



Ankara – İstanbul YHT Hattındaki Tren Atama Problemi İçin Matematiksel Model Yaklaşımları

Enver Kerem KAYA^{id}, Melike SÖNMEZ^{id}, Emine AKYOL ÖZER^{*id}

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

*emineakyol@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 24.11.2023, Kabul/Accepted: 29.02.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Demiryolu sektöründe görev yapan planlamacılar, güzergahlar arasında yapılacak seferleri en verimli ve etkili şekilde yönetmek zorundadır. Bu çalışmada, demiryolu şirketlerinin operasyonel süreçlerini optimize etmelerine yardımcı olacak iki 0-1 tamsayı matematiksel programlama modeli önerilmiştir. İlk modelin amacı, iki hat arasında yapılacak seferlere, farklı enerji tüketimine sahip trenler arasından toplam enerji tüketimini en küçükleyecek şekilde tren atamasını sağlamaktır. İkinci model ise, bu hattaki seferleri minimum sayıda trenle gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Önerilen modeller, GAMS yazılımında kodlanmış ve Cplex çözücüsü kullanılmıştır. Ankara-İstanbul arasındaki yüksek hızlı tren seferleri ile ilgili veriler kullanılarak, önerilen çözüm yaklaşımlarının performansı test edilmiştir. Elde edilen sonuçlar karar vericilerin tercihlerine göre analiz edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Tren atama, Tren Çizelgeleme, Raylı sistemler, Matematiksel modelleme, Enerji-etkin çizelgeleme

Mathematical Model Approaches For Train Assignment Problem on Ankara – Istanbul High-Speed Train Line

Abstract: In the railway sector, planners responsible for operations must efficiently and effectively manage train services between routes. Addressing this problem, this study proposes two binary mathematical programming models to assist railway companies in optimizing their operational processes. The objective of the first model is to allocate trains between two lines in a way that minimizes the total energy consumption among trains with different energy profiles. The second model aims to execute services on the route with the minimum number of trains. The proposed models were coded in the GAMS software and solved using the Cplex solver. To test the performance of the suggested solution approaches, it was conducted using high-speed train services data between Ankara and Istanbul. The obtained results were analyzed based on decision-makers' preferences.

Keywords: Train assignment, Train Scheduling, Railroad systems, Mathematical modelling, Energy-efficient scheduling

1. Giriş

Sürdürülebilir bir gelecek, mevcut varlıkların en verimli şekilde kullanılması ve olabilecek en iyi şekilde korunmasıyla doğru orantılıdır. Bu bağlamda, ulaşım türleri incelendiğinde havayolu, karayolu ve demiryolu arasında gerek yakıt kullanımı gerek ise CO_2 emisyonu bakımından en çevreci ulaşım türü demiryolu ulaşımıdır. Özellikle son yıllarda, ülkemizde demiryolu ulaşımı ile taşınan yolcu sayısı, yüksek hızlı trenlerin (YHT) kullanımı ile oldukça artmıştır. Bu sebeple, daha çevreci olan bu ulaşım türünde bile enerji-etkin yaklaşımların uygulanması sürdürülebilir kalkınma bakımından oldukça önemlidir.

Literatürde, demiryolu çizelgeleme konusunda çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Boroun vd. [1] tren sefer çizelgesinin oluşturulması için bir matematiksel model ve bir sezgisel algoritma önermişlerdir. Yang vd. [2] ise farklı zaman dilimlerindeki yolcu talebini dikkate alan demiryolu

Atıf için/Cite as: E.K. Kaya, M. Sönmez, E. Akyol Özer, “Ankara – İstanbul YHT hattındaki tren atama problemi için matematiksel model yaklaşımları,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 1-10, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1395761

hattının verimliliğini arttırmayı amaçlayan bir tren sefer çizelgesi oluşturma problemine odaklanmıştır. Problemin çözümü için Lagrange gevşetmesine dayalı iki adımdan oluşan bir model önerilmiş ve bu model, Beijing Yizhuang hattındaki veriler kullanılarak test edilmiştir. Xu vd. [3] çalışmalarında, tek hatlı bir demiryolundaki çizelgeleme problemini ele almış, problemin çözümü için benzetim tabanlı bir sezgisel algoritma geliştirilmiştir. Huang vd. [4] ise, metro hatlarındaki tren arızalarından kaynaklanan gecikmeler için, yolcu memnuniyetini arttırmayı amaçlayan bir yeniden çizelgeleme modeli önermişlerdir. Gültekin ve Eren [5] tren hattındaki gecikmeleri azaltmak için 0-1 tam sayılı programlama modeli ve benzetim olmak üzere iki çözüm yöntemi önermişlerdir. 16 istasyonlu 6 trenin çalıştığı Yeniçubuk-Çetinkaya demiryolu hattında örnek bir uygulama yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar mevcut durumla karşılaştırılmış, önerilen modelle gecikmelerde %81,59 oranında iyileşme sağlandığı vurgulanmıştır. Ayrıca, tek hatlı yolların çift hatta dönüştürülmesi durumunun gecikmelere olan etkisi önerilen bir benzetim modeli ile analiz edilmiştir. Yalçınkaya [6] ise çalışmasında, demiryolunun kapasitesi ve diğer işletme kısıtlarını dikkate alan tren tarifesi oluşturma problemi için bir benzetim modeli önermiştir. Amaç, demiryolu koridorundaki tüm istasyonlar için trenlerin istasyona geliş ve kalkış sürelerini hesaplayan olurlu bir tarife oluşturmak ve bu tarifeye bağlı ortalama tren seyahat süresini elde etmektir. Geliştirilen benzetim modelinin yapısı rastgele olayları içerdiğinden, yeniden çizelgeleme/sevk etme problemleri için de kullanılabilmesi öngörülmüştür. Li vd. [7] çalışmasında tren rotalama ve tren çizelgeleme problemini birlikte ele almışlardır. Problemin çözümü için 0-1 karma tamsayı ve doğrusal olmayan bir model önermişlerdir. Ayrıca, gecikme bilgilerini kullanarak elde edilen rotaları iyileştirmek için bir algoritma ve bu çözümleri optimize etmek için bir tabu arama prosedürü geliştirmişlerdir. Benzetim modeli ile elde edilen sonuçlara göre, bu yöntemin optimal çözüme oldukça yaklaştığı ifade edilmiştir.

Literatürde son yıllardaki tren çizelgeleme problemini ele alan çalışmalarda, minimum enerji tüketimi öne çıkan amaçlardan biri olarak göze çarpmaktadır [8-11]. Mo vd. [12], metro sistemlerinde toplam enerji tüketimini azaltmak için optimal tren çizelgesi ve tren dizisi dolaşım planını eş zamanlı olarak oluşturan entegre bir model önermiştir. Tren dönüş ve dolaşım kısıtlamalarını, dinamik yolcu taleplerini ele alan doğrusal programlama modeli Pekin-Yizhuang Metro Hattı üzerinde test edilmiştir. Jin vd. [13] ise, metro sistemlerinin enerji tüketimini azaltmak için bir tren çizelgeleme modeli oluşturmayı hedeflemiştir. Model, tren işletmelerini koordine etmek için regeneratif fren enerjisinin kullanımını artırmayı ve alt istasyon tepe gücünü azaltmayı amaçlamaktadır. Guangzhou Metro Hatları üzerinde yapılan çalışmalar, regeneratif fren enerjisi kullanımının %23 artabileceğini, alt istasyon enerji tüketiminin %14 azalabileceğini ve alt istasyon tepe gücü süresinin %66 azalabileceğini göstermiştir. Hasanzadeh vd. [14] çalışmalarında, elektrikli demiryolu sistemlerinde optimum enerji tüketimi için etkin bir tren çizelgesi oluşturmayı hedeflemiştir. Çözüm yöntemi olarak parçacık sürüsü optimizasyonu algoritmasından yararlanmışlardır. Önerilen algoritma, hat eğimi, hız sınırları, tren varış süreleri, motordan frenleme geçiş gibi pek çok faktörü dikkate almıştır. Önerilen algoritmanın performansı, Tahran Kenti ve Banliyö Demiryolu İşletme Şirketi'nin 2. Hattı'na uygulanarak ortaya koyulmuştur. Zhang vd. [15] ise, kentsel raylı transit trenler için tren gecikmelerini dikkate alan enerji verimli bir zaman çizelgesi geliştirmeyi hedeflemiştir. Problemin çözümü için iki aşamalı bir algoritma önerilmiştir. İlk aşamada, geliştirilmiş bir diferansiyel evrim algoritması kullanılarak trenin enerji tasarruflu işletim stratejisi optimize edilmiş ve hattın her bölümünde trenin optimal çalışma süresi-enerji tüketimi çözüm kümesi elde edilmiştir. İkinci aşamada ise, gecikmiş trenin zaman çizelgesi hızlı bir iteratif algoritma ile tekrar planlanmıştır. Corlu vd. [16] ve Fernández vd. [17] gibi derleme çalışmalar da literatürdeki çalışmalar değerlendirilmiş ve potansiyel çalışma alanları için öneriler sunulmuştur.

Erişilebilen literatürde, demiryolu çizelgeleme problemlerinde enerji odaklı amaçların günden güne öneminin artması göze çarpmaktadır. Bu bakış açısıyla, bu çalışmada benzer şekilde İstanbul-Ankara hattında yapılan seferlere, mevcut tren tipi/sayısı ve operasyonel kısıtları göz önünde bulundurularak toplam enerji tüketimini enküçükleyecek tren ataması problemi ele

alınmıştır. Problemin çözümü için 0-1 tamsayıli bir matematiksel model (M1) geliştirilmiştir. Ayrıca, M1 modelinin kısıtları kullanılarak, iki hat arasında yapılan seferler için gereken minimum tren sayısını belirlemek amacıyla ikinci bir matematiksel model (M2) sunulmuştur. M1 modeli tren atama problemini taktiksel planlama seviyesinde, M2 modeli ise stratejik planlama seviyesinde dikkate almıştır. Bu çalışmanın, erişilebilen literatürden farkı tren atama problemini farklı karar verme seviyelerinde ele almış olmasıdır. Ayrıca erişilebilen çalışmalarda, genellikle tren seferi oluşturma problemine odaklanmış olup, seferlere atanan tren sayıları üzerinde durulmamıştır.

Problem tanımı ve bu modellerin detayları ikinci bölümde verilmiştir. Üçüncü bölümde, Ankara-İstanbul hattındaki seferler kullanılarak matematiksel modellerle elde edilen sonuçlar yer almaktadır. Dördüncü bölümde ise, çalışmanın özeti ve gelecekteki çalışmalar hakkında bilgi verilmiştir.

2. Problem Tanımı ve Matematiksel Modeller

Ankara ve İstanbul (Pendik) YHT istasyonu arasında hafta içindeki herhangi bir günde Ankara-İstanbul 9, İstanbul-Ankara 9 sefer olmak üzere toplam 18 sefer yapılmaktadır. Tablo 1’ de bu seferlerin zaman çizelgesi verilmiştir. Her iki istasyon için de günün ilk seferlerinde ve son 2 seferlerinde yolcu talebi oldukça yüksektir.

Tablo 1. Ankara-İstanbul hattında gerçekleşen seferler

Ankara – İstanbul			İstanbul-Ankara		
Sefer no	Kalkış zamanı	Varış zamanı	Sefer no	Kalkış zamanı	Varış zamanı
1	06:00	09:49	10	06:37	10:30
2	07:15	11:19	11	07:57	12:04
3	09:20	13:20	12	10:21	14:29
4	10:45	14:51	13	12:03	16:01
5	11:25	15:26	14	13:59	18:09
6	13:00	16:53	15	15:53	19:52
7	15:35	19:35	16	17:28	21:34
8	17:45	21:47	17	17:50	22:01
9	19:15	23:11	18	19:53	23:53

Halihazırda, YHT hizmetlerinde faaliyet gösteren HT65000 ve HT80000 olmak üzere toplam iki tip yüksek hızlı tren seti mevcuttur. HT65000, İspanya menşeli CAF şirketinden tarafından üretilmektedir. Tren setleri toplamda 6 vagon içermektedir ve 419 yolcu kapasitesine sahiptir. HT80000 tren seti Siemens Velaro marka olup, Almanya menşeli Siemens AG tarafından üretilmektedir. 8 vagonlu oluşan tren setinin yolcu kapasitesi 500’ den fazladır. HT65000 model trenler azami 250km/s hıza ulaşabilirken HT80000 model trenler ise azami 300km/s hıza çıkabilmektedir fakat Türkiye’deki demiryolları standartları nedeniyle her iki model tren de azami 250km/s hız ile seyahat edebilmektedir. Ayrıca, her iki tren tipi için de sefer sonrasında 40 dakika ile 1,5 saat arası süren kontrol ve temizlik işlemlerinin yapılması gerekmektedir. Bu işlemler tamamlandıktan sonra trenlerin yeniden sefere çıkması mümkündür.

Farklı teknik özelliklere sahip HT65000 ve HT80000 tren setinin enerji tüketimi de farklıdır. Bu çalışmada, enerji tüketimi (E), tren direnci (R), taşıt tonajı (T) ve hat uzunluğu (L_{hat}) kullanılarak hesaplanmıştır. Denklem 1’ de verilmiştir.

$$E = RTL_{hat} \quad (1)$$

Akbayır ve Çayır [18]' in çalışmalarında da vurgulandığı üzere, tren direnci ile ilgili çalışmalar incelendiğinde ampirik verilere dayalı tren direnci formüllerinin ilk olarak Schmidt [19] tarafından kullanılmıştır. Tren direnci hıza bağlı ikinci derece bir polinomla ifade edilmekte olup, bu eşitlik Davis Eşitliği olarak adlandırılmaktadır. Bu denklem, Denklem 2' de verilmiştir.

$$R = A + BV + CV^2 \quad (2)$$

Denklem 2' de A parametresi mekanik direnç anlamına gelir; dingil yükü, dingil sayısı, trenin uzunluğu, aracın tipi ve yol tipi gibi parametreler ile değişmektedir. A parametresi, dingil yükü ve toplam tren yükü ile doğrusal artmaktadır. Denklem 3' de A parametresinin hesaplama denklemi verilmiştir. Buna göre T , ton cinsinden toplam tren yükünü, m dingil yükünü ifade etmektedir. λ ise, araca bağlı bir parametre olup, SNCF araçları için 0,9 ile 1,5 arasında bir değer almaktadır.

$$A = \lambda T \sqrt{\frac{10}{m}} \quad (3)$$

Denklem 2' deki BV ifadesi, B katsayısı ve trenin ortalama hızı (V) ile değişim göstermektedir. B katsayısı; trenin uzunluğuna veya dingil sayısı gibi boyutsal etkilere bağlıdır. CV^2 ifadesi ise, C katsayısı ve hızın karesi ile değişmektedir. CV^2 terimi, trenin ön ve arka alanına etki eden aerodinamik dirençler ile trenin uzunluğuna bağlı aerodinamik dirençlerin toplamını ifade eder. Denklem 4' de denklemi verilmiştir.

$$CV^2 = k_1SV^2 + k_2pLV^2 \quad (4)$$

k_1SV^2 terimi, trenin ön yüzünde ortaya çıkan aerodinamik direnç, k_2pLV^2 ise trenin yan yüzeyleri boyunca ortaya çıkan aerodinamik dirençleri belirtir. k_1 , trenin ön ve arka şekline bağlı bir parametre, k_2 ise pürüzlülüğü ifade eden bir parametredir. k_2 parametresi $p \times L$ yüzeyine bağlı olup, p aracın ray seviyesine kadar olan kısmi çevresini L ise tren boyunu metre cinsinden ifade etmektedir. p değeri genelde 10 metre civarındadır.

Tablo 2. HT65000 ve HT80000 için direnç hesabında kullanılan parametreler

	HT65000	HT80000
V	125 km/sa	125 km/sa
λ	1.5	1.5
L	158,92m	200m
T	440 ton	480ton
m	18 ton	18 ton
B	4,4	4,8
S	10 m ²	10 m ²
p	10 m	10 m
k_1	9×10^{-4}	9×10^{-4}
k_2	20×10^{-6}	20×10^{-6}

Bu çalışmada, HT65000 ve HT80000 tren setlerinin enerji tüketimlerini hesaplayabilmek için Tablo 2' de verilen parametreler kullanılmıştır.[20] Yapılan hesaplamalar sonucu mevcut hatta, HT65000 model tren kullanımı sonucu harcanan toplam enerji 2855,088 kWh, HT80000 model tren kullanımı durumunda 3237,857 kWh olarak elde edilmiştir.

2.1. Matematiksel model

Bu çalışmada, Ankara-İstanbul hattında çalışan seferlere tren ataması için iki matematiksel model önerilmiştir. İlk model(M1) toplam enerji tüketimini en küçükleyen tren atamasını, ikinci

model(M2) ise, seferleri gerçekleştirecek enküçük tren sayısının belirlemeyi amaçlamaktadır. Problemin çözümü için önerilen 0-1 tamsayılı matematiksel modellerin varsayımları, parametreleri, karar değişkenleri, kısıtları ve amaç fonksiyonu bu bölümde verilmiştir.

Varsayımlar:

- Ankara-İstanbul hattını tamamlayan bir tren için kontrol ve temizlik işlemlerinin süresi ortalama 1 saat olarak kabul edilmiştir.
- Kapasite sebebi ile her iki istasyon için de günün ilk ve son 2 seferleri yüksek kapasiteli olan HT80000 model tren ile sağlanmalıdır.
- Trenlerin Ankara-İstanbul hattı arasındaki ara duraklarda düşük hızdaki seyirleri sebebiyle her iki tren tipinin ortalama hızı 125km/s olarak kabul edilmiştir.
- Trenlere ait amortisman giderleri, işletme maliyetleri dikkate alınmamıştır.
- Trenlerin bakım zamanları ve arızaları göz önünde bulundurulmamıştır.

Kümeler:

$N_1 = \{1,2,\dots,n_1\}$ HT65000 model tren kümesi

$N_2 = \{n_1 + 1, \dots, n_2\}$ HT80000 model tren kümesi

$N = N_1 \cup N_2$ Tren kümesi

$S_1 = \{1,2,\dots,m_1\}$ Ankara-İstanbul arasındaki sefer kümesi

$S_2 = \{m_1 + 1, \dots, m_2\}$ İstanbul-Ankara arasındaki sefer kümesi

$S = S_1 \cup S_2$ Sefer kümesi

İndisler:

i : Tren indisi, $i \in N$

s : Sefer indisi, $s \in S$

Parametreler:

e_i : i . trenin hat boyunca tükettiği enerji miktarı

M : Çok büyük pozitif bir sayı

Karar Değişkenleri:

x_{is} : i . tren s . sefere atanırsa 1, diğer durumlarda 0.

y_i : i . tren seçilirse 1, diğer durumlarda 0.

M1 Modeli:

$$Enk z = \sum_{s=1}^{m_2} \sum_{i=1}^{n_2} e_i x_{is} \quad (5)$$

M1 modelinin amaç fonksiyonu (Denklem 5), toplam enerji tüketimini en küçükmektir.

$$\sum_{i=1}^{m_2} x_{is} = 1 \quad \forall s \in S \quad (6)$$

Denklem 6, her sefere yalnızca bir tren atanmasını garanti etmektedir.

$$\sum_{i=n_1+1}^{n_2} x_{is} = 1 \quad \forall s \in S, s \leq 2 \text{ yada } m_1 - 1 \leq s \leq m_1 + 2 \text{ yada } m_2 - 1 \leq s \leq m_2 \quad (7)$$

Denklem 7, Ankara yönünden kalkan ilk ve son iki sefer için, ayrıca İstanbul yönünden kalkan ilk ve son iki sefer için kullanılan trenin HT80000 model olması sağlayan kısıttır. Sonraki kısıtlar seferlere özgü olduğundan açık formda ifade edilmiştir.

$$Mx_{i6} \geq x_{i10} + x_{i18} - 1 \quad \forall i \in N \quad (8)$$

$$Mx_{i13} \geq x_{i1} + x_{i8} - 1 \quad \forall i \in N \quad (9)$$

$$M(x_{i13} + x_{i14}) \geq x_{i1} + x_{i9} - 1 \quad \forall i \in N \quad (10)$$

$$Mx_{i14} \geq x_{i12} + x_{i9} - 1 \quad \forall i \in N \quad (11)$$

Denklem 8 – Denklem 11, bir trenin sefer uygunluğunu kontrol eden kısıttır. Örneğin, bir tren iki farklı İstanbul-Ankara seferine atanmış ise, aynı zamanda ilk seferin varış zamanı ve ikinci seferin kalkış zamanı bakımından uygun olan bir Ankara-İstanbul seferine de mutlaka atanmış olmalıdır. Benzer şekilde iki farklı Ankara-İstanbul seferine atanan bir treninde, uygun bir İstanbul-Ankara seferini gerçekleştirmesi gerekmektedir. Bu durumdaki her kombinasyon için uygun kısıtlar yazılmıştır.

$$x_{i1} + x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i6} + x_{i7} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (12)$$

$$x_{i1} + x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i10} + x_{i11} + x_{i12} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (13)$$

$$x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i6} + x_{i7} + x_{i8} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (14)$$

$$x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i6} + x_{i7} + x_{i8} + x_{i9} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (15)$$

$$x_{i2} + x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i6} + x_{i7} + x_{i13} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (16)$$

$$x_{i3} + x_{i4} + x_{i5} + x_{i6} + x_{i7} + x_{i8} + x_{i14} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (17)$$

$$x_{i5} + x_{i15} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (18)$$

$$x_{i6} + x_{i11} + x_{i12} + x_{i15} + x_{i16} + x_{i17} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (19)$$

$$x_{i10} + x_{i11} + x_{i12} + x_{i13} + x_{i14} + x_{i15} + x_{i16} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (20)$$

$$x_{i7} + x_{i8} + x_{i9} + x_{i15} + x_{i16} + x_{i17} + x_{i18} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (21)$$

$$x_{i11} + x_{i12} + x_{i13} + x_{i14} + x_{i18} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (22)$$

$$x_{i10} + x_{i13} + x_{i14} + x_{i17} \leq 1 \quad \forall i \in N \quad (23)$$

Bir tren bazı sefer gruplarından en çok bir tanesini gerçekleştirebilir. Örneğin, *i*. tren Ankara-İstanbul hattındaki 1. sefer ve 7. sefer arasındaki en çok bir sefere atanabilir. Bunun sebebi, kalkış varış zamanları ile uyumlu bir İstanbul-Ankara seferinin bulunmamasıdır. Bu durumdaki her kombinasyon için uygun kısıtlar Denklem 12 – Denklem 23' de ifade edilmiştir.

$$x_{is} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N, s \in S \quad (24)$$

Denklem 24' de x_{is} karar değişkeninin işaret kısıtı verilmiştir.

M2 Modeli:

$$Enk z = \sum_{i=1}^{n_2} y_i \quad (25)$$

M2 modelinin amaç fonksiyonu (Denklem 25) seferlerde kullanılacak tren sayısının en küçüklenmesidir.

$$\sum_{s=1}^{m_2} x_{is} \leq M y_i \quad \forall i \in N \quad (26)$$

Denklem 26, x_{is} ve y_i karar değişkenlerinin ilişki kısıtıdır.

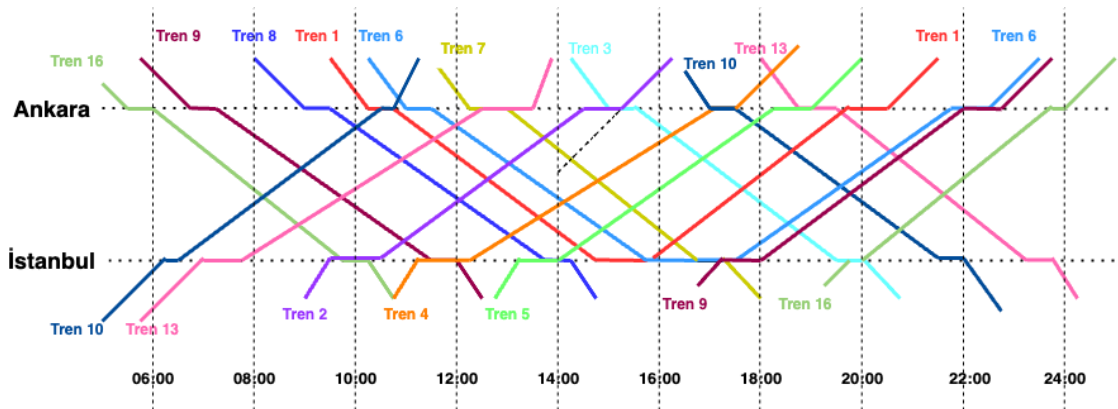
$$y_i \in \{0, 1\} \quad \forall i \in N \quad (27)$$

y_i karar değişkeninin işaret kısıtı, Denklem 27' de verilmiştir. M1 modelinde yer alan Denklem 6 – Denklem 24, M2 modelinin de kısıtlarını oluşturmaktadır.

3. Bulgular

Ankara-İstanbul arasındaki seferlere toplam enerji tüketimini enküçükleyen tren atamasını elde edebilmek için, önerilen M1 modeli GAMS 24.0 programında kodlanmış, Cplex çözücüsüyle 1 saniyeden daha kısa süre içerisinde en iyi çözüm elde edilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu değeri 54453 kWh olarak hesaplanmıştır.

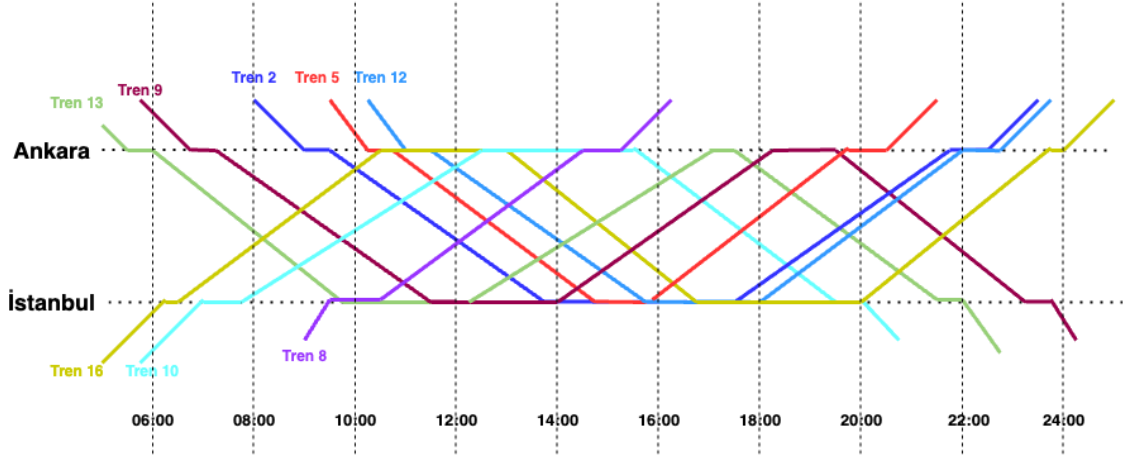
Elde edilen çözüme göre, 8 adet HT65000 model, 4 adet HT80000 model olmak üzere toplam 12 trenin mevcut seferleri gerçekleştirebilmek için yeterli olduğu sonucuna varılmıştır. Zaman-yer grafiği Şekil 1' de verilmiştir. Tren numarası sekiz ve sekizden küçük olan trenler HT65000 modeldir. Kısıtlarda verilen, istasyonların yoğun zamanları olan ilk ve son 2 sefere HT80000 trenlerinin atanması sağlanmıştır.



Şekil 1. M1 modeli ile elde edilen zaman-yer grafiği

Ankara-İstanbul arasındaki seferleri gerçekleştirecek en az sayıda tren atamasını elde edebilmek için, M2 modeli GAMS/Cplex çözücüsüyle 1 saniyeden daha kısa sürede eniyi çözümü elde edilmiştir. Modelin amaç fonksiyonu değeri 8' dir.

Eldeki çözüm incelendiğinde, 3 adet HT65000 model, 5 adet HT80000 model olmak üzere toplam 8 trenin halihazırdaki seferlere ataması yapılmıştır. Zaman-yer grafiği Şekil 2’ de verilmiştir. Tren numarası 2, 5 ve 8 olan trenler HT65000 modeldir. Şekil 2’ den de görüldüğü üzere, amaç kullanılan tren sayısını en küçükmek olduğunda tek bir tren birden çok seferde kullanılmıştır. Örneğin; HT80000 model Tren 9, Sefer 2, 9 ve 14’ de kullanılmıştır.



Şekil 2. M2 modeli ile elde edilen zaman-yer grafiği

Her iki zaman-yer grafiği kıyaslandığında, M1 modeli ile halihazırdaki seferleri gerçekleştirebilmek için daha çok sayıda trene ihtiyaç duyulmuştur. Ancak, amaç enerji tüketimini enküçükmek olduğundan, kısıtlar elverdiğince enerji tüketimi daha az olan HT65000 model tren kullanılmıştır. M2 modeli ile elde edilen çözümde ise, daha az sayıda tren kullanılmasına rağmen, seferleri büyük bir kısmı HT80000 trenleri ile yapılmıştır. Bu çözüme göre hesaplanan toplam enerji tüketimi 56368 kWh' tır. Beklendiği üzere, M2 modelinde enerji tüketimi performans ölçütü dikkate alınmadığından, enerji tüketimi daha yüksektir. Gerçek hayat problemlerinde iki model de karar vericinin tercihleri doğrultusunda ve farklı karar verme seviyelerinde kullanılabilir. Her iki modele de kolayca yeni kısıtlar eklenebilir. Özellikle, iki hat arasındaki seferleri gerçekleştirecek minimum tren sayısının elde edilmesi, planlamacılar açısından oldukça önemli bir karardır.

4. Sonuç

Bu makalede, iki matematiksel model önerilmiştir. Bu modellerin temel amacı, seferlere atanacak trenleri belirlemektir. Ancak, her iki model planlama problemini farklı karar verme seviyelerinde ele almıştır. M1 modeli tren atama problemi taktiksel planlama seviyesinde, M2 modeli ise stratejik planlama seviyesinde dikkate almıştır. Öyle ki, M1 modelinde halihazırdaki tren filosu içerisinde enerji tüketimini enküçükleyecek trenlerin seferlere atanmasını amaçlamaktadır. M2 modelinde ise, tüm seferleri gerçekleştirebilecek minimum tren sayısının belirlenmesini amaçlamaktadır. Önerilen modeller, GAMS yazılımında kodlanmıştır. Ankara-İstanbul arasındaki seferler için çözümler elde edilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, M1 modeli detaylandırılarak, tren hatlarındaki ara duraklar da probleme dahil edilip istasyonlar arası mesafenin bir parametre olarak kullanıldığı yöntemler ile direnimler hesaplanabilir. Trenlerin bakım süreleri ve arızalanma olasılığını dikkate alan, dinamik bir model geliştirilebilir. Ayrıca, trenlerin duruş ve kalkış süreçlerindeki enerji tüketimleri de göz önüne alınarak daha kapsamlı bir çalışma ortaya koyulması mümkündür. M2 modeline ise, personel kısıtları dahil edilip, tren atama problemi ve vardiya çizelgeleme problemi birlikte ele alınabilir.

Kaynakça

- [1] M. Boroun, S. Ramezani, N. V. Farahani, E. Hassannayebi, S. Abolmaali and M. Shakibayifar, "An efficient heuristic method for joint optimization of train scheduling and stop planning on double-track railway systems," *INFOR: Information Systems and Operational Research*, vol.58 no.4, pp. 652-679, 2020.
- [2] L. Yang, Y. Yao, H. Shi and P. Shang, "Dynamic passenger demand-oriented train scheduling optimization considering flexible short-turning strategy," *Journal of the Operational Research Society*, vol.72, no.8, pp. 1707-1725, 2021.
- [3] X. Xu, K. Li, L. Yang, and Z. Gao, "An efficient train scheduling algorithm on a single-track railway system" *Journal of Scheduling*, vol.22, pp. 85-105, 2019.
- [4] Y. Huang, C. Mannino, L. Yang, and T. Tang, "Coupling time-indexed and big-M formulations for real-time train scheduling during metro service disruptions," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol.133, pp.38-61, 2020.
- [5] N. Gültekin, and T. Eren. "Demiryolu çizelgeleme probleminin modellenmesi ve çözümü," *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, vol. 29, no.2, 235-242, 2014, doi:10.17341/gummfd.18951.
- [6] Ö. Yalçınkaya. "Tren çizelgeleme problemi: bir modelleme ve çözüm yaklaşımı," *Demiryolu Mühendisliği*, vol.3, pp. 75-80, 2016.
- [7] F. Li, Z. Gao, K. Li, and D. Z. W. Wang. "Train routing model and algorithm combined with train scheduling" *Journal of Transportation Engineering* vol.139, no.1, 2013.
- [8] A. R. Jafarian-Moghaddam, "Economical speed for optimizing the travel time and energy consumption in train scheduling using a fuzzy multi-objective model" *Urban Rail Transit*, vol.7, no.3, pp. 191-208, 2021.
- [9] J. Zhou, X. Guo, and F. Li, "Urban rail train scheduling with smoothing energy consumption peaks and synchronization time minimization: Using novel time-shift control scheme" *IEEE Access*, vol.9, pp. 70142-70154, 2021.
- [10] H. Zhang, L. Jia, L. Wang, and X. Xu, "Energy consumption optimization of train operation for railway systems: Algorithm development and real-world case study" *Journal of Cleaner Production*, vol.214, pp. 1024-1037, 2019.
- [11] S. Zhan, P. Wang, S. C. Wong, and S. M. Lo, "Energy-efficient high-speed train rescheduling during a major disruption," *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, vol.157, 102492, 2022.
- [12] P. Mo, L. Yang, A. D'Ariano, J. Yin, Y. Yao and Z. Gao, "Energy-efficient train scheduling and rolling stock circulation planning in a metro line: a linear programming approach," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol.21, no.9, pp. 3621-3633, 2020, doi: 10.1109/TITS.2019.2930085.
- [13] B. Jin, X. Feng, Q. Wang, P. Sun and Q. Fang, "Train scheduling method to reduce substation energy consumption and peak power of metro transit systems," *Transportation Research Record*, vol.2675, no.4, pp. 201-212, 2021, doi: 10.1177/0361198120974677.
- [14] S. Hasan-zadeh, S. F. Zarei and E. Najafi, "A train scheduling for energy optimization: Tehran metro system as a case study," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 1, pp. 357-366, 2023, doi: 10.1109/TITS.2022.3215095.
- [15] L. Zhang, D. He, Y. He, B. Liu, Y. Chen and S. Shan, "Real-time energy saving optimization method for urban rail transit train timetable under delay condition," *Energy*, vol.258, 124853, 2022, doi: 10.1016/j.energy.2022.124853
- [16] C. G. Corlu, R. de la Torre, A. Serrano-Hernandez, A.A. Juan, and J. Faulin, "Optimizing energy consumption in transportation: Literature review, insights, and research opportunities," *Energies*, vol.13, no.5, 1115, 2020.
- [17] P. M. Fernández, I. V. Sanchís, V. Yepes, and R. I. Franco, "A review of modelling and optimisation methods applied to railways energy consumption" *Journal of Cleaner Production*, vol. 222, pp. 153-162, 2019.
- [18] Ö. Akbayır and F. H. Çakır, "Enerji verimliliği için tren direnci formüllerinin karşılaştırılması," *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 1, pp. 112-126, 2017.
- [19] E. C. Schmidt, *Freight train resistance, its relation to car weight*. Vol. 43 of Engineering Experiment Station Illinois University, Urbana, Illinois 1910.

[20] S. Ateş, “Yüksek hızlı demiryolu trafiğinin ürettiği bina titreşimlerinin saha koşullarında ölçülmesi ve uluslararası standartlara göre değerlendirilmesi,” Master Thesis, Department of Civil Engineering, Sakarya University, Sakarya, 2021.

Özgeçmiş



Enver Kerem KAYA

1995 yılında Mersin’de doğmuştur. Eskişehir Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü’nden Lisans derecesini almıştır. Montaj ve Proses Mühendisi olarak çalışmaktadır. Optimizasyon, üretim ve operasyon planlama, modelleme ve simülasyon ilgi alanına giren konulardır.

E-Posta: enverkeremkaya@gmail.com



Melike SÖNMEZ

1997 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Eskişehir Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Üretim ve Servis Sistemleri Planlama, Tasarım ve Çizelgeleme konuları ilgi alanına giren araştırma konularındandır.

E-Posta: melikesonmez197@gmail.com



Emine AKYOL ÖZER

1989 yılında Osmaniye’ de doğmuştur. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü’nden 2011 yılında Lisans ve 2013 yılında Yüksek Lisans derecesini aldı. 2017 yılında Pardubice Üniversitesi (University of Pardubice)’ nde Ulaştırma Mühendisliği alanında doktorasını tamamladı. Halen Eskişehir Teknik Üniversitesi’nde Endüstri Mühendisliği bölümünde Doktor Öğretim Üyesi olarak görev yapmaktadır. Çalışma alanları optimizasyon, gerçek zamanlı sistemler, hata teşhisi ve durum izleme, si matematiksel modeller, optimizasyon ve ilerisezgisel algoritmalarıdır.

E-Posta: emineakyol@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Enver Kerem KAYA: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Kaynaklar, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Modelleme. Melike SÖNMEZ: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Emine AKYOL ÖZER: Görselleştirme, İnceleme, Kontrol, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Evaluating the Performance of Railway Transportation Companies Using Multi-Criteria Decision-Making Methods

Çağdaş YÜKSEL*^{ID}, Nuşin UNCU^{ID}

Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Faculty of Engineering, Industrial Engineering Department, Adana, Türkiye

*cagdasyuksel@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 20.12.2023, Kabul/Accepted: 29.02.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Abstract: The purpose of performance evaluation is to generate measurable data on an organization's performance, with the goal of assisting managerial decision-making and enhancing overall performance. In this study, the key performance indicators (KPIs) for railway transportation companies are identified based on expert opinions and previous frameworks. The operational performance of various railway freight transport companies was evaluated using multi-criteria decision-making methods (MCDM). Among the MCDM approaches, the Evaluation Based on Distance from Average Solution (EDAS) method was applied as the main method. In addition to the EDAS method, alternative MCDM methods such as TOPSIS, PROMETHEE II, and COPRAS were used to highlight potential deviations when compared to the results obtained with the EDAS method. Based on the research findings, three out of the seven KPIs, namely safety, have the highest weight at 38%, followed by punctuality at 19%, and journey time at 12%. Subsequently, companies were ranked according to their performance based on all KPIs. Furthermore, a sensitivity analysis was conducted to demonstrate how changes in the relative weights of KPIs can affect the results.

Keywords: Key performance indicators, Multi-criteria decision making, Performance evaluation, Railway freight transport

Demiryolu Taşımacılığı Firmalarının Performanslarının Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri ile Değerlendirilmesi

Öz: Performans değerlendirmenin amacı, bir organizasyonun performansı ile ilgili ölçülebilir veriler üretmek, yönetsel karar alma sürecine destek olmak ve genel performansı artırmaktır. Bu çalışmada, demiryolu taşımacılığı şirketleri için anahtar performans göstergeleri (APG'ler), uzman görüşleri ve önceki çerçevelere dayalı olarak belirlenmektedir. Çeşitli demiryolu yük taşıma şirketlerinin işletme performansı, çoklu kriterli karar verme yöntemleri (ÇKKV) kullanılarak değerlendirilmektedir. ÇKKV yaklaşımlarından biri olan Ortalama Çözüm Uzaklığına Dayalı Değerlendirme (EDAS) yöntemi, ana yöntem olarak uygulanmıştır. EDAS yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında potansiyel sapmaları göstermek için TOPSIS, PROMETHEE II ve COPRAS gibi alternatif ÇKKV yöntemleri de kullanılmıştır. Araştırma bulgularına göre, yedi APG'den üçü, yani emniyet %38 ile en yüksek ağırlığa sahipken, bunu %19 ile dakiklik ve %12 ile seyir süresi takip etmektedir. Daha sonra şirketler tüm KPI'lar baz alınarak performanslarına göre sıralanmıştır. Ayrıca, APG'lerin göreceli ağırlıklarındaki değişikliklerin sonuçları nasıl etkileyebileceğini göstermek için duyarlılık analizi yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Anahtar Performans Göstergeleri (APG'ler), Çok kriterli karar verme, Performans değerlendirme, Demiryolu yük taşımacılığı

1. Introduction

As an effect of transport networks, railways play a vital role in fostering economic growth, reducing road congestion, and limiting climate change [1]. In parallel with the advancement of global trade, railways have gained paramount importance not only within national borders but also between countries and even continents in the transportation of products and goods, particularly in terms of bulk and raw material transportation. This importance arises from their

Atıf için/Cite as: Ç. Yüksel, N. Uncu, "Evaluating the performance of railway transportation companies using Multi-Criteria Decision-Making Methods," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 11-24, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1407420

attributes of safety, longevity, cost-effectiveness in construction, environmental friendliness, and independence from petroleum reliance. Social and economic growth has led to an increasing demand for more railway lines and services. Investments in the railway sector in Türkiye have increased in the last 19 years. Although Türkiye is located between the continents of Asia and Europe, it is not possible to say that it can sufficiently benefit from the geographical advantages created by its inter-regional position in terms of railway networks. It is aimed that Türkiye will reach the desired position with the completion of the ongoing investments and future investments [2].

Railways worldwide are facing increasing demand and limited infrastructure. As per the 2019 OECD report, under the baseline scenario, the annual investment in rail infrastructure is anticipated to rise to USD 315 billion (United States dollars) by the year 2050. This projection is established upon projects currently undergoing diverse stages of construction and planning [3]. Optimizing the use of the existing railway network and services is therefore becoming a central responsibility for all railway stakeholders (such as infrastructure managers, train operators, regulatory agencies, etc.), whether through upgrading infrastructure or developing improved management strategies to provide better services. Considering all of these, measuring railway performances is important for determining where and how to initiate these management efforts. In the context of railways, performance indicates the capacity of a railway system to fulfill its claims in terms of passenger and freight transportation [4]. UIC (International Union of Railways) [5] defines the performance of railways in terms of capacity in market conditions, infrastructure planning, program planning and capacity in operations.

Key Performance Indicators (KPIs) measure the critical aspects vital to the success of a company [6]. The KPI concept will be used to assess the performance of railway freight transportation and train operating companies (TOCs). A two-year project, known as IMPROVERAIL, was initiated by the European Commission in 2001 and aimed at supporting the establishment of railway infrastructure management. As a result of the project, seven indicators were developed, which can be considered as KPIs, and are called “success dimensions”. These are efficiency, accessibility, financial effectiveness, asset utilization, innovation & growth, service quality & reliability, and safety [7]. Platform of Railway Infrastructure Managers in Europe (PRIME) is a forum that aims to enhance rail infrastructure managers' collaboration, support the implementation of European rail policy, and develop performance benchmarking [8]. In 2019, PRIME [9] identified twelve KPIs in five dimensions: safety, environment, performance, delivery, and financial. These KPIs reflect the needs and priorities of railway infrastructure managers and respond to the demands of stakeholders and customers.

In 2013, Law No. 6461 aimed to enhance transparency, cost-efficiency, neutrality, and competition in Türkiye's railway sector. As part of this law, the management of railway infrastructure and train operations were separated. The law has opened the Turkish rail transport sector to competition, and this means that TCDD Taşımacılık has to compete with the private train operating companies that would enter the sector [10]. Thus, in this competitive environment, performance has become important for these companies.

In 2017, TCDD was authorized as the railway infrastructure manager (IM) on the railway infrastructure and state-owned parts of the railway infrastructure in the national railway infrastructure network, and a new company, TCDD Taşımacılık was established as a train operating company (TOC) for passenger and freight transportation. The law opened the Turkish rail transport sector to competition, necessitating that TCDD Taşımacılık competes with newly-entered private train operating companies within the sector. Today, there are five certificated TOCs in the field of railway transportation. One of them has not started transportation activities yet [11].

In this study, the performance evaluation of TOCs is conducted using EDAS method, a relatively new method that facilitates the comparison and ranking of companies based on certain KPIs. The primary benefit of the EDAS method lies in its high efficiency and lower computational requirements when compared to alternative MCDM methods [12]. This method is highly effective when conflicting criteria exist [13]. The findings are reinforced through the application of various types of MCDM methods. This includes TOPSIS which is a distance-based approach similar to EDAS, PROMETHEE II, an outranking type and COPRAS, a utility-based approach.

The rest of the article is structured as follows: Section 2 provides a literature review. Section 3 explains the methodology of applying MCDM methods and related information on the performance KPIs of TOCs. Section 4 presents the results, and the findings are discussed in Section 5.

2. Literature Review

MCDM methods have been commonly applied for deciding between alternatives in the context of railway performance evaluation. Several case studies have been conducted to assess the performance of railway networks in various countries. Lu [4] proposed a framework for measuring British railway performance based on quality-of-service factors. Key performance indicators (KPIs) include accommodation, journey time, connectivity, punctuality, resilience, passenger comfort, energy usage, and resource usage. The Analytic Hierarchy Process (AHP) was employed to determine the order of importance of these KPIs. Additionally, the significant effects of quality-of-service factors on the KPIs were identified using Taguchi L27 design. The data were obtained from simulation runs conducted through the BRaVE program (Birmingham Railway Virtual Environment).

Frederico and Cavenaghi [14] developed a performance measurement system framework for railroad companies implementing within a major Brazilian railway company. They used semi-structured interviews and documentary data collection to obtain evidence on processes, environment, customers, and strategic objectives as perspectives needed to elaborate a performance measurement system based on balanced scorecards. Zhang et al. [15] assessed the China's railway transportation performance using the CRITIC (criteria importance through the intercriteria correlation method)-relative entropy method. The main criteria are safety in production, railway infrastructure, railway equipment, operation efficiency and green development.

Ranjan et al. [16] integrated MCDM methods DEMATEL and Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) for evaluating the performance of Indian railway zones. Jose et al. [17] utilized the Hierarchical Fuzzy Axiomatic Design (H-FAD) method to assess the performance of sixteen zones within the Indian Railways. Petrovic et al. [18] assessed the performance of the Serbian railway system by employing the Entropy weight method to determine criteria weights. They utilized TOPSIS for ranking the performance across different years.

Other studies in the literature have been conducted to compare the railway performances of different countries or regions. Fraszczyk et al. [19] compared five European countries' railway systems on various passenger related parameters and revealed their performance levels compared to the European average using data analysis. Stoilova et al. [20] presented twenty-two infrastructural, economic, and technological criteria for comparing the performance of Trans-European Transport Network (TEN-T) Orient East Med Corridor railway network using SIMUS (Sequential Interactive Model for Urban Systems) method as an MCDM tool.

Stoilova [21] focused on evaluating the developmental levels of railway transport in various railway networks across the Balkan region. This assessment utilized the Shannon Entropy method

and the Stepwise Weight Assessment Ratio Analysis (SWARA) method for criteria weights. Additionally, several MCDM methods, such as VIKOR, Weighted Aggregated Sum Product Assessment (WASPAS), and PROMETHEE, were applied to rank the railway performances of selected Balkan countries. Kara and Yalçın [22] utilized the CRITIC technique to determine criteria weights and the Range of Value (ROV) technique for ranking the performances of twenty-three European countries' railway networks. Bouraima et al. [23] revealed the importance of improvement suggestions as alternatives on the Sub-Saharan African railways performance based on six criteria using the weighted geometric Dombi Maclaurin Symmetric Mean (WGDMSM) operator within an intuitionistic fuzzy environment and combining the method with an interval rough Pivot Pairwise Relative Criteria Importance Assessment (PIPRECIA) operator.

In the literature, although there are few studies outside of MCDM related to railway performance evaluation, they have been encountered. Sharma et al. [24] focused on measuring the performance of Indian Railways in terms of service efficiency. The study has an operational perspective using data envelopment analysis (DEA) methodology. The researchers incorporated quality-of-service dimensions in the performance measurement and benchmarking of the railway zones that constitute a national railway system under the public domain.

Through the literature review, it becomes evident that while numerous studies exist for the general evaluation of railway transportation systems, there is a scarcity of research focusing on the specific level of TOCs. Within the scope of the literature we reviewed, this study contributes by addressing TOCs' performance KPIs and serving as a case-specific investigation to evaluate the performance of railway transportation in Türkiye.

3. Methodology

In this section, we present the identification of KPIs for assessing railway performance. We provide insights into their components and offer a detailed account of the application of MCDM methods, particularly focusing on Buckley's Fuzzy AHP and EDAS.

3.1. Determination of KIPs

As a result of the focus group meeting with eight experts, seven unique KPIs were identified based on the reports of the railway transportation authorities, previous studies in the literature and the structure of the Turkish railway transportation sector [5, 6, 7, 9]. The qualifications of the experts are detailed in Table 1. Each of the experts has substantial knowledge about the railway industry and its operation and can identify the requirements of different stakeholders.

Table 1. The qualifications of experts

Expert	Title	Specialty	Experience
Expert 1	Department manager	Railway capacity management	36 years
Expert 2	Department assistant manager	Railway capacity management	35 years
Expert 3	Department manager	Railway traffic management	25 years
Expert 4	Department assistant manager	Railway traffic management	30 years
Expert 5	Department assistant manager	Railway traffic management	28 years
Expert 6	Department assistant manager	Railway traffic management	28 years
Expert 7	Department manager	Railway infrastructure maintenance	25 years
Expert 8	Department manager	Railway infrastructure modernization	24 years

The KIPs are determined as punctuality (C1), journey time (C2), resource usage (C3), profitability (C4), safety (C5), innovation & growth (C6) and environment (C7).

The punctuality of the trains is directly related to how well they operate according to the timetable. Commonly, punctuality is calculated by dividing the number of punctual trains in a specified period by the total number of trains and expressed as a percentage of punctual trains [25]. In this study, the ratio of the number of trains departing on scheduled time and prior to scheduled time divided by the total number of trains of a TOC is used as performance indicator of punctuality.

The journey time is the ratio of the total actual journey time to the total scheduled journey time within a specified time period.

Resource usage is determined as the ratio of the number of trains operated divided by the number of trains scheduled on the timetable in a given time period.

Profitability arises from a company's operational outcomes. Unlike profit, which is an absolute indicator, profitability is a relative measure that indicates the degree of a company's profit margins.

