



Demiryolu Ulaşım Emniyet Önlemlerinin Resim Bulanık SWARA Yöntemiyle Değerlendirilmesi

Gözde BAKİOĞLU

Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

gozde.bakioglu@marmara.edu.tr

(Alınış/Received: 05.04.2024, Kabul/Accepted: 08.07.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Demiryolu emniyeti, yolcuların ve çalışanların emniyetini garanti altına almak, seyrüsefer esnasında arıza yaşanma olasılığını azaltmak ve demiryolu işletmelerinin sorunsuz bir şekilde faaliyet göstermesini sağlamak açısından kritik bir öneme sahiptir. Demiryolu ulaşım emniyet önlemlerinin belirlenmesi ve sıralanması, demiryolu sektörünün barındırdığı çeşitli emniyet risklerinin ortaya çıkartılması ve bu risklerin yönetilebilmesi için temel bir adım olacaktır. Bu çalışmanın amacı, bir bulanık çok kriterli karar verme yöntemi kullanarak demiryolu emniyet önlemlerini değerlendirmektir. Çalışma kapsamında 8 farklı demiryolu ulaşım emniyet önlemi yazın taraması ve uzman ekibin görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Değerlendirme için, karar vericilerin öznel değerlendirmelerindeki belirsizliği daha iyi modelleyen ve uzman görüşlerini ağırlıklandırma sürecine doğrudan dâhil eden Resim Bulanık SWARA yöntemi kullanılmıştır. Buna ek olarak, çalışma kapsamında farklı ağırlıklar altında her bir ölçütün karar verme süreci üzerindeki etkisini ölçmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, çalışmada uygulanan Resim Bulanık SWARA yöntemine ait hesaplamaların etkinliğini ve sağlamlığını kontrol etmek amacıyla karşılaştırma analizi gerçekleştirilmiştir. Yazın taraması sonucunda, demiryolu emniyet önlemlerini kapsamlı şekilde ele alan ve bu önlemleri Resim Bulanık SWARA yöntemiyle sıralayan bir çalışmanın bulunmaması, bu çalışmanın literatüre önemli bir katkı sağladığını göstermektedir. Çalışmanın bulguları incelendiğinde; demiryolu ulaşım emniyeti açısından demiryolu altyapı periyodik bakımının ilk sırada, üstyapı bakımının ikinci sırada ve demiryolu taşıt bakımının üçüncü sırada öneme sahip olduğu ortaya çıkarılmıştır. Bu çalışmanın sonuçları demiryolu sektöründe çalışan karar vericilere ve araştırmacılara bilgi sağlamak ve teknolojik olarak nerelere yatırım yapılması gerektiğini gözler önüne sermektedir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu emniyeti, Resim bulanık kümeler, SWARA

Evaluation of Railway Transport Safety Measures using Picture Fuzzy SWARA Approach

Abstract: Railway safety is crucial for ensuring the well-being of passengers and workers, reducing the chances of malfunctions during operations, and ensuring efficient railway functioning. Identifying and prioritizing safety measures in railway transportation is a foundational step in identifying potential risks within the sector and effectively managing them. Based on a thorough review of the related literature and input from experts, eight different safety measures were identified. To account for the various factors involved in evaluating railway safety, fuzzy multi-criteria decision-making methods were used. In special, the Picture Fuzzy SWARA method was utilized, as it better incorporates the uncertainty in decision makers' subjective evaluations and expert opinions in the weighting process. Additionally, sensitivity analysis was conducted to determine the impact of each criterion on the decision-making process when assigned different weights. Furthermore, a comparison analysis was performed to check the effectiveness and robustness of the calculations of the Picture Fuzzy SWARA method used in the study. The literature review revealed that there is no study comprehensively addressing railway safety measures and ranking them using the Picture Fuzzy SWARA method, highlighting the significant contribution of this study to the literature. The findings revealed that the top three safety measures for railway transportation are periodic maintenance of railway infrastructure, maintenance of the superstructure, and maintenance of railway vehicles. The results of this study will be valuable for decision makers and researchers in the railway sector, as it introduces a useful method and suggests effective safety measures.

Atıf için/Cite as: G. Bakioğlu, "Demiryolu ulaşım emniyet önlemlerinin Resim Bulanık SWARA Yöntemiyle değerlendirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 107-122, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1465431

Keywords: Railway safety measures, Picture fuzzy sets, SWARA

1. Giriş

Ulaşım, günümüz toplumlarının vazgeçilmez bir parçası olup, emniyetli bir ulaşım sistemi, toplumların refahı ve ekonomik gelişimi için önemli bir unsurdur. Bu bağlamda demiryolu ulaşımı; çevre dostu, sürdürülebilir ve emniyetli bir taşımacılık alternatifi olarak öne çıkmaktadır. Avrupa Çevre Ajansı'nın raporunda, karayolu taşıtı içerisinde bulunan bir yolcunun hayatını kaybetme olasılığı, tren içerisindeki yolcudan 73 kat daha fazla olduğu kaydedilmiştir [1].

Demiryolu taşımacılığını emniyetli bir alternatif haline getirebilmek için hatların ve taşıtların periyodik olarak bakımının yapılması ve gerekli önlemlerin alınması gerekmektedir. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) kaza araştırma ve inceleme yönergesine göre belirlenen kaza türleri arasında çarpışma, deray, hemzemin geçit kazaları, hareket halindeki demiryolu aracının karıştığı insan kazaları, demiryolu araç yangınları ve diğer kazalar yer almaktadır [2]. TCDD İstatistik Yıllığı resmi istatistik verilerine göre; 2016-2022 yılları arasında meydana gelen kaza türleri, sayıları, can kaybı ve yaralı sayıları Tablo 1'de gösterilmiştir [3].

Tablo 1. 2016-2022 yılları arasında meydana gelen kazalar

| Kaza Türleri/Yıllar | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|---|------|------|------|------|------|------|------|
| Kaza Sayıları | | | | | | | |
| Çarpışma | 6 | 2 | 6 | 4 | 9 | 9 | 3 |
| Deray | 51 | 23 | 23 | 26 | 17 | 12 | 21 |
| Hemzemin Geçit Kazası | 23 | 8 | 6 | 14 | 22 | 29 | 20 |
| Diğer Kazalar | 4 | 1 | 3 | 6 | 4 | 3 | 1 |
| Hareket Halindeki Demiryolu Aracı ve Şahıs Kaynaklı Kazalar | 36 | 19 | 33 | 33 | 14 | 20 | 27 |
| Toplam Kaza Sayıları | 120 | 53 | 71 | 83 | 66 | 73 | 72 |
| Can Kaybı Sayısı | 81 | 41 | 76 | 54 | 32 | 30 | 31 |
| Yaralı Sayısı | 72 | 24 | 53 | 28 | 17 | 19 | 21 |

Tablo 1'de bulunan verilere göre kazaların oluşmasında öne çıkan başlıca kazaların demiryolu taşıtlarının en az bir tekerinin raydan ayrılması anlamına gelen deray, hemzemin geçit kazaları ve hareket halindeki tren ve şahıs kaynaklı kazalar olduğu görülmektedir. Literatürdeki çalışmalara bakıldığında, demiryolu emniyet önlemleri ile ilgili dar bir alana odaklanıldığı ya da emniyet çalışmaları ile ilgili tüm ulaşım türlerini kapsayan geniş araştırmalara yer verildiği gözlenmiştir. Liu ve Moini [4], dört farklı ulaşım türü için (karayolu, demiryolu, havayolu ve transit) emniyet ölçütlerinin kapsamlı bir değerlendirmesini sunmuşlardır. Wegman vd. [5] Avrupa ülkeleri için karayolu taşımacılığı alanında 27 farklı emniyet önlemi önermişlerdir. Singleton ve Wang [6] ülkelere ait ulaşım türlerinin emniyet performanslarını karşılaştırmak için anket çalışması uygulamışlar ve sonuçları karşılaştırmalı bir şekilde sunmuşlardır. Matsumoto vd. [7] tren tekerleği ve ray arasındaki sürtünme katsayısından küçük yarıçaplı kurplarda derayı önlemek için çeşitli emniyet önlemleri önermişlerdir. İslam vd. [8] fayda-maliyet analizi kullanarak Avrupa'da verimli demiryolu yük trafiği yönetimi için deray azaltma teknikleri kullanmışlardır. Sümbül vd. [9] deray durumunu tespit edip makiniste bildiren bir sistemi kavramsal olarak tasarlamışlardır.

