropi değerlerinin hesaplanması.

Alternatif sıralama ağırlıklarının entropisi, Eşitlik (2.47)'ye göre hesaplanır.

$$e_b = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m J_{ib} \cdot \ln |J_{ib}| \quad (2.47)$$

e_b : b . ÇKKV yaklaşımının sıralama ağırlıklarına ait entropi değeridir.

Adım 4: Kullanılan her bir ÇKKV yaklaşımı için ağırlıkların hesaplanması.

Her bir ÇKKV yaklaşım için, ağırlık değerleri Eşitlik (2.48)'e göre hesaplanır.

$$g_b = \frac{1 - e_b}{\sum_{b=1}^v (1 - e_b)} \quad (2.48)$$

g_b : b . ÇKKV yaklaşımına ait ağırlık değeridir ve $\sum_{b=1}^v g_b = 1$ 'dir. Geleneksel entropi yönteminde, söz konusu g_b değerleri ağırlık olarak kabul edilmektedir. Uygulamada bu değer, bazı alternatiflerin karar üzerinde baskınlık kurmalarına yol açarak; bazı alternatiflere çok büyük ağırlıklar atanmasına sebep olmaktadır. Bununla birlikte aynı değer, bazı alternatiflerin karar üzerinde etkisiz hale gelmesine yol açarak çok az ağırlık atanmasına neden olmaktadır. TPOP yöntemiyle, bundan sonraki 5 ve 7 arasındaki uygulama adımları; sadece büyük ağırlığa sahip alternatiflerin etkisini azaltmaya değil, aynı zamanda düşük ağırlıklara sahip alternatiflerin etkisini de arttırmak üzere geliştirilmiştir.

Adım 5: Her bir ÇKKV yaklaşımı için g'_b değerlerinin hesaplanması.

g'_b değerleri, Eşitlik (2.49)'a göre hesaplanır. Elde edilen g'_b değerleri $1 \leq g'_b \leq 2$ aralığındadır.

$$g'_b = (1 + \sqrt{g_b}) \quad (b = 1, 2, \dots, v) \quad (2.49)$$

Adım 6: G'_b değerlerinin hesaplanması.

G'_b değeri, Eşitlik (2.50)'ye göre hesaplanır. Elde edilen G'_b değeri $b \leq G'_b \leq 2b$ aralığındadır ve geleneksel yaklaşım sayısını ifade eden $b \geq 2$ dir.

$$G'_b = \sum_{b=1}^v g'_b = \sum_{b=1}^v (1 + \sqrt{g_b}) = v + \sum_{b=1}^v \sqrt{g_b} \quad (2.50)$$

Adım 7: Her bir ÇKKV yaklaşımı için kesin ağırlıkların hesaplanması.

b . yaklaşım için kesin sıralama ağırlık değeri (g_b^*), Eşitlik (2.51) kullanılarak hesaplanır ve $(\sum_{b=1}^v g_b^*) = 1$ dir. Adım 4'te tüm g_b değerlerinin toplamının 1'e eşit olduğu belirtilmiştir ve buna göre $\max \sum_{b=1}^v \sqrt{g_b} = \sqrt{v}$ ve $\min \sum_{b=1}^v \sqrt{g_b} = 1$ dir. Buradan kolaylıkla; $\max \sum_{b=1}^v (1 + \sqrt{g_b}) = v + \sqrt{v}$ ve $\sum_{b=1}^v (1 + \sqrt{g_b}) = v + 1$ çıkarımı yapılabilmektedir. Bu durum ayrıca şu şekilde de ifade edilebilir; g_b değeri "0" iken, $\min g'_b = \min (1 + \sqrt{g_b}) = 1$ ve g_b değeri "1" iken, $\max g'_b = \max (1 + \sqrt{g_b}) = 2$ dir. Böylece, g_b değerlerinin maksimum ve minimum limitleri, Eşitlik (2.52) ve (2.53)'teki

biçimde tanımlanabilir. Buna göre, kesin sıralama ağırlık değerleri $\frac{1}{v+\sqrt{v}} \leq g_b^* \leq \frac{2}{v+1}$ aralığındadır.

$$g_b^* = \frac{g'_b}{G'_b} = \frac{1 + \sqrt{g_b}}{t + \sum_{b=1}^v \sqrt{g_b}} \quad (2.51)$$

$$\min g_b^* = \frac{\min g'_b}{\max G'_b} = \frac{\min(1 + \sqrt{g_b})}{\max(t + \sum_{j=1}^t \sqrt{g_b})} = \frac{1}{t + \sqrt{t}} \quad (2.52)$$

$$\max g_b^* = \frac{\max g'_b}{\min G'_b} = \frac{\max(1 + \sqrt{g_b})}{\min(t + \sum_{j=1}^t \sqrt{g_b})} = \frac{2}{t + 1} \quad (2.53)$$

Adım 8: Her bir ÇKKV yaklaşımı için alternatiflerin sıralama ağırlıklarının normalize edilmesi.

Eşitlik (2.54) ve/veya Eşitlik (2.55) kullanılarak, alternatiflerin sıralanması için alternatiflerin sıralama ağırlıkları normalize edilir.

$$p_{ib} \begin{cases} \frac{(S_b)_{maks} - s_{ib}}{(S_b)_{maks} - (S_b)_{min}}, & s_{ib} \in H \\ \frac{s_{ib} - (S_b)_{min}}{(S_b)_{maks} - (S_b)_{min}}, & s_{ib} \in L \end{cases} \quad (2.54)$$

$$(2.55)$$

p_{ib} : i. alternatifin, b. yaklaşıma göre normalize s_{ib} değeridir. Düşük p_{ib} değerine sahip olan alternatif, optimal çözüme daha yakın alternatiftir.

b. geleneksel yaklaşım için, alternatiflerin sıralanmasında, daha yüksek s_b değeri isteniliyor ise; $s_{ib} \in H$

b. geleneksel yaklaşım için, alternatiflerin sıralanmasında, daha düşük s_b değeri isteniliyor ise; $s_{ib} \in L$

Adım 9: Alternatifler için eksponansiyel ağırlıklı normalize sıralama değerlerinin hesaplanması.

Her bir alternatif için, eksponansiyel ağırlıklı normalize sıralama değeri (u_{ib}), Eşitlik (2.56) kullanılarak hesaplanır.

$$u_{ib} = \exp(g_b^* + p_{ib}) \quad (2.56)$$

Adım 10: Alternatifler için nihai seçim indeksinin hesaplanması.

Her bir alternatif için nihai seçim indeksi FRW_i , Eşitlik (2.57) kullanılarak hesaplanır.

$$FRW_i = \sum_{b=1}^v u_{ib} = \sum_{b=1}^v \exp(g_b^* + p_{ib}) \quad (2.57)$$

Adım 11: Alternatiflerin sıralanması

FRW_i , her bir alternatif için ideal referans noktasından göreceli uzaklığı gösterir. En düşük FRW_i değerine sahip olan alternatif, en iyi alternatiftir. Bu mantığa göre, alternatif sıralaması gerçekleştirilir.

2.11. Spearman Sıralamalı Korelasyon Katsayısı

Spearman Sıralamalı Korelasyon Katsayısı yöntemi, sıralamalı ölçekle ölçülen iki değişken arasındaki ilişkiyi açıklar ve hesaplama yönteminde, değişkenlerin kendi değerleri üzerinden değil, sıra sayıları üzerinden değerlendirme gerçekleştirir. Spearman Sıralamalı Korelasyon Katsayısı -1 ile +1 arasında değişen değerler almakta, değişkenler arasında ilişki olmadığı durumda katsayı sıfıra yaklaşmaktadır. İlişki kuvvetlendikçe değer -1 veya 1'e yaklaşmakta, katsayı işaretinin pozitif olması aynı yönlü ilişkiyi, negatif olması ters yönlü ilişkiyi göstermektedir. Spearman Sıralamalı Korelasyon Katsayısı Eşitlik (2.58) kullanılarak hesaplanır [103].

$$r_s = 1 - \frac{6 * \sum Z_i^2}{n * (n^2 - 1)} \quad (2.58)$$

Burada;

r_s : Spearman Korelasyon Katsayısı'nı,

Z_i : İki değişken sıralamaları arasındaki farkı,

n : Örneklem büyüklüğünü göstermektedir.

3. ÖNERİLEN YAKLAŞIMIN SAVUNMA VE HAVACILIK SANAYİSİNDE FAALİYET GÖSTEREN BİR FİRMADA UYGULANMASI

3.1. Problem Tanımı

Savunma ve havacılık sanayisinde üretilen ürünlerin yüksek doğruluk ve hassasiyetle imalatının gerekmesi, ürünlerde ortaya çıkabilecek kalite problemlerinin olumsuz hayati sonuçlar yaratabilmesi, savunma gücünde yetersizliğin yaşanabilmesi nedenleriyle üretim süreçlerinde yaşanabilecek potansiyel hataların önceden belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Bu kapsamda tez çalışmasında, savunma ve havacılık sanayisinde faaliyet gösteren bir firmanın üretim süreçlerinde ortaya çıkabilecek proses temelli hataların belirlenebilmesi ve önlem önceliklerinin tanımlanabilmesi amacıyla, firma tarafından da kullanılan HTEA temelinde etkin bir analiz yöntemi geliştirilmiştir.

3.2. Firma Tanıtımı

Küçükpazarlı Aerospace (KPA), Hasan ve Sefa Küçükpazarlı kardeşler tarafından kalıp üretimi yapmak üzere 1975 yılında kurulmuştur. 15000 m² kapalı alana sahip firma, kalıp, montaj ve imalat tesislerinden oluşmaktadır. 2014 yılı içerisinde, atmosfer kontrollü AMS2750E ve BAC5621'e göre klas 2 tip C fırın yatırımı ile ısıtım işlem tesisi kurulmuştur. Yakın gelecekte de, kaplama-boyama özel süreçlerinin gerçekleştirileceği ayrı bir tesisin kurulması planlanmaktadır. Yaklaşık 350 çalışana sahip KPA, TUSAŞ (TAI)'ın en büyük yan sanayisidir. Aynı zamanda, büyük ve karmaşık parçaların üretiminde TAI'den sonra Türkiye'nin ikinci büyük üretici firmasıdır.

KPA, dahil olduğu 14 farklı havacılık projesinde yapısal ve kritik parça sınıfında olan ve dünya çapında çok az sayıda firmanın üretebildiği parçalar da dahil olmak üzere toplamda 1400 farklı parçanın üretimini başarıyla sürdürmektedir ve yılda ortalama 400.000 adet parçanın sevkiyatını gerçekleştirmektedir. Bu parçaların çoğu için KPA tek tedarikçi konumundadır.

Kuruluşundan bu güne, milli projelerde de gücünü ve kabiliyetlerini gösteren KPA, ilk milli taarruz helikopteri olan ATAK Helikopteri, ilk milli insansız hava aracı olan ANKA (TIHA), Türk başlangıç ve temel eğitim uçağı olan Hürkuş ve Meltem – II sistem

entegrasyonu projelerinde en kritik parçaların üretimini üstlenmiştir ve halen üretimlerine devam etmektedir.

3.3. Önerilen Bütünleşik HTEA Yaklaşımı

Önerilen yaklaşım iki aşamadan oluşmaktadır. Birinci aşamada, PSI, Entropi ve CRITIC yöntemleri kullanılarak kriter ağırlıkları hesaplanmış ve daha sonra bu üç yöntem tarafından elde edilen ağırlıklar birleştirilmiştir. İkinci aşamada ise, EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemleri ile hata türleri sıralanmıştır. Üç farklı yöntemden elde edilen alternatif sıralamaları TPOP Yöntemi ile birleştirilerek nihai alternatif sıralamaları elde edilmiştir.

Aşama 1: Entropi-PSI-CRITIC yöntemleri kullanılarak önerilen bütünleşik ağırlıklandırma yöntemiyle kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesi.

Önerilen bütünleşik kriter ağırlıklandırma yönteminin adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 1.1.: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması.

Eşitlik (2.2)'de verilen başlangıç karar matrisi $[X]$ oluşturulur.

Adım 1.2.: Entropi, PSI ve CRITIC yöntemleri kullanılarak kriter ağırlıklarının hesaplanması.

Dikkate alınan kriterlerin önem ağırlıkları CRITIC, Entropi ve PSI yöntemleri ile hesaplanır. Her bir yönetime ilişkin uygulama prosedürü bir önceki bölümde verilmiştir.

Adım 1.3.: Nihai kriter ağırlıklarının hesaplanması.

CRITIC, Entropi ve PSI yöntemlerinden elde edilen kriter ağırlıkları Eşitlik (3.1) kullanılarak birleştirilir ve kriterler için nihai önem ağırlıkları hesaplanır [99].

$$w_j = \frac{(w_j^c \times w_j^{en} \times w_j^p)^{1/3}}{\sum_{j=1}^n (w_j^c \times w_j^{en} \times w_j^p)^{1/3}} \quad (3.1)$$

Burada,

w_j^c : j . kriter için CRITIC yöntemiyle hesaplanan kriter ağırlığını,

w_j^{en} : j . kriter için Entropi yöntemiyle hesaplanan kriter ağırlığını,

w_j^p : j . kriter için PSI yöntemiyle hesaplanan kriter ağırlığını,

w_j : j . kriter için nihai önem ağırlığını göstermektedir.

Aşama 2: EDAS-CODAS-COPRAS yöntemleri kullanılarak alternatiflerin (hata türlerinin) sıralanması ve TPOP yöntemiyle nihai sıralamanın elde edilmesi.

Önerilen bütünleşik alternatif sıralama yaklaşımının adımları aşağıda verilmiştir.

Adım 2.1.: EDAS, CODAS, COPRAS yöntemlerini kullanarak alternatiflere ilişkin sıralamaların elde edilmesi.

Kriterler için belirlenen nihai önem ağırlığı, w_j değerleri kullanılarak; EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemleriyle ayrı ayrı olmak üzere hata türlerine ait sıralama ağırlıkları hesaplanır.

Adım 2.2.: TPOP yöntemiyle nihai alternatif sıralama ağırlıklarının belirlenmesi.

EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinden elde edilen hata türlerine ait sıralama ağırlıkları, TPOP Yöntemi ile birleştirilir ve hata türlerinin nihai sıralaması elde edilir.

3.4. Uygulama

3.4.1. Entropi-PSI-CRITIC yöntemleri kullanılarak önerilen bütünleşik ağırlıklandırma yöntemiyle kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesi

Önerilen yaklaşımla sıralanacak alternatifler, uygulamanın gerçekleştirildiği firmada tanımlanmış olan hata türleri olarak belirlenmiştir. Firmada tanımlanmış elli dokuz farklı hata türü vardır ve bunlar Tablo 3.1.'de gösterilmiştir.

Hata türlerinin değerlendirilmesi için altı adet kriter tanımlanmıştır. Bunlar: hata oranı, tespit yeri skoru, frekans, hurda işçilik maliyeti, hurda malzeme maliyeti ve yeniden işleme maliyetidir. Hata oranı; tespit edilen hatalı parça adetinin, üretilen parça adetine bölünerek 100 ile çarpılması sonucu elde edilmiştir ve birimi yoktur. Tespit yeri skoru; hatanın tespit edildiği operasyon adımına veya yere göre skorlandırılmasıyla elde edilmiştir. İlgili skorlandırma firma tarafından belirlenerek mevcut durumda da uygulanmaktadır. Buna göre,

- Ara kontrol operasyonlarında tespit edilen hatalar için 1,
- Giriş kontrol operasyonlarında tespit edilen hatalar için 2,
- Son kontrol operasyonlarında tespit edilen hatalar için 4,
- İlk müşteride tespit edilen hatalar için 8,
- Son müşteride tespit edilen hatalar için 16 skoru kullanılmaktadır.

Skorlandırmadan da anlaşılacağı üzere, hatanın tespit edildiği aşama geciktikçe, yarattığı olumsuz etki artacaktır. Frekans; hatanın oluşma sıklığıdır. Hurda işçilik maliyeti; oluşan hatalar sonucunda hurda olan parçalar için hesaplanan işçilik maliyetidir. Hatalı parça için olan işçilik süresinin (saat/parça), saatlik işçilik ücreti (TL) ve hurda parça sayısı ile çarpılmasıyla elde edilmiştir ve birimi TL'dir. Hurda malzeme maliyeti, oluşan hatalar sonucunda hurda olan parçalar için hesaplanan malzeme maliyetidir ve birimi TL'dir.

Yeniden işleme maliyeti ise, oluşan hatalar sonucunda yeniden işlenen parçalar için hesaplanan işçilik maliyeti, varsa malzeme maliyeti ve diğer fason işlem maliyetlerinin toplamıdır. Yeniden işlenecek parçalar için harcanacak olan işçilik süresinin (saat/parça), saatlik işçilik ücreti (TL) ve parça sayısı ile çarpılması, varsa diğer fason işlem maliyetleri (TL) ve malzeme maliyetlerinin (TL) toplanmasıyla elde edilmiştir ve birimi TL'dir.

Buna göre tez çalışmasında, uygulamanın yapıldığı firmaya ait, 2018 yılı Ocak ayından, 2019 yılı Ağustos ayına kadar olan hata kayıtları kullanılmıştır. Önerilen bütünleşik kriter ağırlıklandırma yönteminin adımları, uygulamanın yapıldığı firma için aşağıdaki gibi işletilmiştir.

Adım 1: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması.

Başlangıç karar matrisi $[X]$, Eşitlik (2.2) kullanılarak Tablo 3.1'deki gibi oluşturulmuştur.

