



A new multidimensional process type FMEA approach: Defense and aerospace industry application

Tuğçe Uslu¹ , Gülin Feryal Can¹ , Elif Kılıç Delice^{2*}

¹Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Başkent University, Ankara, 06790, Turkey

²Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Atatürk University, Erzurum, 25240, Turkey

Highlights:

- Multidimensional process type FMEA
- Risk criteria integrated weighting with PSI, Entropy and CRITIC
- Failure modes' prioritization with EDAS, CODAS and COPRAS

Keywords:

- Risk evaluation
- FMEA
- Multi Criteria Decision Making
- TPOP

Article Info:

Research Article
Received: 26.12.2020
Accepted: 06.10.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.847213

Correspondence:

Author: Elif Kılıç Delice
e-mail:
elif.kdelice@atauni.edu.tr
phone: +90 442 231 6009

Graphical/Tabular Abstract

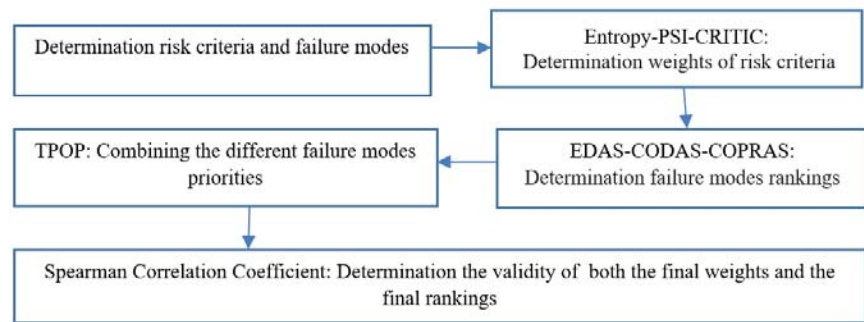


Figure A. Flowchart of MDPT-FMEA approach

Purpose: Failure Modes and Effects Analysis (FMEA), one of the most used methods in the literature, is a powerful risk assessment tool. However, it has many weaknesses that need to be improved. In this study, in order to increase the efficiency of using FMEA; a new multidimensional process type FMEA (MDPT-FMEA) approach is proposed.

Theory and Methods:

The MDPT-FMEA approach consists of three stages. At the first stage, Entropy, Preference Selection Index (PSI) and Criteria Importance through Inter-criteria Correlation (CRITIC) methods were used in the weighting of the risk criteria (RC). The different criteria weights obtained from these three different weighting methods were combined using the geometric mean operator and the integrated (final) weights were calculated. In the second stage, Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS), Combinative Distance-based Assessment (CODAS), Complex Proportional Assessment (COPRAS) to prioritize failure modes (FMs) were used. In the third stage, different FM priorities obtained from these three different ranking methods were combined using the Technique of Precise Order (TPOP) method.

Results:

The proposed MDPT-FMEA approach has been applied in a company operating in the defense and aerospace industry to evaluate the process-based FMs that may arise. In this study, different perspectives of different weighting and ranking methods are reflected in final criteria weights and final FM rankings.

Conclusion:

For the first time, different weighting and different ranking methods are combined in FMEA. As a result of the Spearman Correlation Coefficient calculation, the validity of both of the final criteria weights obtained and the final FM rankings were discussed.



Çok boyutlu yeni bir süreç tipi HTEA yaklaşımı: Savunma ve havacılık sanayi uygulaması

Tuğçe Uslu¹, Gülin Feryal Can¹, Elif Kılıç Delice^{2*}

¹Başkent Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06790, Ankara, Türkiye

²Atatürk Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 25240, Erzurum, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Çok boyutlu süreç tipi FMEA
- PSI, Entropy ve CRITIC ile entegre ağırlıklandırma risk kriterleri
- EDAS, CODAS ve COPRAS ile arıza modlarının önceliklendirilmesi

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi
Geliş: 26.12.2020
Kabul: 06.10.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.847213

Anahtar Kelimeler:

Risk değerlendirme, HTEA, çok kriterli karar verme, TPOP, savunma ve havacılık sanayi

ÖZ

Hata Türleri ve Etkileri Analizi (HTEA), güçlü bir risk değerlendirme aracı olmasına rağmen birçok zayıf yönü nedeniyle geliştirilmesi gereken bir yöntemdir. HTEA'nın kullanım etkinliğini arttırmak için bu çalışmada; yeni bir, çok boyutlu süreç tipi HTEA (ÇBST-HTEA) yaklaşımı önerilmektedir. ÇBST-HTEA yaklaşımı üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada; risk kriter (RK)'lerinin ağırlıklandırılması için Entropi, Tercih Seçim İndeksi (PSI) ve Kriterler arası Korelasyon Yoluyla Kriterlerin Önem Tespiti (CRITIC) yöntemlerinden yararlanılmıştır. Bu üç farklı ağırlıklandırma yönteminden elde edilen farklı RK ağırlıkları, geometrik ortalama operatörü kullanılarak birleştirilmiş ve bütünlük RK ağırlıkları hesaplanmıştır. İkinci aşamada, her bir hata türü (HT)'nin önceliğinin belirlenmesi için bütünlük RK ağırlıkları ile birlikte Ortalama Çözüm Uzaklığına Göre Değerlendirme (EDAS), Birleştirilebilir Uzaklık Tabanlı Değerlendirme (CODAS), Karmaşık Orantılı Değerlendirme (COPRAS) yöntemleri kullanılmıştır. Üçüncü aşamada, söz konusu üç farklı sıralama yönteminden elde edilen farklı HT öncelikleri, Kesin Tercih Sıralama Tekniği (TPOP) yöntemi kullanılarak birleştirilmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen farklı RK sıralamaları ve HT sıralamaları için Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı hesaplanarak; elde edilen nihai ağırlıklar ve nihai sıralamalar geçerlilikleri açısından tartışılmıştır. Bu çalışmada literatürden farklı olarak; farklı ağırlıklandırma ve sıralama yöntemlerinin bakış açıları HTEA'da RK ağırlıklarına ve HT sıralamalarına yansıtılmıştır. Önerilen ÇBST-HTEA yaklaşımı ile, savunma ve havacılık sanayisinde faaliyet gösteren bir firmada süreç bazlı HT'ler değerlendirilmiştir.

A new multidimensional process type FMEA approach: Defense and aerospace industry application

H I G H L I G H T S

- Multidimensional process type FMEA
- Risk criteria integrated weighting with PSI, Entropy and CRITIC
- Failure modes' prioritization with EDAS, CODAS and COPRAS

Article Info

Research Article
Received: 26.12.2020
Accepted: 06.10.2021

DOI:

10.17341/gazimmfd.847213

Keywords:

Risk assessment, FMEA, multi-criteria decision making, TPOP, defense and aerospace industry

ABSTRACT

Failure Modes and Effects Analysis (FMEA) is a powerful risk assessment tool, however it needs to be developed due to many weaknesses. In this study, in order to increase the efficiency of using FMEA; a new multidimensional process type FMEA (MDPT-FMEA) approach is proposed. The MDPT-FMEA approach consists of three stages. In the first stage; Entropy, Preference Selection Index (PSI) and Criteria Importance through Intercriteria Correlation (CRITIC) methods were used to weight the risk criteria (RC). Different RC weights obtained from these three different weighting methods were combined using the geometric mean operator and integrated RC weights were calculated. In the second stage, Evaluation based on Distance from Average Solution (EDAS), Combinative Distance-based Assessment (CODAS), Complex Proportional Evaluation (COPRAS) methods were used together with integrated RC weights to determine the priority of each failure mode (FM). In the third step, the different FM priorities obtained from the three different ranking methods in question were combined using the Technique of Precise Order Preference (TPOP). By calculating the Spearman Rank Correlation Coefficient for different RC rankings and FM rankings obtained as a result of the study; the final weights and final rankings obtained are discussed in terms of their validity. In this study, unlike the literature; perspectives of different weighting and ranking methods are reflected in RC weights and FM rankings in FMEA. With the proposed MDPT-FMEA approach, process-based FMs were evaluated in a company operating in the defense and aerospace industry.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Hata Türleri ve Etkileri Analizi (HTEA) yöntemi, bir sistemdeki mevcut ve potansiyel hataları tespit etmek için olasılık, fark edilebilirlik ve şiddet kriterlerini dikkate alan ve literatürde yaygın bir şekilde kullanılan risk değerlendirme araçlardan biridir. HTEA, bu üç risk kriteri (RK) açısından her bir hata türü (HT)'nü değerlendirmek için 1-10 ölçeğini kullanır ve her bir HT'nin risk derecesini belirlemek için, her bir RK'dan alınan puanlar çarpılarak; Risk Öncelik Değeri (RÖD) elde edilir. En yüksek RÖD'ye sahip HT, en riskli HT olarak belirlenir. Ancak HTEA'nın geliştirilmesi gereken birçok yönü bulunmaktadır. Örneğin; HTEA'da, dikkate alınan RK'ların eşit önem ağırlığına sahip olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, farklı RK değerleri için, farklı HT'lere ilişkin aynı risk derecesi (RD) elde edilebilir. Ek olarak, HTEA ekibinin farklı üyeleri tarafından RK'lar, farklı şekillerde değerlendirilebilirler. Ancak, bu farklı değerlendirmeler, HTEA'da yansıtılamaz. Diğer yandan RÖD, üç kriter değeri çarpılarak hesaplanır ve bu nedenle matematiksel değişikliklere duyarlıdır. RÖD'nin hesaplanmasında kullanılan RD değerlerinin belirlenmesinde, genellikle dilsel değişkenler kullanılır. Bu nedenle, potansiyel HT'lerin belirlenmesi, HT'lerin değerlendirilmesi ve gelecek için yapılan tahminler belirsizlik içermektedir. HT'ler, klasik HTEA'da belirli ve sınırlı sayıda kriter kullanılarak değerlendirilir. Ayrıca, klasik HTEA'da sektöre özgü RK değişimleri göz ardı edilir [1,2]. Bu bağlamda çalışmada, HTEA'nın zayıf yönlerine odaklanılarak; yeni bir, çok boyutlu süreç tipi HTEA (ÇBST-HTEA) yaklaşımı geliştirilmesi amaçlanmıştır. Buna göre, geleneksel HTEA'da dikkate alınan sınırlı sayıda RK sayısı genişletilmiştir. Geliştirilen yaklaşım ile RK'lar, kriterler arasındaki ilişkiler, kriterlerin HT'lere göre aldıkları değerler arasındaki değişim düzeyleri ve bu düzeylerdeki belirsizlik dikkate alınarak ağırlıklandırılmıştır. Ek olarak, HT'lerin öncelikleri, dikkate alınan kriterler için elde edilen kantitatif değerler kullanılarak belirlenmiştir. Buna göre, önerilen ÇBST-HTEA yaklaşımı, özneliği ortadan kaldırdığı için herhangi bir karar vericinin etkisi olmadan kullanılabilir. HTEA'da, birden fazla kriter dikkate alındığından, çalışmada Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yaklaşımından yararlanılmıştır. Önerilen yaklaşımda uygulanan ÇKKV yöntemlerini belirlemek için literatürdeki güncel ve kabul görmüş yöntemler araştırılmış ve bazı özellikler dikkate alınarak kullanılacak yöntemler belirlenmiştir. Bu özellikler; hesaplama kolaylığı, içerdiği istatistiksel prosedürler, fayda ve maliyet türü risk kriterlerini ayrı ayrı değerlendirebilmesi, farklı yöntemlerin alternatif bakış açılarını HT sıralamalarına yansıtabilme, nicel değerlerle çalışabilme olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda, önerilen ÇBST-HTEA'nın ilk aşamasında, RK ağırlıklarının elde edilmesi için Tercih Seçim İndeksi (Preference Selection Index-PSI), Entropi ve Kriterler arası Korelasyon Yoluyla Kriterlerin Önem Tespiti (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation-CRITIC) yöntemleri kullanılmıştır. Daha sonra, bu üç yöntemden elde edilen kriter ağırlıkları, geometrik ortalama operatörü kullanılarak birleştirilmiş ve bütünsel