Literatürde Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, demiryolu performansı ve emniyet değerlendirme çalışmalarında kullanılmıştır. Li vd. [10] bulanık TOPSIS yöntemini kullanarak Pekin raylı transit sisteminin hizmet kalitesini değerlendirmişlerdir. Blagojević vd. [11] bulanık FUCOM ve MARCOS yöntemlerini kullanarak sürdürülebilir trafik yönetimi için demiryolu geçitlerinde emniyet seviyesini sıralamışlardır. Bouraima vd. [12] aralıklı kaba SWARA

yöntemini kullanarak sürdürülebilir ulaşım için alternatif demiryolu sistemlerini değerlendirmişlerdir. Ćirović ve Pamučar [13] uyarlanabilir nöro bulanık çıkarım sistemi kullanarak emniyet iyileştirmeleri için demiryolu hemzemin geçitlerini önceliklendirmişlerdir. An vd. [14] demiryolları için emniyet risklerini bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemi kullanarak sıralamışlardır. Sangiorgio vd. [15] kaza sayısını tahmin etmek ve demiryolu ağlarının güvenliğini değerlendirmek için AHP yöntemini ve doğrusal programlama yaklaşımını birleştirmişlerdir.

Demiryolu ulaşım emniyet önlemlerini ortaya çıkarmak, potansiyel riskleri azaltmak ve demiryolu emniyetini artırmak bakımından büyük öneme sahiptir. Demiryolu emniyeti değerlendirilirken birçok faktör göz önünde bulundurulmaktadır, bu çalışmanın amacı, demiryolu ulaşım emniyet önlemlerini ortaya çıkarıp, bir bulanık ÇKKV yöntemi ile sıralayarak literatürde bulunan bilgi boşluğunu doldurmaktır. Çalışma kapsamında, emniyet önlemleri Resim Bulanık SWARA yöntemi kullanılarak önceliklendirilmiştir. Literatürde, demiryolu ulaşım türünde emniyet tedbirlerini inceleyen çalışmaların bulunmaması ve bu tedbirlerin sıralanmasında Resim Bulanık Kümeler kullanan bir ÇKKV yönteminin uygulanmaması, bu çalışmanın motivasyonunu oluşturmaktadır. Çalışmanın akışı aşağıdaki şekildedir:

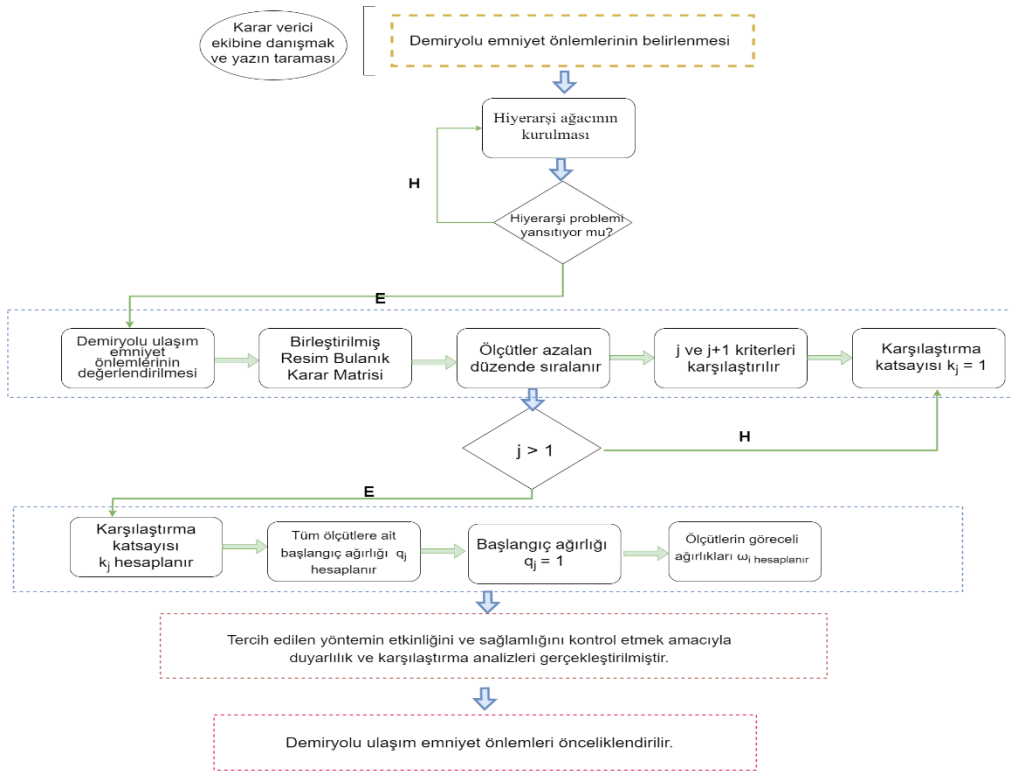
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları çalışanları ve akademisyenlerin oluşturduğu uzman ekip ve kapsamlı bir yazın taraması sonucunda 8 adet demiryolu emniyet önlemi ortaya çıkarılmıştır.
- Demiryolu ulaşım emniyet önlemlerinin sıralanması bir ÇKKV problemidir ve emniyet önlemlerinin değerlendirilebilmesi için karar vericilerin ölçütleri oylamasına ihtiyaç duyulmaktadır. Klasik bulanık kümeler ve keskin kümeler, uzmanların oylama mekanizmasını ihmal etmektedir. Bununla birlikte, resim bulanık kümelerde görüşü alınan karar vericiler evet oyu verenler, hayır oyu verenler, çekimser oy verenler ve red oyu verenler şeklinde 4 gruba ayrılmaktadır.
- Bu çalışmada resim bulanık kümeler kullanılarak karar vericilerin oylamada verecekleri tüm cevaplar hesaba katılmış, böylece karmaşık ölçütlerden ve oylamadan kaynaklı belirsizlikler ortadan kaldırılmıştır.
- Uzman görüşlerini ağırlıklandırma sürecine doğrudan dâhil eden SWARA yöntemi, demiryolu emniyet önlemlerinin sıralanması için tercih edilmiştir.
- Her bir ölçütün karar verme süreci üzerindeki etkisini ölçmek için duyarlılık analizi uygulanmıştır. Bu kapsamda, karar vericilere atanan ağırlık değerleri birbirleri ile değiştirilerek Resim Bulanık SWARA yönteminin sonuçları 6 kez tekrar hesaplanmıştır.
- Çalışma kapsamında kullanılan Resim Bulanık SWARA yönteminin etkinliğini ve sağlamlığını kontrol etmek amacıyla, bu yöntem geleneksel SWARA ve Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemleri ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın sonuçları demiryolu sektöründe çalışan karar vericilere ve araştırmacılara hem geliştirilen yöntem açısından hem de önerilen demiryolu emniyet önlemleri açısından önemli katkılar sağlayacaktır. Çalışma sonunda önceliklendirilen demiryolu emniyet önlemleri ile emniyeti artırıcı stratejik uygulamalar teşvik edilecektir.

Makalenin geri kalan kısımları şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2, çalışma kapsamında tercih edilen yöntemi tanıtarak, resim bulanık kümeleri ve resim bulanık SWARA metodunu detaylı bir şekilde açıklamaktadır. Bölüm 3, demiryolu emniyet önlemlerini açıklayıp, ardından resim bulanık SWARA metodunun bu önlemlere uygulanışını göstermektedir. Aynı bölümde, tercih edilen yöntemin etkinliğini ve sağlamlığını kontrol etmek amacıyla gerçekleştirilen duyarlılık analizi ve karşılaştırma analizlerine yer verilmiştir. Bölüm 4'te bulgular tartışılmış ve çalışmanın sonuçları sunulmuştur.

2. Metot

ÇKKV yöntemleri birden fazla kriter veya faktörün dikkate alındığı karmaşık karar verme problemlerini çözmek için kullanılmaktadır. ÇKKV yöntemlerinin amacı, belirli ölçütlere dayanarak objektif bir şekilde en uygun veya en tercih edilen seçeneği tanımlamak ve seçmektir. Bu çalışmanın konusu olan demiryolu emniyet önlemleri öznel değerlendirmeler gerektiren ve birçok farklı ölçüt içeren karmaşık bir problemdir. Bu karmaşıklığı yönetmek ve analitik bir çerçevede ele almak için ÇKKV yöntemlerine başvurulması gerekmektedir. Çalışma kapsamında, demiryolu emniyet önlemleri ölçüt olarak ele alınmış olup, ölçütlerin ağırlıklarını bulmayı sağlayan ÇKKV yöntemlerinden biri olan SWARA (Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis) metodu tercih edilmiştir. Bu yöntem Resim Bulanık Kümeler ortamında genişletilmiştir. Tercih edilen yönteme ait akış şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Tercih edilen yönteme ait akış şeması

2.1. Resim bulanık kümeler

Demiryollarında emniyet önlemlerinin değerlendirilmesi genellikle karar vericilerin öznel deneyimlerine dayanmaktadır. Öznel deneyimler çeşitli belirsizlikleri ve kesin olmayan bilgileri içinde barındırmaktadır. Bu nedenle demiryolu emniyet önlemlerini daha iyi değerlendirebilmek için bulanık sayıların kullanılması gereklidir. Zadeh [16], gerçek dünya problemlerinde yer alan belirsizliği ve öznel deneyimlerde bulunan kesin olmama durumlarını modellemek için bulanık küme teorisini tanımlamıştır. Bulanık kümeler, üyelik dereceleri farklı olan elemanlardan oluşan topluluklardır ve elemanlarının her birine 0 ile 1 arasında bir üyelik değeri atanabilen bir üyelik fonksiyonu ile tanımlanır. Bu fonksiyon, kümeye tamamen dâhil olmayan elemanlara 0, tamamen dâhil olan elemanlara ise 1 üyelik değeri atamaktadır. Literatürde yer alan güncel çalışmalarda uzman görüşlerinin içerdiği belirsizlikleri daha iyi tasvir edebilmek için bulanık kümeler, çeşitli şekillerde genişletilmiştir. Atanassov [17], belirsizlikleri modellemek için, üyelik fonksiyonları ve üye olmama fonksiyonları içeren, sezgisel bulanık kümeleri önermiştir. Bu kümeler, bazı durumlarda gerçek hayat problemlerindeki karmaşıklıkları modelleyememektedir. Bu sebeple,

Cuong ve Kreinovich [18] sezgisel bulanık kümeleri genişleterek Resim Bulanık Kümeler kavramını geliştirmişlerdir.