Tablo 3.1. Başlangıç karar matrisi

Alternatifler ($i = 1, \dots, 59$)	Kriterler ($j = 1, \dots, 6$)					
	Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	x_{i4}	x_{i5}	x_{i6}
C00	1,730	2,000	2,000	6,250	0,515	0,250
C02	7,810	1,000	1,000	0,250	1,030	65,694
D00	2,540	1,000	4,000	21,750	3,151	0,300
D01	2,300	1,000	8,000	1470,400	14102,900	0,250
D02	6,200	2,000	10,000	3715,442	15609,546	0,125
D03	2,670	2,000	4,000	709,500	4622,140	0,200
D04	1,280	1,000	1,000	9,750	7,539	0,600
D05	9,090	1,000	1,000	18,329	9,318	0,200
D06	0,740	1,000	1,000	17,083	3,276	0,250
D07	1,890	3,000	19,000	1084,200	36175,329	0,500
D99	66,670	2,000	3,000	0,750	6,233	341,400
H01	3,920	1,000	1,000	62,500	26,494	0,250
H04	6,540	6,000	3,000	62,500	56,151	0,250
H05	14,290	1,000	1,000	218,750	1176,000	0,250
H06	12,630	3,000	9,000	1009,075	9447,870	0,500
H07	0,380	1,000	1,000	28,325	99,680	0,190
H09	11,230	1,000	43,000	7056,617	20128,123	0,200
H10	5,420	1,000	31,000	3162,792	7634,972	0,460
H11	0,610	2,000	1,000	0,750	5,000	38,050
H12	1,420	4,000	4,000	31,250	120,980	0,500
H99	0,160	1,000	1,000	24,996	120,000	0,250

Tablo 3.1. devam ediyor

I00	6,370	4,000	2,000	37,500	11,024	0,300
I02	34,600	2,000	16,000	270,825	235,958	262,308
I99	25,000	2,000	1,000	0,250	4,970	0,750
M00	100,000	2,000	1,000	27,925	95,260	0,400
M02	49,960	2,000	1,000	13,333	2,195	0,250
M03	8,910	3,000	2,000	20,000	13,306	0,500
M08	0,880	2,000	1,000	11,500	5,060	0,075
M09	24,480	2,000	8,000	1686,700	1858,690	0,250
M10	0,260	2,000	7,000	398,700	21697,200	0,500
M99	0,580	2,000	2,000	150,000	944,478	0,125
N01	2,860	2,000	53,000	1926,792	2883,784	50,000
N02	4,550	1,000	1,000	0,750	5,330	47,500
N03	6,180	1,000	3,000	473,900	7302,077	0,025
N05	17,490	3,000	7,000	858,325	9049,787	0,250
N06	5,260	1,000	1,000	189,575	556,263	0,500
N07	0,330	1,000	1,000	7,917	4,040	0,500
N08	0,370	1,000	2,000	15,000	3,528	74,000
N09	0,080	4,000	1,000	17,917	19,810	0,100
N12	2,770	3,000	2,000	0,250	4,910	43,240
N13	1,100	1,000	2,000	406,267	567,375	0,250
N14	3,650	1,000	125,000	9358,604	37640,238	1,000
N16	3,670	1,000	107,000	11677,958	70885,205	0,480
N17	1,630	1,000	13,000	190,275	356,171	0,150
N20	8,330	1,000	1,000	1200,000	61,910	0,200
N99	7,110	2,000	10,000	169,150	1086,135	0,075
S00	21,980	2,000	1,000	0,375	6,320	75,000
S03	25,000	2,000	2,000	0,250	4,910	125,000
S04	57,500	2,000	3,000	0,275	8,300	56,250
S05	14,470	2,000	15,000	125,417	203,830	205,750
S06	70,180	2,000	11,000	0,030	10,200	175,275
S07	3,090	2,000	2,000	0,120	5,100	19,275
S09	36,360	2,000	2,000	0,210	4,200	4,000
S10	40,760	3,000	3,000	7,900	0,589	1,500
S11	6,670	2,000	1,000	0,250	0,462	0,500
S99	26,820	2,000	32,000	217,725	656,090	405,500
T05	0,170	1,000	1,000	20,825	94,980	0,050
T08	4,260	3,000	3,000	50,000	187,866	101,875
T99	2,630	2,000	1,000	156,150	139,615	0,200

Adım 2: Entropi, PSI ve CRITIC yöntemleri kullanılarak kriter ağırlıklarının hesaplanması.

Dikkate alınan kriterlerin önem ağırlıkları Entropi, PSI ve CRITIC yöntemleri kullanılarak aşağıdaki gibi hesaplanmıştır.

Adım 2.1. Entropi yöntemiyle kriter ağırlıklarının hesaplanması.

Adım 2.1.1: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması ve normalize edilmesi.

Başlangıç Karar matrisi $[X]$, Tablo 3.1.'de görülmektedir. $[X]$ 'de yer alan kriterlerin hepsi maaliyet türü kriterler olduğu için, Eşitlik (2.3) kullanılarak normalizasyon işlemi gerçekleştirilmiştir. Tablo 3.2.'de maliyet türü normalize değerler yer almaktadır.

Tablo 3.2. Maliyet kriterleri için normalize değerler

Alternatifler ($i = 1, \dots, 59$)	Kriterler ($j = 1, \dots, 6$)					
	Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
	x_{i1}^*	x_{i2}^*	x_{i3}^*	x_{i4}^*	x_{i5}^*	x_{i6}^*
C00	0,046	0,500	0,500	0,0048000	0,8970874	0,1000000
C02	0,010	1,000	1,000	0,1200000	0,4485437	0,0003805
D00	0,031	1,000	0,250	0,0013793	0,1466201	0,0833333
D01	0,035	1,000	0,125	0,0000204	0,0000328	0,1000000
D02	0,013	0,500	0,100	0,0000081	0,0000296	0,2000000
D03	0,030	0,500	0,250	0,0000423	0,0001000	0,1250000
D04	0,063	1,000	1,000	0,0030769	0,0612813	0,0416667
D05	0,009	1,000	1,000	0,0016368	0,0495815	0,1250000
D06	0,108	1,000	1,000	0,0017561	0,1410256	0,1000000
D07	0,042	0,333	0,053	0,0000277	0,0000128	0,0500000
D99	0,001	0,500	0,333	0,0400000	0,0741176	0,0000732
H01	0,020	1,000	1,000	0,0004800	0,0174379	0,1000000
H04	0,012	0,167	0,333	0,0004800	0,0082278	0,1000000
H05	0,006	1,000	1,000	0,0001371	0,0003929	0,1000000
H06	0,006	0,333	0,111	0,0000297	0,0000489	0,0500000
H07	0,211	1,000	1,000	0,0010591	0,0046348	0,1315789
H09	0,007	1,000	0,023	0,0000043	0,0000230	0,1250000
H10	0,015	1,000	0,032	0,0000095	0,0000605	0,0543478
H11	0,131	0,500	1,000	0,0400000	0,0924000	0,0006570
H12	0,056	0,250	0,250	0,0009600	0,0038188	0,0500000
H99	0,500	1,000	1,000	0,0012002	0,0038500	0,1000000
I00	0,013	0,250	0,500	0,0008000	0,0419086	0,0833333
I02	0,002	0,500	0,063	0,0001108	0,0019580	0,0000953
I99	0,003	0,500	1,000	0,1200000	0,0929577	0,0333333
M00	0,001	0,500	1,000	0,0010743	0,0048499	0,0625000
M02	0,002	0,500	1,000	0,0022501	0,2104784	0,1000000
M03	0,009	0,333	0,500	0,0015000	0,0347212	0,0500000
M08	0,091	0,500	1,000	0,0026087	0,0913043	0,3333333
M09	0,003	0,500	0,125	0,0000178	0,0002486	0,1000000
M10	0,308	0,500	0,143	0,0000752	0,0000213	0,0500000
M99	0,138	0,500	0,500	0,0002000	0,0004892	0,2000000

Tablo 3.2. devam ediyor

N01	0,028	0,500	0,019	0,0000156	0,0001602	0,0005000
N02	0,018	1,000	1,000	0,0400000	0,0866792	0,0005263
N03	0,013	1,000	0,333	0,0000633	0,0000633	1,0000000
N05	0,005	0,333	0,143	0,0000350	0,0000511	0,1000000
N06	0,015	1,000	1,000	0,0001582	0,0008305	0,0500000
N07	0,242	1,000	1,000	0,0037893	0,1143564	0,0500000
N08	0,216	1,000	0,500	0,0020000	0,1309524	0,0003378
N09	1,000	0,250	1,000	0,0016744	0,0233216	0,2500000
N12	0,029	0,333	0,500	0,1200000	0,0940937	0,0005782
N13	0,073	1,000	0,500	0,0000738	0,0008143	0,1000000
N14	0,022	1,000	0,008	0,0000032	0,0000123	0,0250000
N16	0,022	1,000	0,009	0,0000026	0,0000065	0,0520833
N17	0,049	1,000	0,077	0,0001577	0,0012971	0,1666667
N20	0,010	1,000	1,000	0,0000250	0,0074624	0,1250000
N99	0,011	0,500	0,100	0,0001774	0,0004254	0,3333333
S00	0,004	0,500	1,000	0,0800000	0,0731013	0,0003333
S03	0,003	0,500	0,500	0,1200000	0,0940937	0,0002000
S04	0,001	0,500	0,333	0,1090909	0,0556627	0,0004444
S05	0,006	0,500	0,067	0,0002392	0,0022666	0,0001215
S06	0,001	0,500	0,091	1,0000000	0,0452941	0,0001426
S07	0,026	0,500	0,500	0,2500000	0,0905882	0,0012970
S09	0,002	0,500	0,500	0,1428571	0,1100000	0,0062500
S10	0,002	0,333	0,333	0,0037975	0,7843803	0,0166667
S11	0,012	0,500	1,000	0,1200000	1,0000000	0,0500000
S99	0,003	0,500	0,031	0,0001378	0,0007042	0,0000617
T05	0,471	1,000	1,000	0,0014406	0,0048642	0,5000000
T08	0,019	0,333	0,333	0,0006000	0,0024592	0,0002454
T99	0,030	0,500	1,000	0,0001921	0,0033091	0,1250000

Adım 2.1.2: Farklı ölçü birimlerindeki aykırılıkları yok etmek için normalizasyonun gerçekleştirilmesi.

Eşitlik (2.9) kullanılarak normalize karar matrisi $[N]$ elde edilmiştir ve Tablo 3.3'te gösterilmiştir.

Adım 2.1.3: Kriterler için Entropi değerlerinin hesaplanması

Her bir kriter için Eşitlik (2.10) ile E_j değeri hesaplanarak, Tablo 3.4'te verilmiştir.

$k = 1/\ln.m$, sabit bir sayı olmak üzere $0 \leq E_j \leq 1$ olmasını sağlar. Bu çalışmada, $m = 59$ olduğu için $k = 1/\ln59 = 0,245246$ olarak elde edilmiştir.

Tablo 3.4'te elde edilen değerlere bakıldığı zaman, en yüksek entropi değerinin "tespit yeri skoru" kriterine ait olduğu görülmektedir. Buradan, ilgili kritere ait bilgi eksikliği düzeyinin de fazla olduğu anlaşılmaktadır.

Tablo 3.3. Normalize başlangıç karar matrisi.

Alternatifler ($i = 1, \dots, 59$)	Kriterler ($j = 1, \dots, 6$)					
	Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
	P_{i1}	P_{i2}	P_{i3}	P_{i4}	P_{i5}	P_{i6}
C00	0,011	0,013	0,016	0,0020493	0,1740054	0,0175303
C02	0,002	0,026	0,032	0,0512322	0,0870027	0,0000667
D00	0,007	0,026	0,008	0,0005889	0,0284395	0,0146086
D01	0,008	0,026	0,004	0,0000087	0,0000064	0,0175303
D02	0,003	0,013	0,003	0,0000034	0,0000057	0,0350605
D03	0,007	0,013	0,008	0,0000181	0,0000194	0,0219128
D04	0,015	0,026	0,032	0,0013136	0,0118866	0,0073043
D05	0,002	0,026	0,032	0,0006988	0,0096172	0,0219128
D06	0,025	0,026	0,032	0,0007498	0,0273543	0,0175303
D07	0,010	0,009	0,002	0,0000118	0,0000025	0,0087651
D99	0,000	0,013	0,011	0,0170774	0,0143764	0,0000128
H01	0,005	0,026	0,032	0,0002049	0,0033824	0,0175303
H04	0,003	0,004	0,011	0,0002049	0,0015959	0,0175303
H05	0,001	0,026	0,032	0,0000586	0,0000762	0,0175303
H06	0,001	0,009	0,004	0,0000127	0,0000095	0,0087651
H07	0,049	0,026	0,032	0,0004522	0,0008990	0,0230661
H09	0,002	0,026	0,001	0,0000018	0,0000045	0,0219128
H10	0,003	0,026	0,001	0,0000040	0,0000117	0,0095273
H11	0,031	0,013	0,032	0,0170774	0,0179226	0,0001152
H12	0,013	0,006	0,008	0,0004099	0,0007407	0,0087651
H99	0,118	0,026	0,032	0,0005124	0,0007468	0,0175303
I00	0,003	0,006	0,016	0,0003415	0,0081289	0,0146086
I02	0,001	0,013	0,002	0,0000473	0,0003798	0,0000167
I99	0,001	0,013	0,032	0,0512322	0,0180307	0,0058434
M00	0,000	0,013	0,032	0,0004587	0,0009407	0,0109564
M02	0,000	0,013	0,032	0,0009606	0,0408259	0,0175303
M03	0,002	0,009	0,016	0,0006404	0,0067348	0,0087651
M08	0,021	0,013	0,032	0,0011137	0,0177100	0,0584342
M09	0,001	0,013	0,004	0,0000076	0,0000482	0,0175303
M10	0,072	0,013	0,005	0,0000321	0,0000041	0,0087651
M99	0,032	0,013	0,016	0,0000854	0,0000949	0,0350605
N01	0,007	0,013	0,001	0,0000066	0,0000311	0,0000877
N02	0,004	0,026	0,032	0,0170774	0,0168129	0,0000923
N03	0,003	0,026	0,011	0,0000270	0,0000123	0,1753026
N05	0,001	0,009	0,005	0,0000149	0,0000099	0,0175303
N06	0,004	0,026	0,032	0,0000676	0,0001611	0,0087651
N07	0,057	0,026	0,032	0,0016178	0,0221814	0,0087651
N08	0,051	0,026	0,016	0,0008539	0,0254005	0,0000592
N09	0,235	0,006	0,032	0,0007149	0,0045236	0,0438257

Tablo 3.3. devam ediyor

N12	0,007	0,009	0,016	0,0512322	0,0182511	0,0001014
N13	0,017	0,026	0,016	0,0000315	0,0001579	0,0175303
N14	0,005	0,026	0,000	0,0000014	0,0000024	0,0043826
N16	0,005	0,026	0,000	0,0000011	0,0000013	0,0091303
N17	0,012	0,026	0,002	0,0000673	0,0002516	0,0292171
N20	0,002	0,026	0,032	0,0000107	0,0014475	0,0219128
N99	0,003	0,013	0,003	0,0000757	0,0000825	0,0584342
S00	0,001	0,013	0,032	0,0341548	0,0141792	0,0000584
S03	0,001	0,013	0,016	0,0512322	0,0182511	0,0000351
S04	0,000	0,013	0,011	0,0465748	0,0107967	0,0000779
S05	0,001	0,013	0,002	0,0001021	0,0004396	0,0000213
S06	0,000	0,013	0,003	0,4269354	0,0087856	0,0000250
S07	0,006	0,013	0,016	0,1067338	0,0175711	0,0002274
S09	0,001	0,013	0,016	0,0609908	0,0213364	0,0010956
S10	0,000	0,009	0,011	0,0016213	0,1521440	0,0029217
S11	0,003	0,013	0,032	0,0512322	0,1939671	0,0087651
S99	0,001	0,013	0,001	0,0000588	0,0001366	0,0000108
T05	0,111	0,026	0,032	0,0006150	0,0009435	0,0876513
T08	0,004	0,009	0,011	0,0002562	0,0004770	0,0000430
T99	0,007	0,013	0,032	0,0000820	0,0006419	0,0219128

Tablo 3.4. Kriterlere ait E_j değerleri

E_j	Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6
	0,706	0,976	0,921	0,521	0,666	0,816

Adım 2.1.4: Her bir kriter için entropiden uzaklaşma değerinin hesaplanması.

Her bir kriter için d_j değeri, Eşitlik (2.11) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 3.5'te verilmiştir.

Tablo 3.5. Her bir kritere ait d_j değerleri

d_j	Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)	TOPLAM
	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	
	0,294	0,024	0,079	0,479	0,334	0,184	

Tablo 3.5'ten de görüldüğü gibi, en yüksek d_j değeri “hurda işçilik maiyeti” kriterine aittir. Buradan, ilgili kritere ait bilgilerin kesinlik derecesinin yüksek olduğu da anlaşılmaktadır.

Adım 2.1.5: Kriter ağırlıklarının hesaplanması.

Her bir kriterin önem ağırlığı w_j^e , Eşitlik (2.12)'den faydalanılarak hesaplanmıştır ve Tablo 3.6.'da verilmiştir.

Tablo 3.6. Her bir kritere ait w_j^{en} değerleri

Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)	Toplam $\sum_{j=1}^n w_j^{en}$
w_1^{en}	w_2^{en}	w_3^{en}	w_4^{en}	w_5^{en}	w_6^{en}	
0,211	0,017	0,057	0,344	0,240	0,132	1,000

Kriterler için hesaplanmış entropi ağırlıklarına göre (bkz. Tablo 3.6.), en yüksek Entropi ağırlığına sahip olan kriter, 0,344 değeriyle, hurda işçilik maliyeti olarak değerlendirilebilir. İkinci en önemli kriter, 0,240 değeriyle hurda malzeme maliyeti ve üçüncü en önemli kriter 0,211 değeriyle hata oranı olarak belirlenmiştir. “Tespit yeri skoru” kriterinin kesinlik düzeyi düşük olduğu için ağırlık değeri de düşük çıkmıştır. Özetle, karar üzerinde, ilgili kritere ilişkin bilgiler yeterli olmadığı için etkisinin de düşük olması sağlanmıştır.

Adım 2.2. PSI yöntemiyle kriter ağırlıklarının hesaplanması

Adım 2.2.1 Başlangıç karar matrisinin oluşturulması ve normalize edilmesi.

Tablo 4.1.'de verilen başlangıç karar matrisi $[X]$ 'teki kriterler maliyet türü kriterler oldukları için Eşitlik (2.3) kullanılarak normalize karar matrisi $[N]$, Tablo 3.7.'deki gibi elde edilmiştir.

Adım 2.2.2: Kriterler için ortalama normalize performans değerlerinin hesaplanması.

Her kriter için \bar{x}_j^* değerleri, Eşitlik (2.4) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 3.8.'de gösterilmiştir.

Adım 2.2.3: Kriterler için tercih değişkenliği değerlerinin hesaplanması.

Her kritere ait PV_j değerleri, Eşitlik (2.5) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 3.9.'da gösterilmiştir.

