



## Prioritizing occupational safety risks with fuzzy FUCOM and fuzzy graph theory-matrix approach

İlker Gölcük<sup>1\*</sup>, Esra Duygu Durmaz<sup>2</sup>, Ramazan Şahin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, İzmir Bakırçay University, 35665, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup>Department of Industrial Engineering, Engineering Faculty, Gazi University, 06570, Ankara, Türkiye

### Highlights:

- A new fuzzy failure mode and effects analysis (FMEA) model
- Integrates fuzzy FUCOM and fuzzy graph theory-matrix approach
- A real-life case study is conducted for prioritizing occupational safety risks

### Keywords:

- Failure mode and effects analysis
- Occupational safety risks
- Fuzzy logic
- FUCOM
- Graph theory-matrix approach

### Article Info:

Research Article

Received: 12.07.2021

Accepted: 19.01.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.970514

### Correspondence:

Author: İlker Gölcük

e-mail:

ilker.golcuk@bakircay.edu.tr

phone: +90 232 493 0000 /

11275

### Graphical/Tabular Abstract

This study develops a new integrated risk assessment model by combining fuzzy FUCOM and fuzzy graph theory-matrix approach as given in Figure A. First, the risk factors and the failure modes are determined. Afterward, the weights of risk factors are determined by using fuzzy FUCOM. Finally, the failure modes are prioritized by considering criteria interactions via the fuzzy graph theory-matrix approach.

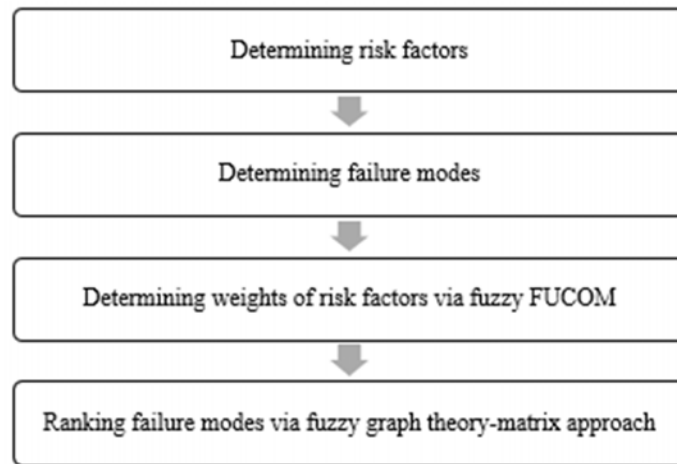


Figure A. Flowchart of the proposed model

**Purpose:** In this study, a new failure mode and effects analysis (FMEA) model is proposed for evaluating occupational safety risks. In the classical FMEA, risk priority numbers (RPNs) are calculated by multiplying the risk scores of the occurrence, severity, and detectability. However, RPN numbers generated by classical FMEA have been the subject of severe criticism in the literature. To overcome the drawbacks of the classical FMEA, this study proposes a new multiple attribute decision making (MADM) model.

**Theory and Methods:** The proposed risk evaluation model combines the full consistency method (FUCOM) and graph theory-matrix approach (GTMA) under a fuzzy environment. The risk scores of failure models and the weights of risk factors have been obtained using the fuzzy FUCOM method. On the other hand, the RPN value of each failure mode is calculated by utilizing fuzzy GTMA. Fuzzy GTMA considers all possible dependencies among risk factors, which in turn produces more accurate rankings. The proposed approach is visualized in Figure A.

**Results:** According to produced results, the most critical failure mode is “hand contact a table saw” (FM3). The FM3 is followed by “hand contact with milling blade” (FM4). The third-ranked failure mode is found as Lift truck collision with shelves in stock area (FM8).

**Conclusion:** The proposed method transforms subjective judgments of decision-makers into meaningful rankings by utilizing state-of-the-art MADM methods. The fuzzy FUCOM method requires only  $(n-1)$  pairwise comparisons where  $n$  being number of criteria. Furthermore, interactions among risk factors are easily integrated into the proposed model. The proposed model is practical and versatile so that it can be used to tackle wide variety of real-life risk assessment problems.



## Bulanık FUCOM ve bulanık çizge teorisi-matris yaklaşımı ile iş güvenliği risklerinin önceliklendirilmesi

İlker Gölcük<sup>1\*</sup>, Esra Duygu Durmaz<sup>2</sup>, Ramazan Şahin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>İzmir Bakırçay Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 35665, İzmir, Türkiye

<sup>2</sup>Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 06570, Maltepe Ankara, Türkiye

### ÖNEÇIKANLAR

- Yeni bir bulanık hata türü ve etkileri analizi (HTEA) modeli
- Bulanık FUCOM ve bulanık çizge teorisi-matris yaklaşımının birleştirilmesi
- İş güvenliği risklerinin önceliklendirilmesi için bir gerçek hayat vaka çalışması

### Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi  
Geliş: 12.07.2021  
Kabul: 19.01.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.970514

### Anahtar Kelimeler:

Hata türü ve etkileri analizi,  
iş güvenliği riskleri,  
bulanık mantık,  
FUCOM,  
çizge teorisi-matris yaklaşımı

### ÖZ

Bu çalışmada iş güvenliği risklerinin değerlendirilmesi için yeni bir hata türü ve etkileri analizi (HTEA) modeli önerilmiştir. Klasik HTEA'ya göre risk öncelik sayıları (RÖS), olabilirlik, şiddet ve fark edilebilirlik puanlarının çarpılmasıyla hesaplanır. Bununla birlikte, klasik HTEA tarafından oluşturulan RÖS değerleri literatürde ağır eleştirilere konu olmuştur. Bu çalışma klasik HTEA'nın dezavantajlarını aşmak için yeni bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) modeli önermektedir. Önerilen risk değerlendirme modeli, tam tutarlılık yöntemini (FUCOM) ve çizge teorisi-matris yaklaşımını (ÇTMY) bulanık ortamda birleştirmektedir. Bulanık FUCOM yöntemi kullanılarak hata türlerinin risk puanları ve risk faktörlerinin ağırlıkları elde edilmiştir. Öte yandan, her hata modunun RÖS değeri bulanık ÇTMY kullanılarak hesaplanmıştır. Bulanık ÇTMY, risk faktörleri arasındaki tüm olası etkileşimleri göz önünde bulundurmada ve böylece daha doğru sıralamalar üretmektedir. Karar vericilerin bulanık değerlendirmeleri en küçük kareler mesafe yöntemi kullanılarak toplanmıştır. Önerilen model, gerçek hayattaki bir vaka çalışmasında uygulanmış ve hata modları sıralanmıştır.

## Prioritizing occupational safety risks with fuzzy FUCOM and fuzzy graph theory-matrix approach

### HIGHLIGHTS

- A new fuzzy failure mode and effects analysis (FMEA) model
- Integrates fuzzy FUCOM and fuzzy graph theory-matrix approach
- A real-life case study is conducted for prioritizing occupational safety risks

### Article Info

Research Article  
Received: 12.07.2021  
Accepted: 19.01.2022

### DOI:

10.17341/gazimmfd.970514

### Keywords:

Failure mode and effects  
analysis,  
occupational safety risks,  
fuzzy logic,  
FUCOM,  
graph theory-matrix approach

### ABSTRACT

In this study, a new failure mode and effects analysis (FMEA) model is proposed for evaluating occupational safety risks. In the classical FMEA, risk priority numbers (RPNs) are calculated by multiplying the risk scores of the occurrence, severity, and detectability. However, RPN numbers generated by classical FMEA have been the subject of severe criticism in the literature. To overcome the drawbacks of the classical FMEA, this study proposes a new Multiple Attribute Decision Making (MADM) model. The proposed risk evaluation model combines the full consistency method (FUCOM) and graph theory-matrix approach (GTMA) under a fuzzy environment. The risk scores of failure models and the weights of risk factors have been obtained using the fuzzy FUCOM method. On the other hand, the RPN value of each failure mode is calculated by utilizing fuzzy GTMA. Fuzzy GTMA considers all possible dependencies among risk factors, which in turn produces more accurate rankings. The fuzzy judgements of the decision makers are aggregated by using the least squares distance method. The proposed model is implemented in a real-life case study and the failure modes are ranked.

\*Sorumlu Yazar/Yazarlar / Corresponding Author/Authors : \*ilker.golcuk@bakircay.edu.tr, esradurmaz@gazi.edu.tr, rsahin@gazi.edu.tr /  
Tel: +90 232 493 0000 / 11275

## 1. Giriş (Introduction)

Son yıllarda İş Sağlığı ve Güvenliği (İSG) konularındaki artan farkındalık sonucu, çalışma ortamındaki iş güvenliğine yönelik çalışmalarda önemli bir artış yaşanmaktadır. Organizasyonlar, iş kazalarına yönelik toplumsal ve yasal baskılar altında çalışmaktadır. Oluşabilecek iş kazaları yalnızca yaralanmalara ve sağlık problemlerine yol açmamakta; aynı zamanda firmaların kredibilitelerine ve marka imajlarına da önemli ölçüde zarar vermektedir [1, 2]. Bu sebeple firmalar İSG risk seviyelerini düzenli olarak gözden geçirmekte ve önleyici önlemleri almaktadır. Bu kapsamda kullanılan en önemli yöntemlerden biri de hata türü ve etkileri analizidir (HTEA).

HTEA potansiyel hataları ortaya çıkarmak ve elmine etmek amacıyla kullanılan önemli bir mühendislik tekniğidir. HTEA yönteminin en önemli özelliklerinden biri proaktif olması ve bir hata ortaya çıkmadan önce düzeltici önlemlerin alınmasını sağlayarak kayıpları engellemesidir. Kökenleri 1960'lı yıllara dayanan HTEA ilk olarak havacılık endüstrisinde güvenilirlik ve güvenlik gerekliliklerini karşılamak için kullanılmıştır [3]. Günümüze dek aralarında otomotiv, elektronik, sağlık ve kimya gibi endüstrilerin bulunduğu pek çok alanda başarıyla uygulanmıştır [4].

