

**OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE DİZAYN
ÇALIŞMALARININ ÖNCELİKLENDİRMELERİNE
YÖNELİK Q SEVİYELİ ORTOPER BULANIK KÜME
TEORİSİ VE MULTIMOORA İLE GELİŞTİRİLMİŞ HATA
TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİ**

**FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS
INTEGRATED WITH Q-RUNG ORTHOPAIR FUZZY SET
THEORY AND MULTIMOORA FOR PRIORITIZATION
OF DESIGN WORKS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY**

SENEM MASAT

PROF. DR DİYAR AKAY

Tez Danışmanı

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı için Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak hazırlanmıştır.

ÖZET

OTOMOTİV ENDÜSTRİSİNDE DİZAYN ÇALIŞMALARININ ÖNCELİKLENDİRMELERİNE YÖNELİK Q SEVİYELİ ORTOPER BULANIK KÜME TEORİSİ VE MULTIMOORA İLE GELİŞTİRİLMİŞ HATA TÜRÜ VE ETKİLERİ ANALİZİ

Senem MASAT

Yüksek Lisans, Endüstri Mühendisliği Bölümü

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Diyar AKAY

Ağustos 2024, 48 sayfa

Otomotiv endüstrisinde artan rekabet gücü ile işletmelerin devamlılıklarını sürdürebilmeleri için yüksek kalite standartlarına sahip olmaları beklenmektedir. Bu standartları yakalayabilmek için potansiyel hata risklerini ölçmeleri; hatalar müşteriye taşınmadan gerekli müdahalelerde bulunarak riskleri azaltmaya ve nihai olarak ortadan kaldırmaya yönelik faaliyetlerde bulunmaları gerekmektedir. Tam olarak bu noktada hata türü ve etki analizi (HTEA) gibi kalite risk değerlendirme araçları karşımıza çıkmaktadır. HTEA, 1960'larda askeri havacılık endüstrisinde dizayn çalışmalarında risklerin azaltılması ve ürünlerin güvenilirliğinin artırılması amacıyla ortaya çıkmış bir yöntemdir. Yöntem, tespit edilebilirlik (D), olasılık (O), şiddet (S) olarak tanımlanan risk faktörlerinin çarpılması ile elde edilen risk öncelik sayısı (RÖS) ile sistemlerde ortaya çıkan/çıkması muhtemel olan risklerin sıralamasını belirlemeyi amaçlamaktadır. HTEA, tasarım, proses, sistem ve hizmet konularına odaklanarak olası hataları tüketiciye ulaşmadan önce tespit edip hatayı tanımlayıp yok etmeyi amaçlayan bir mühendislik

tekniki olarak literatürde yer almaktadır. Bunun yanı sıra öznellik ve buna bağlı belirsizlik içeren niteliksel hatalar, uzmanların tanımlamalarındaki eksiklikler, farklı risk faktörlerinin çarpımı ile elde edilen aynı RÖS değerleri ile öncelik sıralamasının yapılamaması, risk faktörlerindeki en ufak değişimin sıralamaları belirgin bir şekilde etkilemesi, risk faktörlerinin aynı önem derecesinde değerlendirilmesi geleneksel HTEA'nın kısıtları olarak karşımıza çıkmaktadır. Bulanık küme teorilerinin dilsel etiketlerin, belirsizlik ve öznellik kısıtlamaları ile başa çıkmakta başarılı olduğu yapılan çalışmalarda ortaya konulmuştur. Bu çalışmada, geleneksel HTEA'nın bahsedilen eksiklerinin üstesinden gelebilmek için yeni bir bakış açısı ile q seviyeli ortoper bulanık ağırlıklandırılmış birleştirme operatörleri ile geliştirilmiş oran analizi temeline dayalı çok amaçlı optimizasyon ve tam çarpımsal form (MULTIMOORA) yöntemi ile entegre edilmiş HTEA önerilmektedir. İlk olarak, bilginin yetersizliğini ve belirsizliğini etkili bir şekilde ele almak için dilsel etiketler, q seviyeli ortoper bulanık sayılara (QSBS) dönüştürülmektedir. İkinci aşamada, uzman ve risk faktörlerine ait önem derecesi eksikliğini gidermek için uzman ve risk faktörlerine QSBS kullanılarak farklı ağırlıklar atanmaktadır. Sonraki aşamada farklı alan tecrübesine sahip uzmanlardan elde edilen değerlendirmeler q seviyeli ortoper bulanık ağırlıklandırılmış birleştirme operatörleri kullanılarak grup seviyesi görüşüne getirilmiştir. Son olarak, HTEA'nın bilgi toplama sürecini optimize etmek için q seviyeli ortoper bulanık küme (QSBK) teorisi yardımıyla oran sistemine, referans noktası yöntemine ve MULTIMOORA alt yöntemlerinin tam çarpma biçimine yeni bir bakış açısı ile katkı sağlaması amaçlanmaktadır. Çalışmada otomotiv endüstrisinden toplanan gerçek veriler kullanılarak tasarım çalışmalarının önceliklendirilmesine yönelik bir uygulama yapılmıştır. Son olarak önerilen yöntemin, diğer çok kriterli karar verme yöntemleri ile elde edilen sonuçların karşılaştırılması, duyarlılık analizi ve önerilen yaklaşımın HTEA risk analiz metoduna uygunluğuna dair değerlendirme yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Karar Verme, Bulanık Kümeler, Hata Türü ve Etkileri Analizi, Birleştirme Operatörleri, Risk Önceliklendirme

ABSTRACT

FAILURE MODE AND EFFECTS ANALYSIS INTEGRATED WITH Q-RUNG ORTHOPAIR FUZZY SET THEORY AND MULTIMOORA FOR PRIORITIZATION OF DESIGN WORKS IN AUTOMOTIVE INDUSTRY

Senem MASAT

Master of Science, Department of Industrial Engineering

Supervisor: Prof. Dr. Diyar AKAY

August 2024, 48 pages

Businesses must ensure continuity by maintaining high-quality standards as competition increases in the automotive industry. The achievement of high-quality standards requires measuring potential error risks and taking action to reduce and eliminate them before transferring them to the customer. At this point, quality risk assessment tools such as failure mode and effect analysis (FMEA) appear. FMEA is a technique that was introduced by the military aviation industry in the 1960s to reduce risks in design studies and improve product safety. The technique aims to determine the ranking of the risks that arise/are likely to arise in the systems with the risk priority number obtained by multiplying the risk factors defined as detectability (D), probability (O), and severity (S). FMEA that is included in the literature as an engineering technique that focuses on design, process, system and service issues and aims to identify and eliminate possible failures, errors and problems before they reach the consumer. In addition, qualitative failure involving subjectivity and related uncertainty, deficiencies in the error definitions of experts, inability to prioritize with the same risk priority number obtained by multiplying different numbers, the slightest change in risk factors significantly affecting the rankings,

and the evaluation of risk factors with the same degree of importance are the limitations of traditional FMEA. In this study, to overcome the mentioned limitations of traditional FMEA, the MULTIMOORA method, developed with q-rung orthopair aggregation operators, is proposed as a FMEA method with a new perspective. First, linguistic evaluation information is converted into q-rung orthopair fuzzy numbers to handle the inadequacy and uncertainty of information effectively. Second, expressions defined by linguistic expressions are assigned different priorities using q-rung orthopair fuzzy numbers to solve the problem of the weight of expert and risk factors using by aggregation operators. Finally, the proposed method is aimed to compare the results obtained with other multi-criteria decision-making methods, perform sensitivity analysis and evaluate the proposed approach in terms of its suitability to the FMEA risk analysis method.

Keywords: Decision-Making, Fuzzy Sets, Failure Mode and Effects Analysis, Aggregation Operators, Risk Prioritization

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın yürütülmesinde katkısı bulunan Danıőmanım Sn. Prof. Dr. Diyar Akay'a,
Okul hayatım boyunca harcadığım emeklerin kat be kat fazlasını harcayan, bugüne kadar
başarmıő olduğum tüm güzel işlerin sahipleri olan çok kıymetli Annem Gönül ve çok
kıymetli Babam Mehmet Ersoy'a,

Tez döneminde yeni bir yuva kurmanın bedelini acı tecrübelerle ödeyen, günün her
saatinde ders alışabilmem için beni motive eden ve emek harcayan cefakâr eşim
Mustafa'ya,

Çalışmalarımı yakından takip eden ve beni dualarından hiç eksik etmeyen manevi canım
annelerim Fatma, Semiha ve Saniye'ye, değerli halalarım Serpil ve Canan'a ve ismini
geçiremediğim çok sevgili Ablalarım,

Can ve kan bağı ile bağlı olduğum Masat, Kaya ve Karakuő Ailelerine sağladıkları
desteklerden dolayı gönülden teşekkür ediyorum, hepinize minnettarım.

Senem Masat

Ankara

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
İÇİNDEKİLER.....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	ix
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	x
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR TARAMASI.....	5
2.1. Otomotiv Endüstrisinde Dizayn Çalışmalarında Kullanılan Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri.....	5
2.2. Hata Türü ve Etkileri Analizi Çalışmaları.....	8
3. METODOLOJİ.....	16
3.1. q Seviyeli Ortoper Bulanık Küme.....	16
3.2. q Seviyeli Ortoper Ağırlıklandırılmış Birleştirme Operatörü.....	19
3.3. MOORA.....	19
3.3.1. MOORA Oran Sistemi.....	20
3.3.2. MOORA Referans Noktası Yaklaşımı.....	22
3.3.3. MOORA Önem Katsayısı Yaklaşımı.....	22
3.3.4. MOORA Tam Çarpım Metodu.....	23
3.3.5. MULTIMOORA.....	23
3.4. Önerilen HTEA ve q Seviyeli Ortoper Bulanık Ağırlıklandırılmış Birleştirme Operatörleri ile Geliştirilmiş MULTIMOORA Yöntemi.....	24
4. UYGULAMA.....	29
4.1. Otomotiv Endüstrisinde Dizayn Çalışmalarının Önceliklendirilmesine Yönelik Bir Uygulama.....	29

4.2. Duyarlılık Analizi	36
4.3. Karşılaştırma ve Değerlendirme	37
5. SONUÇ ve YORUM	39
6. KAYNAKLAR	43
EKLER.....	47
EK 1 – Tez Çalışması Orjinallik Raporu	47
ÖZGEÇMİŞ	48

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Tez organizasyon şeması	4
Şekil 3.1. SBK, PBK ve QSBK arasındaki ilişki	18
Şekil 3.2. MULTIMOORA akış diyagramı	24
Şekil 3.3. Önerilen yöntemin akış diyagramı	25
Şekil 4.1. Önerilen yöntem ile farklı q seviyelerine göre elde edilen sıralamalar	37
Şekil 4.2. Önerilen yöntemin diğer ÇKKV teknikleri ile karşılaştırılması	38

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 3.1. Çok kriterli karar verme yöntemlerinin karşılaştırılması	20
Çizelge 3.2. Dilsel etiketlerin q seviyeli ortoper bulanık sayı değerleri.....	26
Çizelge 4.1. Uzman ekip tarafından belirlenen hata türleri	31
Çizelge 4.2. Dilsel etiketlerden oluşan uzman ekip hata değerlendirme matrisi.....	31
Çizelge 4.3. Dilsel etiketlerden oluşan matrisin q seviyeli bulanık sayılara dönüştürülmesi	32
Çizelge 4.4. Uzman ağırlıkları.....	32
Çizelge 4.5. Risk faktörü ağırlıkları.....	33
Çizelge 4.6. Birleştirilmiş grup karar matrisi	33
Çizelge 4.7. Karar matrisi	34
Çizelge 4.8. Normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış karar matrisi.....	34
Çizelge 4.9. MOORA yöntemleri ile elde edilen sıralamalar.....	35
Çizelge 4.10. MULTIMOORA final sıralaması	36

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

O	Olasılık
S	Şiddet
D	Tespit edilebilirlik
\tilde{A}	Bulanık Küme
\tilde{B}	Sezgisel Bulanık Küme
\tilde{C}	Pisagor Bulanık Küme
\tilde{D}	Q Seviyeli Ortoper Bulanık Küme
$\mu_{\tilde{A}}$	Bulanık Sayılar için Üyelik Derecesi
$\nu_{\tilde{A}}$	Bulanık Sayılar için Üye Olmama Derecesi
q	Parametre
$S(\tilde{D})$	Skor Fonksiyonu
w	Kriter Ağırlığı
λ	Karar Verici Ağırlığı
Π	Çarpım
Σ	Toplam

Kısaltmalar

AHP	Analitik Hiyerarşi Süreci
COPRAS	Karmaşık Oransal Değerlendirme
CRITIC-MARCOS	Kriterler Arası Korelasyon Yoluyla Kriterlerin Önemi- Uzlaşma Çözümüne Göre Ölçüm Alternatifleri ve Sıralama
CRP	Uzlaşmaya Varma Prosesi
ÇKKV	Çok Kriterli Karar Verme

ELECTRE	Eliminasyon ve Seçim Gerçeğine Dönüştürme
FER	Bulanık Kanıtsal Akıl Yürütme Yaklaşımını
GİA	Gri İlişkisel Analiz
HTEA	Hata Türü ve Etkileri Analizi
IVSF	Aralık Değerli Küresel Bulanık Küme
IVSWAM	Aralık Değerli Küresel Ağırlıklı Aritmetik Ortalama Operatörü
ITARA	Kayıtsızlık Eşiği Tabanlı Öznitelik Oranı Analizi
MULTIMOORA	Oran Analizi Temeline Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon ve Tam Çarpımsal Form
OWA	Sıralı Ağırlıklı Ortalama Operatörünü
PBK	Pisagor Bulanık Küme
PDHLTS	Olasılıksal Çift Hiyerarşi Dilsel Küme
PROMETHEE	Gerçekliği Yansıtan Eleme ve Seçim
QSBS	Q Seviyeli Ortoper Bulanık Sayı
QSBK	Q Seviyeli Ortoper Bulanık Küme
q-ROFWA	Q Seviyeli Ağırlıklandırılmış Birleştirme Operatörü
RÖS	Risk Öncelik Sırası
SBK	Sezgisel Bulanık Küme
SNA	Sosyal Ağ Analizi
SWARA	Adım Adım Ağırlık Değerlendirme Oran Analizi
TOPSIS	İdeal Çözüme Yakınlığa Göre Tercih Sıralama Tekniği
TPBK	Tereddütlü Pisagor Bulanık Kümesi
VIKOR	Çok Kriterli Optimizasyon ve Uzlaşma Çözümü (VIseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje)
VZA	Veri Zarflama Analizini
WASPAS	Bütünleşik Ağırlıklı Toplam ve Çarpım Yöntemi

1. GİRİŞ

Otomotiv endüstrisi gibi kâr amacı güden kuruluşlar ticari devamlılıklarını sağlayabilmek ve rekabet edebilme güçlerini koruyabilmek için; ürettikleri ürünlerin tasarım aşamasından, satış sonrası servis hizmetlerine kadar ürüne dair belirlenen fonksiyonların kusursuz şekilde çalışmasını garanti altına almalıdırlar. Bu bakış açısı ile otomotiv endüstrisinde kalite ve ürün güvenilirliği ön plana çıkmaktadır. Hata Türleri ve Etkileri Analizi (HTEA), bilinen ve/veya potansiyel tasarım, süreç, sistem ve hizmet hatalarını son kullanıcı olan müşteriye ulaşmadan önce bulmak, tanımlamak ve nihai hedef olarak ortadan kaldırmak isteyen bir mühendislik tekniğidir (Bowles ve Peláez, 1995). HTEA, tasarım ve ürün güvenilirliğini artırmak için otomotiv endüstrisi tarafından hızla benimsenmekle beraber makine, elektronik, kimya, ilaç ve tekstil gibi çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Gan ve ark., 2011). Metot, otomotiv endüstrisinde 1977 yılında Ford ve 1985 yılında Fiat başta olmak üzere yıllar içerisinde yaygınlaşmış olup Chrysler ve General Motors tarafından da uygulanmıştır. HTEA, ürünün tasarım, üretim ve servis süreçlerinin her birini ayrı ayrı analiz edebilmektedir; ilave olarak, sistem kalitesini ve güvenilirliğini değerlendirmek ve geliştirmek için de etkili bir araç olarak kullanılmaktadır. Yöntem var olan veya var olabilecek hata türlerini tanımlamakta ve değerlendirmektedir. HTEA, sisteme yönelik iyileştirmeler önermeyi; ürün tasarım ve geliştirme süresini, ürün maliyetini azaltmayı; ürün yaşam döngüsü boyunca iç ve dış müşteri gözünden kalite standartlarına yönelik beklentileri karşılamayı amaçlamaktadır. Yöntem, hata türlerinin risk öncelik sayılarını tanımlamaktadır. Risk öncelik sayısı (RÖS), üç risk faktörünün çarpımı olarak elde edilir. Bu risk faktörleri: olasılık (O), şiddet (S) ve tespit edilebilirlik (D) şeklindedir. Geleneksel HTEA'da her bir risk faktörü on puanlık bir ölçek kullanılarak değerlendirilir, daha yüksek değerler daha ciddi vakaları temsil etmektedir. Yüksek RÖS değerlerine sahip hata türleri daha ciddi olarak kabul edilmesi sebebiyle potansiyel risklerin azaltmasında yüksek RÖS değerlerine daha fazla dikkat edilmesi gerektirmektedir (Bowles ve Peláez, 1995).