Kriterler için hesaplanan tercih değışkenliği değerlerine göre (bkz. Tablo 3.9.), en yüksek değerşkenliğe sahip olan kriter, 9,126 değerıyla, frekans kriteridir. Bunu 4,793 değerıyla tespit yeri skoru kriteri ve 2,384 değerıyla hurda malzeme maliyeti kriteri takip etmektedirler.

Tablo 3.7. Normalize karar matrisi [N]

Alternatifler ($i = 1, \dots, 59$)	Kriterler ($j = 1, \dots, 6$)					
	Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
	x_{i1}^*	x_{i2}^*	x_{i3}^*	x_{i4}^*	x_{i5}^*	x_{i6}^*
C00	0,046	0,500	0,500	0,0048000	0,8970874	0,1000000
C02	0,010	1,000	1,000	0,1200000	0,4485437	0,0003805
D00	0,031	1,000	0,250	0,0013793	0,1466201	0,0833333
D01	0,035	1,000	0,125	0,0000204	0,0000328	0,1000000
D02	0,013	0,500	0,100	0,0000081	0,0000296	0,2000000
D03	0,030	0,500	0,250	0,0000423	0,0001000	0,1250000
D04	0,063	1,000	1,000	0,0030769	0,0612813	0,0416667
D05	0,009	1,000	1,000	0,0016368	0,0495815	0,1250000
D06	0,108	1,000	1,000	0,0017561	0,1410256	0,1000000
D07	0,042	0,333	0,053	0,0000277	0,0000128	0,0500000
D99	0,001	0,500	0,333	0,0400000	0,0741176	0,0000732
H01	0,020	1,000	1,000	0,0004800	0,0174379	0,1000000
H04	0,012	0,167	0,333	0,0004800	0,0082278	0,1000000
H05	0,006	1,000	1,000	0,0001371	0,0003929	0,1000000
H06	0,006	0,333	0,111	0,0000297	0,0000489	0,0500000
H07	0,211	1,000	1,000	0,0010591	0,0046348	0,1315789
H09	0,007	1,000	0,023	0,0000043	0,0000230	0,1250000
H10	0,015	1,000	0,032	0,0000095	0,0000605	0,0543478
H11	0,131	0,500	1,000	0,0400000	0,0924000	0,0006570
H12	0,056	0,250	0,250	0,0009600	0,0038188	0,0500000
H99	0,500	1,000	1,000	0,0012002	0,0038500	0,1000000
I00	0,013	0,250	0,500	0,0008000	0,0419086	0,0833333
I02	0,002	0,500	0,063	0,0001108	0,0019580	0,0000953
I99	0,003	0,500	1,000	0,1200000	0,0929577	0,0333333
M00	0,001	0,500	1,000	0,0010743	0,0048499	0,0625000
M02	0,002	0,500	1,000	0,0022501	0,2104784	0,1000000
M03	0,009	0,333	0,500	0,0015000	0,0347212	0,0500000
M08	0,091	0,500	1,000	0,0026087	0,0913043	0,3333333
M09	0,003	0,500	0,125	0,0000178	0,0002486	0,1000000
M10	0,308	0,500	0,143	0,0000752	0,0000213	0,0500000
M99	0,138	0,500	0,500	0,0002000	0,0004892	0,2000000
N01	0,028	0,500	0,019	0,0000156	0,0001602	0,0005000

Tablo 3.7. devam ediyor

N02	0,018	1,000	1,000	0,0400000	0,0866792	0,0005263
N03	0,013	1,000	0,333	0,0000633	0,0000633	1,0000000
N05	0,005	0,333	0,143	0,0000350	0,0000511	0,1000000
N06	0,015	1,000	1,000	0,0001582	0,0008305	0,0500000
N07	0,242	1,000	1,000	0,0037893	0,1143564	0,0500000
N08	0,216	1,000	0,500	0,0020000	0,1309524	0,0003378
N09	1,000	0,250	1,000	0,0016744	0,0233216	0,2500000
N12	0,029	0,333	0,500	0,1200000	0,0940937	0,0005782
N13	0,073	1,000	0,500	0,0000738	0,0008143	0,1000000
N14	0,022	1,000	0,008	0,0000032	0,0000123	0,0250000
N16	0,022	1,000	0,009	0,0000026	0,0000065	0,0520833
N17	0,049	1,000	0,077	0,0001577	0,0012971	0,1666667
N20	0,010	1,000	1,000	0,0000250	0,0074624	0,1250000
N99	0,011	0,500	0,100	0,0001774	0,0004254	0,3333333
S00	0,004	0,500	1,000	0,0800000	0,0731013	0,0003333
S03	0,003	0,500	0,500	0,1200000	0,0940937	0,0002000
S04	0,001	0,500	0,333	0,1090909	0,0556627	0,0004444
S05	0,006	0,500	0,067	0,0002392	0,0022666	0,0001215
S06	0,001	0,500	0,091	1,0000000	0,0452941	0,0001426
S07	0,026	0,500	0,500	0,2500000	0,0905882	0,0012970
S09	0,002	0,500	0,500	0,1428571	0,1100000	0,0062500
S10	0,002	0,333	0,333	0,0037975	0,7843803	0,0166667
S11	0,012	0,500	1,000	0,1200000	1,0000000	0,0500000
S99	0,003	0,500	0,031	0,0001378	0,0007042	0,0000617
T05	0,471	1,000	1,000	0,0014406	0,0048642	0,5000000
T08	0,019	0,333	0,333	0,0006000	0,0024592	0,0002454
T99	0,030	0,500	1,000	0,0001921	0,0033091	0,1250000

Tablo 3.8. Her bir kritere ait \bar{x}_j^* değerleri

Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
\bar{x}_1^*	\bar{x}_2^*	\bar{x}_3^*	\bar{x}_4^*	\bar{x}_5^*	\bar{x}_6^*
0,072	0,657	0,527	0,040	0,087	0,097

Tablo 3.9. Her bir kritere ait PV_j değerleri

Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
PV_1	PV_2	PV_3	PV_4	PV_5	PV_6
1,494	4,793	9,126	1,085	2,384	1,344

Adım 2.2.4: Kriterler için tercih değerindeki sapmanın hesaplanması.

Her kriter için \emptyset_j değeri, Eşitlik (2.6) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 3.10.'da sunulmuştur.

Tablo 3.10. Her kritere ait \emptyset_j değerleri

Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
\emptyset_1	\emptyset_2	\emptyset_3	\emptyset_4	\emptyset_5	\emptyset_6
0,494	3,793	8,126	0,085	1,384	0,344

Kriterler için hesaplanan genel tercih değerinden sapmalara göre (bkz. Tablo 3.10.), tercih değerinden en yüksek sapmaya sahip olan kriter, 8,126 değeriyle, frekans kriteridir. Bunu 3,793 değeriyle tespit yeri skoru kriteri ve 1,384 değeriyle hurda malzeme maliyeti kriteri takip etmektedirler. Tercih değişkenliği değeri en yüksek olan kriter “frekans” kriteri olduğu için, tercih değişkenliğinden sapma değeri de en yüksek olan kriter yine “frekans” kriteridir.

Adım 2.2.5: Kriter ağırlıklarının hesaplanması

Her bir kriter için w_j^p değeri Eşitlik (2.7) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 3.11.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.11. Kriterlere ait w_j^p değerleri

Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)	Toplam $\sum_{j=1}^n w_j^p$
w_1^p	w_2^p	w_3^p	w_4^p	w_5^p	w_6^p	w_7^p
0,035	0,267	0,571	0,006	0,097	0,024	1

Tablo 3.11'den de görüldüğü, PSI yöntemine göre frekans kriteri en yüksek önem ağırlığına sahip olurken, yeniden işleme maliyeti kriteri en düşük önem ağırlığına sahiptir.

Adım 2.3. CRITIC yöntemiyle kriter ağırlıklarının hesaplanması

Adım 2.3.1: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması

Başlangıç karar matrisi $[X]$, Tablo 3.1.'de gösterilmektedir.

Adım 2.3.2: Karar matrisinin normalize edilmesi

[X]'de yer alan bütün kriterler maliyet türü kriterler oldukları için, Eşitlik (2.3) kullanılarak [N] elde edilmiş ve Tablo 3.7.'de sunulmuştur.

Adım 2.3.3: Kriterlere Ait Standart Sapma Değerinin Hesaplanması.

Eşitlik (2.13) kullanılarak kriterler için σ_j değerleri Tablo 3.12'deki şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 3.12. Kriterlere ait σ_j değerleri

Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
σ_1	σ_2	σ_3	σ_4	σ_5	σ_6
0,161	0,656	0,606	0,141	0,203	0,154

Kriterler için hesaplanan standart sapma değerlerine göre (bkz. Tablo 3.12.), verilerinin ortalamaya göre sapması en yüksek olan kriter, tespit yeri skorudur. Bunu, frekans ve hurda malzeme maliyeti kriterleri izlemektedir.

Adım 2.3.4: Kriterler arasındaki ilişki düzeyinin belirlenmesi.

Eşitlik (2.14) kullanılarak, kriterler arasındaki kovaryans değerleri Tablo 3.13.'teki şekilde hesaplanmıştır.

Tablo 3.13. Kriterlere ait $Cov(j, t)$ değerleri

$Cov(1,2)$	$Cov(1,3)$	$Cov(1,4)$	$Cov(1,5)$	$Cov(1,6)$
-0,003158542	0,010267837	-0,000299477	-0,00085215	0,000441193
$Cov(2,3)$	$Cov(2,4)$	$Cov(2,5)$	$Cov(2,6)$	$Cov(3,4)$
0,044231519	-0,003581425	-0,008308957	0,006915271	-0,005555576
$Cov(3,5)$	$Cov(3,6)$	$Cov(4,5)$	$Cov(4,6)$	$Cov(5,6)$
0,00383064	-0,002614776	-0,000641216	-0,000264325	-0,000802338

Eşitlik (2.15) kullanılarak, kriterler arasındaki r_{jt} değerleri Tablo 3.14.'teki şekilde hesaplanmıştır.

j . ve t . kriterler için hesaplanan korelasyon katsayısı değerlerine göre (bkz. Tablo 3.14.), birbirleri arasında en yüksek ilişki bulunan kriterler, 0,11122408 katsayısıyla, tespit yeri ve frekans kriterleridir. Birbirleri arasında en yüksek ilişki bulunan ikinci sıradaki

kriterler, 0,105522969 katsayısıyla, hata oranı ve frekans kriterleridir. Birbirleri arasında en yüksek ilişki bulunan üçüncü sıradaki kriterler ise, 0,068354929 katsayısıyla, tespit yeri skoru ve yeniden işleme maliyeti kriterleridir. Belirtilen ilk üç sırada ki en yüksek ilişkili kriterler için korelasyon katsayısı değerlerine bakıldığında; katsayıların pozitif oldukları görülmektedir ve bu durumda ilgili kriterler arası ilişkinin de pozitif yönde olduğu söylenebilmektedir.

Tablo 3.14. Kriterler için r_{jt} değerleri

r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}	r_{16}
-0,02999452	0,105522969	-0,0132666	-0,026110229	0,017823376
r_{23}	r_{24}	r_{25}	r_{26}	r_{34}
0,11122408	-0,038819584	-0,062293149	0,068354929	-0,065168372
r_{35}	r_{36}	r_{45}	r_{46}	r_{56}
0,031079777	-0,027970996	-0,022425344	-0,012188193	-0,007930815

Adım 2.3.5: Kriterlere ait bilgi miktarının hesaplanması.

Eşitlik (2.16) kullanılarak; kriterlerin içerdikleri bilgi miktarları C_j Tablo 3.15'teki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 3.15. Kriterlere ait C_j değerleri

Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
2,404	9,822	9,076	2,106	3,044	2,309

Hesaplanan kriterlerin içerdığı bilgi miktarı C_j değerlerine göre (bkz. Tablo 3.15.), en yüksek bilgi miktarına sahip kriter, 9,822 değeriyle, tespit yeri kriteridir. Bunu 9,076 değeriyle frekans kriteri ve 3,044 değeriyle hurda malzeme maliyeti kriteri takip etmektedir. Söz konusu bilgi, standart sapmayı ve ilişki katsayısını içermektedir.

Adım 2.3.6: Kriter ağırlıklarının hesaplanması

w_j^c değerleri Eşitlik (2.17) kullanılarak; Tablo 3.16.'daki gibi elde edilmiştir.

CRITIC yöntemiyle, kriterler için hesaplanan ağırlık değerlerine göre (bkz. Tablo 3.16.), en yüksek ağırlığa sahip olan kriter, 0,342 değeriyle, tespit yeri skorudur. İkinci en

önemli kriter, 0,316 değeriyle frekans kriteri ve üçüncü en önemli kriter 0,106 değeriyle hurda malzeme maliyeti kriteridir.

Tablo 3.16. Kriterlere ait w_j^c değerleri

Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
w_1^c	w_2^c	w_3^c	w_4^c	w_5^c	w_6^c
0,084	0,342	0,316	0,073	0,106	0,080

Adım 3. Entropi-PSI-CRITIC yöntemleri kullanılarak önerilen bütünlük ağırlıklandırma yöntemiyle kriterlerin sıralanması.

Tablo 3.6., 3.11. ve 3.16.'da sırasıyla Entropi, PSI ve CRITIC yöntemleri kullanılarak hesaplanan kriter ağırlıkları, Eşitlik (3.1) kullanılarak birleştirilmiş ve Tablo 3.17'de sunulmuştur.

Tablo 3.17. Kriterlere ait nihai w_j değerleri

Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
w_1	w_2	w_3	w_4	w_5	w_6
0,127	0,172	0,325	0,079	0,202	0,095

Bütünlük ağırlıklandırma yöntemiyle, kriterler için hesaplanan nihai ağırlık değerlerine göre (bkz. Tablo 3.17.), en yüksek ağırlığa sahip olan kriter, 0,325 değeriyle, frekans kriteridir. İkinci en önemli kriter, 0,202 değeriyle hurda malzeme maliyeti kriteri ve üçüncü en önemli kriter 0,172 ile tespit yeri skoru kriteridir.

3.4.2. EDAS-CODAS-COPRAS yöntemleri ile alternatiflerin sıralanması ve TPOP kullanılarak nihai alternatif sıralamasının elde edilmesi

Adım 1. Başlangıç karar matrisinin oluşturulması.

Başlangıç karar matrisi $[X]$, Tablo 2.1.'de gösterilmektedir.

Adım 2. EDAS yöntemiyle alternatif sıralamalarının elde edilmesi.

Adım 2.1.: Ortalama değerler matrisinin oluşturulması

Başlangıç karar matrisi $[X]$ 'te yer alan değerler, Eşitlik (2.18) kullanılarak ortalama değerler matrisi $[AV]$ elde edilmiş ve Tablo 3.18.'de sunulmuştur.

Tablo 3.18. Ortalama değerler matrisi [AV]

Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
AV_1	AV_2	AV_3	AV_4	AV_5	AV_6
13,319	1,898	10,102	820,342	4508,024	35,671

Adım 2.3.: Kriterler için ortalama pozitif uzaklık matrisi ve ortalama negatif uzaklık matrisinin oluşturulması.

Kriterlerin hepsi maliyet türü kriterler oldukları için Eşitlik (2.21) kullanılarak; Ortalamadan pozitif uzaklık matrisi (Positive Distance From Average-PDA) [PDA] matrisi Tablo 3.19'daki gibi elde edilmiştir.

Tablo 3.19. Ortalamadan pozitif uzaklık matrisi [PDA]

Alternatifler ($i = 1, \dots, 59$)	Kriterler ($j = 1, \dots, 6$)					
	Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
	PDA_{i1}	PDA_{i2}	PDA_{i3}	PDA_{i4}	PDA_{i5}	PDA_{i6}
C00	0,870	0,000	0,802	0,992	1,000	0,993
C02	0,414	0,473	0,901	1,000	1,000	0,000
D00	0,809	0,473	0,604	0,973	0,999	0,992
D01	0,827	0,473	0,208	0,000	0,000	0,993
D02	0,535	0,000	0,010	0,000	0,000	0,996
D03	0,800	0,000	0,604	0,135	0,000	0,994
D04	0,904	0,473	0,901	0,988	0,998	0,983
D05	0,318	0,473	0,901	0,978	0,998	0,994
D06	0,944	0,473	0,901	0,979	0,999	0,993
D07	0,858	0,000	0,000	0,000	0,000	0,986
D99	0,000	0,000	0,703	0,999	0,999	0,000
H01	0,706	0,473	0,901	0,924	0,994	0,993
H04	0,509	0,000	0,703	0,924	0,988	0,993
H05	0,000	0,473	0,901	0,733	0,739	0,993
H06	0,052	0,000	0,109	0,000	0,000	0,986
H07	0,971	0,473	0,901	0,965	0,978	0,995
H09	0,157	0,473	0,000	0,000	0,000	0,994
H10	0,593	0,473	0,000	0,000	0,000	0,987
H11	0,954	0,000	0,901	0,999	0,999	0,000
H12	0,893	0,000	0,604	0,962	0,973	0,986
H99	0,988	0,473	0,901	0,970	0,973	0,993
I00	0,522	0,000	0,802	0,954	0,998	0,992

Tablo 3.19. devam ediyor

I02	0,000	0,000	0,000	0,670	0,948	0,000
I99	0,000	0,000	0,901	1,000	0,999	0,979
M00	0,000	0,000	0,901	0,966	0,979	0,989
M02	0,000	0,000	0,901	0,984	1,000	0,993
M03	0,331	0,000	0,802	0,976	0,997	0,986
M08	0,934	0,000	0,901	0,986	0,999	0,998
M09	0,000	0,000	0,208	0,000	0,588	0,993
M10	0,980	0,000	0,307	0,514	0,000	0,986
M99	0,956	0,000	0,802	0,817	0,790	0,996
N01	0,785	0,000	0,000	0,000	0,360	0,000
N02	0,658	0,473	0,901	0,999	0,999	0,000
N03	0,536	0,473	0,703	0,422	0,000	0,999
N05	0,000	0,000	0,307	0,000	0,000	0,993
N06	0,605	0,473	0,901	0,769	0,877	0,986
N07	0,975	0,473	0,901	0,990	0,999	0,986
N08	0,972	0,473	0,802	0,982	0,999	0,000
N09	0,994	0,000	0,901	0,978	0,996	0,997
N12	0,792	0,000	0,802	1,000	0,999	0,000
N13	0,917	0,473	0,802	0,505	0,874	0,993
N14	0,726	0,473	0,000	0,000	0,000	0,972
N16	0,724	0,473	0,000	0,000	0,000	0,987
N17	0,878	0,473	0,000	0,768	0,921	0,996
N20	0,375	0,473	0,901	0,000	0,986	0,994
N99	0,466	0,000	0,010	0,794	0,759	0,998
S00	0,000	0,000	0,901	1,000	0,999	0,000
S03	0,000	0,000	0,802	1,000	0,999	0,000
S04	0,000	0,000	0,703	1,000	0,998	0,000
S05	0,000	0,000	0,000	0,847	0,955	0,000
S06	0,000	0,000	0,000	1,000	0,998	0,000
S07	0,768	0,000	0,802	1,000	0,999	0,460
S09	0,000	0,000	0,802	1,000	0,999	0,888
S10	0,000	0,000	0,703	0,990	1,000	0,958
S11	0,499	0,000	0,901	1,000	1,000	0,986
S99	0,000	0,000	0,000	0,735	0,854	0,000
T05	0,987	0,473	0,901	0,975	0,979	0,999
T08	0,680	0,000	0,703	0,939	0,958	0,000
T99	0,803	0,000	0,901	0,810	0,969	0,994