Resim bulanık kümeler, pozitif üyelik derecesi, nötr üyelik derecesi ve negatif üyelik derecesi olmak üzere üç parametreye sahiptir ve bu üç parametrenin toplamının en fazla 1 olması gerekmektedir. Son [19] resim bulanık kümelerin, belirsizlik ve kesin olmama durumlarını sezgisel bulanık kümelerden daha iyi tasvir ettiğini belirtmiştir. Bu yüzden bu çalışmada demiryolu ulaşım emniyet önlemleri değerlendirilirken meydana gelebilecek bilgi belirsizliklerini daha iyi modelleyebilmek için, resim bulanık kümeler tercih edilmiştir. Resim bulanık kümelerin bazı temel tanımları aşağıda verilmiştir:

Tanım 1: X evrensel kümesi içerisinde x bir eleman olsun. X içerisinde yer alan \tilde{P} resim bulanık kümesi Denklem 1'deki gibi gösterilir [18]:

$$\tilde{P} = \{ \langle x, \mu_P(x), \eta_P(x), \nu_P(x) \rangle \mid x \in X \} \quad (1)$$

Burada $\mu_P(x) \in [0,1]$ pozitif üyelik derecesini, $\nu_P(x) \in [0,1]$ negatif üyelik derecesi ve $\eta_P(x) \in [0,1]$ nötr üyelik derecesini ifade etmektedir. Bu üyelik dereceleri Denklem 2'de verilen koşulu sağlamaktadır.

$$0 \leq \mu_P(x) + \eta_P(x) + \nu_P(x) \leq 1 \quad \forall x \in X \quad (2)$$

Resim bulanık kümeler sezgisel bulanık kümelerin genişletilmiş hali olarak karşımıza çıkmaktadır. Resim bulanık kümeleri, sezgisel bulanık kümelerden ayırt etmek için Thong ve Son [20] demokratik bir seçim oylaması örneği vermiştir. Buna göre, seçimde verilen evet oyu μ_P üyelik derecesini, hayır oyu ν_P üye olmama derecesini, çekimser oy verenler η_P nötr dereceyi ve seçimde red oyu verenler π_P red derecesini temsil etmektedir. Burada, çekimser oy verenler hem evet hem hayır ifadelerini red eden ancak yine de oy kullanan kişileri temsil ederken, oylamayı red edenler ya geçersiz oy kullanan ya da oy kullanmayan kişileri göstermektedir. Çekimser oy verenleri ifade eden η_P nötr derece, sezgisel bulanık kümelerden farklı olarak resim bulanık kümelere eklenmiştir. Böylece, farklı sayılardaki dilsel ifadeler üç farklı derece ile oluşturulmuştur. Çalışma kapsamında 7 farklı dilsel ifade ölçeği tercih edilmiş olup, her bir dilsel ifade evet oyu μ_P üyelik derecesine, hayır oyu ν_P üye olmama derecesine ve çekimser oy veren η_P nötr derecesine sahiptir. Karar vericiler görüşlerini belirtirken üç farklı oyu (dereceyi) içeren 7 adet dilsel ifadelerden yararlanmaktadırlar. Denklem 3'te π_P red derecesi hesabı gösterilmektedir. Dördüncü oy olan "red derecesi" dilsel ifade ölçeğinde yer almamaktadır.

$$\pi_P(x) = 1 - (\mu_P(x) + \eta_P(x) + \nu_P(x)) \quad \forall x \in X \quad (3)$$

Tanım 2: $\tilde{P}_1 = (\mu_{P_1}, \eta_{P_1}, \nu_{P_1})$ ve $\tilde{P}_2 = (\mu_{P_2}, \eta_{P_2}, \nu_{P_2})$ iki resim bulanık sayı ve λ pozitif bir sayı olmak üzere, resim bulanık kümelerdeki temel işlemler aşağıda gösterilmiştir [18]:

$$\tilde{P}_1 \oplus \tilde{P}_2 = \{ \mu_{P_1} + \mu_{P_2} - \mu_{P_1}\mu_{P_2}, \eta_{P_1}\eta_{P_2}, \nu_{P_1}\nu_{P_2} \} \quad (4)$$

$$\tilde{P}_1 \otimes \tilde{P}_2 = \{ \mu_{P_1}\mu_{P_2}, \eta_{P_1} + \eta_{P_2} - \eta_{P_1}\eta_{P_2}, \nu_{P_1} + \nu_{P_2} - \nu_{P_1}\nu_{P_2} \} \quad (5)$$

$$\lambda \tilde{P}_1 = \left\{ \left(1 - (1 - \mu_{P_1})^\lambda, \eta_{P_1}^\lambda, \nu_{P_1}^\lambda \right) \right\}, \lambda > 0, \quad (6)$$

$$(\tilde{P}_1)^\lambda = \left\{ \mu_{P_1}^\lambda, \left(1 - (1 - \eta_{P_1})^\lambda \right), \left(1 - (1 - \nu_{P_1})^\lambda \right) \right\}, \lambda > 0. \quad (7)$$

Tanım 3: $\tilde{P}_i = P(\mu_i, \eta_i, v_i)$, $i = (1, 2, \dots, n)$ bir grup resim bulanık sayılardır. Bu kümenin birleştirilmesi için Denklem 8'de verilen resim bulanık ağırlıklı ortalama (RBAO) formülü kullanılır.

$$\text{RBAO}(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_n) = ((1 - \prod_{i=1}^n (1 - \mu_i)^{w_i}), (\prod_{i=1}^n (\eta_i)^{w_i}), (\prod_{i=1}^n (v_i)^{w_i})) \quad (8)$$

Burada $w_i = (w_1, w_2, \dots, w_n)$ ağırlık vektörleridir ve $w_i \in [0, 1]$, $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ özelliklerine sahiptirler.

Tanım 4: $\tilde{P}_1 = (\mu_{P_1}, \eta_{P_1}, v_{P_1})$ ve $\tilde{P}_2 = (\mu_{P_2}, \eta_{P_2}, v_{P_2})$ iki resim bulanık sayı olmak üzere, bu iki sayının kıyaslanması ve sıralanması için skor fonksiyonlarından yararlanır. Skor fonksiyonu formülü Denklem 9'da gösterilmiştir [21]:

$$S(\tilde{P}_1) = \mu_{P_1} - \eta_{P_1} - v_{P_1} \quad S(\tilde{P}_2) = \mu_{P_2} - \eta_{P_2} - v_{P_2} \quad (9)$$

Burada S (P) fonksiyonu [-1, 1] sayıları arasında değer almaktadır.

2.2. Resim bulanık SWARA yöntemi

Kersulienne vd. [22] tarafından 2010 yılında, adım adım ağırlık değerlendirme oran analizi olarak isimlendirilen SWARA (Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis) yöntemi önerilmiştir. Bu yöntem öznel ölçütlerin ağırlıklarını hesaplamayı amaçlamaktadır. SWARA yönteminin avantajlarından biri, karar vericilerin görüşlerini ölçütlerin başlangıç sıralamasında, göreceli karşılaştırmalarında kullanmasıdır. Bu yönüyle uzman görüşlerini ağırlıklandırma sürecine dâhil ederek, daha sağlam ve anlamlı ağırlık atamalarına sebep olmaktadır. Ayrıca SWARA yönteminin, Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) gibi diğer ağırlıklandırma yöntemlerine göre daha az işlem adımına ve daha az ikili karşılaştırmaya sahiptir ki bu da bir diğer avantajıdır.

ÇKKV problemlerinde bulunan belirsizliklerin üstesinden gelmek için resim bulanık kümelerin kullanıldığı göz önüne alındığında, SWARA yöntemi bu çalışma özelinde resim bulanık küme ortamında genişletilmiştir. Resim bulanık SWARA yöntemi resim bulanık sayıları kullanarak, uzman görüşleri doğrultusunda en önemli ölçütleri ilk sıraya, en az önemli ölçütleri ise son sıraya alan bir kavramdır. Resim Bulanık SWARA yönteminin işlem adımları aşağıdaki gibidir [23]:

Adım 1: Tanımlanan problem ile ilgili ölçütler ve uzmanlardan oluşan karar verici ekip belirlenir.