Safety is one of the most important and essential elements in the performance of a TOC. The number of railway accidents caused by TOC-related issues per million train kilometers is used as a measure of safety KPI.

Innovation & growth for a railway freight TOC involve engaging in innovative activities to enhance digitalization in operational processes, improve operational safety, optimize rolling stock maintenance operations, and modernize rolling stocks, among other initiatives.

The environment KPI, representing environmental friendliness, is measured by the ratio of total hybrid and electric locomotives to the overall locomotives in a TOC's rolling stock.

All KPIs are beneficial criteria, except for safety. As the safety ratio decreases, the performance increases; hence safety stands as a non-beneficial criterion.

3.2. Determining the weights of KPIs: Buckley's FAHP method

AHP, developed by Thomas L. Saaty, is a method for evaluating criteria within a hierarchical framework in MCDM [26]. When there is no available quantitative data about criteria, AHP is the one of the weighting method to be used [27]. On the other hand, fuzzy AHP (FAHP) is a synthetic approach developed as an extension of AHP, which emerges when it is considered that there is a certain fuzziness in the comments and evaluations of decision makers [28]. For these reasons, in this study the FAHP method was used to determine KPI weights.

Buckley [29] extended the pure AHP method by using fuzzy triangular numbers in comparison ratios. The steps of Buckley's fuzzy AHP approach are as follows [30].

In the first step, a fuzzy comparison matrix is created. If there is more than one decision maker, the preferences of each decision maker are combined by geometric mean method.

In the second step, the geometric mean of the fuzzy comparison values of each criterion is calculated by means of Equation 1. In the formula, \tilde{r}_i is still a fuzzy number.

$$\tilde{r}_i = \left(\prod_{j=1}^n \tilde{d}_{ij} \right)^{1/n} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

In the third step, by Equation 2, the triangular fuzzy weight of each criterion is calculated.

$$\tilde{w}_i = \tilde{r}_i * (\tilde{r}_1 + \tilde{r}_2 + \dots + \tilde{r}_n)^{-1} = (lw_i, mw_i, uw_i) \quad (2)$$

In the fourth step, the obtained triangular fuzzy weights are defuzzified using the center of area method by Equation 3.

$$M_i = \frac{lw_i + mw_i + uw_i}{3} \quad (3)$$

In the last step, the obtained crisp values are normalized using Equation 4. The N_i values here are the relative weights of each criterion.

$$N_i = \frac{M_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (4)$$

3.3. Evaluation of performance: EDAS method

EDAS is a distance-based approach that uses positive and negative distances from the average solution [31]. In this method, the desirable alternative is related to distance from the average solution. There is no need to calculate an ideal solution in the EDAS method [13]. The application steps of the EDAS method are as follows [32]:

In the first step, a decision matrix with n alternative and m criteria, $D = [x_{ij}]_{n \times m}$ is formed. Where x_{ij} is the performance value of i^{th} alternative on the j^{th} criterion.

In the second step, the average solution (AV) is calculated for each criterion by Equation 5.

$$AV_j = \frac{\sum_{i=1}^n x_{ij}}{n} \quad (5)$$

In the third step, the positive distance from the average values (PDA) and the negative distance from the average values (NDA) are calculated by following Equations 6 and 7.

If j^{th} criterion is beneficial,

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (x_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (6)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - x_{ij}))}{AV_j} \quad (7)$$

If j^{th} criterion is non-beneficial, Equation 8 and 9 are used.

$$PDA_{ij} = \frac{\max(0, (AV_j - x_{ij}))}{AV_j} \quad (8)$$

$$NDA_{ij} = \frac{\max(0, (x_{ij} - AV_j))}{AV_j} \quad (9)$$

In the fourth step, the weighted sum of the positive distance from the average solution values (SP_i) and the weighted sum of the negative distance from the average solution values (SN_i) for each alternative are calculated by Equations 10 and 11, respectively, where w_j is the weight of j^{th} criterion.

$$SP_i = \sum_{j=1}^m w_j * PDA_{ij} \quad (10)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^m w_j * NDA_{ij} \quad (11)$$

In the fifth step, SP_i and SN_i values are normalized for each alternative using Equations 12 and 13.

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max SP_i} \quad (12)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{\max SN_i} \quad (13)$$

In the final step, the appraisal score (AS) is calculated for each alternative using Equation 14, where $0 \leq AS_i \leq 1$.

$$AS_i = \frac{1}{2} * (NSP_i + NSN_i) \quad (14)$$

3.4. Data preparation

We used operational data for 2021 from the TCDD Enterprise Resource Planning system to derive performance metrics for punctuality, journey time, resource usage, safety, and environment KPIs for the TOCs. However, due to their strategic significance to the companies, we could not directly obtain performance values for ‘innovation and growth’ and ‘profitability’ KPIs. Therefore, we employed the AHP technique to assess the performance values of these KPIs’. We conducted face-to-face interviews with the same group of experts during both the focus group process and the KPI weights determination process. Table 2 below shows all the performance metrics derived for the KPIs of the TOCs.

Table 2. KPIs performance values of TOCs

TOCs	Punctuality	Journey time	Resource usage	Profitability	Safety	Innovation & growth	Environment
TOC 1	0.4602	0.8688	0.7462	0,1314	2,9949	0.1829	0,2083
TOC 2	0.1511	0.6743	0.9059	0,4775	4,2538	0.4261	1,0000
TOC 3	0.6472	0.9265	0.7985	0,3911	1,2711	0.3910	0,5833

4. Results

4.1. Application of Buckley's FAHP method

Experts were asked to evaluate KPIs through the designed questionnaire; their linguistic expressions were converted into triangular fuzzy values using the scale developed by Zaki Mohamed Noor et al. [33]. The evaluations of KPIs by eight experts were combined into a single comparison matrix using the geometric mean method. This aggregated comparison matrix is presented in Table 3.

Table 3. The aggregated comparison matrix

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
	(l, m, u)	(l, m, u)	(l, m, u)	(l, m, u)	(l, m, u)	(l, m, u)	(l, m, u)
C1	(1, 1, 1)	(1.77, 2.24, 2.63)	(1.83, 2.3, 2.87)	(2.77, 3.69, 4.49)	(0.21, 0.25, 0.32)	(2.1, 2.8, 3.34)	(2.29, 2.95, 3.46)
C2	(0.38, 0.45, 0.57)	(1, 1, 1)	(0.87, 1.22, 1.51)	(1.77, 2.41, 3.02)	(0.24, 0.27, 0.37)	(1.49, 2.18, 2.77)	(1.09, 1.33, 1.57)
C3	(0.35, 0.43, 0.68)	(0.66, 0.82, 1.15)	(1, 1, 1)	(1.62, 2.13, 2.54)	(0.26, 0.3, 0.35)	(1.54, 1.87, 2.14)	(1.3, 1.51, 1.68)
C4	(0.22, 0.27, 0.36)	(0.33, 0.42, 0.57)	(0.39, 0.47, 0.62)	(1, 1, 1)	(0.17, 0.19, 0.25)	(0.65, 0.89, 1.11)	(0.73, 0.82, 0.95)
C5	(3.13, 4, 4.73)	(2.73, 3.69, 4.12)	(2.83, 3.38, 3.83)	(4.06, 5.27, 5.91)	(1, 1, 1)	(3.92, 5.11, 6.13)	(3.59, 4.12, 4.49)
C6	(0.3, 0.36, 0.48)	(0.36, 0.46, 0.67)	(0.47, 0.53, 0.65)	(0.9, 1.13, 1.54)	(0.16, 0.2, 0.26)	(1, 1, 1)	(0.87, 1, 1.15)
C7	(0.29, 0.34, 0.44)	(0.64, 0.75, 0.92)	(0.59, 0.66, 0.77)	(1.05, 1.21, 1.36)	(0.22, 0.24, 0.28)	(0.87, 1, 1.15)	(1, 1, 1)

For each KPI, the geometric mean (\tilde{r}_i) of the fuzzy comparison values was calculated by Equation 1. Triangular fuzzy weights (\tilde{w}_i) of each KPI were calculated by Equation 2. Then, the triangular fuzzy weights were defuzzified by the center of area method using Equation 3 and the weights in crisp values (M_i) were obtained. These values are normalized using Equation 4 and N_i values, which were the relative weights of each KPI, were obtained. The results are given in Table 4 below.

Table 4. Geometric means (\tilde{r}_i), triangular fuzzy weights (\tilde{w}_i), crisp weights (M_i) and normalized crisp weights (relative weights, N_i)

Criteria	\tilde{r}_i	\tilde{w}_i	M_i	N_i
	(l, m, u)	(l, m, u)		
C1	(1.3726, 1.6886, 1.9944)	(0.1337, 0.1925, 0.2742)	0.2001	0.1924
C2	(0.8110, 1.0044, 1.2230)	(0.0790, 0.1145, 0.1682)	0.1205	0.1159
C3	(0.7919, 0.9373, 1.1413)	(0.0771, 0.1069, 0.1569)	0.1136	0.1093
C4	(0.4207, 0.4955, 0.6132)	(0.0410, 0.0565, 0.0843)	0.0606	0.0583
C5	(2.8087, 3.4250, 3.8327)	(0.2735, 0.3905, 0.5270)	0.3970	0.3817
C6	(0.4871, 0.5693, 0.7129)	(0.0474, 0.0649, 0.0980)	0.0701	0.0674
C7	(0.5811, 0.6511, 0.7507)	(0.0566, 0.0742, 0.1032)	0.0780	0.0750

Within the specified framework, it has been revealed that the safety KPI is the criterion with the highest relative weight in terms of the performance of a freight TOC, while the profitability KPI stands as having the least relative weight. The relative weights of KPIs obtained with the fuzzy AHP method are shown in Figure 1.

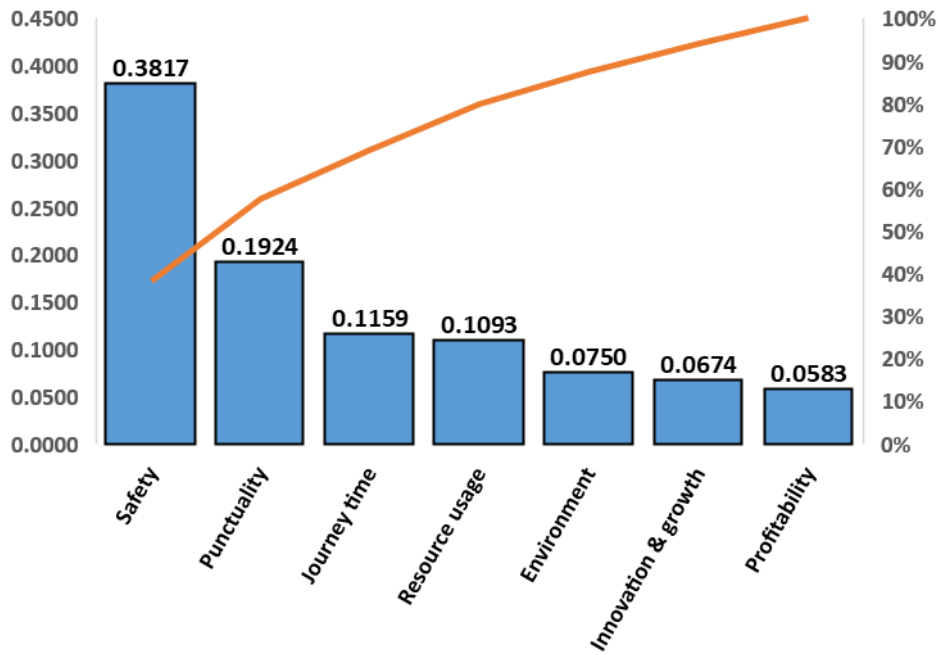


Figure 1. Relative weights (N_i) of KPIs obtained by FAHP method

4.2. Application of EDAS method

For three TOCs and seven KPIs, the decision matrix with the relative weights obtained by Buckley's FAHP method is shown in Table 5. Using Equation 5, the average solutions (AV_j) were calculated and presented for each TOC in Table 5.

Table 5. Decision matrix and average solutions

Weightage	0.1924	0.1159	0.1093	0.0583	0.3817	0.0674	0.0750
TOCs	Punctuality	Journey time	Resource usage	Profitability	Safety	Innovation & growth	Environment
TOC 1	0.4602	0.8688	0.7462	0.1314	2.9949	0.1829	0.2083
TOC 2	0.1511	0.6743	0.9059	0.4775	4.2538	0.4261	1.0000
TOC 3	0.6472	0.9265	0.7985	0.3911	1.2711	0.3910	0.5833
AV_j	0.4195	0.8232	0.8169	0.3333	2.8399	0.3333	0.5972

Since safety is considered as a non-beneficial criterion while other KPIs are considered as beneficial, Equations 6-9 appropriate for calculating PDA and NDA were used. The results are provided in Table 6.

Table 6. PDA and NDA values

TOC	Punctuality	Journey time	Resource usage	Profitability	Safety	Innovation & growth	Environment
-----	-------------	--------------	----------------	---------------	--------	---------------------	-------------

	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA
TOC 1	0.0187	0.0000	0.0064	0.0000	0.0000	0.0095	0.0000	0.0353	0.0000	0.0208	0.0000	0.0304	0.0000	0.0488
TOC 2	0.0000	0.1231	0.0000	0.0210	0.0119	0.0000	0.0252	0.0000	0.0000	0.1900	0.0188	0.0000	0.0506	0.0000
TOC 3	0.1045	0.0000	0.0145	0.0000	0.0000	0.0024	0.0101	0.0000	0.2109	0.0000	0.0117	0.0000	0.0000	0.0017

Using Equations 10 and 11, SP_i and SN_i values for each TOC were calculated. Using Equations 12 and 13, SP_i and SN_i were normalized, NSP_i and NSN_i values were obtained. Then in the final step, AS_i for each TOC were calculated using Equation 14. As the higher AS_i value indicates better performance, it's evident that TOC 3 exhibits the best performance, while TOC 2 demonstrates the least favorable performance as presented in Table 7.

Table 7. SP_i , SN_i , NSP_i , NSN_i , and AS_i values

TOC	SP_i	SN_i	NSP_i	NSN_i	AS_i	Rank
TOC 1	0.0251	0.1449	0.0713	0.5665	0.3189	2
TOC 2	0.1065	0.3341	0.3028	0.0000	0.1514	3
TOC 3	0.3516	0.0042	1.0000	0.9874	0.9937	1

3.3. Sensitivity analysis

Sensitivity analysis, with the mainlines, can be defined as the exploration of how the outputs of a system are related to and are influenced by its inputs [34]. In mathematical models; sensitivity analysis plays a significant role in analyzing the impact and dependency of the inputs while determining the possible outputs of the model [35].

In this study, sensitivity analysis was carried out to reveal whether the alternatives of TOCs are sensitive to changes in KPI weights when fuzzy AHP application is performed with different decision makers.

Firstly, sensitivity analysis was performed on the EDAS method used in performance assessment by changing the KPI weights obtained with the fuzzy AHP method. Sensitivity analysis was carried out over seven different scenarios. In the scenarios, the weight of each KPI separately has been increased to 0.9, and the weights of the other KPIs have been evenly distributed. For example, In the scenario 1, it is assumed that the “punctuality” KPI is the most important criterion with 0.9 weight for performance evaluation of TOCs, and the weights of the other KPIs are evenly distributed. The KPI weights obtained using the fuzzy AHP method and the KPI weights assumed for scenarios of sensitivity analysis are shown in Table 8.

Table 8. KPI weights for sensitivity analysis

KPIs	FAHP	Scenario 1	Scenario 2	Scenario 3	Scenario 4	Scenario 5	Scenario 6	Scenario 7
Punctuality	0.192	0.900	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017
Journey time	0.116	0.017	0.900	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017
Resource usage	0.109	0.017	0.017	0.900	0.017	0.017	0.017	0.017
Profitability	0.058	0.017	0.017	0.017	0.900	0.017	0.017	0.017
Safety	0.382	0.017	0.017	0.017	0.017	0.900	0.017	0.017
Innovation & growth	0.067	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.900	0.017

Environment	0.075	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.017	0.900
-------------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	-------

The results obtained after the scenario implementation are outlined in Table 9. In the actual case, TOC 3 emerges as the best-performing company, while TOC 2 ranks as the lowest performing, as indicated in Table 9. However, upon sensitivity analysis, scenarios 3, 4, 6, and 7 demonstrate a change in rankings. Specifically, in these scenarios, TOC 2 emerges as the best-performing company, while TOC 1 falls to the lowest performing position. These findings suggest that TOC 1 wouldn't be the top-performing company, and TOC 3 wouldn't rank as the lowest performing company in the seven scenarios applied.

Table 9. Results of sensitivity analysis

Scenario	Ranking			Appraisal score		
	TOC1	TOC2	TOC3	TOC1	TOC2	TOC3
Real case	2	3	1	0.3189	0.1514	0.9937
Scenario 1	2	3	1	0.5610	0.0246	0.9994
Scenario 2	2	3	1	0.6030	0.0909	0.9979
Scenario 3	3	1	2	0.0105	0.8976	0.5120
Scenario 4	3	1	2	0.0031	0.9806	0.7196
Scenario 5	2	3	1	0.4169	0.0242	0.9992
Scenario 6	3	1	2	0.0047	0.9744	0.8294
Scenario 7	3	1	2	0.0021	0.9819	0.5035

The results of sensitivity analysis for each TOC based on the scenarios are illustrated in Figure 2. TOC 2 and TOC 3 appear to exhibit the best performance in half of the scenarios, while TOC 1 consistently performs the least favorably.

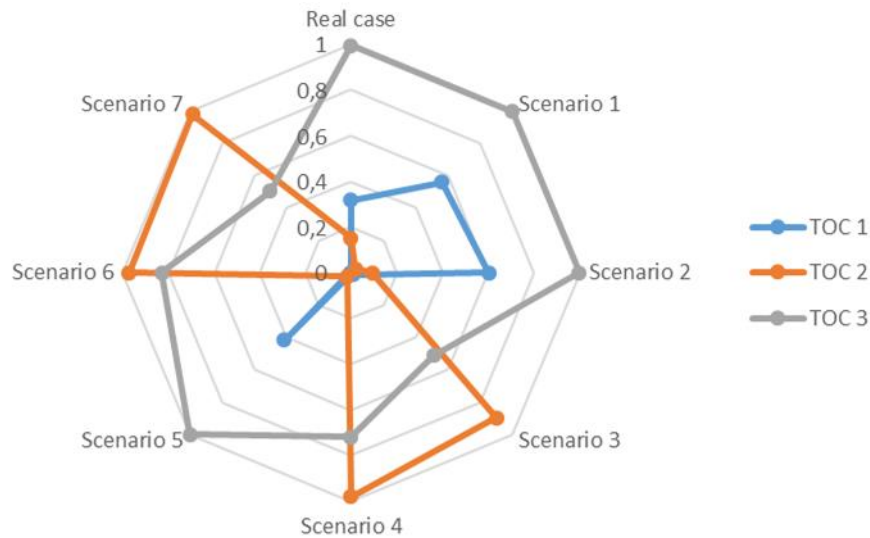


Figure 2. Sensitivity analysis for different scenarios

In addition, a sensitivity analysis was also performed to observe how the results change in case of evaluation with different types of MCDM methods. TOPSIS, COPRAS, and PROMETHEE II methods were applied to assess the performance of TOCs to support the EDAS results. The overall results are presented in Table 10.

Table 10. Results of MCDM methods applied

TOC	EDAS		TOPSIS		COPRAS		PROMETHEE II	
	Result	Rank	Result	Rank	Result	Rank	Result	Rank
TOC 1	0.3189	2	0.4437	2	56.46	2	-0.2160	2
TOC 2	0.1514	3	0.2147	3	54.90	3	-0.3066	3
TOC 3	0.9937	1	0.8944	1	100.00	1	0.5227	1

It is clearly seen from Table 10 that all the applied MCDM methods yielded the same ranking outcome despite the variations in performance scores. TOC 3 is identified as the best-performing company, while TOC 2 was identified as the lowest performing company.

5. Conclusion

In this study, the performances of three freight TOCs were evaluated using some MCDM methods. TOCs have a very important place in mass transportation in Türkiye as it has for the rest of the world. In Türkiye, with the Law No. 6461 on the Liberalization of Railway Transportation enacted in 2013, private railway TOCs were allowed to take part in the sector. As of 2022, three freight TOCs, two of which are privately owned and one of which is state-owned, are actively functioning in Türkiye. Considering that the number of private train operating companies will increase in the near future due to liberalization law, it will be more important for these companies to perform better in a more competitive environment.

The framework designed for the KPIs of TOCs was employed to assess company performance. Seven distinct KPIs were identified through a focus group meeting of eight experts, drawing on reports from railway transportation authorities, previous studies in the literature, and an understanding of the Turkish railway transportation sector. These determined KPIs include punctuality, journey time, resource usage, profitability, safety, innovation & growth, and environment. According to the Buckley's FAHP results, the findings indicate that safety has importance of 38%, punctuality 19%, journey time 12%, resource usage 11%, environment 8%, innovation & growth 7%, and profitability 6% on TOCs' performance.

The companies were ranked based on their performance according to KPIs using EDAS as main method. TOPSIS, PROMETHEE II and COPRAS methods are also applied to the problem to compare the results. Even though the performance scores calculated by MCDM methods are different, all four different methods give the same performance ranking. It was revealed that the company with the best performance is TOC 3, and the company with the worst performance is TOC 2. In order to present whether the alternatives of TOCs are sensitive to the changes in KPI weights in case of different decision makers in determining the KPI weights with the fuzzy AHP method, sensitivity analyzes were performed over seven different scenarios.

Railway freight and passenger transportation exhibit distinct structures and performance indicators. Notably, in Türkiye, public-owned railway companies primarily handle mainline passenger transportation, except for suburban and metro lines. However, if the landscape evolves in the future with an increase in the number of companies involved in passenger transportation, this study can be extended to incorporate passenger train operating companies, advancing its scope and relevance.

References

- [1] M. Frost, S. G. Ison, and R. Watson, "UK rail transport: a review of demand and supply," *Proceedings of the ICE: Transport*, vol. 165, no. 3, pp. 225-234, 2012
- [2] TCDD, "Turkish State Railways sectoral report," Turkey, 2020
- [3] IEA, "The future of ail: Opportunities for energy and the environment", Paris, 2019
- [4] M. Lu, "Evaluation of railway performance through quality of service," Ph.D. dissertation, University of Birmingham, England, 2016
- [5] *UIC leaflet 406: capacity*, UIC International Union of Railways, France, 2004
- [6] R. J. Anderson, R. Hirsch, M. Trompet, and W. Adeney, "Developing benchmarking methodologies for railway infrastructure management companies. Railway Technology Strategy Centre, Centre for Transport Studies, London, United Kingdom, 2003
- [7] IMPROVERAIL, "Improved tools for railway capacity and access management: D2 benchmarking methodologies a uropa zationion of concepts in the railway sector," Competitive and Sustainable Growth Programme, European Commission, Belgium, 2003
- [8] European Commission, "Infrastructure managers (PRIME)", 2023. [Online]. Available: https://transport.ec.europa.eu/transport-modes/rail/market/infrastructure-managers-prime_en [Accessed August 12, 2023]
- [9] Key performance indicators for performance benchmarking, PRIME Catalogue, 2019
- [10] A. Cebeci, H. Tüydüş-Yaman, and D. M. Z. Islam, "Spatial distribution of the rail freight demand in Turkey prior to railway reform," *Research in Transportation Business and Management*, vol. 44, 2022
- [11] UAB-Ministry of Transport and Infrastructure, "Demiryolu tren işletmecisi yetki belgesi sahibi firmalar," 2020. [Online]. Available: <https://uhdgm.uab.gov.tr/uploads/pages/demiryolu-tasimaciligiyetki-belgesi-almis-olan-fi/demiryolu-tren-isletmecisi-yetki-belgesi-sahibi-firmalar.pdf>
- [12] Y. He, F. Lei, G. Wei, R. Wang, J. Wu, and C. Wei, "EDAS method for multiple attribute group decision making with probabilistic uncertain linguistic information and its application to green supplier selection," *International Journal of Computational Intelligence Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 1361-1370, 2019
- [13] M. Keshavarz Ghorabae, E. K. Zavadskas, L. Olfat, and Z. Turskis, "Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS)," *Informatica*, vol. 26, no. 3, pp. 435-451, 2015
- [14] G. F. Frederico, and V. Cavenaghi, "Measuring performance in rail freight transportation companies," *International Business Research*, vol. 10, no. 11, pp. 117-128, 2017
- [15] L. Zhang, Q. Cheng, and Q. Siyuan, "Evaluation of railway transportation performance based on CRITIC-Relative Entropy Method in China," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 2023, 2023
- [16] R. Ranjan, P. Chatterjee, and S. Chakraborty, "Performance evaluation of Indian Railway zones using DEMATEL and VIKOR methods," *Benchmarking: An International Journal*, vol. 23, no. 1, pp. 78-95, 2016
- [17] E. Jose, P. Agarwal, J. Zhuang, and J. Swaminathan, "A multi-criteria decision making approach to evaluating the performance of Indian railway zones," *Annals of Operations Research*, vol. 325, no. 2, pp. 1133-1168, 2023
- [18] N. Petrović, J. Mihajlović, V. Jovanović, D. Ćirić, and T. Živojinović, "Evaluating annual operation performance of Serbian railway system by using multiple criteria decision-making technique" *Acta Polytechnica Hungarica*, vol. 20, no. 1, 2023
- [19] A. Fraszczyk, T. Lamb, and M. Marinov, "Are railways really that bad? An evaluation of rail systems performance in Europe with a focus on passenger rail," *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, vol. 94, pp. 573-591, 2016
- [20] S. Stoilova, N. Munier, M. Kendra, and T. Skrúcaný, "Multi-criteria evaluation of railway network performance in countries of the TEN-T orient-east med corridor," *Sustainability*, vol. 12, no. 4, pp. 1482, 2020
- [21] S. D. Stoilova, "A multi-criteria assessment approach for the evaluation of railway transport in the Balkan region," *Promet-Traffic&Transportation*, vol. 31, no. 6, pp. 655-668, 2019
- [22] K. Kara, and G. C. Yalçın, "Assessing railway transportation performance of European countries with CRITIC and ROV techniques" *Demiryolu Mühendisliği*, no. 17, pp. 93-106, 2023
- [23] M. B. Bouraima, A. Saha, A. Stević, Z. Antucheviciene, J. Qiu, and P. Marton, "Assessment actions for improving railway sector performance using intuitionistic fuzzy-rough multi-criteria decision-making model," *Applied Soft Computing*, vol. 148, 2023

- [24] M. G. Sharma, R. M. Debnath, R. Oloruntoba, and S. M. Sharma, "Benchmarking of rail transport service performance through DEA for Indian railways," *The International Journal of Logistics Management*, vol. 27, no. 3, pp. 629-649, 2016
- [25] N. O. Olsson, and H. Haugland, "Influencing factors on train punctuality - results from some Norwegian studies," *Transport policy*, vol. 11, no. 4, pp. 387-397, 2004
- [26] B. D. Dağdır, and B. Özkan, "A comprehensive evaluation of a company performance using sustainability balanced scorecard based on picture fuzzy AHP," *Journal of Cleaner Production*, vol. 435, no. 140519, 2024
- [27] N. H. Zardari, K. Ahmed, S. M. Shirazi, and Z. B. Yusop, "Weighting methods and their effects on multi-criteria decision-making model outcomes in water resources management," *Springer International Publishing*, Switzerland, pp. 1-5, 2014
- [28] A. Özdağoğlu, and G. Özdağoğlu, "Comparison of AHP and fuzzy AHP for the multi-criteria decision making processes with linguistic evaluations," *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, vol. 6, no. 11, pp. 65-85, 2007
- [29] J. J. Buckley, "Fuzzy hierarchical analysis," *Fuzzy sets and systems*, vol. 17, no. 3, pp. 233-247, 1985
- [30] M. B. Ayhan, "A fuzzy AHP approach for supplier selection problem: A case study in a gear motor company," *International Journal of Managing Value and Supply Chains*, vol. 4, pp. 11-23, 2013
- [31] M. Mathew, and S. Sahu, "Comparison of new multi-criteria decision making methods for material handling equipment selection," *Management Science Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 139-150, 2018
- [32] N. Yalçın, and N. Uncu, "Applying EDAS as an applicable MCDM method for industrial robot selection," *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, vol. 37, no. 3, pp. 779-796, 2019
- [33] A. Zaki Mohamed Noor et al., "Fusion of fuzzy AHP in selecting material for drinking water bottle based on customer needs," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, no. 14, pp. 4243-4249, 2017
- [34] S. Razavi et al., "Future of sensitivity analysis: An essential discipline for systems modeling and policy support," *Environmental Modelling and Software*, vol. 137, 2021
- [35] B. Iooss, and A. Saltelli, "Introduction to sensitivity analysis," in *Handbook of Uncertainty Quantification*, Springer, Cham, pp. 1-31, 2017

Resume



Çağdaş YÜKSEL

He was born in 1989, completed his bachelor's degree at Çukurova University, Department of Industrial Engineering, and his master's degree at Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University, Department of Industrial Engineering. He works at TCDD 6th Regional Directorate, Department of Capacity Management.

Email: cagdasyuksel@tcdd.gov.tr



Nuşin UNCU

She was born in 1980, completed her bachelor's degree at Çankaya University Industrial Engineering (with scholarship). She works as a faculty member at Adana Alparslan Türkeş Science and Technology University. Her research areas are modelling of production and service processes and decision-making methods.

Email: nuncu@atu.edu.tr

Ethics Statement:

Authors confirm that the article is original, there is no plagiarism issue.

Contribution of authors: Çağdaş YÜKSEL: Conceptualization, Methodology, Software, Visualization, Investigation, Supervision. Nuşin UNCU: Resources, Validation, Writing-Original draft preparation, Writing-Reviewing and Editing.



Işıkkara (Kütahya) Bazaltlarının Demiryolu Balastı Olarak Kullanılabilirliği

Mehmet KOZAK 

TCDD 7. Bölge Demiryolu Bakım Servis Müdürlüğü, Afyonkarahisar, Türkiye

mkozak15@hotmail.com

(Alınış/Received: 23.01.2024, Kabul/Accepted: 29.02.2024, Yayımlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Bu çalışma ile Işıkkara (Kütahya) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında; söz konusu bazalt ocağında incelemeler yapılmış ve yapılacak deneyler için örnekler alınmıştır. Alınan örnekler üzerinde fiziksel özelliklerin tespiti için Balast Teknik Şartnamesinde istenilen parçalanma direnci tayini (Los Angeles), su emme oranı, tane yoğunluğu, termal ve bozunma özelliği için $MgSO_4$ deneyi (dona dayanıklılık), aşınmaya karşı direnç tayini (Mikro – Deval) deneyleri yapılmıştır. Kayacın köken ve isminin tespiti için ise petrografik analiz yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar Işıkkara (Kütahya) bazaltlarının; yüksek hızlı tren, hızlı tren ve konvansiyonel demiryolu hatlarında demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğini göstermiştir. Bu çalışma, yapımı devam eden Ankara-İzmir, proje aşamasında olan Eskişehir-Antalya yüksek hızlı tren hatlarına yakın konumda olan Işıkkara (Kütahya) bazaltlarının söz konusu bu hatların balast ihtiyacının karşılanmasında kullanılabilirliği hakkında fikir sağlayacaktır.

Anahtar kelimeler: Balast, Bazalt, Demiryolu balastı, Işıkkara Kütahya, Los Angeles, Mikro–Deval

Usability of Işıkkara (Kütahya) Basalts as Railway Ballast

Abstract: This study aimed to investigate the usability of Işıkkara (Kütahya) basalts as railway ballast. Scope of work; Examinations were made in the basalt quarry in question and samples were taken for the experiments to be carried out. In order to determine the physical properties of the samples taken, the shatter resistance determination required in the Ballast Technical Specification (Los Angeles), water absorption rate, grain density, $MgSO_4$ test (frost resistance) for thermal and degradation properties, and abrasion resistance determination (Micro – Deval) tests were carried out. Petrographic analysis was performed to determine the origin and name of the rock. Experimental studies conducted on Işıkkara (Kütahya) basalts; It has shown that it can be used as railway ballast in high - speed train, speed train and conventional railway lines. This work, It will provide an idea about the usability of Işıkkara (Kütahya) basalts, which are located close to the Ankara-İzmir and Eskişehir-Antalya high - speed train lines, which are under construction, in meeting the ballast needs of these lines.

Keywords: Ballast, Basalt, Railway ballast, Işıkkara Kütahya, Los Angeles, Micro–Deval

1. Giriş

Ulaştırma; insan, mal, hizmet veya unsurların yer değiştirme ihtiyacı veya gerekliliği sonucu araçlı veya araçsız olarak yer küre üzerinde veya uzay düzleminde birel (bireysel) hareketlilik halleridir [1-3]. Ulaştırma altyapısının türüne göre; kara ulaştırması, hava ulaştırması, su ulaştırması ve boru hatları şeklinde sınıflandırılmaktadır. Kara ulaştırması ise kendi içerisinde karayolu ulaşımı ve demiryolu ulaşımı olarak ikiye ayrılmaktadır [4, 5]. Hat denilen özel bir yol üzerinde mekanik olarak hareket eden araçlarla çekilen yolcu ve yük taşıma sistemine demiryolu denilmektedir [6]. T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü'nün demiryolu şebekesi 2022 yılı istatistik verilerine göre iltisak ve istasyon yolları dahil; 11.668 km'lik konvansiyonel ve 1.460 km'lik hızlı tren hattından meydana gelmektedir [7].

Atıf için/Cite as: M. Kozak, "Işıkkara (Kütahya) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliği," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 25-30, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1424191

Demiryolu altyapı ve üstyapı olmak üzere iki ana bölümden oluşur [8]. Demiryolu araçlarının emniyetli, konforlu ve istenilen hızlarda hareket edebilmesini sağlamak amacıyla belirli kriterler esas alınarak inşa edilen ve demiryolu araçlarının yol ile temasının gerçekleştiği yol bölümüne üstyapı denilmektedir. Üstyapı; raylar, traversler, bağlantı malzemeleri ve balasttan oluşmaktadır [9]. Platformun üzerine döşenen, traverslerin aralarını dolduran ve traverse elastik bir yatak oluşturan, traversler tarafından iletilen tüm etkileri kalıcı çökmelere uğramadan ve taneleri arasındaki sürtünme ile yayarak platforma ileten, yola düşen suyun ve eriyen karların drenajını sağlayan, kare gözlü 63 mm açıklıklı elekten % 100 geçen ve kare gözlü 22,4 mm elek üzerinde ise en az % 97'si kalan ve TCDD Balast Teknik Şartnamesinde istenilen gradasyon şartlarını sağlayacak şekilde kırılmış olan keskin köşeli ve keskin kenarlı sert ve sağlam kayalar demiryolu balastı olarak tanımlanabilir [10-13]. Demiryollarının yapısı gereği trenlerin yapabileceği azami hızlara göre, ülkemizdeki T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü (TCDD)'ne ait demiryolları konvansiyonel ($V < 160$ km/s), hızlı tren (160 km/s $\leq V < 250$ km/s) ve yüksek hızlı tren ($V \geq 250$ km/s) hattı olmak üzere üç sınıfa ayrılmaktadır [13]. Bu çalışma ile Işıkkara (Kütahya) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğinin araştırılması amaçlanmıştır.

2. Materyal ve Metot

Çalışma alanı Kütahya ili, Merkez ilçesi, Işıkkara Köyü sınırları içerisinde bulunmaktadır. Kütahya iline 25 km ve Eskişehir iline ise 60 km uzaklıkta olup ulaşım D-230 ve D-650 karayolu ile sağlanmaktadır. Şekil 1'de Işıkkara (Kütahya) bazalt ocağının yer buldur haritası verilmiştir.



Şekil 1. Işıkkara (Kütahya) bazalt ocağının yer buldur haritası

Çalışma sahasında yapılan incelemelerde; ocaktaki bazalt oluşumlarının, koyu gri, siyahımsı renkte, üst seviyelerin yer yer gevşek, alt seviyeler ise sıkı dokulu bir yapıya sahip olduğu gözlenmiştir. Ocak sahasında bazalt kalınlığı 50-100 m arasında değişmekte olup, saha geneli düşünüldüğünde ortalama kalınlık yaklaşık 80 metre civarındadır. Rezerv çok kırıklı ve çatlaklı olması nedeniyle agrega üretimine elverişli olup üst serilerde ki çatlaklar yer yer kil dolguludur. Ocağın genel yapısının balast üretimine uygun olduğu, genel olarak homojen bir yapı sergilediği görülmüştür.

2020 yılında revize edilen TCDD Balast Teknik Şartnamesine göre balastın petrografik özellikleri açısından balast olarak kullanılacak kayacın kökeni ve ismi ile ilgili bir koşul aranmamakta olsa da çalışmada kullanılan kayacın köken ve isminin belirlenmesi için petrografik analiz yapılmıştır. Şartnamede istenilen balastın geometrik özellikleri ise kullanılacak üretim prosedürleri sayesinde sağlanabilecektir.

TCDD Balast Teknik Şartnamesine göre balastın fiziksel özelliklerinin tespiti için parçalanma direnci tayini (Los Angeles), su emme oranı, tane yoğunluğu, termal ve bozunma özelliği için $MgSO_4$ deneyi (dona dayanıklılık), aşınmaya karşı direncin tayini (Mikro – Deval) deneylerinin yapılması gerekmektedir. Bu çalışma da yapılan deneyler ve deneylerde kullanılan standartlar Tablo 1’de, verilmiştir.

Tablo 1. TCDD balast teknik şartnamesine göre balastın fiziksel özelliklerinin tespiti için yapılan deneyler ve deneylerde kullanılan standartlar [13, 14]

Deney	Standart
Parçalanma Direnci Tayini (Los Angeles Aşınma Dayanımı)	TS EN 1097-2 [15]
Su Emme Oranı	TS EN 1097-6 [16]
Tane Yoğunluğu	TS EN 1097-6 [16]
Termal ve Bozunma Özelliği İçin $MgSO_4$ Deneyi (Dona Dayanıklılık)	TS EN 1367-2 [17]
Aşınmaya Karşı Direncin Tayini (Mikro - Deval)	TS EN 1097-1 [18]

3. Bulgular

Polarizan mikroskop ile mineralojik ve petrografik özelliklerin incelenmesinde; yarı kristalli porfirik dokuya sahip kayacın, plajiyoklaz (% 30), olivin (% 15), piroksen (% 10), opak ve tali mineraller (% 1’den az), mikrolit ve volkan camından (% 45) oluşan magmatik kökenli yüzey kayacı olduğu tespit edilmiş ve Kayaçların Modal Minerolojik Sınıflamasına göre kayaç bazalt olarak tanımlanmıştır.

Balastın parçalanma özelliklerini ortaya koymak için kullanılan en etkili yöntem, Los Angeles aşınma testidir. Bu test, demiryollarında kullanılan balastın servis ömrü süresince tren yükünden nasıl etkilendiğini ortaya koymak için kullanılan pratik ve etkili bir testtir [19]. Çalışmada kullanılan Işıkkara (Kütahya) bazaltın parçalanma direnci (Los Angeles) % 12 olarak tespit edilmiştir.

Kayaç içindeki gözenek ya da boşlukların varlığı, kayacın mekanik özelliklerini olumsuz yönde etkilemektedir. Çatlak sistemi içindeki gözeneklerin çok küçük bir miktarı, kayacın deformasyonu üzerinde çok önemli bir etkiye sahip olabilmektedir [20]. Kayaç içindeki gözenek ya da boşluklardaki suyun donması ve ısı artışı ile bunun çözülmesi kayaçların dirençlerinin azalmasına, çatlakların ve ayrışmaların meydana gelmesine sebep teşkil etmektedir [21]. Bu nedenle balast olarak kullanılacak kayacın su emme oranı büyük öneme sahiptir. Çalışmada kullanılan Işıkkara (Kütahya) bazaltın su emme oranı % 0,9 olarak tespit edilmiştir.

Kayaçların tane yoğunluğu, onların fiziksel özelliklerinin yanı sıra dayanımları hakkında da fikir vermektedir. Yüksek tane yoğunluğuna sahip kayaçlar genellikle düşük poroziteli, düşük su emme oranına sahip ve dayanımlı kayaçlardır [22]. Bu açıdan bakıldığında balast olarak kullanılacak kayacın tane yoğunluğu kayacın fiziksel özelliklerinin tespitinde önemli bir yöntemdir. Çalışmada kullanılan Işıkkara (Kütahya) bazaltın tane yoğunluğu $2,76 \text{ Mg/m}^3$ olarak tespit edilmiştir.

Demiryolunda balast olarak kullanılan malzemeler üzerinde ısı farklarından dolayı fiziksel ayrışmalar meydana gelebilmekte ve don etkisi balastın stabilitesini olumsuz yönde etkilemektedir. Don etkisi özellikle balast olarak kullanılan agregalarda bağlayıcı malzeme bulunmaması, atmosferik şartlara direkt maruz kalması yüzünden ısı ve sıcaklık etkisiyle mekanik olarak parçalanmasına sebebiyet vermektedir [23]. Bu yüzden don kaybının balast üzerinde etkisinin tespiti önemli bir parametredir. Çalışmada kullanılan Işıkkara (Kütahya) bazaltın dona dayanıklılık (termal ve bozunma özelliği için MgSO_4 deneyi) değeri % 1 olarak tespit edilmiştir.

Mikro-Deval aşınma deneyi, iri agregaların aşınmaya karşı dayanımını belirlemek için iri agregalar üzerinde uygulanan deney yöntemidir [24]. Bu test ile demiryollarında kullanılan balastın servis ömrü süresince tren yükünden nasıl etkilendiğini ortaya koymak için kullanılan pratik ve etkili bir testtir. Çalışmada kullanılan Işıkkara (Kütahya) bazaltın aşınmaya karşı direnci (Mikro - Deval) % 9 olarak tespit edilmiştir.

Işıkkara (Kütahya) bazaltlarının demiryolu balastı olarak kullanılabilirliğinin tespiti için TCDD Balast Teknik Şartnamesine göre istenilen fiziksel deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir.

Tablo 2. TCDD balast teknik şartnamesine göre balasttan istenilen fiziksel özelliklerinin sınır değerleri ve Işıkkara (Kütahya) bazaltının sonuçları

Deney	Işıkkara (Kütahya) Bazaltı Deney Sonuçları	Konvansiyonel Demiryolu Hattı Sınır Değerleri [14]	Hızlı Tren - Yüksek Hızlı Tren Hatları Sınır Değerleri [14]
Parçalanma Direnci Tayini (Los Angeles Aşınma Direnci)	% 12	$\leq \%20$	$\leq \%14$
Su Emme Oranı	%0,9	$\leq \%2$	$\leq \%1,5$
Tane Yoğunluğu	$2,76 \text{ Mg/m}^3$	$\geq 2,50 \text{ Mg/m}^3$	$\geq 2,60 \text{ Mg/m}^3$
Termal ve Bozunma Özelliği İçin MgSO_4 Deneyi (Dona Dayanıklılık)	% 1	$\leq \%5$	$\leq \%3$
Aşınmaya Karşı Direncin Tayini (Mikro - Deval)	%9	$\leq \%14$	$\leq \%12$

4. Sonuç

Çalışma kapsamında; TCDD Balast Teknik Şartnamesinde istenilen sınır değerlere uygunluğu açısından Işıkkara (Kütahya) bazaltlarının; yüksek hızlı tren, hızlı tren ve konvansiyonel demiryolu hatlarında demiryolu balastı olarak kullanılabilirliği araştırılmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda;

- Parçalanma direnci (Los Angeles aşınma direnci) %12 olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre; bazalt numunesinin hızlı tren - yüksek hızlı tren ($\leq \%14$) ve konvansiyonel ($\leq \%20$) demiryolu hatları için uygun olduğu,
- Su emme oranı %0,9 olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre; bazalt numunesinin hızlı tren - yüksek hızlı tren ($\leq \%1,5$) ve konvansiyonel ($\leq \%2$) demiryolu hatları için uygun olduğu,

- Tane yoğunluğu $2,76 \text{ Mg/m}^3$ olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre; bazalt numunesinin hızlı tren - yüksek hızlı tren ($\geq 2,60 \text{ Mg/m}^3$) ve konvansiyonel ($\geq 2,50 \text{ Mg/m}^3$) demiryolu hatları için uygun olduğu,
- Dona dayanıklılık (termal ve bozunma özelliği için MgSO_4 deneyi) değeri %1 olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre; bazalt numunesinin hızlı tren - yüksek hızlı tren ($\leq \%3$) ve konvansiyonel ($\leq \%5$) demiryolu hatları için uygun olduğu,
- Aşınmaya karşı direnci (Mikro - Deval) %9 olarak bulunmuştur. Bu sonuca göre; bazalt numunesinin hızlı tren - yüksek hızlı tren ($\leq \%12$) ve konvansiyonel ($\leq \%14$) demiryolu hatları için uygun olduğu görülmüştür.

Yapılan deneysel çalışmalar ile Işıkkara (Kütahya) bazaltlarının; yüksek hızlı tren, hızlı tren ve konvansiyonel demiryolu hatlarında demiryolu balastı olarak kullanılabilceği sonucuna varılmıştır. Balast olarak kullanılabilcek kayaç türlerinin belirlenmesi için farklı kayaçlar üzerinde ve aynı kayaç türü olsa da farklı ocaklardan alınan kayaçlar ile yeni çalışmaların yapılmasının faydalı olacağı düşünülmektedir. Aynı zamanda bu çalışma, yapımı devam eden Ankara-İzmir, proje aşamasında olan Eskişehir-Antalya yüksek hızlı tren hatlarına yakın konumda olan Işıkkara (Kütahya) bazaltlarının söz konusu bu hatların balast ihtiyacının karşılanmasında kullanılabilirliği hakkında fikir sağlayacaktır.

Teşekkür

Çalışmama katkısından dolayı TCDD 7. Bölge Müdürlüğü ve Er-Ay Bazalt Madencilik İnşaat Taahhüt Tic. ve San. Ltd. Şti. yetkililerine teşekkürlerimi sunarım.