Kriterlerin hepsi maliyet türü kriterler oldukları için Eşitlik (2.22) kullanılarak; ortalamadan negatif uzaklık matrisi (Negative Distance From Average-NDA) [NDA], Tablo 3.20'deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 3.20. Ortalamadan negatif uzaklık matrisi [NDA]

Alternatifler ($i = 1, \dots, 59$)	Kriterler ($j = 1, \dots, 6$)					
	Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
	NDA_{i1}	NDA_{i2}	NDA_{i3}	NDA_{i4}	NDA_{i5}	NDA_{i6}
C00	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000
C02	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,842
D00	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D01	0,000	0,000	0,000	0,792	2,128	0,000
D02	0,000	0,054	0,000	3,529	2,463	0,000
D03	0,000	0,054	0,000	0,000	0,025	0,000
D04	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D05	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D06	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
D07	0,000	0,580	0,881	0,322	7,025	0,000
D99	4,006	0,054	0,000	0,000	0,000	8,571
H01	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H04	0,000	2,161	0,000	0,000	0,000	0,000
H05	0,073	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H06	0,000	0,580	0,000	0,230	1,096	0,000
H07	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
H09	0,000	0,000	3,257	7,602	3,465	0,000
H10	0,000	0,000	2,069	2,855	0,694	0,000
H11	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000	0,067
H12	0,000	1,107	0,000	0,000	0,000	0,000
H99	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
I00	0,000	1,107	0,000	0,000	0,000	0,000
I02	1,598	0,054	0,584	0,000	0,000	6,354
I99	0,877	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000
M00	6,508	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000
M02	2,751	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000
M03	0,000	0,580	0,000	0,000	0,000	0,000
M08	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000
M09	0,838	0,054	0,000	1,056	0,000	0,000
M10	0,000	0,054	0,000	0,000	3,813	0,000
M99	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000
N01	0,000	0,054	4,247	1,349	0,000	0,402
N02	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,332
N03	0,000	0,000	0,000	0,000	0,620	0,000
N05	0,313	0,580	0,000	0,046	1,007	0,000
N06	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N07	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N08	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,075
N09	0,000	1,107	0,000	0,000	0,000	0,000

Tablo 3.20. devam ediyor

N12	0,000	0,580	0,000	0,000	0,000	0,212
N13	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
N14	0,000	0,000	11,374	10,408	7,350	0,000
N16	0,000	0,000	9,592	13,235	14,724	0,000
N17	0,000	0,000	0,287	0,000	0,000	0,000
N20	0,000	0,000	0,000	0,463	0,000	0,000
N99	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000
S00	0,650	0,054	0,000	0,000	0,000	1,103
S03	0,877	0,054	0,000	0,000	0,000	2,504
S04	3,317	0,054	0,000	0,000	0,000	0,577
S05	0,086	0,054	0,485	0,000	0,000	4,768
S06	4,269	0,054	0,089	0,000	0,000	3,914
S07	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000
S09	1,730	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000
S10	2,060	0,580	0,000	0,000	0,000	0,000
S11	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000
S99	1,014	0,054	2,168	0,000	0,000	10,368
T05	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
T08	0,000	0,580	0,000	0,000	0,000	1,856
T99	0,000	0,054	0,000	0,000	0,000	0,000

Adım 2.4: Alternatifler için ağırlıklı toplam pozitif ve negatif değerlerin hesaplanması.

Eşitlik (2.23) ve (2.24) kullanılarak elde edilen ağırlıklı toplam pozitif SP_i ve negatif SN_i değerleri Tablo 3.21’de sunulmuştur.

Tablo 3.21. Ağırlıklı toplam pozitif ve negatif değerler

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
SP_i	0,746	0,708	0,753	0,348	0,166	0,402	0,862
SN_i	0,009	0,080	0,000	0,493	0,787	0,014	0,000
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
SP_i	0,788	0,868	0,202	0,509	0,832	0,660	0,676
SN_i	0,000	0,000	1,830	1,330	0,000	0,373	0,009
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
SP_i	0,135	0,866	0,196	0,250	0,694	0,676	0,867
SN_i	0,340	0,000	2,361	1,038	0,016	0,191	0,000
Alternatifler	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
SP_i	0,698	0,245	0,666	0,661	0,667	0,675	0,785
SN_i	0,191	1,004	0,120	0,834	0,358	0,100	0,009
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
SP_i	0,280	0,358	0,701	0,172	0,739	0,506	0,194
SN_i	0,199	0,779	0,009	1,533	0,031	0,125	0,347

Tablo 3.21. devam ediyor

Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
SP_i	0,782	0,872	0,745	0,792	0,642	0,769	0,266
SN_i	0,000	0,000	0,102	0,191	0,120	0,000	6,002
Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
SP_i	0,267	0,534	0,715	0,373	0,573	0,541	0,509
SN_i	7,138	0,093	0,037	0,009	0,196	0,358	0,485
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
SP_i	0,260	0,281	0,682	0,626	0,600	0,731	0,231
SN_i	0,630	0,951	0,009	0,229	0,361	0,009	1,824
Alternatifler	T05	T08	T99				
SP_i	0,869	0,583	0,748				
SN_i	0,000	0,276	0,009				

Adım 2.5.: Alternatifler için ağırlıklı toplam pozitif ve negatif değerlerin normalize edilmesi.

Eşitlik (2.25) ve (2.26) kullanılarak, bir önceki adımda elde edilen ağırlıklı toplam pozitif ve negatif değerler normalize edilmiş, normalizasyon sonuçları Tablo 3.22’de sunulmuştur.

Alternatifler için hesaplanan normalize edilmiş ağırlıklı toplam pozitif ve negatif değerlere göre (bkz. Tablo 3.22.), en yüksek ağırlıklı toplam negatif değere sahip olan ilk üç alternatif sırasıyla, 1,000 ile N16, 0,841 ile N14 ve 0,331 ile H09’dur. En yüksek ağırlıklı toplam pozitif değere sahip olan ilk üç alternatif ise sırasıyla, 1,000 ile N07, 0,997 ile T05 ve 0,995 ile D06’dır.

Tablo 3.22. Normalize toplam pozitif ve negatif değerler

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
SP_i	0,855	0,812	0,864	0,399	0,190	0,462	0,989
SN_i	0,001	0,011	0,000	0,069	0,110	0,002	0,000
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
SP_i	0,904	0,995	0,232	0,584	0,954	0,757	0,775
SN_i	0,000	0,000	0,256	0,186	0,000	0,052	0,001
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
SP_i	0,155	0,993	0,225	0,287	0,797	0,775	0,995
SN_i	0,048	0,000	0,331	0,145	0,002	0,027	0,000
Alternatifler	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
SP_i	0,800	0,281	0,765	0,758	0,765	0,774	0,901
SN_i	0,027	0,141	0,017	0,117	0,050	0,014	0,001
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
SP_i	0,322	0,411	0,804	0,198	0,847	0,581	0,222
SN_i	0,028	0,109	0,001	0,215	0,004	0,018	0,049

Tablo 3.22. devam ediyor

Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
SP_i	0,898	1,000	0,855	0,908	0,736	0,882	0,305
SN_i	0,000	0,000	0,014	0,027	0,017	0,000	0,841
Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
SP_i	0,306	0,613	0,820	0,428	0,658	0,621	0,584
SN_i	1,000	0,013	0,005	0,001	0,027	0,050	0,068
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
SP_i	0,298	0,322	0,783	0,718	0,688	0,838	0,265
SN_i	0,088	0,133	0,001	0,032	0,051	0,001	0,256
Alternatifler	T05	T08	T99				
SP_i	0,997	0,668	0,859				
SN_i	0,000	0,039	0,001				

Adım 2.6.: Alternatiflerin sıralanması.

Eşitlik (2.27) kullanılarak; her bir alternatif için sıralama ağırlıkları Tablo 3.23'te verilmiştir.

Tablo 3.23. Alternatiflere ait sıralama puanları

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
AS_i	0,428	0,412	0,432	0,234	0,150	0,232	0,494
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
AS_i	0,452	0,498	0,244	0,385	0,477	0,405	0,388
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
AS_i	0,101	0,497	0,278	0,216	0,399	0,401	0,497
Alternatifler	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
AS_i	0,414	0,211	0,391	0,437	0,407	0,394	0,451
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
AS_i	0,175	0,260	0,403	0,206	0,426	0,299	0,135
Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
AS_i	0,449	0,500	0,434	0,468	0,377	0,441	0,573
Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
AS_i	0,653	0,313	0,413	0,215	0,343	0,336	0,326
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
AS_i	0,193	0,228	0,392	0,375	0,369	0,420	0,260
Alternatifler	T05	T08	T99				
AS_i	0,499	0,354	0,430				

EDAS sıralama yöntemiyle, alternatifler için hesaplanan sıralama ağırlıklarına göre (bkz. Tablo 3.23.), öncelikle önlenmesi gereken hata türü 0,653 ile, N16 kodlu hata türüdür. İkinci en önemli hata türü, 0,573 ile N14 kodlu hata türü ve üçüncü en önemli hata türü ise, 0,500 ile N07 kodlu hata türüdür.

Adım 3. CODAS yöntemiyle alternatif sıralamalarının elde edilmesi

Adım 3.1.: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması ve normalize edilmesi.

Başlangıç karar matrisi $[X]$, Tablo 3.1.'de gösterilmektedir. $[X]$ 'teki kriterlerin hepsi maliyet türü kriterler oldukları için normalize karar matrisi $[N]$, Eşitlik (2.3) kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 4.7.'de gösterilmiştir.

Adım 3.2.: Ağırlıklandırılmış karar matrisinin oluşturulması.

$[N]$, Eşitlik (2.28) kullanılarak $[R]$ 'ye dönüştürülmüş ve Tablo 3.24'te sunulmuştur.

Tablo 3.24. Ağırlıklandırılmış karar matrisi $[R]$

Alternatifler ($i = 1, \dots, 59$)	Kriterler ($j = 1, \dots, 6$)					
	Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
	r_{i1}	r_{i2}	r_{i3}	r_{i4}	r_{i5}	r_{i6}
C00	0,006	0,086	0,162	0,0003814	0,1811205	0,0094819
C02	0,001	0,172	0,325	0,0095357	0,0905603	0,0000361
D00	0,004	0,172	0,081	0,0001096	0,0296024	0,0079016
D01	0,004	0,172	0,041	0,0000016	0,0000066	0,0094819
D02	0,002	0,086	0,032	0,0000006	0,0000060	0,0189638
D03	0,004	0,086	0,081	0,0000034	0,0000202	0,0118524
D04	0,008	0,172	0,325	0,0002445	0,0123726	0,0039508
D05	0,001	0,172	0,325	0,0001301	0,0100104	0,0118524
D06	0,014	0,172	0,325	0,0001395	0,0284729	0,0094819
D07	0,005	0,057	0,017	0,0000022	0,0000026	0,0047410
D99	0,000	0,086	0,108	0,0031786	0,0149642	0,0000069
H01	0,003	0,172	0,325	0,0000381	0,0035207	0,0094819
H04	0,002	0,029	0,108	0,0000381	0,0016612	0,0094819
H05	0,001	0,172	0,325	0,0000109	0,0000793	0,0094819
H06	0,001	0,057	0,036	0,0000024	0,0000099	0,0047410
H07	0,027	0,172	0,325	0,0000842	0,0009358	0,0124762
H09	0,001	0,172	0,008	0,0000003	0,0000046	0,0118524
H10	0,002	0,172	0,010	0,0000008	0,0000122	0,0051532
H11	0,017	0,086	0,325	0,0031786	0,0186554	0,0000623
H12	0,007	0,043	0,081	0,0000763	0,0007710	0,0047410
H99	0,063	0,172	0,325	0,0000954	0,0007773	0,0094819
I00	0,002	0,043	0,162	0,0000636	0,0084613	0,0079016
I02	0,000	0,086	0,020	0,0000088	0,0003953	0,0000090
I99	0,000	0,086	0,325	0,0095357	0,0187680	0,0031606
M00	0,000	0,086	0,325	0,0000854	0,0009792	0,0059262
M02	0,000	0,086	0,325	0,0001788	0,0424953	0,0094819
M03	0,001	0,057	0,162	0,0001192	0,0070102	0,0047410
M08	0,012	0,086	0,325	0,0002073	0,0184342	0,0316063
M09	0,000	0,086	0,041	0,0000014	0,0000502	0,0094819

Tablo 3.24. devam ediyor

M10	0,039	0,086	0,046	0,0000060	0,0000043	0,0047410
M99	0,017	0,086	0,162	0,0000159	0,0000988	0,0189638
N01	0,004	0,086	0,006	0,0000012	0,0000323	0,0000474
N02	0,002	0,172	0,325	0,0031786	0,0175004	0,0000499
N03	0,002	0,172	0,108	0,0000050	0,0000128	0,0948190
N05	0,001	0,057	0,046	0,0000028	0,0000103	0,0094819
N06	0,002	0,172	0,325	0,0000126	0,0001677	0,0047410
N07	0,031	0,172	0,325	0,0003011	0,0230884	0,0047410
N08	0,027	0,172	0,162	0,0001589	0,0264391	0,0000320
N09	0,127	0,043	0,325	0,0001331	0,0047086	0,0237048
N12	0,004	0,057	0,162	0,0095357	0,0189974	0,0000548
N13	0,009	0,172	0,162	0,0000059	0,0001644	0,0094819
N14	0,003	0,172	0,003	0,0000003	0,0000025	0,0023705
N16	0,003	0,172	0,003	0,0000002	0,0000013	0,0049385
N17	0,006	0,172	0,025	0,0000125	0,0002619	0,0158032
N20	0,001	0,172	0,325	0,0000020	0,0015067	0,0118524
N99	0,001	0,086	0,032	0,0000141	0,0000859	0,0316063
S00	0,000	0,086	0,325	0,0063571	0,0147590	0,0000316
S03	0,000	0,086	0,162	0,0095357	0,0189974	0,0000190
S04	0,000	0,086	0,108	0,0086688	0,0112382	0,0000421
S05	0,001	0,086	0,022	0,0000190	0,0004576	0,0000115
S06	0,000	0,086	0,030	0,0794640	0,0091448	0,0000135
S07	0,003	0,086	0,162	0,0198660	0,0182896	0,0001230
S09	0,000	0,086	0,162	0,0113520	0,0222088	0,0005926
S10	0,000	0,057	0,108	0,0003018	0,1583652	0,0015803
S11	0,002	0,086	0,325	0,0095357	0,2018984	0,0047410
S99	0,000	0,086	0,010	0,0000109	0,0001422	0,0000058
T05	0,060	0,172	0,325	0,0001145	0,0009821	0,0474095
T08	0,002	0,057	0,108	0,0000477	0,0004965	0,0000233
T99	0,004	0,086	0,325	0,0000153	0,0006681	0,0118524

Adım 3.3: Negatif ideal çözümün belirlenmesi.

Kriterler için negatif ideal çözüm (nokta), Eşitlik (2.29) ve (2.30) kullanılarak belirlenmiş ve Tablo 3.25.'te sunulmuştur.

Tablo 3.25. Negatif ideal çözüm (nokta) değerleri

Kriterler ($j = 1, \dots, 6$)					
Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
ns_1	ns_2	ns_3	ns_4	ns_5	ns_6
0,000	0,029	0,003	0,000	0,000	0,000

Adım 3.4.: Alternatifler için negatif ideal çözümden Öklid ve Taksicab uzaklıklarının hesaplanması.

Alternatiflerin negatif-ideal çözümden Öklid (E_i) ve Taksicab (T_i) uzaklıkları Eşitlik (2.31) ve (2.32) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 3.26'da sunulmuştur.

Tablo 3.26. Alternatiflerin negatif-ideal çözümden Öklid ve Taksicab uzaklıkları

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
E_i	0,248	0,364	0,167	0,149	0,068	0,098	0,353
T_i	0,414	0,567	0,264	0,195	0,108	0,152	0,490
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
E_i	0,353	0,354	0,033	0,121	0,353	0,106	0,353
T_i	0,489	0,517	0,053	0,181	0,481	0,118	0,476
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
E_i	0,044	0,354	0,144	0,144	0,328	0,080	0,358
T_i	0,068	0,506	0,161	0,159	0,418	0,106	0,539
Alternatifler	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
E_i	0,161	0,060	0,328	0,327	0,330	0,162	0,329
T_i	0,192	0,076	0,411	0,386	0,432	0,201	0,441
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
E_i	0,070	0,082	0,172	0,058	0,353	0,202	0,053
T_i	0,105	0,145	0,254	0,065	0,489	0,346	0,082
Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
E_i	0,353	0,355	0,218	0,347	0,164	0,215	0,144
T_i	0,472	0,524	0,357	0,492	0,221	0,322	0,149
Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
E_i	0,144	0,146	0,353	0,072	0,327	0,171	0,121
T_i	0,152	0,188	0,480	0,120	0,401	0,246	0,183
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
E_i	0,061	0,102	0,172	0,172	0,193	0,384	0,058
T_i	0,078	0,173	0,259	0,251	0,295	0,597	0,065
Alternatifler	T05	T08	T99				
E_i	0,361	0,109	0,327				
T_i	0,574	0,137	0,396				

Alternatifler için hesaplanan negatif ideal çözümden Öklid uzaklıkları ve Taksicab uzaklıklarına göre (bkz. Tablo 3.26.), ortalamadan Öklid uzaklığı en yüksek olan ilk üç alternatif sırasıyla, 0,527 ile S11, 0,505 ile C02 ve 0,492 ile H99 dur. Ortalamadan Taksicab uzaklığı en yüksek olan ilk üç alternatif ise sırasıyla, 0,597 ile S11, 0,573 ile T05 ve 0,567 ile C02 dir.