HTEA, yıllar içerisinde farklı mühendislik dallarında yaygın olarak kullanılmasına rağmen araştırmacılar tarafından çeşitli nedenlerle eleştirilmiştir. Bu nedenler şu şekilde

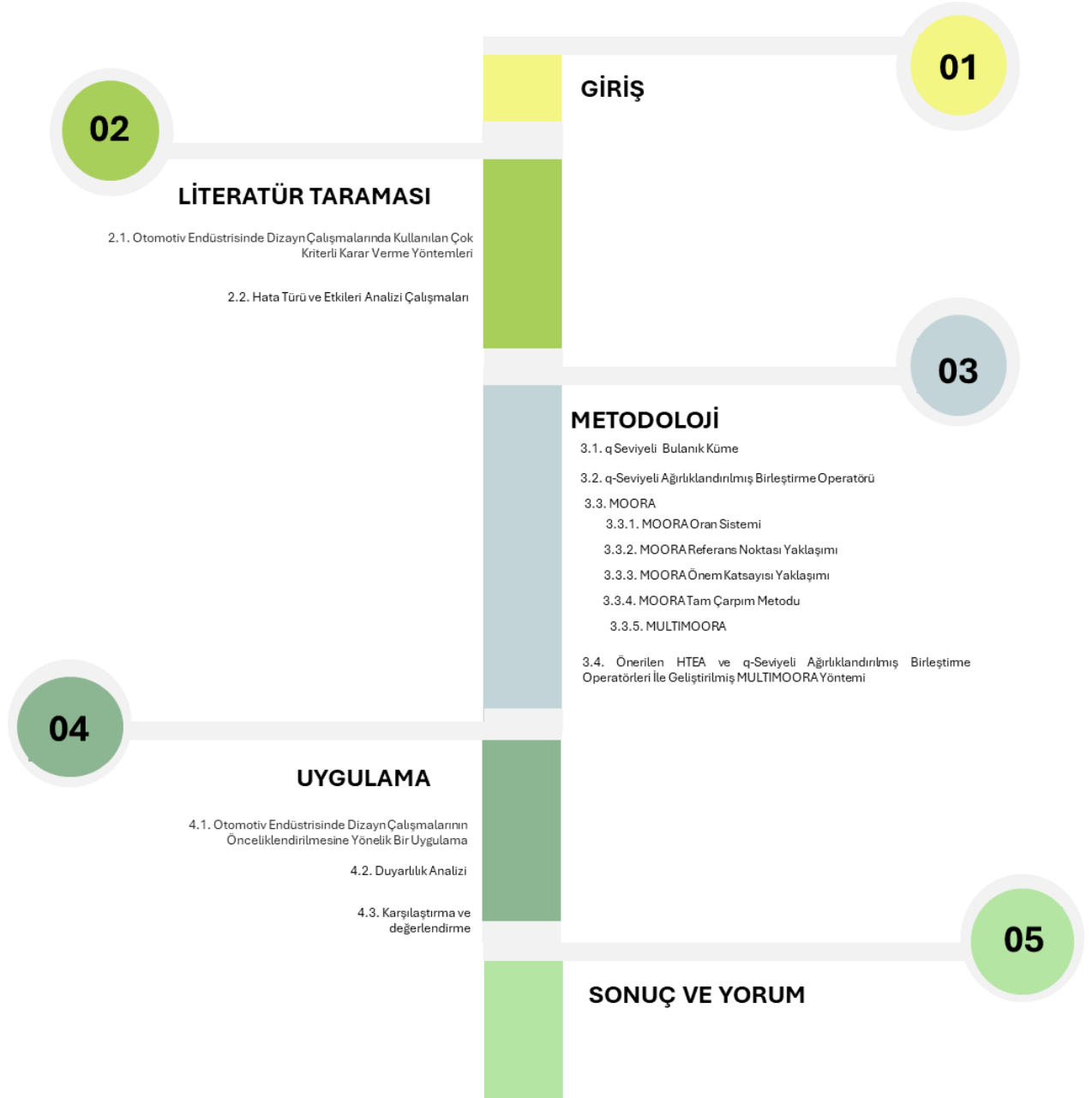
sıralanabilir: farklı O, S ve D değerlerine sahip hata türleri aynı RÖS değerini alabilir bu da RÖS değerinin yüksek riskli potansiyel bir hatayı tespit edemeyebileceği anlamına gelmektedir (Liu ve ark., 2011; Kutlu ve Ekmekçioğlu, 2012) Geleneksel HTEA’da görelî O, S ve D değerlerinin önem dereceleri göz ardı edilmekte ve üç faktörün aynı önem seviyesinde olduğu varsayılmaktadır bu da farklı RÖS değerlerinin yorumlanmasını zorlaştırmaktadır (Liu ve ark., 2011; Kutlu ve Ekmekçioğlu, 2012). Risk faktörlerinden birindeki küçük değışiklikler, RÖS değeri üzerinde çok farklı etkiler yaratmakta ve risk faktörlerinin derecelendirilmesini zorlaştırmaktadır (Liu ve ark., 2011; Kutlu ve Ekmekçioğlu, 2012). Üç faktörü kesin olarak yani net sayılarla değerlendirmek genellikle karar vericileri zorlamaktadır (Liu ve ark., 2011; Kutlu ve Ekmekçioğlu, 2012). Faktörler için bilgi genellikle belirsiz ve dilsel etiket olarak önemli, çok yüksek vb. şekilde ifade edilmektedir. İlave olarak, risk faktörleri arasındaki etkileşimler HTEA yönteminde ihmal edilmektedir (Liu ve ark., 2011; Kutlu ve Ekmekçioğlu, 2012).

Geleneksel HTEA’nın, hataların oluşmasını, müşteriye ulaşmasını önleyecek sistem, tasarım, süreç veya hizmette en önemli erken önleyici metotlardan biri olduğu kanıtlanmış olmasına rağmen, araştırmacılar tarafından geliştirilme ihtiyacı bulunmaktadır (Kutlu ve Ekmekçioğlu, 2012). Bulanık kümesi teorisi ve uzantıları HTEA’nın eksikliklerini gidermek için literatürde sıklıkla başvuru alan metotlar arasındadır (Liu ve ark., 2013). Bulanık küme teorisi Zadeh tarafından belirsizliklerle başa çıkmak amacıyla tasarlanan bir teoridir (Zadeh, 1965). Bulanık küme teorisi zaman içerisinde çeşitli araştırmacılar tarafından farklı formlarda geliştirilmiştir. Q seviyeli ortoper bulanık küme teorisi (QSBK) Yager tarafından, Atanassov’un üye olma veya üye olmama durumlarını 1(bir) olarak alan Sezgisel Bulanık Küme (SBK) ile yine Yager’in geliştirmiş olduğu üye olma ve olmama derecelerini birlikte değerlendiren Pisagor Bulanık Kümenin (PBK) bir uzantısı olarak literatüre kazandırılmıştır (Yager, 2017). QSBK, karar verici uzmanların belirli bir durumda uygun üyelik derecesine ilişkin fikir ve düşüncelerini yakalama yeteneklerini büyük ölçüde artırmış olup daha az kısıtlayıcı bir atmosfer sağlamıştır. Özellikle, karar verici uzman ekibin görüşlerini bütünleştiren bir bulanık bilgi ifade aracı olan QSBK, q parametresini ayarlayarak SBK ve PBK dahil olmak üzere bulanık ifade bilgilerini elde edebilmektedir.

Sunulan tez kapsamında, hem geleneksel HTEA'nın bahsedilen eksik yanlarını gidermek hem de mevcut/potansiyel tasarım hatalarına yönelik önceliklendirme metodolojisi geliştirmek amaçlanmış olup QSBK ve Oran Analizi Temeline Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon ve Tam Çarpımsal Form (MULTIMOORA) yöntemi ile geliştirilmiş melez HTEA modeli önerilmiştir. Geleneksel HTEA'dan farklı olarak görüşler 1-10 arasındaki rakamlar yerine karar vericiye kolaylık sağlayan dilsel etiketler ile alınmıştır. Kurulan modelde kriter ve karar verici ağırlıkları hesaba katılarak geleneksel HTEA'nın eleştirildiği noktaların üstünden gelinmiştir. Mevcut çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinde karar vericilerin kriter ve alternatif değerlendirmeleri sözel olarak belirlenmektedir bu da elde edinilen bilgilerin belirsiz ve karmaşık olmasına neden olmaktadır. QSBK karar vericilerin bu belirsiz ve karmaşık değerlendirme verilerini etkili bir şekilde ele almaktadır. Çalışmada, uzmanların değerlendirmeleri dilsel etiketlerle alınmış olup q seviyeli ortoper bulanık sayılara (QSBS) dönüştürülmüştür. Bireysel uzman görüşleri q seviyeli bulanık ağırlıklandırılmış birleştirme operatörleri kullanarak grup görüşüne evrilmiştir. Bu sayede aynı RÖS değerini elde etme olasılığı ortadan kaldırılmıştır. Her biri ayrı ağırlığa sahip olan kriter değerleri ile hata türlerinden oluşan karar matrisinden MULTIMOORA yöntemi kullanılarak öncelik sıralaması elde edilmiştir. MULTIMOORA yöntemi, hata türlerinin önceliklendirilmesi problemlerinde, uygulama kolaylığı sebebiyle çalışmalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Sunulan tez kapsamında, otomotiv endüstrisinde, Ar-Ge, Kalite ve Üretim departmanlarında çalışan üç adet uzmandan oluşan bir ekip dizayn çalışmalarında öncelik belirlemek amacıyla firmanın veri tabanında kayıtlı olan 1076 adet hatayı incelemiş olup bunları 7 ana başlık altında sınıflandırmanın ardından önerilen model ile tasarım çalışmalarının önceliklendirilmesine yönelik bir sıralama elde edilmiştir.

Çalışmanın ikinci bölümünde otomotiv endüstrisinde dizayn çalışmalarında kullanılan ÇKKV yöntemlerine ve HTEA ile geliştirilmiş farklı çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmanın üçüncü bölümünde, yararlanılan tekniklere dair metodoloji ve önerilen modelin adımları sunulmuştur. Dördüncü bölümde, otomotiv endüstrisinde dizayn hatalarının önceliklendirilmesi amacıyla gerçek hayat verileri kullanılarak önerilen modele dair bir uygulama yapılmıştır. Çalışmanın beşinci bölümünde ise sunulan model ile elde edilen sonuçların duyarlılık analizi yapılmıştır. Literatürdeki diğer ÇKKV

yöntemleri ile model karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Son olarak ise gelecek çalışmalarda geliştirilebilecek kapsamlara dair görüş bildirilmiştir. Çalışmanın tez organizasyon şeması Şekil 1.1’de sunulmuştur.



Şekil 1.1. Tez organizasyon şeması

2. LİTERATÜR TARAMASI

Çalışmanın bu bölümünde ilk olarak otomotiv endüstrisinde dizayn çalışmalarında kullanılan ÇKKV yöntemlerine, ikinci olarak ise literatürde yer alan farklı HTEA çalışmalarına yer verilmiştir.

2.1. Otomotiv Endüstrisinde Dizayn Çalışmalarında Kullanılan Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri

Otomotiv endüstrisi, dünyanın en büyük sanayi sektörleri arasında yer almaktadır. Endüstri, çağdaş toplumlarda merkezi bir konuma sahip olmakla beraber hayati ve ekonomik itici bir güç olarak hizmet vermektedir. Çok sayıda gelişmiş ve gelişmekte olan ülke için ekonominin temel taşı olarak sayılmakta, inovasyon ve istihdam fırsatlarını yönlendirmektedir. Dünya ekonomisinde yadsınamaz bir hacme sahip olan otomotiv endüstrisinde yılda yaklaşık 70 milyon adet araç üretilmektedir (Ikome ve ark., 2022).

Otomotiv endüstrisinde faaliyet gösteren şirketler dalgalanan talep, değişen tüketici tercih ve beklentileri, vasıflı işgücü eksikliği, tedarik zincirlerinde yaşanan aksaklıklar, üretim ve tasarım süreçlerinin karmaşıklığı ve beraberinde yaşanan kalite problemleri dahil olmak üzere çeşitli risklerle karşı karşıyadır. Belirtilen risklere müdahale edilmemesi müşteri portföyünde dalgalanmalara, pazar payında daralmalara, verimlilik, karlılık ve büyümede önemli bir düşüşe yol açarak büyük kayıplara sebep olabilmektedir. Şirketler, etkin bir karar verme metodolojisi ile stratejik kararlar alarak bu zorlukların üstesinden gelebilir, pazardaki büyümelerini ilerletebilir, sürdürülebilirliklerini artırabilir, canlı ve rekabetçi otomotiv endüstrisinde var olmayı başarabilirler (Naik ve Gupta, 2018). Karar verme problemlerinin karmaşıklığı ve rekabetin giderek arttığı ticari atmosferlerde, şirketlerin faaliyetlerini yürütürken karar vericilerin daha bilinçli ve daha etkili seçimler yapmasına yardımcı olabilecek araçlara ihtiyaç duyulmaktadır. ÇKKV, sorunu karakterize eden alternatifleri seçme, sıralama sürecini basitleştirebilen geçerli bir karar destek aracını temsil etmektedir. Son yıllarda ÇKKV, seçim ve sıralama problemlerinde, problemleri tanımlama ve çözme sürecinde karar vericiyi desteklemek için kullanılmaktadır. ÇKKV karmaşıklığı yönetmek, karar vericilerin katılımını teşvik etmek

ve ilgili taraflar arasındaki iletişimi kolaylaştırmak için kullanılabilir (Figueira ve ark., 2005). ÇKKV yöntemlerine karmaşık ve rekabetçi sektörlerde karar verme aşamasında başvurulmaktadır (Stoycheva ve ark., 2018). Bahsedilen karmaşık sektörlerden biri de otomotiv sektörüdür. Karar verme metodolojisi otomotiv sektöründe teknoloji ve tedarikçi seçimi, proje yönetimi, üretim planlama gibi alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır (Swadesh ve ark., 2023). Belirtilen mühendislik alanlarına ek olarak karar verme metodolojisinin mühendislik tasarım çalışmalarında da etkili bir destek mekanizması olduğu yapılan çalışmalarla kanıtlanmıştır (Renzi ve ark., 2017). Literatürde, karar vericilerin ve şirketlerin konsolide tasarım alışkanlıkları, zaman tüketimi açısından yüksek maliyet, araç ve bilgi eksikliği gibi birçok nedenden dolayı araştırma konusu olmuştur. Tasarım çalışmalarında karar verme stratejilerine yönelik odaklanmalar ile mühendislik ve işçilik saatleri gibi giderlerde azalma, iç ve dış müşteri gözünde ise kalite algısında iyileştirmeler olacağı değerlendirilmektedir.

Bu bölümün devamında otomotiv endüstrisinde tasarım problemlerinin çözümünde ÇKKV yöntemlerine başvuran araştırmalara yer verilmektedir.

Jiang ve ark. (2010), otomotiv endüstrisinde yeni ürün geliştirme kalite kontrol aşamasında, kalite tasarım sisteminin zorluklarıyla başa çıkmak için; müşterinin görüşünü, kalite fonksiyon dağılımını ve HTEA'ı entegre ederek yeni bir kalite tasarım modülü geliştirmişlerdir. Çalışmada, temel olarak işbirlikçi kalite tasarım sisteminin oluşturulması, kalite fonksiyon dağılımı ve HTEA'nın entegrasyonu, kalite tasarımının görev dağılımı, bilgisayar destekli işbirlikçi çalışma teknolojisi gibi çeşitli teknolojilerin entegre edilmesine odaklanılmıştır. Önerilen modelde, çalışma verimliliğini artırmak, pazar taleplerindeki dalgalanmalara mümkün olabilecek en hızlı şekilde cevap vermek ve ürün geliştirme döngüsünü kısaltmak amaçlanmıştır. Bazı otomobillerin kalite tasarımının, geliştirilen sistemin yeni ürün geliştirme gereksinimlerini verimli bir şekilde karşılayacağı bir vaka analizi çalışması ile doğrulanmıştır.