Kaynakça

- [1] S. Altınok, “Türkiye’de ulaştırma politikaları, karayolları ve demiryollarının mukayesesi,” *SÜ İİBF Sosyal ve Ekonomik Araştırmalar Dergisi*, 1(1-2), 73-87, 2001
- [2] A. Fidan, “Sürdürülebilir toplu ulaşım sistemi ve önemi,” *Kent Akademisi, Kent Kültürü ve Yönetimi Hakemli Elektronik Dergi*, 4(1), 1-6, 2011
- [3] C. Oral ve E. Kıpık, “Ulaştırma sektörünün önemi üzerine kavramsal bir yaklaşım,” *Oğuzhan Sosyal Bilimler Dergisi*, 1(1), 58-64, 2019
- [4] M. Kozak, “Demiryolu hatlarında karla mücadele,” *Teknik Bilimler Dergisi*, 12(2), 19-24, 2022, <https://doi.org/10.35354/tbed.924866>
- [5] E. B. Pancar, “Yol bilgisi ders notları,” 2018. [Online]. Available: <file:///C:/Users/00036281/Downloads/YOL%20B%C4%B0LG%C4%B0S%C4%B0%20DERS%20NOTLARI%20%20erhan%20pancar-converted.pdf> [Accessed: 08.12.2023]
- [6] M. Kozak, “Beton traversin gelişimi ve üretim aşamasının araştırılması,” *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 6(2), 73-81, 2010
- [7] Anonim, TCDD 2018-2022 istatistik yıllığı, [Online]. Available: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/istrapor/20182022.pdf> [Accessed: 08.12.2023]
- [8] M. Kozak, “Demiryolunda rayların birleşim noktaları ve özelliklerinin araştırılması,” *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(2), 40-49, 2011
- [9] Anonim, T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, “Yol mühendisleri kursu yol üstyapı ders notları,” *TCDD Eğitim ve Öğretim Dairesi Başkanlığı Yayınları*, Ankara, 2016
- [10] M. Kozak, “Hemzemin geçitlerdeki kaplama çeşitleri ve güvenliğe etkisinin araştırılması,” *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 2(1), 1-11, 2012
- [11] K. Oğul, İ. Topal ve E. Poşluk, “Ankara - İstanbul yüksek hızlı tren demiryolunda balast hammaddesi olarak granit ve bazaltın birlikte kullanılabilirliğinin araştırılması ve aşınma dayanımlarına etkisi,” *MT Bilimsel*, 1, 81-89, 2012
- [12] R. Nålund, “Railway ballast characteristics, selection criteria and performance,” Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering Science and Technology, Department of Civil and Transport Engineering, 2014
- [13] M. Kozak, “Demiryolu balastının ve özelliklerinin araştırılması,” *Demiryolu Mühendisliği*, 13, 86-96, 2021

- [14] Anonim, “2021/193423 ihale kayıt numaralı 1, 2, 3, 4, 5, 7 ve 8 (YHT) bölge müdürlükleri yol yenileme ve bakım çalışmalarında kullanılmak üzere 360.000 m³ balast alımı işi balast teknik şartnamesi,” [Online]. Available: <https://ekap.kik.gov.tr/EKAP/Ortak/IhaleArama/index.html> [Accessed: 10.01.2024]
- [15] *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler bölüm 2*, TS EN 1097-2, TSE, Ankara, 2020
- [16] *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler-bölüm 6: Tane yoğunluğunun ve su emme oranının tayini*, TS EN 1097-6, TSE, Ankara, 2013
- [17] *Agregaların termal ve bozunma özellikleri için deneyler-bölüm 2: magnezyum sülfat deneyi*, TS EN 1367-2, TSE, Ankara, 2011
- [18] *Agregaların mekanik ve fiziksel özellikleri için deneyler- bölüm 1: aşınmaya karşı direncin tayini (mikro- deval)*, TS EN 1097-1, TSE, Ankara, 2011
- [19] Ö. F. Apaydın ve M. Yılmaz, “Bazaltik kayaların balast kirlenmesi yönünden karşılaştırılması,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8(1), 296-311, 2019
- [20] A. Teymen, “Bazı kayaların petrografik, fiziksel ve mekanik özellikleri arasındaki ilişkilerin incelenmesi,” Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, 134s, Adana, 2005
- [21] K. Güleç, “Kayaların fiziksel ve mekanik özelliklerinin su muhtevası ile değişimi,” *Bilimsel Madencilik Dergisi*, 13(3), 13-16, 1974
- [22] M. Kozak, “İscehisar (Afyonkarahisar) mermerlerinin jeolojik ve jeomekanik özelliklerinin araştırılması,” Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Mühendislik Fakültesi*, Afyonkarahisa, 2016
- [23] H. Işlak, “Evciler (Gölbaşı/Ankara) bazaltının petrografik ve petrokimyasal özelliklerinin demiryolu balast ve balastaltı malzemesi olarak kullanılabilirliği üzerine etkisi,” Yüksek Lisans Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Konya, 2019
- [24] Z. Arsoy, H. Çiftçi, B. Ersoy, T. Uygunoğlu ve B. Arslan, “Afyonkarahisar bölgesi mermer parça atıklarının beton agregası olarak değerlendirilebilirliğinin araştırılması,” *El-Cezerî Fen ve Mühendislik Dergisi*, 6(3), 503-516, 2019

Özgeçmiş



Mehmet KOZAK

1985 yılında Uşak'ta doğmuştur. Yapı Öğretmenliği, Kamu Yönetimi, Jeoloji Mühendisliği ve İnşaat Mühendisliği bölümlerinde lisans; Yapı Eğitimi ABD ve Jeoloji Mühendisliği ABD'nde ise yüksek lisans eğitimlerini tamamlamıştır. 2007 yılında göreve başladığı TCDD 7. Bölge Müdürlüğünde sırasıyla Yol ve Geçit Kontrol Memuru, Hat Bakım Onarım Memuru, Yol Sürveyanı, İnşaat Teknikeri, Jeoloji Mühendisi olarak görev almış ve 2021 yılından beri TCDD 7. Bölge Demiryolu Bakım Servis Müdürlüğünde Yüksek Jeoloji Mühendisi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: mkozak15@hotmail.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Daha Emniyetli İşletme İçin Bağımsız Hemzemin Geçit Çözümü

Çağla ADALI^{*1,2}, Güray KERA²

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

² Yapı Merkezi İDİS Mühendislik Sanayi ve Ticaret A.Ş., Araştırma ve Geliştirme Departmanı, İstanbul, Türkiye

*cagla.adali@ymidis.com.tr

(Alınış/Received: 12.03.2024, Kabul/Accepted: 26.04.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Hemzemin geçitler, demiryolu emniyetinde kritik noktalar olup, dünyadaki demiryolu kazalarının çoğu hemzemin geçitlerde meydana gelmektedir. Bu konu Avrupa istatistiklerine kıyasla Türkiye’de daha kritiktir. Çoğu durumda karayolu araç sürücülere hemzemin geçitlerde kazalara neden olsa da, kaza olasılığını azaltmak için emniyet açısından geliştirilmiş hemzemin geçit sistemleri kullanımının faydası yadsınamayacak kadar fazladır. Bir hemzemin geçit sisteminin emniyet özelliklerini geliştirmek için bazı önemli noktaların tanımlanması gerekir. Bunlara ek olarak, SIL 4 uyumluluğunun sağlanması hem rastgele hem de sistematik arızaları azaltır. Bu çalışmada, yüksek emniyetli koruma sistemi sağlamak amacıyla bağımsız bir hemzemin geçit sistemi olan id-LX, sunulmuş; sırasıyla Hata Türü ve Etkileri Analizi ile Hata Ağacı Analizi yapılmıştır. Bu sistem, yolboyu ekipmanlarını etkinleştirmek ve gösterge bilgilerini mantık ünitesine iletmek için SIL 4 uyumlu modülleri de dahil olmak üzere, SIL 4 sertifikalı PLC ve mantık ünitesi olarak yazılıma dayanan bir sistemdir. Bu arıza emniyetli sistem, acil durumlarda emniyetli durumu koruma kabiliyetine de sahiptir. SIL 4 uyumluluğu, hemzemin geçit ekipmanları arasındaki ortak nedenlere karşı koruma, sertifikalı bir mantık ünitesi ve sağlam bir makinist uyarı sinyalleri, hemzemin geçitlerde kaza potansiyelini azaltmak için önemli avantajlardır. Önerilen sistemin uygulamaya konması ile, Türkiye’deki yaygın emniyet hedeflerinin önemli ölçüde iyileştirilebileceği kanıtlanmıştır.

Anahtar kelimeler: Ortak nedenli arıza, Arıza emniyetli, Hemzemin geçit, Hemzemin geçit mantığı, Demiryolu emniyeti, Emniyet bariyeri

An Independent Level Crossing Solution For Safer Operation

Abstract: Level crossings are critical points in railway safety since most of the railway accidents in the world occur at level crossings. This issue is more critical in Türkiye when compared to European statistics. Even though in most cases, car drivers cause accidents at level crossings; the benefit of usage of safety-developed level crossing systems, to reduce the probability of accidents, is undeniable. To improve the safety characteristics of a level crossing system, certain crucial points must be identified. In addition, achievement of SIL 4 compliance reduces both random and systematic failures. In this study, id-LX, an independent level crossing system, is presented to provide a high safety protection system; Failure Modes and Effect Analysis and Fault Tree Analysis were performed respectively. This is a system based on SIL 4 certified PLC and software as a logic unit, including SIL 4 complaint modules for activating wayside equipment and for transmitting indication information to the logic unit. This fail-safe system is also capable in emergency situations to keep safe state. SIL 4 compliance, protection against common causes between level crossing equipment, a certified logic unit and a robust train driver warning signals are key advantages to reduce accident potential at level crossings. It has been proven that with the implementation of the proposed system, common safety targets in Türkiye can be significantly improved.

Keywords: Common cause failure, Fail-safe, Level crossing, Level crossing logic, Railway safety, Safety barrier

1. Giriş

Hemzemin geçit, ulaşımda emniyetli seyahat açısından önemli bir role sahiptir. Demiryolu kazalarının çoğu hemzemin geçitlerde meydana gelmekte ve kritik sonuçlar doğurmaktadır.

Atıf için/Cite as: Ç. Adalı, G. Kera, “Daha emniyetli işletme için bağımsız hemzemin geçit çözümü,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 31-40, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1451639

Literatürde de belirtildiği gibi hemzemin geçitlerde her dört kazada bir kişi ölmektedir [1]. Türkiye’de bu oranın çok daha yüksek olduğu kesindir. Bu kazaların sebepleri çoğunlukla yetersiz veya uygunsuz insan eylemleridir. Daha açık olmak gerekirse, kazaların %80-90’ı karayolu araç sürücülerinden kaynaklanmaktadır [2]. Ancak bazen bu kazaların yanlış demiryolu işletiminden kaynaklandığı da olmaktadır. İnsan hayatının önemi göz önünde tutulduğunda, riskleri azaltmak için ekstra emniyet önlemlerinin alınması gerektiği açıktır. Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollarında Tablo 1’de görüldüğü üzere 2010-2021 yılları arasında toplam demiryolu ölümlerinin %48,7’si hemzemin geçitlerde meydana gelmiştir [3][4]. Hemzemin geçit kazalarının sayısı diğer bazı kaza türlerine göre daha az olmasına rağmen hemzemin geçitlerde meydana gelen kazaların ölüm oranının daha yüksek olduğu görülmektedir. Tablo 1’e göre, Türkiye’deki hemzemin geçitlerde emniyet seviyelerinin iyileştirilmesinin acil bir ihtiyaç olduğu görülmektedir.

Tablo 1. Türkiye demiryolu kaza ve ölüm oranları

	Kaza		Ölüm	
	Toplam	Oran	Toplam	Oran
Tren çarpması/çarpışması	61	%5,0	20	%3,1
Raydan çıkma	275	%22,5	35	%5,4
İnsan kazası	460	%37,7	277	%42,4
Diğer	42	%3,4	3	%0,5
Hemzemin geçitte çarpma/çarpışma	382	%31,3	318	%48,7
Toplam	1220	%100,0	653	%100,0

Bu nedenle kaza sayısının azaltılması, ölümlerin ve hatta yaralanmaların önlenmesi amacıyla birçok ülkede hemzemin geçitlerle ilgili çalışmalar yapılmıştır. Çek Cumhuriyeti’nde hemzemin geçitlerde araç sürücülerini, kişileri veya trenleri tespit etmek için uyarı işaretleri yeterli olmadığından, birçok kaza meydana gelmektedir; bundan dolayı, tehlikeli durumları önlemek için bütün hemzemin geçidi gören bir değerlendirme kamera sistemi kullanılmaktadır [5]. Tayvan Demiryollarında hemzemin geçit sistemi emniyeti konusunda yapılan çalışma göz önüne alındığında, kamera izleme sistemli hemzemin geçit geleneksel sisteme göre daha emniyetlidir [6]. Tao, kamera izleme sistemini içeren daha gelişmiş sistemin aksine Tayvan Demiryollarındaki mevcut hemzemin geçit sisteminin emniyetliğini, Hata Ağacı ve Markov Analizi kombinasyonu ile incelemiştir [6]. Ayrıca, Hindistan Demiryolları uygulamasında, hemzemin geçide yaklaşan trenleri tespit ederek hemzemin geçitlerdeki kazaları önlemek için Küresel Konumlama Sistemi (GPS) kullanılmaktadır [7]. Benzer bir çalışma Bangladeş Demiryolları’nda da yapılmıştır. Daha açık olmak gerekirse, trenlerin konumları sonar sensörler aracılığıyla GPS kullanılarak tespit edilir ve Google Map bağlantısının bulunduğu GSM üzerinden gönderilir [8]. Bir tren tespit edildiğinde, hemzemin geçitteki bariyerler açılmaya başlar; ancak, belirttikleri gibi, önerilen algılama sistemi ile ilgili olarak sistemin her şeyi bir tren gibi algılayabileceği şeklinde bir kısıtlama vardır [8]. Bu durum, tren işletimi açısından mutlak bir engeldir.

Durmuş ve ark. [9], sistem çalışırken hata ve arızaları tespit edebilecek nitelikte olan arıza emniyetli sinyalizasyon tasarımının kritiğini yapmıştır. Hata veya arıza tespit edildikten sonra, arıza emniyetli tasarım, sistemi bileşenlere göre farklılık gösteren önceden ayarlanmış emniyetli bir moda alarak bileşenleri korur; örneğin bariyerler kapalı olmaları gerektiği halde kapalı değilse arıza emniyetli tasarım sistemi emniyetli moda alacaktır. Bu arıza durumları meydana geldiğinde, bütün sistemin önceden ayarlanmış emniyetli moda geçmesi gerekir. Örneğin, bariyerin kapalı olmaması durumunda, karayolu araç sürücülerinin daha fazla dikkatini çekecek bir uyarı ve tren makinistleri için de sinyallerin kırmızıya çevrilmesi suretiyle bir uyarı olmalıdır [9]. Tren trafiği, karayolu trafiği, şerit sayısı ve hat sayısı; hemzemin geçitlerde kazaları etkileyen parametrelerden bazılarıdır.

Kore uygulamasında hemzemin geçitler, sinyalizasyon ekipmanına ve yapılan emniyet analizine göre sınıflandırılır [10]. Joung'a [10] göre, emniyet analizi hemzemin geçit kazalarını öngörmenin bir yoludur. Öngörüldükten sonra, meydana gelebilecek kazaları önlemek mümkündür. Örneğin, hataların bir Fransız hemzemin geçit sistemi üzerindeki etkilerini incelemek için Hata Ağacı Analizi (FTA) ve Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA) uygulanmaktadır [11]. İlave emniyet ve risk analizi ile hemzemin geçit kazası olasılığını azaltmanın yanı sıra tren hızı ne kadar yüksekse (110 km/s üzerinde) kaza riskinin de o kadar yüksek olduğunu gösteren bir risk değerlendirme yöntemi gösterilmektedir [11].

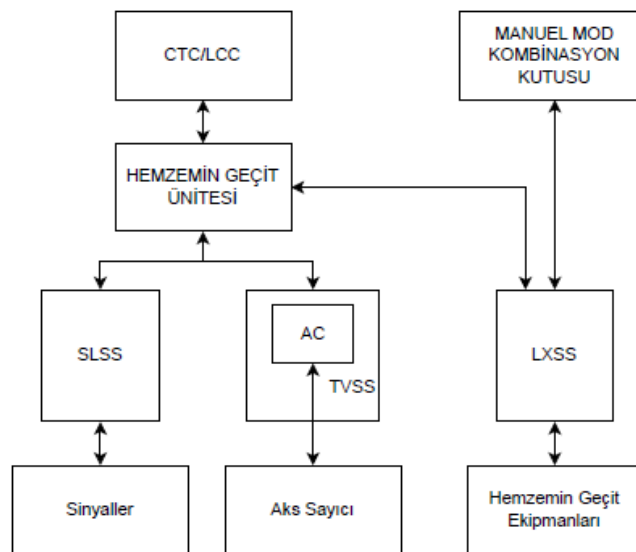
Bu makalede öncelikle ilgili çalışmalarla hemzemin geçit incelenmekte, gerekli emniyet hususları ele alınmakta ve bir düzenek üzerinden emniyetli bağımsız hemzemin geçit sistemi tanıtılmaktadır.

2. Metot

Türkiye'de bulunan konvansiyonel demiryolu hat kesimlerinde 2595 adet hemzemin geçit bulunmaktadır. Bunun 1404 adet lokasyonu pasif korumalı hemzemin geçitlerden oluşmaktadır. Hemzemin geçit sistemi ile korumanın olduğu kesişme yerlerinin büyük bir bölümü ise otomatik korumaya sahip değildir. Bu, hemzemin geçitleri kazalara yol açabilecek insan hatalarına açık hale getirmektedir. İnsan faktörlerini ortadan kaldırmak için sistemin otomatikleştirilmesi gerekir.

Bu çalışmada önerilen bağımsız hemzemin geçit sistemi Şekil 1'de gösterilmektedir. Bu sistemde hemzemin geçit sistemi bir algoritma ile yönetilir ve çevresi hemzemin geçit birimi olarak etiketlenir. Her ikisi de SIL sertifikalıdır, böylelikle sadece derleme ve kodlama riskleri ortadan kaldırılamaz, aynı zamanda donanım/yazılım entegrasyon sorunları da ortadan kalkar. Önerilen bu hemzemin geçit sistemi, bağımsız olma özelliği ile başka bir sinyalizasyon sistemine entegre olma ve istenilen bir lokasyona kurulabilme kabiliyetlerine sahiptir.

Sistemin aktüatörleri, Sinyal Lambası Alt Sistemi (SLSS), Aks Sayıcı (AC) Hat Serbestliği Alt Sistemi (TVSS), engel algılayıcı dahil Hemzemin Geçit Sürücü Alt Sistemi (LXSS) olarak gösterilmiştir. Bu aktüatörlerin CENELEC standartları [12] uyarınca arıza emniyetli olması gerekmektedir. Aktüatörler, hemzemin geçit ünitesine geri bildirim gönderir, böylece sistemi emniyetli duruma geçmeye zorlayabilir.



Şekil 1. Önerilen bağımsız hemzemin geçit sistemi

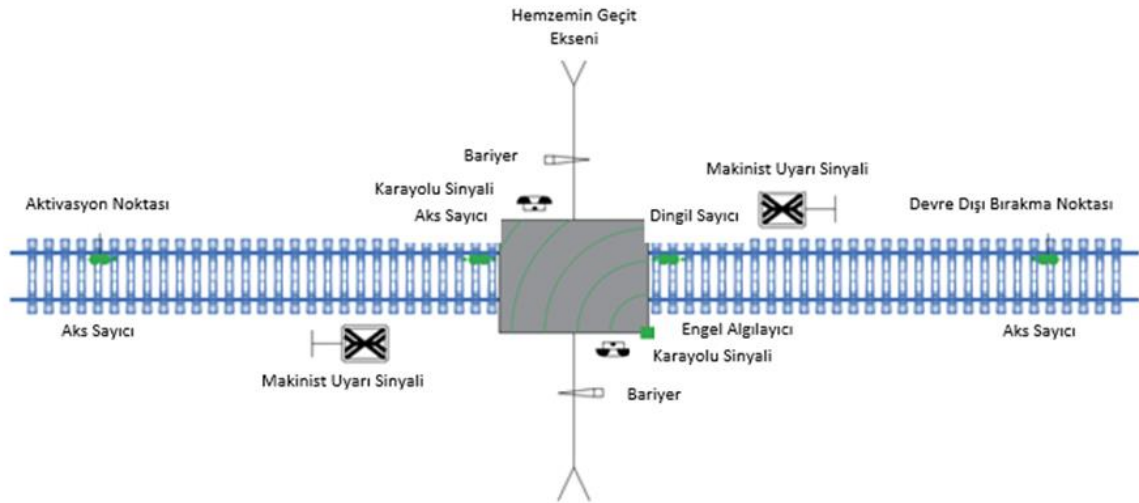
Aktüatörlerin en önemli bileşeni, yolboyu ekipmanlara komut veren ve durumlarını kontrol eden bir baskılı devre kartı olan Sinyal Kontrol ve Doğrulama (SCP - Signal Control and Prove) kartıdır. Aşırı akım ve aşırı gerilim koruması sağlayan çeşitli elektronik bileşenlerden oluşan arıza emniyetli bir bileşendir. Aşırı akım ve aşırı gerilim koruması önemli bir konudur, bu nedenle SCP'deki koruma tek başına yeterli değildir.

Saha Giriş Koruması (FIP - Field Input Protection) adı verilen bir baskılı devre kartı ile ayrıca sahadan da koruma sağlanır. FIP, çeşitli aşırı gerilim koruma cihazları ve sigortalar içerir. Bu bileşenler, ortak neden faktörlerini de azaltmaya yardımcı olur.

Önerilen sistem, işletmecinin ihtiyaçlarını karşılamak için esnekler. Hemzemin geçit trafiğinin yoğunluğu göz önünde bulundurulduğunda, işletmeci, sistemin alt sistemlerinin es geçilmesini isteyebilir. Yoğunluk/hemzemin geçit ilişkisi kuralları, TCDD'nin Hemzemin Geçitlerde Alınacak Tedbirler ve Uygulama Esasları Yönetmeliğinde belirtilmiştir [13].

Önerilen sistem, tam bariyerli bir sistemde bariyerlerin sıralı olarak kapanması gibi detaylı özelliklere de sahiptir. Bu sayede, ilk set bariyerler kapandıktan sonra geçitte sıkışan bir araba, demiryolundan kaçma fırsatı bulacaktır. Bariyerler arabaya çarpma durumunda içeriden kolayca kırılabilir, ancak sürücüler paniklediğinde zamanında harekete geçemeyebilir. Sıralı kapanma, sürücüye kapanıştan önce geçmesi gereken boş bir şerit gösterir ve kazaların çoğu önlenir.

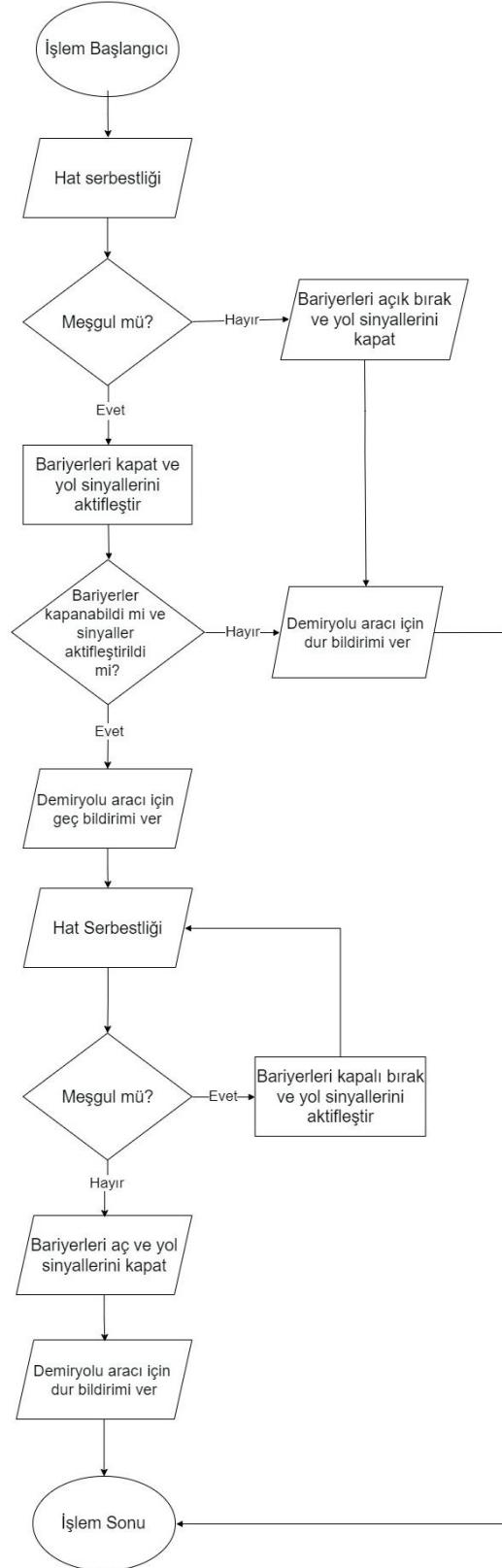
Şekil 2'de tipik bir hemzemin geçit yerleşim düzeni gösterilmektedir. Tren seyir yönünün soldan sağa doğru olduğu varsayılmıştır. Dolayısıyla, aktivasyon noktası en soldaki aks sayıcındadır.



Şekil 2. Hemzemin geçit yerleşim düzeni

Şekil 3'te gösterilen süreçte sistemin kendi mantığı ile çalışan ünite, hat kesiminin meşguliyeti ile başlar ve hemzemin geçit sisteminin aktifleştirilmesini başlatmakla sorumludur. Hemzemin geçit sistemi aktifleştirildiğinde, mantık ünitesi bariyerlerin kapanması, trafik ışıklarının (yol sinyalleri) yanıp sönmeleri ve çanın çalması komutu verir. Modüller, bu ekipmanların durum bildirimlerini mantık ünitesine geri gönderir. Durumları beklediği gibiyse, makinist uyarı sinyali, devam et bildirimi olarak makiniste yeşil bildirim verir. Bu sinyal fren mesafesinin gerisindedir, böylece beklenmedik durumların meydana gelmesi durumunda, makinist hemzemin geçide ulaşmadan önce treni durdurabilir.

Tren, devre dışı bırakma hat kesiminden ayrıldığında süreç sona erer. Mantık ünitesi bu hat kesiminden serbest bildirimini aldığı anda, bariyerlerin açılması, trafik ışıklarının sönmesi ve çanın durması komutunu verir ve makinist uyarı sinyali için dur sinyali olarak kırmızı bildirim gösterir.



Şekil 3. Bariyer algoritmasının blok şeması

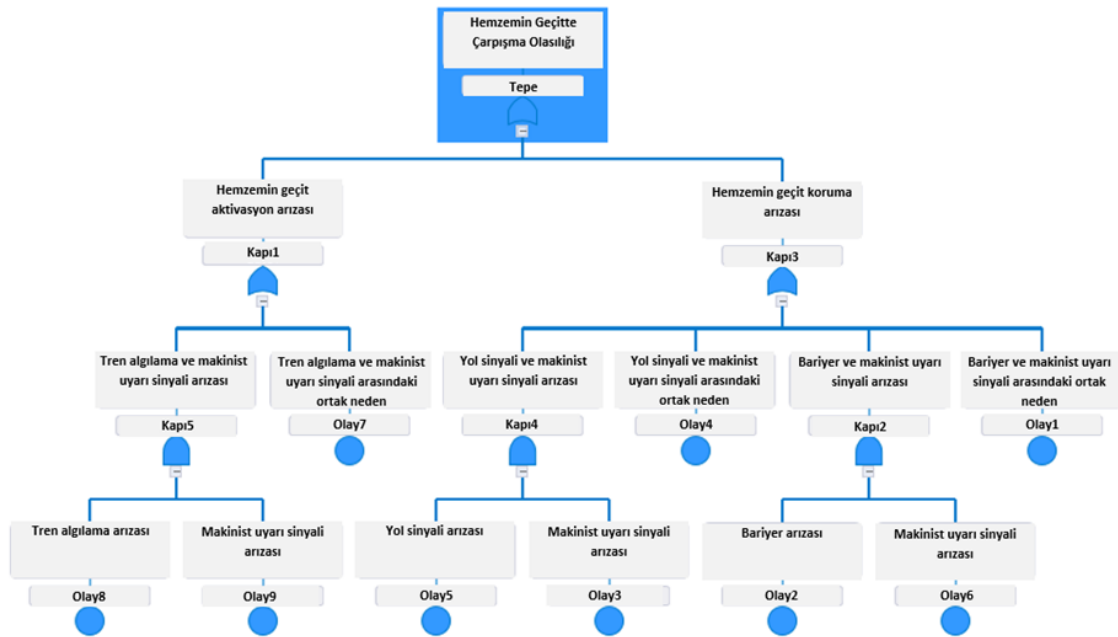
2.1. Emniyet analizi

Hata Türü ve Etkileri Analizi yapılmıştır. Hemzemin geçit sisteminin olası hata türlerini gösteren sonuçlar, Tablo 2’de verilmiştir. Demiryolu araçları için bir emniyet bariyeri olarak makinist uyarı sinyalleri, diğer ekipmanların tekli hatalarını önler. Bu emniyet bariyeri, bir tren, hemzemin geçit ile olan fren mesafesinden önceki makinist uyarı sinyallerine gelmeden önce ekipman arızası meydana gelirse çalışır.

Tablo 2.Önerilen sistemin hata türleri

Fonksiyon	Hata Türü	Emniyet ile ilgili mi?
Aktivasyon	1.1 Makinist uyarı sinyali yeşil yanıyor	2.1 ile ise
	1.2 Makinist uyarı sinyali kırmızı yanıyor	Hayır
	2.1 Tren tespit edilmedi	1.1 ile ise
	2.2 Gereksiz tren algılama	Hayır
Koruma	3.1 Bariyerler kapalı değil	1.1 ile ise
	3.2 Bariyerin gereksiz kapanması	Hayır
	4.1 Yol sinyalleri çalışmıyor	1.1 ile ise
	4.2 Yol sinyallerinin gereksiz aktifleşmesi	Hayır

Tipik bir hemzemin geçit sisteminin Hata Ağacı Analizi, Şekil 4’te gösterilmektedir. Arızanın, makinist uyarı sinyali olan geri dönüşü olmayan bir noktadan geçmeden önce meydana geldiğini varsayarsak, sistemin emniyetliğini etkileyen en önemli faktörler; tren algılama ve makinist uyarı sinyali arasındaki ortak nedenli arızalar, bariyer ve makinist uyarı sinyali arasındaki ortak nedenli arızalar ve yol sinyalleri ile makinist uyarı sinyali arasındaki ortak nedenli arızalardır. Ortak nedenli arızalar, IEC 61508 yöntemine göre 0,01 ile 0,1 arasında, Humphreys yöntemine göre 0,001 ile 0,3 arasında olabilir. VE kapıları arasındaki farklılık ve bunların ortak nedenli arıza değerleri dikkate alındığında, ekipman arızalarının ihmal edilebilir düzeyde olduğu ve başlıca faktörlerin ortak nedenli arızalar olduğu varsayılabilir. Bu nedenle, tasarım sırasında ortak nedenlerin azaltılmasına azami özen gösterilecektir [14] [15].



Şekil 4. Hemzemin geçit sistemi hata ağacı analizi

2.2. Arıza koşullarında sistemin davranışları

Sistemin arızada emniyetli olabilmesi için öncelikle sistemin arızaları tespit edebilmesi gerekmektedir. Beklenmedik bildirimler altında, sistemin mantık ünitesi hata üretecek ve hemzemin geçidi emniyetli duruma sokmak için makinist uyarı sinyalinin dur bildirimine çekecektir (TCDD kurallarına göre, makinist uyarı sinyalindeki dur bildirimini, tren hızının 25 km/sa'e indirilmesini işaret eder). Çeşitli arıza bildirimleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Arıza durumunda üretilecek hatalar

Hata	Açıklaması
Ray bölgesi veri bağdaşım hatası	Aks sayıcıdan kaynaklanan arıza nedeniyle bölgeden aynı anda meşgul ve boş bildirimlerinin gelmesi veya hiç bildirim gelmemesi üzerine üretilir.
Makinist uyarı sinyali bildirimsizlik hatası	Yandı bildirim alınmadığı durumda üretilir.
Yanlış makinist uyarı sinyali hatası	Lojik tarafından yakma komutu gönderilmemesine rağmen, ilgili sinyalden yandı bildirim gelmemesiyle üretilir.
Yanlış bariyer konumu bildirim hatası	<ol style="list-style-type: none"> Lojik tarafından bariyer aç komutu gönderildikten sonra, bariyerin açma süresi bitiminde, bariyerden "bariyer açık" bildirim alınmaması veya bu bildirim kaybedilmesi durumunda üretilir. Lojik tarafından bariyer kapa komutu gönderildikten sonra, bariyerin kapanma süresi bitiminde, bariyerden "bariyer kapalı" bildirim alınmaması veya bu bildirim kaybedilmesi durumunda üretilir.
Bariyer konumu veri bağdaşım hatası	Bariyerden aynı anda açık ve kapalı bildirimlerinin gelmesi veya hiç bildirim gelmemesi üzerine üretilir.
Kırık bariyer hatası	"Bariyer kırık değil" bildirim kaybedildiğinde üretilir.
Yol sinyali hatası	Araç trafiğini kontrol eden yol sinyaline yak komutu gönderildiğinde, sinyalden yandı bildirim alınmamasıyla üretilir.
Çift tetik hatası	Hattın her iki yönünden hemzemin geçit bölgesine tren girişi yapıldığında üretilir.

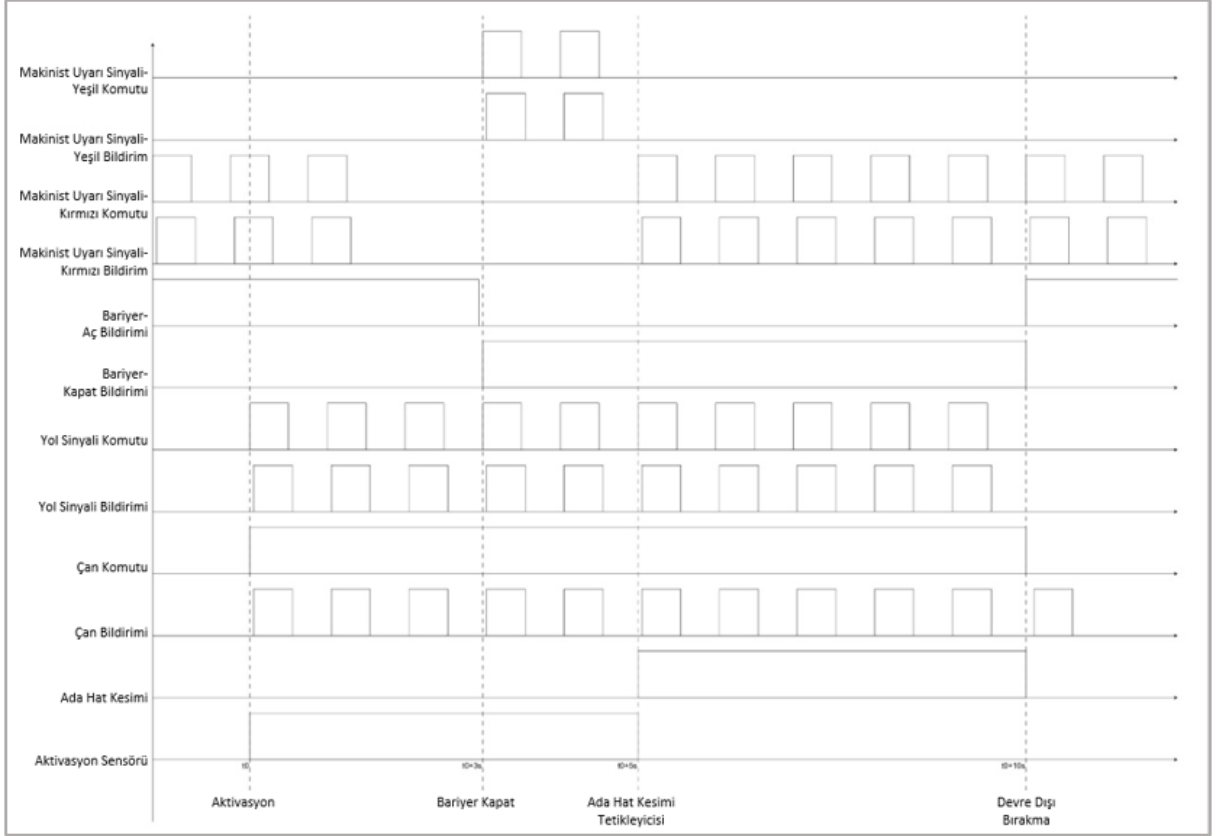
Sistem, arayüzlerden kaynaklanan ihmal edilebilir sürelerdeki kayıpların hata üretimine sebep vermemesi için zaman filtreleri kullanmaktadır.

3. Bulgular

Önerilen sistem, Şekil 2'de gösterildiği gibi, üç tekerlek dedektörü kurularak pratik bir şekilde atölye ortamında gerçekleştirilir. Birinci tekerlek dedektörü sistemin tetiklendiği aktivasyon noktasında, ikincisi ada hat kesiminin girişinde ve üçüncüsü ada hat kesiminin çıkışında olacak şekilde konumlandırılır. Bu tekerlek dedektörleri, hem PLC hem de kendi id-LX yazılımı ile iletişim halindedir. Hemzemin geçit modülü, mantık ünitesi ile yolboyu ekipmanı arasında arayüz sağladığından, komutların mantık ünitesinden yolboyu ekipmanına iletimi ve bildirimlerin yolboyu ekipmanından mantık ünitesine iletimi, hemzemin geçit modülü tarafından gerçekleştirilir.

İlk olarak, tekerlek dedektörleri bir plaka tarafından sıralı olarak tetiklenmiş ve her bir yolboyu ekipmanının davranışları osiloskop ile ölçülmüştür; ölçümler, Şekil 5'te voltaj değişimleri (ilgili ekipmanın aktifleşme durumu) olarak gösterilmektedir. Her bir kare dalga 500ms'lik bir zaman

aralığını temsil etmektedir. Aktivasyon sensörü t0'da tetiklendiğinde, çana ve yol sinyaline komut verilir. Sistemin komut gönderdikten sonra ekipmanlardan geri bildirim alması , 30ms ± 5ms içinde gerçekleşir. Makinist uyarı sinyali, trenin bir hemzemin geçit kesimine ulaşabileceğini göstermek için bariyerler kapalı durumda iken, yeşil bildirim verir. Çan, bariyerler kapanmaya başladığı andan itibaren tamamen açıldığı ana kadar çalmaya devam eder. Ada hat kesimindeki tekerlek dedektörlerinin tetiklenmesi trenin hemzemin geçitte olduğunu gösterir ve makinist uyarı sinyali kırmızı bildirim verir. Tren, devre dışı bırakma noktasına geldiğinde bariyerler açılmaya başlar. Bariyerler tamamen açıldığında, çan ve yol sinyalleri durur.



Şekil 5. Sıralı olarak tetiklenmiş yolboyu ekipmanlarının davranışları

4. Sonuç

Hemzemin geçitler demiryolu emniyetinde önemli bir noktadır. İstatistikler, ölümlü kazaların çoğunun hemzemin geçitlerde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu kazaların meydana gelme olasılığını azaltmanın birçok yolu vardır. Bunlardan ilki, CENELEC uyumlu bir sistemin olmasıdır. Sistemin tasarım ve üretiminin CENELEC uyumlu olması, düşük arıza ve hata olasılıklı arıza emniyetli bir sistemin ortaya çıkmasını sağlar. Hemzemin geçit sisteminin SIL 4 uyumluluğu, hemzemin geçit sisteminde oluşabilecek hem rastgele hem de sistematik arıza ihtimalini azaltır. Sistemin elektrik korumasına sahip olması, sistem tasarımını korur ve ortak nedenli arıza olasılığını azaltır. Ayırma, karmaşıklık ve emniyet analizi gibi diğer hususlar da dikkate alınır. Ek olarak, emniyetli olduğu kanıtlanmış bir mantık ünitesi hemzemin geçitlerde emniyetli davranış sağlar. Bunu, hem kodlama ve derleme hem de yazılımın çalıştığı ortam sağlar. Ayrıca, demiryolu araçları için makinist uyarı sinyalleri, olası tehlikeler için bir emniyet bariyeri sağlar ve makinisti, tren geri dönüşü olmayan noktaya ulaşmadan önce hemzemin geçit sistemindeki arızaya karşı uyarır. Yapılan bu çalışmada, bağımsız bir hemzemin geçit sistemi anlatılmış ve emniyet açısından değerlendirilmiştir. Emniyetli seyahat için, Türkiye'deki

hemzemin geçitlerin mevcut durumu ışığında bağımsız bir hemzemin geçit sistemi çok önemli ve acil bir konudur.

Teşekkür

Bu çalışma, Yapı Merkezi İDİS (İzleme, Denetim ve İletişim Sistemleri) Mühendislik Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi, İstanbul, Türkiye tarafından desteklenmiştir.

Kaynakça

- [1] E. Schöne, “A risk-based method for safety assessment of level crossings,” Ph.D. tezi, Technical University of Dresden, Dresden, 2013
- [2] E. Schöne, Q. Mahboob, *Handbook of RAMS in Railway Systems*. Boca Raton: CRC Press, 2018
- [3] T. C. Devlet Demiryolları İstatistik Yıllığı (2010-2014), s.70
- [4] T. C. Devlet Demiryolları İstatistik Yıllığı (2013-2017), s.67
- [5] P. Sikora, M. Kiac, ve M. K. Dutta, “Classification of railway level crossing barrier and light signalling system using YOLOv3,” in *43rd Int. Conf. on Telecommunications and Signal Processing (TSP)*, Milano, İtalya, 2020, pp. 528-532
- [6] C. C. Tao, “A combinatorial approach to quantify stochastic failure of complex component-based systems the case of an advanced railway level crossing surveillance system,” in *4th Int. Conf. on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD)*, Haikou, Çin, 2007, pp. 301-306
- [7] S. Banerjee, S. Mondal, A. Chakraborty, ve S. Chattaraj, “Global positioning system based automated railway level crossing,” in *Int. Conf. on Computer, Electrical & Communication Engineering (ICCECE)*, Kolkata, Hindistan, 2020, pp. 1-4
- [8] K. R. Ahmed, M. A. Hossain, A. Akter, ve L. Akthar, “A Secure Automated Level Crossing and Train Detection System for Bangladesh Railway,” in *Int. Conf. on Advancement in Electrical and Electronic Engineering (ICAEEE)*, Gazipur, Bangladeş, 2022, pp. 1-4
- [9] M. S. Durmuş, U. Yıldırım, A. Kurşun ve M. T. Söylemez, "Fail-safe signalization design for a railway yard: a level crossing case," in *10th International Workshop on Discrete Event Systems (WODES 2010)*, 2010, pp. 347-352
- [10] E. J. Joung. “Application of safety management process for the safety analysis of level crossing,” in *Int. Conf. on Electrical Machines and Systems (ICEMS)*, Nanjing, Çin, 2005, pp. 2493-2497
- [11] C. Liang, and M. Ghazel. “A risk assessment study on accidents at french level crossings using bayesian belief networks,” *International Journal of Injury Control and Safety Promotion*, vol. 25, no. 2, pp. 162–72, Nisan, 2018. doi: 10.1080/17457300.2017.1416480
- [12] *Railway applications - Communication, signalling and processing systems - Safety related electronic systems for signalling*, CENELEC EN 50129, 2020
- [13] *Railway Level Crossings and Application Principles Regulation*, Şubat, 2023
- [14] *Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems*, CENELEC EN 61508-6, 2010
- [15] R. A. Humphreys, “Assigning Numerical Value to the Beta Factor Common Cause Evaluation,” in *Proceedings: Reliability '87*, vol. 2C, 1987

Özgeçmiş



Çağla ADALI

İstanbul Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünden lisans derecesi ile mezun oldu. Halen İstanbul Teknik Üniversitesi'nde Raylı Sistemler Mühendisliği yüksek lisansı yapmaktadır. Aynı zamanda Yapı Merkezi İDİS Ar-Ge departmanında Demiryolu Sinyalizasyon Mühendisi olarak çalışmaktadır. Daha önce DLH Marmaray'da Marmaray Projesi-CR3 Gebze-Halkalı Banliyö Hattı İyileştirme Projesinde stajyer olarak çalışmıştır. Şu anki araştırma konusu, daha yüksek emniyet standartlarına sahip hemzemin geçit sistemleridir.
E-posta: cagla.adali@ymidis.com.tr

**Güray KERA**

2008 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi Gemi İnşaatı Mühendisliği bölümünden mezun oldu. 2011 yılında aynı bölümde yüksek lisans derecesi aldı.

2013 yılından bu yana demiryolu sektöründe çalışmaktadır. Halen YM İDİS Ar-Ge departmanında Emniyet Müdürü olarak görev yapmaktadır. Daha önce RAMS alanında çeşitli şirketlerde çalıştı. Şu anki araştırma konusu, hemzemin geçit sistemlerinde emniyeti arttırmaktır.

E-posta: guray.kera@ymidis.com.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Çağla ADALI: Metodoloji, Kaynaklar, Yazma-orijinal taslak hazırlama, İnceleme, Görselleştirme. Güray KERA: Kavramsallaştırma, Doğrulama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, Kontrol.



Yatar Gövdeli Tren Setlerinin Bilecik - Bozüyük Arasında Uygulamasının Yolcu Konforu ve Seyahat Süresi Üzerine Etkisinin Matematiksel Olarak İspatı

Beytullah BAŞEĞMEZ

Ataşehir Adıgüzel Meslek Yüksekokulu, Mekatronik Programı, İstanbul, Türkiye

beytullahbasegmez@adiguzel.edu.tr

(Alınış/Received: 22.03.2024, Kabul/Accepted: 20.05.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Demiryolu yolcu taşımacılığında seyahat süresinin kısaltılması önemli bir hedeftir. Yatar gövdeli tren, pasif veya aktif eğilme mekanizmalarını kullanarak hattaki kurpları konvansiyonel trenler için belirlenen sınırlardan daha yüksek hızlarda geçebilen trenleri ifade eder. Aktif eğilmeli teknolojide araç gövdesinin eğilmesi, sensörleri vd. çeşitli elektronik ekipmanı da içerir ve genellikle hidrolik veya elektrikli bir aktüatörün kontrolüne dayanır. Bu çalışmada dünya üzerinde pek çok ülkede uygulaması bulunan yatar gövdeli tren teknolojisinin Türkiye’de de uygulamasına yönelik mevcut demiryolu hattının Bilecik il sınırları içerisindeki kesimine ait veriler kullanılarak hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında, seçilen hattaki kurp ve dever değerlerine göre; hatta konvansiyonel tren seti ve yatar gövdeli tren seti kullanılması durumunda müsavi işletme hızlarında yanıl kuvvet ve konfor katsayısı değerleri bulunmuş ve yatar gövdeli tren kullanılması durumunda gerçekleşecek iyileşme hesaplanmıştır. Hattın belirli kesimlerinde işletme hızının %5 ila %10 oranında artırılabilmesi sonucuna varılmıştır. Bu sonuçlar, seçilen hat özelinde olup, farklı bir hatta yanıl kuvvetlerde daha yüksek oranlarda düşüş gözlenebileceği ve maksimum müsaade edilebilir hız değerlerinde daha yüksek yüzdelerde artış gerçekleştirilebileceği kanaati hasıl olmuştur. Yatar gövdeli tren teknolojisinin Türkiye’de uygulanması durumunda çalışma süresinin kısaltılması nedeniyle daha sık tren kalkışları, daha yüksek hizmet kalitesi ve daha iyi bir imaj sayesinde demiryolu yolculuğunun daha rekabetçi hale gelebileceği, böylece TCDD hedeflerine katkıda bulunulabileceği ve ulusal ekonomiye fayda yaratılabileceği tahmin edilmektedir. Son olarak, bu çalışmanın tesiriyle; Bilecik başta olmak üzere mevcut demiryolu hattındaki yolcu taşımacılığı hizmetinin yatar gövdeli trenlerle gerçekleştirilmeye başlatılmasına yol açacağı umut edilmektedir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Kurp, Yatar gövdeli tren, Hız, Konfor

Mathematical Proof of the Effect of the Application of Tilting Train Sets Between Bilecik and Bozüyük on Passenger Comfort and Travel Time

Abstract: Reducing travel time in railway passenger transportation is an important goal. Tilting train refers to trains that can pass curves on the line at speeds higher than the limits set for conventional trains by using passive or active tilting mechanisms. In active tilting technology, the tilting of the vehicle body involves sensors, various electronic equipment and is usually based on the control of a hydraulic or electric actuator. Calculations were made using the data of the section of the existing railway line within the borders of Bilecik province for the application of the tilting body train technology, which is applied in many countries around the world, in Türkiye. In the study carried out within the scope of this article; according to the curve and cant values on the selected line; in fact, in case of using a conventional train set and a tilting body train set, lateral force and comfort coefficient values were found at equal operating speeds, and the improvement that would occur in case of using a tilting body train was presented as a result, it was concluded that the operating speed can be increased by 5% to 10% in certain sections of the line. These results are specific to the selected line, and it has been concluded that a higher rate of decrease in lateral forces can be observed on a different line and a higher percentage increase in maximum allowable speed values can be achieved. It is estimated that if tilting train technology is implemented in Türkiye, it can make railway travel more competitive thanks to higher service quality and a better image, more frequent train departures due to shorter working hours; thus contributing to TCDD’s targets and creating benefits for the national economy. Finally, with the influence of this study; It is hoped that the passenger transportation service on the existing railway line, especially in Bilecik, will be started to be carried out by tilting trains.

Atıf için/Cite as: B. Başegmez, “Yatar gövdeli tren setlerinin Bilecik - Bozüyük arasında uygulamasının yolcu konforu ve seyahat süresi üzerine etkisinin matematiksel olarak ispatı,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 41-53, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1457013

Keywords: Railway, Curve, Tilting Train, Speed, Comfort

1. Giriş

Seyahat süresinin kısaltılması taşımacılık sektöründe her zaman önemli bir hedef olmuştur. Aliymanlardaki (düz hat) taşıt hızı, güvenlik nedenleriyle veya yakıt tüketimi verimliliği nedeniyle maksimuma çıkarılmış ve/veya sınırlandırılmıştır. Ancak hattaki yatay ve düşey kurplar zorluk teşkil etmekte ve taşıt hızı, seyahat süresi üzerinde negatif etki oluşturmaktadır [1]. Kurpları başarıyla geçmek için trenlerin genellikle kabul edilebilir bir hıza yavaşlaması gerekir. Yatar gövdeli tren, pasif veya aktif eğilme mekanizmalarını kullanarak kurpları konvansiyonel trenler için belirlenen sınırlardan daha yüksek hızlarda geçebilen trenleri ifade eder [2].

Yatar gövdeli demiryolu taşıt teknolojisi, demiryolu taşıt hızını artırmanın efektif yolları içerisinde öne çıkar [3]. Mevcut yapı üzerinde kısmi değişikliklerle işletilebilen yatar gövdeli demiryolu taşıtlarının kullanılmasıyla hızın artırılması; hattın hızlı ve/ya yüksek hızlı demiryolu standartlarına uygun olacak şekilde, daha az kurpla ve kurpların mümkün merteye büyük yarıçaplı/developmanlı olacak şekilde altyapı ve üstyapısının yeniden inşa edilerek işletim hızının artırılması yoluna göre oldukça düşük maliyetli bir çözüm sunmaktadır [3-5].

Yatar gövdeli trenler, sahip olduğu eğilme teknolojisi sayesinde yatay kurplarda 8°'ye kadar eğilebilmesiyle seyahat süresini kısaltmaktadır [3]. Örnek olarak, İsveç ana hattında yer alan Stockholm-Gothenburg demiryolu hattında gerçekleştirilen çalışma süresi simülasyonları neticesinde, her ikisi de 275 km/h azami hıza sahip olan, yatar gövdeli yüksek hızlı yolcu treninin standart konvansiyonel gövdeli bir yüksek hızlı yolcu trenine göre çalışma süresi avantajının yaklaşık olarak %10 olduğu tespit edilmiştir [6].

Bu çalışma; Türkiye'de demiryolunun yolcu taşımacılığı içerisindeki payının artırılması ve TCDD tarafından konvansiyonel hatlardaki hizmetlerin geliştirilmesi hedeflerine binaen dünya üzerinde birçok hatta on yıllardır uygulama imkânı bulmuş yatar gövdeli demiryolu taşıt teknolojisinin Türkiye'de de uygulanabilirliğini ispat etmeyi amaçlamaktadır. Yatar gövdeli tren teknolojisi Türkiye'de konvansiyonel hatlara düşük yatırım maliyetleriyle kısa sürede uygulanabilir. Yapılan hesaplamalara göre sistemin Türkiye'de de uygulanması durumunda demiryolunun yolcu taşımacılığındaki hedeflerine katkıda bulunabileceği ve ulusal ekonomiye fayda yaratabileceği öngörülmüştür [3,7].

TCDD tarafından işletilmekte olan mevcut demiryolu hatlarının yatar gövdeli demiryolu taşıtlarının kullanımına uygun demiryolu hatlarına dönüştürmek için bazı hususların dikkate alınması gereklidir. Mevcut hatta daha hızlı hizmet verileceği için hat bileşenlerinin durumu oldukça önemlidir [8]. Dikkate alınması gereken konular şu şekilde sıralanabilir:

- Pantograf-katener etkileşimi: Yatar gövdeli demiryolu taşıtlarının pantografına konvansiyonel taşıtların elan kullanmakta olduğu katener hattı üzerinden enerji beslenir fakat yatar gövdeli tren setinin pantografındaki yatay yer değiştirme konvansiyonel hattakine göre çok daha fazladır, taşıt gövdesi eğildiğinde, pantograf kafası, pantografin normal çalışma aralığını oldukça aşan büyük bir yanıl yer değiştirme gerçekleştirir. Yatar gövdeli demiryolu taşıtı pantografında daha fazla dinamik kuvvet oluşacağı hususu göz önünde bulundurularak yatay yer değiştirmenin pantograf mukavemeti ve aşınması; ayrıca katener telleri bağlamında belirli sınırlar dahilinde tutulması elzemdir [9].
- Yatay karp: Demiryolu taşıtına etkiyen merkezkaç vd. kuvvetlerin taşıt, altyapı elemanları ve yolcu üzerindeki etkisi, kısa developmanlı yatay kurplardaki geniş yatay kurplara göre fazladır. Bu yüzden dar karp noktalarına dikkat edilmelidir [8]. Demiryolu hattının gerekli noktalarında yatay kurpların tasarımında farklılaşmaya gidilebilir.