Adım 3.5.: Görelî değerlendirme matrisinin oluşturulması.

Eşitlik (2.33), (2.34) ve (2.35) kullanılarak oluşturulan görelî değerlendirme matrisi [Ra], (EK 2)'de sunulmuştur. Görelî değerlendirme matrisinde kullanılan τ eşik parametresi, Eşitlik (2.36) kullanılarak 0,016 olarak alınmıştır.

Adım 3.6.: Alternatiflerin Sıralanması.

Eşitlik (2.37) kullanılarak alternatifler için sıralama ağırlıkları Tablo 3.27'de hesaplanmıştır.

Tablo 3.27. Alternatiflerin sıralama ağırlıkları

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
H_i	10,163	27,626	-4,199	-9,325	-19,537	-15,163	21,427
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
H_i	21,066	22,587	-21,990	-10,768	20,797	-16,017	20,550
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
H_i	-20,956	21,893	-11,417	-11,106	16,562	-17,650	23,919
Alternatifler	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
H_i	-8,516	-19,450	16,074	14,519	17,028	-7,473	16,517
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
H_i	-18,761	-15,564	-5,499	-20,090	21,510	-2,445	-20,416
Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
H_i	20,547	23,135	5,272	20,366	-6,040	2,532	-11,406
Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
H_i	-11,434	-10,261	20,664	-19,837	15,660	-4,254	-10,688
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
H_i	-19,335	-12,145	-3,543	-3,973	-0,126	30,844	-20,031
Alternatifler	T05	T08	T99				
H_i	23,888	-13,607	14,671				

CODAS ağırlıklandırma yöntemiyle, alternatifler için hesaplanan sıralama ağırlıklarına göre (bkz. Tablo 3.27.), en önemli hata türü, 30,844 ile, S11 kodlu hata türüdür. İkinci en önemli hata türü, 27,626 ile C02 kodlu hata türü ve üçüncü en önemli hata türü, 23,919 ile H99 kodlu hata türüdür.

Adım 4. COPRAS yöntemiyle alternatif sıralamalarının elde edilmesi.

Adım 4.1.: Başlangıç karar matrisinin oluşturulması.

Başlangıç karar matrisi [X], Tablo 3.1.'de gösterilmektedir.

Adım 4.2.: Başlangıç karar matrisinin normalize edilmesi.

Normalize karar matrisi [N], Eşitlik (2.38) kullanılarak elde edilmiştir ve Tablo 3.28.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.28. Normalize karar matrisi [N]

Alternatifler ($i = 1, \dots, 59$)	Kriterler ($j = 1, \dots, 6$)					
	Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
	x_{i1}^*	x_{i2}^*	x_{i3}^*	x_{i4}^*	x_{i5}^*	x_{i6}^*
C00	0,002	0,018	0,003	0,0001291	0,0000019	0,0001188
C02	0,010	0,009	0,002	0,0000052	0,0000039	0,0312151
D00	0,003	0,009	0,007	0,0004494	0,0000118	0,0001425
D01	0,003	0,009	0,013	0,0303800	0,0530237	0,0001188
D02	0,008	0,018	0,017	0,0767650	0,0586884	0,0000594
D03	0,003	0,018	0,007	0,0146590	0,0173782	0,0000950
D04	0,002	0,009	0,002	0,0002014	0,0000283	0,0002851
D05	0,012	0,009	0,002	0,0003787	0,0000350	0,0000950
D06	0,001	0,009	0,002	0,0003530	0,0000123	0,0001188
D07	0,002	0,027	0,032	0,0224007	0,1360111	0,0002376
D99	0,085	0,018	0,005	0,0000155	0,0000234	0,1622182
H01	0,005	0,009	0,002	0,0012913	0,0000996	0,0001188
H04	0,008	0,054	0,005	0,0012913	0,0002111	0,0001188
H05	0,018	0,009	0,002	0,0045196	0,0044215	0,0001188
H06	0,016	0,027	0,015	0,0208486	0,0355219	0,0002376
H07	0,000	0,009	0,002	0,0005852	0,0003748	0,0000903
H09	0,014	0,009	0,072	0,1457973	0,0756772	0,0000950
H10	0,007	0,009	0,052	0,0653467	0,0287058	0,0002186
H11	0,001	0,018	0,002	0,0000155	0,0000188	0,0180797
H12	0,002	0,036	0,007	0,0006457	0,0004549	0,0002376
H99	0,000	0,009	0,002	0,0005164	0,0004512	0,0001188
I00	0,008	0,036	0,003	0,0007748	0,0000414	0,0001425
I02	0,044	0,018	0,027	0,0055955	0,0008871	0,1246372
I99	0,032	0,018	0,002	0,0000052	0,0000187	0,0003564
M00	0,127	0,018	0,002	0,0005770	0,0003582	0,0001901
M02	0,064	0,018	0,002	0,0002755	0,0000083	0,0001188
M03	0,011	0,027	0,003	0,0004132	0,0000500	0,0002376
M08	0,001	0,018	0,002	0,0002376	0,0000190	0,0000356
M09	0,031	0,018	0,013	0,0348490	0,0069883	0,0001188
M10	0,000	0,018	0,012	0,0082376	0,0815766	0,0002376
M99	0,001	0,018	0,003	0,0030992	0,0035510	0,0000594
N01	0,004	0,018	0,089	0,0398096	0,0108424	0,0237578
N02	0,006	0,009	0,002	0,0000155	0,0000200	0,0225699
N03	0,008	0,009	0,005	0,0097913	0,0274542	0,0000119
N05	0,022	0,027	0,012	0,0177339	0,0340252	0,0001188
N06	0,007	0,009	0,002	0,0039168	0,0020914	0,0002376
N07	0,000	0,009	0,002	0,0001636	0,0000152	0,0002376
N08	0,000	0,009	0,003	0,0003099	0,0000133	0,0351615
N09	0,000	0,036	0,002	0,0003702	0,0000745	0,0000475
N12	0,004	0,027	0,003	0,0000052	0,0000185	0,0205457

Tablo 3.28. devam ediyor

N13	0,001	0,009	0,003	0,0083939	0,0021332	0,0001188
N14	0,005	0,009	0,210	0,1933588	0,1415188	0,0004752
N16	0,005	0,009	0,180	0,2412791	0,2665124	0,0002281
N17	0,002	0,009	0,022	0,0039313	0,0013391	0,0000713
N20	0,011	0,009	0,002	0,0247933	0,0002328	0,0000950
N99	0,009	0,018	0,017	0,0034948	0,0040836	0,0000356
S00	0,028	0,018	0,002	0,0000077	0,0000238	0,0356367
S03	0,032	0,018	0,003	0,0000052	0,0000185	0,0593945
S04	0,073	0,018	0,005	0,0000057	0,0000312	0,0267275
S05	0,018	0,018	0,025	0,0025912	0,0007664	0,0977633
S06	0,089	0,018	0,018	0,0000006	0,0000383	0,0832829
S07	0,004	0,018	0,003	0,0000025	0,0000192	0,0091586
S09	0,046	0,018	0,003	0,0000043	0,0000158	0,0019006
S10	0,052	0,027	0,005	0,0001632	0,0000022	0,0007127
S11	0,008	0,018	0,002	0,0000052	0,0000017	0,0002376
S99	0,034	0,018	0,054	0,0044984	0,0024668	0,1926757
T05	0,000	0,009	0,002	0,0004303	0,0003571	0,0000238
T08	0,005	0,027	0,005	0,0010331	0,0007063	0,0484065
T99	0,003	0,018	0,002	0,0032262	0,0005249	0,0000950

Adım 4.3.: Ağırlıklandırılmış karar matrisinin oluşturulması.

Ağırlıklandırılmış karar matrisi $[R]$, Eşitlik (2.39) kullanılarak elde edilmiştir ve Tablo 3.29.'da gösterilmektedir.

Tablo 3.29. Ağırlıklandırılmış karar matrisi $[R]$

Alternatifler ($i = 1, \dots, 59$)	Kriterler ($j = 1, \dots, 6$)					
	Hata Oranı (%)	Tespit Yeri Skoru	Frekans	Hurda İşçilik Maliyeti (TL)	Hurda Malzeme Maliyeti (TL)	Yeniden İşleme Maliyeti (TL)
	r_{i1}	r_{i2}	r_{i3}	r_{i4}	r_{i5}	r_{i6}
C00	0,000	0,003	0,001	0,0000103	0,0000004	0,0000113
C02	0,001	0,002	0,001	0,0000004	0,0000008	0,0029598
D00	0,000	0,002	0,002	0,0000357	0,0000024	0,0000135
D01	0,000	0,002	0,004	0,0024141	0,0107054	0,0000113
D02	0,001	0,003	0,005	0,0061001	0,0118491	0,0000056
D03	0,000	0,003	0,002	0,0011649	0,0035086	0,0000090
D04	0,000	0,002	0,001	0,0000160	0,0000057	0,0000270
D05	0,001	0,002	0,001	0,0000301	0,0000071	0,0000090
D06	0,000	0,002	0,001	0,0000280	0,0000025	0,0000113
D07	0,000	0,005	0,010	0,0017801	0,0274604	0,0000225
D99	0,011	0,003	0,002	0,0000012	0,0000047	0,0153814
H01	0,001	0,002	0,001	0,0001026	0,0000201	0,0000113
H04	0,001	0,009	0,002	0,0001026	0,0000426	0,0000113
H05	0,002	0,002	0,001	0,0003591	0,0008927	0,0000113
H06	0,002	0,005	0,005	0,0016567	0,0071718	0,0000225

Tablo 3.29 devam ediyor

H07	0,000	0,002	0,001	0,0000465	0,0000757	0,0000086
H09	0,002	0,002	0,023	0,0115856	0,0152791	0,0000090
H10	0,001	0,002	0,017	0,0051927	0,0057957	0,0000207
H11	0,000	0,003	0,001	0,0000012	0,0000038	0,0017143
H12	0,000	0,006	0,002	0,0000513	0,0000918	0,0000225
H99	0,000	0,002	0,001	0,0000410	0,0000911	0,0000113
I00	0,001	0,006	0,001	0,0000616	0,0000084	0,0000135
I02	0,006	0,003	0,009	0,0004446	0,0001791	0,0118180
I99	0,004	0,003	0,001	0,0000004	0,0000038	0,0000338
M00	0,016	0,003	0,001	0,0000458	0,0000723	0,0000180
M02	0,008	0,003	0,001	0,0000219	0,0000017	0,0000113
M03	0,001	0,005	0,001	0,0000328	0,0000101	0,0000225
M08	0,000	0,003	0,001	0,0000189	0,0000038	0,0000034
M09	0,004	0,003	0,004	0,0027692	0,0014109	0,0000113
M10	0,000	0,003	0,004	0,0006546	0,0164702	0,0000225
M99	0,000	0,003	0,001	0,0002463	0,0007169	0,0000056
N01	0,000	0,003	0,029	0,0031634	0,0021891	0,0022527
N02	0,001	0,002	0,001	0,0000012	0,0000040	0,0021401
N03	0,001	0,002	0,002	0,0007781	0,0055430	0,0000011
N05	0,003	0,005	0,004	0,0014092	0,0068696	0,0000113
N06	0,001	0,002	0,001	0,0003112	0,0004223	0,0000225
N07	0,000	0,002	0,001	0,0000130	0,0000031	0,0000225
N08	0,000	0,002	0,001	0,0000246	0,0000027	0,0033340
N09	0,000	0,006	0,001	0,0000294	0,0000150	0,0000045
N12	0,000	0,005	0,001	0,0000004	0,0000037	0,0019481
N13	0,000	0,002	0,001	0,0006670	0,0004307	0,0000113
N14	0,001	0,002	0,068	0,0153651	0,0285724	0,0000451
N16	0,001	0,002	0,058	0,0191730	0,0538084	0,0000216
N17	0,000	0,002	0,007	0,0003124	0,0002704	0,0000068
N20	0,001	0,002	0,001	0,0019702	0,0000470	0,0000090
N99	0,001	0,003	0,005	0,0002777	0,0008245	0,0000034
S00	0,004	0,003	0,001	0,0000006	0,0000048	0,0033790
S03	0,004	0,003	0,001	0,0000004	0,0000037	0,0056317
S04	0,009	0,003	0,002	0,0000005	0,0000063	0,0025343
S05	0,002	0,003	0,008	0,0002059	0,0001547	0,0092698
S06	0,011	0,003	0,006	0,0000000	0,0000077	0,0078968
S07	0,000	0,003	0,001	0,0000002	0,0000039	0,0008684
S09	0,006	0,003	0,001	0,0000003	0,0000032	0,0001802
S10	0,007	0,005	0,002	0,0000130	0,0000004	0,0000676
S11	0,001	0,003	0,001	0,0000004	0,0000004	0,0000225
S99	0,004	0,003	0,017	0,0003575	0,0004980	0,0182693
T05	0,000	0,002	0,001	0,0000342	0,0000721	0,0000023
T08	0,001	0,005	0,002	0,0000821	0,0001426	0,0045899
T99	0,000	0,003	0,001	0,0002564	0,0001060	0,0000090

Adım 4.4.: Kriterlere göre alternatif değerlerinin hesaplanması.

Tablo 3.29.'da verilen ağırlıklandırılmış karar matrisi $[R]$ 'deki kriterler maliyet türü kriterler oldukları için Eşitlik (2.41) kullanılarak alternatif değerleri S_i^- , Tablo 3.30.'daki gibi elde edilmiştir.

Tablo 3.30. Alternatif değerleri

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
S_i^-	0,004	0,006	0,004	0,019	0,027	0,010	0,002
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
S_i^-	0,004	0,002	0,045	0,031	0,003	0,012	0,006
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
S_i^-	0,020	0,002	0,054	0,030	0,005	0,009	0,002
Alternatifler	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
S_i^-	0,008	0,030	0,008	0,020	0,012	0,007	0,004
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
S_i^-	0,016	0,024	0,005	0,040	0,005	0,010	0,020
Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
S_i^-	0,004	0,002	0,006	0,007	0,008	0,004	0,114
Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
S_i^-	0,133	0,009	0,005	0,011	0,011	0,014	0,017
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
S_i^-	0,023	0,028	0,006	0,010	0,013	0,005	0,044
Alternatifler	T05	T08	T99				
S_i^-	0,002	0,012	0,004				

Adım 4.5.: Alternatiflerin göreceli önem değerlerinin hesaplanması.

Alternatiflerin göreceli önem değerleri Q_i , Eşitlik (2.42) kullanılarak elde edilmiştir ve Tablo 3.31.'de gösterilmektedir.

Tablo 3.31. Alternatiflerin göreceli önem değerleri

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
Q_i	0,025	0,018	0,027	0,006	0,004	0,011	0,048
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
Q_i	0,031	0,05	0,003	0,004	0,04	0,009	0,02
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
Q_i	0,006	0,05	0,002	0,004	0,021	0,013	0,05
Alternatifler	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
Q_i	0,013	0,004	0,015	0,006	0,01	0,016	0,03
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
Q_i	0,007	0,005	0,022	0,003	0,023	0,011	0,006
Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
Q_i	0,031	0,052	0,019	0,017	0,014	0,029	0,001

Tablo 3.31. devam ediyor

Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
Q_i	0,001	0,012	0,021	0,01	0,011	0,008	0,007
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
Q_i	0,005	0,004	0,02	0,011	0,009	0,024	0,003
Alternatifler	T05	T08	T99				
Q_i	0,051	0,01	0,025				

Adım 4.6.: En yüksek göreceli önem değerlerinin belirlenmesi.

En yüksek göreceli öncelik değeri Q_{max} , Eşitlik (2.43) kullanılarak 0,52 olarak elde edilmiştir.

Adım 4.7.: Her bir alternatif için performans indeksi değerlerinin hesaplanması.

Her bir alternatif için performans indeksi P_i , Eşitlik (2.44) kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 3.32.'de gösterilmiştir.

COPRAS ağırlıklandırma yöntemiyle, alternatifler için hesaplanan sıralama ağırlıklarına göre (bkz. Tablo 3.32.), en önemli hata türü, 100,00 ile, N07 kodlu hata türüdür. İkinci en önemli hata türü, 98,012 ile T05 kodlu hata türü ve üçüncü en önemli hata türü, 96,911 ile D06 kodlu hata türüdür.

Tablo 3.32. Alternatiflerin performans indeksi değerleri

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
P_i	48,687	34,512	52,069	11,219	7,919	20,983	93,013
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
P_i	60,495	96,911	4,887	7,052	76,334	18,008	38,494
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
P_i	10,663	95,598	4,057	7,181	39,990	24,921	96,567
Alternatifler	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
P_i	26,032	7,298	28,276	10,938	18,567	30,176	57,385
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
P_i	13,970	9,037	41,601	5,440	43,841	20,740	11,135
Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
P_i	58,989	100,000	35,971	32,165	26,841	55,581	1,906
Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
P_i	1,631	22,976	39,896	20,191	20,617	15,726	13,163
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
P_i	9,375	7,690	39,283	21,294	16,855	46,069	4,951
Alternatifler	T05	T08	T99				
P_i	98,012	18,513	49,236				

Adım 5. TPOP yöntemiyle ÇKKV yöntemlerinden elde edilen alternatiflere ilişkin sıralamaların birleştirilmesi.

Adım 5.1.: Alternatif Sıralama matrisinin oluşturulması.

Farklı ÇKKV yaklaşımlarından elde edilen alternatiflerin sıralama matrisi [S], Eşitlik (2.45) kullanılarak elde edilmiş ve Tablo 3.33.'te gösterilmiştir.