Cebi ve Kahraman (2014), çalışmalarında otomotiv ekran tasarım değerlendirme modelini önermişlerdir. Ekran tasarımı, sürüş güvenliği ve etkinliği açısından önemli bir öğe olması sebebiyle çalışmalarında, ekran tasarım karakteristiklerinin önceliklerini

ve özelliklerini belirlemek için analitik hiyerarşi prosesi (AHP) ve Choquet integral metodolojilerinden oluşan entegre bir metodoloji geliştirilmiştir. Ekranın tasarım özellikleri ve ekranların tasarım parametrelerinin öncelikleri önerilen model kullanılarak ortaya konulmuştur. AHP metodu, müşterilerin öznel değerlendirmesini kullanarak ekranların tasarım parametrelerinin önceliklerini tanımlamak için kullanılırken; bulanık Choquet integrali ise tasarım ekibinden alınan dilsel etiketler ile ekranların tasarım özelliklerini belirlemek için kullanılmıştır. Önerilen algoritmanın temel amacı, uzmanların ekran tasarımı ile ilgili tercihlerini çoklu ve çelişkili tasarım parametreleri altında analiz etmek ve tasarım parametrelerinin önem derecelerini ortaya koymak şeklinde olmuştur.

Latifiana ve ark. (2022), çalışmalarında otomotiv endüstrisindeki akü dizayn Ar-Ge çalışmalarının değerlendirilmesi için yeni bir bulanık model önermişlerdir. Çalışmanın ilk aşamasında, araştırma komitesi tarafından Ar-Ge çalışmalarını kalite, pazar, teknik ve süreç olmak üzere dört kategoride değerlendirebilmek için Delphi tekniğini kullanılarak nihai göstergeler belirlenmiştir. İkinci aşamada, uzmanların subjektif tercihleri ile kriterler değerlendirildikten sonra, kriterlerin nihai ağırlığı bulanık adım adım ağırlık değerlendirme oran analizi (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis: SWARA) yöntemi ile hesaplanmıştır. Ayrıca, her bir modelin ağırlığı ve nihai önceliklendirmesi bulanık karmaşık oransal değerlendirme (Complex Proportional Assessment: COPRAS) yöntemi kullanılarak belirlenmiştir. Bulanık SWARA yönteminden elde edilen sonuçlara dayanarak, otomotiv akü endüstrisinde Ar-Ge tasarımlarının değerlendirilmesinde etkili olan faktörlere dair bir sıralama elde edilmiştir. Çalışmanın sonunda, 0-1 Hedef Programlama ile her bir modelin ülkenin akü endüstrisinde yer alan üretici firmalara atanabilmesi için iki amaçlı bir matematiksel modelden yararlanılmıştır.

Sing ve ark. (2022), otomotiv fren mekanizması özelinde optimum tribolojik özelliklere sahip en iyi fren sürtünme formülasyonunu belirlemek için entegre bir kriterler arası korelasyon yoluyla kriterlerin önemi- uzlaşma çözümüne göre ölçüm alternatifleri ve sıralama (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation- Measurement Alternatives and Ranking according to Compromise Solution: CRITIC-MARCOS) tekniğini geliştirmişlerdir. Çalışmada, altı farklı kompozit üretilmiştir. Üretilen

kompozitler SAE J2522 test prosedürü izlenerek laboratuvar ölçekli bir fren tribometresi yardımı ile ölçülmüştür. Sürtünme katsayısı, sürtünme dalgalanmaları, özgül aşınma oranı, solma ve geri kazanım performanslarını içeren tribolojik bulgular, bileşik sıralamayı belirlemek için değerlendirme kriteri olarak belirlenmiştir. Seçilen kriterlere ağırlık atayabilmek için ÇKKV tekniklerinden CRITIC yönteminden, kompozitlerin sıralamasını belirlemek için MARCOS yaklaşımından yararlanılmıştır. Ayrıca, COPRAS ve MOORA metodolojileri kullanılarak elde edilen kriterler ve alternatifler için önerilen modelin çıktıları ile karşılaştırılmıştır.

2.2. Hata Türü ve Etkileri Analizi Çalışmaları

Çalışmanın bu alt bölümünde literatürde yer alan farklı HTEA yöntemleri ile geliştirilen çalışmalara yer verilmiştir. Literatürde yer alan çalışmalar belirsizlik türüne göre (kesin, bulanık) ve risk değerlendirme yöntemlerine göre (ÇKKV, matematiksel programlama, yapay zeka, melez yaklaşımlar, diğer yöntemler) sınıflandırılmıştır (Liu ve ark., 2013).

Bagheri ve ark. (2016), Ariyanti ve ark. (2023), Zha ve ark. (2024), HTEA'yı matematiksel programlamadan yararlanarak geliştirmişlerdir.

Bagheri ve ark. (2016), ürün yaşam döngüsünün başından sonuna kadar tasarım yapabilmek; hataları ortadan kaldırmak ve etkilerini azaltmak için HTEA'da kesin küme ile birlikte veri zarflama analizini (VZA) kullanılmışlardır. Aralıklı VZA ve gri ilişkisel analiz (GİA) sonuçları birleştirilerek üretim süreçleri kritiklik seviyelerine göre önceliklendirilmiştir. Gerçek bir vaka analizi ile önerilen yöntem örneklendirilmiştir. Peugeot 206, Peugeot 405 parçaları için multidisipliner ekiplerin yardımıyla tanımlanan tüm hata türlerinin S, O, D faktörleri aralıklı veri modelinin girdileri olarak kabul edilerek elde edilen sonuçlar parça üretim süreçlerini önceliklendirmek için GİA yönteminde girdi olarak kullanılmıştır bu sayede üretilecek parçalar önceliklendirilmiştir.

Ariyanti ve ark. (2023), tam sayılı programlama ile geliştirilmiş HTEA ve kesin küme entegrasyonunu önermişlerdir. Çalışmada, lojistik dağıtım merkezinde HTEA ve doğrusal programlama entegrasyonu ile hem depoda yeniden düzenlemeye gidilerek hem de çalışan vardiya planları yapılarak işletme maliyetlerinin en aza indirilmesi

hedeflenmiştir. Sınıf tabanlı depolama yöntemi ile iş çizelgeleme yöntemi arasında, her bir çalışanın çalışma günlerini, vardiyalarını ve tatillerini dahil eden farklı bir program modeli kullanılmıştır.

Zha ve ark. (2024), çok amaçlı optimizasyon yöntemi ile HTEA'daki grup karar verme sürecini optimize etmeyi amaçlayan bir çalışma sunmuş olup belirsizlik türü olarak ise klasik küme yaklaşımını benimsemişlerdir. Çalışmalarında, birden fazla üyenin farklı bireysel görüşleri 1-10 puanlık değerlere kadar dikkate alınmış ve uygun toplu risk önceliklendirmesi altında daha makul toplu risk değerlendirme bilgileri elde etmeyi amaçlayan çok kriterli optimizasyon modelinde, bu değer minimum mesafe risk önceliklendirmesinde karar vericilere kısıt olarak eklenmiştir. Toplu değerlendirme bilgilerini elde etmek için uzmanların değerlendirme matrislerini ve risk değerlerini eş zamanlı entegre eden çok kriterli optimizasyon modeli kullanılmıştır.

Eddy ve ark. (2020), Jomthanachi ve ark. (2021), yapay zekadan yararlanarak HTEA modelini geliştirmişlerdir.

Eddy ve ark. (2020), HTEA ve yapay zekayı entegre ederek hata önlemeyi amaçlayan yeni bir yöntem önermişlerdir, belirsizlik türü olarak ise klasik küme verilerden yararlanmışlardır. Hata Giderme Algoritma Sistemi adını verdikleri modellerinde, belirli bir denetim sürecinde sıfır hatayı amaçlayan yinelemeli olarak öğrenme yeteneğine sahip yapay zekâ tabanlı bir konsept ile hataları elemine etmeye çalışmışlardır.

Jomthanachai ve ark. (2021), VZA ve makine öğrenmesi ile entegre edilmiş bir HTEA önermişler ve klasik küme yaklaşımından faydalanmışlardır. Çalışmada, risk değerlendirme sürecinde, HTEA'dan elde edilen bir dizi risk faktörünün değerlendirmesi için VZA çapraz verimlilik yöntemi kullanılmıştır. Makine öğrenmesi ile hatalar simüle edilmiş, kalan riskin derecesini tahmin etmek için bir algoritma geliştirmiştir.

Wang ve ark. (2018), Fu ve ark. (2022), Peddi ve ark. (2023), HTEA'ı diğer yöntemlerden yararlanarak geliştirmişlerdir.

Wang ve ark. (2018), beklenti teorisi ve Choquet integrali ile genişletilmiş bir HTEA yöntemi önermişlerdir. Çalışmalarında, HTEA metodunda risk değerlendirme ve önceliklendirmede karar vericinin psikolojik davranışlarını ve risk faktörleri arasındaki etkileşimleri eş zamanlı bulanık yaklaşım ile ele alan yeni bir model geliştirmişlerdir. Risk faktörlerinin risk değerlerini belirlemek için beklenti teorisi kullanılmıştır. Risk faktörleri arasındaki etkileşimlerle ilgili olarak, bulanık ölçü ve Choquet integrali, her bir risk faktörü üzerindeki hata türlerinin olası değerini toplamak için kullanılmıştır.

Fu ve ark. (2022), fonksiyonel rezonans analizi yöntemi ile geliştirilmiş bulanık HTEA modeli önermişlerdir. Çalışmalarında, hata türlerini modellemek için fonksiyonel rezonans analizi yöntemden yararlanılmıştır. Monte Carlo Simülasyonu, her bir fonksiyonun bağlantı değişim değerlerini hesaplamak için kullanılmış olup hata türleri temel işlevleri ve bağlantı değişiklikleri için hedefli risk kontrol seçenekleri önerilmiştir.

Peddi ve ark. (2023), veri analizi için yüksek doğruluğu nedeniyle bir makine öğrenmesi algoritması ile entegre edilmiş bulanık HTEA modeli önermişlerdir. Önerdikleri algoritma, RÖS değerlerinin belirlenmesinde insan müdahalesinin yerini almayı amaçlamaktadır. Algoritmayı geliştirmek, modeli eğitmek ve test etmek için önceden değerlendirilmiş taleplerin bir veri kümesi kullanılmıştır. Model, yeni talepleri değerlendirmek için kullanılabilir şekilde eğitilmiştir. Risk faktörlerinin her biri için model ayrı olarak eğitilmiş olup bu süreçte yapay sinir ağı kullanılmıştır. Tahmin edilen risk faktörleri kullanılarak modelin RÖS değerleri hesaplanmış ve geleneksel RÖS değeri karşılaştırılmıştır.

Bowles ve Peláez (1995), Franceschini ve Galetto (2001), Liu ve ark. (2011), Boral ve ark. (2020), HTEA modelini melez yöntemler ile geliştirmişlerdir.

Bowles ve Peláez (1995), hata türlerinin O, S, D değerlerini tanımlamak için dilsel etiketleri kullanan bir HTEA yöntemi ile hataları önceliklendirmek için bulanık mantık tabanlı bir yaklaşım önermişlerdir. Hatalar ile risk faktörleri arasındaki ilişki, uzman bilgisi ile geliştirilen bulanık eğer-o halde (If-Then) kural tabanı ile karakterize edilmiştir.

O, S ve D değerleri için net derecelendirmeler, her olası eğer-o halde kuralının öncülüğüne uyacak şekilde bulanıklaştırılmıştır. Daha sonra bulanık sonucu risk önceliğinin sıralama değeri olarak ağırlıklı maksimum yöntem ortalaması (Weighted Mean of Maximum Method) ile etkisiz hale getirmişlerdir.

Franceschini ve Galetto (2001), yaptıkları çalışmada HTEA hata türlerinin RÖS değerlerinin hesaplamasında tasarım ekibi tarafından sağlanan ve normalde nitel ölçeklerde verilen bilgileri, herhangi bir sayısal dönüşüm gerektirmeden ele almışlardır. Çalışma, risk faktörlerini değerlendirme kriterleri olarak yorumlanmasını ve hata türlerinin alternatif seçenekler olarak değerlendirilmesini içermektedir. Yöntem her bir karar verme kriterini, seçilecek olan alternatifler kümesi üzerinde bulanık bir alt küme olarak değerlendirmektedir. Belirli bir alternatif için her bir kriter üzerinde ifade edilen değerlendirmelerin toplanmasından sonra, en yüksek risk öncelik numarasına sahip hata türü belirlenmiştir. Modelde, aynı RÖS değerini paylaşan iki veya daha fazla hata türü varsa, görelî sıralamalarını ayırt etmek için daha spesifik bir seçim önerilmiştir.

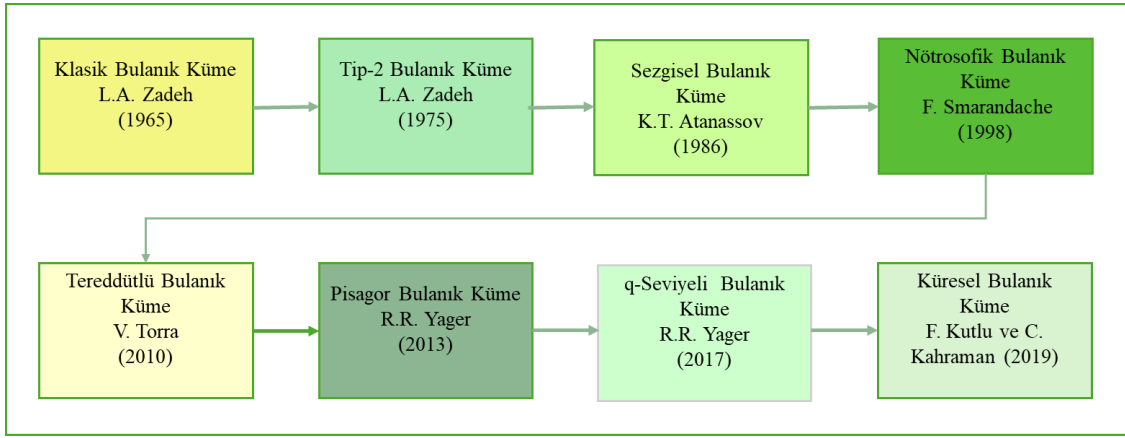
Liu ve ark. (2011), HTEA için gri teori ve bulanık kanıtsal akıl yürütme yaklaşımını (Fuzzy Evidential Reasoning: FER) kullanarak entegre bir risk öncelik modeli önermişlerdir. Karar vericilerin değerlendirme bilgilerinin çeşitliliğinin ve belirsizliğinin modellenmesi için FER yaklaşımı ve hata türlerinin risk önceliklerini belirlemek için gri ilişkisel analiz kullanılmıştır. Çalışmada, karar vericilerin çeşitli görüşleri iyi bir şekilde karakterize edilmiş ve farklı belirsizlik türleri altında hata türleri önceliklendirilmesine olanak sağlanmıştır. Önerilen yöntemde, farklı görüşleri kullanarak risk faktörlerinin değerlendirilmesi, bireysel görüşlerin HTEA grubunun görüşlerine sentezlenmesi, bulanıklaştırılmış grup görüşlerinin genel görüşlerde toplanması, karşılaştırmalı ve standart serilerin oluşturulması, karşılaştırmalı seriler ile standart seriler arasındaki farkın elde etmesi, gri ilişkisel katsayının ve ilişki derecesinin hesaplanması ve ilişki derecesini kullanarak hata türlerinin sıralanması amaçlanmıştır.

Boral ve ark. (2020), çalışmalarında bulanık AHP ile geliştirilmiş bulanık çok özellikli ideal gerçek karşılaştırmalı analiz yöntemini birleştirerek yeni bir entegre çok kriterli karar verme yaklaşımı önermişlerdir. İlk olarak, bulanık AHP kullanılarak risk faktörleri arasındaki bulanık göreceli önemi hesaplanmıştır. Sonraki aşamada önem değerlerini,

hata türlerinin risk seviyelerine göre sıralamak için geliştirilmiş olan bulanık çok özellikli ideal gerçek karşılaştırmalı analiz yöntemi kullanılmıştır.