- Geçiş Eğrisi: Aliymandan kurba geçişteki merkezkaç etkisini azaltmak için geçiş eğrisi kullanılmalıdır. Demiryolu hattı elemanlarına etkisi ve yolcu konforu açısından uzun geçiş eğrileri uygulanmalıdır. Geçiş eğrileri olmadan yapılan yatay kurplar yatar gövdeli demiryolu taşıtlarının avantajını azaltmaktadır [10]. Geçiş eğrileri için genelde önerilen değer 30 m'dir [11].
- Yolcu konforu: Yol tutması yatar gövdeli demiryolu taşıtını kullanan yolcular için önemli problemlerden biridir. Yatay eğim açısı ve hız arttıkça yolcuların konfor seviyesi düşmektedir. Mevcut hatta daha yüksek hızlı demiryolu işletimi yolcuların konfor seviyesini düşürebileceğinden hat boyunca yatay eğim açılarının asgari düzeyde tutulacak şekilde demiryolu hattında iyileştirmelere gidilmesi yarar sağlayacaktır [12].
- Ayrıca hat üzerinde özel düzenlemeler gerektirmese de balast, ray ve ray bağlantılarına gerekli ihtimam, konvansiyonel hatlara nazaran daha fazla gösterilmelidir [10].
- Titreşim: Demiryolu araçlarından kaynaklı titreşimin, yolcu konforu, hat ve taşıt aksamının ömrü hususları çerçevesinde olumsuz etkisini önlemek için titreşim belirli sınırlar içinde tutulmalıdır [3].

Yatar gövdeli tren teknolojisinin kullanımı, Deutsche Bahn'ın 1972 yılında, 624 serisinin 634 serisi olarak adlandırılan versiyonunun, ticari hizmette (aktif) yatar gövdeli ilk tren olarak Köln-Saarbrücken hattında hizmete sunulmasıyla başlamıştır. Yine 70'li yıllarda İtalya'da Pendolino hızlı tren setleri geliştirilmiş ve kullanıma başlamıştır. 1980'lerin başlarında, Birleşik Krallık'ta da yatar gövdeli tren geliştirilmiş ve kullanıma sunulmuşsa da yaygınlık kazanamamıştır. Aktif olarak eğilmeli trenler için çığır açan gelişme, İtalya'da ETR450 ve İsveç'te X2000 gibi büyük seri ticari trenlerin piyasaya sürülmesiyle 1990 civarında gerçekleşti. Japonya'da 2007 yılında Shinkansen Serisi N700, hizmete giren ilk çok yüksek hızlı yatar gövdeli tren olmuştur [6]. Alstom, çeşitli iyileştirmeler yaptıktan sonra 2006 yılında geliştirilmiş aksamı ile önceki versiyonlara göre daha güvenilir yeni nesil Pendolino tren setlerini özellikle İsviçre Federal Demiryollarında (SBB) kullanılmak üzere geliştirip piyasaya sürdü [13]. Tablo 1.'de Dünya'nın çeşitli yerlerinde geliştirilen ve işleme alınan yatar gövdeli trenlerin adları yer almaktadır.

Tablo 1. Çeşitli ülkelerde kullanıma sunulan yatar gövdeli tren setlerinin adları [14]

Yalnızca atalet kuvvetleri tarafından eğilen trenler, (pasif) doğal devrilme özelliğine sahip trenler			
Yatar gövdeli tren seti adı	Kullanıldığı Ülke		
Talgo XXI	İspanya		
UAC TurboTrain	ABD, Kanada		
JNR 381 Serisi	Japonya		
Atalet kuvvetleri tarafından başlatılan ancak bilgisayar tarafından düzenlenen devrilme özelliğine sahip trenler		Bilgisayar tarafından kontrol edilen devrilme özelliğine sahip trenler	
Yatar gövdeli tren seti adı	Kullanıldığı Ülke	Yatar gövdeli tren seti adı	Kullanıldığı Ülke
JR Shikoku 2000 Serisi	Japonya	Acela	ABD
JR Hokkaido KiHa 281 Serisi	Japonya	Advanced Passenger Train	Bir. Krallık
JR Shikoku 8000 Serisi	Japonya	British Rail Class 390 - Pendolino	Bir. Krallık
JR East E351 Serisi	Japonya	Alfa Pendular	Portekiz
Chizu Express HOT7000 Serisi	Japonya	ElettroTreno	İtalya
JR Central 383 Serisi	Japonya	ICT	Almanya
JR Kyushu 883 Serisi	Japonya	JetTrain	Kuzey Amerika
JR Hokkaido KiHa 283 Serisi	Japonya	NSB Class 73 ve 93	Norveç
JR West 283 Serisi	Japonya	Regio Swinger	Almanya ve Hırvatistan
JR Kyushu 885 Serisi	Japonya	Pendolino	İtalya, Finlandiya, Birleşik Krallık, Çekya
JR Shikoku 2700 Serisi	Japonya	Super Voyager	Birleşik Krallık
TRA TEMU1000 Serisi	Japonya	Meitetsu 2000	Japonya
		E5 ve E6 Seri Shinkansen	Japonya

H5 Serisi Shinkansen	Japonya
8600 Serisi	Japonya
E353 Serisi	Japonya
2600 Serisi	Japonya

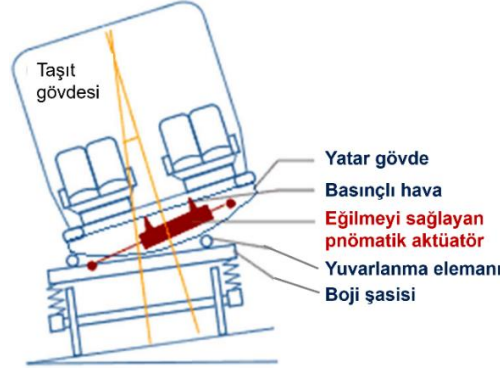
Tren seti yatay kurplardan geçerken tren ve içerisindeki yolcular yanal kuvvetlere maruz kalır [6] ve yolcu konforu ciddi şekilde etkilenir. Taşıtın kurptan geçişi sırasında insan vücudu koltuğa, kol dayanağına veya arabanın yan tarafına doğru zorlanacaktır. Ayrıca taşıt tutmasına yakalanan yolcular olabilir. Bagajlar yolcu baş üstü bölmelerden düşebileceğinden ve yaralanmaya neden olma potansiyeline sahip olacağından güvenlik de etkilenir. Gelecek istasyonda inmeye hazırlanan ayaktaki yolcular dengesini kaybedip düşebilir ve kendilerini ve/ya diğer yolcuları yaralayabilir [1]. Araç gövdesinin içe doğru yatması, yolcuların hissettiği yanal ivmeyi azaltır ve trenin kurpları daha yüksek bir hızda ve sürüş konforunu koruyarak geçmesine olanak tanır [6]. Fakat trenlerin yana yatması nedeniyle oluşan yol tutması, yolcuların bir kısmı için büyük bir sorun oluşturur. Seyahat sırası ve/ya sonrasında; yorgunluk, uyuşukluk, beniz solgunluğu uykululuk, baş dönmesi, tükürük miktarında değişme, mide bulantısı gibi sağlık sorunları gözlenebilir. Binaenaleyh, yolcular üzerinde minimum sağlık sorunu yaratacak şekilde demiryolu hattı tasarımı ve yatar gövde teknolojisi optimize edilmelidir [4].

Boji, birden fazla tekerlek takımı ile irtibatlandırılmış boji şasisi ve bolsterden müteşekkildir. Bolster, üzerinde boji göbeğini barındıran ve boji şasisi ile amortisör ve/ya süspansiyon elemanları ile bağlanmış ikinci temel aksamdır. Bojinin demiryolu taşıtı şasisi ile bağlantısı ise şasi göbeğinin boji göbeği içerisine geçirilmesi ve bağlantı elemanlarıyla ayrılmaya karşı emniyete alınması şeklinde gerçekleştirilir [15].

Yatar gövdeli trenler, doğal eğilmeli trenler ve aktif eğilmeli trenler olarak ikiye ayrılabilir. Doğal (pasif) eğilmeli teknoloji, yatar gövdeli taşıt gövdesinin ağırlık merkezinin yukarısında bulunan bir eğim merkezi ile fizik yasalarına dayanır. Bir yatay kurpta, merkezkaç kuvveti ile yanal ivmenin etkisi altında, araç gövdesinin alt kısmı dışarı doğru kayar. Bu durumun güvenlik üzerinde olumsuz bir etkiye sahip olduğu hususuna dikkat edilmelidir. Aktif eğilmeli teknolojide araç gövdesinin eğilmesi, sensörleri vd. çeşitli elektronik ekipmanı da içeren ve genellikle hidrolik veya elektrikli bir aktüatörün kontrolüne dayanan teknolojiye sahiptir; sistemde tahrik olmadan önemli bir yatma hareketi olmaz [6]. Sensörler, gövde yatış açısı ve (gövdeye monte edilen ivmeölçerle) yanal ivmesi bilgisi hakkında sürekli veri toplar; kontrolörler eğilme talebine göre gerekli eğilme büyüklüğü ve oranını düzenler [16].

Bu sistemde devrilme momenti, kurp yarıçapına bağlı olarak daha yüksek kuvvetlerin etkisinde artmaktadır ancak ağırlık merkezine göre trenin konumu değişmediğinden trenin güvenliği üzerinde negatif tesir yaratmaz, yalnızca çok yüksek yanal rüzgarlarda kabul edilebilir sınırları aşan momentler oluşabilir [6]. Aktif eğilme sistemi altında bugüne kadar Avrupa ve Japon tekniği olmak üzere iki teknik geliştirilmiştir [17].

Avrupa tekniğinde kullanılan sistem güvenli ve güvenilirdir ve diğer yatırma sistemlerine göre biraz daha karmaşık olmasına rağmen yolcu konforu ve yol tutması açısından daha yüksek olumlu geri bildirim sahiptir [2]. Japon tekniğinde ise eğilme, hem hat üzerine hem de taşıta yerleştirilen ekipmanlarla sağlanmaktadır. Bu teknikte, yolcuların konforu daha yüksek olmakla birlikte maliyet de daha yüksektir ve eğilme açısı daha düşüktür [17]. Bu sistemde pnömatik fren sistemiyle (aynı kompresör tarafından beslenen) aynı hattı kullanan, pnömatik aktüatörle gövdenin eğilmesi temin edilir [2]. Şekil 1.'de Japon tekniğinin kullanıldığı yatar gövde mekanizmasına dair şematik gösterim yer almaktadır.



Şekil 1. Japon yatar gövde mekanizmasının şematik gösterimi [2]

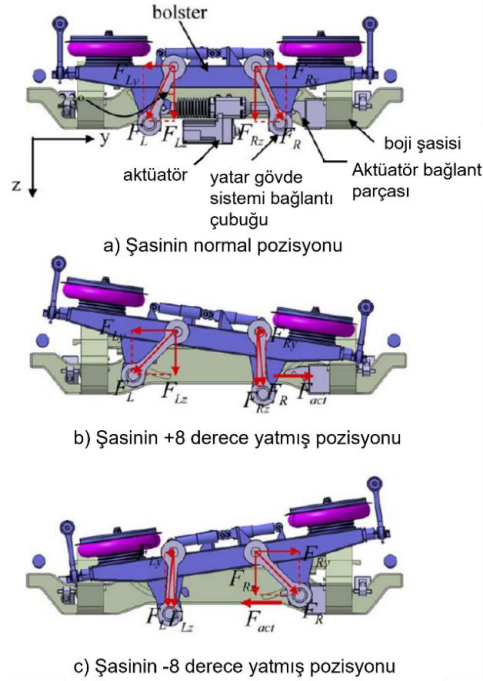
Yatar gövdeli demiryolu taşıtlarının eğilebilmesini sağlayan sistemde; boji şasisi ile bolster arasındaki bağlantılar gövdenin eğilebilmesine olanak taşıyacak şekilde tasarlanmıştır. Demiryolu taşıtı gövdesi, hava yayıyla beşik travers üzerine oturur. Bağlantıları kurplarda uygun vaziyete sokabilmek görevini yerine getiren bir aktüatör bulunur. Ek olarak sistemde kullanılan pantograf mekanizması da özeldir. Şekil 2.'de bu teknolojiye kullanılan aktüatör gösterilmiştir.



Şekil 2. Yatar gövdeli tren teknolojisinde kullanılan elektromekanik aktüatör [6]

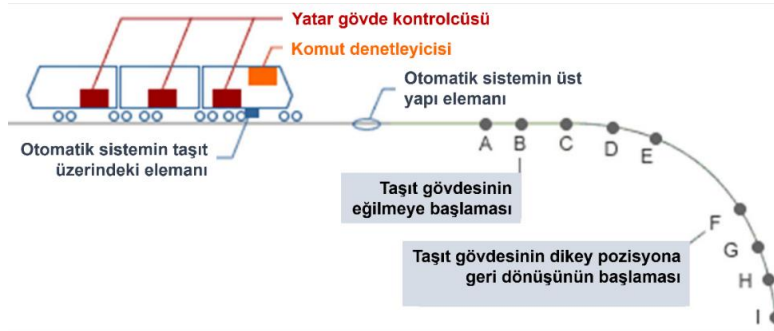
Servo motor tarafından tahrik edilen elektro-mekanik aktüatör, yüksek enerji verimliliğinin yanı sıra hızlı yanıt verme özelliğine de sahiptir. Hidrolik, pnömatik ve elektro-hidrolik tipte aktüatörler de yatar gövdeli sistemde kullanılmaktadır. Hidrolik tip hızlı tepki verir ve diğer tiplerden daha güvenlidir ancak hidrolik borular vb. gibi bakım gerektiren birçok bileşeni vardır ve çalışma yağının kirlenmeden korunması gerekir [18]. Ek olarak hidrolik pompanın ömrü sorun teşkil eder ve çalışma gürültü seviyesi yüksekse kabin içi sessizliği bozarak yolcuları rahatsız edebilir [1].

Eğilme sistemleri, yatay kurplarda dönüş yönüne doğru maksimum 8 derece eğilebilecek şekilde tasarlanmaktadır [9]. Şekil 3.'de bu aksamın normal ve en yüksek eğimle yatmış pozisyonlarına ait görseller; taşıt gövdesi kütlesi kaynaklı ve aktüatörün yarattığı, aksama etkiyen kuvvetlerle birlikte verilmiştir.



Şekil 3. Yatar gövdeli taşıt şasisinin normal ve her iki yönde en yüksek derecede yatmış pozisyonları ve bağlantı elemanındaki kuvvetler [19]

Elektronik kontrollü sistemde; demiryolu taşıtının baş kısmına yerleştirilen bir jiroskop, dış rayın yükseldiği kesimleri algılar ve dever miktarına göre vagon eğilme açısını belirler. Aynı zamanda ön bojiye yerleştirilen bir ivmeölçer, yatay kurplardaki yanıl ivmeyi ölçer ve taşıt gövdesi eğilme açısının aşamalı olarak uygulanmasını sağlar (Şekil 4.). Bu sensörler tarafından sağlanan veriler, gerekli komutları üretebilen işlemci ile etkileşime girer. İşlemci tarafından üretilen komutlar aktüatöre iletilerek gövdenin yatırılması vuku bulur [17].



Şekil 4. Kontrollü eğilme sistemi [2]

2. Metot

Demiryolu hattındaki yol eksenlerinde doğrultunun değiştirildiği eğri parçalarına kurp denir. İki basit kurptan oluşan bileşik kurplar, aynı yönde ya da ters yönde birbirini izleyen yatay kurplar olmak üzere oldukça çok sayıda kurp ile bir güzergâhtaki demiryolu hattı tamamlanır. Yatay kurpların uygun olarak projelendirilmesi, hattın emniyeti ve konforuna doğrudan etki eder. Kurulun uygunsuzluğu halinde demiryolunun kapasitesi ve proje hızı düşecek, kaza ihtimali (örn. derayman) de artacaktır. Yatay kurplarda konfordan taviz verilmeden elde edilebilecek maksimum hız, temel olarak kurp yarıçapına (R) ve devere bağlıdır. Kurplar yarıçapları (R) ile ifade edilmekle birlikte yay (developman) ya da eğrilik derecesi ile de belirtilebilir [20].

Bir taşıta yatay kurpta etki eden merkezkaç kuvveti aşağıdaki denklemlerle hesaplanır.

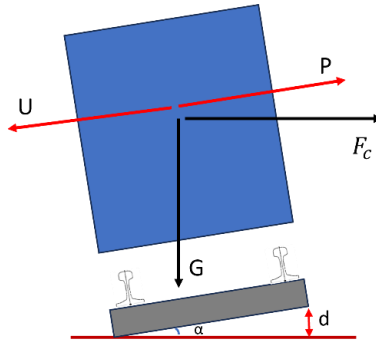
$$F_c = m \frac{v^2}{R} \quad (1)$$

Burada F_c merkezkaç kuvveti, m kütle, v m/s cinsinden taşıt hızı ve R kurp yarıçapıdır (m). Denklem 1'i diğer bir şekilde ifade edersek Denklem 2'ye ulaşılabilir,

$$F_c = \frac{G}{g} \frac{\left(\frac{V}{3,6}\right)^2}{R} \quad (2)$$

Burada G ağırlık ve V km/h cinsinden taşıt hızıdır.

Demiryolu hattındaki kurplarda meydana gelen merkezkaç kuvvetinin olumsuz etkilerini ortadan kaldırmak amacıyla, hat, dış rayın yüksekliği artırılarak dış raydan iç raya doğru eğimli düzlem haline getirilir. Kurban dış rayı ile iç rayı arasındaki yükseklik farkı dever olarak tanımlanır. Dever, merkezkaç kuvvetinin negatif tesirini asgari düzeye indirerek [21] derayman riskini azaltır. Şekil 5.'de dever d ile ifade edilmiştir ve devere göre oluşan kuvvetler de şekilde gösterilmiştir.



Şekil 5. Dever uygulamasının bulunduğu hatta demiryolu taşıtına etkiyen kuvvetler

$P = U$ hali denge durumudur.

$$F_c \cos \alpha = G \sin \alpha \quad (3)$$

$$\frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} = G \cdot \frac{d}{e} \quad (4)$$

Denklem 4'teki e , ekartmandır (ray açıklığı).

$$\frac{V^2}{3,6^2 \cdot 9,81 \cdot R} = \frac{d}{1435} \quad (5)$$

Denklem 5.'den deveri (d) çekersek;

$$d = 11,3 \cdot \frac{V_p^2}{R} \quad (6)$$

Denklem 6.'da dever mm cinsinden, kurp yarıçapı metre cinsinden ve hız km/h cinsindedir. TCDD tarafından kabul edilen maksimum dever değeri 130 mm'dir [12, 22].

$P > U$ hali için,

$K = P - U$ (K: Yanal Kuvvet)

$$K = \frac{G}{g} \cdot \frac{V^2}{R} - G \cdot \frac{d}{e} \quad (7)$$

Konfor katsayısı:

$$\gamma = \frac{K}{G} \quad (8)$$

$$\gamma = \frac{V_{max}^2}{127 \cdot R} - \frac{d}{1435} \quad (9)$$

Konfor katsayısının (γ) hiçbir şartta %6,5'tan büyük olması istenmez [23].

$P < U$ hali için,

$K = U - P$

Konfor katsayısı:

$$\gamma = \frac{d}{1435} - \frac{V_{min}^2}{127 \cdot R} \quad (10)$$

Dünya üzerinde pek çok ülkede uygulaması bulunan yatar gövdeli tren teknolojisinin Türkiye'de de uygulamasına yönelik mevcut demiryolu hattı verileri kullanılarak gerçekleştirilecek matematiksel hesaplama için yukarıdaki denklemlerden yararlanılmıştır. Hesaplamalar için MS Excel programı kullanılmıştır. Yapılan çalışmada hat kesimi olarak Bilecik il sınırları içerisinde yer alan Bozüyük – Demirköy hattı esas alınmıştır. Hatta ait uydu görseli Şekil 6.'da verilmiştir. Tablo 2.'de ise hat boyunca (Bozüyük'ten başlamak üzere) yer alan yatay kurpların sırasıyla yarıçap değerleri verilmiştir.

Tablo 2. Bozüyük'ten Demirköy'e uzanan hatta yatay kurp değerleri

Kurp No	Yarıçap Uzunluğu (m)
Kurp 1	500
Kurp 2	500
Kurp 3	400
Kurp 4	400
Kurp 5	500
Kurp 6	400
Kurp 7	300
Kurp 8	400
Kurp 9	400
Kurp 10	300
Kurp 11	250
Kurp 12	300
Kurp 13	300
Kurp 14	250
Kurp 15	700
Kurp 16	400
Kurp 17	400
Kurp 18	300



Şekil 6. Bozüyük - Demirköy konvansiyonel tren hattının uydu görüntüsü

Bilecik il sınırları dahilindeki Bozüyük-Demirköy hattında işletilen demiryolu yolcu vagonu TÜRASAŞ'ta imal edilen TVS 2000 olup, ray açıklığı 1435 mm olan standart hatta uygun monoblok tekerlek takımına sahip, vagon genişliği 2825 mm, vagon yüksekliği 4050 mm, tampondan tampona vagon boyu 26400 mm ve ön arka bojilerin göbek eksenleri arası mesafe 19000 mm'dir. Müsaade edilebilir minimum kurp yarıçapı 125 m olan bojiler, uzun yıllardır pek çok ülkede yolcu vagonu bojisi olarak kullanılan Y32 tipi olup görseli Şekil 7.'de verilmiştir. Bu bojide maksimum müsaade edilebilir dingil yükü 15 ton olduğundan yola çıkılarak hesaplamalarda vagonun tam dolu halde kütesinin 60 ton olduğu varsayılmıştır.



Şekil 7. TVS2000 yolcu vagonlarında kullanılan Y32 tipi boji [24]

3. Bulgular

Proje hızı 110 km/h seçilerek, denklem 6'ya göre yapılan hesaplamalar neticesinde dever değerleri 250 m kurp için 547mm, 300 m kurp için 456 mm, 400 m kurp için 342mm, 500 m kurp için 274mm ve 700 m kurp için 195 mm olması gerektiği bulunmuştur. Demiryolu üstyapı standartları gereği 130mm'den daha yüksek devere müsaade edilmediğinden bu hatta 110 km/h proje hızının uygulanamayacağı açıktır. Proje hızını 60 km/h kabul ederek Tablo 3.'deki veriler elde edilmiştir.

Tablo 3. Bozüyük – Demirköy hattındaki kurp değerlerine göre dever, yanal kuvvet, konfor katsayısı hesaplamaları tablosu

$V_p=60\text{km/h}$	Kurp (m)	Dever	Yanal Kuvvet	Konfor
No	Yarıçapı	(mm)	(N)	Katsayısı
1	250	162,7	797256,45	1,354
2	300	135,6	664380,38	1,129
3	400	101,7	498285,28	0,847
4	500	81,4	398628,23	0,677
5	700	58,1	284734,45	0,484

Tablo 3.'den görülebileceği üzere 60km/h hızda yanal kuvvetler ve dolayısıyla konfor katsayısı beklenenden çok yüksek değerlerde ortaya çıkmıştır. Bu sebeple bu demiryolu hattında çok daha düşük hızlarda işletim yapılabilir. En keskin kurp olan 250 metrelik kurpta 21 km/h olarak hesaplanan maksimum hız, kurp yarıçapındaki artışla birlikte sırasıyla 23 ve 24 km/h ve 700 metrelik kurpta 27 km/h maksimum hıza ulaşılabilen hesaplanmıştır. Hattın büyük kısmı Karasu Deresi vadisinde yer aldığından oldukça fazla sayıda ve küçük yarıçaplı (keskin) kurp bulunmaktadır. Müsaade edilebilir maksimum hız değerlerinin oldukça düşük çıkması üzerindeki en büyük etken budur. Tabloyu 250 ile 300 metrelik kurplarda maksimum 20km/h; 400 metrelik kurpta maksimum 23km/h ve 500 ile 700 metrelik kurplarda maksimum 25km/h hıza göre güncelleyerek Tablo 4.'e ulaşılabilir.

Tablo 4. Bozüyük – Demirköy hattındaki kurp ve hesaplama sonucu seçilen dever değerlerine göre; yanal kuvvet, konfor katsayısı ve maksimum hız hesaplamaları sonuç tablosu

No	Kurp (m)	Dever	Yanal Kuvvet	Konfor	Hattın deverden	Maksimum
	Yarıçapı	(mm)	(N)	Katsayısı	dolayı eğim açısı	Hız (km/h)
1	250	130	42677,35	0,073	5,2°	20
2	300	130	26677,35	0,045	5,2°	20
3	400	100	38332,58	0,065	4°	23
4	500	80	42186,06	0,072	3,2°	25
5	700	60	28960,98	0,049	2,4°	25

Bozüyük-Demirköy demiryolu hattında yatar gövdeli tren işletilmesi ve sistemin izin verdiği maksimum yatış derecesi olan 8 derece ile gövdenin yatması durumunda konfor katsayısı düşecek yani yolcular daha düşük yanal kuvvet hissederek daha konforlu seyahat etmiş olacaklar ve tren seti için aynı yatay kurplarda maksimum hız artırılmış olacaktır. Hesaplamalar sonucu elde edilen veriler Tablo 5.'de verildi.

Tablo 5.'den görüldüğü üzere yanal kuvvetlerde azalma yaşanmış ve konfor katsayısı göz önünde bulundurularak yapılan hesaplamalar neticesinde bir miktar yanal kuvvet artışına da izin verilerek maksimum hızda bazı kurplarda 2 km/h ilave hız elde edilebilmiştir. Bu hız artışı üstyapının güvenli limitleri içerisinde. Hız artışı olmaksızın aynı hız değerleri ile seyahatte yanal kuvvetlerde %3 ila %8 arasındaki oranlarda ve konfor katsayısında %2,5 ila %7,5 arasındaki oranlarda azalma yaşanacağı hesaplanmıştır. Hesaplama sonuçları Tablo 6.'da verilmiştir.

Tablo 5. Bozüyük – Demirköy hattındaki kurp ve hesaplama sonucu seçilen dever değerlerine göre; hatta yatar gövdeli tren seti kullanılması durumunda yanıl kuvvet, konfor katsayısı ve maksimum hız hesaplamaları sonuç tablosu

No	Kurp (m) Yarıçapı	Dever (mm)	Yanal Kuvvet (N)	Konfor Katsayısı	Maksimum Hız (km/h)
1	250	130,0	40142,95	0,068	20
2	300	130,0	40921,83	0,070	22
3	400	100,0	36598,78	0,062	23
4	500	80,0	40761,06	0,069	25
5	700	60,0	36848,62	0,063	27

Tablo 6. Bozüyük – Demirköy hattındaki kurp ve hesaplama sonucu seçilen dever değerlerine göre; hatta konvansiyonel tren seti ve yatar gövdeli tren seti kullanılması durumunda müsavi işletme hızlarında yanıl kuvvet ve konfor katsayısı değerleri ile bunlardaki yüzde azalma değerleri tablosu

N o	Kurp (m) Yarıçapı	Dever (mm)	Konvansiyonel tren seti		Yatar gövdeli tren seti		Yüzde azalma	
			Yanal Kuvvet (N)	Konfor Katsayısı	Yanal Kuvvet (N)	Konfor Katsayısı	Yanal Kuvvet	Konfor Katsayı
1	250	130	42677,35	0,073	40142,95	0,068	%5,9	%6,6
2	300	130	26677,35	0,045	24565,35	0,042	%7,9	%7,3
3	400	100	38332,58	0,065	36598,78	0,062	%4,5	%4,3
4	500	80	42186,06	0,072	40761,06	0,069	%3,4	%3,8
5	700	60	28960,98	0,049	28080,80	0,048	%3,0	%2,6

4. Sonuç

Yatar gövdeli trenlerin kullanımıyla; daha hızlı ulaşım sağlanması nedeniyle daha sık tren kalkışları, daha yüksek hizmet kalitesi ve daha iyi bir imaj ile demiryolu yolculuğunu daha rekabetçi hale getireceği tahmin edilmektedir. İşletme hızının artması, zaman tasarrufunun ekonomik değerinin yanında, hat üzerinde çalışan demiryolu aracı setlerinin daha fazla sefer yapmasına imkân verecek ve sefer sayısının artmasıyla kapasite artırılabilir. Kapasite artırımı mevzusunun gündemde olduğu güzergâhlarda yeni demiryolu taşıtı seti alınmasına gerek kalmayabileceğinden araç yatırımına gidecek olan maliyetten tasarruf sağlanabilir. Öte yandan tren setinin işletimi sırasında kurplardan önce daha az fren yapılacağı ve kurptan alımana geçişte konvansiyonel demiryolu taşıtının ivmelenmek için harcayacağı enerji kayıpları yatar gövdeli trenlerde oldukça azalacağından verim artırılmış olacaktır [3].

Bu makale kapsamında gerçekleştirilen çalışma neticesinde, hattın belirli kesimlerinde işletme hızının %5 ila %10 oranında artırılacağı sonucuna varılmıştır. Diğer yandan konfor katsayısındaki %7'ye varan düşüş, kabin içerisindeki yolcuların konforunun artacağı anlamını taşır. Bu sonuçlar, Bozüyük-Demirköy hattı özelinde olup, farklı bir hatta yanıl kuvvetlerde daha yüksek oranlarda düşüş gözlenebileceği; maksimum müsaade edilebilir hız değerlerinde ve yolcu konforunda daha yüksek yüzdelerde artış gerçekleştirilebileceği kanaati hâsıl olmuştur.

Türkiye'de demiryolu taşıtları ve aksamı üretimi gerçekleştiren yerli firmalar, kısa sürede yatar gövdeli demiryolu taşıtı üretebilme potansiyeline sahiptir. Demiryolu hatlarında yapılabilecek iyileştirmelerle ve sisteme yatar gövdeli taşıtların dahil edilmesiyle kısa sürede Türkiye'nin pek çok bölgesinde daha hızlı ve konforlu demiryolu yolcu taşımacılığı hizmeti verilebilir. Coğrafyasının önemli bölümü engebeli olan Türkiye'de yüksek hızlı trenlere uygun demiryolu hattı projelendirmesi bilhassa yatay kurp kısıtlamalarından dolayı zor ve maliyetli olacaktır. Büyük şehirler arasında işletilmekte olan ve projesi devam eden YHT hatlarını tamamlayıcı olarak, diğer hatlardaki yolcu taşımacılığının konvansiyonel trenler yerine yatar gövdeli trenlerle gerçekleştirilmesi daha hızlı, ekonomik ve başarılı sonuçlar verebilecektir. Son olarak, bu çalışmanın; başta Bilecik demiryolu hattındaki mevcut yolcu taşımacılığı hizmeti olmak üzere pek çok konvansi-

yonel hatta işletimin yatar gövdeli trenlerle gerçekleştirilmeye başlatılmasına yol açacağı umut edilmektedir.

Kaynakça

- [1] M., Mezzina, A., Piccolini, “Hydraulic systems for tilting trains,” Eaton, Cleveland, ABD, 2016.
- [2] A.O., Darlton, M., Marinov, “Suitability of tilting technology to the tyne and wear metro system,” *Urban Rail Transit*, vol. 1, no. 1, pp. 47–68, 2015, <https://doi.org/10.1007/s40864-015-0007-8>.
- [3] F., Yıldızhan, “Yatar gövdeli demiryolu araç teknolojisi ve Türkiye,” *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 12, ss. 73-82, 2020, <https://doi.org/10.47072/demiryolu.734731>.
- [4] J., Förstberg, E., Andersson, T., Ledin, “Influence of different conditions for tilt compensation on symptoms of motion sickness in tilting trains,” *Brain Research Bulletin*, vol. 47, no. 5, pp. 525–535, 1998, [https://doi.org/10.1016/S0361-9230\(98\)00097-5](https://doi.org/10.1016/S0361-9230(98)00097-5).
- [5] V.A., Profillidis, *Railway management and engineering*, Ashgate Publishing Company, Burlington, ABD, ISBN:9781472407788, 2014.
- [6] Persson, R., Goodall, R.M., Sasaki, K., “Carbody tilting – technologies and benefits,” *Vehicle System Dynamics*, vol. 47, no. 8, pp. 949–981, 2009, <https://doi.org/10.1080/004231110903082234>.
- [7] S.H., Han, H.L., Rho, S.G., Lee, “Estimation on the enhancement of permissible speeds around curves for the tilting train on the gyeongbu line of the korean rail network,” *WIT Transactions on The Built Environment*, vol. 127, pp. 379-388, 2012, <https://doi.org/10.2495/CR120321>.
- [8] J., Choi, “Prediction of displacement induced by tilting trains running on ballasted tracks through measurement of track impact factors,” *Engineering Failure Analysis*, vol. 31, pp. 360-374, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2013.02.004>.
- [9] R. Luo, J. Zeng, W. Zhang, “Pantograph dynamics and control of tilting train,” *Proceedings of the 17th World Congress The International Federation of Automatic Control*, Seoul, Korea, 2008, pp. 8293-8298.
- [10] B., Kufver, R., Persson, “Tracks for Tilting Trains - A Study within the Fast and Comfortable Trains Project,” 2013, [Online]. Available: <http://www.railway-research.org/IMG/pdf/ps.2.9.pdf>, [Accessed: 12-March-2024].
- [11] A., Çoşkun, “Demiryollarında geçiş eğrileri ve dever uygulamaları,” *Demiryolu Mühendisliği*, sayı. 5, ss. 57-59, 2017.
- [12] J. Förstberg, E. Andersson ve T. Ledin, “Influence of different conditions of tilt compensation on motion and motion-related discomfort in high speed trains” *Vehicle System Dynamics*, no. 29, pp. 729-734, 2007.
- [13] Pendolino Tilting Train, [Online]. Available: <https://www.railway-technology.com/projects/pendolino-tran/?cf-view>. [Accessed: 11-March-2024].
- [14] Tilting Train, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Tilting_train, [Accessed: 11-March-2024].
- [15] İ., Kalımbacak, Lokomotif tanıtma ders notu, Eskişehir Eğitim Merkezi Müdürlüğü, 2009.
- [16] F.T., Pearson, R.M., Goodall, I., Pratt, Control system studies of an active anti-roll bar tilt system for railway vehicles, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 212 no. F, 1998, <https://doi.org/10.1243/0954409981530670>.
- [17] C.N., Pyrgidis, *Railway transportation systems design, construction and operation*, CRC Press, Boca Raton, 461, ISBN: 978-1-4822-6216-2, 2016.
- [18] M., Enomoto, S., Kamoshita, M., Kamiyama, K., Sasaki, T., Hamada, A., Kazato, “Development of tilt control system using electro-hydraulic actuators,” *Quarterly Report of RTRI*, vol. 46, no. 4, 2005.
- [19] J.S., Kim, Fatigue assessment of tilting bogie frame for korean tilting train: analysis and static tests, *Engineering Failure Analysis*, vol. 8, no. 13, pp. 1326-1337, <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2005.10.007>, 2006.
- [20] N., Haktan, *Yatay kurplar ders notu*, 2017.
- [21] K.A., Gümüş, “Demiryollarında ray geometrisinin belirlenmesi ve iyileştirilmesi,” Yüksek Lisans Tezi, T.C. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Harita Mühendisliği, 2016.
- [22] C. Urlu, *Demiryolu araçlarının ileri dinamiği*, Ankara, TCDD Yayınları, 1999.
- [23] Kozak, M., “Demiryolunda dever uygulaması ve güvenliğe etkisi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, sayı. 12, 4(1), ss. 41-48, 2016, e-ISSN: 1308-6693.

[24]Demiryolu Yük Arabası için Tekerlek Seti Bogie Vagonu, [Online]. Available: <https://turkish.railwayspare-parts.com/quality-11667873-railroad-coach-bogie-y32-bogie-160-km-h-railway-bogie-wheel-set-bogie-wagon-for-railroad-freight-car>, [Accessed: 19-March-2024].

Özgeçmiş



Beytullah BAŞEĞMEZ

Eskişehir, 1994 doğumludur. Marmara Üniversitesi Makine Mühendisliği 2016 mezunudur. 2018’de Eskişehir Osmangazi Üniversitesi’nden Raylı Sistemler Yüksek Mühendisi olarak mezun oldu. Otomotiv alanıyla alakalı Güç Aktarma Organları ve Elektrikli Taşıtlar kitapları yayınlanmıştır. 2019 - 2022 yılları arasında Uşak Üniversitesi’nde ve 2023 yılından beri Ataçehir Adıgüzel MYO’da akademisyenlik görevini sürdürmektedir. Takım tezgâhları, traktör kabini-tarım makinaları, demiryolu taşıtları ve aksamı, dişli kutuları üretimlerinin gerçekleştirildiği işletmelerin Ar-Ge departmanlarında görev aldı.

E-Posta: beytullahbasegmez@adiguzel.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Demiryollarında Ray Kırılmalarının, Ani Rijitlik Değişimlerinin ve Geometrik Süreksizliklerin Akıllı Telefonlarla, Seyir Hâlinde Ölçümler Alınarak, Sürekli Takibi

Ferhat ÇEÇEN^{ORCID}

Süleyman Demirel Üniversitesi, Göller Bölgesi Teknokent Koordinatörlüğü, Isparta, Türkiye

cecenferhat@sdu.edu.tr

(Alınış/Received: 03.04.2024, Kabul/Accepted: 26.04.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Raylı ulaşım sistemlerinde, ulaşım güvenliğinin sağlanması ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi açısından “Hat Durumu Değerlendirmenin” önemi büyüktür. Bu bağlamda, en yaygın kullanılan metotlardan biri, “Seyir Esnasında Ölçümlerdir”. Ancak konvansiyonel ölçüm/kayıt/teşhis trenleri, oldukça yüksek maliyetlere sahiptir. Ayrıca yıl içerisinde yalnızca birkaç kez ölçüm alınabilmektedir ve ölçümler müddetince de tren trafiği kısıtlanmaktadır. Bu çalışmanın amacı, raylı ulaşım güvenliğini tehdit eden ray kırıklarının ve bakım maliyetlerini artıran ani rijitlik değişimleri ile geometrik süreksizliklerin “akıllı telefonlarla” tespit ve takip edilip edilmeyeceğini belirlemektir. Bu amaçla, literatürde günümüze dek yürütülen çalışmaların yorumlanması akabinde, önerilen yöntem, sektörün rahatlıkla kullanılabileceği bir sadelikte, adım adım izah edilmiştir. Yürütülen düşey ivme ölçümleri sonucunda, gerek ray kırıklarının, gerekse ani rijitlik değişimlerinin/geometrik süreksizliklerin, önerilen mobil cihazlı ölçüm metoduyla rahatlıkla teşhis edilebildiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Yapısal sağlık izleme, Hat durumu değerlendirme, Demiryolu hata teşhisi, Ray çatlağı

Continuous Monitoring of Rail Breaks, Abrupt Stiffness Changes, and Geometric Discontinuities using On-board Measurements via Smartphones

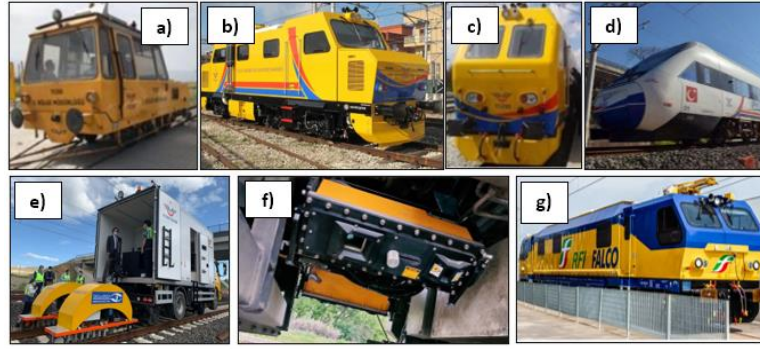
Abstract: In rail transport systems, "Track Condition Assessment" is of great importance for ensuring transportation safety and reducing maintenance costs. In this context, one of the most widely used methods is "On-board Measurement". However, the conventional measurement/recording/diagnostic trains are very expensive. In addition, measurements can only be made a few times a year, and train traffic is restricted during the measurements. The aim of this study is to determine whether rail breaks/fractures, which threaten transportation safety, and abrupt stiffness changes and geometric discontinuities, which increase maintenance costs, can be detected and monitored using “smartphones”. For this purpose, after reviewing and interpreting existing studies carried out in the literature to date, the proposed method is explained step by step in a simple way that can be easily used by the industry. As a result of the vertical acceleration measurements carried out, it was found that both the rail breaks and abrupt stiffness changes/geometric discontinuities can be easily diagnosed using the proposed mobile device measurement method.

Keywords: Structural health monitoring, Track condition assessment, Railway fault diagnosis, Rail crack

1. Giriş

Raylı ulaşım sistemlerinde, yapı elemanlarının ve hat geometrisinin yeterli sıklıkla muayene edilerek, sorunlara zamanında müdahale edilmesi, gerek ulaşım güvenliğinin sürdürülmesi, gerekse bakım maliyetlerinin düşürülmesi açısından büyük öneme sahiptir [1]. Genel hatlarıyla Yapısal Sağlık İzleme (Structural Health Monitoring, SHM) kategorisine giren, demiryolu özelinde ise Hat Durumu Değerlendirme (Track Condition Assessment, TCA) olarak tabir edilen bu muayenelerde birçok farklı metot kullanılmaktadır. Günümüzde en yaygın kullanılan metotlardan biri, seyir esnasında ölçümdür (On-board Measurement, OM) [2]. Şekil 1’de, ülkemizde bu amaçla kullanılan çeşitli ölçüm/kayıt/teşhis araç/tren/ekipmanları sunulmuştur.

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, “Demiryollarında ray kırılmalarının, ani rijitlik değişimlerinin ve geometrik süreksizliklerin akıllı telefonlarla, seyir hâlinde ölçümler alınarak, sürekli takibi,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 54-66, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1464183



Şekil 1. Ülkemizdeki çeşitli TCA araç/tren/ekipmanları: a) Matisa MPV-7 [3], b) Mermec Roger-400 [4], c) Mermec Roger-800 [3], d) Piri Reis [5], e) Demir-Göz [6], f) Latronix kit [7], g) Tesmec OCPD002 [8]

Şekil 1.a'daki Matisa MPV-7 ve Şekil 1.c'deki Mermec Roger-800 hat ölçüm trenlerinin en yüksek işletim hızları sırasıyla 70 ve 140 km/sa olup, konvansiyonel hat kesimlerinde yürütülen geometrik ölçümlerde kullanılmaktadır [3]. Şekil 1.b'deki Mermec Roger-400'ün hız limiti ise 80 km/sa olup, rayların ultrasonik muayenelerinde kullanılmaktadır [4]. TCDD Teknik A.Ş. tarafından geliştirilen Şekil 1.e'deki Demir-Göz ise; Mobil Demiryolu Aracı vb. iş makinelerinin arkasına bağlanılarak, ray ultrasonik muayenelerini, 40 km/sa hıza kadar gerçekleştirebilmektedir [6]. Hızlı tren hatlarında gerekli muayeneler ise, Piri Reis (Şekil 1.d) adı verilen ölçüm treni ile gerçekleştirilmektedir [5, 9]. TCDD, söz konusu ölçüm işlemlerinin bir kısmını, hizmet alımı suretiyle de yaptırmaktadır. Örneğin TCDD Teknik A. Ş., 2021-2022 yıllarında, yaklaşık 25.000 kilometrelik, hat ölçüm ve raporlandırması yapmıştır [7]. Bu esnada kullanılan lazer sensörlü Latronix Track Measurement (LTM) kiti, Şekil 1.f'de görülmektedir [7]. Şekil 1.g'deki Tesmec OCPD002 hat denetim aracının en yüksek hızı ise 140 km/sa olup, ray profili-aşınması, kataner geometrisi-aşınması ve makas sistemleri konusunda muayeneler gerçekleştirebilmektedir [8]. Ülkemizdeki örnekleri sunulan, bu ve benzeri ölçüm/kayıt/teşhis araç/tren/ekipmanları, oldukça yüksek maliyetlere sahip olup, ülkelerin binlerce kilometrelik demiryolu ağları, bu gibi az sayıdaki vasıtayla analiz edilmeye çalışılmaktadır. Sonuçta, hat kategorisine bağlı olarak artmakla birlikte, yıl içerisinde yalnızca birkaç defa ölçüm alınması mümkün olmaktadır. Bu kısıtlama, “küresel” ölçekte geçerli olup, literatürdeki çeşitli yabancı kaynaklarda da belirtilmektedir [2, 10]. Bu yüzden, bazı ülkeler, “yolcu trenlerini” özel tertibatlar ile donatarak, bazı önemli verileri, “sürekli” takip etmek için kullanmaktadır (Continuous Track Monitoring, CTM). Örneğin Alman Demiryolları uzun zaman önce, yemek vagonlarında bu uygulamaya başlamıştır. Sonuçta, hat geometrisi kalitesiyle taşıt davranışı arasında güçlü bir ilişki olduğu, vagon içinden ve aks kutusundan alınan ivme ölçümleri arasında yüksek bir korelasyon bulunduğu belirlenmiştir [11].

Yukarıdaki örnekte de görüldüğü üzere; CTM ölçümlerinde genelde atalet/eylemsizlik esaslı sensörler (ivmeölçerler vb.) kullanılmaktadır. Ayrıca müstakil bir tren/araç işletilmesine ve fazla sayıda personel görevlendirilmesine de gerek duyulmamaktadır. Bu farklılıklar sayesinde, ölçümler, oldukça düşük bir maliyetle gerçekleştirilebilmektedir [10]. CTM'nin sunduğu bu mali tasarrufun yanı sıra, diğer bazı önemli avantajları da söz konusudur. Bu metot ile çok daha sık ölçüm almak, hatta her tren seferini, bir ölçüm sürecine dönüştürmek mümkün olmaktadır. Bu ise bazı kritik unsurların takibi için büyük bir avantaj anlamına gelmektedir. Örneğin ray kırılmaları veya makas sistemi arızaları gibi bazı spesifik sorunların “tamamen” önlenmesi, yıl içerisinde yürütülen birkaç muayene ile mümkün olmayabilmektedir. CTM'nin sağladığı üçüncü önemli avantaj ise; hat geometrisi henüz bozulmaya başlamadan ve yapı elemanlarında sorunlar tam olarak ortaya çıkmadan, ileride sorun çıkarma ihtimali olan lokasyonların önceden belirlenebilmesidir (kestirimci bakım). Örneğin tünel/köprü giriş ve çıkışlarında, ani rijitlik değişimi nedeniyle sıklıkla sorunlar yaşanabilmektedir [12]. Bu lokasyonlarda yeterli/uygun önlemler alınmamışsa, bu rijitlik değişimi, ilerleyen süreçte çeşitli hasarlara ve kazalara sebebiyet verebilmektedir. İvmeölçer kayıtlarında, bu sorun rahatlıkla tespit edilebilmekte ve henüz hat

geometrisi bozulmadan ve üstyapı elemanlarında hasar meydana gelmeden önlem alınabilmektedir [12]. Konvansiyonel ölçüm/kayıt/teşhis tren/araçlarıyla ise hat geometrisi bozulmaya başladıktan veya üstyapı elemanları hasara uğradıktan (ray kırıkları vb.) sonra bu durumun farkına varılabilmektedir. Yukarıda değinilen sorunların bazıları, seyir hâlinde ölçüm (OM) tekniği dışında, farklı metotlarla da analiz ve takip edilebilmektedir. Örneğin “sinyalizasyon” sistemleriyle ray kırığı takibi, birçok ülkede yaygın olarak kullanılan bir metottur. Ancak bu uygulama, bir “kestirimci bakım” metodu değildir. Çünkü bu metotta, raylar kırıldıktan ve kırılan iki ray parçası birbirinden sinyalizasyon akımını iletemeyecek kadar uzaklaştıktan sonra hata tespiti mümkün olabilmektedir. Öte yandan, ray kırığının biçimine ve/veya ortam iklim şartlarına bağlı olarak elektrik akımının “mevcut kırık(lar)a rağmen- iletimi de söz konusu olabilmektedir. Örneğin travers hizasında meydana gelen ray kırıklarında gergi kısıkaçlarının, tünellerde su sızıntılarının, sıcak havalarda ise ray genleşmesinin sinyalizasyon sistemini yanılttığı tecrübelerle sabittir. CTM’nin sağladığı dördüncü önemli avantaj, ölçüm süresince tren trafiğini aksatmamasıdır. Günümüzde özellikle yüksek hızlı yolcu taşımacılığı yapılan hatlarda, sefer sıklıkları oldukça artmış durumdadır ve zorunlu bakım işlemlerinin, geceleri, birkaç saatlik zaman diliminde yürütülmesi gerekmektedir. Bu yüzden, araç parklarındaki vasıtaların sayısı (yüksek maliyetlerine rağmen) artırılrsa dahi, demiryolu trafiği yönetim kısıtları nedeniyle, çok sık kullanılmaları mümkün olmayabilmektedir.