Tablo 3.33. Alternatiflerin sıralama matrisi [S]

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
AS_i	0,428	0,412	0,432	0,234	0,150	0,232	0,494
H_i	10,163	27,626	-4,199	-9,325	-19,537	-15,163	21,427
P_i	48,687	34,512	52,069	11,219	7,919	20,983	93,013
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
AS_i	0,452	0,498	0,244	0,385	0,477	0,405	0,388
H_i	21,066	22,587	-21,990	-10,768	20,797	-16,017	20,550
P_i	60,495	96,911	4,887	7,052	76,334	18,008	38,494
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
AS_i	0,101	0,497	0,278	0,216	0,399	0,401	0,497
H_i	-20,956	21,893	-11,417	-11,106	16,562	-17,650	23,919
P_i	10,663	95,598	4,057	7,181	39,990	24,921	96,567
Alternatifler	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
AS_i	0,414	0,211	0,391	0,437	0,407	0,394	0,451
H_i	-8,516	-19,450	16,074	14,519	17,028	-7,473	16,517
P_i	26,032	7,298	28,276	10,938	18,567	30,176	57,385
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
AS_i	0,175	0,260	0,403	0,206	0,426	0,299	0,135
H_i	-18,761	-15,564	-5,499	-20,090	21,510	-2,445	-20,416
P_i	13,970	9,037	41,601	5,440	43,841	20,740	11,135
Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
AS_i	0,449	0,500	0,434	0,468	0,377	0,441	0,573
H_i	20,547	23,135	5,272	20,366	-6,040	2,532	-11,406
P_i	58,989	100,000	35,971	32,165	26,841	55,581	1,906
Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
AS_i	0,653	0,313	0,413	0,215	0,343	0,336	0,326
H_i	-11,434	-10,261	20,664	-19,837	15,660	-4,254	-10,688
P_i	1,631	22,976	39,896	20,191	20,617	15,726	13,163
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
AS_i	0,193	0,228	0,392	0,375	0,369	0,420	0,260
H_i	-19,335	-12,145	-3,543	-3,973	-0,126	30,844	-20,031
P_i	9,375	7,690	39,283	21,294	16,855	46,069	4,951
Alternatifler	T05	T08	T99				
AS_i	0,499	0,354	0,430				
H_i	23,888	-13,607	14,671				
P_i	98,012	18,513	49,236				

Adım 5.2.: Alternatif sıralama matrisinin normalize edilmesi.

Farklı ÇKKV yaklaşımlarından elde edilen alternatiflerin sıralama matrisi [S]'de yer alan alternatif sıralama ağırlıkları, Eşitlik (2.46) kullanılarak normalize edilmiş ve Tablo 3.34.'te sunulmuştur. Tabloda belirtilen J_{i1} , J_{i2} ve J_{i3} indisleri sırasıyla; EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinden elde edilen alternatif sıralama ağırlıklarının normalize edilmiş değerlerini göstermektedirler.

Tablo 3.34. Alternatiflerin normalize sıralama ağırlık değerleri

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
J_{i1}	0,020	0,019	0,020	0,011	0,007	0,011	0,023
J_{i2}	0,011	0,031	0,005	0,010	0,022	0,017	0,024
J_{i3}	0,025	0,018	0,027	0,006	0,004	0,011	0,048
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
J_{i1}	0,021	0,023	0,011	0,018	0,022	0,019	0,018
J_{i2}	0,024	0,025	0,025	0,012	0,023	0,018	0,023
J_{i3}	0,031	0,050	0,003	0,004	0,040	0,009	0,020
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
J_{i1}	0,005	0,023	0,013	0,010	0,019	0,019	0,023
J_{i2}	0,023	0,025	0,013	0,012	0,019	0,020	0,027
J_{i3}	0,006	0,050	0,002	0,004	0,021	0,013	0,050
Alternatifler	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
J_{i1}	0,019	0,010	0,018	0,020	0,019	0,018	0,021
J_{i2}	0,010	0,022	0,018	0,016	0,019	0,008	0,018
J_{i3}	0,013	0,004	0,015	0,006	0,010	0,016	0,030
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
J_{i1}	0,008	0,012	0,019	0,010	0,020	0,014	0,006
J_{i2}	0,021	0,017	0,006	0,023	0,024	0,003	0,023
J_{i3}	0,007	0,005	0,022	0,003	0,023	0,011	0,006
Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
J_{i1}	0,021	0,023	0,020	0,022	0,017	0,020	0,027
J_{i2}	0,023	0,026	0,006	0,023	0,007	0,003	0,013
J_{i3}	0,031	0,052	0,019	0,017	0,014	0,029	0,001
Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
J_{i1}	0,030	0,014	0,019	0,010	0,016	0,016	0,015
J_{i2}	0,013	0,011	0,023	0,022	0,018	0,005	0,012
J_{i3}	0,001	0,012	0,021	0,010	0,011	0,008	0,007
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
J_{i1}	0,009	0,011	0,018	0,017	0,017	0,019	0,012
J_{i2}	0,022	0,014	0,004	0,004	0,000	0,035	0,022
J_{i3}	0,005	0,004	0,020	0,011	0,009	0,024	0,003
Alternatifler	T05	T08	T99				
J_{i1}	0,023	0,016	0,020				
J_{i2}	0,027	0,015	0,016				
J_{i3}	98,012	18,513	49,236				

Adım 5.3.: Alternatif sıralama ağırlıklarına ait entropi değerlerinin hesaplanması.

Alternatif sıralama ağırlıklarının entropisi, Eşitlik (2.47)'ye göre hesaplanmış ve Tablo 3.35.'te sunulmuştur.

Tablo 3.35. Alternatif sıralama ağırlıklarına ait entropi değerleri

EDAS	CODAS	COPRAS
e_1	e_2	e_3
0,987	0,969	0,920

Adım 5.4: Kullanılan her bir ÇKKV yaklaşımı için ağırlıkların hesaplanması.

Her bir ÇKKV yaklaşımı için, ağırlık değerleri Eşitlik (2.48)'e göre hesaplanmış ve Tablo 3.36.'da sunulmuştur.

Tablo 3.36. Her bir ÇKKV yaklaşımı için ağırlık değerleri

EDAS	CODAS	COPRAS
g_1	g_2	g_3
0,104	0,249	0,647

Adım 5.5.: Her bir ÇKKV yaklaşımı için g'_b değerlerinin hesaplanması.

g'_b değerleri, Eşitlik (2.49)'a göre hesaplanmış ve Tablo 3.37'de sunulmuştur.

Tablo 3.37. Her bir ÇKKV yaklaşımı için g'_b değerleri

EDAS	CODAS	COPRAS
g'_1	g'_2	g'_3
1,323	1,499	1,804

Adım 5.6.: Her bir ÇKKV yaklaşımı için G'_b değerinin hesaplanması.

G'_b değeri, Eşitlik (2.50)'ye göre hesaplanmış ve 4,626 olarak bulunmuştur.

Adım 5.7.: Her bir ÇKKV yaklaşımı için kesin ağırlıkların hesaplanması.

Her bir ÇKKV yaklaşımı için kesin ağırlık değerleri (w_b^*), Eşitlik (2.51)'e göre hesaplanmış ve Tablo 3.38.'de sunulmuştur.

Tablo 3.38. ÇKKV yaklaşımları için w_b^* değerleri

EDAS	CODAS	COPRAS
w_1^*	w_2^*	w_3^*
0,286	0,324	0,390

Adım 5.8.: Her bir ÇKKV yaklaşımı için alternatif sıralama ağırlıklarının normalize edilmesi.

EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinde alternatiflerin sıralanmasında, daha yüksek s_b değerinin istenilmesi sebebiyle, Eşitlik (2.54) kullanılarak sırasıyla EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinden elde edilen, alternatifler için final sıralama ağırlıklarının normalize edilmiş değerleri p_{i1} , p_{i2} , p_{i3} , Tablo 3.39.'da sunulmuştur.

Tablo 3.39. Final sıralama ağırlık değerlerinin normalizasyonu

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
p_{i1}	0,408	0,438	0,401	0,759	0,912	0,764	0,288
p_{i2}	0,391	0,061	0,663	0,760	0,954	0,871	0,178
p_{i3}	0,522	0,666	0,487	0,903	0,936	0,803	0,071
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
p_{i1}	0,365	0,282	0,741	0,486	0,319	0,451	0,480
p_{i2}	0,185	0,156	1,000	0,788	0,190	0,887	0,195
p_{i3}	0,402	0,031	0,967	0,945	0,241	0,834	0,625
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
p_{i1}	1,000	0,284	0,681	0,792	0,460	0,457	0,282
p_{i2}	0,980	0,169	0,800	0,794	0,270	0,918	0,131
p_{i3}	0,908	0,045	0,975	0,944	0,610	0,763	0,035
Alternatifler	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
p_{i1}	0,434	0,802	0,476	0,391	0,445	0,470	0,366
p_{i2}	0,745	0,952	0,280	0,309	0,261	0,725	0,271
p_{i3}	0,752	0,942	0,729	0,905	0,828	0,710	0,433
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
p_{i1}	0,867	0,712	0,454	0,810	0,412	0,642	0,938
p_{i2}	0,939	0,878	0,688	0,964	0,177	0,630	0,970
p_{i3}	0,875	0,925	0,594	0,961	0,571	0,806	0,903
Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
p_{i1}	0,370	0,278	0,396	0,336	0,501	0,384	0,145
p_{i2}	0,195	0,146	0,484	0,198	0,698	0,536	0,800
p_{i3}	0,417	0,000	0,651	0,690	0,744	0,452	0,997
Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
p_{i1}	0,000	0,617	0,436	0,795	0,563	0,576	0,593
p_{i2}	0,800	0,778	0,193	0,959	0,287	0,664	0,786
p_{i3}	1,000	0,783	0,611	0,811	0,807	0,857	0,883
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
p_{i1}	0,834	0,771	0,473	0,504	0,515	0,423	0,712
p_{i2}	0,950	0,814	0,651	0,659	0,586	0,000	0,963
p_{i3}	0,921	0,938	0,617	0,800	0,845	0,548	0,966
Alternatifler	T05	T08	T99				
p_{i1}	0,280	0,543	0,405				
p_{i2}	0,132	0,841	0,306				
p_{i3}	0,020	0,828	0,516				

Adım 5.9.: Alternatifler için eksponansiyel ağırlıklı normalize final sıralama değerlerinin hesaplanması.

Her bir alternatif için, eksponansiyel ağırlıklı normalize final sıralama ağırlığı (u_{ib}), Eşitlik (2.56) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 3.40.'ta sunulmuştur.

Adım 5.10.: Alternatifler için nihai seçim indeksinin hesaplanması.

Her bir alternatif için nihai seçim indeksi (FRW_i), Eşitlik (2.57) kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 3.40.'ta sunulmuştur.

Tablo 3.40. Ekponansiyel ağırlıklı normalize final sıralama ağırlıkları ve alternatifler için nihai sıralama ağırlıkları

Alternatifler	C00	C02	D00	D01	D02	D03	D04
p_{i1}	2,001	2,062	1,987	2,844	3,313	2,857	1,775
p_{i2}	2,045	1,469	2,684	2,957	3,588	3,303	1,652
p_{i3}	2,489	2,874	2,404	3,642	3,766	3,298	1,586
FRW_i	6,534	6,406	7,075	9,444	10,667	9,457	5,013
Alternatifler	D05	D06	D07	D99	H01	H04	H05
u_{i1}	1,917	1,764	2,793	2,163	1,831	2,089	2,151
u_{i2}	1,664	1,617	3,758	3,039	1,672	3,357	1,680
u_{i3}	2,207	1,524	3,884	3,800	1,879	3,399	2,760
FRW_i	5,788	4,905	10,436	9,002	5,382	8,845	6,592
Alternatifler	H06	H07	H09	H10	H11	H12	H99
p_{i1}	3,618	1,768	2,629	2,938	2,108	2,102	1,765
u_{i1}	3,686	1,638	3,077	3,059	1,812	3,462	1,576
u_{i2}	3,663	1,545	3,917	3,795	2,719	3,169	1,530
u_{i3}	10,967	4,950	9,623	9,791	6,639	8,733	4,871
FRW_i	I00	I02	I99	M00	M02	M03	M08
u_{i1}	2,055	2,969	2,142	1,968	2,078	2,129	1,919
u_{i2}	2,912	3,582	1,829	1,883	1,796	2,855	1,813
u_{i3}	3,133	3,790	3,062	3,653	3,380	3,004	2,278
FRW_i	8,100	10,341	7,033	7,504	7,254	7,988	6,011
Alternatifler	M09	M10	M99	N01	N02	N03	N05
u_{i1}	3,168	2,714	2,096	2,992	2,010	2,529	3,402
u_{i2}	3,536	3,328	2,751	3,626	1,650	2,596	3,648
u_{i3}	3,542	3,724	2,674	3,863	2,614	3,306	3,645
FRW_i	10,245	9,766	7,522	10,481	6,274	8,431	10,695
Alternatifler	N06	N07	N08	N09	N12	N13	N14
u_{i1}	1,928	1,757	1,979	1,863	2,197	1,955	1,539
u_{i2}	1,680	1,600	2,243	1,686	2,779	2,363	3,076
u_{i3}	2,241	1,477	2,832	2,944	3,107	2,320	4,004
FRW_i	5,849	4,834	7,054	6,493	8,084	6,638	8,619

Tablo 3.40. devam ediyor

Alternatifler	N16	N17	N20	N99	S00	S03	S04
u_{i1}	1,331	2,466	2,058	2,946	2,337	2,367	2,408
u_{i2}	3,078	3,010	1,676	3,608	1,843	2,687	3,035
u_{i3}	4,015	3,232	2,721	3,325	3,310	3,479	3,571
FRW_i	8,424	8,708	6,456	9,879	7,490	8,533	9,014
Alternatifler	S05	S06	S07	S09	S10	S11	S99
u_{i1}	3,063	2,878	2,137	2,204	2,227	2,032	2,713
u_{i2}	3,574	3,120	2,651	2,672	2,485	1,383	3,622
u_{i3}	3,711	3,775	2,738	3,288	3,439	2,556	3,882
FRW_i	10,349	9,773	7,526	8,164	8,151	5,971	10,217
Alternatifler	T05	T08	T99				
u_{i1}	1,762	2,291	1,995				
u_{i2}	1,577	3,207	1,878				
u_{i3}	1,507	3,382	2,475				
FRW_i	4,846	8,880	6,347				

Adım 5.11.: Alternatiflerin sıralanması.

Adım 5.10'da elde edilen ve Tablo 3.40.'ta gösterilen FRW değerlerine göre alternatifler, Tablo 3.41.'de verildiği şekilde sıralanmıştır.

Tablo 3.41. Alternatiflerin sıralanması

Sıra	Alternatifler	Sıra	Alternatifler	Sıra	Alternatifler	Sıra	Alternatifler
1	N07	16	N09	31	I00	46	H09
2	T05	17	C00	32	S10	47	M10
3	H99	18	H05	33	S09	48	S06
4	D06	19	N13	34	N16	49	H10
5	H07	20	H11	35	N03	50	N99
6	D04	21	I99	36	S03	51	S99
7	H01	22	N08	37	N14	52	M09
8	D05	23	D00	38	N17	53	I02
9	N06	24	M02	39	H12	54	S05
10	S11	25	S00	40	H04	55	D07
11	M08	26	M00	41	T08	56	N01
12	N02	27	M99	42	D99	57	D02
13	T99	28	S07	43	S04	58	N05
14	C02	29	M03	44	D01	59	H06
15	N20	30	N12	45	D03		

TPOP ağırlıklandırma yöntemiyle, alternatifler için belirlenmiş sıralamaya göre (bkz. Tablo 3.41.), en önemli ilk üç alternatif sırasıyla, N07, T05 ve H99 kodlu hata türleridir.

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmada, savunma ve havacılık sanayisine özgü proseslerdeki kalite problemlerini belirlemek amacıyla ÇKKV yapısı kullanılarak yeni bir HTEA yaklaşımı geliştirilmeye çalışılmıştır. Bu yaklaşımda, proseste ortaya çıkabilecek hataların önem düzeylerinin belirlenmesi için Entropi, PSI ve CRITIC yöntemlerinden yararlanılmıştır. Buradaki amaç, farklı bakış açılarıyla kriter ağırlığı hesaplayan yöntemlerin bir arada kullanılabilmesini sağlamaktır. Söz konusu üç ağırlıklandırma yönteminden elde edilen sonuçlar, geometrik ortalamaya dayalı bir birleştirme operatörü kullanılarak tek bir kriter sıralamasına indirgenmiştir. Kullanılan kriter ağırlıklandırma yöntemlerinin hepsi objektif olarak alternatiflerin kriterlere göre aldıkları nicel değerleri kullanarak ağırlık hesaplayabilen, kriter sayısı sınırı olmayan ve karar vericiye ihtiyaç duymayan yöntemlerdir. Aşağıda, Entropi, PSI, CRITIC ve bu üç yöntemin bir arada kullanıldığı Bütünleşik Kriter Ağırlıklandırma Yöntemi'nden elde edilen kriter sıralamaları Tablo 3.42.'de sunulmuştur.

Tablo 3.42. Entropi, PSI, CRITIC ve bütünleşik ağırlıklandırma yöntemlerinden elde edilen kriter sıralamaları

	Entropi	PSI	CRITIC	Bütünleşik Yöntem
Hata Oranı	3	4	4	4
Frekans	5	2	1	1
Tespit Yeri Skoru	6	1	2	3
Hurda İşçilik Maliyeti	1	6	6	5
Hurda Maleme Maliyeti	2	3	3	2
Yeniden İşleme Maliyeti	4	5	5	6

Entropi, PSI ve CRITIC yöntemlerinden elde edilen kriter sıralamaları incelendiğinde, (bkz. Tablo 3.42.), PSI ve CRITIC yöntemlerinden elde edilen sıralamaların birbirine çok yakın olduğu söylenebilir. Söz konusu iki yöntemde sadece “Frekans” ve “Tespit Yeri Skoru” kriterleri yer değiştirmektedir.

Kullanılan kriter ağırlıklandırma yöntemlerinden elde edilen sıralamaların birbirleriyle karşılaştırılabilmesi amacıyla, sıralama şeklinde verilen değişkenler arasındaki ilişkinin derecesini belirten Spearman Sıralama Korelasyon Katsayısı kullanılmıştır. Eşitlik (2.58) kullanılarak hesaplanan Spearman Sıralama Korelasyon Katsayıları Tablo 3.43.'te sunulmuştur.