Literatürde yer alan çalışmalar incelendiğinde geleneksel HTEA ile karşılaştırıldığında bulanık küme uzantıları ile geliştirilen HTEA'nın avantajlarının olduğu gözlemlenmiştir. Geleneksel HTEA risk önceliği için O, S ve D değerleri çarpılarak bir RÖS değeri hesaplanır. Geleneksel HTEA'da bu değerler 1'den 10'a kadar sayılarla temsil edilir ve bu durum yöntemin zayıf yönü olarak değerlendirilip birçok bilim insanı tarafından eleştirilmiştir. Bu zayıf yönün üstesinden gelebilmek için risk faktörlerinin kesin olmayan değerler olarak kullanıldığı ve hata türlerini önceliklendirmek için bulanık küme teorilerinin yöntem olarak seçildiği çeşitli çalışmalar literatürde mevcuttur. Bulanık küme teorisi, belirsizliklerin üstesinden gelmek için Zadeh tarafından geliştirilen bir araçtır. Zadeh'in geliştirmiş olduğu bulanık küme teorisi $[0,1]$ aralığında değer alan üyelik dereceleri ile temsil edilir (Zadeh, 1965). Zadeh, üyelik derecelerinin sınırlarını kesin sayılarla ifade etmek yerine bulanık olarak değerlendirebilen tip-2 bulanık küme teorisini önermiştir (Zadeh, 1975). 1986 yılında Atanassov üyelik, üye olmama ve karar vericiler için kararsızlık dereceleri ile ifade edilen SBK'leri geliştirmiştir (Atanassov, 1986). Nötrosofik küme teorisi, belirsiz ve tutarsız bilgiler içeren problemlerle başa çıkmak için Smarandache tarafından geliştirilmiş olup SBK'nin genelleştirilmiş formudur (Smarandache, 1999). Karar vericilerin tek tercih yapmakta zorlandığı durumların üstesinden gelebilmek için Torra tereddütlü bulanık kümeleri (TBK) tanıtmıştır (Torra, 2010). TBK'nin bir genellemesi olarak üyelik derecelerini daha geniş bir alan ile temsil edebilen PBK teorisi Yager tarafından geliştirilmiştir (Yager, 2013). Yager, SBK ile PBK'lerin genelleştirilmiş sınıfı olan QSBK teorisini 2017 yılında tanıtmıştır (Yager, 2017). Yager, QSBK'nin q seviyesi arttıkça kabul edilebilir ortopair aralığının arttığını ve böylece kullanıcıya üyelik derecesi hakkındaki görüşünü ifade etme konusunda daha fazla esneklik tanıdığını belirtmiştir (Yager, 2017). Kutlu Gündoğdu ve Kahraman, bahsedilen bulanık kümelerin uzantısı olarak karar vericiler için daha geniş bir tercih alanı sağlamak amacıyla küresel bulanık küme teorisini önermişlerdir. Küresel bulanık küme ile karar vericiler üyelik ve üye olmama derecelerden bağımsız şekilde alternatiflerin tereddüt derecelerini belirleyebilmektedir (Gündoğdu ve Kahraman, 2019).

Literatürde sık kullanılan bulanık küme teorileri geliştiren bilim insanları ile beraber kronolojik sırayla Şekil 2.1’de gösterilmektedir (Haktanır ve ark., 2020).



Şekil 2.1. Literatürde en çok kullanılan bulanık küme setleri

Gül ve Ak (2021), geleneksel RÖS sayısının hesaplanmasındaki eksikleri gidermek için aralık değerli küresel bulanık küme ile geliştirilmiş bir HTEA modeli önermişlerdir. Çalışmada, ideal çözüme yakınlığa göre tercih sıralama tekniği (Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution: TOPSIS), ortaya çıkan hata türlerinin önceliklerini belirlemek için küresel kümelerin özel bir dalı olan aralık değerli küresel bulanık küme (Interval-Valued Spherical Fuzzy: IVSF) ile birleştirilmiş olup HTEA'nın mevcut O, S ve D faktörlerine ek olarak maliyet, önleme ve etkililik olarak adlandırılan üç faktör ilave edilmiştir. Bu faktörlerin ağırlıkları, aralık değerli küresel ağırlıklı aritmetik ortalama operatörü (Interval-Valued Spherical Weighted Arithmetic Mean Operator: IVSWAM) ile belirlenmiştir. IVSWAM operatörü tarafından elde edilen önem değerlerini kullanılarak hata türlerinin risk seviyelerine göre önerilen IVSF-TOPSIS metodu ile sıralama elde etmek amaçlanmıştır. Önerilen yöntem bir mermer üretim tesisindeki verilere uygulanmış olup elde edilen sonuçlar yorumlanmıştır.

Akram ve ark. (2022), HTEA'daki hata türlerinin risk önceliklerini elde etmek için tereddütlü Pisagor bulanık küme uzantısı (TPBK) ile geliştirilmiş bir TPBK- Eliminasyon ve Seçim Gerçeğine Dönüştürme-I (ELimination and Choice Translating REality-I: ELECTRE-I) modelini geliştirilmişlerdir. Çalışmada, tereddütlü Pisagor bulanık uyum ve uyumsuzluk matrislerinin formüle edilmesi için TPBK ağırlıklı toplu karar matrisi

oluşturulmuştur. Daha sonra, olası hata türlerinin değerlendirilmesini sağlayan karar grafiğini çizmek için TPBK toplu global matrisi kullanılmıştır. Risklerin ölçülmesi ve sıralanması için tereddütlü PBK ortamında bir ELECTRE-I yaklaşımı ile hata türlerinin değerlendirmesi için tereddütlü PBK uyum/uyumsuzluk matrisleri oluşturulmuştur. En önemli hata türünün belirlemesi için sıralama karar grafiğinden yararlanılmıştır. Sunulan model, sağlık hizmeti hata türlerinin risk değerlendirmesi gibi gerçek hayat uygulaması ile doğrulanmıştır.

Lin ve Lo (2023), nütrosifik bulanık küme teorisi ile HTEA metodunu geliştirmişlerdir. Nütrosifik bulanık küme seti, uzman görüşlerinin belirsizliği ile başa çıkmak için kullanılmıştır. Önerilen yöntemde, nütrosifik-kayıtsızlık eşiği tabanlı oran analizi (Indifference Threshold-Based Attribute Ratio Analysis: ITARA) ile risk faktörlerinin ağırlıkları değerlendirilmiş olup Nütrosifik-TOPSIS metodu ile de hata türlerinin riskleri önceliklendirilmiştir. Geliştirilen metod, gerçek hayat problemi olarak değerlendirilen üniversite yönetimine dair verilere uygulanarak sonuçlar yorumlanmıştır.

Liu ve ark. (2023), çalışmalarında risk değerlendirme problemlerini farklı bir bakış açısıyla ele almak için olasılıksal çift hiyerarşi dilsel küme (Probabilistic Double Hierarchy Linguistic Term Set: PDHLTS) ve bütünleşik ağırlıklı toplam ve çarpım yöntemi (Weighted Aggregates Sum Product Assessment: WASPAS) uzantılı bir HTEA modeli sunmuşlardır. Çalışmada HTEA ve WASPAS kombinasyonunun geleneksel HTEA yönteminin dezavantajlarını önlemesi öngörülmüştür. Değerlendirme sürecinde PDHLTS, hata türlerinin risk seviyelerinin değerlendirilmesinde bilgileri ifade etmek için kullanılmıştır. Uzman ağırlıklarını ihmal eden geleneksel HTEA yönteminin üstesinden gelmek için olasılıksal çift hiyerarşi dilsel uzantısı olacak şekilde sosyal ağ analizi (Social Network Analysis: SNA) yöntemine dayalı ağırlık belirleme yöntemi ile ağırlıklar belirlenmiştir. Farklı hata türlerinin sıralama sıralarını elde etmek için WASPAS yaklaşımı ve SNA ağırlık yöntemi birleştirilerek HTEA geliştirilmiştir. Sunulan metod, deniz ekonomisinin gelişiminde risk değerlendirme verilerine uygulanmıştır.

Zheng ve ark. (2024), amonyak depolama tesisindeki arıza riskini analiz etmek için olasılıksal dilsel etiketleri, uzlaşmaya varma prosesini (Consensus-Reaching Process: CRP), sıralı ağırlıklı ortalama operatörünü (Ordered Weighted Averaging: OWA),

kazanılan ve kaybedilen hakimiyet puanı yöntemini birleştirerek melez olasılıksal dilsel HTEA modelini ortaya koymuşlardır. HTEA prosesinde bir araya gelen uzmanların hata türlerinin risk faktörlerine dair fikir birliğini ölçmek ve geliştirmek için risk kabul edilebilirliğe dayalı bir yöntem tanıtılmıştır. Uzmanların ağırlığının uzlaşma derecelerine göre belirlemek amacıyla risk faktörlerini değerlendirme bilgilerini birleştirmek için uzlaşma derecesine dayalı sıralı ağırlıklı ortalama operatörü tanıtılmıştır. Kazanılan ve kaybedilen hakimiyet skoru yöntemi, hata türlerinin riskini önceliklendirmek için olasılıksal dilsel etiketlerin beklenen değeri temelinde geliştirilmiştir. Son olarak, geliştirilmiş HTEA'nın verimliliğini göstermek için amonyak depolama tesisinde risk analizine ilişkin bir vaka çalışması ele alınmıştır.

Literatürde farklı yaklaşımlarla geliştirilmiş HTEA çalışmaları incelenmiş olup konunun hala geliştirilmeye açık noktalarının olması sebebiyle farklı bir bakış açısı ile görece yeni bir model önerilmiştir. Yapılan bu çalışmada, önerilen model iki farklı problem düşünülerek tasarlanmıştır. Birinci odak noktası klasik HTEA'nın eksik yönleri ile başa çıkmak, ikinci odak noktası ise mevcut/potansiyel tasarım hatalarına yönelik ÇKKV sıralama/önceliklendirme metodolojisi geliştirmek şeklindedir. Model, iki aşamalı olarak geliştirilmiştir. İlk aşama olan hataların tespit ve değerlendirme sürecinde HTEA yönteminden, ikinci aşamada öncelik sıralaması problemine çözüm olması amacıyla ÇKKV yöntemlerinden q seviyeli bulanık küme ile etki alanı genişletilmiş olan MULTIMOORA yönteminden yararlanılmıştır. Yapılan çalışmayı mevcut çalışmalardan ayıran özellikler; kurulan tek model ile geleneksel HTEA'nın eksiklerinin giderilmesi ve ilave olarak q seviyeli bulanık küme yaklaşımı ile geliştirilmiş MULTIMOORA yöntemi ile tasarım çalışmalarında öncelik sırasının belirlenmesi şeklindedir. Geliştirilen modelin metodolojisi ve katkıları sonraki bölümlerde detaylandırılmıştır.

3. METODOLOJİ

Çalışmanın üçüncü bölümü dört alt bölümden oluşmaktadır. Takip eden alt bölümlerde QSBK ve q seviyeli ortoper ağırlıklandırılmış birleştirme operatörü, MULTIMOORA ve önerilen yöntem sunulmaktadır.

3.1. q Seviyeli Ortoper Bulanık Küme

Zadeh beşerî düşüncelerin nicel veya rakamsal değerlendirmelerden ziyade dilsel etiketlerin kullanıma daha yatkın olduğunu göz önünde tutarak 1965 yılında bulanık küme teorisini literatüre kazandırmıştır. Bulanık küme üye olma fonksiyonuyla temsil edilen bir teoridir, klasik mantıktan ziyade bir elemanın bir kümeye $[0,1]$ aralığında farklı üyelik dereceleriyle üye olmasına olanak sağlamaktadır (Zadeh, 1965).

Tanım 1: Boş olmayan bir X kümesinden türetilen \tilde{A} bulanık kümesi, bir x elemanın üye olma derecesi $\mu_{\tilde{A}}(x): X \rightarrow [0,1]$ olmak üzere, bulanık küme genel olarak $\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)): x \in X\}$ şeklinde gösterilmektedir (Zadeh, 1965).

Zadeh'ten sonra Atanassov belirli bir elemanın bir kümeye üye olmama derecesini de dikkate alarak belirsizliği modellemenin daha yararlı olacağını düşünerek 1986 yılında SBK'yi literatüre kazandırmıştır (Atanassov, 1986). SBK üye olma ve üye olmama fonksiyonlarıyla tanımlanmaktadır.

Tanım 2: X evrensel kümesinden türetilen \tilde{B} SBK'nin genel yapısı, bir x elemanın üye olma derecesi $\mu_{\tilde{B}}(x): X \rightarrow [0,1]$ ve üye olmama derecesi $\nu_{\tilde{B}}(x): X \rightarrow [0,1]$ ve $0 \leq \mu_{\tilde{B}}(x) + \nu_{\tilde{B}}(x) \leq 1$ olmak üzere SBK şu şekilde gösterilmektedir:

$\tilde{B} = \{(x, \mu_{\tilde{B}}(x), 1 - \nu_{\tilde{B}}(x)): x \in X\}$. Her $x \in X$ için kararsızlık derecesi $\pi_{\tilde{B}} = (1 - \nu_{\tilde{B}}(x)) - \mu_{\tilde{B}}(x)$ olarak hesaplanmaktadır (Atanassov, 1986).

Yager (2013), SBK'lerin belirsizliği tam anlamıyla ifade edememesi nedeniyle PBK'i ortaya atmıştır.

Tanım 3: X evrensel kümesinden türetilen \tilde{C} PBK'nin genel yapısı, bir x elemanın üye olma derecesi $\mu_{\tilde{C}}(x): X \rightarrow [0,1]$ ve üye olmama derecesi $\nu_{\tilde{C}}(x): X \rightarrow [0,1]$ ve $0 \leq \mu_{\tilde{C}}(x)^2 + \nu_{\tilde{C}}(x)^2 \leq 1$ olmak üzere PBK şu şekilde gösterilmektedir (Yager, 2013):

$\tilde{C} = \{ \langle x, \mu_{\tilde{C}}(x), 1 - \nu_{\tilde{C}}(x) \rangle : x \in X \}$. \tilde{C} PBK için kararsızlık derecesini $\pi_{\tilde{C}} = \sqrt{1 - \mu_{\tilde{C}}(x)^2 - \nu_{\tilde{C}}(x)^2}$ olarak tanımlanmıştır.

Yager (2017), SBK ve PBK geliştirilmiş bir versiyonu olarak QSBK'i geliştirmiştir. q seviyeli ortoper bulanık modeller karar vericilere diğer standart olmayan bulanık kümelerle göre daha esnek bir değerlendirme yaklaşımı sunmaktadır.

Tanım 4: X evrensel kümesinden türetilen \tilde{D} QSBK'nin genel yapısı, bir x elemanın üye olma derecesi $\mu_{\tilde{D}}(x): X \rightarrow [0,1]$ ve üye olmama derecesi $\nu_{\tilde{D}}(x): X \rightarrow [0,1]$ ve $0 \leq (\mu_{\tilde{D}}(x))^q + (\nu_{\tilde{D}}(x))^q \leq 1$ olmak üzere QSBK şu şekilde gösterilmektedir (Yager, 2017):

$\tilde{D} = \{ \langle x, \mu_{\tilde{D}}(x), 1 - \nu_{\tilde{D}}(x) \rangle : x \in X \}$. \tilde{D} QSBK için kararsızlık derecesi ise $\pi_{\tilde{D}} = (1 - (\mu_{\tilde{D}}(x))^q - (\nu_{\tilde{D}}(x))^q)^{1/q}$ ile gösterilmektedir.

QSBS'ler üzerinde temel aritmetik işlemler aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Yager, 2017):

Tanım 5: $\tilde{D} = \langle \mu_1, \nu_1 \rangle_q$ ve $\tilde{E} = \langle \mu_2, \nu_2 \rangle_q$ iki QSBS ve $k > 0$ olmak üzere,

$$\tilde{D} \oplus \tilde{E} = \langle (\mu_1^q + \mu_2^q - \mu_1^q \mu_2^q)^{1/q}, \nu_1 \nu_2 \rangle_q \quad (1)$$

$$\tilde{D} \otimes \tilde{E} = \langle \mu_1 \mu_2, (\nu_1^q + \nu_2^q - \nu_1^q \nu_2^q)^{1/q} \rangle_q \quad (2)$$

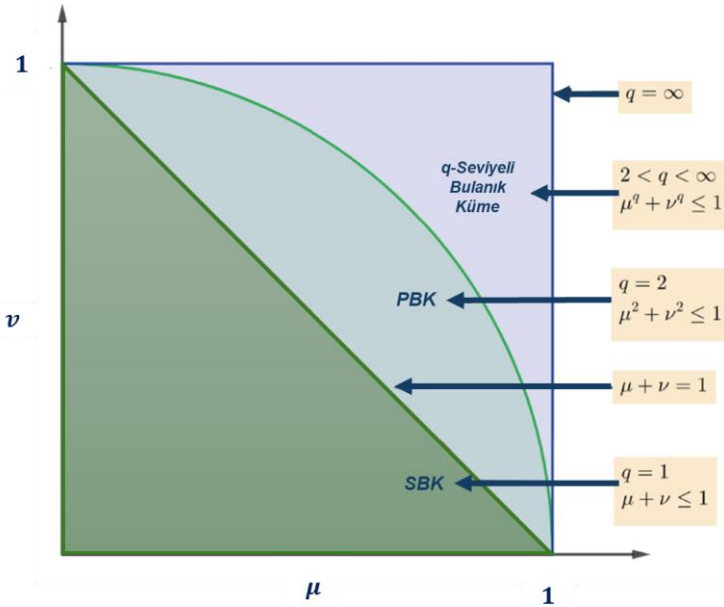
$$k\tilde{D} = \langle (1 - (1 - \mu_1^q)^k)^{1/q}, \nu_1^k \rangle_q \quad (3)$$

$$\tilde{D}^k = \langle \mu_1^k, (1 - (1 - v_1^q)^k)^{1/q} \rangle_q \quad (4)$$

Tanım 6: $\tilde{D} = \langle \mu, v \rangle_q$ bir QSBS olmak üzere, bu sayının kesin bir sayıya dönüştürülmesi için ilgili puan fonksiyonu Eş. 5'te sunulmuştur (Shishavan vd., 2020).

$$S(\tilde{D}) = \frac{2 + \mu^q - v^q}{(2 - \mu^q + v^q) \times (2 - \mu^q - v^q)} \quad (5)$$

QSBK, SBK ve PBK'nin modelleyemediği bazı durumlarda risk bilgilerini modellemeyi başarabilmektedir. PBK ve SBK ile karşılaştırıldığında, QSBK'nin dilsel etiketin etki alanı için daha geniş bir alana sahip olduğu, belirsizliği ve bulanıklığı daha fazla tanımlayabildiği görülebilir. Bu nedenle, QSBK'yi risk değerlendirme bilgilerinin ifadesini genişletebilir ve belirsiz risk bilgilerini etkili bir şekilde yakalayabilir. QSBK daha genel ve esnek özelliğe sahip olmakla beraber karmaşık ve belirsiz ortamlar için PBK ve SBK'den daha uygun olduğu çalışmalarda ifade edilmektedir. SBK, PBK ve QSBK arasındaki ilişki Şekil 3.1'de görsel olarak gösterilmiştir (Jin ve ark., 2021).