Endüstride ve bilimsel yazında sıkça kullanılan bir teknik olan HTEA, metodolojik açıdan önemli eleştirilere maruz kalmıştır. Özellikle risk öncelik sayılarının (RÖS) hesaplanması konusunda klasik HTEA tekniğinin eksiklikleri literatürde pek çok açıdan ortaya konmuştur [2, 5-7]. Klasik HTEA tekniğinde risk faktörleri olarak olabilirlik, şiddet ve fark edilebilirlik kullanılmaktadır. Her bir hata türüne ait olan RÖS değerleri de bu üç risk faktörünün skorlarının çarpılmasıyla elde edilmektedir. Literatür incelendiğinde HTEA'ya yönelik getirilen önemli eleştiriler şu şekilde sıralanabilir [2, 7]: 1) Risk faktörlerinin alabileceği tüm skorlar göz önünde bulundurulduğunda, aynı RÖS değerinin elde edilebileceği pek çok farklı skor kombinasyonu bulunmaktadır. Örneğin olabilirlik, şiddet ve fark edilebilirlik faktörlerinin risk skorlarının sırasıyla 3, 4, 5 ve 1, 10, 6 olması durumlarında RÖS değeri 60 olarak bulunacaktır. Bu durum RÖS değerlerinin farklı hata türlerinin risk seviyelerini doğru bir biçimde ayırt edemediğini göstermektedir. 2) RÖS değerlerinin hesaplanmasında kullanılan çarpma işleminin altında yatan sebep çok açık değildir. Pek çok toplam operatörü kullanılabilecekken neden çarpım işleminin tercih edildiği bilimsel dayanaklarla ortaya konamamıştır. 3) Risk faktörlerinin nispi önem dereceleri ihmal edilmekte ve her bir risk faktörü eşit önemde kabul edilmektedir. 4) Olabilirlik, şiddet ve fark edilebilirlik faktörlerinin risk skorlarını elde etmek amacıyla dönüşüm tablolarından faydalanılmaktadır. Ancak bu tablolarda her bir risk faktörü için farklı ölçekler kullanılmaktadır. 5) Risk faktörlerinin alabileceği tüm skorlar dikkate alınarak hesaplanan RÖS değerlerinin histogram grafikleri incelendiğinde, RÖS değerlerinin belli alanlarda yoğunlaştığı ve grafik üzerinde pek çok boşluğun olduğu görülmektedir. Bu durum elde edilen RÖS değerlerinin yorumlanmasını zorlaştırmaktadır. 6) Risk faktörlerinin skorlarındaki küçük bir değişiklik, RÖS değeri üzerinde büyük bir etkiye neden olmaktadır. 7) Risk faktörlerinin skorlarının kesin ve nümerik değerlerle ifade edilmesi oldukça güçtür. 8) Risk faktörleri arasındaki olası etkileşimler ihmal edilmektedir.

Yukarıda ifade edilen zorlukların üstesinden gelebilmek için pek çok yöntem önerilmiştir [8]. Bu kapsamda bulanık mantık [9] ve Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) [10] yöntemlerinin ön plana çıktığı görülmektedir. Zeng vd. [11] inşaat endüstrisinde İSG risklerini HTEA yöntemiyle ölçmüş ve Çin'de gerçekleştirilen bir gerçek hayat projesini raporlamışlardır. Lux vd. [12] üretim ekipmanı tasarımcılarının İSG gereksinimlerini sağlamak için kullanılan "iş

durumu HTEA" adlı yeni bir protokol önermişlerdir. Bao vd. [13] madencilik endüstrisindeki iş hastalıklarının değerlendirilmesi için Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) ve bulanık kapsamlı değerlendirme yöntemlerini entegre etmiştir. Ozdemir vd. [14] 5S metodoloji, AHP ve VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) yöntemlerini birleştirerek bir üniversite laboratuvarındaki tehlikeleri önceliklendirmişlerdir. Ilbahar vd. [15] Pisagor bulanık HTEA, Pisagor bulanık AHP ve bulanık çıkarım sistemini entegre ederek Güvenlik ve Kritik Etki Analizi modelini önermiştir. Karasan vd. [16] HTEA ve Fine-Kinney metodolojilerinde Pisagor bulanık AHP ve bulanık çıkarım sistemlerini kullanmıştır. Mete [17] AHP ve Oran Analizine Dayalı Çok Amaçlı Optimizasyon (MOORA) yöntemlerini Pisagor bulanık ortamda birleştirerek entegre bir HTEA modeli önermiştir. Dabbagh ve Yousefi [18] otomotiv yedek parçaları üreten bir şirkette İSG değerlendirmesi için HTEA, bulanık bilişsel haritalar ve MOORA yöntemlerini kullanarak hibrit bir yaklaşım önermiştir. Dahooie vd. [19] inşaat endüstrisinde mesleki tehlike değerlendirmesi için Aşamalı Ağırlık Değerlendirme Oranı Analizi (SWARA) ve tereddütlü bulanık toplama operatörlerini entegre etmiştir. Gölcük [2] aralık tip-2 bulanık çıkarım sistemi kullanarak RÖS değerlerini elde etmiş, ardından aralık tip-2 bulanık sayıları temel olarak Best Worst Method (BWM) [20, 21] ve Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS) [22, 23] metodlarıyla bir grup karar verme yaklaşımı önermiştir. İlgili alandaki diğer çalışmalara yapılan literatür derlemelerinden erişilebilir [8, 24, 25]. Bu çalışmada bulanık FUCOM (Full Consistency Method - Tam Tutarlılık Yöntemi) [26-28] ve bulanık Çizge Teorisi ve Matris Yaklaşımı (ÇTMY) [29, 30] ile entegre bir ÇKKV yöntemi geliştirilmiştir. Gerçek hayat problemlerinde ikili karşılaştırma matrislerinin doldurulması bilişsel bakımdan zorlayıcı ve zaman alıcı olması sebebiyle, bulanık FUCOM ile çok daha az sayıda ikili karşılaştırma yaparak önceliklerin elde edilmesi sağlanmıştır. Bulanık FUCOM ile hem hata türleri hem de risk faktörlerinin öncelikleri doğrusal programlamaya dayalı olarak elde edilmiştir. Ayrıca, RÖS değerlerinin hesaplanmasındaki eksiklikleri gidermek amacıyla bulanık ÇTMY kullanılmıştır. Bulanık ÇTMY yönteminin en önemli özelliği ise risk faktörleri arasındaki etkileşimleri de dikkate alabilmesidir. Ayrıca farklı karar vericilerin değerlendirmeleri, doğrusal denklem sistemlerinin çözümüne dayalı olan en küçük kareler mesafe yöntemi ile birleştirilmiştir. Önerilen entegre ÇKKV modeli mobilya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede İSG risklerini analiz etmek amacıyla kullanılmıştır.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde organize edilmiştir: Bölüm 2'de literatür taramasına yer verilmiştir. Bölüm 3'te kullanılan yöntemler matematiksel ayrıntılarıyla birlikte açıklanmıştır. Bölüm 4'te önerilen yöntemin adımlarına yer verilmiştir. Yöntemin uygulama çalışması Bölüm 5'te verilmiştir. Bölüm 6'da doğrulama ve karşılaştırma çalışmaları yapılmıştır. Bölüm 7'de ise sonuçlar bölümü yer almaktadır.

## 2. Literatür Taraması (Literature Review)

Literatürde çeşitli sektörlerde iş kazalarının nedenlerini ve etkilerini inceleyen ve çalışma ortam koşullarını İSG kapsamında ele alan pek çok çalışma mevcuttur. Bu çalışmalarda L ve X tipi matris yöntemi, HTEA, sebep-sonuç analizi, hata ağacı analizi gibi nicel ve nitel risk değerlendirme yöntemleri kullanılmıştır [31]. Ancak son yıllarda İSG risk analizinde yapılan çalışmalarda ÇKKV yöntemlerine ve klasik yöntemlerle entegre edilmiş ÇKKV yöntemlerine olan ilginin arttığı görülmektedir. Son yıllarda gerçekleştirilen İSG risk analizi çalışmalarından bazıları şu şekilde özetlenebilir.

Adem vd. [32] Endüstri 4.0'ın üretim tesislerinde uygulanmasının ortaya çıkarabileceği gözle ilgili rahatsızlıklar, zihinsel yorgunluk,

statik çalışma pozisyonundan kaynaklanan rahatsızlıklar, robotlarla çalışma sonucu tehlikeli parçacıklara maruz kalma ve psikolojik baskı gibi yeni riskler üzerinde durmuş ve ele alınan risklerin değerlendirilmesi için bir kararsız bulanık AHP yaklaşımı önermişlerdir. Boyacı vd. [33] plastik sektöründe bir İSG risk değerlendirme uygulaması gerçekleştirmiştir. Maliyet unsurunu da bir risk değerlendirme faktörü olarak ele aldıkları bu çalışmada risk değerlendirmesi için çok kriterli kararsız bulanık dilsel terim setlerini kullanmışlardır. Liu vd. [34] çalışmalarında dilsel bulanık ortam altında mesleki risklerin değerlendirilmesi ve sıralamasında TODIM ve PROMETHEE yöntemlerini entegre eden bir yaklaşım önermişlerdir. Yöntemin etkinliğini göstermek için bir hastanede sağlık personeli için uygulama çalışması gerçekleştirmişlerdir. Konuyla ilgili yapılan çalışmalar hakkında daha detaylı bilgi almak isteyen okuyucular Gul [35] tarafından yazılan derleme makalesinden faydalanabilirler.

### 3. Metodoloji (Methodology)

#### 3.1. Bulanık FUCOM (Fuzzy FUCOM)

Sübjektif ağırlıklandırma yöntemlerinden biri olan FUCOM kısa süre önce Pamučar vd. [27] tarafından geliştirilmiştir. FUCOM yönteminin öne çıkan özelliği AHP ve BWM yöntemlerine göre çok daha az sayıda ikili karşılaştırma yapılmasına ihtiyaç duymasidir. Doğrusal programlamaya dayalı bir yöntem olan FUCOM, iki önemli tutarlılık koşulunun sağlanmasını denetlemektedir. Bunlardan ilki, kriterlerin ağırlıkları arasındaki oranların, ikili karşılaştırma matrisinde verilen önceliklere eşit olmasıdır. Bir diğer koşul ise matematiksel geçişlilik (transitivity) özelliğinin testine dayanmaktadır. Böylece elde edilen ağırlıklarla birlikte tutarlılıktan sapma derecesi de hesaplanmakta ve daha güvenilir kriter ağırlıkları ortaya konmaktadır.

FUCOM yöntemi kriter sayısının  $n$  olduğu bir karar probleminde yalnızca  $n-1$  ikili karşılaştırma kullanarak aşağıda verilen üç adımı takip etmektedir [26].

**Adım 1:** Karar verici, kriterlerin sıralamasını yapar. En önemli olduğu düşünülen kriter birinci sırada yer alırken, en az önemli olan kriter  $n$ . sıraya yerleştirilir. Böylece kriterlerin sıralamaları Eş. 1'deki gibi elde edilir.

$$C_{j(1)} > C_{j(2)} > \dots > C_{j(k)} \dots > C_{j(n)} \quad (1)$$

Burada  $k$  söz konusu kriterin sıralamasını vermektedir. Eğer aynı öneme sahip kriterler varsa  $\succ$  yerine  $\sim$  yazılabilir.