Tablo 3.43. Kriter sıralamaları arasındaki korelasyon katsayısı değerleri

Kriter Ağırlıklandırma Yöntemleri	Entropi	PSI	CRICTIC	Bütünleşik Yöntem
Entropi	1	-0,771	-0,714	-0,314
PSI	-0,771	1	0,943	0,771
CRICTIC	-0,714	0,943	1	0,886
Bütünleşik Yöntem	-0,314	0,771	0,886	1

Kullanılan kriter ağırlıklandırma yöntemlerinden elde edilen sıralamaların birbiri arasındaki ilişki düzeyleri incelendiğinde (bkz. Tablo 3.43.), birbirine en benzer sıralamanın, 0,943 katsayısıyla PSI ve CTIRIC yöntemlerinden elde edilen sıralamalar olduğu söylenebilir. Bunu 0,886 katsayısıyla CRITIC ve Bütünleşik Yöntemden elde edilen kriter sıralamalarının benzerliği izlemektedir. Üçüncü sırada birbirine en benzer kriter sıralamalarının elde edildiği yöntemler ise, 0,771 katsayısıyla PSI ve Bütünleşik Yöntemdir. PSI ve CRITIC yöntemlerinin birbirleri arasındaki ilişki düzeyinin yüksek olmasının sebebi aşağıdaki gibi açıklanabilir:

PSI yönteminde kullanılan tercih değerinden sapma miktarında, kriterler için hesaplanan değişkenlik yani varyans kullanılmaktadır (bkz. Eşitlik (2.5)). CRITIC yönteminde ise kriterlerin sıralanmasında, içerdikleri bilgi düzeyi hesaplanmaktadır (bkz. (Eşitlik (2.16))). Buna göre standart sapması yüksek olan kritere ait önem ağırlığı da yüksek olmaktadır. Bununla birlikte, hem CRITIC hem de PSI yöntemlerine ait sıralamaların yüksek düzeyde bütünleşik yöntemden elde edilen kriter sıralamalarıyla ilişkili olduğu görülmektedir.

Entropi yönteminden elde edilen sıralamaların ise, Bütünleşik Ağırlıklandırma Yöntemi ile zayıf ve ters yönde ilişkili olduğu belirlenmiştir. Bu durum Entropi yönteminde, başlangıç karar matrisindeki kriterlere ait bilgilerin eksiklik düzeyinden yola çıkılmasından kaynaklanmaktadır. PSI ve CRITIC yöntemlerinde ise, başlangıç karar matrisindeki veriler kapsamında kriterler için değişkenlik düzeyi sorgulanmaktadır. Her iki yöntem benzer bakış açılarına sahip oldukları için Bütünleşik Kriter Ağırlıklandırma Yönteminden elde edilen sıralamalar üzerindeki etkileri daha fazla ortaya çıkmıştır.

Önerilen yaklaşımın ikinci aşamasında ise EDAS, COPRAS ve CODAS yöntemleri kullanılarak hata türleri sıralanmıştır. Bu sıralamada, birinci aşamada elde edilen bütünleşik kriter ağırlıkları dikkate alınmıştır. EDAS ve CODAS sıralama yöntemlerinin ortak özelliği uzaklık ölçütleriyle çalışmalarıdır. COPRAS yöntemi de, fayda ve maliyet türü kriterlerin sıralama üzerindeki etkilerini yansıtmaya çalışmaktadır.

EDAS, CODAS, COPRAS ve bu üç yöntemden elde edilen sonuçların kullanıldığı TPOP yöntemlerinden elde edilen alternatif sıralamaları Tablo 3.44.'te sunulmuştur.

Tablo 3.44. EDAS, CODAS, COPRAS, TPOP yöntemlerinden elde edilen alternatif sıralamaları

Sıra	EDAS	CODAS	COPRAS	TPOP
C00	19	23	14	17
C02	24	2	23	14
D00	17	30	12	23
D01	48	36	43	44
D02	57	53	49	57
D03	49	46	32	45
D04	8	9	6	6
D05	11	10	8	8
D06	5	6	3	4
D07	47	59	56	55
D99	34	39	53	42
H01	9	11	7	7
H04	26	48	38	40
H05	33	13	21	18
H06	59	58	46	59
H07	7	7	5	5
H09	44	42	57	46
H10	51	40	52	49
H11	29	17	18	20
H12	28	49	29	39
H99	6	3	4	3
I00	22	35	28	31
I02	53	53	51	53
I99	32	19	29	21
M00	15	22	45	26
M02	25	16	36	24
M03	30	34	25	29
M08	12	18	10	11
M09	56	50	41	52
M10	46	47	48	47
M99	27	32	17	27
N01	54	56	54	56
N02	20	8	16	12
N03	43	27	33	35
N05	58	57	44	58
N06	13	14	9	9
N07	3	5	1	1
N08	16	24	22	22
N09	10	15	24	16

Tablo 3.44. devam ediyor

N12	35	33	27	30
N13	14	25	11	19
N14	2	41	58	37
N16	1	43	59	34
N17	42	37	30	38
N20	23	12	19	15
N99	52	54	35	50
S00	39	20	34	25
S03	40	31	40	36
S04	41	38	42	43
S05	55	51	47	54
S06	50	44	50	48
S07	31	28	20	28
S09	36	29	31	33
S10	37	26	39	32
S11	21	1	15	10
S99	45	55	55	51
T05	4	4	2	2
T08	38	45	37	41
T99	18	21	13	13

Kullanılan alternatif sıralama yöntemlerinden elde edilen sıralamaların birbirleriyle karşılaştırılabilmesi amacıyla, Spearman Sıralama Korelasyon Katsayısı kullanılmıştır. Eşitlik (2.58) kullanılarak hesaplanan korelasyon, Tablo 3.45.'te sunulmuştur.

Tablo 3.45. Alternatif sıralamaları arasındaki korelasyon katsayısı değerleri

Alternatif Sıralama Yöntemleri	EDAS	CODAS	COPRAS	TPOP
EDAS	1,000	0,752	0,676	0,870
CODAS	0,752	1,000	0,809	0,956
COPRAS	0,676	0,809	1,000	0,887
TPOP	0,870	0,956	0,887	1,000

Kullanılan alternatif sıralama yöntemlerinden elde edilen sıralamaların birbirleriyle ilişki düzeyleri incelendiğinde (bkz. Tablo 3.45.), birbirine en benzer sıralamanın, 0,956 katsayısıyla CODAS ve TPOP yöntemlerinden elde edilen sıralamalar olduğu söylenebilmektedir. Bunu 0,870 korelasyonu ile EDAS ve TPOP yöntemlerinden elde edilen kriter sıralamalarının benzerliği izlemektedir. Üçüncü sırada birbirine en benzer alternatif sıralamalarının elde edildiği yöntemler ise, 0,887 katsayısıyla COPRAS ve TPOP yöntemleridir. Buna göre, TPOP yönteminden elde edilen sıralamaların, diğer yöntemlerden

elde edilen sıralamalarla pozitif yönde, güçlü bir ilişkisi vardır ve elde edilen nihai sıralama, kullanılan EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinin etkisini yansıtmaktadır.

İleride yapılacak olan çalışmalarda önerilen yaklaşım, farklı sektörler için gerçekleştirilen HTEA uygulamalarında kullanılabilir. Ayrıca farklı sayıda, farklı kriterler kullanılarak yaklaşımın uygulaması gerçekleştirilebilir. Yaklaşım dahilinde kullanılan ÇKKV yöntemleri dışında, farklı ÇKKV yöntemleri uygulamaya entegre edilebilir.

KAYNAKLAR

- [1] “TSV 2023 - Stratejik lokomotif sektörler: güvenlik, savunma ve savunma sanayi.” TSV2023.com. <http://www.tsv2023.org/index.php/en/stratejik-lokomotif-sektorler/41-uncategorised/144-guevenlk-savunma-ve-savunma-sanay.html>. (Accessed: Dec. 23, 2019).
- [2] Y. Ayrım, “Risk değerlendirmesi için üç aşamalı sezgisel bulanık bir yaklaşım önerisi,” M.S. thesis, Dept. Ind. Eng., Başkent Univ., Ankara, Turkey, 2017.
- [3] J. Trixier, G. Dusserre, O. Salvi and D. Gaston, “Review of 62 risk analysis methodologies of industrial plants,” *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 291-303, Jul. 2002.
- [4] Ö. Özkılıç. “İş Sağlığı ve Güvenliği, yönetim sistemleri ve risk değerlendirme metodolojileri.” [ozlemozkilocakademi.com. https://1012af86-1cd9-467a-9363-265bf75a7743.filesusr.com/ugd/6eefe5_dcaeb8efafd0445a8d2350773b3d5ba2.pdf](https://1012af86-1cd9-467a-9363-265bf75a7743.filesusr.com/ugd/6eefe5_dcaeb8efafd0445a8d2350773b3d5ba2.pdf) (Accessed: Dec. 30, 2019).
- [5] O. Çevik and G. Aran, “Kalite iyileştirme sürecinde Hata Türü Etkileri Analizi (FMEA) ve piston üretiminde bir uygulama.” [dergipark.org, https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/289386](https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/289386), (Accessed: Jan. 03, 2020).
- [6] R. Attri and S. Grover, “Application of preference selection index method for decision making over the design stage of production system life cycle,” *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, vol. 27, pp. 207-216, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.jksues.2013.06.003
- [7] L. Wu, J. Sun, L. Liang and Y. Zha, “Determination of weights for ultimate cross efficiency using Shannon entropy,” *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 5162-5165, May. 2011, doi: 10.1016/j.eswa.2010.10.046
- [8] E. Mulliner, K. Smallbone and V. Maliene, “An assessment of sustainable housing affordability using a multiple criteria decision making method,” *Omega*, s. 270-273, Apr. 2013, doi: 10.1016/j.omega.2012.05.002

- [9] K. Ghorabae, E. K. Zavadskas, Z. Turskis and J. Antucheviciene, "A new Combinative Distance-based Assessment (CODAS) Method for Multi-criteria Decision-making," *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, vol. 50, no. 3, pp. 25-44, Sept. 2016.
- [10] Y. Dorfeshan, S. M. Mousavi, V. Mohagheghi and B. Vahdani, "Selecting project-critical path by a new interval type-2 fuzzy decision methodology based on MULTIMOORA, MOOSRA and TPOP methods," *Computers & Industrial Engineering*, pp. 160-178, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.cie.2018.04.015
- [11] A. J. J. Braaksma, W. Klingenberg and J. Veldman, "Failure mode and effect analysis in asset maintenance: a multiple case study in the process industry," *International Journal of Production Research*, vol. 51, no. 4, pp. 1055-1071, Jan. 2012, doi: 10.1080/00207543.2012.674648
- [12] B. Aksu, A. Paradkar, M. Matas, Ö. Özer, T. Güneri and P. York, "A quality by design approach using artificial intelligence techniques to control the critical quality attributes of ramipril tablets manufactured by wet granulation," *Pharmaceutical Development and Technology*, vol. 18, no. 1, pp. 236-245, Feb. 2013, doi: 10.3109/10837450.2012.705294
- [13] C. Chen "A developed autonomous preventive maintenance programme using RCA and FMEA," *International Journal of Production Research*, vol. 51, no. 18, pp. 5404-5412, Sept. 2013, doi: 10.1080/00207543.2013.775521
- [14] W., Song, X. Ming, Z. Wu and B. Zhu, "Failure modes and effects analysis using integrated weight-based fuzzy TOPSIS," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 26, no. 12, pp. 1172-1186, Feb. 2013 doi: 10.1080/0951192X.2013.785027
- [15] H. Liu, L. Liu and P. Li, "Failure mode and effects analysis using intuitionistic fuzzy hybrid weighted Euclidean distance operator," *International Journal of Systems Science*, vol. 45, no. 10, pp. 2012-2030, 2014, doi: 10.1080/00207721.2012.760669

- [16] T. Yeh and L. Chen, "Fuzzy-based risk priority number in FMEA for semiconductor wafer processes," *International Journal of Production Research*, vol. 52, no. 2, pp. 539-549, Jan. 2014, doi: 10.1080/00207543.2013.837984
- [17] R. Apreda, A. Bonaccorsi, G. Fantoni and D. Gabelloni, "Functions and failures: how to manage technological promises for societal challenges," *Technology Analysis & Strategic Management*, vol. 26, no. 4, pp. 369-384, Apr. 2014, doi: 10.1080/09537325.2013.850653
- [18] H. Alyami, P. T. Lee, Z. Yang, R. Riahi, S. Bonsall and J. Wang, "An advanced risk analysis approach for container port safety evaluation," *Maritime Policy & Management*, vol. 41, no. 7, pp. 634-650, Nov. 2014, doi: 10.1080/03088839.2014.960498
- [19] H., Yörükoğlu, "Yenilenebilir enerji kaynakları risklerinin FUZZY-FMEA yöntemi ile analizi," M.S. thesis, Dep. Ind. Eng., Kocaeli Univ., Kocaeli, Turkey, 2014.
- [20] M. B. Fakoya, "Failure modes and effects analysis of repeating accounting students," *Journal of Social Sciences*, vol. 41, no. 1, pp. 37-43, 2014, doi: 10.1080/09718923.2014.11893339
- [21] M. B. Zaman, E. Kobayashi, S. Khanfir, T. Pitana and A. Maimun, "Fuzzy FMEA model for risk evaluation of ship collisions in the Malacca Strait: based on AIS data," *Journal of Simulation*, vol. 8, no. 1, pp. 91-104, Feb. 2014, doi: 10.1057/jos.2013.9
- [22] C. Lin, A. H. I. Lee and H. Kang, "An integrated new product development framework – an application on green and lowcarbon products," *International Journal of Systems Science*, vol. 46, no. 4, pp. 733-753, 2015, doi: 10.1080/00207721.2013.798447
- [23] J. Wang, S. Kan, T. Chen and J. Liu, "Application of quality by design (QbD) to formulation and processing of naproxen pellets by extrusion–spheronization," *Pharmaceutical Development and Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 246-256, Mar. 2015, doi: 10.3109/10837450.2014.908300

- [24] B. Nepal and O. P. Yadav, "Bayesian belief network-based framework for sourcing risk analysis during supplier selection," *International Journal of Production Research*, vol. 53, no. 20, pp. 6114-6135, 2015, doi: 10.1080/00207543.2015.1027011
- [25] E. M. Altunbey, "HTEA' da Ağırlıklandırılmış Aralık Tip 2 Bulanık Kural Tabanı Sistemi yaklaşımı ve uygulaması," M.S. thesis, Dept. Ind. Eng., İstanbul Teknik Univ., İstanbul, Turkey, 2015.
- [26] F. Okumuş, "Taşyünü üretim tesisinde Hata Türü ve Etkileri Analizi ile Taguschi Deney Tasarımının birlikte uygulanması," M.S. thesis, Dept. Ind. Eng., Kocaeli Univ., Kocaeli, Turkey, 2015.
- [27] K. Chang, "A novel general risk assessment method using the soft TOPSIS approach," *Journal of Industrial and Production Engineering*, vol. 32, no. 6, pp. 408-421, 2015, doi: 10.1080/21681015.2015.1070375
- [28] M. Çakmak, "Demir-çelik sektöründe Bulanık Hata Türleri ve Etkileri Analizi (FUZZY FMEA) Yöntemi ile risk değerlendirme uygulaması," M.S. thesis, Dept. Computer. Eng., Karabük Univ., Karabük, Turkey, 2015.
- [29] N. Kara, "Savunma ve havacılık sanayiinde yeni ürün geliştirme projelerinde risk yönetimi süreci başlangıç aşamasının analizi," M.S. thesis, Dep. Business Administration, Bahçeşehir Univ. İstanbul, Turkey, 2015.
- [30] S. Luo and G. Lee, "Applying failure mode and effects analysis for successful knowledge management," *Total Quality Management & Business Excellence*, vol. 26, no. 1, pp. 62-75, 2015, doi: 10.1080/14783363.2012.733263
- [31] D. I. Stavrou and N. P. Ventikos, "A novel approach in risk evaluation for ship-to-ship (STS) transfer of cargo using process failure mode and effects analysis (PFMEA)," *Journal of Risk Research*, vol. 19, no. 7, pp. 913-933, 2016, doi: 10.1080/13669877.2015.1043572
- [32] S. Liu, J. Cheng, Y. Lee and F. Gau, "A case study on FMEA-based quality improvement of packaging designs in the TFT-LCD industry," *Total Quality*

- Management & Business Excellence*, vol. 27, no. 4, pp. 413-431, 2016, doi: 10.1080/14783363.2015.1004308
- [33] A. Huang, W. Hsieh, C. Pan, S. Ou, and H. Wang, "Applying HFMEA for the prevention of human error during instrument sterilization procedures: A case study on a medical center in central Taiwan," *IIE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, vol. 6, no. 3, pp. 162-173, 2016, doi: 10.1080/19488300.2016.1199612
- [34] B. Erten, "İlaç lojistik sektöründe 5*5 Matris, Fine Kinney ve FMEA yöntemleri ile risk değerlendirmelerinin karşılaştırılması," M.S. thesis, Dep. Occupational Health and Safety, İstanbul Aydın Univ. İstanbul, Turkey, 2016.
- [35] E. Akyuz, I. Akgun and M. Celik, "A fuzzy failure mode and effects approach to analyse concentrated inspection campaigns on board ships," *Maritime Policy & Management*, vol. 43, no. 7, pp. 887-908, Apr. 2016, doi: 10.1080/03088839.2016.1173737
- [36] H. Liu, J. You, S. Chen and Y. Chen, "An integrated failure mode and effect analysis approach for accurate risk assessment under uncertainty," *IIE Transactions*, vol. 48, no. 11, pp. 1027-1042, Apr. 2016, doi: 10.1080/0740817X.2016.1172742
- [37] I. Pergher, V. P. Brandolf, D. A. J. Pacheco and G. L. R. Vaccaro, "A patient-centric approach to improve health care services," *Cogent Business & Management*, vol. 3, no. 1227232, 2016.
- [38] S. Rezaian, "Environmental, health, and safety risks of the power lines nearby the human settlements," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 22, no. 8, pp. 1696-1707, Aug. 2016, doi: 10.1080/10807039.2016.1218272
- [39] Y. Zhou, J. Xia, Y. Zhong and J. Pang, "An improved FMEA method based on the linguistic weighted geometric operator and fuzzy priority," *Quality Engineering*, vol. 28, no. 4, pp. 491-498, May. 2016, doi: 10.1080/08982112.2015.1132320
- [40] A. Lux, J. M. Bikond, A. Etienne and E. Quillerou-Grivot, "FMEA and consideration of real work situations for safer design of production systems," *International Journal*

of *Occupational Safety and Ergonomics*, vol. 22, no. 4, pp. 557-564, Aug. 2016, doi: 10.1080/10803548.2016.1180856