Şekil 3.1. SBK, PBK ve QSBK arasındaki ilişki

QSBK, sonuçların doğruluğunu garanti etmesi ve daha fazla esnek bir ortoper alan sağlması sebebiyle giderek artan sayıda uzmanın ilgisini çekmektedir. Karar vericiler,

QSBK kullanarak SBK ve PBK'den daha etkili bir şekilde bilgilerini iletebilirler. QSBS ile ÇKKV yöntemlerinin kombinasyonu son derece karmaşık senaryoları daha özgün bir şekilde karakterize edilebilmektedir (Akram ve Shumaiza, 2021).

3.2. q Seviyeli Ortoper Ağırlıklandırılmış Birleştirme Operatörü

q seviyeli ortoper bulanık ağırlıklandırılmış birleştirme operatörü, çalışma kapsamında önerilen çok kriterli karar verme yönteminde uzmanlardan oluşan ekibin aralarında bir fikir birliği elde ederken tüm bireysel karar vericilerin görüşlerini toplamak için kullanılacaktır. QSBK'lerin q seviyeli bulanık ağırlıklandırılmış birleştirme operatörü aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Liu ve Wang, 2017):

Tanım 7: \tilde{a}_n QSBS, w_n QSBS'nin ağırlığı olmak üzere q seviyeli ağırlıklandırılmış birleştirilmiş operatörü şekildeki gibi tanımlanır (Liu ve Wang, 2017):

$$q - \text{ROFWA} (\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) = w_1 \tilde{a}_1 \oplus w_2 \tilde{a}_2 \oplus \dots \oplus w_n \tilde{a}_n \quad (6)$$

Tanım 8: $\tilde{a}_k = \langle u_k, v_k \rangle$ ($k = 1, 2, \dots, n$) q-seviyeli bulanık sayıların kümesi olsun q-seviyeli bulanık ağırlıklı toplama operatörü aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$q - \text{ROFWA} (\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n) = \left\langle \left(1 - \prod_{k=1}^n (1 - u_k^q)^{w_k}\right)^{\frac{1}{q}}, \prod_{k=1}^n v_k^{w_k} \right\rangle \quad (7)$$

Elde edilen q-ROFWA ($\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_n$) aşağıdaki koşullar sağlar (Liu ve Wang, 2019):

- (i) $0 \leq u \leq 1; 0 \leq v \leq 1$
- (ii) $0 \leq u^q + v^q \leq 1$.

3.3. MOORA

MOORA çok kriterli karar verme problemlerinin çözümünde sıklıkla kullanılan Brauers ve Zavadskas (2006) tarafından geliştirilen bir yöntemdir. MOORA yöntemi farklı yöntemlerin gruplandırılmasına dayanmakta olup karar alternatiflerini sıralamak ve seçmek için etkili bir araçtır.

MOORA yöntemi, farklı yaklaşımların sınıflandırılmasına dayanmaktadır. Oransal analize dayalı çok amaçlı optimizasyon yöntemi olan MOORA'nın, MOORA-Oran, MOORA-Referans Noktası, MOORA-Önem Katsayısı, MOORA-Tam Çarpım Formu ve MULTIMOORA adında farklı yaklaşımları mevcuttur (Brauers ve Zavadskas, 2006). Chakraborty (2011) tarafından MOORA yöntemi belirlenmiş olan basitlik, güvenilirlik, hesaplama süresi, matematiksel işlem ve veri türü kriterleri baz alınarak diğer çok bilinen ÇKKV yöntemleri ile kıyaslamıştır. MOORA metodunun değerlendirilen diğer metotlara üstün olduğunu Çizelge 3.1'de belirtilmiştir (Chakraborty, 2011).

Çizelge 3.1. Çok kriterli karar verme yöntemlerinin karşılaştırılması

Yöntem	Hesaplama Zamanı	Matematiksel İşlemler	Basitlik	Güvenilirlik	Veri Türü
MOORA	Çok az	Minimum	Basit	İyi	Nicel
AHP	Çok fazla	Maksimum	Çok kritik	Zayıf	Karma
TOPSIS	Makul	Makul	Normal	Orta	Nicel
VIKOR	Az	Makul	Basit	Orta	Nicel
ELECTRE	Fazla	Makul	Normal	Orta	Karma
PROMETHEE	Fazla	Makul	Normal	Orta	Karma

MULTIMOORA tek başına bir metot olmayıp oran yaklaşımı, referans noktası ve tam çarpım formu MOORA yaklaşımlarının sıralama değerlerinin baskınlık teorisinden yararlanarak nihai sıralamaya ulaşmasını sağlamaktadır.

Çalışmanın bu bölümünde literatürde bulunan MOORA-Oran Metodu, MOORA-Referans Noktası Yaklaşımı, MOORA-Tam Çarpım Formu, MULTIMOORA tanıtılmıştır.

3.3.1. MOORA Oran Sistemi

MOORA-Oran yönteminin adımları aşağıda adım adım açıklanmıştır (Brauers ve Zavadskas, 2006):

Adım 1) Kriterlerin ve alternatiflerin performans değerlerinin belirlenmesi

m adet alternatif ve n adet kriter değerleri ile karar matrisinin oluşturması ilk adımdır, Eş. 8'de karar matrisi gösterilmektedir. Burada χ_{ij} , i. alternatifin j. amaca ya da kritere göre performans değerini göstermektedir.

$$X = \begin{bmatrix} \chi_{11} & \chi_{12} & \cdot & \chi_{1n} \\ \chi_{21} & \chi_{22} & \cdot & \chi_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \chi_{m1} & \chi_{m2} & \cdot & \chi_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Adım 2) Matrisin normalleştirilmesi

Matristeki her bir alternatif için her bir kritere veya amaca karşılık gelen performans değeri, tüm performans değerlerinin karelerinin toplamının kareköküne bölünerek matris normalleştirilir. X_{ij}^* , i. alternatifin j. amaca göre normalleştirilmiş performans değerini ifade etmektedir. Eş. 9'da gösterilmiştir.

$$X_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2}} \quad (9)$$

Adım 3) Farkların hesaplanması

Bu adımda normalleştirilmiş maksimizasyon performans değerleri toplamından minimizasyon performans değerleri toplamı çıkarılır, Eş. 10'da gösterilmiştir. g, maksimize edilecek amaçları, (n-g) minimize edilecek amaçları, y_i^* ise i. alternatifin tüm amaçlara göre normalleştirilmiş değerini göstermektedir. y_i^* değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanmaktadır, y_i^* sıralamasına göre ilk alternatif en uygun değer olarak yorumlanmaktadır.

$$y_i^* = \sum_{j=1}^g x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n x_{ij}^* \quad (10)$$

3.3.2. MOORA Referans Noktası Yaklaşımı

MOORA-Oran yöntemi ile elde edilen normalleştirilmiş değerler baz alınır. Alternatiflerin kriterlere yönelik maksimizasyon durumunda en iyi değeri, minimizasyon durumunda ise en düşük değeri referans noktası r_i olarak alınır. Alternatiflerin her bir amaca göre referans noktasına olan uzaklıkları bulunur, Eş. 11’de gösterilmiştir (Brauers ve Zavadskas, 2006).

$$d_{ij} = |r_i - x_{ij}^*| \quad (11)$$

Alternatiflerin sıralaması her alternatifin en yüksek değeri bulunur (P_i). Eş. 12’de kabul edilmiştir. Alternatifler küçükten büyüğe doğru sıralanır, ilk alternatif en iyi seçenek olarak kabul edilir (Brauers ve Zavadskas, 2006).

$$P_i = \min_i(\max_j d_{ij}) \quad (12)$$

3.3.3. MOORA Önem Katsayısı Yaklaşımı

MOORA Oran yöntemi ile elde edilen normalleştirilmiş değerler baz alınır. Kriterlerin veya amaçların önceliklerinin farklı olabileceği dikkate alınarak alternatiflerin performans değerleri hesaplanır, Eş 13’te gösterilmiştir (Stanujkic ve ark., 2012).

$$y_i^* = \sum_{j=1}^g w_j x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n w_j x_{ij}^* \quad (13)$$

w_j , kriterlerin ağırlıklarını ifade etmektedir. Kriterlerin önem ağırlıklarının referans noktası yaklaşımında da kullanılmaktadır. Eş. 5 genişletilerek ağırlıklarının da dikkate alındığı Eş. 14 oluşturulur (Stanujkic vd., 2012).

$$d_{ij} = w_j |r_i - x_{ij}^*| \quad (14)$$

3.3.4. MOORA Tam Çarpım Metodu

Brauers ve Zavadskas (2010) tarafından MOORA yönteminin tam çarpım sürümü geliştirilmiştir. Araştırmacılar tarafından U_i , alternatiflerin skorları olarak tanımlamakla beraber U_i değerlerinin büyükten küçüğe doğru sıralamasından elde edilen ilk alternatif en uygun seçenek olarak yorumlanmaktadır. Her bir alternatifin maksimizasyon amaçlı verilerin çarpımı A_i (Bkz. Eş. 16), minimizasyon amaçlı verilerin çarpımına B_i 'e (Bkz. Eş. 17) bölünmektedir, U_i Eş. 15'te gösterilmektedir (Brauers ve Zavadskas, 2010).

$$U_i = \frac{A_i}{B_i} \quad (15)$$

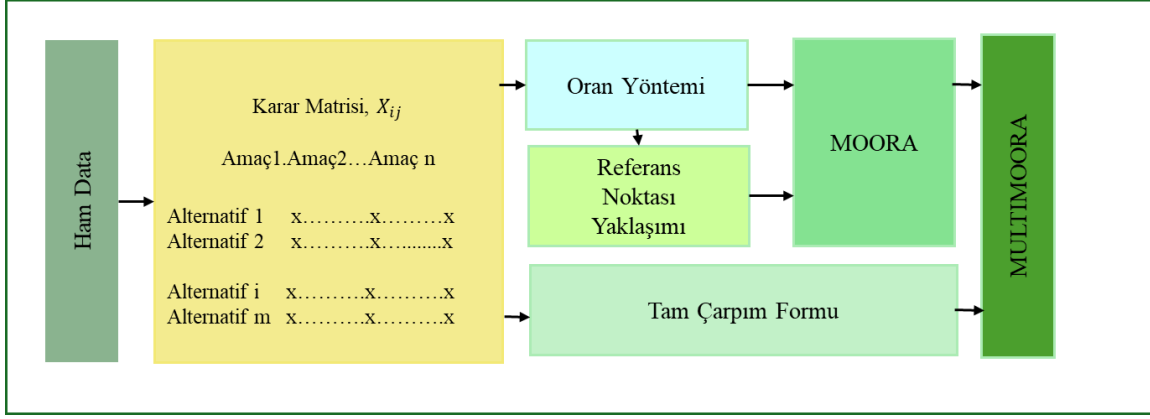
$$A_i = \prod_{j=1}^g x_{ij} \quad (16)$$

$i=1, \dots, m$; i alternatiflerin sayısını, $j=1, \dots, n$; j ise amaçların sayısını, g maksimize edilecek amaçların sayısını, $n-g$ ise minimize edilecek ifade etmektedir (Brauers ve Zavadskas, 2010).

$$B_i = \prod_{j=g+1}^n x_{ij} \quad (17)$$

3.3.5. MULTIMOORA

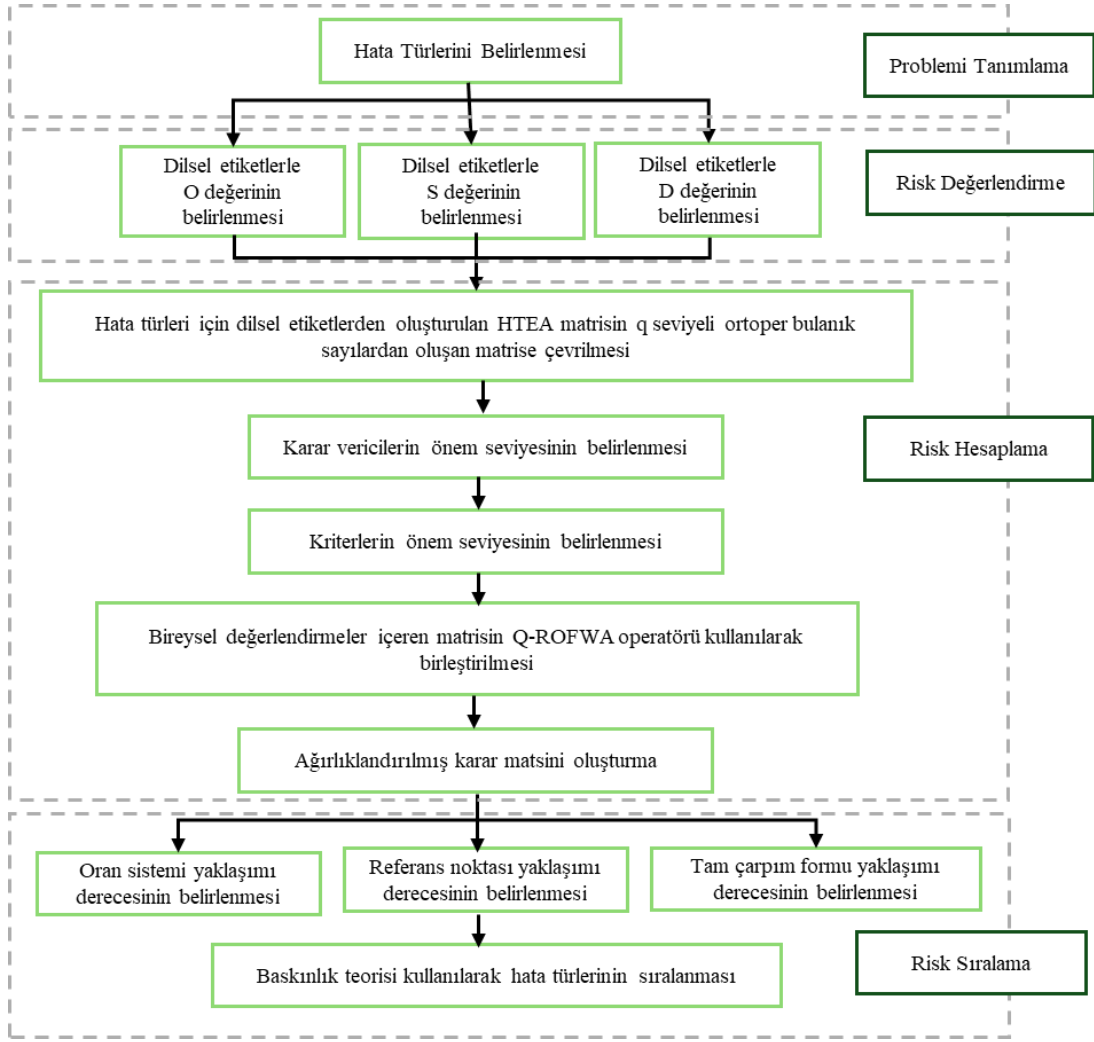
MULTIMOORA metodu, oran yöntemi, referans noktası ve tam çarpım formunu kullanılarak ulaşılan sıralama değerlerinin baskınlık teorisine göre, alternatiflerin nihai sıralamasını yapmaktadır. MULTIMOORA yöntemine ait akışını diyagramı Şekil 3.2'de gösterilmektedir (Brauers ve ark., 2014).