(final) RK ağırlıkları elde edilmiştir. İkinci aşamada, farklı HT sıralamalarını belirlemek için Ortalama Çözüm Uzaklığına Göre Değerlendirme (Evaluation Based on Distance from Average Solution-EDAS), Birleştirilebilir Uzaklık Tabanlı Değerlendirme (Combinative Distance-Based Assessment-CODAS) ve Karmaşık Orantılı Değerlendirme (Complex Proportional Assessment-COPRAS) yöntemleri kullanılmıştır. Üçüncü aşamada ise, bu üç yöntemden elde edilen farklı HT sıralamaları, Kesin Tercih Sıralama Tekniği (Technique of Precise Order-TPOP) ile birleştirilerek HT'lere ait tek bir sıralama elde edilmiştir. Son olarak; PSI, Entropi ve CRITIC yöntemlerinden elde edilen RK ağırlıklarına göre ortaya çıkan, RK sıralamaları arasındaki benzerliği belirlemek için Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı (Spearman Rank Correlation Coefficient) hesaplanmış ve tartışılmıştır. Ayrıca EDAS, CODAS, COPRAS ve TPOP yöntemlerinden elde edilen sıralamalar arasındaki ilişki de, Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı kullanılarak tartışılmıştır [3].

PSI yöntemi ile kriter ağırlıkları, az sayıda ve basit hesaplamalar ile elde edilmektedir. Ayrıca bu yöntemde, HT'lerin RK'lar için aldıkları kantitatif değerler kullanılmaktadır. PSI, kriter sayısına bağlı olmaksızın çalışabilmektedir. PSI'da, kriterler için göreceli önem değerlerinin atanması gerekli değildir. Bu özelliği ile karar vericiler arasında uyumsuzluk durumlarında kriterlerin göreceli önem değerlerini belirlemede avantaj sağlar [4]. Entropi, farklı karar verme problemlerinde kullanılabilen ve bir veri setindeki faydalı bilgi miktarını ölçen etkili bir yöntemdir ve ağırlık belirleme problemlerinde yüksek doğruluk sağlar. Karar verme ortamından elde edilen bilgilerin sayısının veya kalitesinin; çözümün doğruluğunu ve güvenilirliğini etkilediği görüşüne dayanmaktadır [5]. Diğer bir yöntem olan CRITIC ise, kriter ağırlıklarını objektif olarak belirleyebilir ve karar vericilerin kriterlerin göreceli önemini ifade etmelerini kolaylaştırır. CRITIC yönteminde, kriter ağırlıkları; alternatiflerin performans değerleri arasındaki korelasyon ve değişkenlik düzeyine odaklanılarak elde edilmektedir [6]. Önerilen yaklaşımda PSI, ENTROPY ve CRITIC yöntemlerinin kullanılmasının nedeni, bu üç kriter ağırlıklandırma yönteminin, herhangi bir karar verici etkisi olmaksızın, objektif olarak kriter ağırlıklarını belirleyebilmeleri ve her yönetime ait farklı bakış açılarının hesaplama sürecine dahil edilmek istenmesidir.

HT'lerin sıralanmasında kullanılan yöntemlerden biri olan EDAS, alternatiflerin değerlendirilmesinde ortalama çözümü göz önünde bulunduran bir yöntemdir. Bu kapsamda, alternatiflerin sıralanması için Ortalamadan Pozitif Uzaklık (Positive Distance from Average-PDA) ve Ortalamadan Negatif Uzaklık (Negative Distance from Average-NDA) olmak üzere iki farklı sıralama ölçütü kullanılmaktadır [7]. Bu durum, EDAS yönteminden elde edilen sonuçların hassasiyetini arttırmaktadır. HT'lerin önceliklendirilmesinde kullanılan bir diğer yöntem olan COPRAS, diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla hesaplama süresi düşük, uygulanması kolay bir yöntemdir. Ayrıca

alternatiflerin yüzde olarak gösterilen performans indeksi sayesinde, bir alternatifin diğer alternatiften ne kadar iyi veya kötü olduğu belirlenebilmektedir [8]. Diğer bir yöntem olan CODAS yönteminde, HT'lerin sıralanması için negatif ideal çözümden Öklid uzaklıkları ve Taksicab uzaklıkları kullanılmaktadır, iki farklı ölçüt dikkate alınarak sıralama yapıldığı için daha kesin sonuçlar verebilmektedir [9]. TPOP yöntemi ise, basit bir hesaplama sürecine sahiptir ve uygulaması kolaydır. HT'ler için farklı yöntemlerle elde edilen farklı sıralamalardan kaynaklanan karışıklığı ortadan kaldırmaktadır [10]. TPOP yönteminde, farklı tekniklerin sıralama sonuçlarındaki belirsizlik de dikkate alınır.

Bu çalışmada önerilen ÇBST-HTEA, savunma ve havacılık endüstrisinde faaliyet gösteren bir firmanın üretim süreçlerine uygulanmıştır. Savunma ve havacılık sanayisinde mevcut ve olası HT'lerin tespiti büyük önem taşımaktadır, çünkü bu sektörde üretilen ürünler genellikle ülkelerin savunma ve hava taşımacılığını gerçekleştirmek amacıyla kullanılmaktadır. Ayrıca, ilgili ürünlerin odak noktası insan olduğu için, herhangi bir hatanın varlığı mümkün olan en kısa sürede önlenmelidir.

Çalışmanın kalan kısımlarının organizasyonu şu şekildedir: Çalışmanın ikinci bölümünde, risk değerlendirmesinde HTEA ve ÇKKV entegrasyonunu kullanan çalışmalarla ilgili literatür araştırması yer almaktadır. Üçüncü bölümde, önerilen yaklaşımın aşamalarından bahsedilmiştir. Dördüncü bölümde, önerilen ÇBST-HTEA yönteminin savunma ve havacılık endüstrisinde faaliyet gösteren bir firmaya uygulanması anlatılmaktadır. Beşinci bölümde, elde edilen sonuçlara ilişkin tartışmalar verilmiş, altıncı bölümde sonuçlar ve gelecek dönem çalışma önerileri üzerinde durulmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI (LITERATURE REVIEW)

Literatüre bakıldığında, HTEA yönteminin farklı yöntemlerle ve farklı alanlarda risk değerlendirme için kullanıldığı çok sayıda çalışma olduğu görülmektedir. Bu bölümde, güncel çalışmalara değinmek amacıyla, 2015-2020 yılları arasında HTEA-ÇKKV entegrasyonunu kullanan çalışmalara ilişkin literatür taramasına yer verilmiştir. Lin vd. [11], ürün tasarım kriterlerini sıralamak için düşük karbon emisyonlu ürünlerin geliştirilmesi kapsamında; Bulanık Yorumlayıcı Yapısal Modelleme (Fuzzy Interpretive Structural Modelling-FISM), Kalite Fonksiyon Yayılımı (Quality Function Deployment-QFD) ve Bulanık Analitik Ağ Süreci (Fuzzy Analytic Network Process-FANP) metodlarını kullanmışlardır ve kriter sıralamalarını önerilen entegre yaklaşım ile elde etmişlerdir. Altunbey [12], HTEA'da uzman görüşlerinin kullanılmasından kaynaklanan belirsizliklerin, verilerdeki değişkenliğin, geleneksel HTEA modelinin formülasyonundan kaynaklanan hataların engellenmesi amacıyla, Ağırlıklandırılmış Aralık Tip 2 Bulanık Kural Tabanlı Sistem (Interval Type 2 Fuzzy Rule Base System-IT2FS) temelinde yeni bir HTEA modeli geliştirmiştir. Chang [13], tasarım kriterlerini önceliklendirmek için bir dizüstü bilgisayar modülü tasarımı