CTM metodunun bu önemli avantajları nedeniyle, son yıllarda, hakkında yürütülen araştırmalar oldukça artmış vaziyettedir. Bu çalışmalarda çeşitli farklı CTM metotları araştırılmış olup, bu metotlardan en çok rağbet görenlerden biri, akıllı telefonlu CTM ölçümleridir. Bu çalışmalarda, CTM metodunda kullanılan sensörlere benzer sensörler içeren akıllı telefonların/mobil cihazların, demiryolu ölçümlerinin en azından bir kısmında, kullanılıp kullanılmayacağı araştırılmaktadır [2, 12]. Çünkü akıllı telefonlar, MEMS tipi (Micro-electro Mechanical System) ivmeölçerler ve açısal hız ölçerler (jiroskop) içerdiği gibi, uydu bazlı koordinat verisi sağlayan Küresel Konum Belirleme Sistemi (Global Navigation Satellite Systems, GNSS) çipleri de içermekte ve ayrıca kablosuz veri iletişimi de sağlamaktadır. Bu donanım ve özellikleri ile akıllı telefonların, hem bazı önemli verilerin “ekonomik” bir şekilde, “sürekli” ölçümünü sağlayabilmesi, hem de ölçüm sonuçlarının dünyanın her yerinden izlenebildiği “gerçek zamanlı” erişime de imkân tanınması beklenilmektedir [13]. Bu inovatif konuda, ülkemizde günümüze kadar, ne yazık ki, herhangi bir akademik çalışma yürütülmemiş/yayımlanmamıştır. Yabancı literatürde tespit edilebilen çeşitli çalışmaların ana amaçları, kullanılan sensör tipleri ve veri alma sıklıkları (VAS) ise Tablo 1’de özetlenmiştir. Referansları verilen çalışmaların ana amaçları incelendiğinde, mobil cihazlarla; demiryolu taşıtlarının konumlarının ivme-jiroskop verileriyle belirlenmesi [13], seyahat konforunun ölçülmesi [12, 14, 15], çeşitli geometrik parametrelerin belirlenmesi [10, 11] ve çeşitli hat kesimlerinin titreşim şiddeti üzerindeki etkileri [2, 16, 17] konularının araştırıldığı görülmektedir. Bu çalışmalar faydalı olsalar da sektörün ihtiyaç duyduğu “öncelikli” alanlara, tam anlamıyla yönelik değillerdir. Ayrıca ölçüm prosedürleri, sektörün kolayca kullanabileceği şekilde izah edilmemiş, hatta uygunsuz ölçüm teknikleri kullanılmıştır.

Tablo 1. Mobil cihazların raylı sistemlerde, çeşitli alanlarda kullanılabilirliğinin araştırıldığı çalışmalar

Çalışmanın Ana Amacı	İvmeölçer VAS	Jiroskop VAS	GNSS	Referans
Konum takibi	Belirtilmemiş	Belirtilmemiş	Yok	[13]
Seyahat konforu	10 Hz	Yok	Var	[14]
Seyahat konforu	18-35 Hz	Yok	Yok	[15]
Seyahat konforu	30 Hz	Yok	Yok	[12]
Geometrik parametreler	76-120 Hz	132-198 Hz	Var	[11]
Geometrik parametreler	200-500 Hz	200-500 Hz	Yok	[10]
Titreşim şiddeti-hat kesimi ilişkisi	100 Hz	Yok	Yok	[16]

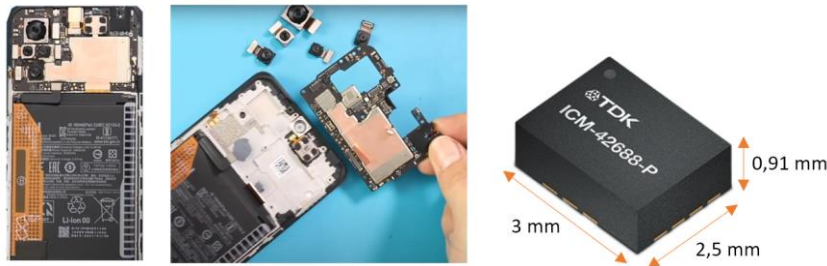
Titreşim şiddeti-hat kesimi ilişkisi	100 Hz	Yok	Var	[17]
Titreşim şiddeti-hat kesimi ilişkisi	232-432 Hz	Yok	Yok	[2]

Sonuç olarak, bu çalışmanın amacı, raylı ulaşım sektörünün “öncelikli ihtiyacı” olduğu düşünülen ve konvansiyonel TCA muayenelerinin kısmen/tamamen “eksik kaldığı” görülen hususların takviyesidir. Bu bağlamda; akıllı telefon (mobil cihaz) kullanılarak, daha yüksek sıklıkla (istenilirse her tren seferinde), daha ekonomik, kestirimci bakım anlayışına uygun ve tren trafiğini aksatmayacak bir çözüm ortaya konulması hedeflenmektedir. Ayrıca, literatürde mevcut mobil cihazlı TCA çalışmalarında tespit edilen çeşitli eksilik/yanlışıklar ortaya konularak, daha uygun bir ölçüm prosedürü elde edilmeye çalışılacaktır. Bu bağlamda, önerilecek uygulamanın raylı ulaşım sektöründe, çeşitli kademelerdeki personellerin rahatlıkla uygulayabileceği bir sadeliğe sahip olmasına ve detaylıca izah edilmesine özen gösterilmiştir. Bu sayede, çeşitli kritik hususların (ray kırığı vb.) muayenesi daha sık yapılabilecek ve sonuçta, bakım maliyetlerinin düşürülmesi ve daha önemlisi, ulaşım güvenliğinin artırılması açısından fayda sağlanabilecektir.

2. Metot

2.1. Ölçümlerde kullanılan mobil cihaz

Çalışma kapsamında yürütülen ölçümlerde, Xiaomi Redmi Note 10 Pro modeli mobil cihaz kullanılmıştır. Mobil cihazda, TDK InvenSense icm4x6xx modeli 3-eksenli ivmeölçer mevcuttur. Bu ivmeölçerin kapasitesi $156,9064 \text{ m/s}^2$, çözünürlüğü $0.0047884034 \text{ m/s}^2$, sinyal/gürültü performansı ise $70 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$ 'dir. İvmeölçer ile aynı kutu içerisinde, açılabilir hız ölçer de (jiroskop) bulunmaktadır. Bu jiroskop, TDK Invensense icm4x6xx modeli ve 3-eksenlidir. Kapasitesi 34.905556 rad/s , çözünürlüğü ise $0.001065233 \text{ rad/s}$ 'dir. Gerek ivmeölçer gerekse jiroskop, MEMS tipi (Microelectro Mechanical System) olup, Şekil 2'den görüldüğü üzere oldukça küçük boyutlara sahiptir. Adı geçen mobil cihazın kullanılmasının nedeni, yukarıda zikredilen hassas ölçüm karakteristiklerine ilaveten, çoğu mobil cihazdan daha yüksek “örnekleme hızına/veri alma sıklığına” sahip olmasıdır. Bu konuya ilişkin detaylar ilerleyen bölümde sunulacaktır.

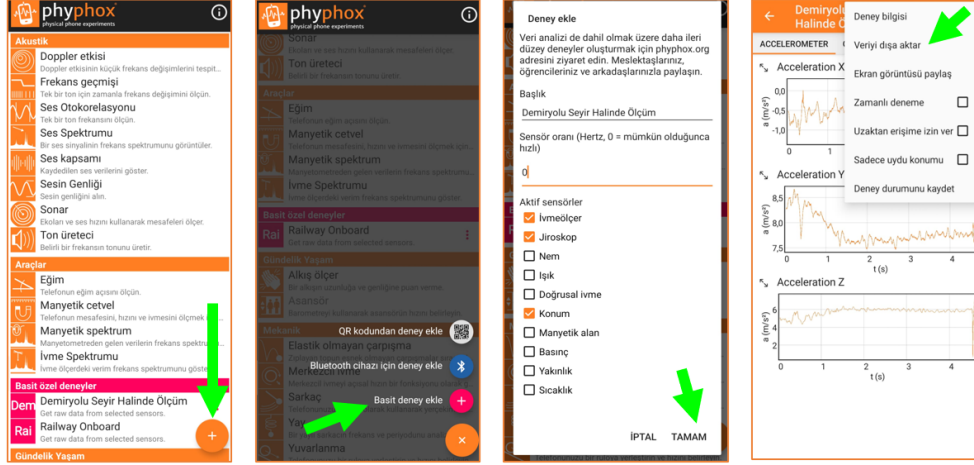


Şekil 2. Kullanılan mobil cihazın iç görünümü ve ivmeölçer ile jiroskobu içeren kutunun boyutları [18]

2.2. Ölçümlerde kullanılan yazılım ve uygulanan ayarlar

Çalışma kapsamında yürütülen ölçümlerde, Google Play (Android) veya App Store (iOS) üzerinden ücretsiz olarak yüklenebilen, Phyphox yazılımı (1.1.12-beta2 kodlu Android sürümü) kullanılmıştır. RWTH Aachen Üniversitesi (Almanya) tarafından geliştirilen bu yazılım, birçok ödül kazanmıştır [19]. Yazılım mobil cihaz içerisindeki termometre, barometre, manyetometre, ivmeölçer, lüks ölçer, jiroskop, konum sensörleri üzerinden veri alıp, istenilen örnekleme hızlarında kayıt gerçekleştirebilmekte ve uzaktan erişime/ekran paylaşımına da izin vermektedir. Şekil 3'te çalışma esnasında kullanılan deney şablonunun ayarlandığı işlem adımları sunulmuştur. En soldaki ekran görüntüsü, program başlangıç ekranı olup, sağ alt köşesindeki “🔴” simgesi ve açılan ekranda basit deney ekle “🔴” simgesi kullanılarak, şablon ayarlarına girilmektedir. Açılan

ekranda, deney şablonu için bir “başlık” belirlenmektedir. Ardından sensör oranı (örnekleme hızı, sampling rate) değeri girilmektedir. Bu değer, kullanılan mobil cihaz altyapısına ve sensör tipine bağlı olarak, çeşitli telefon modelleri arasında oldukça değişkendir. “0” değeri girilmesi hâlinde, mobil cihazın izin verdiği en yüksek örnekleme hızı ile kayıt gerçekleştirilmektedir.



Şekil 3. Phypbox yazılımında deney (ölçüm) şablonunun belirlenmesi ve kaydedilen verinin dışı aktarımı

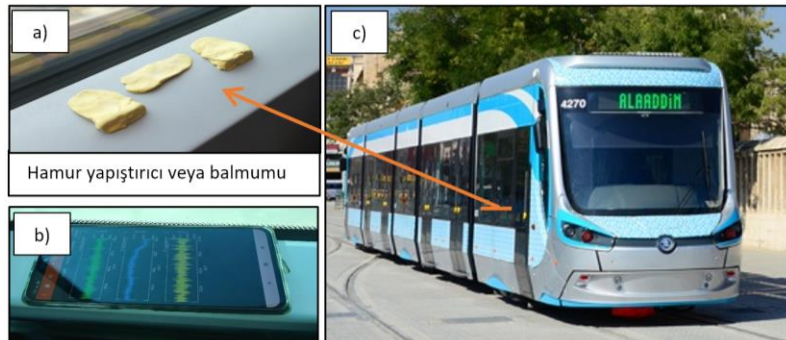
Phypbox internet sitesinde [20] 3883 adet (ve sürekli artan sayıda) mobil cihazın sensörleri ile ilgili veri tabanı mevcuttur. Bu sitede verileri bulunmayan ve her yıl piyasaya yenileri dâhil olan, yüzlerce başka model mobil cihaz da söz konusudur. Dolayısıyla günümüzde dünyada mevcut çeşitli birçok mobil cihazın bu çalışma kapsamında karşılaştırılması mümkün olmamıştır. Bunun yerine, sensör hassasiyeti ve veri alma sıklığı yüksek bir mobil cihazın kullanılması yeterli görülmüştür. Bu veri tabanına göre, örneğin iPhone 14 Pro Max modeli mobil cihazın en yüksek veri alma sıklığı 100 Hz (saniyede 100 adet) iken, bu çalışmada kullanılan Redmi Note 10 Pro'nun 500 Hz'dir. Bu değer, Tablo 1'deki, günümüze kadar çeşitli araştırmacılar tarafından kullanılan örnekleme hızlarının neredeyse tamamından yüksek ve yalnızca referansı verilen [10] çalışma ile eşittir. Yüksek örnekleme hızı, -ölçüm amacına göre- bazen çok kritik bir ihtiyaç hâline gelebilmektedir. Örneğin 30 km/sa hızla giden bir demiryolu aracı, 1 saniyede yaklaşık 8,3 metre yol katetmektedir. Dolayısıyla örneğin 100 Hz veri alma sıklığı ile her 8,3 cm'de bir veri alınabilirken, 500 Hz veri alma sıklığında, her 1,7 cm'de bir veri alınabilmektedir. Araç hızının artması ile bu mesafeler doğru orantılı olarak artacaktır. Sonuç olarak, özellikle ray kırığı gibi, çok dar bir lokasyonu etkileyen hasar tiplerinin tespiti hedefleniyorsa, ivme değişimi çok kısa bir sürede gerçekleştiğinden, veri alma sıklığının mümkün olduğu kadar artırılması, bu problemlerin tespit edilebilirliği açısından oldukça önemlidir. Aksi takdirde demiryolu aracı söz konusu problemleri lokasyondan geçerken, meydana gelen ivme değişimlerinin pik noktaları kayıt altına alınamayabilecek, ya hafif bir bozulma veya normal bir seyir titreşimi gibi algılanabilecektir. Öte taraftan, Nyquist örnekleme teoremine göre, örnekleme hızı örneğin 100 Hz olan bir mobil cihaz ile ancak 50 Hz'e (yarısı) kadarki sinusoidal sinyaller sağlıklı bir şekilde ölçülebilmektedir [11]. Araç-yol etkileşimi ile ortaya çıkan titreşimlerin frekansları ise araç hızına bağlı olarak artmakta ve eğer mobil cihaz örnekleme hızı yeterli değilse, yüksek frekanslar kayda girememektedir. Dolayısıyla bu çalışmada, kullanılan mobil cihaz ile ulaşılabilecek en yüksek veri alma sıklığına erişilmesi için Şekil 3'te görülen ayar ekranında, veri alma sıklığı “0” olarak girilmiştir.

Örnekleme hızının ayarlanmasından sonra, sıra, kullanılacak sensör tiplerinin belirlenmesine gelmektedir. Bu çalışmada, mobil cihaz içerisindeki çeşitli sensörlerden, yalnızca ihtiyaç duyulan 3 adedi (ivmeölçer, jiroskop, konum) kullanılmış olup, Şekil 3'te, soldan 3. ekran görüntüsünde görülen onay kutucukları işaretlendikten sonra, ekranın sağ alt köşesindeki “TAMAM” butonu kullanılarak, test ekranına geçilmiştir. Bu ekrandaki “▶” butonu kullanılarak kayıt

başlatılabilmekte, “**II**” butonu kullanılarak da, istenilen zamanda durdurulup, “**▶**” butonu ile kayıt devam ettirilebilmektedir. Kayıt durdurulup “**◀**” butonu ile mevcut ekrandan çıkıldığında ise, ölçüm kaydı, otomatik olarak, giriş ekranında, “Kaydedilmiş deney durumları” kısmında görünür hâle gelmektedir. Bu kayda girilerek, kaydedilen ölçüm sonuçları, yüzeysel olarak incelenebilmektedir. Detaylı analizler için ise; bu çalışmada kullanılan yöntem, kaydedilen verilerin Microsoft Office Excel (.xls) formatına dönüştürülüp, internet üzerinden e-posta adresine veya WhatsApp hesabına transfer edilmesidir. Bunun için ölçüm sonunda, kayıt ekranından ayrılmadan önce veya daha sonra herhangi bir zamanda ilgili ölçüm kaydına girilerek, sağ üst köşedeki “**■**” butonu üzerinden “veriyi dışarı aktar” seçeneği kullanılmıştır. Bu ekran, Şekil 3’teki en sağdaki ekran görüntüsünde mevcuttur. Bu ekranda ayrıca “uzaktan erişime izin verme” ve “ekran görüntüsü paylaşımı” ayarları da mevcut olup, aktifleştirilmesi hâlinde, internet erişimi olan, dünyanın herhangi bir yerinde, gerek sensör verileri (ivme, açısız hız, ışık şiddeti, sıcaklık vb.), gerekse trenin konumu ve hızı, “anlık” olarak izlenebilmektedir (real time access).

2.3. Ölçümlerin gerçekleştirildiği demiryolu aracı ve raylı sistem hattı

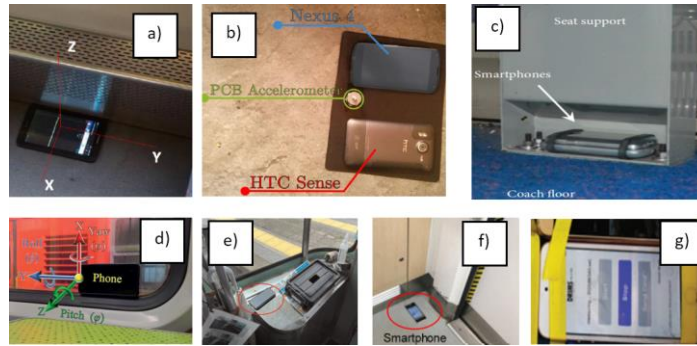
Bu çalışma kapsamında, Konya Büyükşehir Belediyesince işletilen, 1435 mm ekartman mesafesine sahip, kent içi, hafif raylı sistem, yolcu tramvay hattında [21] ölçümler gerçekleştirilmiştir. Bu hattın tercih edilme nedeni, hata tespit edilen lokasyonların kolayca erişilebilir olması ve trafik güvenliği tehlikeye sokulmadan detaylı incelemelerin yapılabilmesidir. Konya’da, Alaaddin-Selçuk Üniversitesi ve Alaaddin-Adliye İstasyonları arasında işletilen 2 farklı tramvay hattı mevcuttur. 2015 yılında hizmete açılan Alaaddin-Adliye hattında, 9 adet istasyon bulunmaktadır ve toplamda 4,4 km uzunluğa sahiptir [21]. Bu çalışmada, çeşitli birçok demiryolu unsurunu içeren (alyman, kurp, makas vb.) Zafer-Mevlânâ İstasyonları arasında kaydedilen ölçüm sonuçlarının verilmesi, çalışma hacminin fazla artmaması bakımından yeterli görülmüştür. Konya ilinde işletilen tramvay setleri, Škoda 28 T1/2 (Škoda ForCity Classic) modelidir. Tramvay setleri, 5 adet (toplamda 32,52 metre), düşük-döşemeli, çift-yönlü, üç sabit boylu vagonlardan oluşmaktadır. Tarif edilen niteliklerdeki toplamda 72 tramvay seti, 2013-2015 yıllarında Škoda tarafından Konya iline özel olarak üretilmiştir [22]. Bu setlerin tümü elektrik enerjisi ile (katener hattı üzerinden pantograflarıyla enerji olarak) çalışmakta olup, hız limitleri 70 km/sa’dır [23]. Ancak 12 adedi, nano-lityum-titanyum akü içermektedir. Bu sayede pantograf mevcut olan hat kesimlerinde şarj olarak, 3 km mesafeye kadar harici enerji kullanmaksızın çalışabilmektedir. Bu akülü setler, Alaaddin-Adliye arasında işletilmekte olup, Şekil 4.a’da örnek bir fotoğraf sunulmuştur. Söz konusu şarjlı setler, Mevlânâ İstasyonundan Alaaddin İstasyonuna kadar (yaklaşık 1,8 km), katener hattından enerji almaksızın ulaşım sağlayabilmektedir [24].



Şekil 4. a) Ölçümlerde mobil cihazın montajında kullanılan hamur yapıştırıcılar, b) Mobil cihazın tramvayda montajı yapılan lokasyon (pencere kenarı), c) Ölçümlerin gerçekleştirildiği tramvay seti örneği

2.4. Mobil cihazın raylı sistem aracı içerisinde konumlandırılması

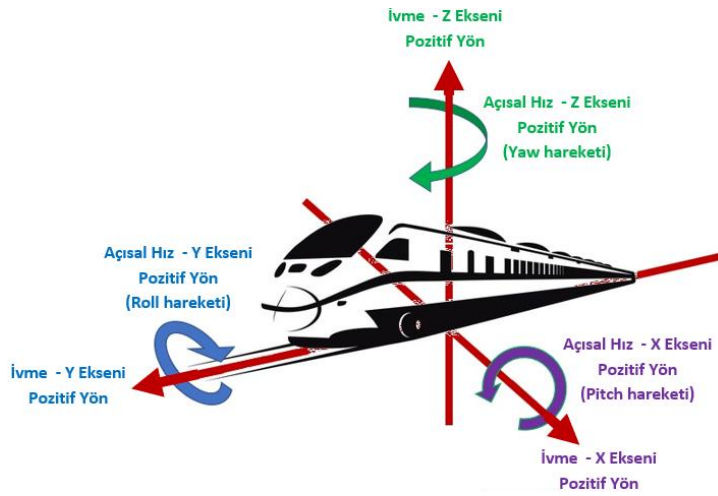
Mobil cihazlarla demiryolu ölçümü konusunda, günümüze kadar yürütülen çalışmalarda (Tablo 1), kullanılan mobil cihazların, demiryolu taşıtları içerisinde konumlandırıldıkları lokasyonlar ve bağlantı tipleri Şekil 5’te toplanmıştır. Bu şekil incelendiğinde, bazı çalışmalarda mobil cihazların zemine veya yolcu koltuğu altına konumlandırıldığı görülmektedir (Şekil 5.a,c,f). Ancak bu durum, hem konum (GNSS) verilerinin alınmasını zorlaştıracak [11-13], hem de vagon içerisinde hareket eden insanların (adım atma vb. hareketlerinin) neden olacağı, istenilmeyen (yanıltıcı) titreşimlerin ölçüm kayıtlarına girmesine neden olacaktır [11]. Mevcut literatürde, “bağlantı yeri” bakımından söz konusu olan bu yanlış tercihler, “bağlantı biçimi” için de söz konusudur. Bu bağlamda, bazı çalışmalarda mobil cihazlar ya hiçbir yapıştırıcı kullanılmadan olduğu gibi konumlandırılmış (Şekil 5.b,c,e,f), ya da titreşim iletme kapasitesi düşük/sönümleyici [12] yapıştırıcı/bant kullanılmıştır (Şekil 5.a,d,g). Şekil 5’te sunulan tüm bu uygulamalar, belirtilen bu sorunlardan ya birini ya da her ikisini birlikte içermektedir. Bu çalışma kapsamında ise hem konum bilgisinin daha iyi alınabileceği bir lokasyon, hem de titreşim şiddet ve frekans bileşenlerini daha iyi iletebilecek bir bağlantı metodu kullanılmıştır.



Şekil 5. Literatürde mobil cihazla hat ölçümü yapılırken kullanılan teknikler: a) Vagon zeminine çift taraflı bantla yapıştırma [12], b) Kauçuk ped üzerine serbest konumlandırma [15], c) Yolcu koltuğunun altında serbest konumlandırma [16], d) Vagon penceresine yapıştırma [10], e) Kontrol panosu üzerinde serbest konumlandırma [2], f) Vagon zemininde serbest konumlandırma [13], g) Bantla yapıştırma [17]

Bu çalışma kapsamında yürütülen ölçümlerde kullanılan mobil cihaz, tramvay yolcu koltuğunun hemen yanındaki pencerenin kenarına (Şekil 4) konumlandırılmıştır. Bu esnada, piyasada rahatlıkla erişilebilen hamur yapıştırıcı (Şekil 4.a) kullanılmıştır. Bu malzemenin tercih edilmesinin nedeni, ölçümler için yeterli yapıştırma kuvvetine ve frekans iletimine sahip olması, ölçümlerden sonra da yapıştırıcının kolayca ve iz bırakmadan ayrılabilmesidir. Ölçümlerde hamur yapıştırıcı yerine frekans iletimi bakımından daha iyi, ancak uygulanabilirlik açısından bir nebze daha zor olan bal mumunun da kullanılabileceği tespit edilmiştir. Bazı trenlerde, pencere kenarındaki vagon gövdesinin bir miktar eğimli olması mümkündür (Şekil 4.a). Bu durumda, kullanılan yapıştırıcının, pencereden uzak kısımlarının bir miktar fazla tutulması (eğime ters) faydalı olacaktır. Çünkü Phyphox yazılımında “kalibrasyon” seçeneği bulunmamaktadır. Ancak, mobil cihazın eğiminin tamamen yeryüzüne paralel hâle getirilmesi zorunluluğu yoktur. Çünkü verilerin Excel’e aktarımı ardından, yapılacak basit bir kalibrasyon işlemi ardından, bu olumsuz etki minimize edilebilmektedir. Bu kalibrasyon ihtiyacı, önceki bir çalışmada kısmen [13] dile getirilmekte, ancak nasıl bir işlem yürütüleceği izah edilmemektedir. Bu çalışmada uygulanan prosedür ise, sektörün rahatça kullanabilmesi için kısaca izah edilecektir. Mobil cihaz, raylı sistem aracına yapıştırıldıktan sonra, tren dururken, ivme değerlerinin (doğrusal ivmeölçer verilerinin) sıfır (0) olması gerekmektedir. Ancak cihaz yapıştırıldığında, yer yüzüne tam paralel olmazsa, sıfır değeri yerine, bazı pozitif/negatif değerler söz konusu olacaktır. Ancak ölçüm işlemi bittikten ve veri transferi tamamlandıktan sonra, Excel’de, taşıt hareket etmediği bir âna ait kayıtlarda, sonuçlar sıfır olacak şekilde/nötrleştirici ekleme/çıkarma formülü uygulandığında ve bu formül tüm satırları kapsayacak şekilde genişletildiğinde, bu sorun, yeterli düzeyde çözülmüş olmaktadır. Benzer uygulama, “kullanılacaksa” açışal hız kayıtlarında da yapılmalıdır.

Çalışma süresince, mobil cihazın ekran kısmı, üste gelecek (vagon tabanına paralel) şekilde (Şekil 4.b) konumlandırma yapılmıştır. Ancak bu uygulama da zorunlu değildir. Mobil cihazın bir düzleminin seyir istikameti ile paralel olması kaydıyla, farklı yönlerde montajı da mümkündür. Öte yandan, yalnızca düşey eksenle analiz yapılacaksa, herhangi bir düzlemin seyir istikametine paralel olmasına da gerek yoktur. Ancak eğer üç-eksenli analiz yapılacaksa, ölçüm sonuçlarının doğru bir şekilde analiz edilebilmesi için, bir düzlemin seyir düzlemi ile paralel olması ve mobil cihazın tren seyir istikameti ile ilişkisinin doğru bir şekilde bilinmesi gerekmektedir. Cihazın bu çalışmada uygulandığı (Şekil 4’te tarif edilen) şekilde konumlandırılması hâlinde, ölçüm sonuçlarının tren seyir düzlemiyle aksel ilişkisi, Şekil 6’daki gibi olacaktır. Şunu ifade etmek gerekir ki; bu çalışmada, araştırma amacıyla uygulanan “geçici süreli” yapıştırma tekniğine, sektörel uygulamalarda ihtiyaç duyulmayabilecektir. Mobil cihazın, kontrol kabini içinde, pencereye yakın uygun bir yere, enerji kaynağına bağlı bir şekilde sabitlenmesi, “uzun süreli” ölçümler için daha uygun olabilecektir. Bu şekilde, yukarıda değinilen “kalibrasyon” işlemine de gerek duyulmayacak, sağlıklı ve pratik bir bağlantı tesis edilmesi mümkün görülmektedir.



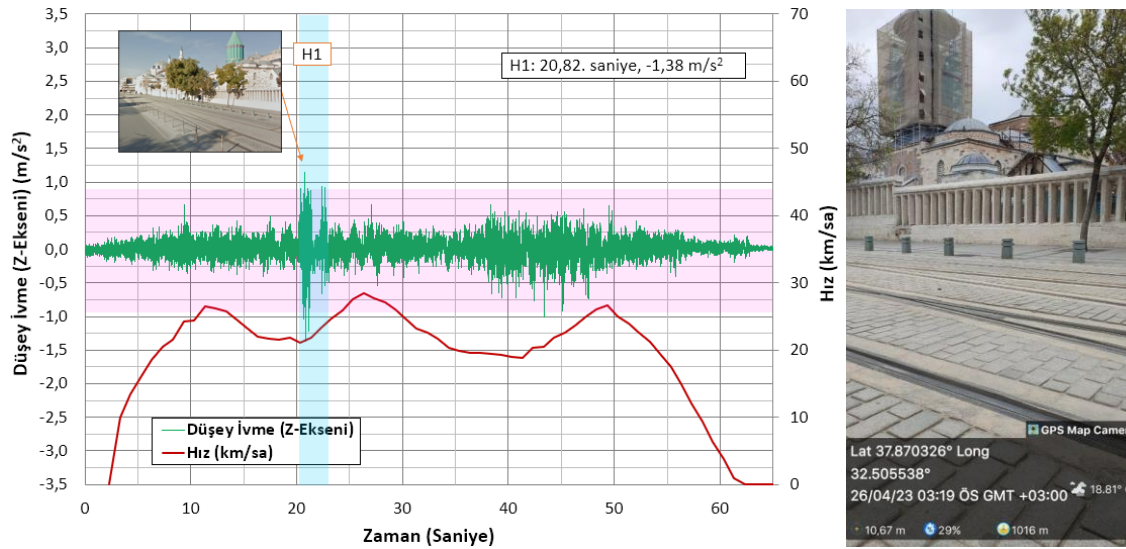
Şekil 6. Mobil cihazla ölçülen ivme ve açısal hız kayıtlarının (Şekil 5 için) hat güzergâhı ile ilişkisi

Bu çalışma kapsamında, mobil cihazın “trenin farklı lokasyonlarına” yapıştırılmasının nasıl bir etkiye sahip olduğu konusu araştırılmamıştır. Bunun nedeni, değinilen konunun, daha önce, çeşitli çalışmalarda araştırılmış olmasıdır. Örneğin Rodríguez ve ark. (2021), farklı ölçüm lokasyonlarından alınan ölçümleri değerlendirdiklerinde, aynı “trende/eğilime” sahip olduklarını belirlemiş ve değersel olarak kayda değer bir farkları olmadıklarını tespit etmiştir [12]. Öte taraftan, 1. Giriş bölümünde detayları verilen Alman Demiryolları CTM analiz sonuçlarına göre, vagon içinden ve aks kutusundan alınan ölçümler arasında yüksek bir korelasyon mevcuttur [11].

3. Bulgular

Önceki bölümde tarif edilen metodoloji kullanılarak, Konya Büyükşehir Belediyesince işletilen tramvay hatlarında çeşitli birçok ölçümler alınmıştır. Ancak bu çalışmada yalnızca Mevlânâ-Zafer İstasyonları arasında kaydedilen, düşey eksenle (Şekil 6’daki Z-ekseni) ivme kayıtlarına ait analiz sonuçlarının sunulması yeterli görülmüştür. Bu hat kesiminin tercih edilme nedeni önceki bölümde izah edilmiş olup, düşey eksene ait ivme kayıtlarının analiz edilmesinin gerekçesi ise; ray kırılmaları, ani rijitlik değişimleri ve geometrik süreksizliklerin tespit ve takibi açısından asgari bilgiyi sağlayabilmesidir. İlerleyen süreçte, diğer hat kesimlerinde, diğer eksenlerdeki ivme kayıtları ve açısal hız ölçümleri de kullanılarak, araştırmalara devam edilmesi planlanmaktadır. Şekil 7’de Mevlânâ İstasyonu ile müteakip trafik ışığı arasında kaydedilen düşey ivme-zaman (yeşil renkli) ve hız-zaman (kırmızı renkli) grafikleri sunulmuştur. Yapılan birçok ölçüm sonucunda, Adliye-Zafer İstasyonları arasında, vagon üzerinden alınan mobil cihazlı düşey ivme

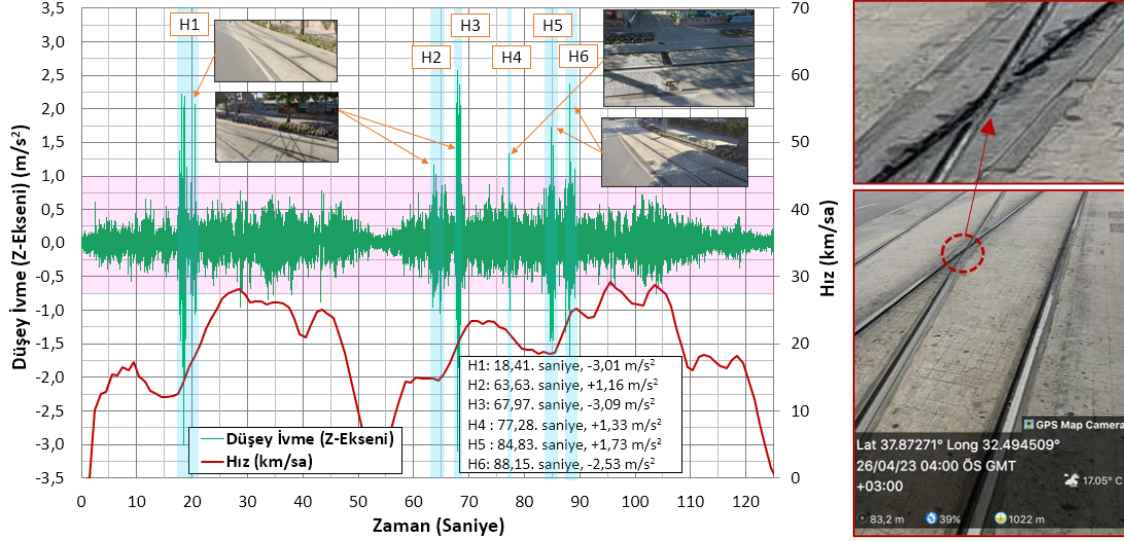
kayıtlarında, $\pm 0,95 \text{ m/s}^2$ değerinin (Şekil 7’de saydam kırmızı dolguyla taranan alanın), normal hat işletimi kaynaklı titreşimlerden kaynaklandığı kanaati hâsıl olmuştur. Diğer ifadeyle; $\pm 0,95 \text{ m/s}^2$ arasındaki düşey ivme değişimleri, (tren setine, üstyapı tipine, taşıt hızına, tolere edilebilir geometrik bozulmalara vs. bağlı olarak artıp azalan) normal hat işletimi kaynaklıdır. Dolayısıyla bu aralıkta kalan ivme değişimleri, bu çalışmanın tespitini hedeflediği problemlerin kapsamı dışındadır. Buna göre, Şekil 7’de, değinilen $\pm 0,95 \text{ m/s}^2$ düşey ivme limitini aşan yalnızca bir hata (H1) tespit edilmiştir. Kayıt işlemleri sonlandırıldığında ve ölçüm sonuçları Excel’e transfer edilerek incelendiğinde, bu H1 hatasının 20,82. saniyede gerçekleştiği tespit edilmiştir. Phypbox yazılımında, ivme kaydı ile senkronize bir şekilde konum (GNSS) bilgileri de kaydedildiğinden, söz konusu zaman diliminde tramvayın bulunduğu koordinatlar (Enlem: 37,87039912, Boylam: 32,50548075 derece) kolayca belirlenebilmiştir. Belirlenen bu koordinatlar, Google Earth veya Google Haritalar uygulamalarına girilerek (arama alanına 37.87039912, 32.50548075 yazılarak), hata konumu haritada ön-izlenebilmekte, hatta karayolu ile yakın bir güzergâhta bulunması hâlinde, Google Sokak Görünümü (Street View) ile de incelenebilmektedir. Hata lokasyonuna erişim için ise; belirlenen koordinatlar, Google, Yandex vb. “Navigasyon” uygulamalarına girilerek, hata lokasyonuna taşıtla ve/veya yaya olarak ulaşım sağlanabilmektedir. Belirtilen koordinatlara ulaşıldığında, Şekil 7’deki, $-1,38 \text{ m/s}^2$ ’ye ulaşan bu çoklu-ivme artışlarının, Mevlânâ Türbesi ve Müzesi önünde teşkil edilen Makas Sisteminden kaynaklandığı tespit edilmiştir. Bölgede hız tahdidi (20/25 km/sa) uygulanmasına rağmen, kaydedilen bu yüksek ivmeler, konvansiyonel makas sistemlerinde sıklıkla karşılaşılan bir sorundur. Metal tren tekerinin, metal raylar üzerinde yuvarlanırken, karşılaştığı süreksizlikler (makaslar) bu ivme artışlarına neden olmaktadır. Şekil 7’de sağda, GPS Map Cam uygulaması kullanılarak, söz konusu makas sisteminin ölçümlerin gerçekleştirildiği tarihteki görünümü ve enlem, boylam, hava durumu (sıcaklık-nem) gibi çeşitli detay bilgileri ile birlikte sunulmuştur. Bu fotoğraftan söz konusu makas sisteminin, tarihi yapıya yakınlığı da görülebilmektedir. Dikkat çeken bir diğer husus, makas sisteminde tekil ivme değişimi değil, çoklu artış-azalışların söz konusu olmasıdır. Bunun nedeni, sağ ve sol tekerlerin makasa girdiği ve çıktığı lokasyonların farklı olmasıdır. Saniyede 500 veri alınması sayesinde bu çok kısa mesafeler, kayda ayrı ayrı girebilmiştir.



Şekil 7. Mevlânâ İstasyonu ile müteakip trafik ışığı arasındaki hat kesimine ait ivme-hız-zaman grafiği (solda) ve H1 hatasının kaynaklandığı makas sisteminin yakından görünümü (sağda)

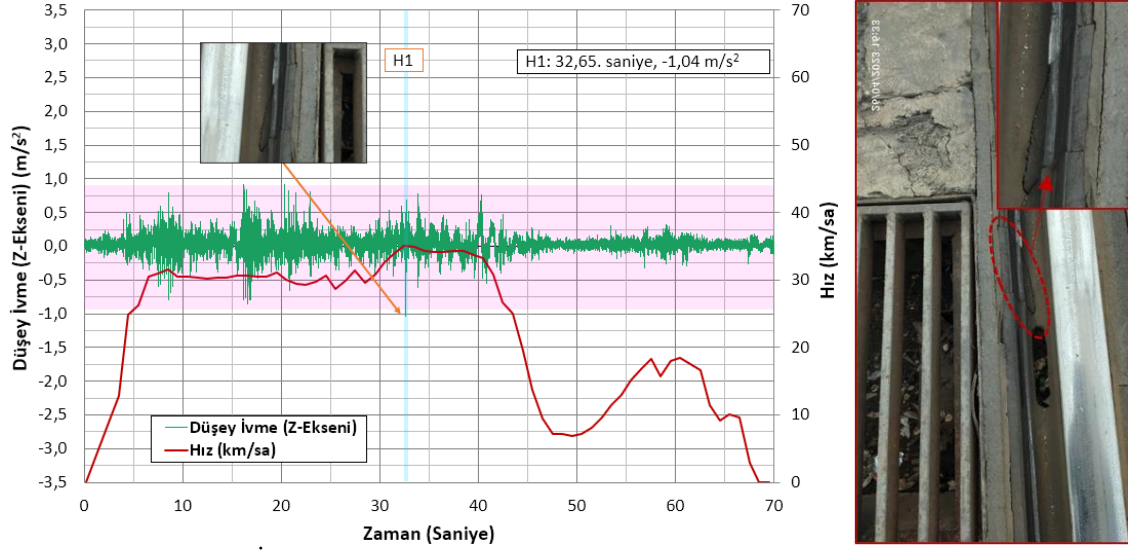
Şekil 7’de sunulan makas sistemi kaynaklı ivme artışı, ölçüm yapılan hat kesimindeki çeşitli bazı diğer makas sistemlerinde de söz konusu olmuştur. Şekil 8’de buna dair 5 örnek (H1, H2, H3, H5, H6) görülmektedir. Ancak ivme şiddetleri, her makasta aynı değildir. Olası ilk neden, tramvay hızının her makasta aynı olmayışıdır. Çünkü hız arttıkça dinamik kuvvetler artmaktadır. Ancak, bazı makaslarda, taşıt hızı aynı olmasına rağmen, ivme şiddeti $-3,00 \text{ m/s}^2$ değerinin üzerine

çıkmıştır. Bunun nedeni, geometrik anormalliğinin daha fazla olmasıdır. Şekil 8’de (sağda), $-3,01 \text{ m/s}^2$ ’ye ulaşan H1 hatasının GPS Map Cam uygulaması ile alınan görüntüsü sunulmuştur. Kayda giren bir diğer hata tipi (H4) ise su drenaj kanalı/ızgarasının neden olduğu rijitlik değişimidir. $+1,33 \text{ m/s}^2$ ’ye ulaşan bu hata, bu bölgede, ilerleyen süreçte üstyapı ve/veya altyapı elemanlarında sorunlar oluşacağını işaret etmektedir. Bu hata tipi, ulaşım güvenliğini henüz tehdit etmese de bakım maliyetlerini düşüren “kestirimci bakım” uygulamaları açısından önem arz etmektedir.



Şekil 8. Mevlânâ-Alaaddin İst. arasındaki hatta ait ivme-hız-zaman grafiği ile H1'in yakından görünümü

Ölçümlerin gerçekleştirildiği hat kesiminde tespit edilen bir diğer çok önemli hata tipi, ray kırığıdır. Sıradan gözle muayeneler esnasında tespit edilmesi oldukça güç olan bu kırılma, kullanılan metodolojinin (mobil cihazlı TCA) sağladığı avantajlar sayesinde tespit edilebilmiş ve Şekil 9’da sunulan grafikte, $-1,04 \text{ m/s}^2$ ’lik “tekil ivme değişimiyle” kendini göstermiştir. Bu yüksek ivmelenme (Şekil 9, H1), daha önce açıklanan hata tipiyle (Şekil 8, H4) aynı nedenden ortaya çıkmıştır. Yani su drenaj kanalı/ızgarasının neden olduğu rijitlik değişimi, zamanla ray kırığına dönüşmüştür. Bu durum, daha önce Şekil 8, H4 hatası için yapılan yorumların haklılığını da ortaya koymaktadır. Yani belirlenen ivme şiddetini aşan ani rijitlik değişimleri ve geometrik süreksizlikler, eğer kestirimci bakım uygulamalarıyla zamanında önlem alınmazsa, zamanla daha yüksek maliyetli bakım işlemleri gerektiren ve ulaşım emniyetini tehdit eden hasarlara sebebiyet verebilmektedir. Söz konusu ray kırığı (km. 00+560) tespit edilince ilgili birime bilgi verilmiş, gerekli müdahalelerin yapılacağına dair teşekkür içeren bir yanıt alınmıştır.



Şekil 9. Alaaddin-Zafer İst. arasındaki hatta ait ivme-hız-zaman grafiği ile ray kırığının yakından görünümü

4. Sonuç

Bu çalışma kapsamında, yürütülen mobil cihazlı demiryolu ölçümlerinde, Türkçe dil paketine sahip, ücretsiz bir mobil yazılım (Phyphox) kullanılmıştır. Çalışma içerisinde bu yazılım kullanılarak nasıl ölçüm alınabileceği, mümkün olduğu kadar basite indirgenerek izah edilmeye çalışılmıştır. Bu şekilde raylı ulaşım sektöründe, çeşitli kademelerdeki personellerin rahatlıkla uygulayabileceği bir yöntem ortaya konulmaya çalışılmıştır. Kullanılan mobil cihaz, çalışma içerisinde detayları verilen pratik bir metotla tramvaya bağlanmış ve rutin seyir müddetince düşey ivme değerlerinin ve senkronize bir şekilde konum verilerinin kaydedilmesi sağlanmıştır. Ölçüm yapılan hat kesiminde, rutin seyir esnasında, $\pm 0,95 \text{ m/s}^2$ ivme değerini aşmayan titreşimler olduğu, bu değeri aşan lokasyonlarda ise çeşitli üstyapı/altyapı hatalarının, ani rijitlik değişimlerinin ve geometrik süreksizliklerin mevcut bulunduğu görülmüştür. Bir diğer husus, özellikle ray kırığı gibi hatalar, çok kısa bir mesafede etkili olmakta ve meydana gelen ivme değişimleri birkaç milisaniyeyi geçmemektedir. Dolayısıyla mobil cihazların bu çok kısa süreli ivme değişimini okuyabilmesi için yüksek örnekleme hızı ile ölçüm alması kritik bir öneme sahiptir. Çalışma kapsamında saniyede 500 veri kaydı (500 Hz örnekleme) gerçekleştirilmiştir. Raylı ulaşım sistemi işletmecileri, söz konusu ölçüm sonuçlarını, kestirimci bakım amacıyla kullanabileceklerdir. İşletmeciler, kendi hat ve araç karakteristiklerini baz alarak, belirleyecekleri uyarı-limit değerini aşan lokasyonları takibe alabilir ve müdahale-limit değerini aşan lokasyonlarda; çeşitli bakım, revizyon, modernizasyon, rehabilitasyon kararları alabilir. Örneğin ölçüm yapılan hat güzergâhında, henüz ray çatlağı görülmeyen, ancak yüksek ivme değişimlerine neden olan birçok drenaj kanalı/ızgarası tespit edilmiştir. Bu hatalara karşı, kestirimci bakım anlayışla, önceden önlem alınması oldukça faydalı olacaktır. Nitekim ölçüm yapılan hat kesiminde, bir adet ray kırığı da tespit edilmiştir. Bu ray kırığının, söz konusu drenaj kanalı/ızgarasının bulunduğu bir lokasyonda meydana gelmiş olması, yukarıda değinilen çıkarımların doğruluğunu göstermektedir. Bir diğer kullanım alanı, bazı hat kesimlerinde tekayyüdat (geçici hız sınırlaması) uygulamak ve/veya (hız-zaman-konum verileriyle) tekayyüdatlara uyulup uyulmadığını kontrol etmek olabilir. Bir diğer önemli kullanım alanı ise, bu veriler, hat kesimlerinde ne tür üstyapı/altyapı elemanları kullanılabileceği konusunda karar vermekte kullanılabilir. Örneğin, ölçüm gerçekleştirilen hat kesiminde, Unesco Dünya Mirasında bulunan Mevlânâ Türbe ve Müzesinin yakınına makas sistemi teşkil edildiği ve bu makas sisteminde, $0,95 \text{ m/s}^2$ limit değerini aşan ivmelenmeler söz konusu olduğu tespit edilmiştir. Mobil cihazlı ölçümler sayesinde, makas sisteminin farklı bir bölgeye taşınması kararı alınabilir, mevcut izolasyon tedbirlerinin yeterliliği analiz ettirilebilir veya mevcut izolasyon sistemi inşa edilirken yeterli olsa dahi, makas sisteminin aynı performansa sahip olup olmadığı takibe alınabilir.

Teşekkür

Bu çalışmadaki katkıları için Konya Büyükşehir Belediyesi yetkililerine ve Phyphox, Google Maps, GPS Map Cam ve Microsoft Excel yazılımı geliştiricilerine teşekkürlerimi sunarım.