Adım 2: Uzmanlar, resim bulanık sayılara ait dilsel terimleri kullanarak demiryolu ulaşım emniyet önlemlerini değerlendirir.

Adım 3: Uzmanlara ait ağırlıklar belirlenip, RBAO operatörü kullanılarak birleştirilmiş karar matrisi oluşturulur.

Adım 4: Dönüştürme yapılan birleştirilmiş karar matrisindeki resim bulanık sayılar en önemliden en az önemliye doğru sıralanır.

Adım 5: Ölçütlere ait göreceli önem değerleri (H_j) ikinci ölçütten başlayarak tüm ölçütler birbirleri ile karşılaştırılarak bulunur ve karşılaştırma katsayısı (k_j) Eşitlik 10 ile hesaplanır.

$$k_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ H_j + 1, & j > 1 \end{cases} \quad (10)$$

Adım 6: Tüm ölçütlere ait başlangıç ağırlığı (q_j), aşağıda bulunan Eşitlik 11 yardımıyla hesaplanır.

$$q_j = \begin{cases} 1, & j = 1 \\ \frac{q_{j-1}}{k_j}, & j > 1 \end{cases} \quad (11)$$

Adım 7: Ölçütlerin göreceli ağırlıkları ω_i , Eşitlik 12 kullanılarak belirlenir.

$$\omega_i = \frac{q_j}{\sum_{j=1}^n q_j} \quad (12)$$

3. Uygulama ve Bulgular

Demiryolu emniyeti, yolcuların ve çalışanların emniyetini garanti altına almak, kaza riskini en aza indirmek ve demiryolu işletmelerinin sorunsuz bir şekilde faaliyet göstermesini sağlamak açısından hayati bir rol oynamaktadır. Emniyet önlemlerinin belirlenmesi ve sıralanması, demiryolu sektörünün barındırdığı çeşitli emniyet risklerinin ortaya çıkarılması ve bu risklerin yönetilebilmesi için temel bir adım olacaktır. Bu sebeple çalışma kapsamında demiryolu ulaşım emniyet önlemleri, literatür taraması ve uzman ekibin görüşleri doğrultusunda aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır.

Tren Emniyet Teknolojilerinin Geliştirilmesi (K1): İleri teknolojilerle donatılmış bu uygulama, çeşitli sensörler ve iletişim sistemleri aracılığıyla tren hareketlerini ve hattaki diğer trenleri izleyerek emniyetsiz durumları algılamaktadır. Otomatik fren uygulayarak çarpışmaları önlemektedir ve aşırı hız, ani engeller gibi emniyetsiz durumları azaltarak demiryolu emniyetini arttırmaktadır. Feng vd. [24] raylı transit trenlerin emniyet sensör teknolojilerini incelemişler ve mikroçip tabanlı sensörler ve bileşik sensörler gibi etkin şekilde algılamayı ve yüksek performansı sağlayan teknolojilerin akıllı trenler için daha uygun emniyet önlemleri olduğunu belirlemişlerdir.

Demiryolu Taşıtlarının Periyodik Bakımı (K2): Bu önlem, demiryolu taşıtlarının düzenli bakımını içermektedir ve taşıtların emniyetli ve etkin bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır. Bakım, demiryolu taşıtlarının dilgil takımı, boji, şasi, koşum takımları gibi önemli bileşenlerinin kontrolünü ve gerekli tamiratlarını kapsamaktadır. Bununla birlikte, demiryolu taşıtı tekerleğine ait bandaj ve buden kısımlarının bakımı da bu önlemin bir parçasıdır.

Demiryolu Hattı İçin İhata Duvarı Uygulaması (K3): İhata duvarları, demiryolu koridoruna insanların ve hayvanların girişini engellemek için tasarlanmaktadır. Demiryolu hattı boyunca yerleştirilen bu duvarlar, emniyete yönelik potansiyel riskleri azaltmakta ve demiryolu araçlarının seyri/seferini engelleyecek dış etkenlerin girişini önlemektedir. Bu önlem, demiryolu hatlarının çevresel emniyetini artırır, yolcular ve demiryolu personelinin emniyetini sağlamaktadır.

Demiryolu Üstyapısının Periyodik Bakımı (K4): Bu önlem, demiryolu üstyapı elemanlarının düzenli olarak kontrol edilmesini ve bakımını içermektedir. Üstyapıya ait raylar, traversler ve balastın bakımı düzenli olarak yapılmakta ve gerekli onarımlar ve yenilemeler gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, rayı ve traversleri birbirine bağlayan bağlantı elemanlarının (sela, tirfon, pandrol, bağlantı plakaları vb.) bakımı da düzenli olarak kontrol edilmektedir. Matsumoto vd. [7] demiryolu üstyapısı ve araç tekerleği arasında oluşacak hasarları göz önüne alıp, periyodik bakımın gerekliliğine dikkat çekmiştir.

Demiryolu Altyapısının Periyodik Bakımı (K5): Bu önlem, ani iklim değişikliklerine karşı dayanıklı yeni sanat yapıları yapılmasını veya mevcut yapıların periyodik olarak bakımını hedeflemektedir. Bunun yanı sıra, altyapıda kontrol ve bakım çalışmaları düzenli olarak yapılmakta ve gerekli iyileştirmeler uygulanmaktadır. Bu önlem, demiryolu altyapısının

sağlamlığını artırarak emniyet risklerini azaltmaktadır ve operasyonel verimliliği artırmaktadır. Al-Douri vd. [25] altyapı ve üstyapı periyodik bakımlarının emniyet ve kâr için en önemli faktörler olduğunu belirlemişlerdir.

Hemzemin Geçitlerin İyileştirilmesi (K6): Hemzemin geçitlerde bariyerler, uyarı ışıkları ve sesli sinyallerin kurulmasıyla, motosiklet sürücüleri ve yayaları yaklaşan trenlerden haberdar etmek ve izinsiz geçişleri önlemek için gelişmiş bir altyapı oluşturulması önlemdir. Bu yükseltmeler sayesinde hemzemin geçitlerdeki görünürlük ve farkındalık artmakta, trenlerle araçlar veya yayalar arasındaki çarpışma vakalarının azalmasına katkı sağlanmakta ve böylece genel emniyet artırılmaktadır. Nedeliaková vd. [26] hemzemin geçit iyileştirmelerinin önemine dikkat çekmiş, yayalar için bariyerli uyarı cihazı ile polisle bağlantılı kamera sistemi kurulmasını önermişlerdir.

Demiryolu Tüneli Yangın Algılama ve Söndürme Sistemi (K7): Tünel boyunca yerleştirilen yangın algılama sensörleri, olası yangınları erken aşamada tespit etmekte ve otomatik olarak alarm vermektedir. Aynı zamanda, tünel içindeki duman ve toksik gazların yayılmasını önlemek için otomatik yangın söndürme sistemleri devreye girmektedir. Bu sistem, tünel içindeki görüş mesafesinin azalmasını, ısı artışını ve oksijen seviyesinin düşmesini kontrol ederek yangının hızla kontrol altına alınmasını sağlamaktadır. Van Weyenberge vd. [27] yangın durumunda demiryolu tünellerinde can emniyetine yönelik araştırma yapmış ve tahliye koridorları ile yangın algılama sensörlerinin önemine dikkat çekmişlerdir.

Acil Durum Hazırlık ve Personel Eğitim Programı (K8): Acil durum müdahale eğitim programları ve tren makinisti yorgunluk yönetimi programları bütünleştirilerek demiryolu personelinin hem acil durumlara hazırlıklı olmasını hem de günlük operasyonlarda yorgunlukla ilgili riskleri yönetmesini sağlamaktadır. Bu kapsamlı program, kazaları önlemek ve müdahale süreçlerini iyileştirmek için personelin yetkinliklerini ve bilgi düzeyini artırmaktadır.

Demiryolu emniyet önlemlerini tanımlayan ve bu önlemleri tecrübelerine göre sıralayan uzman ekibi Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) Genel Müdürlüğü Modernizasyon Dairesi ve Bakım Dairesi çalışanlarından ve öğretim üyesi akademisyenlerinden oluşmaktadır. Karar verici ekibe dair özellikler Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Karar verme ekibine ait özellikler

| Karar Verme Ekibi | Sektör | Meslek | Deneyim | Akademik Derece |
|----------------------|----------------------------|-------------|---------|-----------------|
| Karar Verici#1 (KV1) | TCDD-Modernizasyon Dairesi | Mühendis | 12 | Yüksek Lisans |
| Karar Verici#2 (KV2) | TCDD-Bakım Dairesi | Mühendis | 10 | Yüksek Lisans |
| Karar Verici#3 (KV3) | TCDD-Modernizasyon Dairesi | Mühendis | 15 | Yüksek Lisans |
| Karar Verici#4 (KV4) | Üniversite | Akademisyen | 12 | Doktora |

Çalışma kapsamında emniyet önlemleri ölçüt olarak ele alınacak ve ölçütlerin ağırlıklarını bulmayı sağlayan bir yöntem olan resim bulanık SWARA metodu kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Meksavang vd. [28] tarafından geliştirilen ve Tablo 3'te yer alan dilsel terimlere karşılık gelen resim bulanık sayı ölçeği, çalışma kapsamında kullanılarak ölçütler değerlendirilmiştir. Tablo 1’de gösterilen uzman ekip sırasıyla KV= {KV1, KV2, KV3, KV4} olarak belirtilip, tecrübelerine ve özgeçmişlerine göre uzman ağırlıkları sırasıyla $w_i = (0,25; 0,2; 0,30 \text{ ve } 0,25)$ şeklindedir.