amacıyla, İdeal Çözüme Benzerliğe Göre Sipariş Tercihi Tekniği (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution-TOPSIS) ve HTEA entegrasyonunu uygulamıştır. Liu vd. [14], HT'leri sıralamak için Elimination Et Choix Traduisant la Réalité (ELECTRE) ve HTEA yöntemlerini birleştirmiştir. Hajiagha vd. [15], Tahran metrosundaki gecikme nedenlerinin sıralanması için HTEA uygulamışlardır. Değerlendirmelerdeki belirsizliğin, Bulanık İnanç Yapıları (Fuzzy Belief Structure-FBS) ile modellendiği Çok Kriterli Optimizasyon ve Uzlaşık Çözüm (Sırpça "Vle Kriterijumsko Kompromisno Rangiranje"-VIKOR) yöntemini entegre etmişlerdir. Ahmadi vd. [16], karayolu inşaat projelerindeki riskleri değerlendirmek için Bulanık HTEA ve Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (Analytical Hierarchy Process-AHP) yöntemlerini birlikte kullanmışlardır. Romdhane vd. [17], KOBİ'lerde, 6 Sigma uygulamasını kolaylaştırmak amacıyla, İstatistiksel Proses Kontrol (Statistical Process Control-SPC) ile sistem kabiliyetlerinin belirlendiği, AHP ve HTEA yöntemleri kullanılarak iyileştirme faaliyetlerinin önceliklendirildiği yeni bir model önermiştir. Delice ve Can [2], bir montaj hattındaki potansiyel HT'leri önceliklendirmek için stokastik bir değerlendirme sürecine dayanan, HTEA ve Çok Nitelikli Sınır Yakınlık Alanı Karşılaştırması (Multi-Attributive Border Approximation Area Comparison-MABAC) yöntemini birleştiren yeni bir yaklaşım sunmuştur. Özdemir vd. [18] tehlikeli atıkların yönetimi için 5S, HTEA, IIT2FSs, AHP ve VIKOR yöntemlerini entegre etmiştir. Chiu vd. [19], sistematik ve eksiksiz bir ürün-servis sisteminin geliştirilmesi için HTEA ile Önem Performansı Analizi (Importance-Performance Analysis-IPA) yaklaşımlarını entegre etmişler, düzeltilmesi gereken öncelikli HT'leri belirlemişler ve Gri İlişkisel Analiz (Grey Relation Analysis-GRA) yöntemiyle servis alternatiflerini değerlendirilmişlerdir. Ayaz [20], bilgisayar veri günlüklerini uygulama alanı olarak seçerek; HTEA adımlarının otomatikleştirilmesi ve böylece, hem özelliğin ortadan kaldırılması hem de, analizin daha kolay yapılmasını amaçlamıştır. HT'ler veri setinden otomatik olarak elde edilmiş ve bu HT'leri değerlendirmek için veriye dayalı objektif risk ölçütleri önerilmiştir. Ayrıca GRA, TOPSIS, VIKOR yöntemleri ile HT'lerin sıralaması yapılmış ve sonuçlar, geleneksel HTEA ile karşılaştırılmıştır. Liu vd. [21], küme analizi ve olasılık teorisini kullanarak, büyük uzman grupları tarafından uygulanabilecek yeni bir HTEA yaklaşımı geliştirmişlerdir. Risk faktörlerinin objektif olarak ağırlıklarının belirlenmesi için Entropi yöntemini kullanmışlardır. Fattahi ve Khalilzadeh [22], HTEA için RK ağırlıklarının ve HT önceliklerinin sırasıyla, bulanık AHP ve Bulanık Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon (Fuzzy Multiple Multi-Objective Optimization by Ratio Analysis-FMULTIMOORA) yöntemleri ile hesaplandığı, HTEA için yeni bir bulanık hibrit model önermişlerdir. İlbahara vd. [23], iş sağlığı ve güvenliği alanında risk değerlendirmesi için Fine Kinney, Pisagor Bulanık AHP ve bulanık bir çıkarım sistemi içeren, yeni bir entegre yaklaşım olan, Pisagor Bulanık Orantılı Risk Değerlendirmesi (Pythagorean Fuzzy Proportional Risk Assessment-PFPRA) yaklaşımını kullanmışlardır. Kumar vd. [24], bir gaz tedarik

istasyonunda HT'lerin risk derecelerini belirlemek için Bulanık HTEA ve GRA yöntemlerini uygulamıştır. Wang vd. [25], HTEA'da RK'lerin önem ağırlıklarının değerlendirilmesinde, İhtimal Teorisini (Prospect Theory), risk faktörleri arasındaki etkileşime yönelik bulanık ölçümleri ve Choquet İntegral'i uygulamışlardır. RÖD hesaplanması aşamasında ise, Entropi ağırlıklandırma metodunun kullanıldığı, hibrit bir yaklaşım geliştirmişlerdir. Nie vd. [26], atık su gazlaştırma sistemine yönelik risk değerlendirmesi amacıyla HTEA uygulamışlardır. Çalışmada, uzman görüşlerinin alınmasında, çok parçalı dil bilimsel terim kümeleri (Multi-granular Linguistic Term Set), RK ağırlıklarının belirlenmesinde ise, En İyi-En Kötü metodu (Best-Worst Method-BWM) ve Maksimize Türetme Yöntemi (Maximizing Derivation Method), HT risk seviyelerinin sıralandırılmasında da, COPRAS kullanmışlardır. Arabsheybani et al. [27], tedarikçi performansını değerlendirmek için FMOORA temelli, bulanık çok amaçlı bir optimizasyon modeli kurarak HTEA'yı geliştirmişler ve HT'leri bu yöntemle değerlendirmişlerdir. Mete [28], bir doğal gaz boru hattı inşaat projesinde risklerin değerlendirilmesi için; Pisagor bulanık kümelerinin kullanıldığı, HTEA merkezli AHP-MOORA entegre yaklaşımını önermiştir. Liu vd. [29], Bulut Modeli Teorisi (Cloud Model Theory) ve GRA yöntemlerini entegre ederek; yeni bir HTEA yaklaşımı geliştirmiştir. Cano-Olivos vd. [30], satın alma departmanına yönelik, HTEA ve AHP yöntemlerini kullanarak risk analizi gerçekleştirmişlerdir. Chen vd. [31], bulanık ortamda HTEA ile risk değerlendirmesi için, oran analizi artı sıralı ağırlıklı geometrik ortalama (Ordered Weighted Geometric Average-OWGA) operatörüne ve Choquet integraline dayalı, genişletilmiş MULTIMOORA yöntemini önermişlerdir. ÇKKV yöntemlerinin HTEA alanında kullanılması ile ilgili daha kapsamlı bilgi için Liu et al. [32] tarafından yapılan çalışma incelenebilir. Bu çalışmada; HT'lerin değerlendirilmesi ve önceliklendirilmesi için ÇKKV

yaklaşımlarının kullanıldığı, 1998-2018 yıllarına ait, 169 adet HTEA çalışması bütün yönleriyle tartışılmıştır.

Literatür araştırmasından da görüldüğü gibi, çeşitli ÇKKV yöntemleri HTEA ile entegre edilmiştir. Ancak literatürde, HTEA'da farklı ağırlıklandırma ve farklı sıralama yöntemlerini birleştiren bir çalışma bulunmamaktadır. Her farklı ağırlıklandırma ve sıralama yöntemi, farklı bir bakış açısıyla risk değerlendirmesini gerçekleştirir ve bu farklı bakış açıları, farklı RK ağırlıkları ve farklı HT önceliklerini de beraberinde getirmektedir. Düzeltici-önleyici faaliyetler için bir plan yapılmadan önce, farklı yöntemlerle RK'leri ağırlıklandırmak ve HT'leri önceliklendirmek, farklı öncelik ve ağırlık sonuçlarının da uzmanlar tarafından görülebileceğini sağlamaktadır. Bununla birlikte, literatürde savunma ve havacılık alanında da gerçekleştirilen herhangi bir risk değerlendirme çalışmasına rastlanmamıştır.

3. ÖNERİLEN ÇBST-HTEA YAKLAŞIMI (PROPOSED MDPT-HTEA APPROACH)

Çalışmada önerilen ÇBST-HTEA yaklaşımı, Şekil 1'de gösterildiği gibi, RK'lerin ağırlıklandırılması, HT'lerin sıralanması, sıralamaların birleştirilmesi olmak üzere üç aşamadan oluşmaktadır.

Ayrıca, ÇBST-HTEA yaklaşımında kullanılan tüm yöntemlere ait notasyonlar, okuyucuların yöntemleri kolay takip edebilmeleri için Tablo 1'de verilmiştir.

Aşama 1. Bütünleşik RK ağırlıklarının belirlenmesi

Bu aşamada, RK'lar PSI, Entropi ve CRITIC yöntemleri kullanılarak; objektif bir şekilde ağırlıklandırılır. Önerilen bütünleşik kriter ağırlıklandırma yönteminin adımları aşağıda verilmiştir.

Aşama 1. Bütünleşik RK ağırlıklarının elde edilmesi

- Adım 1.1. Başlangıç karar matrisinin oluşturulması
- Adım 1.2. PSI yöntemi ile RK ağırlıklarının belirlenmesi
- Adım 1.3. Entropi yöntemi ile RK ağırlıklarının belirlenmesi
- Adım 1.4. CRITIC yöntemi ile RK ağırlıklarının belirlenmesi
- Adım 1.5. Geometrik ortalama operatörü ile bütünleşik RK ağırlıklarının belirlenmesi

Aşama 2. Farklı HT öncelik sıralarının elde edilmesi

- Adım 2.1. EDAS yöntemi ile HT sıralarının belirlenmesi
- Adım 2.2. CODAS yöntemi ile HT sıralarının belirlenmesi
- Adım 2.3. COPRAS yöntemi ile HT sıralarının belirlenmesi

Aşama 3. TPOP yöntemi ile bütünleşik HT öncelik sıralarının elde edilmesi

Şekil 1. ÇBST-HTEA yaklaşımının akış diyagramı (Flowchart of MDPT-FMEA approach)

Tablo 1. Çalışmada kullanılan notasyonlar (Notations used in the study)