**Adım 2:** Sıralanan kriterler için karşılaştırmalı öncelikler belirlenir. Ardından, karşılaştırmalı öncelik vektörü Eş. 2'deki şekilde oluşturulur.

$$\phi = (\phi_{1/2}, \phi_{2/3}, \dots, \phi_{k/(k+1)}, \dots, \phi_{(n-1)/n}) \quad (2)$$

Burada  $\phi_{k/(k+1)}$  ifadesi  $C_{j(k)}$  kriterinin sıralamasının  $C_{j(k+1)}$  kriterine göre ne ölçüde avantajlı olduğunu göstermektedir. Karşılaştırmalı öncelik vektörü oluşturulurken önceden tanımlanmış bir ölçek kullanılacağı gibi tam sayı ya da ondalıklı sayılar kullanılabilir.

**Adım 3:** Matematiksel model kurularak nihai ağırlıklar belirlenir. Bu noktada iki önemli koşulun sağlanması gerekmektedir. Bu koşullar şu şekilde verilmektedir:

**Koşul 1:** Ağırlık katsayılarının oranı, karşılaştırmalı önceliklere eşit olmalıdır. Bu koşul Eş. 3'te gösterilmiştir.

$$\frac{w_k}{w_{k+1}} = \phi_{k/(k+1)} \quad (3)$$

**Koşul 2:** Kriter ağırlıkları, matematiksel geçişlilik özelliğini sağlamalıdır. Matematiksel olarak  $\phi_{k/(k+1)} \times \phi_{(k+1)/(k+2)} = \phi_{k/(k+2)}$  eşitliğinin sağlanması gerekmektedir. Öte yandan,  $\phi_{k/(k+1)} = w_k/w_{k+1}$  ve  $\phi_{k/(k+2)} = \phi_{k/(k+1)} \times \phi_{(k+1)/(k+2)}$  eşitlikleri  $w_k/w_{k+2} = (w_k/w_{k+1}) \otimes (w_{k+1}/w_{k+2})$  şeklinde yazılabilir. Böylece, ikinci koşul için gerekli kriter Eş. 4'teki gibi verilebilir.

$$\frac{w_k}{w_{k+2}} = \phi_{k/(k+1)} \otimes \phi_{(k+1)/(k+2)} \quad (4)$$

Tam tutarlılığın gerçekleşebilmesi için verilen eşitliklerin en yüksek düzeyde sağlanabilmesi gerekmektedir. Eşitliklerin sağlanamaması durumunda ise sapma derecesinin en aza indirgenmesi istenmektedir. Dolayısıyla  $\left| \frac{w_k}{w_{k+1}} - \phi_{k/(k+1)} \right|$  ve  $\left| \frac{w_k}{w_{k+2}} - \phi_{k/(k+1)} \otimes \phi_{(k+1)/(k+2)} \right|$  ifadelerindeki maksimum sapmanın minimize edilmesi amaçlanmaktadır.

Sonuç olarak kriterlerin ağırlıklarını belirlemek için kurulacak doğrusal programlama modeli aşağıdaki gibidir (Eş. 5).

$$\begin{aligned} & \min_j \\ & \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{(w_{j(k),1} \cdot w_{j(k),2} \cdot w_{j(k),3})}{(w_{j(k+1),1} \cdot w_{j(k+1),2} \cdot w_{j(k+1),3})} \ominus \right. \\ \left. (\phi_{k/(k+1),1}, \phi_{k/(k+1),2}, \phi_{k/(k+1),3}) \right|, \\ \left. \frac{(w_{j(k),1} \cdot w_{j(k),2} \cdot w_{j(k),3})}{(w_{j(k+2),1} \cdot w_{j(k+2),2} \cdot w_{j(k+2),3})} \ominus \right. \\ \left. (\phi_{k/(k+1),1}, \phi_{k/(k+1),2}, \phi_{k/(k+1),3}) \otimes \right. \\ \left. (\phi_{(k+1)/(k+2),1}, \phi_{(k+1)/(k+2),2}, \phi_{(k+1)/(k+2),3}) \right) \end{array} \right\} \quad (5) \\ & \text{s. t. } \begin{cases} \sum_{j=1}^n D(\tilde{w}_j) = 1 \\ w_{j,1} \leq w_{j,2} \leq w_{j,3} \\ w_{j,1} \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \end{aligned}$$

Burada,  $\tilde{w}_j = (w_{j,1}, w_{j,2}, w_{j,3})$  j. kriterin bulanık ağırlığı,  $\tilde{\phi}_{k/(k+1)} = (\phi_{k/(k+1),1}, \phi_{k/(k+1),2}, \phi_{k/(k+1),3})$  ve  $\tilde{\phi}_{(k+1)/(k+2)} = (\phi_{(k+1)/(k+2),1}, \phi_{(k+1)/(k+2),2}, \phi_{(k+1)/(k+2),3})$  tam tutarlılığı kontrol etmekte kullanılan bulanık karşılaştırmalı önceliklerdir. Ayrıca  $\ominus$  ve  $\otimes$  sırasıyla bulanık çıkarma ve çarpma operasyonlarını göstermektedir. Maksimum sapma  $\delta$  ile ifade edilirse, Eş. 5'te verilen matematiksel model şu şekilde düzenlenebilir (Eş. 6).

$$\begin{aligned} & \min \delta \\ & \left\{ \begin{array}{l} \left| \frac{\tilde{w}_j^{(k)} \ominus \tilde{w}_j^{(k)}}{\tilde{\phi}_{k/(k+1)}} \otimes \right| \leq \delta, j \in J; k \in K_1 \\ \left| \frac{\tilde{w}_j^{(k)} \ominus \tilde{w}_j^{(k)}}{\tilde{\phi}_{k/(k+1)} \otimes \tilde{\phi}_{(k+1)/(k+2)}} \right| \leq \delta, j \in J; k \in K_2 \\ \sum_{j=1}^n D(\tilde{w}_j) = 1 \\ w_{j,1} \leq w_{j,2} \leq w_{j,3} \\ w_{j,1} \geq 0, j = 1, 2, \dots, n \end{array} \right. \quad (6) \end{aligned}$$

Burada kriterler kümesi  $J \in \{1, 2, \dots, n\}$  ile gösterilirken, bulanık karşılaştırmalar için gerekli kriter indisleri  $K_1 \in \{1, 2, \dots, n-1\}$  ve  $K_2 \in \{1, 2, \dots, n-2\}$  şeklinde ifade edilmektedir.

#### 3.2. Bulanık Çizge Teorisi-Matris Yaklaşımı (Fuzzy Graph Theory-Matrix Approach)

ÇTMY kriterler arası etkileşimleri dikkate alabilen çizge teorisi ve matris permanentine dayalı bir ÇKKV yöntemidir. Çizge teorisine

dayalı olduğundan problem görselleştirilebilir. Ek olarak, matris gösterimi permanent hesaplamalarını yapabilmeyi mümkün kılmaktadır [7].

Kombinatoryal matematiğin bir dalına ait olan permanent ilk kez Binet ve Cauchy tarafından ortaya atılmıştır [36]. Matris permanentleri, determinantlara benzetmekle beraber, gauss eliminasyon yöntemiyle kolaylıkla hesaplanamamaktadır. İkili bir matrisin permanentini hesaplamak karmaşıklık sınıfları içerisinde #P-tam içerisinde yer almaktadır [37,38].

Bir  $m \times n$  boyutundaki  $A = (a_{ij})$  matrisinde  $m \leq n$  olmak üzere, matris permanenti şu şekilde hesaplanır [36]: (Eş. 7)

$$Per(A) = \sum_{\sigma} a_{1\sigma(1)} a_{2\sigma(2)} \dots a_{m\sigma(m)} \quad (7)$$

Burada  $a_{1\sigma(1)} a_{2\sigma(2)} \dots a_{m\sigma(m)}$  sırası  $A$ 'nın diyagonali olarak isimlendirilir. Aynı zamanda  $A$  matrisinin permanenti,  $A$ 'nın olası tüm diyagonal çarpımlarının toplamı şeklinde ifade edilir [30].

Tüm elemanları negatif olmayan değerlerden oluşan bir matris için polinom zamanda permanent hesaplanması aşağıdaki şekilde yapılabilir [55]: (Eş. 8)

$$Per(A) = (-1)^n \sum_{S \subseteq \{1, \dots, n\}} (-1)^{|S|} \prod_{i=1}^n \sum_{j \in S} a_{ij} \quad (8)$$

Burada  $S$  ifadesi  $\{1, \dots, n\}$ 'nin tüm alt kümelerini,  $|S|$  ise eleman sayısını göstermektedir.

*Örnek 1* [7]: Bir  $3 \times 3$  boyutundaki  $A$  matrisinin aşağıdaki şekilde verildiğini varsayalım. (Eş. 9)

$$A = \begin{pmatrix} a & d & e \\ f & b & g \\ h & i & c \end{pmatrix} \quad (9)$$

$A$  matrisinin permanent değeri aşağıdaki gibi hesaplanır: (Eş. 10)

$$Per(A) = a \times b \times c + a \times g \times i + b \times e \times h + c \times d \times f + d \times g \times h + e \times f \times i \quad (10)$$

Burada  $Per(A)$ ,  $A$  matrisinin permanentini göstermektedir. Öte yandan, aynı matrisin determinantını hesapladığımızda ise aşağıdaki şekilde verilen bir ifade karşımıza çıkmaktadır. (Eş. 11)

$$Det(A) = a \times b \times c - a \times g \times i - b \times e \times h - c \times d \times f + d \times g \times h + e \times f \times i \quad (11)$$

Burada matris determinantı  $Det(A)$  ile gösterilmektedir.

Permanent ve determinant arasındaki en önemli fark permutasyonlarda eksi işaretlerinin olmaması ve tüm bilgi kaybına izin verilmemesidir [29]. Bu yönüyle, düğümler arasındaki tüm etkileşimler dikkate alınmaktadır.