Kaynakça

- [1] D. Sasi, S. Philip, R. David, J. Swathi, “A review on structural health monitoring of railroad track structures using fiber optic sensors,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 33 (7), pp. 3787-3793, 2020
- [2] A. G. Hessami, R. Muttram, *New Research on Railway Engineering and Transportation*, IntechOpen, Jan. 24, 2024. Doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.105261>
- [3] K. Uray, “Demiryolu Bakım İşlerinde Matris Yöntemi Kullanılarak Risklerin Olası Etkilerinin Belirlenmesi,” *Afet ve Risk Dergisi*, vol. 4 (2), pp. 121-134, 2021
- [4] Mermec Group, “Roger 400,” 2024. [Online]. Available: <https://www.mermecgroup.com/inspect/recording-cars/105/roger-400.php> [Accessed January 28, 2024]
- [5] M. V. Taciroğlu, M. Kardeşahin, M. Tığdemir, “Ankara-Eskişehir Yüksek Hızlı Tren Hattında Meydana Gelen Geometrik Bozulmaların Değerlendirilmesi,” *Çukurova Ü. Müh. Mim. F. Der.*, vol. 30(2), pp. 345-354, 2015
- [6] TCDD, “Demiryolları’nda “Demir Göz” Göreve Başladı,” 2021. [Online]. Available: <https://www.tcdd.gov.tr/haberler/demiryollarinda-demir-goz-goreve-basladi> [Accessed January 28, 2024]
- [7] Latronix AB, “25 000 km of Latronix Track Measurement, together with TCDD Teknik,” 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=bIuaRV4m8wY> [Accessed January 28, 2024]
- [8] Tesmec, “OCPD002,” 2024. [Online]. Available: <https://www.tesmec.com/railway/products/diagnostic-solutions/ocpd002-rail-diagnostic-vehicle> [Accessed January 28, 2024]
- [9] M. V. Taciroğlu, M. Kardeşahin, M. Tığdemir, H. Işıker, “Demiryolu Hat Geometrisinin Fraktal Analizi,” *Demiryolu Mühendisliği.*, vol. 16, pp. 170-184, Temmuz 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1130088
- [10] Á. Vinkó, T. Simonek, C. Ágh, A. Csikós, B. Figura, "Feasibility of Onboard Smartphones for Railway Track Geometry Estimation: Sensing Capabilities and Characterization", *P. Pol. Civ. En.*, vol. 67, pp. 200-210, 2022
- [11] F. Seraj, N. Meratnia, P. J. M. Havinga, "RoVi: Continuous transport infrastructure monitoring framework for preventive maintenance," in *PerCom*, Kona, HI, USA, 2017, pp. 217-226
- [12] A. Rodríguez, R. Sanudo, M. Miranda, A. Gomez, J. Benavente, “Smartphones and tablets applications in railways, ride comfort and track quality: Transition zones analysis,” *Measurement*, vol: 182, ID: 109644, 2021
- [13] J. Cong, M. Gao, Y. Wang, R. Chen, P. Wang, “Subway rail transit monitoring by built-in sensor platform of smartphone,” *Frontiers of Inf. Technology & Electronic Engineering*, vol. 21 (8), pp. 1226-1238, 2020
- [14] E. Simonyi, Z. Fazekas, P. Gaspar, “Smartphone application for assessing various aspects of urban public transport,” *Transportation Research Procedia*, vol. 3, pp. 185-194, 2014
- [15] A. Azzoug, S. Kaewunruen, “RideComfort: A Development of Crowdsourcing Smartphones in Measuring Train Ride Quality,” *Frontiers in Built Environment*, vol: 3 (3), pp. 1-12, 2017
- [16] A. Paixao, E. Fortunato, R. Calçada, “Smartphone’s Sensing Capabilities for On-Board Railway Track Monitoring: Structural Performance and Geometrical Degradation Assessment,” *Advances in Civil Engineering*, vol: 2019, ID: 1729153, 2019, doi: <https://doi.org/10.1155/2019/1729153>
- [17] H. T. Aung, K. Inoue, S. H. Pha, W. Takeuchi, “Condition Monitoring of Yangon Circular Railway and Yangon–Mandalay Railway Based on Car-Body Acceleration Response Using a Portable Device,” *Journal of Disaster Research*, Vol. 15 (3), 2020
- [18] Geardo, “Xiaomi Redmi Note 10 Pro Teardown | Screen Replacement,” 2022. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=3CIvc4B8SY> [Accessed January 28, 2024]
- [19] Phyphox, “Awards,” 2024. [Online]. Available: <https://phyphox.org/> [Accessed January 28, 2024]
- [20] Phyphox, “Phyphox Sensor Database,” 2024. [Online]. Available: <https://phyphox.org/sensordb/> [Accessed January 28, 2024]

- [21] Wikipedia, “Konya tramvayı,” 2024. [Online]. Available: https://tr.wikipedia.org/wiki/Konya_tramvay%C4%B1#cite_note-urbanrail-1 [Accessed January 28, 2024]
- [22] Railway Gazette International, “Škoda Transportation wins Konya tram contract,” 2013. [Online]. Available: <https://www.railwaygazette.com/koda-transportation-wins-konya-tram-contract/37820.article> [Accessed January 28, 2024]
- [23] Wikipedia, “Škoda 28 T,” 2024. [Online]. Available: https://en.m.wikipedia.org/wiki/%C5%A0koda_28_T [Accessed January 28, 2024]
- [24] Railway Gazette International, “Konya orders trams for catenary-free operation,” 2014. [Online]. Available: <https://www.railwaygazette.com/konya-orders-trams-for-catenary-free-operation/39481.article> [Accessed January 28, 2024]

Özgeçmiş



Ferhat ÇEÇEN

TCDD’de geçen 16 yıllık hizmeti akabinde, Süleyman Demirel Üniversitesinde Dr. Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Demiryollarında seyir hâlinde ölçüm sistemleri ve milli demiryolu traversleri geliştirilmesi konulu araştırmaları devam etmektedir.
E-Posta: cecenferhat@sdu.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Ray Bağlantı Elemanlarına Akımsız Ni-B Kaplama ve Isıl İşlem Uygulamaları

Mustafa DURSUNLAR^{*1}, Zakir TAŞ²

¹ Yozgat Bozok Üniversitesi, Sorgun Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Yozgat, Türkiye

² Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

*mustafa.dursunlar@yobu.edu.tr

(Alınış/Received: 19.04.2024, Kabul/Accepted: 20.05.2024, Yayımlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Son yıllarda raylı sistem araçlarının hızı ve taşıdığı yük miktarları artmıştır. Bu durum kent içi ve yüksek hızlı tren hatlarının günümüz koşullarına uyumunu zorlaştırmaktadır. Bu amaçla ray bağlantı elemanlarının aşınma, korozyon ve yorulma dayanımlarının artırılması için genellikle Zn-Al kaplanarak kullanılmaktadır. Zn-Al kaplamanın yeterli sertlik ve aşınma direncine sahip olmaması, çinko banyolarının sürdürülebilir ve çevreci olmaması, homojen olmayan kaplama kalınlığı gibi nedenler Zn-Al kaplamayı dezavantajlı kılmaktadır. Bu çalışmada Zn-Al kaplamaya alternatif olarak, SKL14 gergi kışacları akımsız Ni-B kaplanmış ve ısıl işlem uygulanmıştır. Kaplama yüzeylerinin incelenmesinde, Zn-Al kaplama yüzeylerinde bazı çizik, çukur ve süreksizlikler gözlemlenmiş olup, Ni-B kaplama yüzeylerinde ise boşluk, gözenek, çizik, çukur, süreksizlik, akma, kabarma, pullanma, çatlama, kılcal kırılma vb. herhangi bir kusur gözlemlenmemiştir. Kaplamaların kesitten görünüşlerinin incelenmesinde, Zn-Al kaplama kalınlığının homojen olmadığı ve kaplama kalınlığının ortalama yaklaşık 22,5µm olduğu, atma, kabuk, süreksizlik ile altlık malzemeye çok iyi yapışmadığı gözlemlenmiştir. Ni-B kaplamalarda atma, kabuklanma ve süreksizlik gözlemlenmemiş olup, homojen bir kaplama kalınlığı elde edilmiş ve altlık malzemeye çok iyi bir şekilde yapıştığı, kaplama kalınlıklarının yaklaşık ise 19,5 µm olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama yüzeylerinin SEM analizi sonucunda, Zn-Al kaplama yüzeyinde pürüz, çatlak ve boşlukların olduğu heterojen bir yapı gözlemlenmiştir. Ni-B kaplamaların ise yüzeyde düzensiz, dokulu ve çok katmanlı küme oluşmasını sağlayan nodüllerden kaynaklanan karnabahar formu gözlemlenmiştir. Isıl işlem sonucu, tane boyutlarının küçüldüğü ve tane sınırlarının daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum, ısıl işlemin kaplamanın sertlik ve aşınma direncini artırmasıyla açıklanmaktadır. Sonuç olarak, gergi kışaclarına Ni-B kaplama ve ısıl işlem başarılı bir şekilde uygulanmış olup, Zn-Al kaplamalara iyi bir alternatif oluşturmaktadır.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Ray, Ray bağlantısı, Gergi kışacı, Ni-B kaplama

Electroless Ni-B Coating and Heat Treatment Application for Rail Fastener Elements

Abstract: In recent years, the speed of rail system vehicles and the amount of load they carry have increased. This situation makes it difficult for urban and high-speed train lines to adapt to today's conditions. For this purpose, Zn-Al coating is generally used to increase the wear, corrosion and fatigue resistance of rail fasteners. Reasons such as Zn-Al coating not having sufficient hardness and wear resistance, zinc baths not being sustainable and environmentally friendly, and non-homogeneous coating thickness make Zn-Al coating disadvantageous. In this study, as an alternative to Zn-Al coating, SKL14 tension clamps were coated with electroless Ni-B and heat treated. In the examination of the coating surfaces, some scratches, pits and discontinuities were observed on the Zn-Al coating surfaces, while on the Ni-B coating surfaces, voids, pores, scratches, pits, discontinuities, flowing, blistering, flaking, cracking, capillary breaks, etc. were observed. No defects were observed. When examining the cross-sectional views of the coatings, it was observed that the Zn-Al coating thickness was not homogeneous and the average coating thickness was approximately 22.5µm, and that it did not adhere very well to the substrate material due to flaking, crust, discontinuity. No flaking, crusting or discontinuity was observed in Ni-B coatings, a homogeneous coating thickness was obtained and it was observed that it adhered very well to the substrate material, and the coating thickness was approximately 19.5 µm. As a result of the SEM analysis of the coating surfaces, a

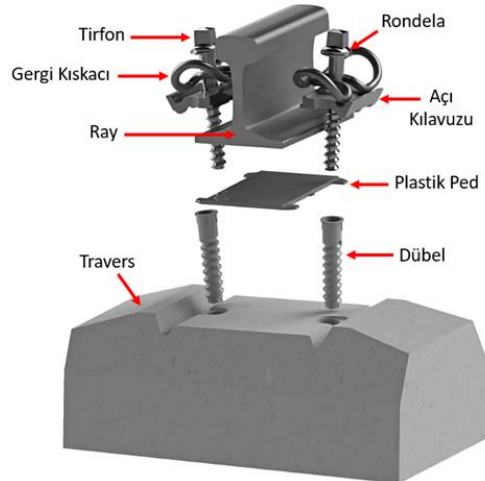
Atıf için/Cite as: M. Dursunlar, Z. Taş, "Ray bağlantı elemanlarına akımsız Ni-B kaplama ve ısıl işlem uygulamaları," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 67-78, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1471045

heterogeneous structure with roughness, cracks and voids was observed on the Zn-Al coating surface. The cauliflower form of Ni-B coatings, resulting from nodules that create irregular, textured and multi-layered clusters on the surface, was observed. It was observed that as a result of heat treatment, grain sizes decreased and grain boundaries became more distinct. This is explained by the fact that heat treatment increases the hardness and wear resistance of the coating. As a result, Ni-B coating and heat treatment have been successfully applied to tension clamps and represent a good alternative to Zn-Al coatings.

Keywords: Railway, Rail, Rail fastener, Tension clamp, Ni-B coating

1. Giriş

Demiryolu taşımacılığı birçok ülke ve bölgedeki yolcu ve yük taşımacılığı için her zaman çok önemli bir ulaşım aracı olmuştur. Son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle beraber raylı sistem araçlarının hızları ve taşıyabildikleri yük tonajları artmıştır. Bu durum demiryollarındaki ray-travers bağlantı elemanlarının hem mukavemetli hem de esnek yapıda olmasını gerektirmiştir [1]. Demiryoluna mukavemet ray ve traversler aracılığıyla, gerekli esneklik ise ray-travers bağlantı elemanlarıyla verilmektedir. Ray-travers bağlantı elemanları arasında esnekliği sağlayan eleman ise gergi kısıkaçlarıdır [2]. Gergi kısıkaçları, ray-travers bağlantı elemanı çeşitlerinden biri olan HM tipi bağlantının bir elemanıdır. Günümüzde HM tipi bağlantı, yüksek hızlı hatlarda, ağır taşımacılık, konvansiyonel ve kent içi raylı sistem hatlarında en sık kullanılan ortak bağlantı tipidir. HM tipi ray-travers bağlantı elemanlarından biri olan yaylı gergi kısıkaçları ise SKL olarak adlandırılmaktadır [3]. HM tipi bağlantıya ait görsel Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1. HM tipi bağlantı

Gergi kısıkaçları, demiryolu hattı boyunca uzanan karşılıklı her iki rayın sağ ve sol tabanlarına basacak şekilde ortalama 60 cm aralıklarla yerleştirilen traverslere sıkıca montajı yapılarak hatlarda sıklıkla kullanılmaktadır. Bu sayede rayların ve traverslerin uzunlamasına ve yanıl hareket etmesini engelleyerek hat bütünlüğünü korur. Ayrıca iki ray arası açıklık olan ekartman ile iki travers arası eker aralığının sabit kalmasını sağlar. Hattın rijitliğini ve sistemin ekstra titreşimini alarak demiryolunun esnek olmasını sağlar. Bu özellikleri sayesinde gergi kısıkaçları demiryolu güvenliği, verimliliği ve konforunu önemli ölçüde artırmaktadır [3-6].

Gergi kısıkaçları uluslararası standartlara sahip ve farklı kimyasal bileşimli, sakin çelikten imal edilen ve gerekli mekanik özellikleri sağlaması için ısıl işlem ve dekarbürizasyon uygulanan alaşım bir yay çeliğidir [1]. Günümüzde yaygın olarak kullanılan yay çeliklerinin başında 38Si7, 51CrV4, 60Si2MnWE, 60Si2Mn ve 62Si2CrA gelmektedir. Bu yay çeliklerinin içerisinde Alman standartlarına göre isimlendirilen 38Si7 en az karbon içeriğine sahip olanıdır. Düşük karbon içeriği, plastisitenin zayıflığını alır ve tokluğun üstesinden gelir. Ayrıca dekarbürizasyon

hassasiyetini en aza indirger ve yorulma ömrünü artırır. Bu özellikleri sayesinde demiryolu yapım, bakım ve onarım maliyetlerini azaltarak demiryolu işletmeciliğine ekonomik olarak katkı sağlar. Ayrıca karbon oranının az olması sürdürülebilir bir çevre, iklim değişikliği ve nötr karbon ilkelerini benimseyip destekler [7-9].

Gergi kısıkaçları, raylı sistem araçlarının neden olduğu yüksek hız ve tonajların etkisiyle yapısı itibarıyla ortalama 12 mm aşağı-yukarı yer değiştirme hareketi yaparak demiryoluna gerekli esnekliği sağlamaktadır. Ancak gergi kısıkaçının demiryoluna kazandırdığı bu esnekliğe karşın aşınması kaçınılmazdır. Gergi kısıkaçının aşınmasıyla birlikte ray-travers bağlantı sıklığı zayıflar ve gergi kısıkaç yüzeylerinde çatlakların oluşmasıyla yorulma kaynaklı kırılma gibi çeşitli hasarlara neden olmaktadır. Bu durum, raylı taşıtların derayman (raydan çıkma) olmasına ve demiryolu trafiğini olumsuz etkileyerek yolcu ve yük taşımacılığını riske atmaktadır [10-12]. Bu durumun üstesinden gelmek için gergi kısıkaçlarına çeşitli kaplamalar ve ısıl işlem uygulamaları yapılmaktadır.

Gergi kısıkaçlarının imalinde ısıl işlem ve dekarbürizasyon işlemi uygulanmaktadır [1, 13]. Isıl işlem, gergi kısıkaçının sertlik ve aşınma direncini artırmaktadır. Dekarbürizasyon işlemi ise sertlik ve aşınma direncini azaltmakla beraber yorulma ömrünü artırmaktadır. Dekarbürizasyon işlemi malzeme yüzeylerinde çapak, çatlak ve çukur gibi bazı imal kusurlarına neden olabilmektedir. Dekarbürizasyonla sertliği azalan gergi kısıkaçları yüksek hız, ağır tonaj, aşırı titreşim, çevre ve yol şartları gibi etkenlerden dolayı kolayca aşınmaktadır [10-11, 13]. Bu duruma çözüm olarak gergi kısıkaçlarına genellikle çinko galvaniz kaplama yapılarak hatlarda kullanılmaktadır. Çinko kaplama yapılmasının asıl amacı aşınma direncinin artırılmasından ziyade korozyon koruması için uygulanmaktadır. Çinko galvaniz kaplama banyolarına son yıllarda Al ilave edilmesine rağmen yeterince sertlik ve aşınma direncine sahip olmaması, çinko banyolarının sürdürülebilir ve çevreci olmaması, homojen bir kaplama kalınlığının elde edilememesi gibi nedenler çinko galvaniz kaplama kullanımını dezavantajlı hale getirmektedir [14-17]. Çinko galvaniz kaplamanın bu dezavantajlarına karşın, akımsız kaplamalar sahip olduğu üstün özellikleri sayesinde iyi bir alternatif sunmaktadır.

Akımsız kaplamalar, otokatalik bir süreç olup kimyasal biriktirme olarak bilinir ve elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmadan kaplama yapılmasına olanak sağlayan bir yöntemdir [18]. İlk akımsız Nikel (Ni) kaplama 1940'lı yıllarda Brenner ve Riddel tarafından [19], ilk akımsız Nikel-Bor (Ni-B) kaplama ise yaklaşık 10 yıl sonra geliştirilmiştir [20]. Akımsız nikel kaplama banyolarında bir indirgeyici ajanla birikme olur ve homojen kaplama kalınlığı elde edilir. Bu sayede diğer kaplama yöntemlerine kıyasla karmaşık geometriler için mükemmel şekil uyumu sağlar [21].

Ni-B kaplamalar, akımsız Nikel-Fosfor (Ni-P) kaplamaların bir çeşidi olarak yaklaşık 70 yıldır endüstriyel olarak kullanılmaktadır. Yüksek sertlik ve aşınma direnci (Ni-P'ye göre), düşük sürtünme katsayısı, korozyon direncinin nispeten yüksek olması, lehmlenebilir olması, yüksek elektrik iletkenliği, homojen kaplama kalınlığı eldesi, yüzey kalitesinin iyi olması, estetik görünmesi, çevreci bir kaplama olması gibi birçok olumlu özelliklere sahiptir. Bu sayede Ni-B kaplamalar elektronik, havacılık, otomotiv, tekstil ve kimya endüstrisinde yaygın olarak tercih edilmektedir [18, 22]. Akımsız kaplamalar içerisinde Ni-P kaplamalar popüler olsa da son yıllarda üstün sertlik ve aşınma direnci sayesinde yüksek teknoloji gerektiren önemli kaplamalarda Ni-B kaplamalar sıklıkla tercih edilmektedir [22].

Ni-B kaplamadaki yüzey morfolojisi karnabahar benzeri bir yapıya, renk olarak açık gri veya füme rengi görünüme sahiptir [23]. Amorf olan kaplama yapısı, bor miktarının artışı ile amorf faz miktarını artırmaktadır. Ni-B kaplamaların geneli %5-7 arasında bor içeriğine sahip olup, X-ışınında ağırlıkça %5-6 oranında bulunan kaplamalar amorf yapı olarak görünür ve kaplamadaki bor miktarının artışı sertlik, aşınma ve korozyon direncini artırır [20]. Ayrıca sertlik, aşınma ve

korozyon direncini optimize etmek için amorf olan yapı kristale döndürülebilmektedir [24]. Yaklaşık 300°C ve üzeri ısıl işlem uygulamaları sonrasında yapıda kristal faz görülebilmekte ve bu sayede sertlik yaklaşık iki katına çıkabilmektedir [25].

Ni-B kaplamaların metalik altlıklara yapışmaları ve süreklilikleri çok iyi olmakta ve kaplama işlemi çok kolay yapılabilmektedir. Bu sayede homojen bir kaplama yapılmasına imkan sağlar ve karmaşık geometrilerin düzgün bir biçimde kaplanabilmesi çok kolaydır [26-27]. Morfolojileri karnabahara benzer ve bu yapı özellikle adeziv aşınma koşulları altında yağlayıcıları tutma konusunda iyidir [28]. Sertlik ve aşınma dirençlerinin yüksek olması, yağlayıcılıkları ve yükleme kapasitelerinin iyi olmasından kaynaklanır [27]. Yüksek sertlik ile aşınma ve korozyon dirençlerinin yüksek olması sayesinde paslanmaz çelik, alüminyum ve titanyum gibi malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için Ni-B kaplamalar son yıllarda birçok endüstride yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [29].

Literatür incelendiğinde, Ni-B kaplamaların çeşitli altlık malzemelere başarıyla uygulandığı birçok çalışma mevcuttur. Krishnaveni ve ark. [28], yumuşak, bakır ve paslanmaz çelik üzerine Ni-B kaplama yapmışlar ve sertlik ile aşınma direncini incelemişlerdir. Sonuç olarak Ni-B kaplamaların sertlik ve aşınma direncini artırdığını bulmuşlardır. Vitry ve ark. [25], altlık malzeme olarak St-37 yumuşak çelik üzerine Ni-B kaplaması yapmışlar ve kaplamanın çizilme testine karşı iyi bir direnç göstererek sünek bir davranış sergilediğini bulmuşlardır. Bülbül ve ark. [30], AISI 316L paslanmaz çelik üzerine Ni-B kaplama yaparak kaplamanın yapısı, tribolojik ve korozyon özelliklerini incelemişlerdir. Sonuç olarak karnabahar bir morfolojiye sahip amorf olan kaplamanın çeliğin sertlik ve aşınma direncini iyileştirdiğini bulmuşlardır. Correa ve ark. [31], magnezyum ve AZ91D alaşım altlıklarının üzerine Ni-B kaplama yapmışlar ve tribolojik davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak Ni-B kaplamaların düşük sürtünme katsayıları ile aşınma oranlarını önemli ölçüde azalttığını bulmuşlardır. Madah ve ark. [32], altlık olarak Ck45 çeliği üzerine akımsız Ni-B kaplamış ve kaplamanın kuru kayma sırasındaki aşınma mekanizmaları ve aşınmış yüzeylerin dayanıklılık ömrü üzerine çalışma yapmışlardır. Sonuç olarak Ni-B kaplamanın spesifik aşınma oranının çeliğinkinin onda biri kadar olduğunu bulmuşlardır. Bonin ve ark. [26], altlık malzeme olarak St-37 yumuşak çelik üzerine Ni-B/Ni-P; Ni-P/Ni-B; Ni-B/Ni-B ve Ni-P/Ni-P dörtlü dubleks kaplama yaparak aşınma karakterizasyonunu incelemişlerdir. Sonuçlarda Ni-B kaplamaların daha iyi yapışma, sertlik ve aşınma direncinin daha yüksek olduğunu bulmuşlardır. Balaraju ve ark. [33], altlık olarak orta karbonlu çelik üzerine Ni-B kaplamışlar ve sertlik ile aşınma davranışını incelemişlerdir. Sonuç olarak kaplamanın sertlik ve aşınma direncinin arttığını gözlemlenmiştir. Vitry ve ark. [20], altlık malzeme olarak St-37 yumuşak çelik üzerine Ni-B kaplama koşullarını değiştirerek kaplamanın bor içeriğinin artırılması üzerine çalışmışlardır. Sonuç olarak yüksek borlu (%7–9 B) kaplamanın aşındırıcı aşınmaya, orta borlu (%5–6 B) kaplamaların ise kayma aşınması ve çizik testine daha iyi direnç gösterdiğini bulmuşlardır. Mukhopadhyay ve ark. [18], altlık olarak AISI 1040 çeliğine Ni-B, Ni-B-Mo ve Ni-B-W kaplamalar yapmış ve kaplamaların oda ile yüksek sıcaklıklarda tribolojik davranışını karşılaştırmışlardır. Sonuç olarak kaplamaların sertlik ve aşınma dirençlerinin arttığını bulmuşlardır. Mukhopadhyay ve ark. [34], AISI 1040 çeliği üzerine Ni-B kaplama yaparak tribolojik davranışa çalışma sıcaklığının etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak farklı çalışma sıcaklıklarında kaplamanın aşınma direncinin arttığını bulmuşlardır. Gültekin ve ark. [35], düşük karbonlu St-42 çeliğinin üzerine kurşunsuz Ni-B ve Ni-B/CeO₂ kompozit kaplama yapmışlar ve bu kaplamaların aşınma direncini artırdığını bulmuşlardır. Bayatlı ve ark. [36], altlık malzeme olarak su verilmiş ve temperlenmiş AISI 1040 çelik malzeme üzerine Ni-B ve Ni-B-W kaplamalara bor karbür takviyesinin yüzey özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sonuç olarak, kaplamaların sertlik, aşınma ve çizilme dirençlerinin arttığını bulmuşlardır. Agrawal ve ark. [37], altlık olarak çelik malzemelerin üzerine stabilizatör içermeyen çift banyodan oluşan Ni-B kaplama yapmışlardır. Sonuç olarak yapılan kaplamaların sertlik, çizilme sertliği, aşınma ve korozyon dirençlerinin arttığını bulmuşlardır.

Bu çalışmada, özellikle kaynaklı demiryollarında [38] standart olarak Zn-Al kaplanarak kullanılan gergi kışkaçlarına, kaplama ve yüzey kalitesi, altlık malzemeye yapışma ve üstün mekanik özellikleri vb. açısından Ni-B kaplama ile iyi bir alternatif oluşturulması amaçlanmıştır.

2. Metot

2.1. Materyal

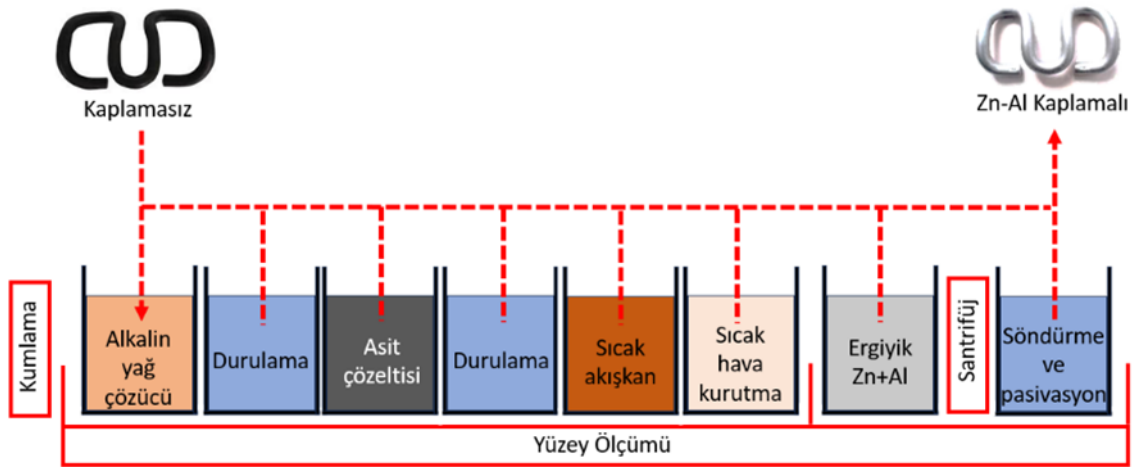
Çalışmada altlık olarak kullanılan malzeme Ø13 mm çapında ve 38Si7 kimyasal bileşime sahip HM tipi ray-travers bağlantı elemanlarından SKL14 yaylı gergi kışkacıdır. Çeliğin kimyasal bileşimi Tablo 1’de verilmiştir. Çalışmada kullanılan gergi kışkaçları aynı döküm, şarj ve imalat numarasına sahip olup, Gürmak Demiryolundan temin edilmiştir.

Tablo 1. 38Si7 SKL14 kimyasal bileşimi

Element	C	Si	Mn	P	S
Yüzde (%)	0,35-0,42	1,50-1,80	0,5-0,8	maks. 0,025	maks. 0,025

2.2. Zn-Al kaplama

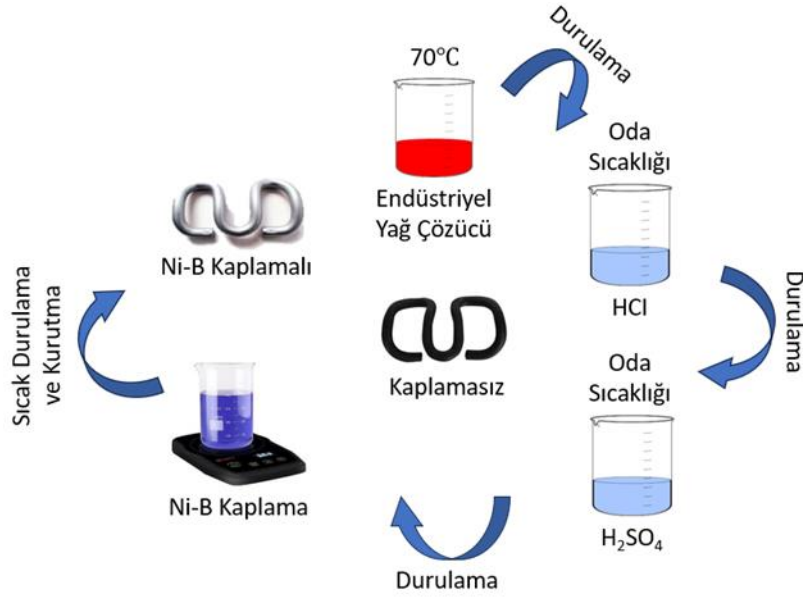
Zn-Al kaplamalar, demiryolunda kullanılan gergi kışkaçlarına standart olarak uygulanan Zn-Al prosesine uygun bir biçimde Gürmak Demiryolunda yapılmıştır. Kaplama öncesi tüm numuneler 230µ ile kumlanmıştır. Kaplama işleminde banyo içeriği yaklaşık %60 Zn ve %40 Al olarak ayarlanmıştır. Kaplama kalınlığı yaklaşık ~20µm olarak yapılmıştır. Kaplamaya ait proses Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Zn-Al kaplama prosesi

2.3. Ni-B kaplama

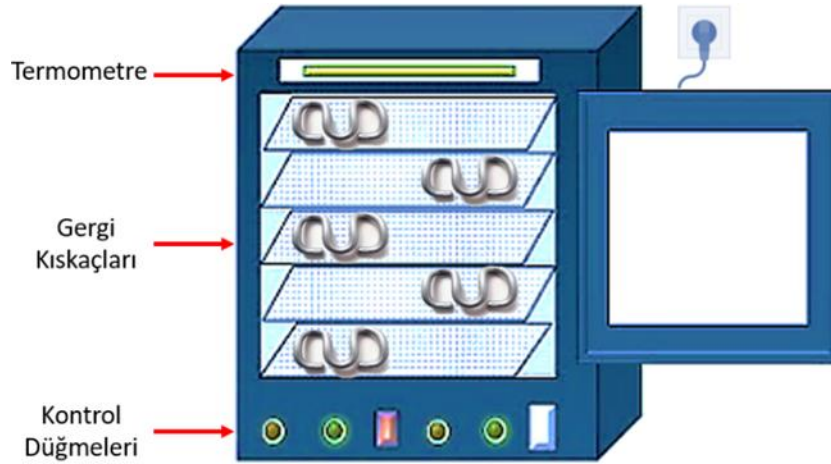
Ni-B kaplamalar, BoraPlate ticari prosesiyle kaplanmıştır. Kaplama öncesi numunelerin tamamı 230µ ile kumlanmıştır. Daha sonra 70°C sıcaklıkta 10 dakika boyunca endüstriyel yağ çözücü ile yüzeyler temizlenmiştir. Ardından sırasıyla HCl ve H₂SO₄ çözeltileri ile yüzeyler oda sıcaklığında aktive edilmiştir. Her bir adımdan sonra numuneler damıtılmış su ile durulanmıştır. Tüm akımsız kaplama işlemleri 60 dakika süreyle 90±2°C sıcaklıkta gerçekleştirilmiştir. Banyo manyetik bir karıştırıcı kullanılarak çalkalanmıştır. Kaplama işlemi tamamlandıktan sonra 50-55°C sıcaklığındaki sıcak suda durulama yapılmıştır. Kaplama kalınlığı yaklaşık ~20µm ve bor içeriği ise yaklaşık %5 olarak ayarlanmıştır. Ön işlem, kaplama işlemi ve kaplama koşullarını içeren proses Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. Ni-B kaplama prosesi

2.4. Isıl işlem

Isıl işlem, Ni-B kaplama sonrasında endüstriyel elektrikli ısıl işlem fırınında 250°C sıcaklıkta 5 saat olarak uygulanmıştır. Isıl işleme ait proses Şekil 4'te gösterilmiştir.



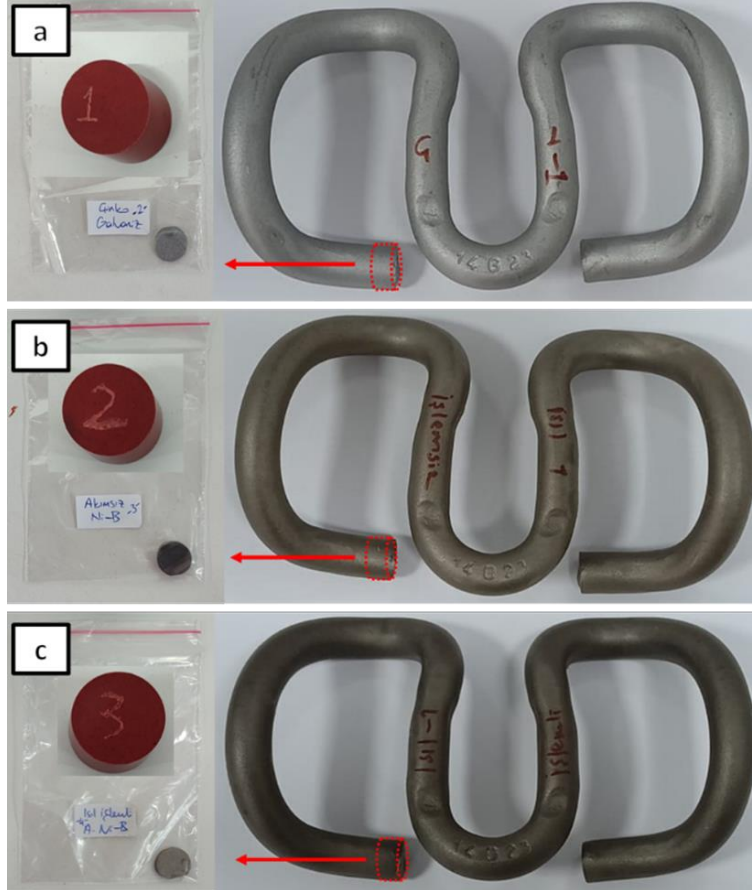
Şekil 4. Isıl işlem fırını

2.4. Karakterizasyon

Mikroyapı çalışmaları, Sivas Bilim ve Teknolojisi Üniversitesi ile Karadeniz Teknik Üniversitesi Laboratuvarlarında yapılmıştır. Mikroyapı analizleri için Zn-Al, Ni-B ve ısıl işlemlenmiş Ni-B numunelerinin hassas kesimle belirlenen kesit alanları tabanlarından kesilmiş ve daha sonra bakalite alınmıştır. Numune tabanlarının dışarıda kalan yüzeyleri bakalitin üst kısmında kalmış ve dolayısıyla kaplamaların en dış yüzeyi incelenmiştir. Hassas kesim yerleri, kesilen numune parçaları ve bakalite alınan numunelere ait görsel Şekil 5'te gösterilmiştir. Bakalite alınan numunelere daha sonra gerekli mikroyapı analizi için zımpara ve parlatma işlemlerine tabi tutulmuştur. Kesit görüntüleri ve kaplama kalınlığı SOIF MDS400 model bilgisayar destekli optik cihazıyla, kaplama yüzeylerinin morfoloji analizi ise yüksek çözünürlüğe sahip Zeiss Evo LS10 model SEM cihazı kullanılarak analiz edilmiştir.

3. Bulgular

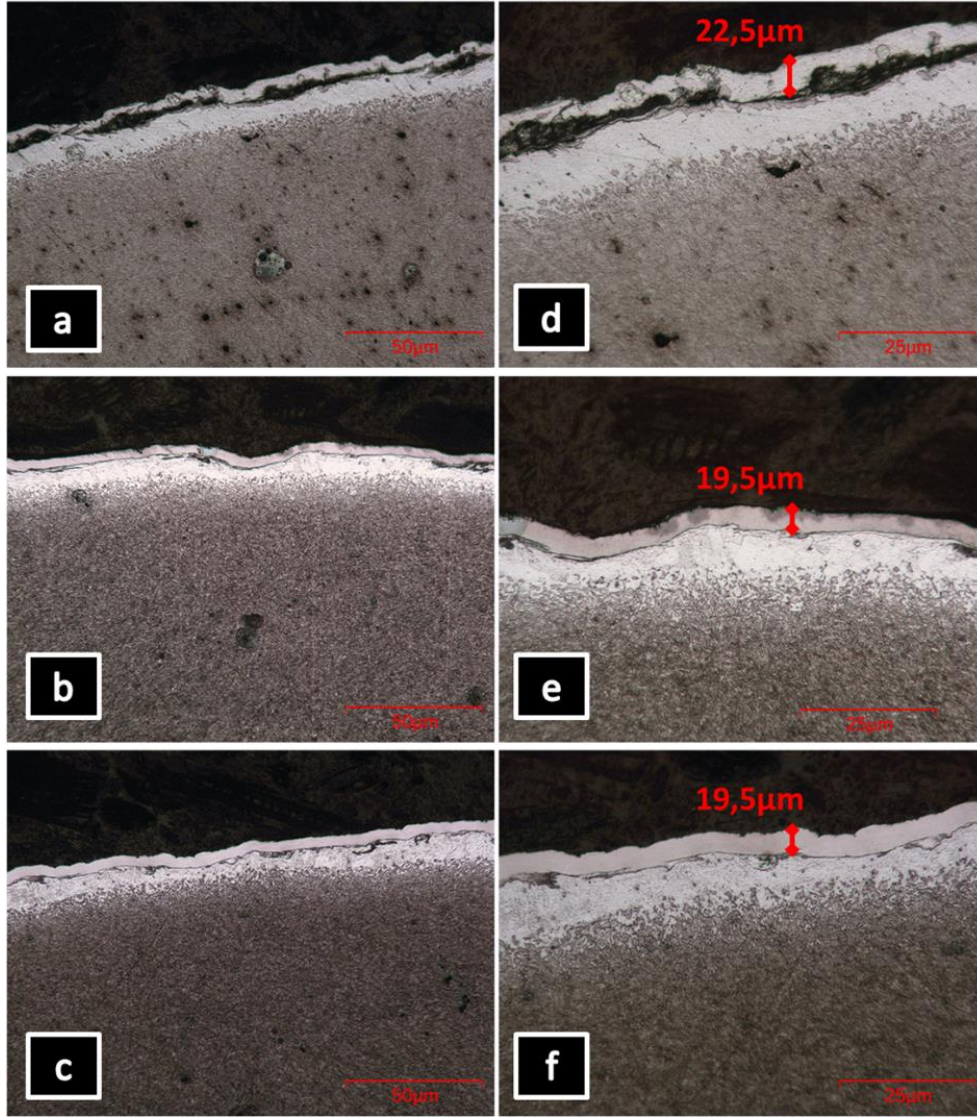
Şekil 5'te gergi kısıkaçlarının kaplama sonrası makro görüntüleri ve ilgili hassas kesim yerleri gösterilmektedir. Şekil 5-a Zn-Al kaplamalı gergi kısıkaçını göstermektedir. Bu kaplamanın yüzey kalitesi çok iyi olmamakla beraber, numune üzerindeki bazı çizik, çukur ve süreksizlikler gözlemlenmiştir. Şekil 5-b Ni-B kaplamalı gergi kısıkaçını ve Şekil 5-c ise ısıtılmış Ni-B numunesine ait görseldir. Ni-B ve ısıtılmış Ni-B numunelerinin yüzeylerinde boşluk, gözenek, çizik, çukur, süreksizlik, akma, kabarma, pullanma, çatlama, kılcal kırılma vb. herhangi bir kusur gözlemlenmemiş olup, kaplama başarıyla uygulanmıştır. Ayrıca Ni-B ve ısıtılmış Ni-B numunelerinin yüzey kalitesinin klasik Zn-Al kaplamadan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 5. Kaplama sonrası gergi kısıkaçları a) Zn-Al b) Ni-B c) Isıl işlemlenmiş Ni-B

Şekil 6-a-b-c kaplanan numunelere ait kesit görüntülerini, Şekil 6-d-e-f görselleri ise kaplama kalınlıklarını göstermektedir. Şekil 6-a Zn-Al kaplamanın kesit görüntüsünü, Şekil 6-d ise kaplama kalınlığını göstermektedir. Şekil 6-a incelendiğinde, Zn-Al kaplamadaki atma, kabuklanma, süreksizlik ve homojen olmayan kaplama kalınlığı görülmektedir. Bu nedenlerden dolayı Zn-Al kaplamanın altlık malzemeye çok iyi bir şekilde yapışmadığı gözlemlenmiştir. Şekil 6-d incelendiğinde, Zn-Al kaplama kalınlığının yaklaşık $22,5\mu\text{m}$ olduğu gözlemlenmiştir.

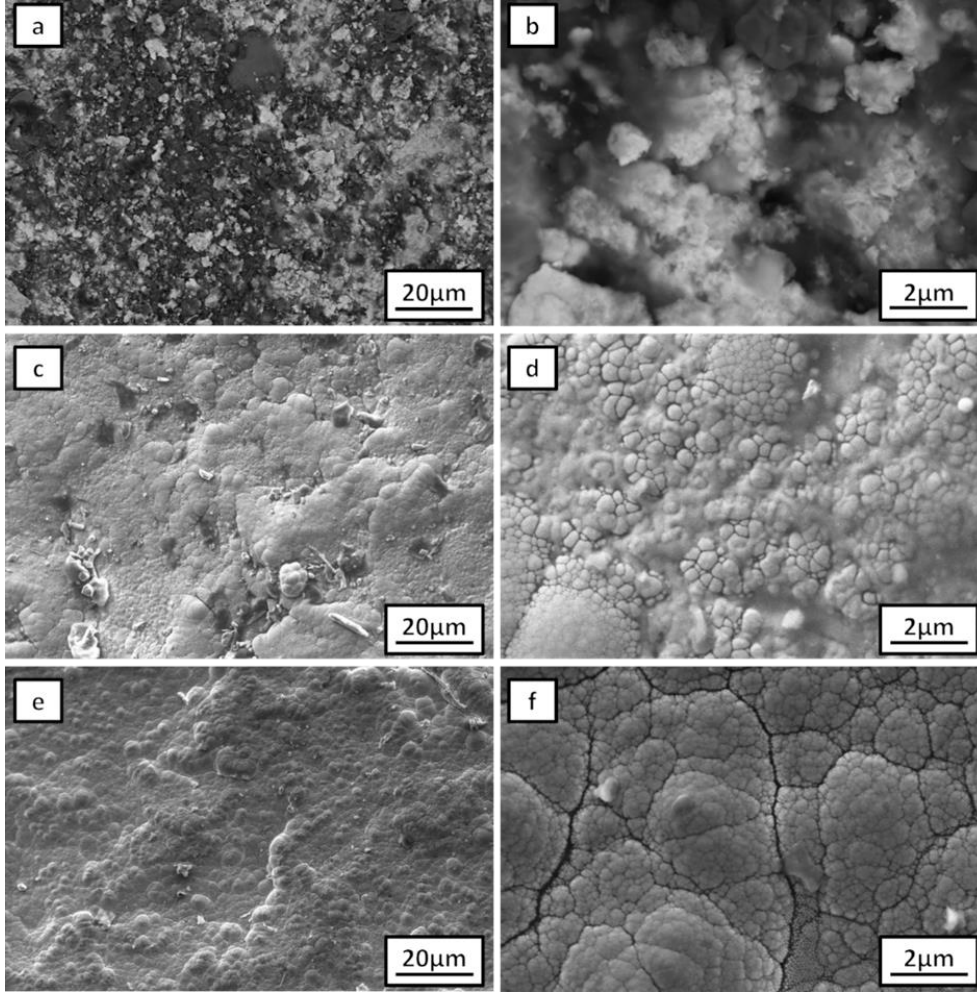
Şekil 6-b Ni-B kaplamanın kesit görüntüsünü, Şekil 6-e ise kaplamanın kalınlığını göstermektedir. Şekil 6-c ısıtılmış Ni-B kaplamanın kesitini, Şekil 6-f ise kaplama kalınlığını göstermektedir. Şekil 6-b ve Şekil 6-c incelendiğinde, Ni-B ve ısıtılmış Ni-B kaplamada atma, kabuklanma ve süreksizlik gözlemlenmemiş olup, homojen bir kaplama kalınlığı elde edilmiştir. Bu sayede Ni-B kaplama, altlık malzemeye çok iyi bir şekilde yapışmıştır. Şekil 6-e ve Şekil 6-f incelendiğinde, Ni-B ve ısıtılmış Ni-B kaplama kalınlıklarının yaklaşık $19,5\mu\text{m}$ olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Kesit a) Zn-Al b) Ni-B c) Isıl işlemlenmiş Ni-B ve kaplama kalınlıklarının mikroyapıları

Şekil 7 kaplama yüzeylerinin morfolojilerine ait SEM görüntülerini göstermektedir. Şekil 7-a-b Zn-Al, Şekil 7-c-d Ni-B, Şekil 7-e-f ise ısıl işlemlenmiş Ni-B kaplamalara ait SEM görüntüleridir. Şekil 7-a incelendiğinde, Zn-Al kaplamanın yüzey morfolojisinin heterojen bir yapıda olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7-b incelendiğinde ise yüksek büyütmede kaplama yüzeyinde pürüz, çatlak ve boşlukların varlığı gözlemlenmiştir.

Şekil 7-c incelendiğinde, düşük büyütmede yüzeyin pürüzlü olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 7-d incelendiğinde ise yüksek büyütmede beklenildiği üzere literatürde kendi has görüntüsü olan karnabahar formu gözlemlenmiştir [36]. Bu karnabahar formu, yüzeyde düzensiz, dokulu ve çok katmanlı küme oluşmasını sağlayan nodüllerden kaynaklanmaktadır. Nodüller sayesinde oluşan özgün karnabahar morfolojisi, Ni-B kaplamalara estetik bir görünüm kazandırmasının yanı sıra yüksek sertlik ve aşınma direnci sağlar. Ayrıca bu nodüller, kaplamaya iyi bir yapışma, homojen kaplama kalınlığı ile geniş bir yüzey alanı kazandırır [33]. Şekil 7-e-f için ısıl işlemin yüzey morfolojisine etkisi incelendiğinde, kaplama dokusunun değişmediği, tane boyutlarının küçüldüğü ve tane sınırlarının daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Tane sınırlarının oluşup daha belirgin hale gelmesi ve tane boyutlarının küçülmesinin, kaplamanın sertlik ve aşınma direncini artırdığı birçok çalışmada ispatlanmıştır [21].



Şekil 7. Kaplama yüzeylerinin SEM görüntüleri a-b) Zn-Al ve c-d) Ni-B e-f) Isıl işlemlenmiş Ni-B

4. Sonuç

Bu çalışmada SKL14 ray bağlantı elemanı gergi kısıkaçları Zn-Al, Ni-B ve 250°C-5 saat ısıl işlemlenmiş Ni-B olmak üzere üç farklı şekilde kaplanmıştır. Ni-B ve ısıl işlemlenmiş Ni-B kaplama yüzeylerinde boşluk, gözenek, çizik, çukur, süreksizlik, akma, kabarma, pullanma, çatlama, kılcak kırılma vb. herhangi bir kusur gözlemlenmemiş olup, Zn-Al kaplama yüzeylerinde ise bazı çizik, çukur ve süreksizlikler gözlemlenmiştir. Makro düzeyde yüzey kalitesi gözlem analizi sonucunda, Ni-B ve ısıl işlemlenmiş Ni-B kaplamaların yüzey kalitelerinin Zn-Al kaplamadan çok daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama kesitlerinin optik incelemeleri sonucu, Zn-Al kaplama kalınlığının yaklaşık 22,5µm olduğu, homojen olmayan kaplama kalınlığı, atma, kabuk, süreksizlik ile altlık malzemeye çok iyi yapışmadığı gözlemlenmiştir. Ni-B ve ısıl işlemlenmiş Ni-B kaplamalarda atma, kabuklanma ve süreksizlik gözlemlenmemiş olup, homojen bir kaplama kalınlığı elde edilmiş ve altlık malzemeye çok iyi bir şekilde yapıştığı, kaplama kalınlıklarının yaklaşık ise 19,5 µm olduğu gözlemlenmiştir. Kaplama yüzeylerinin SEM sonucunda, Zn-Al kaplama yüzeyinde pürüz, çatlak ve boşlukların olduğu heterojen bir yapı gözlemlenmiştir. Ni-B kaplamaların SEM sonucunda ise yüzeyde düzensiz, dokulu ve çok katmanlı küme oluşmasını sağlayan nodüllerden kaynaklanan karnabahar formu gözlemlenmiştir. Isıl işlemin Ni-B kaplamanın yüzeyine etkisi olarak tane boyutlarının küçüldüğü ve tane sınırlarının daha belirgin hale geldiği gözlemlenmiştir. Bu durum yüksek sertlik ve aşınma direnciyle açıklanmaktadır. Ni-B kaplama ile sertlik ve aşınma direnci artacak gergi kısıkaçlarının yüzeylerindeki olası çentik darbe kaynaklı çatlak, kırılma ve aşınmaların, Zn-Al kaplamalı gergi kısıkaçları numunelerine kıyasla gecikeceği öngörülmektedir. Bu sayede gergi kısıkaçları, servis koşulları altında herhangi bir hasar mekanizmasına uğramadan ve

aşınmadan uzun ömürlü kullanılabilir. Bu durum demiryolu güvenliğine ve ekonomisine olumlu katkıda bulunacaktır. Sonuç olarak, gergi kısıkaçlarına Ni-B kaplama ve ısıl işlem başarılı bir şekilde uygulanmış olup, bu çalışmadaki sonuçlar ve literatür araştırmalarına göre Ni-B kaplama, demiryollarında standart olarak kullanılan Zn-Al kaplamaya göre iyi bir alternatif olacaktır. Ayrıca bu çalışmanın gergi kısıkaçlarının akımsız Ni-B kaplama ve ısıl işlem uygulamalarının deneysel olarak incelendiği ilk çalışma olarak literatüre ve raylı sistem endüstrisine katkı sağlayacağı öngörülmektedir.