Notasyon	Açıklama	Notasyon	Açıklama
[X]	Başlangıç karar matrisi	w_j	j . RK'nın bütünleşik ağırlığı
[N]	Normalize karar matrisi	PDA_{ij} ve NDA_{ij}	i . HT'nin j . RK için ortalama çözüme olan pozitif ve negatif uzaklıkları
[AV]	Ortalama değerler matrisi	SP_i, SN_i	i . HT'nin ağırlıklı toplam pozitif değeri ve i . HT'nin ağırlıklı toplam negatif değeri
[R]	Ağırlıklı normalize karar matrisi	NSP_i ve NSN_i	i . HT'nin normalize edilmiş ağırlıklı toplam pozitif değeri ve i . HT'nin normalize edilmiş ağırlıklı toplam negatif değeri
[Ra]	Görelî değerlendirme matrisi	AS_i	i . HT'nin değerlendirme puanını
[S]	Sıralama ağırlıkları matrisi	ns_j	j . RK için hesaplanan negatif ideal çözüm değeri
x_{ij}	i . HT'nin ($HT_i; i = 1, \dots, n$) j . RK ($RK_j; j = 1, \dots, m$) için değeri	E_i ve T_i	i . HT'nin negatif çözümden Öklid uzaklığı ve i . HT'nin negatif çözümden Taksicab uzaklığı
x_{ij}^*	i . HT'nin j . RK'ya göre normalize performans değeri	h_{ik}	i . ve k . RK'lar arasındaki uzaklık
PV_j	j . RK'ya ait tercih değişkenliği değeri	H_i	i . HT'nin değerlendirme puanı
\emptyset_j	j . RK'ya ait tercih değerindeki sapma değeri	S_i^+, S_i^-	i . HT'nin değerlerinin hesaplanması
w_j^p	PSI yöntemine göre j . RK'ya ait ağırlık değeri	Q_i, Q_{max}	i . HT'nin göreceli önem değeri ve maksimum göreceli önem değeri
P_{ij}	i . HT'nin j . RK'ya göre değerinin oransal büyüklüğü	P_i	Her bir HT için performans indeksi
E_j	j . RK'ya ait entropi değeri	s_{ib}	i . HT'nin b . ÇKKV yaklaşımına göre sıralama $1, \dots, n$; ($b = 1, \dots, v$)
d_j	j . RK'ya ait entropiden uzaklaşma değeri	J_{ib}	i . HT'nin b . ÇKKV yaklaşımına göre elde edilen sıralama ağırlığının normalize değeri
w_j^e	Entropi yöntemine göre j . RK'ya ait ağırlık değeri	e_b	b . ÇKKV yaklaşımının sıralama ağırlıklarına ait entropi değeri
σ_j	j . RK'nın HT'lere göre aldığı değerler arasındaki standart sapma değeri	g_b	b . ÇKKV yaklaşımına ait ağırlık değeri
$Cov(j, t)$	j . ve t . RK'lar arasındaki kovaryans değeri	g'_b	b . ÇKKV yaklaşımına ait belli ağırlık değeri
\bar{x}_j^*	j . RK'nın HT'lere göre aldığı normalize değerlerin ortalaması	G'_b	g'_b değerlerinin toplamı
r_{jt}	j . ve t . ($t = 1, \dots, m$) RK'lar arasındaki korelasyon katsayısı	p_{ib}	i . HT'nin, b . yaklaşıma göre normalize s_{ib} değeri
C_j	j . RK'nın içerdiği bilgi miktarı	u_{ib}	i . HT'nin, b . yaklaşıma göre eksponansiyel ağırlıklı normalize sıralama değeri
w_j^c	j . RK'nın CRITIC yönteminden elde edilen ağırlığı	FRW_i	i . HT'nin için nihai seçim indeksi

Adım 1.1. Başlangıç karar matrisinin oluşturulması

Söz konusu üç yöntem de her bir HT için RK değerlerini içeren ve Eş. 1'de gösterilen [X]'in oluşturulmasıyla başlamaktadır.

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

Daha sonra, farklı ölçü birimlerindeki aykırılıkları yok etmek için normalizasyon işlemi, her bir yöntemin [X]'den sonra uyguladıkları ilk adımdır.

Adım 1.2. PSI yöntemi ile RK ağırlıklarının belirlenmesi

Sırasıyla fayda ve maliyet türü RK'lar için, Eş. 2 kullanılarak [X], normalize edilir ve [N] elde edilir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij}}{\max x_{ij}} \quad (2)$$

$$x_{ij}^* = \frac{\min x_{ij}}{x_{ij}}$$

Daha sonra, her bir kriter için normalize performans değerlerine ait ortalama değer \bar{x}_j^* , Eş. 3'deki gibi hesaplanır.

$$\bar{x}_j^* = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{ij} \quad (3)$$

Kriterlere ait tercih değişkenliği değeri ve tercih değerindeki sapma değeri; Eş. 4 ve Eş. 5'teki gibi hesaplanır ve Eş. 6 yardımıyla her bir kriter için ağırlık değeri belirlenir.

$$PV_j = \sum_{i=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_j^*)^2 \quad (4)$$

$$\emptyset_j = |1 - PV_j| \quad (5)$$

$$w_j^p = \frac{\emptyset_j}{\sum_{j=1}^n \emptyset_j} \quad (6)$$

Adım 1.3. Entropi yöntemi ile RK ağırlıklarının belirlenmesi

Eş. 7 kullanılarak, P_{ij} değerleri hesaplanır ve daha sonra her bir kriter için entropi değerleri Eş. 8 yardımıyla hesaplanır.

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}^*}{\sum_{i=1}^n x_{ij}^*}; \quad \forall j \quad (7)$$

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m [P_{ij} \ln P_{ij}]; \quad \forall j \quad (8)$$

Her bir kriter için, entropiden uzaklaşma değeri ise, Eş. 9 ile hesaplanır ve bu değerler kullanılarak, Eş. 10 yardımıyla kriter ağırlıkları belirlenir.

$$d_j = 1 - E_j; \quad \forall j \quad (9)$$

$$w_j^e = \frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_j}; \quad \forall j \quad (10)$$

Adım 1.4. CRITIC yöntemi ile RK ağırlıklarının belirlenmesi

Eş. 2'ye göre $[X]$, fayda ve maliyet türü kriterler için ayrı ayrı normalize edilerek elde $[N]$ elde edilir ve daha sonra, her bir kriterin HT'lere göre aldığı değerler kapsamında, standart sapmasının hesaplanması için Eş. 11 kullanılır.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{ij}^* - \bar{x}_j^*)^2} \quad (11)$$

$[X]$ 'teki performans değerleri dikkate alınarak; korelasyon katsayısı ve kriterler arasındaki ilişki düzeyi Eş. 12 ve Eş.13 kullanılarak belirlenir.

$$Cov(j, t) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_{ij}^* - \bar{x}_j^*)(x_{it}^* - \bar{x}_t^*)}{n-1} \quad (12)$$

$$r_{jt} = \frac{Cov(j, t)}{\sigma_j \sigma_t} \quad (13)$$

Her bir kritere ait bilgi miktarının hesaplanması için ise, Eş. 14 kullanılır ve her bir kriterin ağırlığı olan w_j^c 'yi bulabilmek için, Eş. 15 uygulanır.

$$C_j = \sigma_j \sum_{j=1}^n (1 - r_{jt}) \quad (14)$$

$$w_j^c = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (15)$$

Adım 1.5. Geometrik ortalama operatörü ile bütünleşik RK ağırlıklarının belirlenmesi

Entropi, PSI ve CRITIC yönteminden elde edilen farklı ağırlıklar, Eş. 16 kullanılarak birleştirilir [33].

$$w_j = \frac{(w_j^c \times w_j^e \times w_j^p)^{1/3}}{\sum_{j=1}^n (w_j^c \times w_j^e \times w_j^p)^{1/3}} \quad (16)$$

Aşama 2. Farklı HT sıralamalarının elde edilmesi

Bu bölümde, EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemleri kullanılarak ve bir önceki aşamada hesaplanan birleştirilmiş kriter ağırlıklarının dikkate alınmasıyla, HT'ler önceliklendirilir. Bu aşamada kullanılan her bir yöntemin ilk adımı, Eş. 1'deki gibi, $[X]$ 'in oluşturulmasıdır.

Adım 2.1. EDAS yöntemi ile HT sıralamalarının belirlenmesi

$[X]$ 'te yer alan kriter değerlerinin ortalaması alınarak; Eş. 17'de gösterildiği gibi $[AV]$ elde edilir.

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^m x_{ij}}{m} \quad (17)$$

Daha sonra, $[PDA]$ ve $[NDA]$ her bir kriter için hesaplanır. Fayda türü kriterler için Eş. 18 ve Eş. 19 kullanılırken; maliyet türü kriterler için Eş. 20 ve Eş. 21 kullanılır.

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (x_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (18)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - x_{ij}))}{AV_j} \quad (19)$$

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - x_{ij}))}{AV_j} \quad (20)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (x_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (21)$$

Bütün HT'ler için ağırlıklı toplam pozitif ve negatif değerler, Eş. 22 ve Eş. 23 kullanılarak hesaplanır.

$$SP_i = \sum_{i=1}^n w_j \cdot PDA_{ij} \quad (22)$$

$$SN_i = \sum_{i=1}^n w_j \cdot NDA_{ij} \quad (23)$$

Elde edilen ağırlıklı toplam pozitif ve negatif değerler, Eş. 24 ve Eş. 25 kullanılarak normalize edilir.

$$NSP_i = \frac{SP_i}{maks_i(SP_i)} \quad (24)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{maks_i(SN_i)} \quad (25)$$

HT'lerin sıralanması için ise, her bir alternatifin değerlendirme puanları (AS_i), Eş. 26 ile hesaplanır. Burada, $0 \leq AS_i \leq 1$ koşulu sağlanmalıdır.

$$AS_i = \frac{1}{2} \times (NSP_i + NSN_i) \quad (26)$$

Adım 2.2. CODAS yöntemi ile HT sıralamalarının belirlenmesi

[X], Eş. 2'de görüldüğü gibi, fayda ve maliyet tipi kriterler dikkate alınarak normalize edilmekte ve [N] elde edilmektedir. [N] elde edildikten sonra [R], Eş. 27 kullanılarak oluşturulur.

$$r_{ij} = w_j \cdot x_{ij}^* \quad (27)$$

Ardından, Eş. 28 ve Eş. 29 kullanılarak, HT'lerin negatif ideal çözüm noktasından uzaklıklarına sıralamaları belirlenir.

$$ns = [ns_j]_{1 \times n} \quad (28)$$

$$ns_j = \min r_{ij} \quad (29)$$

ns_j değeri dikkate alınarak; her bir HT'nin Öklit ve Taksikap uzaklıkları sırasıyla, Eş. 30 ve Eş. 31'deki gibi hesaplanır.

$$E_i = \sqrt{\sum_{j=1}^n (r_{ij} - ns_j)^2} \quad (30)$$

$$T_i = \sum_{j=1}^n |r_{ij} - ns_j| \quad (31)$$

E_i ve T_i değerleri dikkate alınarak [Ra], Eş. 32 ve Eş. 33'ün kullanılmasıyla elde edilir.

$$Ra = [h_{ik}]_{m \times n} \quad (32)$$

$$h_{ik} = (E_i - E_k) + (\psi(E_i - E_k) * (T_i - T_k)) \quad (33)$$

Eş. 33'te yer alan ve Eş. 34 ile hesaplanan ψ değeri, iki HT'nin Öklit uzaklıkları açısından eşitliğini belirlemek için bir sınır fonksiyonudur ve burada $k \in \{1, 2, \dots, m\}$ olarak tanımlanır.

$$\psi = \begin{cases} 0, & |E_i - E_k| < \tau \\ 1, & |E_i - E_k| \geq \tau \end{cases} \quad (34)$$