Bulanık ÇTMY metodunda ise kriterler arasındaki etkileşimler bulanık yönlü çizgeler (digraph) kullanılarak modellenir. Bulanık yönlü çizge, düğümler kümesi  $\tilde{V} = (\tilde{v}_j)$  ve yönlü bağlantılar (arc) kümesinden  $\tilde{E} = (\tilde{e}_{jk})$  oluşmaktadır. Bir  $\tilde{v}_j$  düğümü  $j$ . kriterin bulanık puanını gösterirken,  $\tilde{e}_{jk}$  ise  $j$ . kriterin  $k$ . kriter üzerindeki bulanık etki derecesini göstermektedir. Bulanık yönlü çizge Eş. 12'deki gibi bir matris olarak ifade edilebilir.

$$\tilde{A} = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 & \dots & C_n \\ C_1 & \tilde{V}_1 & \tilde{e}_{12} & \tilde{e}_{13} & \dots & \tilde{e}_{1n} \\ C_2 & \tilde{e}_{21} & \tilde{V}_2 & \tilde{e}_{23} & \dots & \tilde{e}_{2n} \\ C_3 & \tilde{e}_{31} & \tilde{e}_{32} & \tilde{V}_3 & \dots & \tilde{e}_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_n & \tilde{e}_{n1} & \tilde{e}_{n2} & \tilde{e}_{n3} & \dots & \tilde{V}_n \end{matrix} \quad (12)$$

Eş. 12'de gösterildiği gibi oluşturulan  $\tilde{A}$  matrisinin permanenti hesaplanarak risk öncelik sayıları (RÖS) elde edilebilir. Bulanık permanentin nasıl hesaplanacağı ilerleyen bölümde ayrıntılarıyla verilecektir.

### 3.3. En Küçük Kareler Mesafe Metodu (Least Squares Distance Method)

En küçük kareler mesafe (EKKM) yöntemi Wang ve Parkan [40] tarafından önerilmiştir. EKKM yönteminin temel adımları aşağıdaki gibidir:

$\tilde{R}_i = (r_{i1}, r_{i2}, r_{i3})$  ve  $\tilde{R}_j = (r_{j1}, r_{j2}, r_{j3})$  bulanık üçgensel sayılar,  $v_i$  ve  $v_j$  de bu bulanık üçgensel sayıların nispi önem dereceleri olsun.  $\tilde{R}_i$  ve  $\tilde{R}_j$  arasındaki ağırlıklı Öklid uzaklığı şu şekilde hesaplanır: (Eş. 13)

$$d_{ij} = dist(v_i \tilde{R}_i, v_j \tilde{R}_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^3 (v_i r_{ik} - v_j r_{jk})^2} \quad (13)$$

Bulanık değerlendirmeler arasındaki ağırlıklı mesafe en aza indirildiğinde toplu görüşe ulaşırlar. Bu nedenle, tüm ağırlıklı bulanık görüş çiftleri arasındaki uzaklıkların karelerinin toplamı en aza indirilmelidir. Uzlaşık bulanık değerlendirme, aşağıdaki optimizasyon modeli çözümlenerek elde edilebilir:

$$\begin{aligned} Min J &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij}^2 \\ &= \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left[ \sum_{k=1}^3 (v_i r_{ik} - v_j r_{jk})^2 \right] \\ s.t. \sum_{i=1}^n v_i &= 1, v_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (14)$$

Eş. 14'te yer alan optimizasyon modeli Eş. 15'teki şekilde çözümlenir:

$$V^* = \frac{G^{-1}e}{e^T G^{-1}e} \geq 0 \quad (15)$$

Burada  $V^* = (v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*)$  bulanık değerlendirmelerinin optimum ağırlıklarını göstermektedir. Ayrıca,  $e = (1, \dots, 1)$  ifadesi  $e^T$ 'nin transpozisini ve  $G^{-1}$  ifadesi de  $G$ 'nin tersini temsil etmektedir.  $G$  ise Eş. 16 ve Eş. 17'deki gibi tanımlanmaktadır:

$$G = (g_{ij})_{n \times n} = \begin{bmatrix} n-1 & \sum_{k=1}^3 r_{1k}^2 & \dots & -\sum_{k=1}^3 r_{1k} r_{nk} \\ -\sum_{k=1}^3 r_{2k} r_{1k} & \dots & \dots & -\sum_{k=1}^3 r_{2k} r_{nk} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -\sum_{k=1}^3 r_{nk} r_{1k} & \dots & \dots & n-1 & \sum_{k=1}^3 r_{nk}^2 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$g_{ij} = \begin{cases} (n-1) \sum_{k=1}^3 r_{ik}^2, & \text{if } i = j, \forall i, j \\ -\sum_{k=1}^3 r_{ik} r_{jk}, & \text{if } i \neq j, \forall i, j \end{cases} \quad (17)$$

Sonunda, bulanık değerlendirmeler, aşağıdaki gibi doğrusal bir eklemeli toplama kuralı kullanılarak toplanır (Eş. 18).

$$\begin{aligned}\bar{R} &= \sum_{i=1}^n v_i^* \bar{R}_i \\ &= \left( \sum_{i=1}^n v_i^* r_{i1}, \sum_{i=1}^n v_i^* r_{i2}, \sum_{i=1}^n v_i^* r_{i3} \right)\end{aligned}\quad (18)$$

Burada  $v_i^*$   $i$ . bulanık değerlendirme nispi ağırlığıdır. Bu değerler normalize edilerek  $\sum_i v_i = 1$  ifadesinin sağlanmaktadır.

#### 4. Önerilen Model (Proposed Model)

Bu bölümde önerilen bütünsel bulanık HTEA yaklaşımının ana hatları sunulacaktır. Ardından, önerilen yöntem ve algoritmik adımları açıklanacaktır. Önerilen yöntem aşağıdaki adımları içermektedir:

- Karar vericilerin belirlenmesi ve hata türlerinin belirlenmesi
- Risk değerlendirme matrisi ve risk faktörlerinin ağırlıklarının belirlenmesi
- Risk faktörleri arasındaki etkileşimleri dikkate alarak hata türlerinin sıralanması

İlerleyen bölümlerde her bir adım ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

##### 4.1. Aşama 1: Problemin Yapılandırılması (Structuring the Problem)

*Adım 1:* İlk aşamada karar verici grubu oluşturulmaktadır. Bu adımda karar vericiler belirlenir. Çalışmanın amacı ve kapsamı ortaya konur.

*Adım 2:* Uzman görüşleri ve kapsamlı literatür incelemeleri yardımıyla olası hata modları listelenir. Daha sonra risk faktörlerinin listesi belirlenir.

*Adım 3:* Son olarak, dilsel değişkenler ve bunlarla ilişkili bulanık sayılar oluşturulur.

##### 4.2. Aşama 2: Risk Değerlendirme Matrisinin Oluşturulması (Forming Risk Evaluation Matrix)

*Adım 4:* Bu adımda, hata türlerinin değerlendirmeleri, kesin olmayan ve muğlak yargılara izin veren bulanık FUCOM yöntemi ile hesaplanır. İlk olarak, karar vericilerden hata türlerini sıralamaları istenir. Hata türlerinin ve risk faktörlerinin belirlendiği durumu ele alalım. Örneğin, risk faktörleri olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik şeklinde belirlenmişse, karar vericiler hata türlerini sırasıyla sözü edilen risk faktörleri açısından değerlendirerek sıralar. Yapılan sıralamaların ardından dilsel değişkenler kullanarak karşılaştırmalı öncelikler elde edilir. Karşılaştırmalı öncelikler verilirken, sıralamada birinci sırada yer alan kriter ile diğer kriterler karşılaştırılır. Ardından, tutarlılık koşullarıyla ilgili kısıtlar oluşturulur ve detayları bir önceki bölümde verilen matematiksel model formüle edilir. Oluşturulan doğrusal programlama modelinin çözümü nihai ağırlıklardır. Her hata türü için bulunan ağırlıklar Eş. 19-Eş. 21'deki gibi gösterilir:

$$HT^{O(p)} = \left( HT_1^{O(p)}, HT_2^{O(p)}, \dots, HT_n^{O(p)} \right) \quad (19)$$

$$HT^{S(p)} = \left( HT_1^{S(p)}, HT_2^{S(p)}, \dots, HT_n^{S(p)} \right) \quad (20)$$

$$HT^{F(p)} = \left( HT_1^{F(p)}, HT_2^{F(p)}, \dots, HT_n^{F(p)} \right) \quad (21)$$

Burada  $HT^{O(p)}$ ,  $HT^{S(p)}$  ve  $HT^{F(p)}$  hata türlerinin sırasıyla olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik faktörleri için  $p$ . karar verici tarafından yapılan değerlendirme puanlarını göstermektedir.

*Adım 5:* Risk faktörlerinin ağırlıkları, bir önceki adımdaki benzer işlemler neticesinde bulanık FUCOM kullanılarak hesaplanır. Risk faktörlerinin ağırlık vektörü aşağıdaki gibi gösterilir (Eş. 22).

$$W^{(p)} = \left( w_O^{(p)}, w_S^{(p)}, w_F^{(p)} \right) \quad (22)$$

Burada  $w_O^{(p)}$ ,  $w_S^{(p)}$ ,  $w_F^{(p)}$  sırasıyla olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik risk faktörlerinin  $p$ . karar verici için ağırlıklarıdır.

*Adım 6:* Her bir karar vericinin risk puanları ve faktör ağırlıkları EKKM yöntemiyle toplanır. Bu adımla birlikte  $p$  karar vericinin değerlendirmeleri tek bir karar verici değerlendirmesine indirgenmiş olur.

*Adım 7:* Ağırlıklı risk değerlendirme matrisi hesaplanır. Bu bağlamda olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik risk puanları ile faktör ağırlıkları çarpılarak Eş. 23-Eş. 25'te görüldüğü gibi hesaplanır.

$$HT_w^O = \left( HT_1^O \times w_O, HT_2^O \times w_O, \dots, HT_n^O \times w_O \right) \quad (23)$$

$$HT_w^S = \left( HT_1^S \times w_S, HT_2^S \times w_S, \dots, HT_n^S \times w_S \right) \quad (24)$$

$$HT_w^F = \left( HT_1^F \times w_F, HT_2^F \times w_F, \dots, HT_n^F \times w_F \right) \quad (25)$$

##### 4.3. Aşama 3: Hata Türlerinin Sıralanması (Ranking of Failure Modes)

Bu bölümde hata türleri bulanık ÇTMY kullanılarak sıralanmaktadır. Bulanık ÇTMY yönteminin en önemli avantajı, risk faktörleri arasındaki olası tüm etkileşimleri dikkate alarak (RÖS) değerlerini elde etmesidir. Bu çalışmada olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik faktörleri kullanıldığından, ilgili matematiksel ifadeler de bu üç faktör için verilmiştir.