Tablo 3. Resim bulanık sayılar ve dilsel terimler

| Dilsel Terimler | Resim Bulanık Sayılar |
|-----------------|-----------------------|
| Çok İyi (Çİ) | < 0,10; 0,00; 0,85 > |
| İyi (İ) | < 0,25; 0,05; 0,60 > |
| Biraz İyi (Bİ) | < 0,30; 0,00; 0,60 > |
| Orta (O) | < 0,50; 0,10; 0,40 > |
| Biraz Kötü (BK) | < 0,60; 0,00; 0,30 > |
| Kötü (K) | < 0,75; 0,05; 0,10 > |
| Çok Kötü (ÇK) | < 0,90; 0,00; 0,05 > |

Tablo 4 demiryolu emniyet önlemlerinin Tablo 2’de yer alan dilsel terimler yardımıyla uzman ekip tarafından değerlendirilmesini göstermektedir.

Tablo 4. Önlemlerin dilsel terimlerle değerlendirilmesi

| Önlemler | KV1 | KV2 | KV3 | KV4 |
|--|-----|-----|-----|-----|
| Tren Emniyet Teknolojilerinin Geliştirilmesi (K1): | Bİ | Bİ | Bİ | İ |
| Demiryolu Taşıtlarının Periyodik Bakımı (K2): | İ | BK | Bİ | İ |
| Demiryolu Hattı İçin İhata Duvarı Uygulaması (K3): | BK | BK | K | BK |
| Demiryolu Üstyapısının Periyodik Bakımı (K4): | Çİ | İ | İ | Çİ |
| Demiryolu Altyapısının Periyodik Bakımı (K5): | İ | Çİ | Çİ | Çİ |
| Hemzemin Geçitlerin İyileştirilmesi (K6): | K | ÇK | K | BK |
| Demiryolu Tüneli Yangın Algılama ve Söndürme Sistemi (K7): | ÇK | ÇK | ÇK | K |
| Acil Durum Hazırlık ve Personel Eğitim Programı (K8): | BK | O | BK | K |

Dilsel değerlendirmeler yapıldıktan sonra Eşitlik 8 kullanılarak birleştirilmiş karar matrisi oluşturulmuştur. Ardından Eşitlik 9 yardımıyla birleştirilmiş resim bulanık küme keskin değerlere dönüştürülmüştür. Ölçütlere ait keskin değerler, en önemliden en az önemliye doğru sıralanır ve böylece S_j değerleri elde edilmiştir. Ardından Eşitlik 10 kullanılarak karşılaştırma katsayısı (k_j), Eşitlik 11 ile başlangıç ağırlığı (q_j) hesaplanmıştır. Son olarak, ölçütlere ait göreceli ağırlıklar w_j , Eşitlik 12 yardımıyla hesaplanmıştır. Resim bulanık SWARA sonuçları Tablo 5’te verilmiştir.

Tablo 5. Resim bulanık SWARA sonuçları

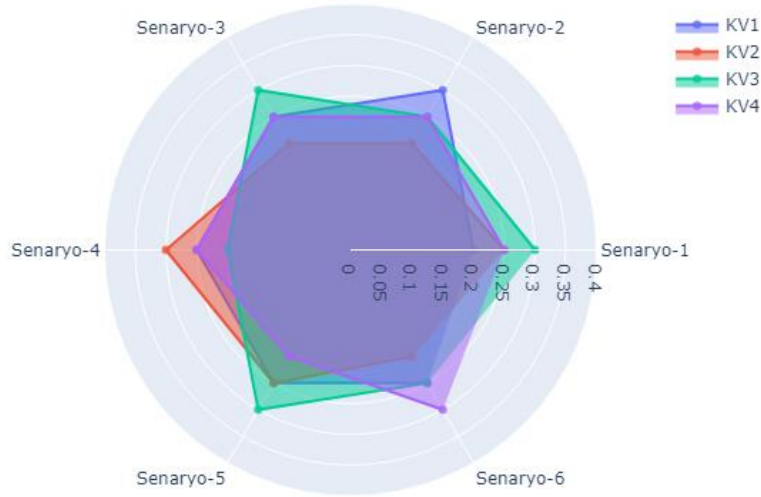
| Demiryolu Emniyet Önlemleri | S_j | k_j | q_j | w_j | Önlemlerin Sıralaması |
|--|--------|-------|-------|-------|-----------------------|
| Demiryolu Altyapısının Periyodik Bakımı (K5): | 0,815 | 1,000 | 1,000 | 0,206 | 1 |
| Demiryolu Üstyapısının Periyodik Bakımı (K4): | 0,771 | 1,044 | 0,958 | 0,197 | 2 |
| Demiryolu Taşıtlarının Periyodik Bakımı (K2): | 0,447 | 1,324 | 0,724 | 0,149 | 3 |
| Tren Emniyet Teknolojilerinin Geliştirilmesi (K1): | 0,416 | 1,031 | 0,702 | 0,145 | 4 |
| Acil Durum Hazırlık ve Personel Eğitim Programı (K8): | -0,219 | 1,635 | 0,429 | 0,088 | 5 |
| Demiryolu Hattı İçin İhata Duvarı Uygulaması (K3): | -0,315 | 1,096 | 0,392 | 0,081 | 6 |
| Hemzemin Geçitlerin İyileştirilmesi (K6): | -0,408 | 1,093 | 0,358 | 0,074 | 7 |
| Demiryolu Tüneli Yangın Algılama ve Söndürme Sistemi (K7): | -0,639 | 1,231 | 0,291 | 0,060 | 8 |

Tablo 5’te belirtildiği gibi Resim Bulanık SWARA yöntemi neticesinde demiryolu altyapı periyodik bakımı ilk sırada, üstyapı bakımı ikinci sırada ve demiryolu taşıtlarının bakımı üçüncü sırada yer alan emniyet önlemleridir. Sıralama; tren emniyet teknolojilerinin geliştirilmesi, eğitim programları, ihata duvarı uygulaması, hemzemin geçit iyileştirmeleri ve tünel içi yangın algılama ve söndürme önlemleri şeklinde devam etmektedir.

3.1. Duyarlılık analizi

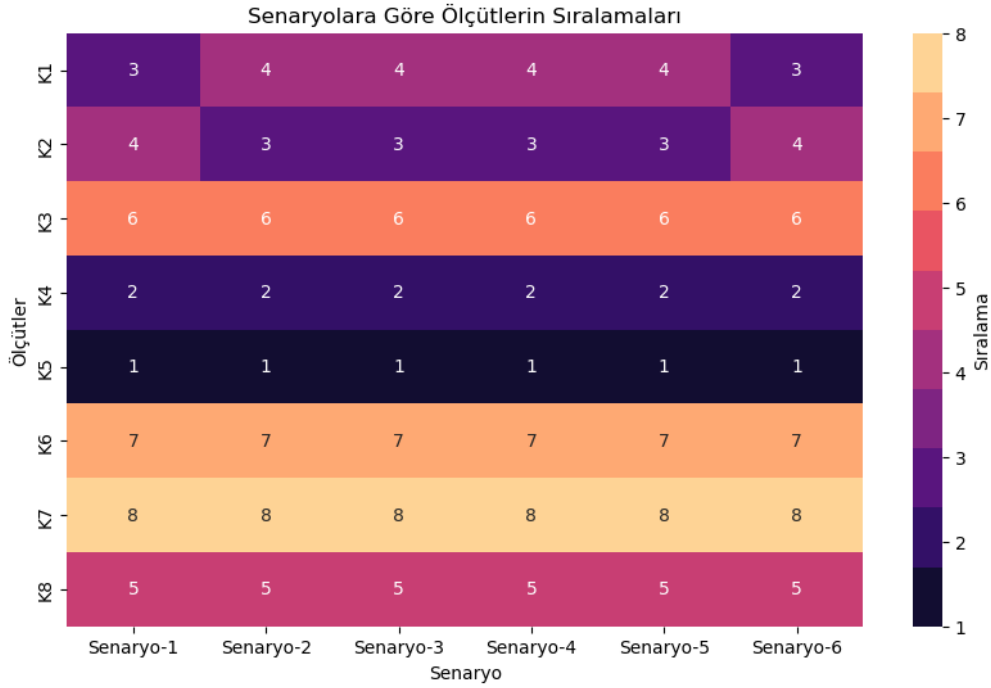
Duyarlılık analizi, farklı ağırlıklar altında her bir ölçütün karar verme süreci üzerindeki etkisini ölçmektedir. Böylece önerilen metodun ağırlık değişikliklerine karşı dayanıklılığını veya hassasiyetini ve metodun doğruluğunu test etmeye yardımcı olmaktadır. Ağırlıklarda meydana gelen değişim, ölçütlerin sıralama düzeninde bir değişikliğe neden olduğunda sonuç duyarlı olarak kabul edilmektedir.