Şekil 3.2. MULTIMOORA akış diyagramı

3.4. Önerilen HTEA ve q Seviyeli Ortoper Bulanık Ağırlıklandırılmış Birleştirme Operatörleri ile Geliştirilmiş MULTIMOORA Yöntemi

Bu bölümde, q seviyeli ortoper bulanık ağırlıklandırılmış birleştirme operatörleri ile genişletilmiş hata türü ve etkileri analizinin MULTIMOORA entegrasyonuna dayanan yöntemin adımları anlatılmaktadır. Sunulan yöntemin akış şeması Şekil 3.3'te sunulmuştur.



Şekil 3.3. Önerilen yöntemin akış diyagramı

Adım 1) Sistemdeki hata türlerinin belirlenmesi, risk faktörlerinin ve karar vericilerin belirlenmesi

Uzman ekip $e_k = \{e_1, e_2, \dots, e_l\}$ tarafından hata türleri $FM_i = \{FM_1, FM_2, \dots, FM_m\}$ ve risk faktörleri $RF_j = \{RF_1, RF_2, \dots, RF_n\}$ belirlenir.

Adım 2) Her bir risk faktörüne ilişkin karar vericilerden değerlendirmelerin alınması

Her bir uzman tarafından hata türleri ve risk faktörlerinin değerlendirmelerine yönelik dilsel etiketlerden oluşan matris $\tilde{X}^k = (\tilde{x}_{ij}^k)_{m \times n}$, $k = 1, 2, \dots, l$ oluşturulur.

Adım 3) Hata türleri için dilsel etiketlerden oluşturulan matrisin q seviyeli ortoper bulanık sayılardan oluşan matrise çevrilmesi

Uzman ekip tarafından dilsel etiketlerle oluşturulan matris Çizelge 3.2'den (Akram ve ark., 2020) yararlanılarak QSBS'e çevrilir.

Çizelge 3.2. Dilsel etiketlerin q seviyeli ortoper bulanık sayı değerleri

Dilsel Etiket	q- seviyeli bulanık sayı (μ, v)
Kesinlikle yüksek (KY)	(1,00; 0,00)
Çok yüksek (ÇY)	(0,90; 0,10)
Yüksek (Y)	(0,75; 0,10)
Orta yüksek (OY)	(0,60; 0,25)
Orta (O)	(0,50; 0,45)
Orta düşük (OD)	(0,40; 0,50)
Düşük (D)	(0,25; 0,60)
Çok düşük (ÇD)	(0,10; 0,75)
Son derece düşük (SDD)	(0,00; 0,90)

Adım 4) Karar vericilerin ve risk faktörlerinin ağırlıklarını belirlenmesi

Dilsel etiketlerden oluşturulan uzman değerlendirmeleri, q seviyeli ortoper bulanık sayılar ile $D_k = [\mu_k, v_k]$ şeklinde gösterilmektedir (Wang ve Li, 2018). Uzman ağırlıkları Eş. 18'den yararlanılarak hesaplanır.

$$\lambda_k = \frac{(1 + \mu_k^q - v_k^q)/2}{\sum_{k=1}^l (1 + \mu_k^q - v_k^q)} \text{ ve } \sum_{k=1}^l \lambda_k = 1 \quad (18)$$

Adım 5) Risk faktörlerinin ağırlıklarının belirlenmesi

Risk faktörlerinin ağırlıkları, QSBS'leri kullanarak elde edilen skor fonksiyonu Eş. 19'dan yararlanılarak hesaplanır (Wang ve Li, 2018).

$$W_j = \frac{\sum_{k=1}^l \lambda_k (1 + \mu_k^q - v_k^q)}{\sum_{j=1}^n W_j \sum_{k=1}^l \lambda_k (1 + \mu_k^q - v_k^q)} \quad \sum_{j=1}^n W_j = 1 \quad (19)$$

Adım 6) Uzmanların QSBS' e çevrilmiş olan bireysel değerlendirmelerinin $\tilde{a}_k = (\mu_k, v_k)$, q seviyeli bulanık ağırlıklandırılmış birleştirme operatörleri kullanılarak birleştirilmesi, grup görüşüne dönüştürülmesi

Eş. 7'den yararlanılarak bireysel değerlendirmeler birleştirilmektedir.

$$q - \text{ROFWA} (\tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \dots, \tilde{a}_k) = \left\langle \left(1 - \prod_{k=1}^n (1 - \mu_k^q)^{w_k}\right)^{1/q}, \prod_{k=1}^n v_k^{w_k} \right\rangle \quad (7)$$

Adım 7) QSBS'den oluşan matris aşağıdaki skor fonksiyonu kullanılarak net sayılara çevrilmesi

Eş. 5'ten yararlanılarak q seviyeli bulanık sayılardan kesin sayılara dönüştürülür.

$$S(\tilde{D}) = \frac{2 + \mu^q - v^q}{(2 - \mu^q + v^q) \times (2 - \mu^q - v^q)} \quad (5)$$

Adım 8) Ağırlıklandırılmış karar matrisi oluşturulması

Eş. 20'den yararlanılarak kriter ağırlıkları ile karar matrisinin ağırlıklandırma işlemi gerçekleştirilir.

$$\tilde{R}_{ij} = \tilde{x}_{ij} * w_j \quad (20)$$

Adım 9) Oran yaklaşımı derecesinin belirlenmesi

Eş. 10'dan yararlanılarak hesaplanır, çıkan sonuçlar küçükten büyüğe sıralanır.

$$y_i^* = \sum_{j=1}^g x_{ij}^* - \sum_{j=g+1}^n x_{ij}^* \quad (10)$$

Adım 10) Referans noktası derecesinin belirlenmesi

Eş. 12'den yararlanılarak hesaplanır, çıkan sonuçlar küçükten büyüğe sıralanır.

$$P_i = \min_i(\max_j d_{ij}) \quad (12)$$

Adım 11) Tam çarpım formunun belirlenmesi

Eş. 15'ten yararlanılarak hesaplanır, çıkan sonuçlar maksimumdan minimuma doğru sıralanır.

$$U_i = \frac{A_i}{B_i} \quad (15)$$

Adım 12) Alternatiflerin sıralanması

Baskınlık teorisi kullanılarak, üç ayrı sıralama tek bir sıralama haline getirilir (Brauers ve Zavadskas, 2011).

4. UYGULAMA

4.1.Otomotiv Endüstrisinde Dizayn Çalışmalarının Önceliklendirilmesine Yönelik Bir Uygulama

Çalışmanın bu bölümünde önerilen HTEA ve q seviyeli ortoper ağırlıklandırılmış birleştirme operatörleri ile geliştirilmiş MULTIMOORA yöntemi, otomotiv endüstrisinde ticari araçlar tasarlayan, üreten ve servis sonrası hizmetler sunan yıllık ortalama 3200 adet ticari araç üretim kapasitesine ve yerli, global metriklerde güçlü pazar payına sahip büyük ölçekli bir işletmede dizayn çalışmalarının önceliklendirilmesi probleminde uygulanmıştır. Çalışmanın sonucunda varılmak istenilen nokta hata türlerine yönelik bir öncelik sıralamasının belirlenmesi şeklindedir. Firmanın üretim, Ar-Ge, iş geliştirme, lojistik, üretim planlama, malzeme yönetimi, satın alma birimleri dahil olmak üzere tüm kullanıcılara erişim ve görüntüleme sağlayabilen günümüzün popüler iş yönetim araçlarından biri olan bir platformda hata geribildirimlerine yönelik online veri tabanında kayıtlı olan 1076 adet hata, otomotiv endüstrisinde uzun yıllar Ar-Ge, kalite ve üretim departmanlarında çalışan üç adet uzmandan oluşan bir ekip tarafından dizayn çalışmalarında öncelik belirlemek amacıyla incelenmiştir. Bu hatalar, yılın belirlenen çeyreğinde tüm araç tipleri için montaj hattının sonunda yer almakta olan kalite noktalarında kayıt altına alınmaktadır. Veri tabanındaki hata türleri alanında uzman karar vericiler tarafından problemin yalınlaştırmak amacıyla 7 ana başlık altında sınıflandırmıştır. Hata türleri, HTEA metodundaki risk faktörleri ile matris oluşturacak şekilde dilsel etiketlerle belirtilmiştir. Dilsel etiketler QSBS'lere çevrilerek matris güncellenmiştir. Üç uzmanın sektör ve alan tecrübelerinin birbirinden farklı olması sebebiyle değerlendirmedeki yaklaşımları dördüncü bir uzman tarafından dilsel etiketlerle değerlendirilmiş olup QSBS'lerin skor fonksiyonundan yararlanılarak ağırlıklandırılmıştır. Aynı şekilde HTEA'da risk faktörlerinin ağırlıkları eş seviyede görülmeyip aynı teknik ile ağırlıklar belirlenmiştir. MOORA metodunun farklı yaklaşımları ile elde edilen değerler baskınlık teorisi temel alınarak sıralanmış olup dizayn ekibi tarafından en kritikten en az kritik olan hatalara yönelik bir sıralama elde edilmiştir. Uygulama adımları aşağıdaki gibidir.

Adım 1) Sistemdeki hata türlerinin ve risk faktörlerinin belirlenmesi

Üretim, Ar-Ge ve Kalite departmanlarında uzun yıllar görev almakta olan karar verici ekip tarafından otomotiv şirketinin veri tabanındaki 1076 adet hata, 7 adet ana başlık altında sınıflandırması şu şekilde olmuştur:

Üretim hattında cihazların veya parçaların montajları esnasında kullanılan yardımcı elemanların ölçülerine dair kusurlar birinci tip hata türü olarak belirlenmiştir. Örneğin montajı yapılacak malzeme ile kullanılacak havşa başlı cıvatanın ölçü uyumsuzluğu veya cıvata ile ara mesafe pul uyumsuzluğu şeklindedir. İkinci hata türü ise aracın iç dizaynında sıkça kullanılan fiber malzemelerden oluşan araç kaplamalarının kalıp veya ölçü kusuru sebebiyle araç hareketi esnasında ortaya çıkan istenmeyen sesler/gürültüler şeklinde bir sınıflandırmadır. Örneğin aracın cam direklerinin kaplamalarından gelen ses veya şoför mahalindeki diz kaplamasından gelen ses şeklindedir. Üçüncü tip sınıflandırmaya dahil edilen hata türü ise aracın elektrik tesisatlarında, akü, kablo, röle aksamalarına ait elektrik hardware tasarım hataları şeklindedir. Örneğin tavan klima tesisatına ait kablonun boyunun kısa olması veya kamera kablosuna ait konektörün uyumsuzluğu şeklindedir. Dördüncü tip hata türü ise aracın fonksiyonlarını çalıştıracak olan yazılım hatalarını temsil etmektedir. Örneğin kapı açılma sürelerindeki tutarsızlıklar veya klimaların şalter kapandıktan sonra devre dışı kalması şeklindedir. Beşinci tip hata türü sürücü gösterge panelinde yer alan fonksiyonel tuşların dizilimi şeklindedir. Örneğin müşteri özel isteğine istinaden tasarlanan engelli kapı tuşunun konsol diziliminde yanlış konumlandırılması şeklindedir. Altıncı hata türü olarak belirlenen kapsam ise koltuk dizilim homologasyon hatalarıdır. Bu hatalar araçlarda yolcu sayısına bağlı olarak tasarlanan koltuk dizilimdeki mesafe ölçülerinde uyumsuzluklar şeklindedir. Son olarak belirlenen hata türü ise hayati önem taşıyan parçalar için araç tipi uyumsuzluğu şeklindedir. Örneğin seçilen motor tipi ile iskelet uyumsuzluğu şeklindedir.

Belirlenen hata türleri Çizelge 4.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Uzman ekip tarafından belirlenen hata türleri

Hata Türü	Hata Türü Tanımları
FM1	Bağlantı elemanı uyumsuzluk tasarım hataları
FM2	Araçta takılan fiber malzeme aksamlarının tolerans seviyelerinden kaynaklı gürültü hataları
FM3	Elektrik hardware tasarım hataları
FM4	Elektronik yazılım tasarım hataları
FM5	Sürücü gösterge panelindeki tuş dizilim tasarım hataları
FM6	Koltuk dizilim homologasyon mesafe tasarım hataları
FM7	DS parçalar için araç-parça uyumsuzlukları

Risk faktörleri ise O, S ve D olarak belirlenmiştir.

Adım 2) Her bir risk faktörüne ve hata türüne ilişkin karar vericilerden değerlendirmelerin alınması, Çizelge 4.2’de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2. Dilsel etiketlerden oluşan uzman ekip hata değerlendirme matrisi

	O			S			D		
	e1	e2	e3	e1	e2	e3	e1	e2	e3
FM1	O	OY	Y	Y	ÇY	KY	O	O	ÇY
FM2	Y	Y	ÇY	ÇY	Y	KY	KY	KY	KY
FM3	O	OD	OY	ÇY	Y	KY	ÇY	OY	ÇY
FM4	D	D	D	Y	ÇY	KY	Y	Y	KY
FM5	ÇD	ÇD	ÇD	Y	O	ÇY	KY	KY	KY
FM6	D	ÇD	D	ÇY	Y	KY	ÇY	Y	KY
FM7	SDD	SDD	SDD	KY	KY	KY	KY	KY	KY

Adım 3) Hata türleri için dilsel etiketlerden oluşan matrisin Çizelge 3.2’den yararlanarak dilsel etiketlerin q seviyeli bulanık sayı karşılıklarından oluşan matrise çevrilmesi, Çizelge 4.3’te gösterilmiştir.

QSBS'nin başlangıç noktası olan $q=3$ olarak seçilmiştir. Çalışmanın devamında yapılacak olan duyarlılık analizinde farklı q değerleri ile önerilen yöntem analiz edilmektedir.

Çizelge 4.3. Dilsel etiketlerden oluşan matrisin q seviyeli bulanık sayılara dönüştürülmesi

	O			S			D		
	e1	e2	e3	e1	e2	e3	e1	e2	e3
	(μ, ν)	(μ, ν)	(μ, ν)	(μ, ν)	(μ, ν)	(μ, ν)	(μ, ν)	(μ, ν)	(μ, ν)
FM1	(0,50; 0,45)	(0,60; 0,25)	(0,75; 0,10)	(0,75; 0,10)	(0,90; 0,10)	(1,0; 0,0)	(0,50; 0,45)	(0,50; 0,45)	(0,9; 0,1)
FM2	(0,75; 0,10)	(0,75; 0,10)	(0,90; 0,10)	(0,90; 0,10)	(0,75; 0,10)	(1,0; 0,0)	(1,00; 0,00)	(1,00; 0,00)	(1,0; 0,0)
FM3	(0,50; 0,45)	(0,40; 0,50)	(0,60; 0,25)	(0,90; 0,10)	(0,75; 0,10)	(1,0; 0,0)	(0,90; 0,10)	(0,60; 0,25)	(0,9; 0,1)
FM4	(0,25; 0,60)	(0,25; 0,60)	(0,25; 0,60)	(0,75; 0,10)	(0,90; 0,10)	(1,0; 0,0)	(0,75; 0,10)	(0,75; 0,10)	(1,0; 0,0)
FM5	(0,10; 0,75)	(0,10; 0,75)	(0,10; 0,75)	(0,75; 0,10)	(0,50; 0,45)	(0,9; 0,1)	(1,00; 0,00)	(1,00; 0,00)	(1,0; 0,0)
FM6	(0,25; 0,60)	(0,10; 0,75)	(0,25; 0,60)	(0,90; 0,10)	(0,75; 0,10)	(1,0; 0,0)	(0,90; 0,10)	(0,75; 0,10)	(1,0; 0,0)
FM7	(0,00; 0,90)	(0,00; 0,90)	(0,00; 0,90)	(1,00; 0,00)	(1,00; 0,00)	(1,0; 0,0)	(1,00; 0,00)	(1,00; 0,00)	(1,0; 0,0)

Adım 4) Uzmanların önem derecelerinin Eş. 18'den yararlanılarak belirlenmesi, Çizelge 4.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.4. Uzman ağırlıkları

Uzman	Departman Bilgisi	Dilsel Etiket	Q seviyeli bulanık sayı (μ, ν)	Uzman Ağırlığı λ_k
e1	Ar-Ge Uzmanı	Y	(0,75; 0,10)	0,3397
e2	Üretim Uzmanı	O	(0,50; 0,45)	0,2472
e3	Kalite Uzmanı	ÇY	(0,9; 0,1)	0,4131

e1 için uzman ağırlığı λ_{e1} aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$\lambda_{e1} = \frac{(1 + 0,75^3 - 0,10^3)/2}{(0,710 + 0,516 + 0,864)} = 0,3397$$

Adım 5) Risk faktörlerinin önem derecelerinin Eş. 19'dan yararlanılarak belirlenmesi, Çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5. Risk faktörü ağırlıkları

Risk Faktörü	e1 değerlendirme	e2 değerlendirme	e3 değerlendirme	Risk Faktörü Ağırlığı W_j
O	ÇY (0,90; 0,10)	ÇY (0,90; 0,10)	ÇY (0,90; 0,10)	0,3336
S	KY (1,0; 0,00)	KY (1,0; 0,0)	KY (1,0; 0,0)	0,3861
D	Y (0,75; 0,10)	O (0,50; 0,45)	ÇY (0,90; 0,10)	0,2803