Teşekkür

Bu çalışma Mustafa DURSUNLAR'ın doktora tez çalışmalarından türetilmiş olup, malzeme temini ve kaplamalar için Gürmak Demiryolu ve Bematek'e teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] J. Liu, B. Jiang, C. Zhang, G. Li, Y. Dai, and L. Chen, "Evolution during hot rolling and control by thermomechanical control process of surface decarburization on 38Si7 spring steel," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 31, no. 11, pp. 8677–8686, 2022, doi:10.1007/s11665-022-06956-5
- [2] Y. Liu, X. Jiang, Q. Li, and H. Liu, "Failure analysis and fatigue life prediction of high-speed rail clips based on dic technique," *Advances in Mechanical Engineering*, vol. 13, no. 12, 2021, doi: <https://doi.org/10.1177/16878140211066225>
- [3] D. Ferreño, J. A. Casado, I. A. Carrascal, S. Diego, E. Ruiz, M. Saiz, J. A. Sainz-Aja, and A. I. Cimentada, "Experimental and finite element fatigue assessment of the spring clip of the SKL-1 railway fastening system," *Engineering Structures*, vol. 188, pp. 553–563, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.03.053>
- [4] M. Chen, W. Zhai, S. Zhu, L. Xu, and Y. Sun, "Vibration-based damage detection of rail fastener using fully convolutional networks," *Vehicle System Dynamics*, vol. 60, no. 7, pp. 2191–2210, 2022, doi: 10.1080/00423114.2021.1896010
- [5] Y. Lu, H. Xie, J. Wang, Z. Li, F. Jia, H. Wu, J. Han, and Z. Jiang, "Influence of hot compressive parameters on flow behavior and microstructure evolution in a commercial medium carbon micro-alloyed spring steel," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 58, pp. 1171–1181, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.021>
- [6] M. Sol-Sánchez, L. Pirozzolo, F. Moreno-Navarro, and M. C. Rubio-Gámez, "A study into the mechanical performance of different configurations for the railway track section: a laboratory approach," *Engineering Structures*, vol. 119, pp. 13–23, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.008>
- [7] W. Peng, J. Zhang, X. Yang, Z. Zhu, and S. Liu, "Failure analysis on the collapse of leaf spring steels during cold-punching," *Engineering Failure Analysis*, vol. 17, no. 4, pp. 971–978, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2009.11.008>
- [8] C. Xu, Y. Liang, M. Yang, J. Yu, and X. Peng, "Effects of the ultrasonic assisted surface rolling process on the fatigue crack initiation position distribution and fatigue life of 51CrV4 spring steel," *Materials*, Vol. 14, Page 2565, 2021, doi:10.3390/MA14102565
- [9] C. L. Zhang, L. Y. Zhou, and Y. Z. Liu, "Surface decarburization characteristics and relation between decarburized types and heating temperature of spring steel 60Si2MnA," *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, vol. 20, no. 8, pp. 720–724, 2013, doi:10.1007/s12613-013-0789-1
- [10] D. Ma, J. Shi, Z. Yan, and L. Sun, "Failure analysis of fatigue damage for fastening clips in the ballastless track of high-speed railway considering random track irregularities," *Engineering Failure Analysis*, vol. 131, no. 105897, 2022, doi:10.1007/s12613-013-0789-1
- [11] H. Wang, F. Su, Z. Wen, and C. Li, "Effects of Mn and Si on the ferrite decarburization of spring steel," *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 27, pp. 363–371, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.09.259>
- [12] N. Zhang, C. Fu, B. Jiang, L. Sun, and Y. Liu, "Failure analysis of fatigue fracture for 60Si2Mn steel fastening clip in the track of high-speed railway," *Engineering Failure Analysis*, vol. 142, no. 106757, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106757>

- [13] X. W. Wang, Q. F. Hu, C. L. Zhang, L. Chen, C. Y. Zhu, B. Tao, B. Jiang, and Y. Z. Liu, "Optimization of heat treatment for 38Si7 spring steel with excellent mechanical properties and controlled decarburization," *Materials*, vol. 15, no. 11, 2022, doi:10.3390/ma15113763
- [14] H. Kania, J. Mendala, J. Kozuba, and M. Saternus, "Development of bath chemical composition for batch hot-dip galvanizing—a review," *Materials*, vol. 13, no. 18, pp. 4168, 2020, doi:10.3390/MA13184168
- [15] M. Klekotka, K. Zielińska, A. Stankiewicz, and M. Kuciej, "Tribological and anticorrosion performance of electroplated zinc based nanocomposite coatings," *Coatings*, vol. 10, no. 6, pp. 594, 2020, doi:10.3390/coatings10060594
- [16] Q. Li, H. Lu, J. Cui, M. An, and D. Li, "Electrodeposition of nanocrystalline zinc on steel for enhanced resistance to corrosive wear," *Surface and Coatings Technology*, vol. 304, pp. 567–573, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.07.056>
- [17] I. D. Utu, R. Muntean, and I. Mitelea, "Corrosion and wear properties of Zn-based composite coatings," *Journal of Materials Engineering and Performance*, vol. 29 no. 8, pp. 5360–5365, 2020, doi: <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04995-4>
- [18] A. Mukhopadhyay, T. K. Barman, P. Sahoo, and J. P. Davim, "Comparative study of tribological behavior of electroless Ni–B, Ni–B–Mo, and Ni–B–W coatings at room and high temperatures," *Lubricants*, vol. 6, no. 3, pp. 67, 2018, doi:10.1177/1350650118755781
- [19] A. Brenner, and G. E. Riddell, "Nickel plating on steel by chemical reduction," *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, vol. 37, no. 1, pp. 31, 1946, doi:10.6028/jres.037.019
- [20] V. Vitry, and L. Bonin, "Increase of boron content in electroless nickel-boron coating by modification of plating conditions," *Surface and Coatings Technology*, vol. 311, pp. 164–171, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.01.009>
- [21] S. Pal, and V. Jayaram, "Effect of microstructure on the hardness and dry sliding behavior of electroless Ni–B coating". *Materialia*, vol. 4, pp. 47–64, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.09.004>
- [22] P. Sahoo, and S. K. Das, "Tribology of electroless nickel coatings—a review," *Materials & Design*, vol. 32, no. 4, pp. 1760–1775, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.11.013>
- [23] M. Yunacti, V. Vitry, A. Montagne, and M. H. Staia, "Replacing toxic hard chrome coatings: exploring the tribocorrosion behaviour of electroless nickel-boron coatings," *Coatings*, vol. 13, no. 12, pp. 2046, 2023, doi:10.3390/coatings13122046
- [24] V. Vitry, J. Hastir, A. Mégret, S. Yazdani, M. Yunacti, and L. Bonin, "Recent advances in electroless nickel boron coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 429, no. 127937, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127937>
- [25] V. Vitry, A. F. Kanta, and F. Delaunoy, "Mechanical and wear characterization of electroless nickel-boron coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 206, no. 7, pp. 1879–1885, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.021>
- [26] L. Bonin, and V. Vitry, "Mechanical and wear characterization of electroless nickel mono and bilayers and high boron-mid phosphorus electroless nickel duplex coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 307, pp. 957–962, 2016, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2016.10.021>
- [27] V. Vitry, and F. Delaunoy, "Nanostructured electroless nickel-boron coatings for wear resistance," *Anti-Abrasive Nanocoatings: Current and Future Applications*, pp. 157–199, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-85709-211-3.00007-8>
- [28] K. Krishnaveni, T. S. N. Sankara Narayanan, and S. K. Seshadri, "Electroless Ni–B coatings: preparation and evaluation of hardness and wear resistance," *Surface and Coatings Technology*, vol. 190, no. 1, pp. 115–121, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2004.01.038>
- [29] R. Tima, and F. Mahboubi, "Effect of plasma nitriding temperature on microstructure and wear properties of electroless nickel-boron coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 415, no. 127084, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127084>
- [30] F. Bülbül, H. Altun, V. Ezirmik, and Ö. Küçük, "Investigation of structural, tribological and corrosion properties of electroless Ni–B coating deposited on 316L stainless steel," *Journal of Engineering Tribology*, vol. 227, no. 6, pp. 629–639, 2012, doi:10.1177/1350650112464928
- [31] E. Correa, A. A. Zuleta, L. Guerra, M. A. Gómez, J. G. Castaño, F. Echeverría, H. Liu, P. Skeldon, and G. E. Thompson, "Tribological behavior of electroless Ni–B coatings on magnesium and AZ91D alloy," *Wear*, vol. 305, no. 1–2, pp. 115–123, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.06.004>
- [32] F. Madah, C. Dehghanian, and A. A. Amadeh, "Investigations on the wear mechanisms of electroless Ni–B coating during dry sliding and endurance life of the worn surfaces," *Surface and Coatings Technology*, vol. 282, pp. 6–15, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2015.09.003>

- [33] J. N. Balaraju, A. Priyadarshi, V. Kumar, N. T. Manikandanath, P. P. Kumar, and B. Ravisankar, "Hardness and wear behaviour of electroless Ni-B coatings," *Materials Science and Technology*, vol. 32, no.16, pp. 1654–1665, 2016, doi:10.1080/02670836.2015.1137683
- [34] A. Mukhopadhyay, T. K. Barman, and P. Sahoo, "Effect of operating temperature on tribological behavior of as-plated Ni-B coating deposited by electroless method," *Tribology Transactions*, vol. 61, no. 1, pp. 41–52, 2018, doi:10.1080/10402004.2016.1271929
- [35] D. Gültekin, E. Duru, and H. Akbulut, "Improved wear behaviors of lead-free electroless NiB and Ni-B/CeO₂ composite coatings," *Surface and Coatings Technology*, vol. 422, no. 127525, 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127525>
- [36] A. Bayatlı, E. F. Şahin, and M. Kocabaş, "Effect of boron carbide reinforcement on surface properties of electroless Ni-B and Ni-B-W coatings," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 305, no. 127899, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2023.127899>
- [37] R. Agrawal, L. Gupta, S. Jain, R. Sharma, and A. Mukhopadhyay, "Electroless Ni-B coating formed from a stabilizer-free double bath," *Transactions of the Indian Institute of Metals*, vol. 77, no. 4, pp. 1039-1051, 2024, doi: <https://doi.org/10.1007/s12666-023-03220-9>
- [38] H. Çuğ ve M. Dursunlar, "Termit ve yakma alın kaynağı ile birleştirilmiş R260 kalite rayın mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi", *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 14, ss. 167–179, Temmuz 2021, doi: 10.47072/demiryolu.944266

Özgeçmiş



Mustafa DURSUNLAR

Karabük Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümünde lisans ve yüksek lisans eğitimini tamamlamış olup, aynı alanda doktora eğitimine Yozgat Bozok Üniversitesinde devam etmektedir. Yozgat Bozok Üniversitesi Sorgun Meslek Yüksekokulu Ulaştırma Hizmetleri Bölümü Raylı Sistemler Makine Teknolojisi Programında öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: mustafa.dursunlar@yobu.edu.tr



Zakir TAŞ

Lisans ve yüksek lisans eğitimini Almanya'da, doktora eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesinde tamamlamıştır. Yozgat Bozok Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır.

E-Posta: zakir.tas@bozok.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Mustafa DURSUNLAR: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme. Zakir TAŞ: Kontrol, İnceleme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Yüksek Hızlı Tren İşletmeciliği Esnasında Yapılan Bildirimlerin Kaza Sınıflandırmaları ve Heinrich Kaza Piramidi ile Karşılaştırılması

Sultan GÜNDÜZ^{*}, Ömür AKBAYIR

Eskişehir Teknik Üniversitesi, LEE, Raylı Sistem Mühendisliği ABD, Eskişehir, Türkiye

**sltngndz@gmail.com*

(Alınış/Received: 04.07.2024, Kabul/Accepted: 14.07.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Emniyetin sürekliliğinin sağlanması ve kazaların önlenmesi için seneler içerisinde kaza nedensellik modelleri ve metotları oluşturularak, kaza verilerinin tutulması ile kazaların önüne geçilmesi için kaza piramidi, domino teorisi, İsviçre peyniri modeli, papyon modeli gibi yaklaşımlar geliştirilmiştir. Çalışmada 2009-2020 yılları arasında yüksek hızlı tren işletmeciliği esnasında yapılan bildirimlerin veri analizi yapılarak, bildirimler kaza inceleme ve raporlama yönergeleri kapsamında kaza ve kaza öncülleri olarak hasar durumunu da içerecek şekilde sınıflandırılmıştır. Kaza ve kaza öncüllerinin hasar bilgileri ile yıllara dağılımlarının frekans analizi yapılmıştır. Son olarak veriler kullanılarak Heinrich kaza piramidine göre bir uyarılma yapılmıştır.

Anahtar kelimeler: Emniyet, Kazalar ve kaza öncülleri, Yüksek hızlı tren işletmeciliği, Heinrich kaza piramidi, Veri analizi

Accident Classifications of Notifications Made During High Speed Train Operation and Comparison with Heinrich's Accident Pyramid

Abstract: Accident causality models and methods have been developed over the years to ensure the continuity of safety and prevent accidents. By maintaining accident data, approaches such as the accident pyramid, domino theory, Swiss cheese model, and bow-tie model have been established to prevent accidents. In the study, a data analysis of reports made during high-speed train operations between 2009 and 2020 was conducted, and the reports were classified according to accident investigation and reporting guidelines, including the damage status, as accidents and accident precursors. Frequency analyses of the damage information of accidents and accident precursors were performed with their annual distributions. Finally, using the data, an adaptation was made according to Heinrich's accident pyramid.

Keywords: Safety, Accidents and accident precursors, High-speed train operation, Heinrich's accident pyramid, Data analysis

1. Giriş

Türkiye'de demiryolu ağları gelişmeye ve büyümeye devam ederken yüksek hızlı tren işletmeciliğine geçiş ile tren hızları 200-250 km/s seviyelerine kadar atmıştır. Demiryolu ağlarının genişlemesi, tren hızlarının ve işletme yoğunluğunun artması emniyet yönetim sistemi programlarına olan ihtiyacı ortaya çıkarmıştır.

Avrupa'da uygulanmakta olan direktifler kapsamında Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı uhdesinde "Demiryolu Emniyet Yönetmeliği" 2015 yılında Resmî Gazetede yayımlanmıştır. 2019 yılında ise "Demiryolu Kazalarını ve Olaylarını Araştırma ve İnceleme Yönetmeliği" yürürlüğe girmiştir. Kurumlar içinde emniyet kültürünün yaygınlaştırılması üzerine yapılan çalışmaların yanı sıra 2019 yılı sonrasında kazaların incelenmesi ve raporlanmasına da önem verilmiştir. Demiryollarında meydana gelen kaza öncüsü niteliği taşıyan hatalar, arızalar, ramak kala olaylar, kaza incelemeleri, kaza raporları büyük maddi hasarlı ve ölümlü kazaların önlenmesi için iyileştirmeler yapılabilmesine olanak sağlayacaktır. Bu sebeple sahadan gelecek bildirimlerin

Atıf için/Cite as: S. Gündüz, Ö. Akbayır, "Yüksek hızlı tren işletmeciliği esnasında yapılan bildirimlerin kaza sınıflandırmaları ve Heinrich Kaza Piramidi ile karşılaştırılması," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 79-96, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1510410

sürekli tutulması, emniyet yönetim sistemine girdi sağlaması ve çalışanların emniyet kültürü bilinci içerisinde hareket etmeleri oldukça önemlidir.

Kazaların nedenlerini ve nasıl meydana geldiklerini anlamak için kullanılan teorik çerçeveler kaza nedensellik modelleridir. Kaza nedensellik modellerinden biri olan ve 1931 senesinde ilk olarak Heinrich tarafından geliştirilen kaza piramidi teorisi, daha düşük şiddetteki olayların sayısının en aza indirilmesinin, kazalar da dahil olmak üzere yüksek şiddetteki olayların sayısının azaltılmasına yol açtığını ileri sürmektedir [1].

Kyriakidis ve arkadaşları [2], kaza piramidi teorisini demiryolu emniyetinin kaza öncüsü izleme programını iyileştirmek için emniyet olgunluk modeli önerisi geliştirmek üzere bir çalışma yapmışlardır. Golovina ve arkadaşları [3], inşaat emniyeti ile ilgili önleyici tehlike tanıma ve kontrol süreci için bu kaza piramidi teorisine dayalı bir algoritma tasarlamışlardır. Marshall ve arkadaşları [4], iş kazalarında Heinrich'in teorisini doğrulamak için istatistiksel yöntemlere başvurmuşlardır. Endüstriyel süreç analizinde, Prem ve arkadaşları [5], kimya endüstrisi kazalarının tarihsel veri tabanlarına dayalı emniyet piramitleri oluşturmuş ve bunları Heinrich'in piramidi ile karşılaştırarak olay meydana gelme eğilimlerini anlamışlardır. Özellikle havacılık sektöründe, Walker [6], kara kutularda kaydedilen verilere dayalı olarak olaylar, kazalar ve ciddi olaylar arasında niceliksel bir ilişki kurarak uçuş verileri izleme sistemini iyileştirmek amacıyla bir risk piramidi oluşturmuştur. Majumdar ve arkadaşları [7], Yeni Zelanda ve Birleşik Krallık hava sahalarında kaydedilen ayrılma kaybı (LOS- Loss of Separation) olaylarının verilerini kullanarak emniyet göstergeleri geliştirmek için kaza piramidi teorisini doğrudan uygulamışlardır. Heinrich'in piramidinde düşünülen niceliksel ilişkiden farklı olarak, Nazeri ve Lance [8], kazalar ve olaylar arasındaki ilişkiyi niteliksel faktörler üzerinden incelemiştir. Uçak olay verilerinin kaza verileriyle bağlantılı olarak bütünsel bir analizini yapmak için veri madenciliği tekniğini kullanmışlardır. Önceki çalışmalarında, ciddi olay verilerini çıkararak ve Bayes Ağı (BN) inşası için bir dizi adımı takip ederek bu tür kazalara katkıda bulunan etkili nedenlerin senaryolarını araştıran, Arnaldo ve arkadaşları [9, 10] hava trafik yönetiminde meydana gelen farklı şiddetteki olay raporlarını inceleyerek bu teorisinin uygulanabilirliğini tespit edip, bu teoriyi niteliksel bir perspektiften analiz etmişlerdir.

Literatür taramasında; kaza öncüsü verileri kullanılarak yapılan kazaların önlenmesi için önerilen metotlarla ilgili çalışmaların metro işletmeciliği, havacılık işletmeciliği ve sağlık alanlarında yapıldığı görülmüştür. Fidan ve Akbayır [11], hızlı tren işletmeciliği hata bildirimlerinin kelime bulutu analizi ile gruplanması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Fakat yüksek hızlı tren işletmeciliği kapsamında kaza önleme önerileri ve emniyet değerlendirmeleri hakkında Heinrich kaza piramidi ile karşılaştırma yapan bir çalışmaya ulaşamamıştır.

Bu çalışmanın amacı; 2009-2020 tarihleri arasında yüksek hızlı tren işletmeciliği esnasında yapılan bildirimleri kaza öncüleri, ramak kala olaylar, kazaları ve iş kazaları olarak hasar durumlarını da içerecek şekilde sınıflandırmaktır. Ramak kala olayların, kazaların ve iş kazalarının frekansları analiz edilerek Heinrich piramidi ile karşılaştırması yapılarak emniyet yönetim sistemi programlarına girdi sağlanabilmesi amaçlanmaktadır.

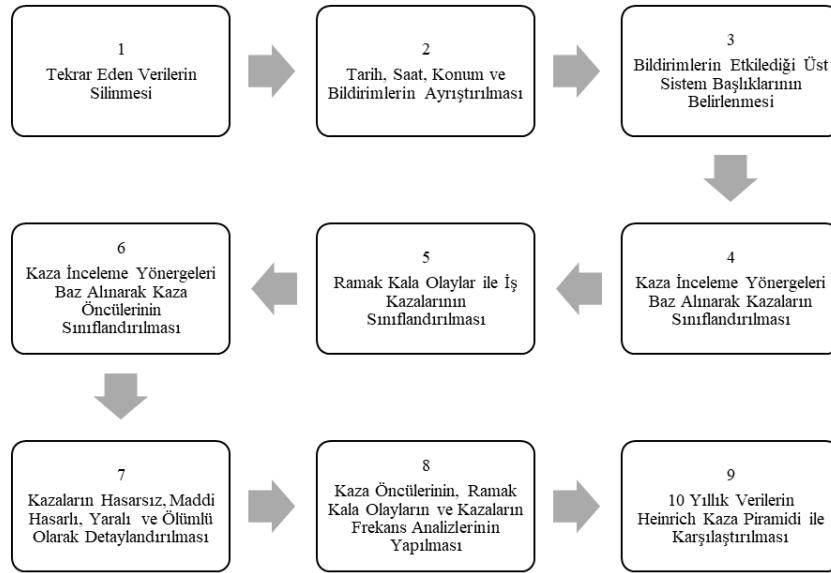
2. Metot

Hızlı ve konforlu ulaşımın artan talepler doğrultusunda demiryollarının gelişmesi ile yüksek hızlı tren işletmeciliğinin önem kazanmasıyla, serbestleşmenin de denklemeye dahil olmasıyla demiryollarında Emniyet Yönetim Sistemi uygulamalarının başlatılması kaçınılmaz olmuştur. Avrupa Birliği'nin ardından Türkiye'de de Emniyet Yönetim Sistemleri Resmî Gazete 'de yayınlanan yönetmelikler ile 2015 yılında zorunlu hale gelmiştir.

Emniyet yönetim sistemlerinin dayandırıldığı temeller arasında bulunan risklerin izlenmesi, emniyetin devamlılığının sağlanması ve emniyetle ilgili bilgilerin geri bildirimlerinin sürekli yapılması önem arz etmektedir. Son 20 yıldır kaza öncülerinin kullanılarak, kazaların önlenmesine yönelik yapılan çalışmalar ağırlık kazanmıştır.

Çalışmanın konusu verilerin erişimi serbest olup elden temin edilmiştir. Bu veriler; Ankara-Eskişehir Yüksek Hızlı Tren hattının açılması ile, 2009-2020 yılları arasında tarih, saat, konum içerecek şekilde yüksek hızlı tren işletmeciliği esnasında yapılan bildirimlerdir. Yapılan bildirimler serbest metin olarak yazılmış 11000 satırdan oluşmaktadır. Karmaşık şekilde iletilen ve tekrar eden bildirimleri içeren veriler Şekil 1’de gösterildiği sıralama ile işlenmiştir.

Ön işlemede tekrar eden veriler silinmiştir. Verilerin analiz edilebilmesi için tarih, saat ve konum bilgileri ayrıştırılarak düzenlenmiştir. Yapılan bildirimlerin tepede hangi sistemi ve olayı ilgilendirdiğine bakılarak sınıflandırma yapılmıştır. Sonrasında kaza inceleme yönergelerindeki bilgiler dikkate alınarak kazalar ve kaza öncüleri sınıflandırılmıştır. İş kazası kapsamında değerlendirilecek çalışmalara değinilerek, son dakikada önlenen kazalar ramak kala olarak belirtilmiştir.



Şekil 1. Verilerin işlenme adımları

Verilerin ön işlemlerinin tamamlanması ile kaza bildirimlerinin maddi hasarlı veya hasarsız bir şekilde sonuçlanması kategorize edilmiştir. Yaralanmalı ve ölümlü kazalar da kategorize edilmiştir. Kazaların nasıl sonuçlandığının milyon tren km cinsinden frekansı analiz edilerek, çerçevesinde analiz edilmiştir.

Kaza, ve ramak kala olayların yıllar bazında sıklığı ve milyon tren km cinsinden frekansı analiz edilmiştir.

Son olarak elde edilen bulgular, Heinrich piramidi ile orantılanarak karşılaştırılıp, kaza piramidi teorisinin yüksek hızlı tren işletmeciliği kapsamında nasıl yorumlanabileceğine değinilmiştir.

3. Bulgular

2009-2020 yılları arasında yüksek hızlı tren işletmeciliği esnasında yapılan kaza, iş kazası ve ramak kala bildirimlerin veri analizi işleme adımlarının detayları ve her aşamadaki bulguların çıktıkları bu başlık altında verilmiştir.

3.1. Tekrar eden verilerin silinmesi

Veri setinin içerisinde aynı tarihlerde birkaç kere yazılmış tekrar eden bildirimler silinmiştir. 11.000 satırlık veriden arda kalan yaklaşık 7000 satır veri analizinin kapsamını oluşturacaktır. Bildirimi yapılan olayların içerisinde yer alan tekrar eden ve verilerin işlenmesini zorlaştıran noktalamaya işaretleri silinerek veriler sadeleştirilmiştir.

3.2. Tarih, saat, konum ve bildirimlerin ayrıştırılması

Veri setinde aynı satırda bulunan olaylar analizlerinin kolay yapılabilmesi adına farklı satırlara ayrıştırılmıştır. Tarihler, saatler, konumlar ve bildirimi yapılan olaylar ayrı ayrı satırlara taşınmıştır.

3.3. Bildirimlerin etkilediği üst sistem başlıklarının belirlenmesi

Demiryolları; altyapı, üstyapı, elektrifikasyon, sinyalizasyon, işletmecilik alanlarının ve demiryolu araçlarının bütününden oluşan multidisipliner bir alandır. Veri seti kapsamında bildirilen olaylar tüm bu disiplinlerle ilgili olup, çevresel koşullardan doğan etkileri de kapsamaktadır. Bu sebeple verilerin anlaşılabilmesi ve detaylı yorumlanabilmesi adına bildirimler öncelikle üst sistem, üst olay ve çevre bazında Tablo 1'deki gibi sınıflandırılmıştır.

Tablo 1. Bildirilen olayların üst sistem, üst olay ve çevre sınıflandırılması

Üst Sistem, Üst Olay ve Çevre Sınıflar	Açıklama
Araç	Yüksek hızlı tren setlerinde, bakım araçlarında ve kılavuz trenlerde ortaya çıkan arıza ve hatalar kapsamında yapılan bildirimler Araç başlığı altında detaylı olarak sınıflandırılmıştır.
Çarpışma	Kişilerin yaralanması, demiryolu araçlarının ve hattın zarar görmesi ile sonuçlanan çarpışma kazaları Çarpışma başlığı altında kategorize edilmiştir.
Deray	Demiryolu araçlarının raydan çıkması ile sonuçlanan kazalar Deray başlığı altına eklenmiştir.
Doğa Olayları	Kötü hava koşulları, seller, teressübat birikimleri, kar yağışları, doğal gaz boru patlamaları ve miting gibi dış etken olarak değerlendirilebilecek işletmeciliği aksatan bildirimler Doğa Olayları başlığı altında sınıflandırılmıştır.
Enerji Sistemi	Operasyonu etkileyen ve gecikmelere sebep olan elektrifikasyon sistemlerinde katener ve şebeke enerjileri kaynaklı yaşanan arızalar Enerji Sistemi başlığı altında detaylandırılmıştır.
İhbar	Hatta izinsiz girişler, hattaki izinsiz çalışmalar, hattın içinde bulunan engeller ve bu gibi olaylar kapsamında yapılan bildirimler İhbar başlığı altında sınıflandırılmıştır.
Operasyon	İşletmecilik esnasında alınan operasyonel kararlar, yolcu kaynaklı duruşlar ile gecikmelere sebep olan bildirimler Operasyon başlığı altında detaylandırılmıştır.
Sinyalizasyon Sistemi-Anklaşman	Sinyalizasyon sistemi kapsamında trenlerin emniyetli bir şekilde işletilmesini sağlayan; sinyal, makas, ray devresi, kumanda kontrol merkezi gibi alt sistemleri ile arayüzü olan anlaşılan sistemde meydana gelen hatalar, arızalar Sinyalizasyon Sistemi-Anklaşman başlığı altında sınıflandırılmıştır.
Sinyalizasyon Sistemi-ATS	Sinyalizasyon sistemi trenlerin kırmızı sinyalleri ihlal etmemesi için bir koruma sistemi olan ulusal Otomatik Tren Durdurma sisteminde meydana gelen hatalar ve arızalar bu başlık altında sınıflandırılmıştır.
Sinyalizasyon Sistemi-ERTMS	Sinyalizasyon sistemi kapsamında trenlerin emniyetli bir şekilde işletilmesini güvence altına alan anlaşılan sistemi ile arayüzü bulunan Otomatik Tren Koruma sistemleri kapsamında meydana gelen hatalar ve arızalar Sinyalizasyon Sistemi-ERTMS/ETCS başlığı altında sınıflandırılmıştır.
Sinyalizasyon Sistemi-Saha Ekipmanları	Sahada bulunan sinyalizasyon sistemi ekipmanlarının (makas motoru, LED sinyal, ray devresi, sinyalizasyon kabloları) hasarı sonucunda işletmenin aksamasına sebep olan olaylar Sinyalizasyon Sistemleri-Saha başlığı altında sınıflandırılmıştır.

Üst Sistem, Üst Olay ve Çevre Sınıflar	Açıklama
Şahıs Kazaları	Hareketli demiryolu aracı sebebiyle, yolcuların ve 3. kişilerin yaralanması ile sonuçlanan kazalar bu başlık altında toplanmıştır.
Vandalizm	3. kişiler tarafından sistemlerin, hattın, işletmeciliğin hasar alması için yapılan sabotaj girişimleri çevre etkisine sahip olsa dahi Vandalizm başlığı altında sınıflandırılmıştır
Yangın	Vagonlardaki dumanlanmalar, hattaki ve araçtaki yangın ihbarları ile yangın vakaları Yangın başlığı altında sınıflandırılmıştır.
Yol	Altyapı ve üstyapıda meydana gelen yol bozuklukları kapsamında yapılan bildirimler Yol başlığı altında sınıflandırılmıştır.

3.4. Kaza inceleme yönergeleri baz alınarak kazaların sınıflandırılması

Kaza öncüleri; kazaya sebep olma potansiyeli olan, istenmeyen, beklenmedik, demiryolu sisteminin işleyişini ve/veya emniyetini etkileyen, kaza tanımı dışında kalan durumlardır. TCDD ve TCDD Taşımacılık A.Ş taraflarınca yayınlanan Kaza İnceleme Yönergeleri [12, 13] baz alınarak ölüm, yaralanma, maddi hasar ile sonuçlanan görünür hasara sebep olmayıp işletmenin gecikmesine sebep olan bildirimler kaza olarak sınıflandırılmıştır. Tablo 2’de kazalar görülebilir.

Tablo 2. Kaza olarak sınıflandırılan bildirimler

Kaza	Açıklama
Çarpışma	Gabaride Bulunan Bir Engel ile Çarpışma Kaçan Vagon Çarpışması Karambol Tren-İş Otosu Çarpışması Tren-Karayolu Aracı Çarpışması Tren-Trene Çarpışma
Deray	Aracın Raydan Çıkması Makas Tanzimi Yapılamaması Ters Makastan Çıkma Yük Treninin Raydan Çıkması
Hemzemin Geçit Kazaları	Tren-Karayolu aracı çarpışması (Geçitte) Tren-Yaya çarpışması (Geçitte) Tren-Geçici nesne çarpışması (Geçitte)
Şahıs Kazaları	Hareketli demiryolu aracı nedeniyle kişilerin maruz kaldığı kaza Platformdan Yolcu Düşmesi Şahısın Katener Enerjisine Kapılması Vatandaşın Katenere Kapılması
Demiryolu Aracındaki Yangın	Seyir halindeki araçta yangın Seyirde yüklü eşyada yangın Park etmiş araçlarda yangın (Sevk için bekleyen)
Diğer Kazalar	Seyir halindeki araçta yangın Seyirde yüklü eşyada yangın Park etmiş araçlarda yangın (Sevk için bekleyen)

Yüksek hızlı tren hatlarında hemzemin geçit bulunmadığı için bildirilen bir hemzemin geçit kazası bulunmamakla beraber demiryolu aracında yangın ve diğer kazalar olarak sınıflandırılan kazalarda verilerde bulunmamaktadır.

3.5. Ramak kala olaylar ile iş kazalarının sınıflandırılması

Son dakikada engellenerek, ıskalanan, ölüm ve hasar ile sonuçlanmayan bildirimler Ramak Kala olarak sınıflandırılmıştır. Tablo 3’te veri seti içerisinde veri setindeki Ramak Kala olaylar belirtilmiş ve açıklamaları yapılmıştır. Ramak kala olayların her biri aynı zamanda bir kaza öncüsü niteliğindedir.

Tablo 3. Ramak kala olaylar

Ramak Kala	Açıklama
Ters Makastan Çıkma	Ters makastan çıkan bir tren ile karşıdan gelen trenin kafa kafaya çarpışması trafik kontrolünün farkındalığı sayesinde engellenmiştir.
Meşguliyetin Kaybolması ve Sinyalin Yeşil/Sarı Yanması	Bir trenin bloğa girmesinin ardından meşguliyetin kaybolması ve arkadan gelen trene sinyalin sarı bildiri vermesi ile trenlerin çarpışması trafik kontrolünün farkındalığı sayesinde engellenmiştir.
Gabaride Bulunan Bir Engel ile Çarpışma	Makinistlerin gabaride bulunan engelleri fark etmesi üzerine fren yaparak durmaları ile çarpışmalar önlenmiştir.

Ramak Kala	Açıklama
İhata Hattına İzinsiz Girişler/Çalışmalar	İhata hattına izinsiz giren kişilerin, ihata hattında izinsiz ve uygunsuz yapılan çalışma yapan kişilerin makinistler tarafından fark edilmesi ile fren yapmaları sonucu ölümlü kazaların yaşanması ihtimali önlenmiştir.
İhata Hattında Cisim Olması	İhata hattında bulunan cisimlerin makinist tarafından fark edilmesi durulması ile maddi hasarların önüne geçilmiştir.
İntihar	Makinistin intihar teşebbüsünde bulunacak bir şahsı fark etmesi üzerine durması ile ölümlü bir kazanın önüne geçilmiştir.
Trenlerin Kafa Kafaya Çarpışması	Kırmızı sinyal bildirisine uyulmaması sebebi ile makasta iki tren karşılaşmıştır, fakat durabildikleri için trenlerin kafa kafaya çarpışması önlenmiştir.
Vagon Kaçması	Makinistin başboş kaçan bir vagon bildirmesi üzerine emniyetli durum sağlanana kadar işletme düzenlenmiş ve olası bir kazanın önüne geçilmiştir.

Kaza yönergeleri kapsamına iş kazaları dahil edilmemektedir, fakat farkındalık yaratması açısından veri setindeki iş kazaları da Tablo 4'te görüldüğü gibi sınıflandırılmıştır. 10 yıl içerisinde 1'i ölümlü, 7'si yaralanmalı toplamda 8 iş kazası meydana gelmiştir.

Tablo 4. İş kazaları

İş Kazaları
Bakım Aracından Düşme
Belirlenemeyen Kaza
İskele Çökmesi
İşçinin Katenere Kapılması
Makine ve Vagon Bağlanması Sırasında Parmak Sıkışması
Servis Personelinin Yaralanması

3.6. Kaza inceleme yönergeleri baz alınarak kaza öncülerinin sınıflandırılması

TCDD ve TCDD Taşımacılık A.Ş taraflarınca yayınlanan Kaza İnceleme Yönergeleri [12, 13] kapsamında belirtilen kaza öncüleri göz önünde bulundurularak bildirimlerde kaza öncüsü özelliği taşıyanlar sınıflandırılmıştır. Kaza öncüleri sınıflandırılırken kritik ve emniyetle alakalı olan durumlar kaza yönergeleri baz alınsa da gelecekte yapılacak çalışmalarda literatürü desteklemek için daha detaylı bir şekilde verilmiştir. İş kazaları ve vandalizm bildirimleri kaza inceleme mevzuatının konusu olmadığından kaza öncüsü olarak değerlendirilmemiştir.

1. İlk adımda TCDD Taşımacılık A.Ş Kaza İnceleme Yönergesi ekinde yer alan kaza öncülleri dikkate alınarak; aracın tekerlek takımında, gövdesinde, fren sisteminde herhangi bir hasar olmasının kazalara öncülük edebileceği değerlendirilerek Araç kategorisi altında kaza öncüleri belirlenmiştir. Tablo 5'te ilgili kaza öncüleri görülebilir.

Tablo 5. Araç kategorisindeki kaza öncüleri

Araç Kategorisindeki Kaza Öncüleri	
Aks Arızası	Hız Sensörü Arızası
Aks Bloke Arızası	İvmelenme Arızası
Ana Depo Arızası	Kapı Arızası
Apleti	Kompresör Arızası
Araçtan Sarkan Parçalar	Kondüvit Hattı Arızası
BCU Arızası	Kumlama Butonu Takılı Kalması
Boden Aşınması	Pantograf Düşmesi/Arızalanması
Boji Arızası	Pantograf Kırılması
Boji Hava Yastığı Patlaması	Pantograf Patlama
Boji İzleme Hatası	Set Altında Buzlanma
Boji Sıcaklık İhbarı	Set DJ Tutmaması/Arızası
Bojide Aşırı Titreme	Süspansiyon Arıza İhbarı
Cam Kırılması	Şaft Çözme Arızası
Dingil Sıcaklık İhbarı	Tekerlek Kilitleme Arızası
Dingil Yanması	Totman Arızası
Dişli Kutusu Aşırı Isınma	Tünel Geçişleri Aşırı Basınç
Dişli Kutusu Dumanlanması	Vagon Aks Kilitleme
Fren Arızası	Vagon Arası Körüklerin Açık Olması
Fren Havası Üretememe	Vagonun Amortisörünün Patlaması
Hız Denetim Arızası	Veri Yolu Vagon İletişim Sisteminde Arıza

Araç Kategorisindeki Kaza Öncüleri
Hız Göstergesi Arızası

2. TCDD Kaza İnceleme Yönergesi kapsamında tariflenen önlem alınmaması durumunda kazalara öncülük edebilecek sel, kar yağışı gibi bildirimler Doğa Olayları kategorisinde Tablo 6'da kaza öncülü olarak belirtilmiştir. Aşırı yağış, sel ve altyapının zarar görmesinin ardından yaşanan kazalar öncesinde meydana gelmiştir.

Tablo 6. Doğa olayları kategorisindeki kaza öncüleri

Çevre Koşulları Kategorisindeki Kaza Öncüleri
Aşırı Yağış
Buz Sarkması/Buzlanma
Doğalgaz Borusu Patlaması
Fırtına
Kar Yağışı
Kar Yağışı Nedeniyle Makasın Tanzim Edilememesi
Katener Direğinin Altının Su Sebebi ile Oyulması
Kötü Hava Şartları
Sel ve Teressubat
Yıldırım Düşmesi
Yoğun Sis

3. Katenerlerde ark oluşması ve tel kopmaları sarkmaları yüksek voltajlar sebebi ile kaza öncülü olma niteliği taşımaktadır. Enerji Sistemi altında sınıflandırılan kaza öncüleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Enerji sistemi kategorisindeki kaza öncüleri

Enerji Sistemi Kategorisindeki Kaza Öncüleri
Faz Çakışması
Gerilim Trafosunun Patlaması
Katener Sisteminde Ark
Katener Teli Sarkması/Kopması
Katenerin Yabancı Cisim Kaynaklı Zarar Görmesi
Portör Telinde Patlama
Trafo Arızası

4. Kazaların önlenmesinde en büyük katkısı olan ihbarları da kaza öncülü olarak değerlendirebiliriz. Bilginin doğru zamanda iletilmesi ile birçok kazanın önünde geçilmiştir. İhbar başlığı altında kaza öncüsü olarak nitelendirilen bildirimler Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. İhbar kategorisindeki kaza öncüleri

İhbar Kategorisindeki Kaza Öncüleri
Aracın İzni Olmayan Hattan Seyri
Hatta Emniyetsiz Araç Parkı
Hemzemin Geçitte Araç Kılması
İhata Hattına İzinsiz Girişler/Çalışmalar
İhata Hattına Karayolu Aracı Girmesi
İhata Hattına Sondaj Aracı Devrilmesi
İhata Hattında Cisim Olması
İzinsiz Sisteme Reset Atılması
Peronda Sarı Çizgiyi Yolcuların İhlal Etmesi
Şüpheli Cisim İhbarı
Teknik Binada Patlama
Tramvay Geçitte Tramvay Kılması
Vagonların Ayrılmak Üzere Olması

5. Sinyalizasyon sistemlerinin önemli bileşenlerinden biri olan anlaşılan sistemi, trenlerin emniyetli hareket edebilmesi için saha ekipmanları olan makas motorlarının, ray devrelerinin ve sinyallerin emniyetli bir şekilde kilitlenmesini sağlar. Hattın serbest olması durumunu değerlendirerek trenlere hareket yetkisinin emniyetli bir şekilde ulaşmasını sağlar. Anlaşılan sistemleri emniyetli bir yapıya sahip olsalar dahi, anlaşılan sisteminde de hatalar ve arızalar

meydana gelmektedir. Hata ve arıza durumunda anlaşılan sistemlerinden beklenen hatada emniyetli (fail-safe) duruma geçmesidir. Fakat sistemin hatada emniyetli duruma geçmediği zamanlarda görülmüştür, geçse bile trenlerin sevki kırmızı geçiş izni, bölge zaman izni gibi trafik kontrolörü ve makinist arasındaki haberleşme ile sağlanmaktadır. Böyle durumlarda birkaç olayın üst üste gelmesi, anlaşılan sisteminin yokluğu ve devre dışı olması kaza öncüsü olarak değerlendirilmiştir. Anlaşılan Sistemleri başlığı altında kaza öncüsü olarak nitelendirilen bildirimler Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Sinyalizasyon sistemi-anlaşılan kategorisindeki kaza öncüleri

<u>Sinyalizasyon Sistemi-Anlaşılan Kategorisindeki Kaza Öncüleri</u>
Anlaşılanın Devre Dışı Kalması
Haberleşme Arızası
Hattın İmha olması
İM Kartı Arızası /Değişimi
Kart Arızası
Kumanda Merkezi Düzenleme Yapılmaması
Lokal Masa Arızası
Makas Arızası
Makas Mutabakat Kaybı/Arızası
Meşguliyetin Kaybolması ve Sinyalin Yeşil/Sarı Yanması
OM Arızası
OS Arızası
Sinyal Arızası
Sinyal Renk Bildirim Arızası
Sinyal Stabilizatörünün Arızalanması
Sistem Arızası

6. Sinyalizasyon sisteminin bileşeni olan Otomatik Tren Durdurma (ATS) sistemi yerli bir çözüm olup, yapısı tamamen emniyetli değildir. Amacı, trenlerin kırmızı sinyali geçmesi durumunda treni durdurma. Fakat ATS sistemi makinistin sistemi izole ederek seyre devam etmesine izin vermektedir. Bu işletmenin aksaması için sinyalin ihlal edilmesi, trafik kontrolü ve makinistin haberleşmesi ile kırmızı geçiş izinlerinin verilmesi gibi durumları ortaya çıkarır. ATS sisteminin yokluğu ve ihlali de kaza öncüsü olarak değerlendirilmiştir. ATS Sistemi başlığı altında kaza öncüsü olarak nitelendirilen bildirimler Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. Sinyalizasyon sistemi-ATS kategorisindeki kaza öncüleri

<u>Sinyalizasyon Sistemi-ATS Kategorisindeki Kaza Öncüleri</u>
ATS Arızası

7. Sinyalizasyon sisteminin bileşeni olan Avrupa Demiryolu Trafik Yönetim Sistemleri (ERTMS) anlaşılan sistemi ile trenlerin emniyetli bir şekilde hareket edebilmesi için geliştirilmiş, Avrupa Tren Koruma Sistemi (ETCS) ve GSM-R sistemlerinin birleşimidir. Otomatik Tren Koruma (ATP) sistemini bünyesinde barındıran ERTMS sistemleri araç üstü bilgisayarlar ve hat boyu ekipmanlarının haberleşmesi ile anlaşılandan gelen hareket yetkisi doğrultusunda emniyetli bir trafik yönetimi sağlar. Hatalar ve arızalar doğrultusunda ERTMS sistemlerinin izole edilmesi ve bu sistemlerin kullanılmaz duruma gelmesi gibi durumlar kaza öncüsü olarak değerlendirilmiştir. ERTMS Sistemi başlığı altında kaza öncüsü olarak nitelendirilen bildirimler Tablo 11’de verilmiştir.

Tablo 11. Sinyalizasyon sistemi-ERTMS kategorisindeki kaza öncüleri

<u>Sinyalizasyon Sistemi-ERTMS Kategorisindeki Kaza Öncüleri</u>
Araçüstü Bilgisayar Arızası
ATP Arızası
Çelişkili İşaretler
EB (Acil Fren) Arızası
Eurocabin Arızası
LEU Arızası
Mod Geçiş Yapılmaması
Odometre Arızası
RBC Bağlantısı Kopması

Sinyalizasyon Sistemi-ERTMS Kategorisindeki Kaza Öncüleri
RBC Hatası
Seviye Geçişi Yapılamaması

8. Sinyalizasyon sisteminin önemli bileşenlerini barındıran saha ekipmanlarının zarar görmesi durumunda tren trafiğinin emniyetli bir şekilde sağlanması riske girmektedir. Hasarlı emniyet kritik saha ekipmanları ile alakalı kaza öncüsü niteliğindeki bildirimler Saha Ekipmanları başlığı altında Tablo 12’de detaylandırılmıştır.

Tablo 12. Sinyalizasyon sistemi-saha ekipmanları kategorisindeki kaza öncüleri

Sinyalizasyon Sistemi-Saha Ekipmanları Kategorisindeki Kaza Öncüleri
Makas Cebire ve Gergi Çubuğunda Kırılma
Makasın ve Makas Motorunun Zarar Görmesi
Sinyal LED Arızası
Sinyal Trafo Arızası
Sinyalin Zarar Görmesi

9. Yangınlar her zaman tehlikeli durumları ortaya çıkarmakla beraber kaza öncüsü olarak değerlendirilir ve önlem gerektirir. Yangın başlığı altında kaza öncüsü olarak nitelendirilen bildirimler Tablo 13’te verilmiştir.

Tablo 13. Yangın kategorisindeki kaza öncüleri

Yangın Kategorisindeki Kaza Öncüleri
Ot Yangını
Trafoda Yangın Çıkması
Vagonda Dumanlanma-Yangın İhbarı
Yangın
Yangın İhbarı

10. Altyapı ve üstyapı olarak yollarda meydana gelen bozukluklar fark edilmediği ve ihmal edildiği takdirde ciddi kazalara sebebiyet verecektir. Tablo 14’te Yol başlığı altındaki kaza öncüleri listelenmiştir.

Tablo 14. Yol kategorisindeki kaza öncüleri

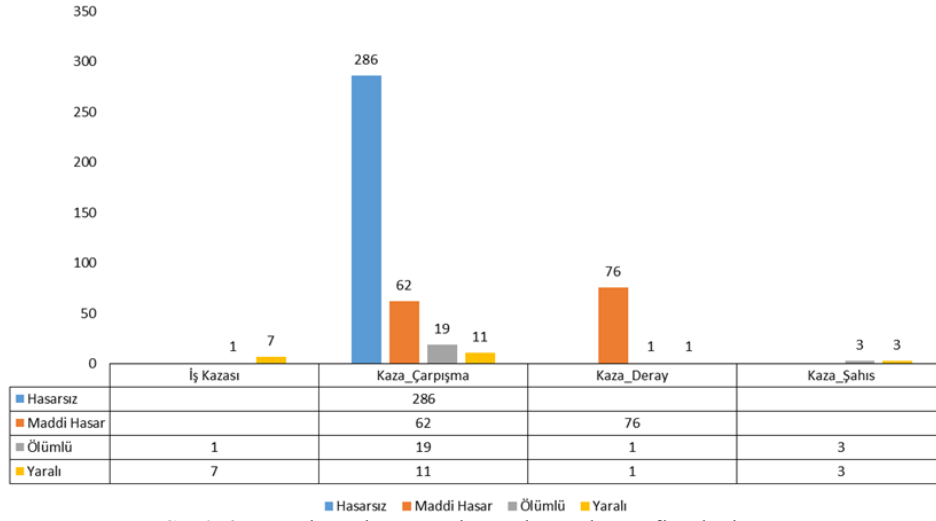
Yol Kategorisindeki Kaza Öncüleri
Alüminotermit Kaynağı Kırılması
Alt Geçit Yıkılması
Alt Geçitten Parça Dökülmesi
Hat Burulmaları ve Hattaki Diğer Bozulmalar
Hatta Taş Parçaları Düşmesi
İç Rayda Çökme
Kırık Ray
İstinat Duvarının Yıkılması
Makasta Parça Kırığı
Ray Kaynağının Akması
Ray Kesilmesi
Rayın Dirsek Yapması
Yarmada Çökme
Yol Çökmesi

3.7. Kazaların hasarsız, maddi hasarlı, yaralı ve ölümlü olarak detaylandırılması

Kaza piramidi ile karşılaştırma yapılabilmesi için kazaların aşağıdaki şekilde sınıflandırılması ihtiyacı doğmuştur.

- Hasarsız; kişilerin ve demiryolu varlıklarının hasar almadığı kazalardır.
- Maddi hasarlı; demiryolu araçlarının, alt yapının, üst yapının, katener sistemlerinin veya sinyalizasyon sistemlerin zarar gördüğü kazalardır.
- Yaralanmalı; kişilerin kazadan yaralı olarak kurtulması durumudur.
- Ölümlü; kişiler için kazaların can kaybı ile sonuçlanması durumudur.

Şekil 2’de kazaların hasar ve kayıplar bazında sınıflandırılması ile frekansları görülmektedir.



Şekil 2. Kazaların hasar ve kayıp bazında sınıflandırılması

Ölüm ve yaralanma ile sonuçlanan kazaların yoğunluğunun az olduğu görülmektedir. Fakat emniyet çerçevesinde her zaman hedef kazaların ölümlü sonuçlanmasını önlemler olarak engellemektir.

Tablo 15’de kaza olaylarının hasar ve kayıplar bazında detaylandırılmış hali verilmektedir.

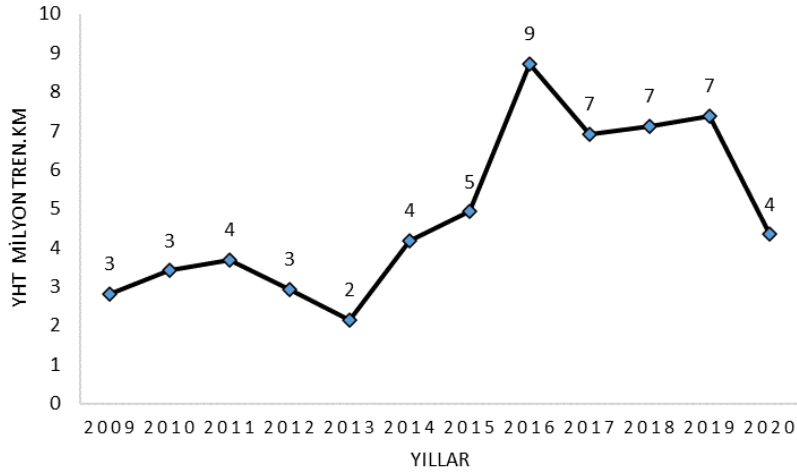
Tablo 15. Kazalar ve hasar-kayıp tablosu

Kaza	Hasarsız	Maddi Hasar	Yaralanmalı	Ölümlü
Gabaride Bulunan Bir Engel ile Çarpışma	21	11		
Karambol		1		
Tren-Karayolu Aracı Çarpışması		4		
Tren-İş Otosu Çarpışması		1		
Tren-Trene Çarpışma	1		1	1
Kaçan Vagon Çarpışması		1		
Gabaride Bulunan Bir Engel ile Çarpışma	264	45		1
Aracın Raydan Çıkması		30	1	1
Yük Treninin Raydan Çıkması		1		
Ters Makastan Çıkma		42		
Makas Tanzimi Yapılamaması		2		
Hareketli demiryolu aracı nedeniyle kişilerin maruz kaldığı kaza			12	8
Platformdan Yolcu Düşmesi				2
Şahsın Katener Enerjisine Kapılması			1	
Vatandaşın Katenere Kapılması			1	
Yolcunun Ayağının Araç ile Peron Arasına Sıkışması				1

3.8. Kaza öncülerinin, ramak kala olayların ve kazaların frekans analizlerinin yapılması

Her ülkedeki demiryolu ağı uzunluğu ve taşımacılık yoğunluğu farklı olduğu için verileri karşılaştırabilmek ve incelemek için bir ölçüye ihtiyaç vardır. Taşımada en çok kullanılan ölçü birimleri; tren.km, hamton.km, netton.km ve yolcu.km dir. Bu birimler taşıma istatistiklerinde, planlamalarında; taşıma miktarını ve trafiğini ölçmek için kullanılır [14].