*Adım 8:* Risk faktörleri arasındaki bulanık etkileşim dereceleri belirlenir. Risk faktörleri arasındaki etkileşim dereceleri dilsel değişkenler aracılığıyla karar vericilerden alınır. Bulanık etkileşim matrisi Eş. 26'da verilmiştir.

$$\tilde{\beta}^{(p)} = \begin{bmatrix} 0 & \tilde{r}_{12}^p & \tilde{r}_{13}^p \\ \tilde{r}_{21}^p & 0 & \tilde{r}_{23}^p \\ \tilde{r}_{31}^p & \tilde{r}_{32}^p & 0 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Burada  $\tilde{r}_{ij}^p$   $p$ . karar verici tarafından verilen  $i$ . risk faktörünün  $j$ . risk faktörüne olan bulanık etki derecesini göstermektedir. Ardından, Adım 6'ya benzer bir biçimde bulanık etkileşim dereceleri EKKM yöntemiyle toplanır.

*Adım 9:* Ağırlıklı risk değerlendirme matrisinde yer alan değerler baz alınarak, bulanık risk permanent matrisi oluşturulur. Bu matrisde her bir hata türünün risk faktörleri bazında aldığı değerler matrisin köşegenine Eş. 27'deki gibi yerleştirilir.

$$\tilde{\Psi}_i = \begin{bmatrix} H\tilde{T}_w^O & 0 & 0 \\ 0 & H\tilde{T}_w^S & 0 \\ 0 & 0 & H\tilde{T}_w^F \end{bmatrix} \quad (27)$$

Burada  $\tilde{\Psi}_i$   $i$ . hata türüne ait bulanık risk permanent matrisidir.

*Adım 10:* Bulanık risk permanent matrisi ve bulanık etkileşim matrisi toplanarak risk sıralama matrisi elde edilir.

$$\xi_i = \tilde{\psi}_i + \tilde{\beta} = \begin{bmatrix} HT_w^O & \tilde{r}_{12} & \tilde{r}_{13} \\ \tilde{r}_{21} & HT_w^S & \tilde{r}_{23} \\ \tilde{r}_{31} & \tilde{r}_{32} & HT_w^F \end{bmatrix} \quad (28)$$

Burada  $\xi_i$  i. hata türüne ait risk sıralama matrisidir. (Eş. 28)

*Adım 11:* Risk sıralama matrislerinin permanentleri hesaplanarak RÖS değerleri elde edilir. Her bir hata türüne ait permanent  $per(\xi_i)$  hesaplandıktan sonra bulunan değerler azalan şekilde sıralanır. En yüksek  $per(\xi_i)$  değerine sahip hata türleri en kritik hata türü olarak değerlendirilir.

## 5. Uygulama (Application)

Önerilen model, mobilya sektöründe faaliyet gösteren bir işletmede uygulanmıştır. Söz konusu üretim işletmesi doğal masif ahşap ve kaplamalar kullanarak yüksek kaliteli mobilyalar üretmekte ve Avrupa'nın önde gelen dolap mobilya tedarikçilerine ihracat yapmaktadır. Şirket, İSG konusundaki performansını halihazırda takip etmektedir. Bu çalışmaya katılmaya istekli olunduktan sonra ilgili beyaz yakalı çalışanlar belirlenmiş ve uzmanlar bu çalışmanın kapsamı hakkında aydınlatılmıştır. Önerilen yöntemin adım adım uygulaması gerçekleştirilmiştir.

*Adım 1:* İlk adımda karar verici ve uzmanlar belirlenmiştir. Karar verme sürecinde çalışmaya dahil olan uzmanlar üretim şefi, kalite kontrol mühendisi ve insan kaynakları uzmanıdır. Hata türleri ve risk büyüklüklerine ilişkin gerekli bilgiler uzmanlardan elde edilmiştir.

*Adım 2:* Önerilen HTEA modelinin ikinci adımında uzmanlar bir araya gelerek riskleri tartışmışlardır. Farklı birimlerden gelen çok disiplinli uzmanlar önceki çalışmalardan yola çıkarak 10 adet hata

türünü belirlemişlerdir. Riskler, nedenleri ve etkileri ile Tablo 1'de verildiği gibi belirlenmiştir.

*Adım 3:* Uzmanların değerlendirmelerinde kullanacakları dilsel skala literatür taraması yardımıyla belirlenmiştir. Kullanılan dilsel skala Tablo 2'de sunulmuştur. Karar vericilere kolaylık olması açısından hem bulanık FUCOM hem de bulanık ÇTMY yöntemlerinde aynı dilsel skaladan faydalanılmıştır.

*Adım 4:* Bu aşamada bulanık FUCOM yöntemi kullanılarak karar vericilerden hata türlerinin risk puanları elde edilmiştir. Bu kapsamda, karar vericiler hata türlerini en önemliden en önemsize doğru olacak şekilde sıralamışlardır. Ardından, en önemli gördükleri hata türü baz alınarak diğer hata türlerini karşılaştırmışlar ve Tablo 2'de yer alan dilsel etiketleri kullanarak nispi önem dereceleri atamışlardır. Karar vericilerden alınan sıralamalar ve ikili karşılaştırmalara ilişkin değerlendirmeler Tablo 3'te sunulmuştur.

Karar vericilerden alınan sıralamalar ve ikili karşılaştırmalar neticesinde matematiksel model oluşturulmuştur. Matematiksel modelin çözülmesiyle birlikte  $HT^{O(p)}$ ,  $HT^{S(p)}$  ve  $HT^{F(p)}$  değişkenlerine ait risk puanları Tablo 4-Tablo 6'daki gibi oluşturulmuştur.

*Adım 5:* Her bir karar verici olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik kriterlerinin nispi önem derecelerini belirlemiştir. Burada da bir önceki adımda ifade edildiği şekilde önce kriterler sıralanmış, ardından yapılan sıralama baz alınarak ikili karşılaştırmalar bulanık sayılar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Karar vericilerden elde edilen kriter sıralamaları ve ikili karşılaştırmalar Tablo 7'de verilmiştir.

Oluşturulan doğrusal programlama modelinin çözülmesiyle birlikte p. karar vericiye ait kriter ağırlıkları  $w_O^{(p)}$ ,  $w_S^{(p)}$ , ve  $w_F^{(p)}$  elde edilmiştir.

**Tablo 1.** Çalışmada belirlenen riskler (Risks identified in the study)

Sembol Risk Adı	Risk sebebi	Risk etkisi
HT <sub>1</sub>	Ahşap tozuna maruz kalma	Koruyucu ekipman kullanmamak
HT <sub>2</sub>	Malzemelerin işlenmesi sırasında gözlerle çapak/talaş teması	Koruyucu ekipman kullanmamak
HT <sub>3</sub>	Parmakların bir masa testeresine temas etmesi	Kalkan eksikliği, personel dikkatsizliği
HT <sub>4</sub>	Freze bıçakları ile el teması	Kalkan eksikliği, personel dikkatsizliği
HT <sub>5</sub>	İşçiler tarafından ağır yük hareketi	Yetersiz yük taşıma
HT <sub>6</sub>	Yangın	Personel dikkatsizliği
HT <sub>7</sub>	Nakliye sırasında düşen palet	Personel dikkatsizliği
HT <sub>8</sub>	Stok alanında forkliftin raflara çarpması	Sürücü dikkatsizliği
HT <sub>9</sub>	İş parçaları boyunca titreşim	Titreşim yalıtıcıları veya sönümleme eksikliği
HT <sub>10</sub>	Geri tepme - operatöre fırlayan parça	Parçanın kesici kafasına sıkışması

**Tablo 2.** Kullanılan dilsel skala (Employed linguistic scale)

Dilsel etiket	Kısaltma	Bulanık sayı
Eşit Önemde	E	(1;1;1)
Zayıf Önemde	Z	(1;2;3)
Orta Önemde	O	(2;3;4)
Orta Üzeri Önemli	OU	(3;4;5)
Güçlü	G	(4;5;6)
Güçlü Üzeri	GU	(5;6;7)
Çok Güçlü	CG	(6;7;8)
Çok Çok Güçlü	CCG	(7;8;9)
Aşırı	A	(8;9;9)

**Tablo 3.** Hata türleri karşılaştırmaları (Comparisons of failure modes)

Kriter	Uzman	Karşılaştırmalar									
O	Uzman 1	HT3	HT4	HT7	HT5	HT6	HT10	HT1	HT8	HT2	HT9
		E	Z	O	O	G	GU	GU	CGG	CCG	A
	Uzman 2	HT4	HT3	HT6	HT5	HT7	HT2	HT10	HT9	HT1	HT8
		E	Z	Z	O	O	OU	GU	CCG	CCG	A
	Uzman 3	HT3	HT4	HT5	HT6	HT7	HT10	HT8	HT2	HT9	HT1
		E	Z	O	O	OU	G	G	GU	GU	A
S	Uzman 1	HT4	HT3	HT6	HT8	HT7	HT2	HT10	HT1	HT5	HT9
		E	Z	O	OU	OU	G	GU	GU	CGG	CGG
	Uzman 2	HT6	HT8	HT4	HT3	HT9	HT1	HT2	HT7	HT10	HT5
		E	O	O	OU	OU	G	GU	GU	GU	CCG
	Uzman 3	HT3	HT4	HT10	HT6	HT1	HT8	HT7	HT2	HT5	HT9
		E	O	G	G	GU	CGG	CGG	CCG	CCG	A
F	Uzman 1	HT2	HT1	HT7	HT8	HT9	HT10	HT6	HT3	HT5	HT4
		E	Z	O	O	OU	G	GU	GU	CGG	CGG
	Uzman 2	HT1	HT2	HT7	HT8	HT9	HT4	HT10	HT5	HT6	HT3
		E	O	OU	G	G	GU	CGG	CGG	CGG	A
	Uzman 3	HT3	HT6	HT7	HT1	HT2	HT9	HT10	HT4	HT5	HT8
		E	Z	Z	O	OU	OU	GU	GU	CGG	A

**Tablo 4.** Olasılık için hata türleri öncelikleri (Priorities of failure modes w.r.t occurrence)

	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3
HT1	(0,042;0,085;0,094)	(0,053;0,092;0,097)	(0,053;0,083;0,083)
HT2	(0,056;0,094;0,104)	(0,027;0,09;0,09)	(0,045;0,094;0,094)
HT3	(0,096;0,263;0,263)	(0,067;0,131;0,131)	(0,093;0,254;0,254)
HT4	(0,074;0,136;0,136)	(0,084;0,249;0,249)	(0,072;0,132;0,132)
HT5	(0,022;0,102;0,102)	(0,015;0,087;0,087)	(0,024;0,081;0,081)
HT6	(0,021;0,062;0,062)	(0,033;0,108;0,108)	(0,021;0,099;0,099)
HT7	(0,025;0,084;0,084)	(0,019;0,104;0,115)	(0,024;0,08;0,08)
HT8	(0,05;0,095;0,095)	(0,074;0,104;0,113)	(0,04;0,095;0,099)
HT9	(0,07;0,105;0,108)	(0,033;0,069;0,075)	(0,056;0,111;0,117)
HT10	(0,027;0,071;0,073)	(0,028;0,075;0,075)	(0,027;0,078;0,078)