ψ fonksiyon değerinin belirlenmesinde kullanılan τ parametresi, karar verici tarafından tanımlanabilen bir sınır değerdir. Literatürde bu parametre değerinin 0,01 ile 0,05 arasında bir değer olarak karar verici tarafından seçilebileceği belirtilmektedir. Eğer, iki HT'ye ait Öklit uzaklıkları arasındaki fark, τ değerinden daha düşükse, söz konusu iki HT, Taksikap uzaklıkları açısından karşılaştırılır. Bu çalışmada, τ değerinin belirlenebilmesi için HT'lere ait Öklit uzaklık değerleri için varyans hesaplanmış ve iki HT'nin Öklit uzaklıkları arasındaki farkın belirlenen varyans değerinden küçük olması durumunda, söz konusu iki HT'yi karşılaştırmak için Taksikap uzaklığı kullanılmıştır [34]. Son aşamada, her bir HT için sıralama ağırlığı H_i , Eş. 35 ile belirlenir. HT'lerin önceliklendirilmesi için H_i değerleri büyükten küçüğe doğru sıralanır. En yüksek H_i değerine sahip olan HT, öncelikle önlenmesi gereken en önemli HT olarak tanımlanır.

$$H_i = \sum_{k=1}^m h_{ik} \quad (35)$$

Adım 2.3. COPRAS yöntemi ile HT sıralamalarının belirlenmesi

[X], Eş. 2 yardımıyla normalize edilir ve [N] oluşturulur. Daha sonra, [R] Eş. 27 ile elde edilir. Ardından, fayda türü kriterler için HT değerleri S_i^+ ve maliyet türü kriterler için S_i^- Eş. 36 ve Eş. 37 yardımıyla hesaplanır.

$$S_i^+ = \sum_{j=1}^k r_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, k \quad (36)$$

$$S_i^- = \sum_{j=k+1}^n r_{ij} \quad i = k + 1, k + 2, \dots, n \quad (37)$$

Sonraki adımda, HT'lerin göreceli önem değerleri Q_i ; Eş. 38 yardımıyla hesaplanır. En yüksek göreceli önem değeri Q_{max} ise, Eş. 39 ile bulunmaktadır.

$$Q_i = S_i^+ + \frac{\sum_{i=1}^m S_i^-}{S_i^- \cdot \sum_{i=1}^m \frac{1}{S_i^-}} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (38)$$

$$Q_{max} = \{Q_i\} \forall i = 1, 2, \dots, m \quad (39)$$

Her bir HT için performans indeksi, Eş. 40 yardımıyla hesaplanır. P_i indeksi 100 olan HT, öncelikle önlem alınması gereken HT olarak tanımlanır. HT'lerin tercih sıralaması, P_i değerlerinin büyükten küçüğe doğru sıralanmasıyla bulunur.

$$P_i = \frac{Q_i}{Q_{max}} \cdot 100\% \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (40)$$

Aşama 3. TPOP yöntemi ile farklı HT sıralamalarının birleştirilmesi

TPOP yönteminin ilk adımında, farklı ÇKKV yöntemlerinden elde edilen HT sıralama ağırlıklarının yer aldığı [S] matrisi, Eş. 41'deki gibi oluşturulur.

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \dots & S_{1v} \\ S_{21} & S_{22} & \dots & S_{2v} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ S_{m1} & S_{m2} & \dots & S_{mv} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Daha sonra, [S] matrisi Eş. 42 kullanılarak normalize edilir. Normalizasyon sürecinin ardından, HT'lere ait sıralama ağırlıkları için entropi değeri, Eş. 43'teki gibi hesaplanmaktadır. Burada, $0 \leq J_{ib} \leq 1$ olmalıdır.

$$J_{ib} = \frac{|s_{ib}|}{\sum_{i=1}^m |s_{ib}|} \quad (42)$$

$$e_b = \frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m |J_{ib} \cdot \ln J_{ib}| \quad (43)$$

Her bir ÇKKV yaklaşımına ait önem ağırlığı, e_b değerleri kullanılarak Eş. 44'teki gibi hesaplanır ve $\sum_{b=1}^v g_b = 1$ olmalıdır.

$$g_b = \frac{1 - e_b}{\sum_{b=1}^v (1 - e_b)} \quad (44)$$

g'_b değerleri, Eş. 45'e göre hesaplanır. Elde edilen g'_b değerleri $1 \leq g'_b \leq 2$ aralığındadır.

$$g'_b = (1 + \sqrt{g_b}) \quad (b = 1, 2, \dots, v) \quad (45)$$

G'_b değeri, Eş. 46'ya göre hesaplanır. Elde edilen G'_b değeri $b \leq G'_b \leq 2b$ aralığındadır ve kullanılan ÇKKV yaklaşımlarının sayısını ifade eden $b \geq 2$ dir.

$$G'_b = \sum_{b=1}^v g'_b = \sum_{b=1}^v (1 + \sqrt{g_b}) = b + \sum_{b=1}^v \sqrt{g_b} \quad (46)$$

Kesin sıralama ağırlık değeri (g_b^*), Eş. 47 kullanılarak elde edilir ve $(\sum_{b=1}^v g_b^*) = 1$ dir.

$$g_b^* = \frac{g'_b}{G'_b} = \frac{1 + \sqrt{g_b}}{b + \sum_{b=1}^v \sqrt{g_b}} \quad (47)$$

Sonraki adımda, her bir ÇKKV yönteminden elde edilen HT'lere ait sıralama ağırlıkları, Eş. 48 kullanılarak normalize edilir.

$$p_{ib} = \begin{cases} \frac{(s_b)_{maks} - s_{ib}}{(s_b)_{maks} - (s_b)_{min}}, & s_{ib} \in H \\ \frac{s_{ib} - (s_b)_{min}}{(s_b)_{maks} - (s_b)_{min}}, & s_{ib} \in L \end{cases} \quad (48)$$

En düşük p_{ib} değerine sahip olan HT, ideal çözüme en yakın HT olarak tanımlanır. Eğer kullanılan ÇKKV yöntemlerinde, HT'lerin öncelikli olmaları için yüksek sıralama ağırlıklarına sahip olmaları isteniyorsa, $s_{ib} \in H$ olarak ifade edilir. Eğer kullanılan ÇKKV yöntemlerinde HT'lerin öncelikli olmaları için düşük sıralama ağırlıklarına sahip olmaları isteniyorsa, $s_{ib} \in L$ olarak tanımlanır. Normalizasyon sürecinin sonunda, u_{ib} değeri Eş. 49 ile hesaplanır. Son olarak, u_{ib} değerleri temelinde, her bir HT için birleştirilmiş (final) sıralama ağırlıkları Eş. 50 ile belirlenir.

$$u_{ib} = \exp(g_b^* + p_{ib}) \quad (49)$$

$$FRW_i = \sum_{b=1}^v u_{ib} = \sum_{b=1}^v \exp(g_b^* + p_{ib}) \quad (50)$$

En düşük FRW_i değerine sahip olan HT öncelikle önlenmesi gereken HT olarak tanımlanır.

4. ÖNERİLEN ÇBST-HTEA YAKLAŞIMININ SAVUNMA VE HAVACILIK SANAYİSİNDE FAALİYET GÖSTEREN BİR FİRMADA UYGULANMASI

(APPLICATION OF THE SUGGESTED MDPT-FMEA APPROACH IN A COMPANY OPERATING IN DEFENCE AND AEROSPACE INDUSTRY)

Bu çalışmada; savunma ve havacılık sanayinde faaliyet gösteren bir firmanın üretim süreçlerinde ortaya çıkabilecek HT'lerin belirlenerek değerlendirilmesi için önerilen ÇBST-HTEA yaklaşımının uygulama adımları aşağıdaki gibi anlatılmıştır.

Aşama 1. Bütünleşik RK ağırlıklarının belirlenmesi

Adım 1.1. Başlangıç karar matrisinin oluşturulması

Önerilen ÇBST-HTEA yaklaşımının ilk adımında, RK'lerin HT'lere göre aldıkları değerleri gösteren [X], Tablo 2'deki gibi oluşturulmuştur. Bu matriste, firmanın üretim süreçlerinde 59 farklı HT ($HT_i; i = 1, 2, \dots, 59$) ve bunları değerlendirmek üzere dikkate alınan 6 farklı RK ($RK_j; j = 1, 2, \dots, 6$) gösterilmiştir. Dikkate alınan altı RK şu şekilde sıralanabilir: hata oranı (RK_1), tespit yeri skoru (RK_2), frekans (RK_3), hurda işçilik maliyeti (RK_4), hurda malzeme maliyeti (RK_5), yeniden işlem maliyeti (RK_6). Çalışmada, Ocak 2018'den Ağustos 2019'a kadar olan hata kayıtları kullanılmıştır.

Adım 1.2. PSI yöntemi ile RK ağırlıklarının belirlenmesi

Bu çalışmada ele alınan bütün kriterlerin maliyet türü kriterler olması nedeniyle, Tablo 2'de verilen [X], Eş. 2 kullanılarak normalize edilmiş ve Tablo 3'de gösterilen [N] elde edilmiştir.