- [41] S. H. R. Hajiagha, S. S., Hashemi, Y. Mohammadi and E. K. Zavadskas, "Fuzzy belief structure based VIKOR method: an application for ranking delay causes of Tehran metro system by FMEA criteria," *Transport*, vol. 31, no. 1, pp. 108-118, Jan. 2016, doi: 10.3846/16484142.2016.1133454
- [42] M. Ahmadi, K. Behzadian, A. Ardeshir and Z. Kapelan, "Comprehensive risk management using fuzzy FMEA and MCDA techniques in highway construction projects," *Journal of Civil Engineering and Management*, vol. 23, no. 2, pp. 300-310, Jul. 2016, doi: 10.3846/13923730.2015.1068847
- [43] T. B. Romdhane, A. Badreddine and M. Sansa, "A new model to implement Six Sigma in small- and medium-sized enterprises," *International Journal of Production Research*, vol. 55, no. 15, pp. 4319-4340, Oct. 2016, doi: 10.1080/00207543.2016.1249430
- [44] J. Meekhof and A. B. Bailey, "Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) for Cataloging: An Application and Evaluation," *Cataloging & Classification Quarterly*, vol. 55, no. 7, pp. 493-505, 2017, doi: 10.1080/01639374.2017.1356782
- [45] H. Liu, L. Wang, X., You and S. Wu, "Failure mode and effect analysis with extended grey relational analysis method in cloud setting," *Total Quality Management & Business Excellence*, Jun. 2017, doi: 10.1080/14783363.2017.1337506
- [46] E. Pazireh, A. H. Sadeghi and S. Shokohyar "Analyzing the enhancement of production efficiency using FMEA through simulation-based optimization technique: A case study in apparel manufacturing," *Cogent Engineering*, vol. 4, no. 1284373, Jan. 2017, doi: 10.1080/23311916.2017.1284373
- [47] Y. Ozdemir, M. Gul and E. Celik, "Assessment of occupational hazards and associated risks in fuzzy environment: A case study of a university chemical laboratory," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 23, no. 4, pp. 895-924, Feb. 2017, doi: 10.1080/10807039.2017.1292844

- [48] W. Jiang, C. Xie, B. Wei and Y. Tang, "Failure Mode and Effects Analysis based on Z-numbers," *Intelligent Automation & Soft Computing*, May. 2017, doi: 10.1080/10798587.2017.1327158
- [49] J. Perisic, M. Milovanovic, I. Petrovic, L. Radovanovic, M. Ristic, V. Perisic and M. Vrbanac, "Modeling and risk analysis of brine mixing mobile unit operation processes," *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, vol. 12, no. 7, pp. 646-653, Mar. 2017, doi: 10.1080/15567249.2016.1259694
- [50] M. Gul, and E. Celik, "Fuzzy rule-based Fine–Kinney risk assessment approach for rail transportation systems," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, Jan. 2018, doi: 10.1080/10807039.2017.1422975
- [51] L. Cure, A. Elliott and S. Nicks, "Identifying appropriate interruption-handling strategies during healthcare care processes," *IIEE Transactions on Healthcare Systems Engineering*, vol. 7, no. 4, pp. 261-270, 2017, doi: 10.1080/24725579.2017.1380087
- [52] T. Casian, S. Lurian, C. Bogdan, L. Rus, M. Moldovan and I. Tomuta, "QbD for pediatric oral lyophilisates development: risk assessment followed by screening and optimization," *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 43, no. 12, pp. 1932-1944, Jul. 2017, doi: 10.1080/03639045.2017.1350702
- [53] A. Parand, G. Faiella, B. D. Franklin, M. Johnston, F. Clemente, N. A. Stanton And N. Secdalis, "A prospective risk assessment of informal carers' medication administration errors within the domiciliary setting," *Ergonomics*, vol. 61, no. 1, pp. 104-121, 2018, doi: 10.1080/00140139.2017.1330491
- [54] M. Chiu, C. Chu and C. Chen, "An integrated product service system modelling methodology with a case study of clothing industry," *International Journal of Production Research*, vol. 56, no. 6, pp. 2388-2409, 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1374570
- [55] A. Kokangül, U. Polat ve C. Dağsuyu, "A new approach for environmental risk assessment," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 24, no. 1, pp. 90-104, 2018, doi: 10.1080/10807039.2017.1364132

- [56] H. İ. Ayaz, "Bilgisayar veri günlükleri üzerine HTEA otomasyonu ve alternatif yöntemler ile çözüm yaklaşımları," M.S. thesis, Dep. Ind. Eng., Hacettepe Univ. Ankara, Turkey, 2018.
- [57] H. Liu, X. You, F. Tsung and P. Ji, "An improved approach for failure mode and effect analysis involving large group of experts: An application to the healthcare field," *Quality Engineering*, Apr. 2018, doi: 10.1080/08982112.2018.1448089
- [58] M. B. Kumar and R. Parameshwaran, "Fuzzy integrated QFD, FMEA framework for the selection of lean tools in a manufacturing organisation," *Production Planning & Control*, vol. 29, no. 5, pp. 403-417, Feb. 2018, doi: 10.1080/09537287.2018.1434253
- [59] V. S. Chudiwal, S. Shahi and S. Chudiwal, "Development of sustained release gastro-retentive tablet formulation of nicardipine hydrochloride using quality by design (QbD) approach," *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 44, no. 5, pp. 787-799, 2018, doi: 10.1080/03639045.2017.1413111
- [60] B. Witold and J. Ruzbarsky, "Breakdown cause and effect analysis. Case study," *Management Systems in Production Engineering*, vol. 26, no. 2, pp. 83-87, Jun. 2018, doi: 10.1515/mspe-2018-0013
- [61] Y. Chen, Y. Hou, A. Peterson and M. Ahmadian, "Failure mode and effects analysis of dual levelling valve airspring suspensions on truck dynamics," *Vehicle System Dynamics*, 2018, doi: 10.1080/00423114.2018.1480787
- [62] A. Khare, U. S. Pande and M. Majumder, "Identification and FMEA analysis of working fluid properties for OTEC plants," *Journal of Information and Optimization Sciences*, vol. 39, no. 1, pp. 263-273, 2018, doi: 10.1080/02522667.2017.1374729
- [63] I. Alsyouf, U. Kumar, L. Al-Ashi and M. Al-Hammadi, "Improving baggage flow in the baggage handling system at a UAE-based airline using lean Six Sigma tools," *Quality Engineering*, Feb. 2018, doi: 10.1080/08982112.2018.1437180
- [64] N. U. Putra and F. Wang, "Integrating quality function deployment and failure mode and effect analysis in subcontractor selection," *Total Quality Management & Business Excellence*, Feb. 2018, doi: 10.1080/14783363.2018.1444473

- [65] B. Garg, S. Beg, R. Kaur, R. Kumar, O. P. Katare and B. Singh, "Long-chain triglycerides-based self-nanoemulsifying oily formulations (SNEOFs) of darunavir with improved lymphatic targeting potential," *Journal of Drug Targeting*, vol. 26, no. 3, pp. 252-266, 2018, doi: 10.1080/1061186X.2017.1365875
- [66] S. Beg, S. Sarwar, S. Saini, S. Bandopadhyay, O. Prakash, "QbD-driven development and evaluation of nanostructured lipid carriers (NLCs) of Olmesartan medoxomil employing multivariate statistical techniques", *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 43, no. 3, pp. 407-420, 2018, doi: 10.1080/03639045.2017.1395459
- [67] G. H. Oh, J. H. Park, H. W. Shin, J. E. Won, J. E. Kim and Y. J. Park, "Quality-by-design approach for the development of telmisartan potassium tablets," *Drug Development and Industrial Pharmacy*, vol. 44, no. 5, pp. 837-848, 2018, doi: 10.1080/03639045.2017.1414233
- [68] Y. Trakulsunti, J. Antony, A. Ghadge and S. Gupta, "Reducing medication errors using LSS Methodology: A systematic literature review and key findings," *Total Quality Management & Business Excellence*, Feb. 2018, doi: 10.1080/14783363.2018.1434771
- [69] A. Prashar, "Toward cycle time reduction in manufacturing SMEs: Proposal and evaluation," *Quality Engineering*, vol. 30, no. 3, pp. 1-45, Apr. 2018, doi: 10.1080/08982112.2018.1460669
- [70] I. Lazakis, Y. Raptodimos and T. Varelas, T. "Predicting ship machinery system condition through analytical reliability tools and artificial neural networks," *Ocean Engineering*, pp. 405-415, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2017.11.017
- [71] A. Karasan, E. Ilbahar, S. Cebi and C. Kahraman, "A new risk assessment approach: Safety and Critical Effect Analysis (SCEA) and its extension with Pythagorean fuzzy sets," *Safety Science*, pp. 173-187, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.04.031
- [72] Y. Liu, Z. Kong and Q. Zhang, "Failure modes and effects analysis (FMEA) for the security of the supply chain system of the gas station in China," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, pp. 325-330, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.ecoenv.2018.08.028

- [73] R. B. Santos, U. R. Oliveira and H. M. Rocha, "Failure mapping for occupational safety management in the film and television industry," *International Journal of Production Economics*, pp. 1-12, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.ijpe.2018.05.024
- [74] R. Fattahi and M. Khalilzadeh, "Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment," *Safety Science*, pp. 290-300, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2017.10.018
- [75] S. Yousefi, A. Alizadeh, J. Hayati and M. Bagheri, "HSE risk prioritization using robust DEA-FMEA approach with undesirable outputs: A study of automotive parts industry in Iran," *Safety Science*, pp. 144-158, Feb. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2017.10.015
- [76] E. Ilbahar, A. Karaşan, S. Cebi and C. Kahraman, "A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system," *Safety Science*, pp. 124-136, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2017.10.025
- [77] A. M. Kumar, S. Rajakarunakaran, P. Pitchipoo and R. Vimalasan, "Fuzzy based risk prioritisation in an auto LPG dispensing station," *Safety Science*, pp. 231-247, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2017.09.011
- [78] W. Wang, X. Liu, Y. Qin and Y. Yong, "A risk evaluation and prioritization method for FMEA with prospect theory and Choquet integral," *Safety Science*, pp. 152-163, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.08.009
- [79] R. Bubbico, V. Greco, C. Menale, "Hazardous scenarios identification for Li-ion secondary batteries," *Safety Science*, pp. 72-88, Apr. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.04.024
- [80] V. R. Renjith, M. J. Kalathil, P. H. Kumar and D. Madhavan, "Fuzzy FMECA (failure mode effect and criticality analysis) of LNG storage facility," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, pp. 537-547, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.jlp.2018.01.002

- [81] R. Nie, Z. Tian, X. Wang, J. Wang and T. Wang, "Risk evaluation by FMEA of supercritical water gasification system using multi-granular linguistic distribution assessment," *Knowledge-Based Systems*, pp. 185-201, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.knosys.2018.05.030
- [82] M. Catelani, L. Ciani and M. Venzi, "Failure modes, mechanisms and effect analysis on temperature redundant sensor stage," *Reliability Engineering and System Safety*, pp. 425-433, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.ress.2018.08.013
- [83] A. Arabsheybani, M. M. Paydar and A. S. Safaei, "An integrated fuzzy MOORA method and FMEA technique for sustainable supplier selection considering quantity discounts and supplier's risk," *Journal of Cleaner Production*, pp. 557-591, 2018. (doi: 10.1016/j.jclepro.2018.04.167
- [84] H., Liu, X., Chen, C., Duan and Y.M., Wang, Failure mode and effect analysis using multi-criteria decision making methods: A systematic literature review, *Computers & Industrial Engineering*, s.881-897, 2019, doi: 10.1016/j.cie.2019.06.055
- [85] W. Wang, X. Liu, Y. Qin and Y. Fu, "A risk evaluation and prioritization method for FMEA with prospect theory and Choquet integral," *Safety Science*, pp. 152-163, Aug. 2018, doi: 10.1016/j.ssci.2018.08.009
- [86] T. K. Polat, "Risk priority with Fuzzy Logic: Application of a textile factory," *Journal of Science*, vol. 23, no. 2, pp. 203-212, Apr. 2019, doi: 10.16984/sofenbilder.458807
- [87] N. G. Mutlu and S. Altuntaş, "Hazard and risk analysis for ring spinning yarn production process by Integrated FTA-FMEA Approach," *Tekstil ve Konfeksiyon*, vol. 29, no. 3, pp. 208-218, Apr. 2019, doi: 10.32710/tekstilvekonfeksiyon.482167
- [88] S. Mete, "Assessing occupational risks in pipeline construction using FMEA-based AHP-MOORA integrated approach under Pythagorean fuzzy environment," *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, vol. 25, no. 7, pp. 1645-1660, Jan. 2019, doi: 10.1080/10807039.2018.1546115
- [89] P. Cano-Olivos, R. Hernandez-Zitlalpopoca, D. Sanchez-Partida, S. Caballero-Morales and J. Martinez-Flores, "Risk analysis of the supply chain of a tools

- manufacturer in Puebla, Mexico,” *Wiley*, vol. 27, pp. 406-413, Jan. 2019, doi: 10.1111/1468-5973.12258
- [90] M. Hecht and D. Baum, “Failure propagation modeling in FMEAs for reliability, safety, and cybersecurity using SysML,” *Procedia Computer Science*, vol. 153, pp. 370-377, 2019, doi: 10.1016/j.procs.2019.05.091
- [91] A. Geramian, A. Abrahan and A. Nozari, “Fuzzy logic-based FMEA robust design: a quantitative approach for robustness against groupthink in group/team decision-making,” *International Journal of Production Research*, 2019, doi: 10.1080/00207543.2018.1471236
- [92] K. K. Dadsena, S. P. Sarmah and V. N. A. Naikan, “Risk evaluation and mitigation of sustainable road freight transport operation: a case of trucking industry,” *International Journal of Production Research*, vol. 57, no. 19, pp. 6223-6245, Feb. 2019, doi: 10.1080/00207543.2019.1578429
- [93] A. Karami and R. Johnsson, “Utilization of Multi Attribute Decision Making Techniques to integrate automatic and manual ranking of options,” *Journal of Information and Engineering*, vol. 30, pp. 519-534, Mar. 2014.
- [94] K. Maniya and M. G. Bhatt, “A selection of material using a novel type decision-making method: Preference selection index method,” *Materials & Design*, vol. 31, no. 4, pp. 1785-1789, Apr. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.11.020
- [95] M. Madic and M. Radovanovic, “Ranking of some most commonly used non-traditional machining process using ROV and CRITIC Methods” *U.P.B. Sci. Bull.*, vol. 77, no. 2, pp. 1454-2358, Jan. 2015.
- [96] E. K. Zavadskas and A. Kaklauskas, “Systemotechnical evaluation of buildings (Pastatų sistemotechninis įvertinimas),” *Vilnius: Technika*, 280p, 1996.
- [97] A. Kaklauskas, E. K. Zavadskas, M. K. Naimaviciene, V. Plakys and D. Venskus, “Model for a complex analysis of intelligent built environment,” *Automation in Construction*, pp. 326-340, May. 2010, doi: 10.1016/j.autcon.2009.12.006

- [98] V. Ömürbek, E. Aksoy ve Ö. Akçakanat, "Bankaların sürdürülebilir performanslarının ARAS, MOOSRA ve COPRAS Yöntemleri ile değerlendirilmesi," *Vizyoner Dergisi*, vol. 8, no. 19, pp. 14-32, Nov. 2017, doi: 10.21076/vizyoner.329346
- [99] A. Jahan, F. Mustapha, S. M. Sapuan, M. Y. Ismail, and M. Bahraminasab, "A framework for weighting of criteria in ranking stage of material selection process," *Int J Adv Manuf Technol*, vol. 58, pp. 411-420, Jan. 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3366-7
- [100] B. Bairaghi, B. Dey, B. Sarkar and S. K. Sanyal, "A De Novo multi-approaches multi-criteria decision making technique with an application in performance evaluation of material handling device," *Computers & Industrial Engineering*, pp. 267-282, Sept. 2015, doi: 10.1016/j.cie.2015.05.015
- [101] Y. Çeber, "Hata Türü ve Etkileri Analizi yönteminin (FMEA) üretim sektöründe uygulanması," M.S. thesis, Dep. Total Quality Managment, Dokuz Eylül Univ. İzmir, Turkey, 2010.
- [102] M. Demircioğlu ve İ. T. Coşkun, "CRITIC-MOOSRA Yöntemi ve UPS seçimi üzerine bir uygulama," *Ç.Ü. Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, vol. 27, no. 1, pp. 183-195, Jan. 2018.
- [103] O. Kılıç ve H. Çerçioğlu, "TCDD iltisak hatları projelerinin değerlendirilmesinde uzlaşık çok ölçütlü karar verme yöntemleri uygulaması," *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.*, vol. 31, no. 1, pp. 221-220, 2016.
- [104] D. H. Stamatis, *Failure Mode And Effects Analysis – FMEA from Theory To Execution*, A. Koudstaa, Ed., Milwaukee, Wisconsin, USA: ASQ Quality Press, 2003.
- [105] H. Çelik, "Analitik Hiyerarşi Yöntemi ile elektronik hizmet kalitesi performansı analizi: Mevduat bankaları üzerine bir uygulama," M.S. thesis, Dep. Business Administration, Nevşehir Hacı Bektaş Veli Univ. Nevşehir, Turkey, 2015.
- [106] N. Karakaşoğlu, "Bulanık çok kriterli karar verme yöntemleri ve uygulama," M.S. thesis, Dep. Business Administration, Pamukkale Univ. Denizli, Turkey, 2008.

- [107] G. Aran, "Kalite iyileştirme sürecinde Hata Türü Etkileri Analizi (FMEA) ve bir uygulama" M.S. thesis, Dep. Business Administration, Gaziosmanpaşa Univ. Tokat, Turkey, 2006.
- [108] "FMEA - Hata Türü ve Etkileri Analizi (HTEA), Endüstri Mühendisleri İletişim Portalı." Endüstrimuhendisligi.blogspot.com. <http://endustrimuhendisligi.blogspot.com/2012/12/fmea-hata-turleri-ve-etkileri-analizi.html> (Accessed: Dec. 23, 2019).
- [109] M. Gök, "G20 Ülkelerinin enerji göstergeleri açısından çok kriterli karar verme teknikleri ile sıralanması," M.S. thesis, Dep. Business Administration, Ankara Univ. Ankara, Turkey, 2015.
- [110] A. Valls and V. Torra, "Using classification as an aggregation tool in MCDM," *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 159-168, Oct. 2000.

EKLER