**Tablo 5.** Şiddet için hata türleri öncelikleri (Priorities of failure modes w.r.t severity)

	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3
HT1	(0,047;0,097;0,101)	(0,036;0,08;0,08)	(0,037;0,066;0,066)
HT2	(0,035;0,08;0,08)	(0,037;0,084;0,084)	(0,051;0,082;0,082)
HT3	(0,077;0,124;0,124)	(0,023;0,084;0,084)	(0,166;0,318;0,384)
HT4	(0,088;0,266;0,269)	(0,041;0,091;0,091)	(0,089;0,097;0,097)
HT5	(0,055;0,098;0,098)	(0,053;0,094;0,094)	(0,063;0,095;0,102)
HT6	(0,025;0,077;0,077)	(0,125;0,274;0,298)	(0,028;0,075;0,092)
HT7	(0,027;0,085;0,088)	(0,047;0,095;0,1)	(0,044;0,081;0,094)
HT8	(0,016;0,08;0,082)	(0,066;0,08;0,08)	(0,043;0,073;0,075)
HT9	(0,064;0,114;0,122)	(0,03;0,094;0,095)	(0,066;0,098;0,102)
HT10	(0,035;0,081;0,086)	(0,06;0,113;0,113)	(0,034;0,069;0,069)

**Tablo 6.** Fark edilebilirlik için hata türleri öncelikleri (Priorities of failure modes w.r.t detectability)

	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3
HT1	(0,071;0,13;0,13)	(0,146;0,295;0,352)	(0,014;0,084;0,084)
HT2	(0,092;0,251;0,251)	(0,08;0,088;0,088)	(0,015;0,075;0,081)
HT3	(0,047;0,097;0,101)	(0,062;0,095;0,095)	(0,081;0,242;0,242)
HT4	(0,065;0,116;0,121)	(0,043;0,079;0,079)	(0,046;0,096;0,109)
HT5	(0,052;0,1;0,1)	(0,051;0,093;0,093)	(0,055;0,106;0,107)
HT6	(0,034;0,078;0,079)	(0,065;0,109;0,109)	(0,065;0,128;0,128)
HT7	(0,024;0,08;0,08)	(0,038;0,077;0,077)	(0,032;0,104;0,104)
HT8	(0,021;0,098;0,098)	(0,024;0,071;0,084)	(0,065;0,095;0,102)
HT9	(0,024;0,079;0,079)	(0,036;0,081;0,081)	(0,031;0,098;0,102)
HT10	(0,027;0,078;0,078)	(0,04;0,079;0,086)	(0,033;0,078;0,078)



**Tablo 7.** Kriter ağırlıkları için ikili karşılaştırma matrisleri (Pairwise comparisons for criteria weights)

Uzman	Karşılaştırma		
Uzman 1	S	O	F
	E	G	GU
Uzman 2	S	O	F
	E	OU	G
Uzman 3	S	O	F
	E	CGG	CCG

*Adım 6:* Her bir karar verici için elde edilen kriter ağırlıkları ve hata türü puanları EKKM yöntemi kullanılarak toplanmıştır. Toplanan kriter ağırlıkları ve hata türü puanları sırasıyla Tablo 8 ve Tablo 9'da verilmiştir.

*Adım 7:* Bu adımda kriter ağırlıkları ile hata türü puanları çarpılarak  $HT_w^O$ ,  $HT_w^S$  ve  $HT_w^F$  değerleri hesaplanmıştır. Her bir sütuna yerleştirilen bu değerler ile ağırlıklı risk değerlendirme matrisi Tablo 10'daki gibi ortaya konmuştur.

*Adım 8:* Bu adımda olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik kriterleri arasındaki etkileşimler dikkate alınmıştır. Her bir karar verici dilsel değişkenler yardımıyla kriterler arasındaki etkileşimi tanımlamışlardır. Her bir karar vericiden elde edilen bulanık etkileşim matrisleri EKKM metoduyla toplanmış ve Tablo 11'de verilen sonuçlar elde edilmiştir.

*Adım 9:* Bu adımda her bir hata türü için risk permanent matrisi oluşturulmuştur. (Tablo 12). Risk permanent matrisi oluşturulurken ağırlıklı risk değerlendirme matrisinde yer alan puanlar, hata türüne ait olan permanent matrisinin köşegenine yazılmıştır. Örneğin, *HT1*

**Tablo 8.** Toplanan hata türleri öncelikleri (Aggregated priorities of failure modes)

	O	S	F
HT1	(0,049;0,087;0,091)	(0,039;0,079;0,08)	(0,05;0,127;0,135)
HT2	(0,042;0,092;0,095)	(0,041;0,082;0,082)	(0,05;0,106;0,109)
HT3	(0,081;0,196;0,196)	(0,059;0,127;0,135)	(0,059;0,121;0,123)
HT4	(0,075;0,159;0,159)	(0,067;0,121;0,121)	(0,05;0,095;0,1)
HT5	(0,02;0,089;0,089)	(0,057;0,096;0,098)	(0,053;0,099;0,1)
HT6	(0,024;0,085;0,085)	(0,038;0,1;0,11)	(0,051;0,1;0,101)
HT7	(0,023;0,088;0,091)	(0,039;0,087;0,093)	(0,031;0,086;0,086)
HT8	(0,054;0,098;0,102)	(0,041;0,078;0,079)	(0,035;0,086;0,093)
HT9	(0,05;0,091;0,096)	(0,052;0,101;0,105)	(0,03;0,085;0,086)
HT10	(0,028;0,075;0,075)	(0,041;0,084;0,086)	(0,033;0,078;0,08)

**Tablo 9.** Toplanan kriter ağırlıkları (Aggregated criteria weights)

	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3	Toplam
S	(0,584;0,73;0,876)	(0,515;0,687;0,858)	(0,675;0,788;0,9)	(0,588;0,733;0,877)
O	(0,146;0,146;0,146)	(0,172;0,172;0,172)	(0,113;0,113;0,113)	(0,139;0,139;0,139)
F	(0,083;0,122;0,175)	(0,086;0,137;0,215)	(0,075;0,098;0,129)	(0,081;0,116;0,167)

**Tablo 10.** Ağırlıklı risk değerlendirme matrisi (Weighted risk evaluation matrix)

	O	S	F
HT1	(0,007;0,012;0,013)	(0,023;0,058;0,071)	(0,004;0,015;0,023)
HT2	(0,006;0,013;0,013)	(0,024;0,06;0,072)	(0,004;0,012;0,018)
HT3	(0,011;0,027;0,027)	(0,035;0,093;0,118)	(0,005;0,014;0,02)
HT4	(0,01;0,022;0,022)	(0,039;0,089;0,106)	(0,004;0,011;0,017)
HT5	(0,003;0,012;0,012)	(0,033;0,07;0,086)	(0,004;0,012;0,017)
HT6	(0,003;0,012;0,012)	(0,023;0,073;0,096)	(0,004;0,012;0,017)
HT7	(0,003;0,012;0,013)	(0,023;0,064;0,082)	(0,003;0,01;0,014)
HT8	(0,007;0,014;0,014)	(0,024;0,057;0,069)	(0,003;0,01;0,016)
HT9	(0,007;0,013;0,013)	(0,031;0,074;0,092)	(0,002;0,01;0,014)
HT10	(0,004;0,01;0,01)	(0,024;0,062;0,075)	(0,003;0,009;0,013)

**Tablo 11.** Toplanan etkileşim matrisi (Aggregated interaction matrix)

	O	S	F
HT1	O	(0;0;0)	(2,194;3,194;4,194)
	S	(0;0;0)	(3,617;4,617;5,617)
	F	(0;0;0)	(1;2;3)

**Tablo 12.** HT1 için risk permanent matrisi (Permanent matrix for HT1)

	O	S	F
HT1	O	(0,007;0,012;0,013)	(0;0;0)
	S	(0;0;0)	(0,023;0,058;0,071)
	F	(0;0;0)	(0,004;0,015;0,023)

için risk permanent matrisi Tablo 12'deki gibi hesaplanmıştır. Benzer şekilde tüm hata türleri için aynı işlemler yapılarak bulanık risk permanent matrisleri oluşturulmuştur.

*Adım 10:* Bu adımda bulanık etkileşim matrisi ve hata türüne ait olan bulanık risk matrisi toplanarak risk sıralama matrisi elde edilmiştir. Toplama işlemi yapılırken bulanık aritmetik kuralları gözetenilmiş, matrislerdeki bulanık sayılar taraf tarafa olacak şekilde toplama işlemi yapılmıştır. HT1 için oluşturulan risk sıralama matrisi Tablo 13'teki şekilde hesaplanmıştır.

*Adım 11:* Son olarak her bir hata türü için oluşturulan risk sıralama matrislerinin permanenti hesaplanmıştır. Tablo 14 hata türleri için bulanık RÖS değerlerini ve hata türlerinin sıralarını göstermektedir.

## 6. Doğrulama (Validation)

Bu bölümde önerilen model diğer ÇKKV teknikleriyle karşılaştırılmış ve geçerlilik testleri yapılmıştır. Bir sonraki bölümde, yapılan karşılaştırmalı analiz sonuçları verilecektir.

### 6.1. Karşılaştırmalı Analiz (Comparative Analysis)

Önerilen entegre HTEA modeli, literatürde sıklıkla kullanılan bulanık ÇKKV teknikleriyle karşılaştırılmıştır. Bu kapsamda bulanık ARAS

[41], bulanık EDAS [42], bulanık MABAC [42], bulanık TODIM [44], bulanık TOPSIS [45] ve bulanık VIKOR [46] yöntemleri kullanılmıştır. Önerilen modelin literatürdeki pek çok ÇKKV tekniğinden en önemli farkı, sıralamalar elde edilirken olası tüm etkileşimlerin dikkate alınmasıdır. Bu noktada etkileşimleri dikkate alınmanın sıralamalar üzerinde etkisinin olup olmadığı araştırılmıştır. Bunun için Eş. 26 ile verilen bulanık etkileşim matrisinde tüm değerler sıfır olarak kabul edilmiş ve önerilen yöntem, etkileşimleri dikkat almayan versiyonu ile de hesaplanmıştır. Diğer ÇKKV teknikleri etkileşimleri dikkate almadığından, daha sağlıklı bir karşılaştırma ve analiz imkânı elde edilmiştir.