Tablo 2. Başlangıç karar matrisi (Initial decision matrix)

	RK_1	RK_2	RK_3	RK_4	RK_5	RK_6
	x_{i1}	x_{i2}	x_{i3}	x_{i4}	x_{i5}	x_{i6}
HT_1	1,730	2,000	2,000	6,250	0,515	0,250
HT_2	7,810	1,000	1,000	0,250	1,030	65,694
HT_3	2,540	1,000	4,000	21,750	3,151	0,300
HT_4	2,300	1,000	8,000	1470,400	14102,900	0,250
HT_5	6,200	2,000	10,000	3715,442	15609,546	0,125
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
HT_{54}	40,760	3,000	3,000	7,900	0,589	1,500
HT_{55}	6,670	2,000	1,000	0,250	0,462	0,500
HT_{56}	26,820	2,000	32,000	217,725	656,090	405,500
HT_{57}	0,170	1,000	1,000	20,825	94,980	0,050
HT_{58}	4,260	3,000	3,000	50,000	187,866	101,875
HT_{59}	2,630	2,000	1,000	156,150	139,615	0,200

Tablo 3. Normalize karar matrisi [N] (Normalized decision matrix)

	RK_1	RK_2	RK_3	RK_4	RK_5	RK_6
	x_{i1}^*	x_{i2}^*	x_{i3}^*	x_{i4}^*	x_{i5}^*	x_{i6}^*
HT_1	0,046	0,500	0,500	0,0048000	0,8970874	0,1000000
HT_2	0,010	1,000	1,000	0,1200000	0,4485437	0,0003805
HT_3	0,031	1,000	0,250	0,0013793	0,1466201	0,0833333
HT_4	0,035	1,000	0,125	0,0000204	0,0000328	0,1000000
HT_5	0,013	0,500	0,100	0,0000081	0,0000296	0,2000000
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
HT_{54}	0,002	0,333	0,333	0,0037975	0,7843803	0,0166667
HT_{55}	0,012	0,500	1,000	0,1200000	1,0000000	0,0500000
HT_{56}	0,003	0,500	0,031	0,0001378	0,0007042	0,0000617
HT_{57}	0,471	1,000	1,000	0,0014406	0,0048642	0,5000000
HT_{58}	0,019	0,333	0,333	0,0006000	0,0024592	0,0002454
HT_{59}	0,030	0,500	1,000	0,0001921	0,0033091	0,1250000

Tablo 4. Her bir kritere ait \bar{x}_j^* , PV_j ve \emptyset_j değerleri (\bar{x}_j^* , PV_j ve \emptyset_j values for each criterion)

	RK_1	RK_2	RK_3	RK_4	RK_5	RK_6
\bar{x}_j^*	0,072	0,657	0,527	0,040	0,087	0,097
PV_j	1,494	4,793	9,126	1,085	2,384	1,344
\emptyset_j	0,494	3,793	8,126	0,085	1,384	0,344

Daha sonra, her kriter için \bar{x}_j^* , PV_j ve \emptyset_j değerleri Eş. 3-Eş. 5 kullanılarak hesaplanmış ve Tablo 4'te gösterilmiştir. Tablo 4'e bakıldığında, RK 'ler için hesaplanan PV_j değerlerine göre en yüksek değışkenliğe sahip olan RK , 9,126 değeriyle, frekans (RK_3)'tır. RK 'ler için hesaplanan \emptyset_j değerlerine bakıldığında ise, tercih değeri en yüksek sapmaya sahip olan kriter 8,126 değeriyle, yine frekans kriteridir. Son olarak Eş. 6 kullanılarak Tablo 8'de gösterilen w_j^p değerleri elde edilmiştir.

Adım 1.3. Entropi yöntemi ile RK ağırlıklarının belirlenmesi

PSI yönteminde olduğu gibi Tablo 3'te gösterilen [N] üzerinde işlem yapılarak, her bir RK için Eş. 7 ile P_{ij} değerleri Tablo 5'de gösterildiği gibi belirlenmiştir. Daha sonra Eş. 8 ile E_j değerleri ve Eş. 9 ile d_j değerleri hesaplanmış ve Tablo 6'da gösterilmiştir. $k = 1/\ln. m$, sabit

bir sayı olmak üzere $0 \leq E_j \leq 1$ olmasını sağlar. Bu çalışmada, $m = 59$ olduğu için $k = 1/\ln 59 = 0,245246$ olarak elde edilmiştir. Tablo 6'da görüldüğü gibi, en yüksek d_j değeri RK_4 yani "hurda işçilik maiyeti" kriterine aittir. Buradan, ilgili RK 'ya ait bilgilerin kesinlik derecesinin yüksek olduğu da anlaşılmaktadır. Her bir RK 'nin önem ağırlığı w_j^e , Eş. 6'dan faydalanılarak hesaplanmıştır ve Tablo 8'de verilmiştir.

Adım 1.4. CRITIC yöntemi ile RK ağırlıklarının belirlenmesi

İlk olarak, Eş. 11 kullanılarak RK 'ler için σ_j değerleri kriter sırasına göre 0,161-0,656-0,606-0,141-0,203-0,154 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuca göre, standart sapması en yüksek olan RK , RK_2 yani tespit yeri skorudur. Daha sonra, Eş. 12 kullanılarak $Cov(j, t)$ değerleri, Eş. 13 kullanılarak r_{jt} değerleri hesaplanmış ve Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 5. Entropi yöntemi için P_{ij} değerleri (P_{ij} values for the entropy method)

	RK_1	RK_2	RK_3	RK_4	RK_5	RK_6
	P_{i1}	P_{i2}	P_{i3}	P_{i4}	P_{i5}	P_{i6}
HT_1	0,011	0,013	0,016	0,0020493	0,1740054	0,0175303
HT_2	0,002	0,026	0,032	0,0512322	0,0870027	0,0000667
HT_3	0,007	0,026	0,008	0,0005889	0,0284395	0,0146086
HT_4	0,008	0,026	0,004	0,0000087	0,0000064	0,0175303
HT_5	0,003	0,013	0,003	0,0000034	0,0000057	0,0350605
HT_6	0,007	0,013	0,008	0,0000181	0,0000194	0,0219128
HT_7	0,015	0,026	0,032	0,0013136	0,0118866	0,0073043
HT_8	0,002	0,026	0,032	0,0006988	0,0096172	0,0219128
HT_9	0,025	0,026	0,032	0,0007498	0,0273543	0,0175303
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots	\vdots
HT_{54}	0,000	0,009	0,011	0,0016213	0,1521440	0,0029217
HT_{55}	0,003	0,013	0,032	0,0512322	0,1939671	0,0087651
HT_{56}	0,001	0,013	0,001	0,0000588	0,0001366	0,0000108
HT_{57}	0,111	0,026	0,032	0,0006150	0,0009435	0,0876513
HT_{58}	0,004	0,009	0,011	0,0002562	0,0004770	0,0000430
HT_{59}	0,007	0,013	0,032	0,0000820	0,0006419	0,0219128

Tablo 6. Kriterlere ait E_j ve d_j değerleri (E_j ve d_j values for criteria)

	RK_1	RK_2	RK_3	RK_4	RK_5	RK_6	
E_j	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5	E_6	
	0,706	0,976	0,921	0,521	0,666	0,816	
d_j	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	Toplam
	0,294	0,024	0,079	0,479	0,334	0,184	1,394

Tablo 7. RK'lere ait $Cov(j, t)$ ve r_{jt} değerleri

$Cov(j, t)$ ve r_{jt} değerleri				
$Cov(1, 2)$	$Cov(1, 3)$	$Cov(1, 4)$	$Cov(1, 5)$	$Cov(1, 6)$
-0,0031	0,0102	-0,0002	-0,0008	0,0004
$Cov(2, 3)$	$Cov(2, 4)$	$Cov(2, 5)$	$Cov(2, 6)$	$Cov(3, 4)$
0,0442	-0,0035	-0,0083	0,0069	-0,0055
$Cov(3, 5)$	$Cov(3, 6)$	$Cov(4, 5)$	$Cov(4, 6)$	$Cov(5, 6)$
0,0038	-0,0026	-0,0006	-0,0002	-0,0008
r_{12}	r_{13}	r_{14}	r_{15}	r_{16}
-0,0299	0,1055	-0,0132	-0,0261	0,0178
r_{23}	r_{24}	r_{25}	r_{26}	r_{34}
0,1112	-0,0388	-0,0622	0,0683	-0,0651
r_{35}	r_{36}	r_{45}	r_{46}	r_{56}
0,0310	-0,0279	-0,0224	-0,0121	-0,0079

Tablo 7'de birbirleri arasında en yüksek ilişki bulunan RK'ler, 0,1112 katsayısıyla, tespit yeri skoru ve frekans kriterleridir. En yüksek ilişkili RK'ler için korelasyon katsayısı değerlerine bakıldığında; katsayıların pozitif oldukları görülmektedir ve bu durumda ilgili RK'ler arasındaki ilişkinin de pozitif yönde olduğu söylenebilmektedir. Son olarak, Eş. 14 kullanılarak C_j değerleri kriter sırasına göre 2,404-9,822-9,076-2,106-3,044-2,309 olarak hesaplanmıştır. Bu değerlere göre en yüksek bilgi miktarına sahip RK, 9,822 değeriyle, tespit yeri kriteridir. Söz konusu bilgi, standart sapmayı ve ilişki

katsayısını içermektedir. Son olarak, Eş. 15 kullanılarak Tablo 8'de gösterilen w_j^c değerleri elde edilmiştir.

Adım 1.5. Geometrik ortalama operatörü ile bütünlük RK ağırlıklarının belirlenmesi

Entropi, PSI ve CRITIC yöntemleri ile RK'lerin önem ağırlıkları, Eş. 16 kullanılarak üç yöntemden elde edilen birleştirilmiş (final) ağırlıkları ve kriter sıralamaları Tablo 8'de gösterilmiştir. Tablo 8'de görüldüğü gibi, bütünlük RK ağırlık değerlerine (w_j) göre en yüksek önem ağırlığına sahip olan RK frekans (RK_3)' tır.

Aşama 2. Farklı HT sıralamalarının elde edilmesi

Bu aşamada, w_j değerleri dikkate alınarak; EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinin kullanılmasıyla HT'ler önceliklendirilmiştir. Tablo 2'de verilen $[X]$ kullanılarak, her bir yöntemin hesaplama prosedürü işletilmiştir. HT'lerin EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinin uygulanması sonucunda elde edilen sıralama ağırlık değerleri sırasıyla, AS_i , H_i ve P_i Tablo 9'da sunulmuştur.

Adım 2.1. EDAS yöntemi ile HT sıralamalarının belirlenmesi

EDAS yönteminin uygulanması için Eş. 17-Eş. 26 kullanılarak, her bir HT için sıralama puanı AS_i elde edilmiştir. Tablo 9'da gösterilen AS_i değerlerine bakıldığında, öncelikle önlenmesi gereken ilk üç HT 0,653; 0,573 ve 0,500 ile HT_{43} , HT_{42} ve HT_{37} kodlu HT'lerdir.

Adım 2.2. CODAS yöntemi ile HT sıralamalarının belirlenmesi

CODAS yöntemiyle Eş. 27-Eş. 35 kullanılarak her bir HT için H_i sıralama ağırlıkları elde edilmiştir. Tablo 9'a göre, en önemli HT'ler sırasıyla 30,844; 27,626 ve 23,919 ile HT_{55} , HT_2 ve HT_{21} türleridir.

Adım 2.3. COPRAS yöntemi ile HT sıralamalarının belirlenmesi

COPRAS yöntemiyle Eş. 36-Eş. 40 kullanılarak her bir HT için elde edilen P_i sıralama ağırlıkları elde edilmiştir. Tablo 9'a göre, en önemli HT'ler sırasıyla 100,00; 98,012 ve 96,911 ile HT_{37} , HT_{57} ve HT_{21} kodlu HT'lerdir.