Demiryolu ulaşım emniyeti için önerdiğimiz önlemlerin sıralamalarının değişimlerini incelemek adına 6 farklı senaryo uygulanmıştır. Bu analizde resim bulanık sayıların birleştirilmesinde kullanılan ve $w_i = (0,25; 0,2; 0,30$ ve $0,25)$ şeklinde belirlenen ağırlık setleri birbirleri ile değiştirilerek, Resim Bulanık SWARA yöntemi sonuçları 6 kez tekrar hesaplanmıştır. Karar vericilere atanan ağırlık değerleri her senaryoda farklılık göstermektedir. Senaryolar ve atanan ağırlık değerleri Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Senaryolar ve ağırlık değerleri

Karar vericilere ait ağırlıkların değiştirilmesi sonucu bir ve ikinci sırada bulunan demiryolu altyapısı ve üstyapısı periyodik bakım önlemleri hiçbir senaryoda sıralama değiştirmemiştir. Senaryo-1 ve Senaryo-6 sonucunda dördüncü sırada yer alan tren emniyet teknolojilerinin geliştirilmesi önlemi üçüncü sıraya yerleşmiştir. Model sonucu üçüncü sırada bulunan demiryolu taşıtlarının periyodik bakım önlemleri bu senaryolarda dördüncü sıraya denk gelmektedir. Duyarlılık analiz sonuçları ve ölçütlerin aldığı sıralamalar Şekil 3’te gösterilen ısı haritası yardımıyla görselleştirilmiştir.



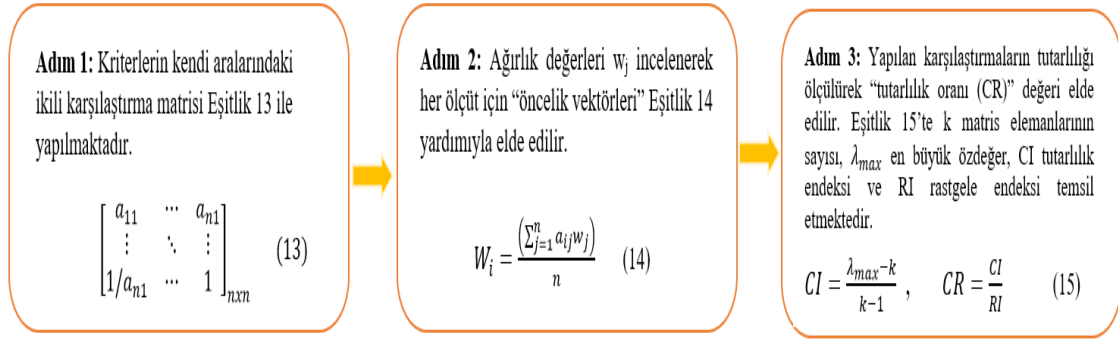
Şekil 3. Duyarlılık analiz sonuçları

Duyarlılık analizi sonucu tüm senaryolarda, ağırlık değerlerinin değişmesine rağmen ilk iki demiryolu emniyet önleminin değişiklik göstermemesi bu karar verme probleminin duyarlı olmadığını göstermektedir. Bu durumda, demiryolu emniyet önlemleri için seçilen Resim Bulanık SWARA yönteminin önlemleri sıralamada tutarlı ve dayanıklı olduğu sonucuna varılabilmektedir.

Uzmanların tecrübelerine bağlı olarak etki düzeylerini gösteren ağırlık değerlerinin 6 farklı senaryoda değişiklik göstermesi sonucunda ilk sıralardaki demiryolu emniyet önlemlerinin değişmemesi, bu yöntemin tercih edilebilir olduğunu göstermektedir; yöntem, değişen ağırlık setlerinden etkilenmemiş ve tutarlı sonuçlar vermiştir.

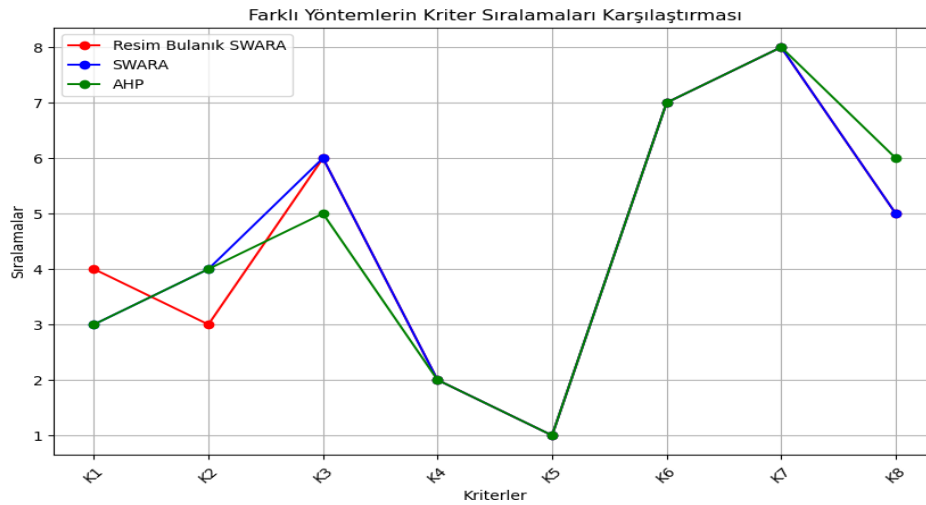
3.2. Karşılaştırma analizi

Çalışma kapsamında kullanılan Resim Bulanık SWARA yöntemine ait hesaplamaların etkinliğini ve sağlamlığını kontrol etmek amacıyla karşılaştırma analizi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda, Resim Bulanık SWARA yöntemi, geleneksel SWARA ve Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. AHP yöntemi Thomas L. Saaty tarafından ortaya çıkarılmış olup [29], karmaşık karar verme süreçlerinde çeşitli kriterlerin sistematik olarak karşılaştırılmasına olanak tanıyarak, tutarlı ve objektif sonuçlar elde edilmesini sağlamaktadır. AHP yönteminin uygulanabilmesi için işlem adımları Şekil 4'te verilmiştir. İkili kriter karşılaştırmaları Saaty tarafından önerilen 1-9 karşılaştırma ölçeği yardımıyla gerçekleştirilmiştir [29].



Şekil 4. AHP yöntemi işlem adımları

Şekil 5 çalışma kapsamında kullanılan Resim Bulanık SWARA yöntemi, geleneksel SWARA ve AHP yöntemlerinin görsel olarak karşılaştırılmasını göstermektedir. Buna göre, bir ve ikinci sırada yer alan demiryolu altyapısı ve üstyapısı periyodik bakım önlemleri tüm yöntemlerde değişiklik göstermemiştir. Ancak, SWARA ve AHP yöntemlerinde, resim bulanık SWARA yönteminden farklı olarak, "Demiryolu Taşıtlarının Periyodik Bakımı" ve "Demiryolu Hattı İçin İhata Duvarı Uygulaması" önlemlerinin sıralamalarda değişiklik gösterdiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, AHP yönteminde, resim bulanık SWARA yönteminden farklı olarak, "Demiryolu Altyapısının Periyodik Bakımı" ve "Hemzemin Geçitlerin İyileştirilmesi" önlemlerinin de sıralamalarda farklılık gösterdiği belirlenmiştir. Tüm yöntemlerde son iki sırada yer alan önlemler değişiklik göstermemiştir. Karşılaştırma analizleri sonucunda, ilk iki kriterin Resim Bulanık SWARA yöntemi ile diğer karşılaştırma yöntemlerinde aynı sonucu vermesi, bu yöntemin geçerliliğinin ve doğru çalıştığının bir göstergesidir.