Sözü edilen bulanık ÇKKV tekniklerine ait parametreler ilgili makalelerde sunulduğu şekilde kullanılmış ve herhangi bir değişikliğe gidilmemiştir. Karşılaştırmalı analiz sonucunda elde edilen sıralamalar Tablo 15'te verilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, HT3 ve HT4 için elde edilen sıralamaların tüm yöntemlerde aynı olduğu görülmektedir. HT3 ve HT4 sırasıyla bir ve ikinci sıradaki en önemli hata türü olarak bulunmuştur. Elde edilen sıralamaların birbirlerine yakın oldukları gözlemlenmiştir.

Sıralamalar arasında istatistiksel olarak anlamlı bir farkın olup olmadığını araştırmak amacıyla Spearman korelasyon katsayıları Tablo 16'daki gibi hesaplanmıştır.

**Tablo 13.** HT1 için risk sıralama matrisi (Risk ranking matrix for HT1)

	O	S	F
HT1	O (0,007;0,012;0,013)	(2,859;3,859;4,859)	(2,194;3,194;4,194)
S	(0;0;0)	(0,023;0,058;0,071)	(3,617;4,617;5,617)
F	(0;0;0)	(1;2;3)	(0,004;0,015;0,023)

**Tablo 14.** Hata türlerinin sıralanması (Ranking of failure modes)

	Bulanık RÖS	Durulaştırılmış RÖS	Sıra
HT1	(0,025;0,111;0,214)	0,114	6
HT2	(0,021;0,119;0,224)	0,120	4
HT3	(0,041;0,252;0,46)	0,252	1
HT4	(0,038;0,204;0,373)	0,205	2
HT5	(0,01;0,115;0,209)	0,113	7
HT6	(0,012;0,109;0,198)	0,107	9
HT7	(0,012;0,113;0,214)	0,113	8
HT8	(0,027;0,125;0,239)	0,128	3
HT9	(0,025;0,117;0,224)	0,119	5
HT10	(0,014;0,096;0,177)	0,096	10

**Tablo 15.** Diğer ÇKKV teknikleri ile elde edilen sıralamalar (Rankings obtained by other MCDM methods)

HT	ÇKKV Teknikleri							
	Önerilen Model	Bulanık ARAS	Bulanık EDAS	Bulanık MABAC	Bulanık TODIM	Bulanık TOPSIS	Bulanık VIKOR	
	Etkileşim Var	Yok						
1	6	3	6	7	6	6	7	3
2	4	6	8	6	8	5	8	7
3	1	1	1	1	1	1	1	1
4	2	2	2	2	2	2	2	2
5	7	5	5	4	5	4	5	4
6	9	4	4	3	4	3	4	5
7	8	9	7	8	7	7	6	8
8	3	8	10	9	10	9	10	9
9	5	7	3	5	3	8	3	6
10	10	10	9	10	9	10	9	10

**Tablo 16.** Korelasyon analizi (Correlation analysis)

İkili Karşılaştırma	Önerilen Model Etkileşim		Bulanık	Bulanık	Bulanık	Bulanık	Bulanık	Bulanık		
	Var	Yok	ARAS	EDAS	MABAC	TODIM	TOPSIS	VIKOR		
			Var	Yok	Var	Yok	Var	Yok	Var	Yok
Önerilen Model Etkileşim	Var	Yok	1	0,564	0,394	0,479	0,394	0,442	0,37	0,515
			-	1	0,77	0,855	0,77	0,891	0,697	0,964
Bulanık ARAS			-	-	1	0,915	1	0,77	0,988	0,855
Bulanık EDAS			-	-	-	1	0,915	0,927	0,903	0,867
Bulanık MABAC			-	-	-	-	1	0,77	0,988	0,855
Bulanık TODIM			-	-	-	-	-	1	0,758	0,867
Bulanık TOPSIS			-	-	-	-	-	-	1	0,794
Bulanık VIKOR			-	-	-	-	-	-	-	1

Spearman korelasyon katsayıları incelendiğinde, etkileşimleri dikkate alınan sıralamalar üzerinde istatistiksel olarak anlamlı farklara yol açtığı görülmektedir. Risk faktörleri arasındaki etkileşimlerin uzmanlar tarafından belirlendiği model ile etkileşim derecelerinin sıfır olarak kabul edildiği model karşılaştırıldığında korelasyon katsayısı 0,564 ve p-değeri 0,096 olarak bulunmuştur. Bir başka ifadeyle %95 güven düzeyinde, aralarında korelasyon olduğu hipotezi reddedilmiştir. Etkileşimleri dikkate alınan sıralamalar üzerinde istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşturduğu ortaya çıkmaktadır. Bir diğer önemli bulgu ise kriterler arasındaki etkileşimlerin sıfır olarak verildiği bulanık ÇTMY metodu ile diğer bulanık ÇKKV teknikleri benzer sıralamalar üretmişlerdir. Bulanık ARAS, bulanık EDAS, bulanık MABAC, bulanık TODIM, bulanık TOPSIS, ve bulanık VIKOR yöntemleriyle yapılan karşılaştırmalarda p-değerleri sırasıyla 0,014, 0,004, 0,014, 0,001, 0,031 ve 0 şeklinde elde edilmiştir. Etkileşimlerin dikkate alınmadığı bulanık ÇTMY ile diğer ÇKKV yöntemlerinin %95 güven düzeyinde istatistiksel olarak farklı olmadığı ortaya çıkmıştır. Sonuç olarak, kriter etkileşimlerinin dikkate alınmasının sıralamalar üzerinde anlamlı farklar oluşturduğu ortaya konurken, etkileşimlerin dikkate alınmadığı durumda, diğer ÇKKV yöntemlerine uygun şekilde sonuçlar üretilmektedir. Önerilen model literatürde en sık kullanılan ÇKKV yöntemlerine uygun şekilde sıralamalar üretirken, diğer yöntemlerin dikkate alınmadığı kriter etkileşimlerini de modelleme kabiliyetine sahiptir.

### 6.2. Geçerlilik Testi (Validity Test)

Geçerlilik testi bölümünde Wang ve Triantaphyllou [47] tarafından önerilen test kriterleri kullanılmıştır. Wang ve Triantaphyllou [47] test kriterlerini şu şekilde tanımlamıştır [48, 49]: Test kriteri 1: Her bir kriterin ağırlığını değiştirmeden, optimal olmayan alternatif daha kötü bir alternatifle değiştirilirse en iyi alternatif değişmemelidir. Test kriteri 2: Geçişlilik özelliği sağlanmalıdır. Test kriteri 3: Çok kriterli problem alt problemlere bölündüğünde, alt problemlerden elde edilen sıralamalar ana problemdeki sıralamalara uygun olmalıdır.

Önerilen modelin geçerliliği yukarıda yer alan 3 adet test kriteri doğrultusunda değerlendirilmiştir. Test kriteri 1 için optimal olmayan alternatif olarak HT6 belirlenmiştir. HT6 alternatifi karar matrisinden çıkarılmış ve yerine daha kötü bir HT6' alternatifi belirlenmiştir. Burada HT6' alternatifi olasılık, şiddet ve fark edilebilirlik kriterleri için aldıkları puanlar (0,022;0,083;0,083), (0,036;0,08;0,09) ve (0,049;0,098;0,099) şeklinde belirlenmiştir. Hesaplamalar sonucunda sıralama  $HT3 > HT4 > HT8 > HT2 > HT9 > HT1 > HT5 > HT7 > HT6' > HT10$  şeklinde oluşmuştur. En iyi alternatifin sırası aynı kaldığı için test kriteri 1 sağlanmıştır.

Test kriteri 2 ve 3 için ise karar verme problemi alt problemlere ayrılmıştır. Bu kapsamda belirlenen alt problemler {HT1, HT2, HT3, HT4, HT5}, {HT2, HT3, HT4, HT5, HT6}, {HT3, HT4, HT5, HT6, HT7}, {HT4, HT5, HT6, HT7, HT8}, {HT5, HT6, HT7, HT8, HT9} ve {HT6, HT7, HT8, HT9, HT10} şeklindedir. Alt problemler için yapılan hesaplamalar neticesinde, sıralamalar  $HT3 > HT4 > HT2 >$

$HT1 > HT5$ ,  $HT3 > HT4 > HT2 > HT5 > HT6$ ,  $HT3 > HT4 > HT5 > HT7 > HT6$ ,  $HT4 > HT8 > HT5 > HT7 > HT6$ ,  $HT8 > HT9 > HT5 > HT7 > HT6$  ve  $HT8 > HT9 > HT7 > HT6 > HT10$  olarak elde edilmiştir. Tüm sıralamalar dikkate alındığında geçişlilik özelliğinin korunduğu ve  $HT3 > HT4 > HT8 > HT2 > HT9 > HT1 > HT5 > HT7 > HT > HT10$  sıralama ilişkisinin bozulmadığı görülmektedir. Dolayısıyla test kriteri 2 ve 3 de sağlanmaktadır. Bulanık ÇTMY her bir alternatif için bir kare matris oluşturmakta ve permanent fonksiyonu hesaplamaktadır. Her bir alternatif ayrı şekilde hesaba katıldığı için sıra değişimi problemi yaşanmamaktadır.

### 7. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada yeni bir entegre bulanık HTEA modeli önerilmiştir. Bu kapsamda hata türlerinin risk faktörleri bazındaki puanları ve faktör ağırlıkları bulanık FUCOM yöntemiyle elde edilmiştir. Bulanık FUCOM yöntemi ile ihtiyaç duyulan ikili karşılaştırma matrislerinin sayısı oldukça az olduğundan, karar vericilerden daha sağlıklı veri elde edilmesine olanak tanımıştır. Ardından risk faktörleri arasındaki etkileşimleri de dikkate alan ve matris permanentlerinin hesaplanmasına dayalı bir yöntem olan bulanık ÇTMY kullanılarak her bir hata türü için RÖS değerleri elde edilmiştir. Karar vericilerin değerlendirmeleri ise doğrusal denklem sistemlerinin çözümüne dayalı olan EKKM yöntemine göre birleştirilmiştir.