Tablo 8. PSI, Entropi, CRITIC yöntemlerinden elde edilen RK ağırlıkları ve birleştirilmiş RK ağırlıkları
(Criterion weights obtained from PSI, Entropy, CRITIC methods, and combined criteria weights)

	RK_1	RK_2	RK_3	RK_4	RK_5	RK_6
w_j^e ve kriter sıralaması	w_1^e 0,211 3	w_2^e 0,017 6	w_3^e 0,057 5	w_4^e 0,344 1	w_5^e 0,240 2	w_6^e 0,132 4
w_j^p ve kriter sıralaması	w_1^p 0,035 4	w_2^p 0,267 2	w_3^p 0,571 1	w_4^p 0,006 6	w_5^p 0,097 3	w_6^p 0,024 5
w_j^c ve kriter sıralaması	w_1^c 0,084 4	w_2^c 0,342 1	w_3^c 0,316 2	w_4^c 0,073 6	w_5^c 0,106 3	w_6^c 0,080 5
w_j ve kriter sıralaması	w_1 0,127 4	w_2 0,172 3	w_3 0,325 1	w_4 0,079 6	w_5 0,202 2	w_6 0,095 5

Tablo 9. EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinden elde edilen HT'lere ait sıralama ağırlıkları
(Sequencing weights of HT obtained from EDAS, CODAS and COPRAS methods)

Sıralama ağırlıkları	Hata türleri						
	HT_1	HT_2	HT_3	HT_4	HT_5	HT_6	HT_7
AS_i	0,428	0,412	0,432	0,234	0,150	0,232	0,494
H_i	10,163	27,626	-4,199	-9,325	-19,537	-15,163	21,427
P_i	48,687	34,512	52,069	11,219	7,919	20,983	93,013
	HT_8	HT_9	HT_{10}	HT_{11}	HT_{12}	HT_{13}	HT_{14}
AS_i	0,452	0,98	0,244	0,385	0,477	0,405	0,388
H_i	21,066	22,587	-21,990	-10,768	20,797	-16,017	20,550
P_i	60,495	96,911	4,887	7,052	76,334	18,008	38,494
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
	HT_{36}	HT_{37}	HT_{38}	HT_{39}	HT_{40}	HT_{41}	HT_{42}
AS_i	0,449	0,500	0,434	0,468	0,377	0,441	0,573
H_i	20,547	23,135	5,272	20,366	-6,040	2,532	-11,406
P_i	58,989	100,000	35,971	32,165	26,841	55,581	1,906
	HT_{43}	HT_{44}	HT_{45}	HT_{46}	HT_{47}	HT_{48}	HT_{49}
AS_i	0,653	0,313	0,413	0,215	0,343	0,336	0,326
H_i	-11,434	-10,261	20,664	-19,837	15,660	-4,254	-10,688
P_i	1,631	22,976	39,896	20,191	20,617	15,726	13,163
	HT_{50}	HT_{51}	HT_{52}	HT_{53}	HT_{54}	HT_{55}	HT_{56}
AS_i	0,193	0,228	0,392	0,375	0,369	0,420	0,260
H_i	-19,335	-12,145	-3,543	-3,973	-0,126	30,844	-20,031
P_i	9,375	7,690	39,283	21,294	16,855	46,069	4,951
	HT_{57}	HT_{58}	HT_{59}				
AS_i	0,499	0,354	0,430				
H_i	23,888	-13,607	14,671				
P_i	98,012	18,513	49,236				

Aşama 3. TPOP yöntemi ile farklı HT sıralamalarının birleştirilmesi

TPOP yöntemi ile EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinden elde edilen ve Tablo 9'da gösterilen sıralama ağırlıkları ile Eş. 41-Eş. 50 kullanılarak birleştirilmiş ve HT'lere ait final sıralamalar Tablo 10'daki gibi elde edilmiştir. Tablo 10' bakıldığında, EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinden elde edilen birleştirilmiş sıralama sonuçlarına göre öncelikle önlenmesi gereken ilk üç HT; HT_{37} , HT_{57} ve HT_{21} olarak belirlenmiştir.

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

Bu çalışmada farklı ağırlıklandırma yaklaşımları, bu yöntemlerin farklı bakış açıları nedeniyle farklı RK ağırlıkları üretmiştir. Örneğin, PSI tercih değişkenliğini

dikkate alırken, Entropi verilerdeki belirsizlik seviyesini ya da CRITIC standart sapmayı ve RK'ler arasındaki korelasyonu dikkate alır. Geometrik ortalama operatörü kullanılarak hesaplanan bütünleşik ağırlık sonuçlarına göre, HT'leri değerlendirmede en önemli RK, frekans olarak ortaya çıkmıştır. Farklı yöntemler farklı ağırlıklar üretebildiğinden, tüm bu farklı bakış açılarını yansıtabilecek bütünleşik final ağırlık değerleri elde etmek önemlidir. Aksi takdirde, tek bir yöntemin yanlı sonuçları kullanılarak bir değerlendirme yapılabilir. Bu aynı zamanda, HT'lerin sıralamaları için de geçerlidir. Farklı ağırlıklandırma yaklaşımları tarafından tanımlanan RK sıralamaları arasındaki korelasyonları değerlendirmek için, Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı Tablo 11'deki gibi hesaplanmıştır.

Tablo 11'de görüldüğü gibi, PSI ve CRITIC yöntemlerinden elde edilen sıralamaların yüksek benzerlik gösterdiği tespit edilmiştir. Bunu, 0,886 katsayısıyla CRITIC ve bütünleşik

Tablo 10. EDAS, CODAS, COPRAS ve TPOP yöntemlerinin uygulanması sonucu elde edilen HT sıralamaları
(HT rankings obtained as a result of applying EDAS, CODAS, COPRAS and TPOP methods)

Hata türleri	EDAS	CODAS	COPRAS	TPOP	Hata türleri	EDAS	CODAS	COPRAS	TPOP
HT_1	19	23	14	17	HT_{31}	27	32	17	27
HT_2	24	2	23	14	HT_{32}	54	56	54	56
HT_3	17	30	12	23	HT_{33}	20	8	16	12
HT_4	48	36	43	44	HT_{34}	43	27	33	35
HT_5	57	53	49	57	HT_{35}	58	57	44	58
HT_6	49	46	32	45	HT_{36}	13	14	9	9
HT_7	8	9	6	6	HT_{37}	3	5	1	1
HT_8	11	10	8	8	HT_{38}	16	24	22	22
HT_9	5	6	3	4	HT_{39}	10	15	24	16
HT_{10}	47	59	56	55	HT_{40}	35	33	27	30
HT_{11}	34	39	53	42	HT_{41}	14	25	11	19
HT_{12}	9	11	7	7	HT_{42}	2	41	58	37
HT_{13}	26	48	38	40	HT_{43}	1	43	59	34
HT_{14}	33	13	21	18	HT_{44}	42	37	30	38
HT_{15}	59	58	46	59	HT_{45}	23	12	19	15
HT_{16}	7	7	5	5	HT_{46}	52	54	35	50
HT_{17}	44	42	57	46	HT_{47}	39	20	34	25
HT_{18}	51	40	52	49	HT_{48}	40	31	40	36
HT_{19}	29	17	18	20	HT_{49}	41	38	42	43
HT_{20}	28	49	29	39	HT_{50}	55	51	47	54
HT_{21}	6	3	4	3	HT_{51}	50	44	50	48
HT_{22}	22	35	28	31	HT_{52}	31	28	20	28
HT_{23}	53	53	51	53	HT_{53}	36	29	31	33
HT_{24}	32	19	29	21	HT_{54}	37	26	39	32
HT_{25}	15	22	45	26	HT_{55}	21	1	15	10
HT_{26}	25	16	36	24	HT_{56}	45	55	55	51
HT_{27}	30	34	25	29	HT_{57}	4	4	2	2
HT_{28}	12	18	10	11	HT_{58}	38	45	37	41
HT_{29}	56	50	41	52	HT_{59}	18	21	13	13
HT_{30}	46	47	48	47					

Tablo 11. Kriter sıralamaları arasındaki Spearman sıra korelasyon katsayısı
(Spearman rank correlation coefficient between criteria rankings)

Ağırlıklandırma Yöntemleri	Entropi	PSI	CRITIC	Bütünleşik Ağırlıklandırma Yöntemi
Entropi	1.000	-0.771	-0.714	-0.314
PSI	-0.771	1.000	0.943	0.771
CRITIC	-0.714	0.943	1.000	0.886
Bütünleşik Ağırlıklandırma	-0.314	0.771	0.886	1.000

Tablo 12. EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinden elde edilen HT sıralamalarının Spearman sıra korelasyon katsayıları
(Spearman rank correlation coefficients of HT rankings obtained from EDAS, CODAS and COPRAS methods)

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

yöntemden elde edilen RK sıralamalarının benzerliği izlenmektedir. Üçüncü sırada birbirine en benzer RK sıralamalarının elde edildiği yöntemler ise, 0,771 katsayısıyla PSI ve bütünleşik yöntemdir. PSI ve CRITIC yöntemlerinin birbirleri arasındaki ilişki düzeyinin yüksek olmasının sebebi şu şekilde açıklanabilir: PSI yönteminde kullanılan tercih değerinden sapma miktarında, RK'ler için hesaplanan değişkenlik yani varyans kullanılmaktadır. Bununla birlikte, CRITIC yönteminde her bir RK için bilgi düzeyinin hesaplanması için varyans önemlidir. CRITIC yönteminde, daha yüksek öneme sahip kriterlerin varyansı daha yüksektir. Bu nedenle, hem CRITIC hem de PSI yöntemlerine ait sıralamaların yüksek düzeyde bütünleşik yöntemden elde edilen RK sıralamalarıyla ilişkili olduğu görülmektedir. Entropi yönteminden elde edilen sıralamaların, geometrik ortalama kullanılarak elde edilen bütünleşik ağırlıklandırma ile zayıf ve ters yönde ilişkili olduğu tespit edilmiştir. Bunun nedeni, Entropi yönteminin, başlangıç karar matrisindeki RK'lere ilişkin bilgi eksikliğine dayanmasıdır. PSI ve CRITIC yöntemlerinde ise, başlangıç karar matrisindeki veriler kapsamında RK'ler için değişkenlik seviyesi sorgulanır. Her iki yöntem de, benzer bakış açılarına sahip oldukları için bütünleşik ağırlıklandırmadan elde edilen sıralamalar üzerindeki etkileri daha fazla ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada, HT'lerin sıralamaları da bütünleşik RK ağırlıkları dikkate alınarak EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemleri kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra, TPOP tarafından farklı sıralama sonuçları birleştirilmiştir. EDAS ve CODAS sıralama yöntemlerinin ortak özelliği uzaklık ölçütleriyle çalışmalarıdır. COPRAS yöntemi de, fayda ve maliyet türü RK'lerin sıralama üzerindeki etkilerini yansıtmaya çalışmaktadır. EDAS, CODAS ve COPRAS'tan elde edilen HT'lerin sıralamalarını karşılaştırmak için, Tablo 12'deki gibi Spearman Sıra Korelasyon Katsayısı kullanılmıştır.