Şekil 5. Karşılaştırma analizi sonuçları

Karşılaştırma sonuçlarını değerlendirirken, geleneksel yöntemlerin sınırlamalarını vurgulamak ve bu yöntemleri resim bulanık kümelerin sağladığı avantajlarla karşılaştırmak önemlidir. Geleneksel karar verme yaklaşımları genellikle karar kriterlerinin çok yönlü doğasını ve karar vericilerin öznel değerlendirmelerini yeterince yakalayamamaktadır. Ayrıca, uzmanların oylama mekanizmaları geleneksel yöntemlerde göz ardı edilmektedir. Buna karşılık, resim bulanık kümelerin esnekliği ve karmaşık problemleri etkin bir şekilde ele alabilme yeteneği, demiryolu güvenlik önlemleri gibi komplike bir problemin daha doğru ve kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini sağlamaktadır. Aynı zamanda, resim bulanık kümelerde karar vericilerin dört farklı oy mekanizmasına sahip olması, demiryolu güvenlik problemlerinin daha kapsamlı şekilde

ele alınmasını sağlamaktadır. Çalışma kapsamında resim bulanık SWARA yöntemi yerine geleneksel SWARA yöntemi kullanılması durumunda, üçüncü ve dördüncü güvenlik önlemlerinde değişiklik olduğu gözlemlenmektedir. Geleneksel SWARA yönteminin, resim bulanık SWARA düzeyinde öznel değerlendirmeleri hassas ve doğru bir şekilde ele alamaması, bu yöntemle elde edilen sıralama sonuçlarının güvenilirliğini düşürmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma hem yolcuların hem de demiryolu çalışanlarının emniyeti açısından önemli bulgular içermektedir. Araştırmanın motivasyonu demiryolu sektöründe emniyet önlemlerinin etkili bir şekilde belirlenmesi ve önceliklendirilmesi için bir çerçeve oluşturarak, potansiyel kaza risklerini azaltmaktır. Bu amaçla uzman ekip görüşleri ve kapsamlı yazın taramasının ardından 8 ana demiryolu emniyet önlemi belirlenmiştir.

Belirlenen emniyet önlemleri Resim Bulanık SWARA yöntemi kullanarak önceliklendirilmiştir. Metodun uygulanması sonucunda, demiryolu altyapı periyodik bakımı ilk sırada, demiryolu üstyapı bakımı ikinci sırada ve demiryolu taşıtlarının bakımı üçüncü sırada yer almıştır. Al-Douri vd. [25] İsveç demiryollarının performansını incelemişler ve altyapı ve üstyapı periyodik bakımlarının demiryolu endüstrisinde hem emniyeti hem de kâr elde etmeyi destekleyen en önemli faktör olduğunu ortaya çıkartmışlardır. Stabil olmayan yarma şevleri, zeminde çökme, tasman ve heyelan gibi altyapı deformasyonları ve yeryüzü suyu sebebiyle oluşan tahribatlar demiryolu altyapı sorunlarını oluşturmaktadır. Altyapıda oluşan sorunlar önlem alınmazsa hattın çökmesine, köprü ve tünellerin deformasyonuna, heyelan sebepli hatların kaymasına ve kıyı erozyonuna sebep olmaktadır. Büyük oranda can kayıplarına sebep olabilecek bu sonuçlara alınması gereken önlemler ilk sırada yer almıştır. Altyapı sorunlarını önlemek için köprü, tünel, menfez gibi sanat yapılarının bakımlarının yapılması, altyapıyı zamanla bozan suyun drenajının sağlanması, heyelanlı bölgelerde zeminin iksa/istinat duvarı, fore kazık, kaya dolgu vb. yapılarla sağlanması gibi önlemler alınmalıdır.

Ray yüzeyinde aşınma, çatlama ve kırılmalar, traverslerde eker hataları, çürüme ve aşınmalar, conta bağlantı sorunları, cebire kırılmaları gibi bağlantı malzemesi eksen sorunları, geometrik bozukluklar demiryolu üstyapı sorunlarını oluşturmaktadır. Önerdiğimiz yöntem sonucunda ikinci sıraya yerleşen demiryolu üstyapı önlemleri alınmazsa, ray profilinin bozulması, parça kopmaları, ekartman bozulmaları, ray yürümesi ve deray gibi ciddi sorunlar ortaya çıkabilmektedir. Üstyapı ile ilgili kusurların giderilmesi için periyodik olarak makineli veya el aletleri ile bakım yapılması gerekmektedir.

Uygulanan yöntem sonucunda demiryolu taşıtlarının bakımı ve tren emniyet teknolojileri uygulamaları üçüncü ve dördüncü sıralarda önemli emniyet önlemleri olarak belirlenmiştir. Demiryolu taşıtlarının karoseri kısmından bandaj konikliğine kadar oluşabilecek tüm kusur ve arızaların periyodik bakımı büyük önem taşımaktadır. Örneğin, bandaja verilen koniklik sayesinde dış ve iç teker arasındaki dönme uyumu düzeliyor kaymalar yaşanmayacaktır. Demiryolu taşıtlarının ve parçalarının gerekli tamiratları yapılarak seyrüsefer esnasında arıza yaşanma olasılığı azaltılmış olacaktır. Sensörler ve iletişim sistemleri kullanılarak oluşturulmuş sinyalli hatlar sayesinde tren hareketleri izlenebilmektedir; böylece emniyetsiz durumlar sinyaller sayesinde tespit edilmektedir. Aşırı hız veya ani engeller gibi durumlarda otomatik fren uygulamasına ek olarak, izlenen tren hareketleri sonucunda bir hat üzerinde bir tren bulunduğu, o kısımdan trenin çıkması beklenmekte ve ardından bir sonraki tren o hatta gönderilmektedir. Bununla birlikte, Crawford ve Kift [30], ileri teknolojilerin demiryollarında sağlık ve emniyet konuları için çeşitli olumsuz etkilerini dile getirmiştir. Bu etkiler, karmaşıklıkla sürekli artan sistemlerin son kullanıcılar tarafından benimsenmesinde meydana gelen güçlükler, veri güvenliği ve gizliliği ile ilgili kaygılar ve kontrolörler için değişen bilişsel zorluklardan oluşmaktadır. Emniyet risklerini azaltmak için her bir demiryolu taşıtı bileşeni için belirlenmiş

bakım yöntemlerinin ve standartların oluşturulup, bunların etkin bir şekilde bileşenlere uygulanması gerekmektedir. Ayrıca ileri teknolojilerin demiryolu hatları ve taşıtlarıyla bütünleştirilmesi, demiryolu personelinin bu yeni emniyet teknolojilerinin kullanımı ile ilgili eğitilmesi gerekmektedir.

Demiryolu emniyet önlemleri sırasıyla eğitim programları, ihata duvarı uygulaması, hemzemin geçit iyileştirmeleri ve tünel içi yangın algılama ve söndürme önlemleri şeklinde devam etmektedir. Demiryolu personelinin eğitimi acil durumlara hazırlıklı olma, yorgunlukla ilgili riskleri yönetme ve sorumlu olduğu kritik işleri eksiksiz tamamlaması bakımından önemlidir. Örneğin, trenlerin istasyonda dururken vagonların frenlerinin personel tarafından çekilmemesi, vagonların hat üzerinde bağımsız olarak hareket etmesine ve akabinde ciddi kazalara neden olmasına yol açmaktadır. Demiryolu araçlarının seyrüseferini engelleyecek dış etkenlerin müdahalesini önlemek amacıyla demiryolu hattı boyunca ihata duvarı örülmesi, çarpışma veya diğer emniyet ihlalleri riskini azaltmaktadır. Yaya yoğunluğunun olduğu bölgelerde, hatta girişlerin engellenmesi için üstgeçit veya altgeçitlerin yapılması ve yayaların bu alanlara yönlendirilmesi gerekmektedir. Demiryolu ve karayolunun birleştiği hemzemin geçitlerde yaşanan kaza sayıları TCDD İstatistik Yıllığı verilerine göre yüksek sayıdadır. Hemzemin geçitlerde kazaların yaşanmaması için bariyerler, uyarı ışıkları ve sesli sinyaller gibi önlemler koyulmalı, hemzemin geçit bölgelerinin bakımı standartlara uygun şekilde yapılmalıdır. Bununla birlikte, görüş mesafesi açısından, karayolu ve demiryolu birbirine dik şekilde gelmelidir; açılı şekilde birleşen hemzemin geçitler görüş mesafesini azaltmakta ve kazalara neden olabilmektedir. Nedeliaková vd. [26] hemzemin geçitlerde yaşanan kaza risklerini analiz etmiş ve yayalar için bariyerli uyarı güvenlik cihazı ile birlikte yol boyunca bir kaldırım yapılması, hemzemin geçitteki olayları izlemek için polisle bağlantılı kamera sistemi kurulması gibi önlemleri önermişlerdir. Uyguladığımız model sonucunda yangın algılama ve söndürme önlemleri son sırada çıkmıştır. Bunun temel sebebi, tünellerde yangın riskinin diğer emniyet risklerinden daha az olmasıdır. İhtimal az da olsa, tünellerde yangınları erken aşamada tespit eden ve otomatik alarm verip yangını söndüren sistemlerin bulundurulması gerekmektedir.

Çalışma kapsamında, uyguladığımız metodun ağırlık değişikliklerine karşı dayanıklılığını ve hassasiyetini ölçmek için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Karar vericilere atanan ağırlık değerlerinin değiştirilmesiyle 6 farklı senaryo elde edilmiş, analiz sonucunda uyguladığımız yöntem tutarlı ve dayanıklı bulunmuştur.