Sonuçlar incelendiğinde, en kritik hata türlerinin sırasıyla, parmakların bir masa testeresine temas etmesi (HT3) ve freze bıçakları ile el teması (HT4) olduğu görülmektedir. Bu hata türlerini stok alanında forkliftin raflara çarpması (HT8), malzemelerin işlenmesi sırasında gözlerle çapak/talaş teması (HT2) ve iş parçaları boyunca titreşim (HT9) risklerinin takip ettiği görülmektedir. Karar vericilerin değerlendirmelerine göre son sırada yer alan hata türleri ise sırasıyla nakliye sırasında düşen palet (HT7), yangın (HT6) ve geri tepme (HT10) şeklinde bulunmuştur.

Çalışmanın temel sınırlaması, sonuçların uzmanlardan ve karar vericiden elde edilen bilgilere dayandırılıyor olmasıdır. Bu nedenle, üretilen sonuçlar karar vericilerin değerlendirmelerine özgüdür ve mobilya sektörü için genelleştirilemeyebilir. Gelecek çalışmalarda, önerilen bulanık ÇKKV modeli sezgisel bulanık kümeler, Pisagor bulanık kümeler gibi farklı bulanık küme uzantularıyla birlikte kullanılabilir. Ayrıca, hata türleri arasındaki neden-sonuç ilişkileri analiz edilebilir. Son olarak önerilen entegre yaklaşım, çeşitli gerçek hayat risk değerlendirme problemlerini modellemek için kullanılabilir.

### Kaynaklar (References)

1. Fattahi R., Khalilzadeh M., Risk evaluation using a novel hybrid method based on FMEA, extended MULTIMOORA, and AHP methods under fuzzy environment, Safety Science, 102, 290-300, 2018.

2. Gölcük İ., Interval type-2 fuzzy inference-based failure mode and effect analysis model in a group decision-making setting, *Kybernetes*, ahead-of-print (ahead-of-print), 2021.
3. Peláez C.E., Bowles J.B., Using fuzzy cognitive maps as a system model for failure modes and effects analysis, *Information Sciences*, 88 (1), 177-199, 1996.
4. Liu H.C., Liu L., Lin Q.L., Fuzzy failure mode and effects analysis using fuzzy evidential reasoning and belief rule-based methodology, *IEEE Transactions on Reliability*, 62 (1), 23-36, 2013.
5. Chang C.L., Liu P.H., Wei C.C., Failure mode and effects analysis using grey theory, *Integrated Manufacturing Systems*, 12 (3), 211-216, 2001.
6. Pillay A., Wang J., Modified failure mode and effects analysis using approximate reasoning, *Reliability Engineering & System Safety*, 79 (1), 69-85, 2003.
7. Baykasoğlu A., Gölcük İ., Comprehensive fuzzy FMEA model: a case study of ERP implementation risks, *Operational Research*, 20, 795–826, 2020.
8. Huang J., You J.X., Liu H.C., Song M.S., Failure mode and effect analysis improvement: A systematic literature review and future research agenda, *Reliability Engineering and System Safety*, 199, 2020.
9. Zadeh L.A., Fuzzy sets, *Information and Control*, 8 (3), 338-353, 1965.
10. Tzeng G.-H., Huang J.-J., Multiple attribute decision making: methods and applications: CRC press, 2011.
11. Zeng S.X., Tam C.M., Tam V.W.Y., Integrating safety, environmental and quality risks for project management using a FMEA method, *Engineering Economics*, (1), 44-52, 2010.
12. Lux A., Mawo De Bikond J., Etienne A., Quillerou-Grivot E., FMEA and consideration of real work situations for safer design of production systems, *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics*, 22 (4), 557-564, 2016.
13. Bao J., Johansson J., Zhang J., An occupational disease assessment of the mining industry's occupational health and safety management system based on FMEA and an improved AHP model, *Sustainability (Switzerland)*, 9 (1), 2017.
14. 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*, 23 (4), 895-924, 2017.
15. Ilbahar E., Karaslan 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*, 103, 124-136, 2018.
16. Karaslan A., Ilbahar E., Cebi S., Kahraman C., A new risk assessment approach: Safety and Critical Effect Analysis (SCEA) and its extension with Pythagorean fuzzy sets, *Safety Science*, 108, 173-187, 2018.
17. Mete S., Assessing occupational risks in pipeline construction using FMEA-based AHP-MOORA integrated approach under Pythagorean fuzzy environment, *Human and Ecological Risk Assessment*, 25 (7), 1645-1660, 2019.
18. Dabbagh R., Yousefi S., A hybrid decision-making approach based on FCM and MOORA for occupational health and safety risk analysis, *Journal of Safety Research*, 71, 111-123, 2019.
19. Dahooie J.H., Vanaki A.S., Firoozfar H.R., Zavadskas E.K., Čereška A., An extension of the failure mode and effect analysis with hesitant fuzzy sets to assess the occupational hazards in the construction industry, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17 (4), 2020.
20. Rezaei J., Best-worst multi-criteria decision-making method, *Omega*, 53, 49-57, 2015.
21. Gölcük İ., An interval type-2 fuzzy reasoning model for digital transformation project risk assessment, *Expert Systems with Applications*, 159, 113579, 2020.
22. Baykasoğlu A., Gölcük İ., Revisiting ranking accuracy within WASPAS method, *Kybernetes*, 49 (3), 885-895, 2020.
23. Zavadskas E.K., Turskis Z., Antucheviciene J., Zakarevicius A., Optimization of weighted aggregated sum product assessment, *Elektronika ir elektrotechnika*, 122 (6), 3-6, 2012.
24. Spreafico C., Russo D., Rizzi C., A state-of-the-art review of FMEA/FMECA including patents, *Computer Science Review*, 25, 19-28, 2017.
25. Liu H.C., Zhang L.J., Ping Y.J., Wang L., Failure mode and effects analysis for proactive healthcare risk evaluation: A systematic literature review, *Journal of Evaluation in Clinical Practice*, 26 (4), 1320-1337, 2020.
26. Pamucar D., Ecer F., Prioritizing the weights of the evaluation criteria under fuzziness: The fuzzy full consistency method-FUCOM-F, *Facta Universitatis, series: Mechanical Engineering*, 18 (3), 419-437, 2020.
27. Pamučar D., Stević Ž., Sremac S., A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM), *Symmetry*, 10 (9), 393, 2018.
28. Ecer F., FUCOM subjektif ağırlıklandırma yöntemi ile rüzgâr çiftliği yer seçimini etkileyen faktörlerin analizi An analysis of the factors affecting wind farm site selection through FUCOM subjective weighting method, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27 (1), 24-34, 2021.
29. Rao R.V., Padmanabhan K.K., Selection, identification and comparison of industrial robots using digraph and matrix methods, *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 22 (4), 373-383, 2006.
30. Baykasoğlu A., "Graph theory" and "matrix method" based approach for business process modeling/simulation software selection, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 28 (3), 555-566, 2013.
31. Marhavilas P.K., Koulouriotis D., Gemeni V., Risk analysis and assessment methodologies in the work sites: On a review, classification and comparative study of the scientific literature of the period 2000–2009, *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 24 (5), 477-523, 2011.
32. Adem A., Çakıt E., Dağdeviren M., Occupational health and safety risk assessment in the domain of Industry 4.0, *SN Applied Sciences*, 2 (5), 2020.
33. Boyacı A.Ç., Solmaz M.B., Kabak M., A model proposal for occupational health and safety risk assessment based on multi-criteria hesitant fuzzy linguistic term sets: An application in plastics industry, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36 (2), 1041-1053, 2021.
34. Liu R., Zhu Y.J., Chen Y., Liu H.C., Occupational health and safety risk assessment using an integrated TODIM-PROMETHEE model under linguistic spherical fuzzy environment, *International Journal of Intelligent Systems*, 36 (11), 6814-6836, 2021.
35. Gul M., A review of occupational health and safety risk assessment approaches based on multi-criteria decision-making methods and their fuzzy versions, *Human and Ecological Risk Assessment*, 24 (7), 1723-1760, 2018.
36. Marcus M., Minc H., Permanents, *The American Mathematical Monthly*, 72 (6), 577-591, 1965.
37. Nourani Y., Andresen B., Exploration of NP-hard enumeration problems by simulated annealing-the spectrum values of permanents, *Theoretical Computer Science*, 215 (1), 51-68, 1999.
38. Baykasoğlu A., A review and analysis of "graph theoretical-matrix permanent" approach to decision making with example applications, *Artificial intelligence review*, 42 (4), 573-605, 2014.
39. Ryser H.J., *Combinatorial Mathematics: Mathematical Association of America*, 1963.
40. Wang Y.-M., Parkan C., Two new approaches for assessing the weights of fuzzy opinions in group decision analysis, *Information Sciences*, 176 (23), 3538-3555, 2006.
41. Mavi R.K., Green supplier selection: A fuzzy AHP and fuzzy ARAS approach, *International Journal of Services and Operations Management*, 22 (2), 165-188, 2015.
42. Ghorabae M.K., Zavadskas E.K., Amiri M., Turskis Z., Extended EDAS method for fuzzy multi-criteria decision-making: An application to supplier selection, *International Journal of Computers, Communications and Control*, 11 (3), 358-371, 2016.
43. Božanić D., Tešić D., Kocić J., Multi-criteria fucom -fuzzy mabac model for the selection of location for construction of single-span bailey bridge, *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 2 (1), 132-146, 2019.
44. Tosun Ö., Akyüz G., A Fuzzy TODIM Approach for the Supplier Selection Problem, *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 8 (2), 317-329, 2015.
45. Baykasoğlu A., Gölcük İ., Development of a novel multiple-attribute decision making model via fuzzy cognitive maps and hierarchical fuzzy TOPSIS, *Information Sciences*, 301, 75-98, 2015.
46. Chen L.Y., Wang T.C., Optimizing partners'choice in IS/IT outsourcing projects: The strategic decision of fuzzy VIKOR, *International Journal of Production Economics*, 120 (1), 233-242, 2009.
47. Wang X., Triantaphyllou E., Ranking irregularities when evaluating alternatives by using some ELECTRE methods, *Omega*, 36 (1), 45-63, 2008.

48. Aydemir S.B., Gündüz S.Y., Extension of multi-Moora method with some q-rung orthopair fuzzy Dombi prioritized weighted aggregation operators for multi-attribute decision making, *Soft Computing*, 24 (24), 18545-18563, 2020.
49. Aydemir S.B., Gunduz S.Y., A novel approach to multi-attribute group decision making based on power neutrality aggregation operator for q-rung orthopair fuzzy sets, *International Journal of Intelligent Systems*, 36 (3), 1454-1481, 2021.