Tablo 12'den de görüldüğü gibi, 0,956 katsayısıyla CODAS ve TPOP yöntemlerinden elde edilen sıralamaların en yüksek benzerliğe sahip olduğu söylenebilmektedir. Bunu, 0,870 korelasyonuyla EDAS ve TPOP yöntemlerinden elde edilen kriter sıralamalarının benzerliği izlemektedir. Üçüncü sırada birbirine en benzer HT sıralamalarının elde edildiği yöntemler ise, 0,887 katsayısıyla COPRAS ve TPOP yöntemleridir. Buna göre, TPOP yönteminden elde edilen sıralamalar, diğer yöntemlerden elde edilen sıralamalarla güçlü bir pozitif ilişkiye sahiptir ve elde edilen son sıralama EDAS, CODAS ve COPRAS yöntemlerinin etkisini yansıtmaktadır.

6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, RK'lerin ağırlıklandırmasında ve HT'lerin sıralamasında farklı yöntemlerin farklı bakış açılarını yansıtacak, yeni bir ÇBST-HTEA yaklaşımının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Ayrıca, geleneksel HTEA ile ilgili giriş bölümünde verilen eksiklikler giderilmiştir. Önerilen ÇBST-HTEA yaklaşımında, kullanılan RK ağırlıklandırma yöntemlerinin hepsi objektif olarak HT'lerin RK'lere göre aldıkları nicel değerleri kullanarak ağırlık hesaplayabilen, kriter sayısı sınırı olmayan ve karar vericiye ihtiyaç duymayan yöntemlerdir. Yine, önerilen ÇBST-HTEA yaklaşımında, tercih edilen sıralama yöntemleri TPOP ile birleştirilmiştir. Böylelikle, bu sıralama yöntemlerinin farklı bakış açıları, HT'lerin nihai sıralamalarına da yansımıştır. Önerilen yaklaşım, uzmanların tek bir yöntemle güvenmeksiz, risk değerlendirme sonuçları elde etmesine izin verecektir. Ayrıca, önerilen yaklaşımda kullanılan farklı yöntemlerin sonuçlarını bir arada değerlendirmek de mümkün olacaktır. Bu durum, çalışma alanlarında gerçekten engellenmesi gereken HT'lerin öncelikle farklı yöntemlere göre belirlenmesi açısından önemlidir.

Bu çalışmada geliştirilen yaklaşım, farklı sektörler için HTEA uygulamalarında kullanılabilir. Ayrıca, yaklaşımın uygulanması farklı RK'ler kullanılarak gerçekleştirilebilir. Yaklaşım içinde kullanılan ÇKKV yöntemlerinin yanı sıra farklı ÇKKV yöntemleri, önerilen ÇBST-HTEA yaklaşımına entegre edilebilir.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Ayrım Y., Risk değerlendirmesi için üç aşamalı sezgisel bulanık bir yaklaşım önerisi, Yüksek Lisans Tezi, Başkent Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2017.
2. Delice E., Can G. F. A Stochastic Approach For Failure Mode And Effect Analysis, Rairo-Operations Research, 51, 1077-1100, 2017.
3. Delice E.K., Can G. F., Kahya E., Improving the rapid office strain assessment method with an integrated multi-criteria decision making approach, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 35 (3),1297-1314, 2020.
4. Attri R., Grover, S., Application of preference selection index method for decision making over the design stage of production system life cycle, Journal of King Saud University – Engineering Sciences, 27, 207-216, 2015.

5. Wu L., Sun J., Liang L., Zha, Y., Determination of weights for ultimate cross efficiency using Shannon entropy, *Expert Systems with Applications*, 38, 5162-5165, 2011.
6. Madic M., Radovanovic M., Ranking of some most commonly used non-tarditional machining process using ROV and CRITIC Methods, *U.P.B. Sci. Bull.*, 77 (2), 1454-2358, 2015.
7. Supçiller A. A., Bayramoğlu S., Wind farm location selection with interval grey numbers based I-GRA and grey EDAS methods, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 35 (4), 1847-1860, 2020.
8. Mulliner, E. K. Smallbone and V. Maliene, An assessment of sustainable housing affordability using a multiple criteria decision making method, *Omega*, 270-273, 2013.
9. Ghorabae, K. Zavadskas E. K., Turskis Z., Antucheviciene J., A new Combinative Distance-based Assessment (CODAS) Method for Multi-criteria Decision-making, *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 50 (2), 5-44, 2016.
10. Dorfeshan Y., Mousavi S. M., Mohagheghi V., Vahdani B., Selecting project-critical path by a new interval type-2 fuzzy decision methodology based on MULTIMOORA, MOOSRA and TPOP methods, *Computers & Industrial Engineering*, 160-178, 2018.
11. Lin C., Lee A. H. I., Kang H., An integrated new product development framework – an application on green and lowcarbon products, *International Journal of Systems Science*, 46 (4), 733-753, 2015.
12. Altunbey E. M., HTEA’ da Ağırlıklandırılmış Aralık Tip 2 Bulanık Kural Tabanı Sistemi yaklaşımı ve uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye, 2015.
13. Chang K., A novel general risk assessment method using the soft TOPSIS approach, *Journal of Industrial and Production Engineering*, 32 (6), 408-421, 2015.
14. Liu S., Cheng J., Lee Y., Gau F., A case study on FMEA-based quality improvement of packaging designs in the TFT-LCD industry, *Total Quality Management & Business Excellence*, 27 (4), 413-431, 2016.
15. Hajiagha S. H. R., Hashemi S. S., Mohammadi Y., Zavadskas E. K., Fuzzy belief structure based VIKOR method: an application for ranking delay causes of Tehran metro system by FMEA criteria, *Transport*, 31 (1), 108-118, 2016.
16. Ahmadi M., Behzadian K., Ardeshir A., Kapelan Z., Comprehensive risk management using fuzzy FMEA and MCDA techniques in highway construction projects, *Journal of Civil Engineering and Management*, 23 (2), 300-310, 2016.
17. Romdhane T. B., Badreddine A., Sansa M., A new model to implement Six Sigma in small- and medium-sized enterprises, *International Journal of Production Research*, 55 (15), 4319-4340, 2016.
18. Ozdemir Y., Gul M., Celik E., Assessment of occupational hazards and associated risks in fuzzy environment: A case study of a university chemical laboratory, *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 23 (4), 895-924, 2017.
19. Chiu M., Chu C., Chen C., An integrated product service system modelling methodology with a case study of clothing industry, *International Journal of Production Research*, 56 (6), 2388-2409, 2018.
20. Ayaz H. İ., Bilgisayar veri günlükleri üzerine HTEA otomasyonu ve alternatif yöntemler ile çözüm yaklaşımları, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, 2018.
21. Liu Y., Kong Z., Zhang Q., Failure modes and effects analysis (FMEA) for the security of the supply chain system of the gas station in China, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 325-330, 2018.
22. Fattahi R., Khalilzadeh M., Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment, *Safety Science*, 290-300, 2018.
23. Ilbahar E., Karaşan A., Cebi S., Kahraman C., A novel approach to risk assessment for occupational health and safety using Pythagorean fuzzy AHP & fuzzy inference system, *Safety Science*, 124-136, 2018.
24. Kumar A. M., Rajakarunakaran S., Pitchipoo P., Vimalasan R., Fuzzy based risk prioritisation in an auto LPG dispensing station, *Safety Science*, 231-247, 2018.
25. Wang W., Liu X., Qin Y., Yong Y., A risk evaluation and prioritization method for FMEA with prospect theory and Choquet integral, *Safety Science*, 152-163, 2018.
26. Nie R., Tian Z., Wang X., Wang J., Wang T., Risk evaluation by FMEA of supercritical water gasification system using multi-granular linguistic distribution assessment, *Knowledge-Based Systems*, 185-201, 2018.
27. Arabsheybani A., Paydar M. M. and Safaei A. S., An integrated fuzzy MOORA method and FMEA technique for sustainable supplier selection considering quantity discounts and supplier's risk, *Journal of Cleaner Production*, 557-591, 2018.
28. Mete S., Assessing occupational risks in pipeline construction using FMEA-based AHP-MOORA integrated approach under Pythagorean fuzzy environment, *Human and Ecological Risk Assessment: An International*, 25 (7), 1645-1660, 2019.
29. Liu H., Wang L., You X., Wu S., Failure mode and effect analysis with extended grey relational analysis method in cloud setting, *Total Quality Management & Business Excellence*, 745-767, 2017.
30. Cano-Olivos P., Hernandez-Zitlalpopoca R., Sanchez-Partida D., Caballero-Morales S., Martinez-Flores J., Risk analysis of the supply chain of a tools manufacturer in Puebla, Mexico, *Wiley*, 27, 406-413, 2019.
31. Chen, Y., Ran, Y., Wang Z., L. Xinlong, Yang X., Genbao, Z., An extended MULTIMOORA method based on OWGA operator and Choquet integral for risk prioritization identification of failure models.

- Engineering applications of artificial intelligence, 91, 12, 2020.
32. Liu, H., Chen X., Duan C., Wang, Y.M., Failure mode and effect analysis using multi-criteria decision making methods: A systematic literature review, *Computers & Industrial Engineering*, 881-897, 2019.
 33. Jahan A., Mustapha F., Sapuan S. M., Ismail M. Y., Bahraminasab M., A framework for weighting of criteria in ranking stage of material selection process, *Int J Adv Manuf Technol*, 58, 411-420, 2012.
 34. Pakdil F., Toktaş P, Can G.F., Six sigma project prioritization and selection: A multi-criteria decision making approach in healthcare industry, *International Journal of Lean Six Sigma*, doi:10.1108/ijlss-04-2020-0054, in press.