O risk faktörü için kriter ağırlığı W_o aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$W_o = \frac{0,3397 * (1 + 0,9^3 - 0,1^3) + 0,2492 * (1 + 0,9^3 - 0,1^3) + 0,4131 * (1 + 0,9^3 - 0,1^3)}{(1,728 + 2 + 1,452)} = 0,3336$$

Adım 6) Uzmanların bireysel değerlendirmelerinden oluşan QSBK matrisi değerlerinin q seviyeli ortoper bulanık ağırlıklandırılmış birleştirme operatörleri kullanılarak Eş. 7'den yararlanılarak birleştirilmesi, Çizelge 4.6'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Birleştirilmiş grup karar matrisi

	O	S	D
	(μ, v)	(μ, v)	(μ, v)
FM1	(0,6561; 0,2091)	(1,0000; 0,0000)	(0,7724; 0,2417)
FM2	(0,8326; 0,1465)	(1,0000; 0,0000)	(1,0000; 0,0000)
FM3	(0,5311; 0,4560)	(1,0000; 0,0000)	(0,8652; 0,1254)
FM4	(0,2500; 0,6531)	(1,0000; 0,0000)	(1,0000; 0,0000)
FM5	(0,1000; 0,7867)	(0,8101; 0,1450)	(1,0000; 0,0000)
FM6	(0,2291; 0,6901)	(1,0000; 0,0000)	(1,0000; 0,0000)
FM7	(0,0000; 0,9159)	(1,0000; 0,0000)	(1,0000; 0,0000)

Adım 7) Grup değerlendirilmesi formuna getirilen QSBS matrisi Eş. 5'ten yararlanılarak kesin sayılara çevrilir, sonuçlar Çizelge 4.7'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.7. Karar matrisi

	O	S	D
FM1	0,7706	3,0000	1,0329
FM2	1,2717	3,0000	3,0000
FM3	0,6018	3,0000	1,4466
FM4	0,4500	2,9970	3,0000
FM5	0,4028	1,1742	3,0000
FM6	0,4379	3,0000	3,0000
FM7	0,3612	3,0000	3,0000

$\tilde{D} = (0,6561; 0,2091)$ için skor fonksiyonu $S(\tilde{D})$ aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır.

$$S(\tilde{D}) = \frac{2 + 0,6561^3 - 0,2091^3}{(2 - 0,6561^3 + 0,2091^3) \times (2 - 0,6561^3 - 0,2091^3)} = 0,7706$$

Adım 8) Normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış karar matrisini Eş. 20'den yararlanılarak belirlenmiştir ve Çizelge 4.8'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.8. Normalize edilmiş ve ağırlıklandırılmış karar matrisi

	O	S	D
FM1	0,13967	0,15725	0,04167
FM2	0,23068	0,15725	0,12104
FM3	0,11138	0,15725	0,05837
FM4	0,08383	0,15709	0,12104
FM5	0,07497	0,06155	0,12104
FM6	0,08194	0,15725	0,12104
FM7	0,06641	0,15725	0,12104

Adım 9,10,11) Oran yaklaşımı derecesi Eş. 10'dan yararlanarak, Referans noktası derecesi Eş. 12'den yararlanarak, Tam çarpım formu derecesi Eş. 15'ten yararlanarak belirlenmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.9'da gösterilmiştir.

Çizelge 4.9. MOORA yöntemleri ile elde edilen sıralamalar

Hata Türü	MOORA		MOORA		MOORA
	Oran Metodu Y_i	Hata Türü	Referans Noktası Yaklaşımı P_i	Hata Türü	Tam Çarpım Formu U_i
FM1	0,3386	FM1	0,0910	FM1	2,3879
FM2	0,5090	FM2	0,0000	FM2	11,4543
FM3	0,3270	FM3	0,1193	FM3	2,6668
FM4	0,3620	FM4	0,1469	FM4	4,1583
FM5	0,2576	FM5	0,1557	FM5	1,4569
FM6	0,3602	FM6	0,1487	FM6	4,0689
FM7	0,3447	FM7	0,1643	FM7	3,2976

Adım 12) Alternatiflerin baskınlık teorisi kullanılarak sıralanması, Tablo 4.10'da gösterilmiştir.

MOORA oran metodu için sıralama $FM_2 > FM_4 > FM_6 > FM_7 > FM_1 > FM_3 > FM_5$ şeklindedir. En kritik hata türü olan FM_2 'den başlayarak en az kritik olan FM_5 önem seviyesine göre bir sıralama elde edilmiştir. MOORA referans noktası yaklaşımında ise sıralama $FM_2 > FM_1 > FM_3 > FM_4 > FM_6 > FM_5 > FM_7$ şeklindedir. En kritik öneme sahip olan hata türü FM_2 , en az kritik önem sahip hata türü FM_7 şeklindedir. MOORA tam çarpım formu yaklaşımında elde edilen sıra $FM_2 > FM_4 > FM_6 > FM_7 > FM_3 > FM_1 > FM_5$ şeklindedir. En kritik öneme sahip olan hata türü FM_2 , en az kritik önem sahip hata türü FM_5 şeklindedir. MULTIMOORA yönteminde MOORA Oran, MOORA Referans Noktası Yaklaşımı, MOORA Tam Çarpım Formu baskınlık teorisi esas alınarak nihai sıra elde edilmiş olup Çizelge 4.10'da gösterilmiştir. Baskınlık teorisine göre birinci önem seviyesine sahip değer oran metodu, referans noktası yaklaşımı ve tam çarpım formu için FM_2 şeklindedir. Bu noktada FM_2 'e alternatif başka değer bulunmadığı için FM_2 MULTIMOORA final sıralamasında ilk sırayı almaktadır. İkinci önem seviyesine sahip hata türünde oran metodunda FM_4 , referans noktası yaklaşımında FM_1 , tam çarpım formu yaklaşımında ise FM_4 şeklindeki sıralamalarda FM_4 'ün FM_1 'e baskın olması sebebiyle MULTIMOORA final sıralamasında ikinci sırayı FM_4 almaktadır.

Hata türleri kritiklik seviyeleri açısından $FM_2 > FM_4 > FM_6 > FM_7 > FM_3$, $FM_1 > FM_5$ şeklinde sıralanmıştır. FM_3 ve FM_1 'in birbirlerine baskınlıkları bulunmamaktadır. Dizayn çalışmalarında ilk olarak odaklanması gereken hata türünün FM_2 , daha sonrasında kritiklik seviyesine göre sıralandığında en az öneme sahip olanın değeri FM_5 olduğu önerilen yöntem tarafından hesaplanmıştır. Çalışmanın sonunda modelin elde ettiği sıralama uzman ekip tarafından değerlendirilmiş olup elde edilen sıralamanın son derece tutarlı olduğu değerlendirilmiştir.

Çizelge 4.10. MULTIMOORA final sıralaması

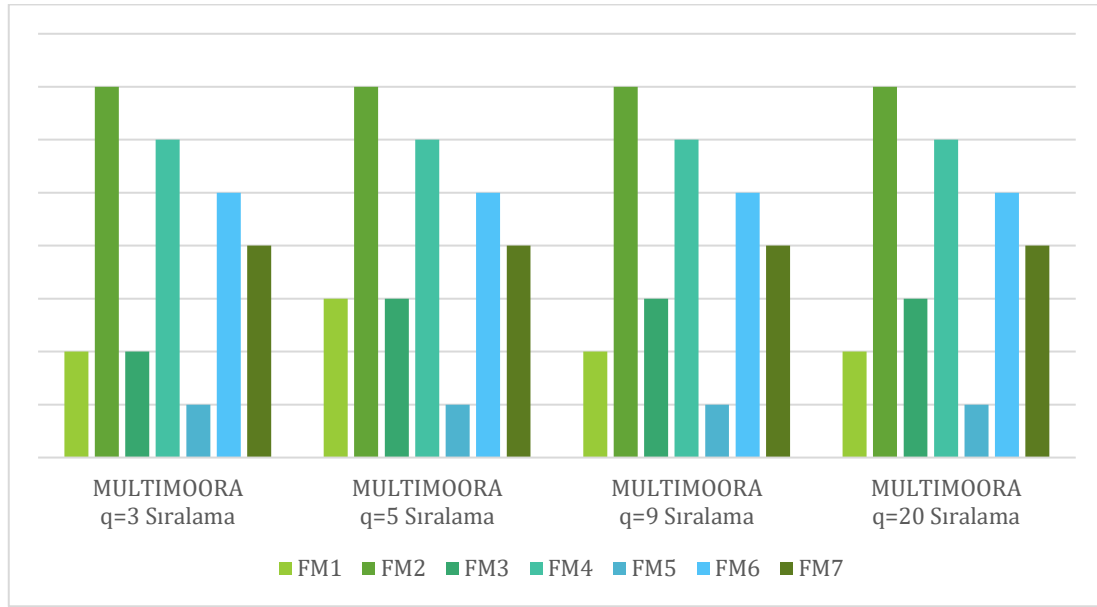
Sıralama	MOORA Oran Metodu Y_i	MOORA Referans Noktası Yaklaşımı P_i	MOORA Tam Çarpım Formu U_i	MULTIMOORA Final Sıralama
1	FM2	FM2	FM2	FM2
2	FM4	FM1	FM4	FM4
3	FM6	FM3	FM6	FM6
4	FM7	FM4	FM7	FM7
5	FM1	FM6	FM3	FM1, FM3
6	FM3	FM5	FM1	FM1, FM3
7	FM5	FM7	FM5	FM5

4.2. Duyarlılık Analizi

Bu çalışmada QSBK yaklaşımı ve q seviyeli ortoper bulanık ağırlıklandırılmış birleştirme operatörleri ile geliştirilmiş MULTIMOORA yöntemi ile entegre edilmiş bir HTEA yöntemi önerilmektedir. q parametresinin kullanılması, SBK ve PBK'nın elde edemediği uzman değerlendirme bilgileri için üyelik derecesi bakımından daha geniş bir alanı kapsadığı Şekil 3.1.'den gözlemlenmektedir. Aynı zamanda q değeri, karar vericilere karar verme özgürlüğü de tanımaktadır. Önerilen HTEA yönteminde, farklı karar verme durumlarını gösteren q parametresi hata türlerinin sıralama sonuçlarını etkileyebilecek bir parametredir. Bu nedenle, çalışmanın bu bölümünde q parametresinin hata türleri sıralamasını nasıl etkilediği analiz edilecektir.

Hata türlerinin farklı q parametreleri altında hareketlerini gözlemlemek için duyarlılık analizi yapılmıştır. Analiz sonuçları Şekil 4.1'de gösterilmiştir. Dilsel değerlendirmeler

sabit tutulmuş olup q parametresi değiştirilerek sonuçlar gözlemlenmiştir. q parametresinin değişimi ile uzman ağırlıkları ve kriter ağırlıklarının da değişimi gözlenmiştir. Önerilen yöntemde kullanılmış olan $q=3$ parametresine ek olarak $q=5$, $q=9$ ve $q=20$ değerleri için durum incelenmiş ve önerilen yöntemden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.



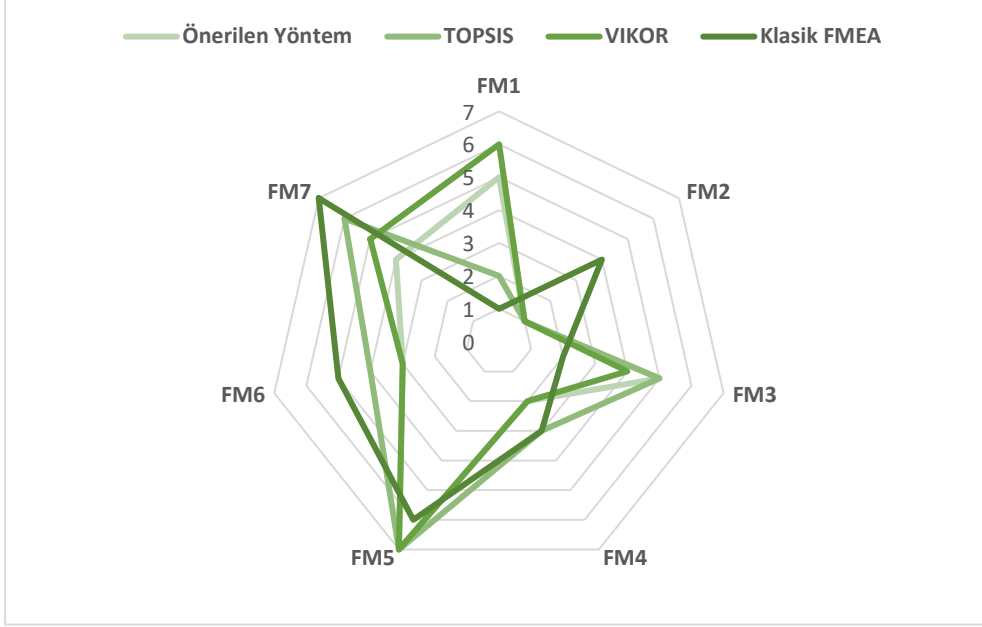
Şekil 4.1. Önerilen yöntem ile farklı q seviyelerine göre elde edilen sıralamalar

Duyarlılık analizi Şekil 4.1’den takip edileceği gibi $q=3$, $q=5$, $q=9$ ve $q=20$ değerleri için MULTIMOORA final sonuçlarında FM_1 , FM_3 hata türleri hariç diğer hata türlerinin sıralamasının sabit kaldığı tespit edilmiştir. $q=3$ ve $q=5$ değerlerinde FM_1 , FM_3 ’ün birbirlerine baskınlık kuramadıkları gözlemlenmiştir. Bütün bu analizler bize önerilen metotta en kritik hata türü olarak belirlenen FM_2 alternatifinin ve en az kritik öneme sahip olan FM_5 alternatifinin sıralamasının q parametresinin değişiminden etkilenmediğini göstermektedir.

4.3. Karşılaştırma ve Değerlendirme

Çalışmanın bu bölümünde önerilen yöntem klasik HTEA, TOPSIS (Hwang ve Yoon, 1981) ve VIKOR (Opricovic, S. 1998) yöntemleriyle karşılaştırılmaktadır. Farklı ÇKKV teknikleriyle elde edilen sonuçlar arasında aynı veriyi farklı şekillerde işlemelerinden kaynaklı sonuç farklılıkları gözlemlenmektedir. Şekil 4.2, çalışmada önerilen yöntemin

karşılaştırılan diğer üç teknikten Bulanık TOPSIS ve Bulanık VIKOR ile aynı sıralamada en kritik olarak FM_2 ve en az kritiklik seviyesine sahip hata türü olarak da FM_5 öne çıkmaktadır. Diğer açıdan ise sıralamanın geri kalanında farklılıklar gözlemlenmektedir.



Şekil 4.2. Önerilen yöntemin diğer ÇKKV teknikleri ile karşılaştırılması

Karar vericilerden yapılan uygulama ve analiz sonrası görüşmelerde, elde edilen sonuçların değerlendirilmesi talep edilmiştir. Önerilen melez HTEA yöntemi ile elde edilen sonuçlar ile hata türlerinin kritik seviyeleri arasında uyum olduğuna dair görüş birliğine varılmıştır.

5. SONUÇ ve YORUM

Rekabetin yüksek olduğu günümüz koşullarında işletmelerin müşteriye yenilikçi, konforlu, sürdürülebilir ürünler sunabilmesi ve tüm bunları gerçekleştirirken kaliteden ödün vermeden ilerlemesi gerekmektedir. Katma değeri yüksek ürün çıktısını hedefleyen işletmelerin aynı zamanda kalite standartlarını gözeterek daha az hata, hızlı çözüm, düşük maliyet gibi temel etkenler, varlıklarını sürdürmeleri için olmazsa olmazlarıdır. Müşteriye özel hizmet veren, ürünlerini müşterilerin istekleri doğrultusunda tasarlayan firmalarda hata geri bildirimlerine ivedilikle çözüm sunulması beklenmektedir. Otomotiv sektörü gibi kâr amacı güden kuruluşların, iş sürekliliğini ve rekabet gücünü koruyabilmeleri için tasarım, üretim ve servis süreçlerinde kalite tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. HTEA bilinen ve/veya potansiyel hataları son kullanıcıya ulaşmadan önce bulmayı, tanımlamayı ve ortadan kaldırmayı amaçlayan kalite mühendislik tekniğidir.