Bu çalışmanın sonuçları, demiryolu sektöründeki uygulayıcılara ve araştırmacılara yönelik kılavuz niteliğindedir. Araştırma kapsamında ortaya çıkarılan emniyet önlemleri, kaza risklerini azaltacak ve yolcu ile personel emniyetini artıracaktır. Bu sayede, demiryolu sektöründe faaliyet gösteren karar vericilere, hangi emniyet önlemlerinin öncelikli olduğu konusunda rehberlik edilerek hangi alanlara daha fazla yatırım yapılması gerektiği belirlenecektir. Önceliklendirilen önlemler, yeni teknolojilere ve uygulamalara odaklanmaktadır ve demiryolu sektöründeki standartları yükseltmektedir. Bu da demiryolu sistemlerinin daha teknolojik ve emniyetli hale gelmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca, çalışma kapsamında kullanılan Resim Bulanık SWARA yöntemi farklı ulaştırma problemlerine de uygulanabilmesi bakımından esnek ve güçlü bir yöntemdir. Özgün parametreleri, yöntemi ve karar vericiler için önemli bulguları dikkate alındığında, bu araştırma mevcut literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır.

Gelecek çalışmalarda çalışma kapsamında kullanılan yöntemin demiryolu sektörü performans verimliliği, enerji yönetimi gibi konulara uygulanabilmesi söz konusudur. Ayrıca Resim Bulanık kümeler TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), VIKOR (VİseKriterijumsa Optimizacija I Kompromisno Resenje) gibi geleneksel yöntemler için genişletilip demiryolu problemlerine uygulanabilmesi mümkündür.

Teşekkür

Çalışma kapsamında uzman görüşlerini bildiren TCDD Modernizasyon Dairesi ve Bakım Dairesi çalışanlarına katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Kaynakça

- [1] European Environment Agency, “Passenger and freight transport demand in Europe,” 2021. [Online]. Available: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/passenger-and-freighttransport-demand/assessment-1> [Accessed March 20, 2024]
- [2] Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, Trafik Dairesi Başkanlığı, “Kaza Araştırma ve İnceleme Yönergesi,” 2014. [Online]. Available: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/mevzuat/mulga/yonergeler/kazaaras.doc> [Accessed March 20, 2024]
- [3] TCDD, “Yıllara Göre TCDD İstatistik Yıllığı,” 2022. [Online]. Available: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/istapor/20182022.pdf> [Accessed March 25, 2024]
- [4] R. Liu, & N. Moini, “Benchmarking transportation safety performance via shift-share approaches,” *Journal of Transportation Safety & Security*, vol. 7, no. 2, pp. 124-137, Nov. 2014.
- [5] F. Wegman, J. Commandeur, E. Doveh, V. Eksler, V. Gitelman, S. Hakkert, D. Lynam, & S. Oppe, “SUNflowerNext: Towards a composite road safety performance index,” *Deliverable*, vol. 6, no. 16, 2008.
- [6] P. A. Singleton, & L. Wang, “Safety and security in discretionary travel decision making: Focus on active travel mode and destination choice,” *Transportation Research Record*, vol. 2430, no. 1, pp. 47-58, Jan. 2014.
- [7] A. Matsumoto, Y. Michitsuji, Y. Ichianagi, Y. Sato, H. Ohno, M. Tanimoto, A. Iwamoto, & T. Nakai, “Safety measures against flange-climb derailment in sharp curve-considering friction coefficient between wheel and rail,” *Wear*, vol. 432, 202931, Aug. 2019.
- [8] D. M. Z. Islam, K. Laparidou, & A. Burgess, “Cost effective future derailment mitigation techniques for rail freight traffic management in Europe,” *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 70, pp. 185-196, Sep. 2016.
- [9] H. Sümbül, A. Böğrek, A. Tunçer, “Demiryolu ulaşım güvenliği için makinist uyarım sistemi kavramsal tasarımı ve simülasyonu,” *Demiryolu Mühendisliği*, no. 14, pp. 1-13, July. 2021. doi: 10.47072/demiryolu.832113
- [10] J. Li, X. Xu, Z. Yao, & Y. Lu, “Improving service quality with the fuzzy TOPSIS method: a case study of the Beijing rail transit system,” *IEEE Access*, vol. 7, pp.114271-114284, Aug. 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2932779
- [11] A. Blagojević, S. Kasalica, Ž. Stević, G. Tričković, & V. Pavelkić, “Evaluation of safety degree at railway crossings in order to achieve sustainable traffic management: A novel integrated fuzzy MCDM model,” *Sustainability*, vol. 13, no. 2, pp.832, Jan.2021.
- [12] M.B. Bouraima, Y. Qiu, Ž. Stević, & V. Simić, “Assessment of alternative railway systems for sustainable transportation using an integrated IRN SWARA and IRN CoCoSo model,” *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 86, 101475, April 2023.
- [13] G. Ćirović & D. Pamučar (2013). “Decision support model for prioritizing railway level crossings for safety improvements: Application of the adaptive neuro-fuzzy system.” *Expert Systems with Applications*, 40(6), 2208-2223.
- [14] M. An, Y. Chen & C. J. Baker (2011). “A fuzzy reasoning and fuzzy-analytical hierarchy process based approach to the process of railway risk information: A railway risk management system.” *Information Sciences*, 181(18), 3946-3966.
- [15] V. Sangiorgio, A. M. Mangini & I. Precchiazzi (2020). “A new index to evaluate the safety performance level of railway transportation systems.” *Safety science*, 131, 104921.
- [16] L.A. Zadeh, “Fuzzy sets,” *Information and control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, June 1965.
- [17] K.T. Atanassov, “Intuitionistic fuzzy sets,” *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 20, no. 1, pp. 87–96, Aug. 1986.
- [18] B. C. Cuong, & V. Kreinovich, “Picture fuzzy sets,” *Journal of computer science and cybernetics*, vol. 30, no.4, pp.409-420, Feb. 2014.
- [19] L.H. Son, “Measuring analogousness in picture fuzzy sets: from picture distance measures to picture association measures,” *Fuzzy Optimization and Decision Making*, vol. 16, pp. 359-378, Sep. 2016.

- [20] P.H. Thong & L. H. Son (2016). "Picture fuzzy clustering: a new computational intelligence method." *Soft computing*, 20(9), 3549-3562.
- [21] H. Garg, "Some picture fuzzy aggregation operators and their applications to multicriteria decision-making," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 42, no. 12, pp. 5275-5290, Jun. 2017.
- [22] V. Keršulienė, E. K. Zavadskas, & Z. Turskis, "Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (SWARA)," *Journal of business economics and management*, vol. 11, no. 2, pp. 243-258, Jun 2010.
- [23] M. K. Saraji & D. Streimikiene (2022). "Evaluating the circular supply chain adoption in manufacturing sectors: A picture fuzzy approach." *Technology in Society*, 70, 102050.
- [24] J. Feng, J. Xu, W. Liao & Y. Liu (2017). "Review on the traction system sensor technology of a rail transit train." *Sensors*, 17(6), 1356.
- [25] Y.K. Al-Douri, P. Tretten & R. Karim (2016). "Improvement of railway performance: a study of Swedish railway infrastructure." *Journal of Modern Transportation*, 24, 22-37.
- [26] E. Nedeliaková, J. Sekulová & I. Nedeliak (2016). "A New Approach to the Identification of Rail Risk at Level Crossing." *Procedia Engineering*, 134, 40-47.
- [27] B. Van Weyenberge, X. Deckers, R. Caspeele & B. Merci (2016). "Development of a risk assessment method for life safety in case of fire in rail tunnels." *Fire technology*, 52, 1465-1479.
- [28] P. Meksavang, H. Shi, S.M. Lin & H.C. Liu (2019). "An extended picture fuzzy VIKOR approach for sustainable supplier management and its application in the beef industry." *Symmetry*, 11(4), 468.
- [29] T.L. Saaty, J.P. Bennett (1977). "A theory of analytical hierarchies applied to political candidacy." *Behavioral Science*, 22, 237-245.
- [30] E.G. Crawford & R.L. Kift (2018). "Keeping track of railway safety and the mechanisms for risk." *Safety science*, 110, 195-205.

Özgeçmiş



Gözde BAKİOĞLU

Lisans eğitimini çift ana dal yaparak ve bölüm birincisi olarak Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği ve Harita Mühendisliği Bölümlerinde tamamlamıştır. Yüksek Lisans eğitimini Boğaziçi Üniversitesi'nde, Doktora eğitimini ise İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, Ulaştırma Mühendisliği biriminde tamamlamıştır. Doktora sürecinde bir yıl boyunca Kanada/Toronto Üniversitesi Ulaştırma Araştırma Enstitüsü'nde çalışmalar yapmıştır. 2015-2024 yılları arasında İTÜ İnşaat Mühendisliği Ulaştırma biriminde Araştırma Görevlisi olarak görev yapmış, daha sonra Marmara Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümüne Doktor Öğretim Üyesi olarak atanmıştır.

E-Posta: gozde.bakioglu@marmara.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.