Her ne kadar geleneksel HTEA'nın, tasarım, süreç veya hizmet sistemlerinde hataların oluşmasını tespit eden ve engelleyen en önemli erken önleme yöntemlerinden biri olduğu kanıtlanmış olsa da eksiklikleri sebebiyle birçok araştırmacı tarafından eleştirilmiştir. Bu eksiklikler: (i) Geleneksel HTEA'da risk faktörlerinin göreceli olması göz ardı edilip üç faktörün de eşit öneme sahip olduğu varsayılır, farklı risk faktörlerinin çarpımından ortaya çıkan aynı RÖS değerlerinin yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. (ii) Tek bir risk faktöründeki ufak bir değişikliğin RÖS değeri üzerinde çok farklı etkileri vardır ve bu da hataların önceliklendirilmesini zorlaştırmaktadır. (iii) Karar vericilerin risk faktörlerini rakamlarla değerlendirmesi genellikle zordur.

Tez kapsamında sunulan çalışma, otomotiv endüstrisinde dizayn hatalarına yönelik bir önceliklendirme ihtiyacına istinaden geliştirilmiştir. Sunulan model ile hem geleneksel HTEA'nın eksiklikleri ile başa çıkmak hem de tasarım çalışmalarına dair bir aciliyet sıralaması yapmak amaçlanmıştır. Çalışmanın odaklanması gereken iki ayrı problemi ele alıp tek model tasarımı ile geliştirmesi, sunulan modeli literatürdeki çalışmalardan ayıran nokta olarak değerlendirilmektedir. Modeli, diğer çalışmalardan ayıran bir diğer özelliği ise metodolojisidir. HTEA, QSBK teorisi ve MULTIMOORA ile ilk defa konsolide edilerek bir karar verme metodolojisi olarak kullanılmıştır.

Çalışmada, bir otomotiv firmasında uzun yıllar görev almakta olan; ürün geliştirme, kalite ve üretim departmanlarında çalışan uzmanlardan oluşan bir grup, şirketin veri tabanında bulunan 1076 adet hatayı incelemiş olup bunları yedi ana hata türü başlığı altında toplamışlardır. Problemin değerlendirme aşamasında özellikle tasarım ve üretim süreçleri gibi potansiyel hataları tanımlamanın son derece önemli olması sebebiyle ÇKKV tekniklerinden HTEA ile çalışmaya başlanmıştır. Hata türleri, uzmanlar tarafından geleneksel HTEA’da eleştirilen 1-10 arasındaki rakamlar yerine dilsel etiketlerle değerlendirilmiştir. Değerlendirmelerden oluşan karar matrisi dilsel etiketlerin bilgiyi yeterince ifade etmemesi sebebiyle, karar verme problemine esneklik sağlayacak olan QSBS’lere çevrilmiştir. Bulanık küme seçiminde alabildiği farklı q parametreleri ile kapsayıcılığının yüksek olması sebebiyle QSBK’lerden yararlanılmıştır. Buradaki amaç bilginin yetersizliğini farklı değerlerle simüle edebilmek ve noksanlıklarla esnek bir şekilde başa çıkabilmektir. Modelde, geleneksel HTEA’da eleştirilen diğer bir nokta olan uzmanların ve risk faktörlerinin ağırlıkları eşit sayılmamış hem uzmanların hem de risk faktörlerinin görece ağırlıkları hesaplanmıştır. Karar verici uzman grubunun bireysel görüşleri q seviyeli bulanık ağırlıklandırılmış birleştirme operatörü kullanılarak konsolide edilmiş ve karar matrisine entegre edilmiştir. Elde edilen karar matrisi ile bir sonraki aşama olan hata türlerini sıralama prosesine geçilmiştir. Sıralama aşamasında diğer ÇKKV teknikleri karşılaştırıldığında matematiksel hesaplamadaki yalınlığı, kolay uygulanabilirliği, alt yöntemler içerisinde baskınlık teorisi ile nihai sıralamayı elde etmesi sebebiyle MULTIMOORA yöntemi bulanık HTEA yöntemine entegre edilmiş çalışmanın amaçladığı üzere tasarım çalışmalarına yönelik nihai sıralama elde edilmiştir.

Elde edilen final sonuçlar kritiklik açısından $FM_2 > FM_4 > FM_6 > FM_7 > FM_3$, $FM_1 > FM_5$ şeklindedir. Önerilen yöntem, farklı ÇKKV tekniklerden TOPSIS, VIKOR ve klasik HTEA yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Önerilen yöntemde en önemli değere sahip olan FM_2 ve en az kritiklik seviyesine sahip olan FM_5 , TOPSIS ve VIKOR değerlendirmelerinde de aynı sıralamaya sahip olmakla beraber uzmanlar, modelin sonuçlarını bütüncü bakış açısı ile değerlendirdiğinde modelin nihai sıralamasının, karşılaştırıldığı TOPSIS, VIKOR ve geleneksel HTEA sıralamalardan daha gerçekçi bir önem seviyesine sahip olduğu şeklinde görüş bildirmişlerdir. Tasarım çalışmalarında öncelik sıralaması ihtiyacına istinaden geliştirilen model ile hem literatürdeki HTEA eksiklikleri giderilmiş hem de endüstri problemine gerçekliği yüksek sonuçlar ile çözüm

sunulmuştur. Tasarım çalışmalarında önerilen öncelik sıralamasına yönelik odaklanmalar ile mühendislik ve işçilik saatleri gibi giderlerde azalma, iç ve dış müşteri gözünde ise kalite algısında iyileştirmeler olacağı öngörülmektedir.

Özetle, önerilen yöntemle birlikte değerlendirme sürecinde geleneksel HTEA'nın aksine karar vericileri zorlayan rakamsal değerlendirmeler yerine dilsel etiketler aracılığı ile görüşler alınmış, karar vericilere kolaylık sağlanmıştır. Geleneksel HTEA'da risk faktörlerinin ağırlıkları eşit alınırken, sunulan modelde hem karar vericilerin hem de kriterlerin ağırlıklarının birbirinden farklı olabileceği göz önünde bulundurulmuş ve ağırlıklar bulanık yöntemler ile hesaplanmıştır. Dilsel etiketlerin değerlendirmede yeterli olmaması sebebiyle, etiketler değerlendirmeye esneklik katacak olan QSBS'lere dönüştürülmüş ve birleştirme operatörlerinden yararlanılarak bireysel uzman görüşleri grup görüşüne dönüştürülmüştür. Karar vericilerin grup görüşü risk faktörlerinin değerlendirilmesine katkıda bulunacak şekilde karar matrisine entegre edilmiştir. Hem karar vericilerin hem de kriterlerin ağırlıkları hesaba katılarak klasik HTEA'da eleştirilen aynı RÖS değerlerinin elde edilmesi problemi ortadan kaldırılmıştır. Alt yöntemlerin baskınlık teorisinden yararlanılacak şekilde zaman, matematiksel işlem, yalınlık ve güvenilirlik bakımında diğer ÇKKV yöntemlerinden üstün olan MULTIMOORA, q seviyeli bulanık küme ile etki alanı genişletilerek nihai sıralama belirlenmiştir.

Önerilen melez HTEA yönteminin pratik katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- (i) Önerilen yöntem risk yöneticilerine ve/veya paydaşlara risk analizini efektif şekilde gerçekleştirme imkânı sunabilir.
- (ii) Önerilen yöntem uzman ağırlıkları ve risk öncelik ağırlıklarını hesaba katarak tüm potansiyel/ mevcut hatalardan en kritik hata türünü belirlemek için kullanılabilir.
- (iii) Önerilen yöntem elektrik-elektronik, üretim, servis sonrası hizmetler gibi çeşitli alanlarda farklı esnek koşullarda hata riskini değerlendirmek ve önceliklendirmek için uygulanabilir. Bu nedenle, risk analizinin güvenilirliğini ve etkinliğini artırmak için bu yaklaşım kullanılabilir.

Kullanılan metodoloji hakkında gelecek çalışmalarda şu noktalara odaklanılabilir: sunulan tez kapsamında dinamik referans noktaları dikkate alınmamıştır, bir sonraki aşamada referans noktalarına esneklik sağlayacak olan bir model geliştirilebilir. Çalışmada, her bir uzmanın ve risk faktörünün bulanık ağırlığı hesaplamayı kolaylaştırmak adına uzmanlar tarafından belirlenmiştir. Uzman ağırlıkları ve kriter ağırlıklarının kendi içerisinde etkileşimini dikkate almak için bulanık ölçü yaklaşımı kullanılabilir.

6. KAYNAKLAR

- Akram, M., Khan, A., Ahmad, U., 2022. Extended MULTIMOORA method based on tuple linguistic Pythagorean fuzzy sets for multi-attribute group decision-making. *Granular Computing* 8(2), 311-332.
- Akram, M., Luqman, A., Alcantud, J.C.R., 2020. Risk evaluation in failure modes and effects analysis: hybrid TOPSIS and ELECTRE I solutions with Pythagorean fuzzy information. *Neural Computing and Applications* 33(11), 5675-5703.
- Akram, M., Shumaiza, 2021. Multi-criteria decision making based on q-rung orthopair fuzzy promethee approach. *Iranian Journal of Fuzzy Systems* 18, 107-127.
- Atanassov, K.T., 1986. Intuitionistic fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems* 20(1), 87-96.
- Baghery, M., Yousefi, S., Rezaee, M.J., 2016. Risk measurement and prioritization of auto parts manufacturing processes based on process failure analysis, interval data envelopment analysis and grey relational analysis. *Journal of Intelligent Manufacturing* 29(8), 1803-1825.
- Boral, S., Howard, I., Chaturvedi, S.K., McKee, K., Naikan, V.N.A., 2020. An integrated approach for fuzzy failure modes and effects analysis using fuzzy AHP and fuzzy MAIRCA. *Engineering Failure Analysis* 108.
- Bowles, J.B., Peldez, E.C., 1995. Fuzzy logic prioritization of failures in a system failure mode, effects and criticality analysis *Reliability Engineering and System Safety* 50, 203-213.
- Brauers, W., Ginevicius, R., Podvezko, A., 2014. Ranking of the Lithuanian Banks During the Recession of 2008-2009 by the MULTIMOORA Method. *Annals of Management Science* 3(1), 1-28.
- Brauers, W.K.M., Zavadskas, E.K., 2010. Project Management by Multimoora as an Instrument for Transition Economies / ProjektŲ Vadyba Su Multimoora Kaip Priemonė Pereinamojo Laikotarpio Ūkiams. *Technological and Economic Development of Economy* 16(1), 5-24.
- Brauers, W.K.M., Zavadskas, E.K., 2011. Multimoora Optimization Used to Decide on a Bank Loan to Buy Property. *Technological and Economic Development of Economy* 17(1), 174-188.
- Eddy, D., Krishnamurty, S., Grosse, I.R., White, M., 2020. A Defect Prevention Concept Using Artificial Intelligence. *Conference: ASME 2020 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.*

- Figueira, J.R., Greco, S., Ehrgott, M., 2005. Multiple Criteria Decision Analysis.
- Franceschini, F., Galetto, M., 2001. A new approach for evaluation of risk priorities of failure modes in FMEA. *International Journal of Production Research* 39(13), 2991-3002.
- Fu, S., Yu, Y., Chen, J., Han, B., Wu, Z., 2022. Towards a probabilistic approach for risk analysis of nuclear-powered icebreakers using FMEA and FRAM. *Ocean Engineering* 260.
- Gan, L., Xu, J., Han, B.T., 2011. A computer-integrated FMEA for dynamic supply chains in a flexible-based environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 59(5-8), 697-717.
- Gul, M., Ak, M.F., 2021. A modified failure modes and effects analysis using interval-valued spherical fuzzy extension of TOPSIS method: case study in a marble manufacturing facility. *Soft Computing* 25(8), 6157-6178.
- Haktanır, E., Kahraman, C., 2020. Interval-valued neutrosophic failure mode and effect analysis. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 39, 6591–6601.
- Jin, C., Ran, Y., Zhang, G., 2021. Interval-valued q-rung orthopair fuzzy FMEA application to improve risk evaluation process of tool changing manipulator. *Applied Soft Computing* 104.
- Jomthanachai, S., Wong, W.-P., Lim, C.-P., 2021. An Application of Data Envelopment Analysis and Machine Learning Approach to Risk Management. *IEEE Access* 9, 85978-85994.
- Kutlu, A.C., Ekmekçioğlu, M., 2012. Fuzzy failure modes and effects analysis by using fuzzy TOPSIS-based fuzzy AHP. *Expert Systems with Applications* 39(1), 61-67.
- Kutlu Gündoğdu, F., Kahraman, C., 2019. Spherical fuzzy sets and spherical fuzzy TOPSIS method. *Journal of Intelligent & Fuzzy Systems* 36(1), 337-352.
- Lin, S.W., Lo, H.W., 2023. An FMEA model for risk assessment of university sustainability: using a combined ITARA with TOPSIS-AL approach based neutrosophic sets. *Ann Oper Res*, 1-27.
- Liu, H.-C., Liu, L., Bian, Q.-H., Lin, Q.-L., Dong, N., Xu, P.-C., 2011. Failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning approach and grey theory. *Expert Systems with Applications* 38(4), 4403-4415.
- Liu, H.-C., Liu, L., Liu, N., 2013. Risk evaluation approaches in failure mode and effects analysis: A literature review. *Expert Systems with Applications* 40(2), 828-838.
- Liu, H.-C., Wang, L.-E., Li, Z., Hu, Y.-P., 2019. Improving Risk Evaluation in FMEA With Cloud Model and Hierarchical TOPSIS Method. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 27(1), 84-95.

- Liu, P., Shen, M., Geng, Y., 2023. Risk assessment based on failure mode and effects analysis (FMEA) and WASPAS methods under probabilistic double hierarchy linguistic term sets. *Computers & Industrial Engineering* 186.
- Mursitama, T.N., Ariyanti, F.D., Paramaputra, B.E., Noerlina, Utama, D.N., Abrori, S.A., 2023. Reduce Overtime of Distribution Centre by Re-Layout and Employee Shift Scheduling Use Class Based Storage and Integer Linear Programming. *E3S Web of Conferences* 426.
- Opricovic, S., 1998. *Multicriteria Optimization of Civil Engineering Systems*. Faculty of Civil Engineering, p. 302.
- Peddi, S., Lanka, K., Gopal, P.R.C., 2023. Modified FMEA using machine learning for food supply chain. *Materials Today: Proceedings*.
- Renzi, C., Leali, F., Di Angelo, L., 2017. A review on decision-making methods in engineering design for the automotive industry. *Journal of Engineering Design* 28(2), 118-143.
- Seyfi, S.A., Donyatalab, Y., Farrokhzadeh, E., 2021. Extension of Classical Analytic Hierarchy Process Using q-Rung Orthopair Fuzzy Sets and Its Application to Disaster Logistics Location Center Selection. *International Conference on Intelligent and Fuzzy Systems, Izmir*.
- Smarandache, F., 2000. *Neutrosophic Probability, Set, And Logic (first version)*.
- Stanujkic, D., Magdalinovic, N., Jovanovic, R., Stojanovic, S., 2012. An Objective Multi-Criteria Approach to Optimization Using Moora Method and Interval Grey Numbers. *Technological and Economic Development of Economy* 18(2), 331-363.
- Stoycheva, S., Marchese, D., Paul, C., Padoan, S., Juhmani, A.-s., Linkov, I., 2018. Multi-criteria decision analysis framework for sustainable manufacturing in automotive industry. *Journal of Cleaner Production* 187, 257-272.
- Swadesh Kumar, S., Monye, S.I., Afolalu, S.A., Lawal, S.L., Gisanrin, T.T., Oluwatoyin, O.A., Adeyemi, A.G., 2023. Now and Future Challenges of the Automobile Industry in the Developing World. *E3S Web of Conferences* 430.
- Torra, V., 2010. Hesitant fuzzy sets. *International Journal of Intelligent Systems*, n/a-n/a.
- Wang, R., Li, Y., 2018. A Novel Approach for Green Supplier Selection under a q-Rung Orthopair Fuzzy Environment. *Symmetry* 10(12).
- Wang, W., Liu, X., Qin, Y., 2018. A fuzzy Fine-Kinney-based risk evaluation approach with extended MULTIMOORA method based on Choquet integral. *Computers & Industrial Engineering* 125, 111-123.

Wei, G., Gao, H., Wei, Y., 2018. Some q-rung orthopair fuzzy Heronian mean operators in multiple attribute decision making. *International Journal of Intelligent Systems* 33(7), 1426-1458.

Yager, R.R., 2017. Generalized Orthopair Fuzzy Sets. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 25(5), 1222-1230.

Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Information and Control* 8(3), 338-353.

Zadeh, L.A., 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I. *Information Sciences* 8, 199-249.

Zha, Q., Wang, S., Zhang, W., Zhang, H., 2024. Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) Approach Based on Avoidance of Aggregation Discrepancy. *IEEE Transactions on Engineering Management* 71, 7325-7340.

Zheng, Q., Tang, J., Wang, W., Deveci, M., Mardani, A., 2024. Analyzing the risk of the ammonia storage facility using extended FMEA model based on probabilistic linguistic GLDS method with consensus reaching. *International Journal of Hydrogen Energy* 62, 1231-1244.