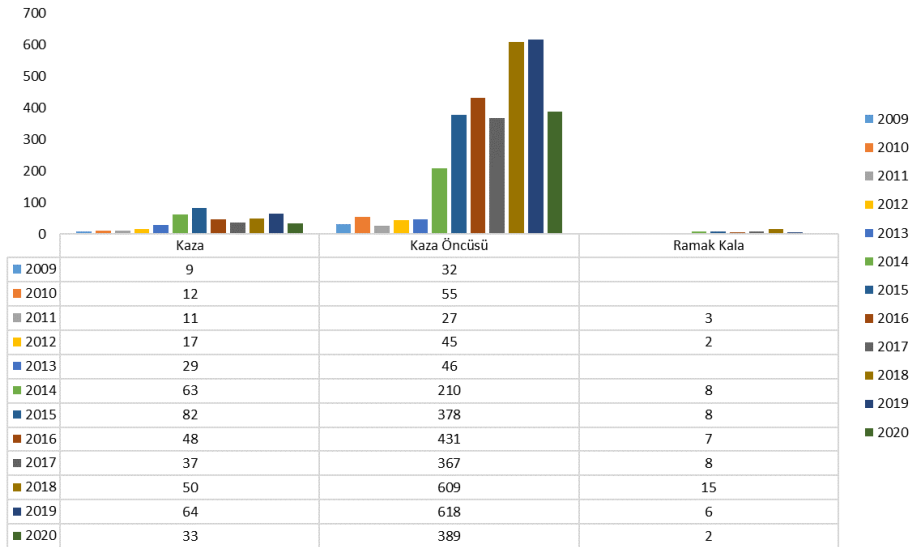
Veriler 2009-2020 yılları arasında YHT işletmeciliği esnasında meydana gelen bildirimlerden oluştuğundan; 2009-2020 İstatistik Yıllıklarından alınan milyon tren.km değerleri Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Türkiye’de yılları için 2009-2020 yılları için milyon tren.km cinsinden YHT taşıma miktarı

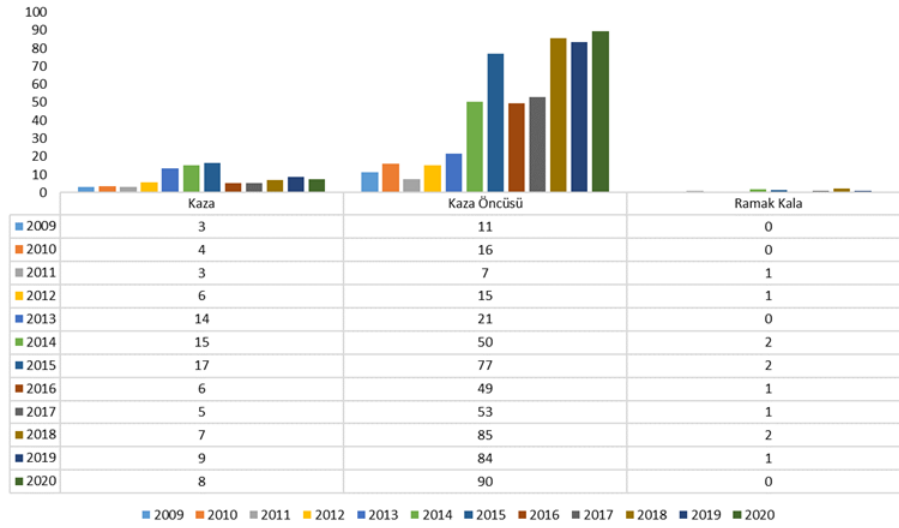
2009-2020 yılları arasındaki her yıl için kaza öncülerin, ramak kala olayların ve kazaların miktarı ile milyon tren.km cinsinden taşıma miktarı oranlanmıştır. Örneğin; 2014 yılında bildirilen kaza sayısı 63’tür. Taşıma miktarı ise 4 milyon tren.km’dir. 63’ün 4’e bölünmesi ile 15,07 değeri 2014 yılı için milyon tren.km başına kazaların miktarıdır. Milyon tren.km; bir trenin milyon kilometre işletilmesini gösteren ölçü birimidir.

Şekil 4’teki veriler, iş kazaları, kazalar, kaza öncüleri ve ramak kala durumlarının yıllara göre dağılımını göstermektedir.



Şekil 4. Kazaların, ramak kala olayların ve kaza öncülerinin yıllara göre dağılımı

Türkiye’de 2009-2020 yılları arasındaki milyon tren.km başına kaza öncülerinin, ramak kala olayların ve kazaların değişimi Şekil 5’te görülmektedir.



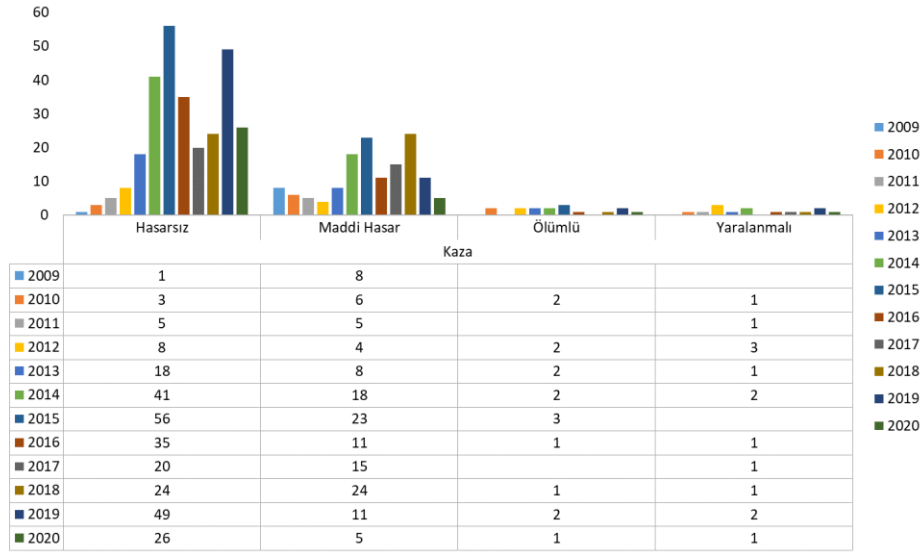
Şekil 5. Türkiye’de 2009-2020 yılları arasındaki milyon tren.km başına kaza öncülerinin, ramak kala olayların ve kazaların değişimi

2015 yılında 82, 2016 yılında 48, 2017 yılında 37, 2018 yılında 50, 2019 yılında 64 ve 2020 yılında 33 kaza meydana gelmiş. Milyon tren.km cinsinden ise; 2015 yılında 17, 2016 yılında 6, 2017 yılında 5, 2018 yılında 7, 2019 yılında 9 ve 2020 yılında 8 kaza meydana gelmiştir. 2015 yılı milyon tren.km başına en yüksek kaza sayısına sahip yıl olmuştur.

2014 yılından itibaren kaza öncüsü olaylarda belirgin bir artış görülmektedir. 2014 yılında 210, 2015 yılında 378, 2016 yılında 431, 2017 yılında 367, 2018 yılında 609, 2019 yılında 618 ve 2020 yılında 389 kaza öncüsü olay rapor edilmiştir. Milyon tren.km cinsinden ise; 2014 yılında 50, 2015 yılında 77, 2016 yılında 49, 2017 yılında 53, 2018 yılında 85, 2019 yılında 84 ve 2020 yılında 90 kaza öncüsü bildirilmiştir. 2020 yılı milyon tren.km başına en yüksek kaza öncüsü bildirilen yıl olmuştur. Kaza öncüsü sayılarının da 2014 yılı ve sonrasında artış gösterme eğilimine girdiği görülmektedir. Artışların 2014 yılı ve sonrasında görülmesinin, emniyet yönetim sistemi yönetmeliğinin demiryollarında 2015 yılı içinde yürürlüğe girmesiyle ve emniyet kültürünün kuruma kazandırılmasıyla ilgili olduğu değerlendirilmiştir. Emniyet yönetim sistemi geri bildirim önemli kıldığından, yürürlüğe giren yönetmelik sonrasında kayıtların tutulması ve verilerin detaylı toplanması da bu durumu açıklamaktadır.

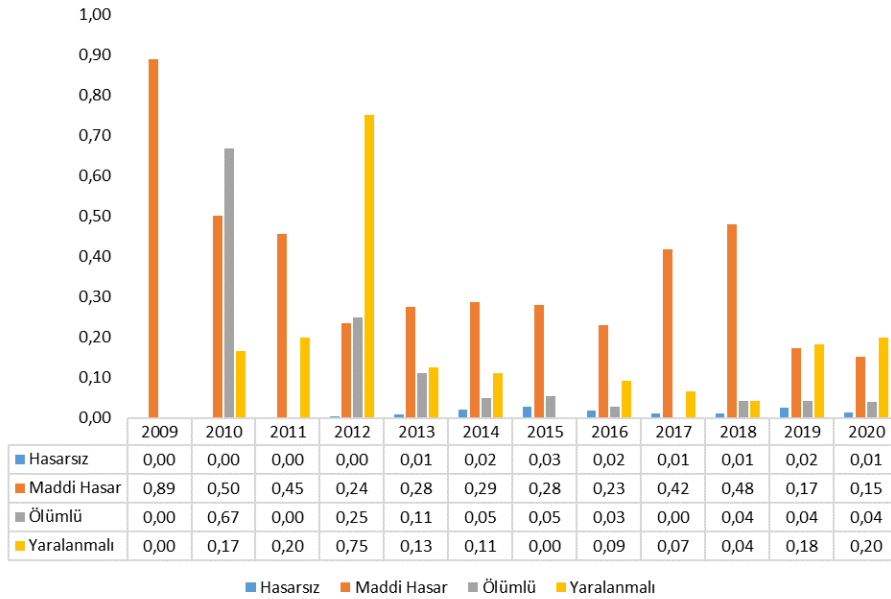
2014 yılı ve sonrasında ramak kala olaylarının sayısında belirgin bir artış görülmektedir. Bu durum, ciddi kazaların öncesinde tehlikeli durumların yaşandığını ve bunların raporlandığını göstermektedir. Ramak kalalar demiryolu çalışanlarının farkındalıkları sayesinde kıl payı önlenmiş kazalardır. 2018 yılında ise 15 olay ile ramak kala olayların en çok meydana yıldı.

Şekil 6’da kazaların hasar ve kayıp bazında yıllara göre dağılımı görülmektedir.



Şekil 6. Kazaların hasar ve kayıp bazında yıllara göre dağılımı

Türkiye’de 2009-2020 yılları arasındaki milyon tren.km başına hasar ve kayıp bazında kazaların değişimi Şekil 7’de görülmektedir.



Şekil 7. Türkiye’de 2009-2020 yılları arasındaki milyon tren.km başına hasar ve kayıp bazında kazaların değişimi

Hasarsız Kazalar: Yıllar bazında en fazla hasarsız kaza (56) 2015 yılında meydana gelmiştir. Milyon tren.km başına hasarsız kaza bildiriminin en çok yapıldığı yıl 0,03 oranı ile 2015 yılıdır. Diğer yıllar ile kıyaslandığında bu durum, demiryolu ağlarının genişletildiği senelere denk gelmektedir. Hasarsız kaza sayısının yüksek olması, yeni açılan hatlarda çevresel adaptasyonun ve ilgili bölgelerdeki personeller için emniyet kültürünün zamanla oturduğunu, fakat bu durumun ciddi sonuçlara yol açmadığı görülmektedir. Hasarsız kazaların büyük çoğunluğunu rastgele kazalar oluşturmaktadır.

Maddi Hasarlı Kazalar: Yıllar bazında en fazla maddi hasarlı kaza (23) 2015 yılında meydana gelmiştir. Milyon tren.km başına maddi hasarlar değerlendirilir ise en fazla maddi hasarlı kaza

0,48 oranı ile 2018 yılında meydana gelmiştir. Deray ve çarpışma kazalarının yoğunlukta olduğu maddi hasarlı kazaların sayısının demiryolu ağının genişlemesine bağlı olarak artış gösterdiği görülmektedir. Kazalar, ölüm ve yaralanma ile sonuçlanmamış olup, maddi hasar ile sonuçlanmıştır.

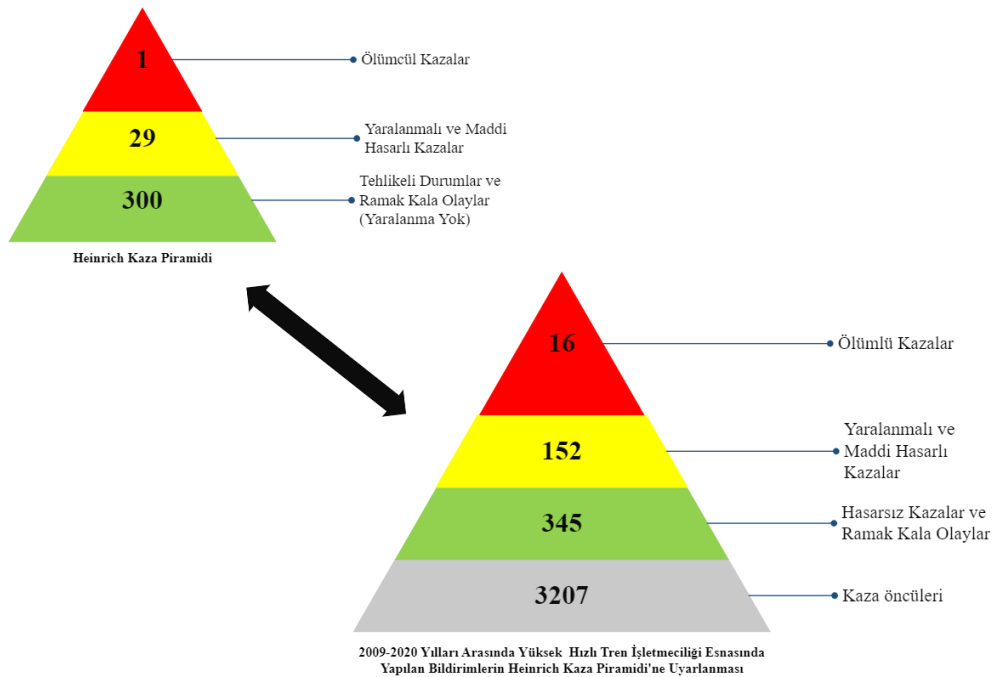
Ölümlü Kazalar: 2010,2012, 2013 ve 2014 yıllarında 2 ölümlü kaza görülmüştür. 2015 yılında 3 ölümlü kaza görülmüştür. Birçok öncünün birleşip ölümlü kazalara sebep olma ihtimali olduğu gibi emniyet kritik bir noktada yapılan tek bir hata veya öncü de ölümlü kazalara sebep olabilmektedir. Kaza analizleri ve raporları emniyet yönetim sistemine geri bildirim sağlayarak, gelecek için gerekli önlemlerin alınmasına zemin oluşturacaktır.

Yaralanmalı Kazalar: Genellikle her yıl 1-3 arasında yaralanma vakası yaşanmıştır. 2012 yılında 3 yaralanma vakası meydana gelmiştir. Yaralanmalı kazaların ölümle sonuçlanma tehlikesi vardır ve bu durum göz ardı edilmemelidir. Yaralanmalı kazaların potansiyel ölümlü kazalar da olabileceği değerlendirilmektedir.

3.9. Heinrich kaza piramidi ile karşılaştırılma

Heinrich'in kaza piramidi, iş güvenliği konusunda klasik bir modeldir ve kazaların sıklığı ile ciddiyeti arasında bir ilişki olduğunu gösterir. Heinrich'in orijinal piramidine göre, her 300 ramak kala olay (tehlikeli durum), 29 küçük kaza (yaralanma) ve 1 büyük kaza (ölümcül kaza) ile sonuçlanır. Bu model, iş yerlerinde daha küçük olayları ve tehlikeli durumları azaltmanın, ciddi kazaların önlenmesine yardımcı olacağını öne sürer.

Şekil 8'de 2009-2020 yılları arasında yüksek hızlı tren işletmeciliği esnasında yapılan bildirimlerdeki kaza öncüler, ramak kala olaylar ve kazalar; hasar, yaralanma, ölümcül sonuçlarıyla beraber Heinrich kaza piramidine uyarlanmıştır.



Şekil 8. Yüksek hızlı tren işletmeciliği esnasında yapılan 10 yıllık bildirimlerin Heinrich kaza piramidine uyarlanması

Kaza Öncüleri (3207 olay): 10 yıllık bildirimler içerisinde 3207 adet olay kaza öncüsü niteliği taşımaktadır. Heinrich kaza piramidine uyarlanan piramitte bu taban emniyet önlemlerinin iyileştirilmesi gereken en geniş alandır. Kaza öncüleri, kazaların ve ramak kala olayların yaşanmadan önlenmesini sağlayabilecek nitelikte bilgi içermektedir.

Hasarsız Kazalar ve Ramak Kala Olaylar (345 olay): 10 yıllık bildirimler içerisinde meydana gelen hasarsız kazaların ve ramak kala olayların sayısı 345'tir. Bu seviye, kazanın neredeyse gerçekleştiği ancak herhangi bir hasar veya yaralanmanın olmadığı durumlardır. Yaralanmaları ve maddi hasarlar olmasa dahi ramak kala olayların ve hasarsız kazaların yaşanması ciddi kazalarında yaşanma riskinin artmakta olduğunu gösterir.

Yaralanmalı ve Maddi Hasarlı Kazalar (160 olay): 10 yıl içerisinde yaralanma ve maddi hasar ile sonuçlanan 160 kaza yaşanmıştır. Bu tür kazalar, daha ciddi kazaların öncüsü olma niteliği taşır.

Ölümlü Kazalar (24 olay): Piramidin en üst seviyesi, 10 yıl içerisinde ölümle sonuçlanan 24 kazayı içerir. Bu tür kazaların önlenmesi için kapsamlı emniyet stratejileri ve sürekli iyileştirme süreçleri gereklidir. Heinrich piramidinin önerdiği gibi, alttaki seviyelerdeki kazaların ve olayların yönetimi, bu tür ciddi kazaların önlenmesine yardımcı olacaktır.

Uyarlanan piramitte görüldüğü gibi 10 yıllık verilerin analizi sonucunda yüksek hızlı tren işletmeciliğinde her 3390 kaza öncüsü, 348 ramak kala olay (tehlükeli durum) ve hasarsız kaza, 160 küçük kaza (yaralanma) ve 24 büyük kaza (ölümcül kaza) ile sonuçlanmıştır.

Bu piramit, emniyet yönetim sistemlerinde öncelik verilmesi gereken alanları belirlemeye yardımcı olur. Heinrich kaza piramidinden farklı olarak çalışmada uyarlanan piramidin tabanına kaza öncüleri de eklenmiştir. Taban genişledikçe, üst seviyelerdeki ciddi kazaların önlenmesi için daha fazla fırsat ortaya çıkar.

4. Sonuç

Bu çalışma yüksek hızlı tren hattı işletmeciliği esnasında yapılan 10 yıllık bildirimlerin emniyet yönetim sistemlerine, kaza inceleme ve araştırma çalışmalarına katkı sağlayacak şekilde girdiler ortaya çıkarabilmek amacıyla yapılmıştır. Çalışmada bildirimlerden oluşan veri setinin düzenlenmesi, sınıflandırma yöntemleri ve analizlerle emniyet çerçevesinde yorumlanması detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Heinrich kaza piramidi ile karşılaştırma yapılarak da 10 yıl sürecinde meydana gelen kazaların, ramak kala olayların ve kaza öncülerinin hasar ve durum tespitleri ile bir değerlendirme yapılmıştır.

Bildirimler göstermektedir ki yüksek hızlı tren hatlarının ilk devreye alındığı seneler sonrasında yapılan kaza öncüsü bildirimleri artmıştır.

2015 yılı ve sonrasında bildirilen kazalarda artış olduğu görülmektedir. 2015 yılı milyon tren.km başına en yüksek kaza sayısına sahip yıl olmuştur.

2020 yılı milyon tren.km başına en yüksek kaza öncüsü bildirilen yıl olmuştur. Kaza öncüsü sayılarının 2014 yılı ve sonrasında artış gösterme eğilimine girdiği görülmektedir. Artışların 2014 yılı ve sonrasında görülmesinin, emniyet yönetim sistemi yönetmeliğinin demiryollarında 2015 yılı içinde yürürlüğe girmesiyle ve emniyet kültürünün kuruma kazandırılmasıyla ilgili olduğu değerlendirilmiştir. Emniyet yönetim sistemi geri bildirim önemli kıldığından, yürürlüğe giren yönetmelik sonrasında kayıtların tutulması ve verilerin detaylı toplanması bu durumu açıklamaktadır.

2014 yılı ve sonraki yıllarda ramak kala olaylarının artışı pozitif bir bakış açısı ile değerlendirilir ise kuruma emniyet kültürünün kazandırıldığı ve çalışanların farkındalıklarının bu doğrultuda arttığı görülmektedir.

Deraylar genellikle ters makastan çıkma sebebiyle meydana geldiklerinden, makastarın ve makast motorlarının zarar görmesiyle kısacası maddi hasarla sonuçlanmaktadır. Ölümlü kazaların demiryollarında meydana gelme oranı her zaman diğer ulaşım sistemlerine göre daha düşüktür. 2009-2020 yılları arasında 10 yıllık süreçte 16 ölümlü kaza bildirilmiştir.

Heinrich kaza piramidi karşılaştırmasında 10 yıllık verilerin analizi sonucunda yüksek hızlı tren işletmeciliğinde her 3207 kaza öncüsü, 345 ramak kala olay (tehlikeli durum) ve hasarsız kaza, 152 küçük kaza (yaralanma) ve 16 büyük kaza (ölümcül kaza) ile sonuçlanmıştır. Heinrich kaza piramidinden farklı olarak çalışmada uyarlanan piramidin tabanına kaza öncüleri de eklenmiştir. Tabandan başlayarak bildirilen her kaza öncüsü, her hasarsız ve maddi hasarlı kaza kapsamında önlemler almak en tepe de ölümcül kazaların yaşanması riskini ciddi oranda düşürecektir.

Heinrich kaza piramidi karşılaştırmasında 10 yıllık verilerin analizi sonucunda yüksek hızlı tren işletmeciliğinde 16 ölümlü kaza meydana gelmiştir. Heinrich kaza piramidindeki oran göz önünde bulundurulursa; yaralanmalı kazaların piramide göre 480, hasarsız kazaların ise 4800 olması gerekirken, mevcut durumda yaralanmalı kazaların 152 ve hasarsız kazaların 345 olduğu görülmektedir. Gerçek veriler ile piramit verileri karşılaştırıldığında yeteri kadar verinin tutulmamış olduğu görülmektedir.

Bu çalışmada yüksek hızlı tren işletmeciliği esnasında yapılan bildirimlerden oluşan veri seti kullanılarak; kaza öncülerinin tepe tehlikeler ile bağlantısı kurularak tehlike kütüğü çalışmaları desteklenebilir. Sıklık analizleri daha detaylı çalışılarak risk analizlerinde kullanılması değerlendirilebilir. Bildirimler tren numaralarını, set numaralarını ve gecikme dakikalarını da içermektedir. Bu çalışmanın konusu olmadığı için bu bilgiler kullanılmamıştır. Fakat bildirimler tren ve setler dikkate alınarak araçların hata/arıza analizleri yapılabilir, araç yüklenicilerinin taahhüt etmiş oldukları MTBF değerlerini sağlayıp sağlamadığı kontrol edilebilir. Gecikmeler detaylı incelenerek tüm işletmenin güvenilirlik ve kullanıma hazır olma analizleri yapılabilir. Fakat bunun için verilerde hatalara müdahale edilme süreleri, saat detaylarının doğruluğu gibi hususlar göz önünde bulundurulmalıdır.

Bildirimler Türkiye’de emniyet alanında birçok çalışmaya girdi sağlayabilecek oldukça değerli bilgilerdir. Kurumlar bazında bu tür verilerin tutulması ve çalışmalara girdi sağlaması açısından değerlendirilmesi her zaman sürekliliğini koruyan bir durum olmalıdır.

Teşekkür

Bu çalışma kaza öncülerinin ve kazaların yıllar bazında incelenmesi için girdi oluşturan bildirimlerin sağlanmasında destek olan Özgür Şahin’e teşekkürlerimi sunarım.

Kaynakça

- [1] Heinrich, H. "Industrial Accident Prevention: A Scientific Approach. " *New York, NY, USA: McGraw-Hill*,1931
- [2] M. Kyriakidis vd., "Metro railway safety: An analysis of accident precursors," *Elsevier Ltd. Safety Science*, 2012
- [3] O. Golovina, M. Perschewski, J. Teizer, M. König, "Algorithm for quantitative analysis of close call events and personalized feedback in construction safety," *Automation in Construction Volume 99*, s. 206–222, 2019
- [4] P. Marshall, A. Hirmas, M. Singer, "Heinrich's pyramid and occupational safety: A statistical validation," *Safety Science Volume 101*, s. 180-189, 2018
- [5] K. Prem, D. Ng, M. Mannan, "Harnessing database resources for understanding the profile of chemical process industry incidents," *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, s. 549–560, 2010
- [6] G. Walker, "Redefining the incidents to learn from: Safety science insights acquired on the journey from black boxes to Flight Data Monitoring," *Safety Science*, s. 14–22, 2017
- [7] A. Majumdar, M. Dupuy, W. Ochieng, P. Nalder, "Developing safety indicators for New Zealand airspace: Analysis of loss-of-separation incidents," *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, s. 86–97, 2006
- [8] Z. Nazeri, G. Donohue, L. Sherry, "Analyzing relationships between aircraft accidents and incidents," *In Proceedings of the International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT 2008)*, Fairfax, WV,USA, 2008
- [9] R. Arnaldo Valdés, S. Liang Cheng, V. Gómez Comendador, F. Sáez Nieto, "Application of bayesian networks and information theory to estimate the occurrence of mid-air collisions based on accident precursors," *Entropy*, s. 969, 2018
- [10] R. Arnaldo Valdés, S. Liang Cheng, V. Gómez Comendador, F. Sáez Nieto, "Detection of common causes between air traffic serious and major incidents in applying the convolution operator to heinrich pyramid theory," *Entropy*, s. 1-28, 2019
- [11] M. Fidan, Ö. Akbayır, Ö. "Hızlı tren işletmeciliği hata bildirimlerinin kelimebulutu analizi ile gruplanması," *Raylı Sistemler Kongre ve Sergisi*, Eskişehir: Elektrik Mühendisleri Odası, İnşaat Mühendisleri Odası, Makina Mühendisleri Odası, TMMOB, s. 49-53, 2023
- [12] TCDD, Kaza araştırma inceleme ve raporlama yönergesi, 14.12.2016
- [13] TCDD Taşımacılık A.Ş., kaza inceleme yönergesi, 2020
- [14] Ö. Akbayır, "Dünya'da ve Türkiye'de demiryolu kazaları nedeniyle meydana gelen ölüm oranlarının karşılaştırılması," *Demiryolu Mühendisleri Derneği*, no. 5, pp. 45-52, 2016

Özgeçmiş**Sultan GÜNDÜZ**

Lise eğitimini Eskişehir Atatürk Anadolu Meslek Lisesi'nde, lisans eğitimini Karabük Üniversitesi'nde tamamlamıştır. Yüksek lisans eğitimine Eskişehir Teknik Üniversitesi'nde devam etmektedir. 2018-2023 yıllarında Savronik'de Sinyalizasyon Sistemleri Mühendisi olarak çalışmıştır. 2023 yılından bu yana Aselsan'da Sistem Tasarım ve RAMS Mühendisi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren araştırma konuları raylı sistemler, sinyalizasyon, emniyet ve güvenilirlik alanlarıdır.

E-Posta: sltngndz@gmail.com

**Ömür AKBAYIR**

Lise eğitimini Demiryolu Meslek Lisesinde, lisans ve yüksek lisans eğitimini Eskişehir Osmangazi Üniversitesi'nde, doktora eğitimini Gazi Üniversitesi'nde tamamlamıştır. 1999-2015 yıllarında TCDD'de Teknisyen ve Mühendis olarak, 2015-2018 yıllarında Anadolu Üniversitesi'nde Dr. Öğr. Üyesi olarak çalışmıştır. 2018 yılından bu yana Eskişehir Teknik Üniversitesi'nde çalışmakta olup Doç. Dr. unvanını 2022 yılında almıştır.

E-Posta: omurakbayir@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Sultan GÜNDÜZ: Metodoloji, Verilerin görselleştirilmesi, Verilerin yorumlanması. Ömür AKBAYIR: Verilerin temini, Kontrol.



Geleceğin Taşımacılık Altyapısı İçin Çeşitli Cam Elyaf Takviyeli Kompozit Ürünlerle Donatılan Demiryolu Beton Traversleri Hakkında Bir İnceleme

Reşat KÖROĞLU*¹, Ömer Faruk ERKENDİRCİ²

¹ TCDD Uşak EKAY Kontrolörlüğü, Uşak, Türkiye

² Uşak Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Uşak, Türkiye

*resatkoroglu@tcdd.gov.tr

(Alınış/Received: 04.07.2024, Kabul/Accepted: 10.07.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Bu çalışma kapsamında farklı cam elyaf takviyeli kompozit ürünler kullanılarak konvansiyonel öngerilmeli beton travers mukavemet değerlerine ulaşarak milli ve daha düşük maliyetlerde ürünler almak için deneyler yürütülmüştür. Yapılan test ve analizler sonucunda cam elyaftan mamul dokuma kumaş, keçe kumaş, çeşitli ebatlarda kırpıntılar (kesik elyaf katkıları) ve dairesel çubuklar (donatılar) kullanılarak imal edilen test numunelerinin Dywidag normunda öngermeli beton traversler için istenilen kriterleri yakalayamadığı görülmüştür. Bununla birlikte söz konusu değerlere en yüksek oranda yaklaşan ve fayda/maliyet açısından en yüksek verim alınan cam elyaf dairesel çubukların ebatları ve beton dökümü sırasındaki dizilişleri ile beton reçetesi (beton karışım oranı) üzerine çalışmaların genişletilebileceği ve geleceğin taşımacılık altyapısı için milli, daha düşük maliyet ve daha yüksek kullanım ömrünü yakalamak adına önemli katkıları olacağı değerlendirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Beton travers, Cam elyaf, Kompozit malzeme

A Review on Railway Concrete Sleepers Reinforced with Various Glass Fiber Reinforced Composite Products for Future Transportation Infrastructure

Abstract: In this study, experiments were conducted using different types of glass fiber reinforced composite materials to achieve the strength values of conventional prestressed concrete sleepers, aiming to produce national products at lower costs. As a result of the tests conducted, it has been observed that the test samples manufactured using woven fabric made of glass fiber, felt fabric, various sizes of chopped fibers and rods did not achieve the conventional prestressed concrete sleeper criteria of Dywidag norms. Nevertheless, the studies on the size of the glass fibre rods, which approach the values in question at the highest efficiency in terms of benefit/cost and their arrangement during concrete casting and concrete mixture ratio can be expanded. This will make important contributions to achieving national lower cost and higher service life for the transport infrastructure of the future.

Keywords: Railway, Concrete sleeper, Glass fiber, Composite material

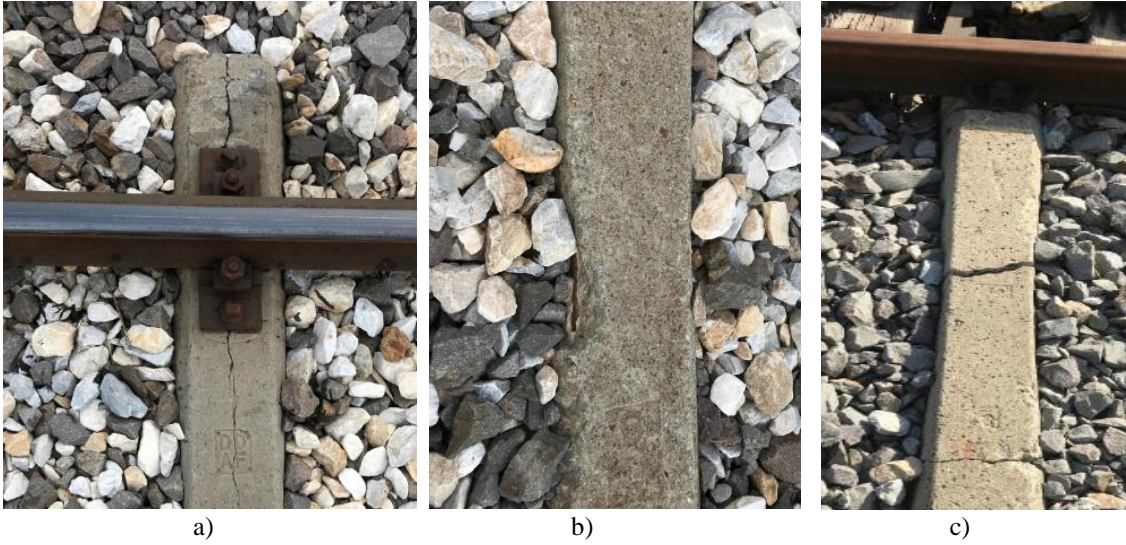
1. Giriş

Günümüzde, demiryolu taşımacılığı, çevresel sürdürülebilirlik, verimlilik ve güvenilirlik gibi önemli endişeleri ele almak için kritik bir çözüm olarak ön plana çıkmaktadır. Demiryolu aracından raya, raylardan da kendi üzerine gelen kuvvetleri uygun şekilde altyapıya ileten, yolun açıklığını koruyarak ekseninde tutan, düşey ve yatay yöndeki harekete dayanacak şekilde imal edilen elemanlara travers adı verilmektedir. Demiryolu hatlarında genellikle ahşap, demir (çelik) ve beton traversler kullanılmakta olup planlanan servis ömürleri sırasıyla ortalama 20 yıl, 50 yıl ve 50 yıldır [1, 2]. Son yıllardaki teknolojik ilerlemelerle yeni imalat yöntemleri geliştirilerek kompozit travers üzerine de çalışılmaktadır [3]. Ahşap traverslerin dinamik yüklemelere dayanıklı, mükemmel elektrik ve ses yalıtımına sahip olmasına karşın maliyetlerinin yüksek olması, çevresel şartlar nedeniyle ömürlerinin kısa oluşu, böceklerin zarar verme ihtimali ve hammaddesi için gerekli çevresel tahribat nedeniyle kullanımı giderek azalmaktadır. Demir

Atıf için/Cite as: R. Köroğlu, Ö.F. Erkendirci, "Geleceğin taşımacılık altyapısı için çeşitli cam elyaf takviyeli kompozit ürünlerle donatılan demiryolu beton traversleri hakkında bir inceleme," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 97-106, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1510246

traversler ise ahşap traverslere göre daha yüksek servis ömrü ve kısmen daha hafif olmaları gibi bazı avantajlar sunmasına rağmen bakımının zor olması, sinyalizasyonlu hatlarda elektrik izolasyon güçlüğü ve korozyon gibi nedenlerle kullanımı giderek azalmış ve yeni tip travers ihtiyacı doğmuştur. Bu olumsuz gelişmeler paralelinde ahşap ve çelik travers yerine günümüzde beton travers kullanımı giderek yaygınlaşmış ve ülkemizde kullanım oranı % 98'e ulaşmıştır [4].

Demiryolu üstyapısının temel taşı olan traversler, zamanla karşılaşılan çeşitli sorunlarla mücadele etmektedir. Bu sorunların başında Şekil 1'de örnekleri sunulan enine ve boyuna istikamette çatlama, donatı korozyonu, yüzey aşınması (ray mesnedinde veya travers tabanından soyulma) ve paspayı atması (servis yükleri altında, deray nedeniyle veya hattın bakım/montajı esnasında meydana gelen darbeler nedeniyle) gelmektedir.



Şekil 1. Beton traverslerde karşılaşılan bazı sorunlar a) Boyuna çatlama b) Paspayı atması c) Travers merkezinde enine çatlama

Bu zorluklara çözüm olarak, son yıllarda cam elyaf takviyeli kompozit malzemelerin demiryolu traversleri için alternatif bir seçenek olarak ortaya çıkması dikkat çekicidir. Bu yeni malzemelerin yüksek dayanıklılığı, düşük bakım gereksinimi ve uzun ömürlü performansı ile demiryolu traverslerinde de kullanım potansiyeline sahiptir.

Kompozit malzeme, en az iki farklı malzemenin büyük boyutlarda birleşerek oluşturduğu bir yapıdır. Bu malzemenin temel işlevi, tek başına kullanılmayan veya birbiriyle karışamayan malzemeleri bir araya getirerek hafiflik, esneklik, mukavemet, maliyet gibi özellikleri optimize etmektir. Kompozit malzemenin yapısı genellikle iki ana bileşenden oluşur: birincisi matris adı verilen ve polimerler, metaller, metal alaşımları, seramikler gibi malzemelerden yapılan bileşen olup bu bileşen malzemeyi bir arada tutar ve esneklik, tokluk gibi özellikler kazandırır. Diğer bileşen ise takviye malzemesi olarak da adlandırılan ve çelik, karbür, aramid gibi malzemelerden oluşup malzemenin mukavemetini artırır.

Kompozit malzemeler, hem yüksek mukavemet özellikleri hem de hafiflikleri nedeniyle çeşitli endüstri alanlarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Havacılık ve uzay teknolojileri, savunma sanayi, otomotiv, inşaat, ulaşım ve sağlık gibi birçok sektörde geniş bir uygulama yelpazesi bulunmaktadır.

Elyaf takviyeli kompozit malzemeler, kompozit malzemelerin önemli bir bölümünü oluşturur. Bu malzemeler, yüksek mekanik dayanımlı ve güçlü kompozit malzemelerin üretilmesini sağlayan

liflerin takviye malzemesi olarak kullanılmasıyla elde edilir. İnce elyaflar genellikle matris olarak kullanılarak bu malzemeler üretilir. Elyafın yoğunluğu, kompozit malzemenin özelliklerini doğrudan etkiler. Bir yüke maruz kaldığında, elyaf takviyeli kompozit malzeme, yükü matris malzemesinden takviye malzemesine ileterek büyük çoğunluğunu takviye malzemesinin karşılamasını sağlar. Elyaf takviyeli kompozitlerde elyafın homojen dağılımı, malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerini doğrudan etkiler. Ayrıca, kullanılan elyafın türü, malzemenin dayanımı ve rijitliği gibi özelliklerini artırırken, kompozit malzemenin çalışma sıcaklığına olan uygunluğunu da sağlar.

Beton travers ve kompozit malzemeler üzerine çeşitli araştırmalar yapan araştırmacılardan Aktaş vd. [5] çok çeşitli donatılar kullanarak ürettikleri beton traverslerin sönümlene özelliklerini incelemişler, lamine karbon elyaf takviyeli poliüretan donatıların sıradan B70 tipi traverslere oranda %50'nin üzerinde bir sönümlene oranlarına sahip olduklarını, bu durumun ise traversin servis ömrünü uzatırken bakım ihtiyacı ve çevre üzerindeki olumsuz etkilerini düşürdüğünü tespit etmişlerdir. Çeçen vd. [6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13] klasik beton traverslerin güncel literatürde geçen çeşitli sorunları ve son dönemde geliştirilen çözümlerden bahsedilerek, sorunların yerli karbon ve cam fiber takviyeli polimer hammaddeler kullanılarak çözülebilmesini ray mesnedinde statik yüklemeli pozitif moment deneyleri yaparak araştırmışlar, demiryolu üstyapı elemanlarından olan beton traverslerin literatürde geçen çeşitli sorunlarına değinerek çözümleri için halihazırda kullanılan çelik donatılar yerine karbon fiber takviyeli polimerlerin (carbon fiber reinforced polymers, CFRP) kullanımını araştırmışlar ve bu çalışmalarında klasik dairesel donatı yerine maliyeti daha düşük olan lamine form kullanmışlardır. Ayrıca üretmiş oldukları traversler üzerinde yapılan TS EN 13230-3 statik eğilme testleri ve ANSYS sonlu eleman analizlerine göre de servis ömürleri açısından gayet verimli sonuçlar elde etmişler, ön gerilmeli ve öngerilmemiş beton traversler karşılaştırılmış, ön gerilmeli traverslerin dezavantajlarını gidermek için karbon fiber takviyeli donatılar kullanılarak traversin servis ömrünü uzatma, bakım ihtiyaçlarını azaltma ve çevreye verilen zararı azaltma hedeflenmiş, B70 tipi öngerilmeli beton traverslerde yerli polipropilen elyaf donatı kullanılarak servis ömrü, sönümlene performansı ve rezonans direncinin artırılması hedeflenmiş ve ürettikleri elyafı ve elyafsız traversleri TS EN 13230-2'de yeni bir travers tasarımı sırasında istenilen yüklem-kaldırma-tekrar yüklem gibi kademeli artışlı statik eğilme testi, modern modal testi ve yüksek hızlı darbe testlerine tabi tutarak gerekli incelemelerini yapmışlar, karbon fiber takviyeli polimer donatılar kullanarak ürettikleri beton traversleri yüklem-boşaltma-yeniden yüklem şeklindeki testlerini uygulayarak elde ettikleri sonuçları, sıradan B70 tipi beton traversin sonuçları ile karşılaştırmışlardır. Karşılaştırma sonucunda da yeni tip donatılı beton traverslerin yük taşıma kapasitesinin ve servis ömrünün daha yüksek olduğu sonucuna ulaşmışlar, beton travers üretiminde donatı olarak yerli karbon fiber takviyeli poliüretan kullanıldığında üretilen traversin beton traverslerin merkez negatif eğilme performansı, öngerilmeli olarak üretilen B70 tipi traverslerle karşılaştırılmış, çalışma sonucu yapılan değerlendirmede, yerli karbon fiber takviyeli poliüretan kullanılarak üretilen traverslerin yorulma esaslı tasarım yükünün, B70 tipi öngerilmeli traverslere oranla neredeyse 2 katına çıktığını tespit etmişler, bunun yanında üretilen traverslerde herhangi bir öngerilme uygulanmadığı ve etriye kullanılmadığı halde, B70 tipi öngerilmeli traversin kırılma yükünün üzerindeki yüklemelerde dahi, meydana gelen çatlak genişliklerinin 0,05 mm'nin altında kaldığını tespit etmişler, demiryolu traverslerinin tekrarlı darbe yükleri altındaki davranışlarını incelemek adına karbon fiber takviyeli poliüretan donatılı traversler ile çelik donatılı beton traversleri karşılaştırmışlardır. Buna göre karbon fiber takviyeli poliüretan donatılı traverslerin tekrarlanan darbe yüküne karşı direncinin çelik donatılı traverslere göre çok daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca bu traverslerin servis ömürlerinin daha uzun olması, çevre üzerindeki etkilerinin ve bakım ihtiyaçlarının daha az olduğu tespitlerini yapmışlar, çok çeşitli donatılar kullanarak beton travers numuneleri ürettiklerini, bu ürünlerin yüklem-boşaltma-tekrar yüklem testleri ve tek aşamalı statik yüklem testlerini yaparak traverslerdeki deformasyonları gözlemlemiş, bu yeni ürünlerin, sıradan B70 tipi beton traverslerden daha iyi performans gösterdiklerini tespit etmişlerdir. Ferdous vd. [14] partikül dolgululu reçine ve cam elyaf takviyeli

kompozit kullanılarak üç farklı demiryolu traversi üretmiş, ürünleri çeşitli testlerden geçirerek karşılaştırmalar yapmışlardır. Hameed vd. [15] demiryolu traverslerinin betonunda agreganın hacimsel olarak % 15'ini kırıntı kauçuk ile değiştirerek deneysel bir araştırma yaparak test ve analizlerden çıkan sonuçlarla karşılaştırma yapmışlardır. Li vd. [16] beton traverse ait Amerikan, Avrupa ve Çin standartlarını karşılaştırarak tartışmıştır. Shokrieh vd. [17] traverslerin kompozit malzemelerle yük kapasitesini arttırmayı hedeflemiş, donatılı ve donatısız traversler üreterek testler yapmış ve sonlu elemanlar yöntemiyle de karşılaştırmalar yapmışlardır. Tacim vd. [18] demiryolu traverslerinin ahşap, çelik, beton, plastik ve kompozit olmak üzere beş türde üretilse de genellikle öngermeli beton traversler kullanıldığını belirtmişler, ancak bu traverslerde gerek travers istifleme sırasında oluşan hasarları gerekse üretim esnasında çeşitli sebeplerden kaynaklı kalıp yan yüzeylerinde hacimsel boşluklar ve segregasyon gibi hasarların meydana geldiğini, bu durumun da uzun süre açık havada çeşitli hava şartlarına maruz kalan beton traverslerde deformasyona sebep olması nedeniyle öngermeli beton traverslerde dayanıklılık (durabilite) ve dayanım sorunları ile çözüm önerilerini incelemiştir.

Bu çalışmanın amacı, cam elyaf takviyeli çeşitli kompozitler kullanılarak demiryolu traversleri imal ederek özelliklerini incelemek ve geleneksel traverslerle karşılaştırarak geleceğin demiryollarında kullanılabilecek milli, daha düşük maliyetli ve daha uzun kullanım ömrü olan traversler elde edilip edilemeyeceğini araştırmaktır.

Dolayısıyla çalışma, demiryolu altyapısının sürdürülebilirliği ve verimliliği için yenilikçi çözümler arayan araştırmacılar ve mühendisler için önemli bir kaynak olacaktır.

2. Metot

Bu çalışmada TCDD Afyon Beton Travers Fabrikasında bulunan üretim hattında B70 tipi beton travers kalıpları ve küp numunesi hazırlama kalıpları kullanılarak farklı donatılar içeren beton travers ve test numuneleri imal edilmiş ve bu numuneler için basınç testi ve üç nokta mesnet deneyleri yapılarak fabrikada üretimi devam eden geleneksel B70 tipi demiryolu beton traverslerinin sonuçları karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Üretim sırasında gerek küp numuneleri gerekse imal edilen beton traverslerde halihazırda kullanılan beton reçetesi (karışım oranları) kullanılmıştır.

2.1. Donatı olarak cam elyaf dokuma kumaş kullanılan test numunelerinin hazırlanması

200x200x200 mm ölçülerindeki test küpü numunesine cam elyaftan imal dokuma kumaş, keçe kumaş, farklı ölçülerde kırpıntılar (kesik elyaf beton katkıları) ve son olarak cam elyaf çubuklar (dairesel donatılar) kullanılmıştır. Cam elyaf ürünleri kalıp içerisinde ilki kalıp tabanından 35 mm, diğeri ise ilk setten 100 mm sonra olmak üzere toplam 2 set halinde kullanılmıştır. Dokuma kumaşın bir setinde kalıp boyunca uzanan, 180x180 mm ölçüsünde ve 10x10 mm gözölçüsünde çit teli bir kat olarak uzatılmış, üzerine yine aynı en ve boyda 300 gr/m² dokuma kumaş ikinci katı meydana getirmiş, üçüncü katta çit teli, dördüncü katta dokuma kumaş ve son olarak beşinci katta çit teli şeklinde bir set oluşturulmuştur. Kumaş ve telin beton travers imalatındaki ölçüsü ise 150 mm x 2500 mm şeklinde olup uygulama sırasındaki görüntüsü Şekil 2.a.'de görülmektedir.

2.2. Donatı olarak cam elyaf keçe kumaş kullanılan test numunelerinin hazırlanması

Takviye olarak cam elyaf keçe kumaşın kullanımı da tıpkı dokuma kumaşla aynı kat ve set şeklinde olmuştur. Seçilen cam elyaf keçe ise 300 gr/m² ölçüsünde olup uygulama sırasındaki görüntüsü Şekil 2.b.'de görülmektedir.



a)



b)

Şekil 2. Farklı donatılarla beton dökümü a) Cam elyaf dokuma kumaş b) Cam elyaf keçe kumaş

2.3. Donatı olarak cam elyaf kırıntıları kullanılan test numunelerinin hazırlanması

Takviye olarak cam elyaf kırıntısı seçilirken uzunluk olarak 3 mm ve 12 mm ölçüsünde olan iki farklı malzeme kullanılmış, her bir malzeme için de ayrı ayrı yapılan üretimlerde 5 kg/m^3 dozunda kırıntı kullanılarak Şekil 3.' deki gibi üretimler yapılmıştır. Bu üretimler yine iki set halinde ve her bir set tel-kırıntı-tel-kırıntı-tel şeklinde yapılmıştır. Şekil 4.a' da donatı olarak 12 mm cam elyaf kırıntısının kullanıldığı test küpü örneği verilmiştir.



Şekil 3. Donatı olarak cam elyaf kırıntıları kullanılarak kalıplara beton dökümü

2.4. Donatı olarak cam elyaf çubuk kullanılan test numunelerinin hazırlanması

Takviye olarak cam elyaf dairesel çubuk kullanılmasında çapı 5 mm olan ürünler tercih edilmiş, deney küpü numunelerinde 17 cm boyunda ve bir sette aralarında dörder santimetre bulunan Şekil 4.b' deki gibi toplam 4 adet çubuk kullanılarak yine toplam 2 set şeklinde kullanılmıştır. Beton travers üretiminde ise traversin boyuna doğru uzatılan 2 metre boyunda ve her bir sette aralarında dörder cm bulunan toplam 4 adet çubuk kullanılarak yine toplamda 2 set şeklinde kullanılmıştır. Dairesel çubuklar için bu diziliş sebebi beton reçetesindeki maksimum agrega tane büyüklüğünün 32 mm olması nedeniyle betonun kalıba homojen bir şekilde dağılabilmesini sağlamak için donatılar arasına en az 40 mm boşluk bırakılması gerektiği değerlendirilmiştir.



Şekil 4. Test küpleri ve hazırlanışı a) 12 mm kırpıntı cam elyaf b) Cam elyaf çubuk ile küp numunesi hazırlama

Yapılan imalatlarda her bir setin arasındaki mesafenin 100 mm olarak seçilmesinin sebebinin mevcut B70 tipi beton traversin içerisinde yer alan çelik gergi çubuklarının arasındaki mesafenin de 100 mm olmasıdır.

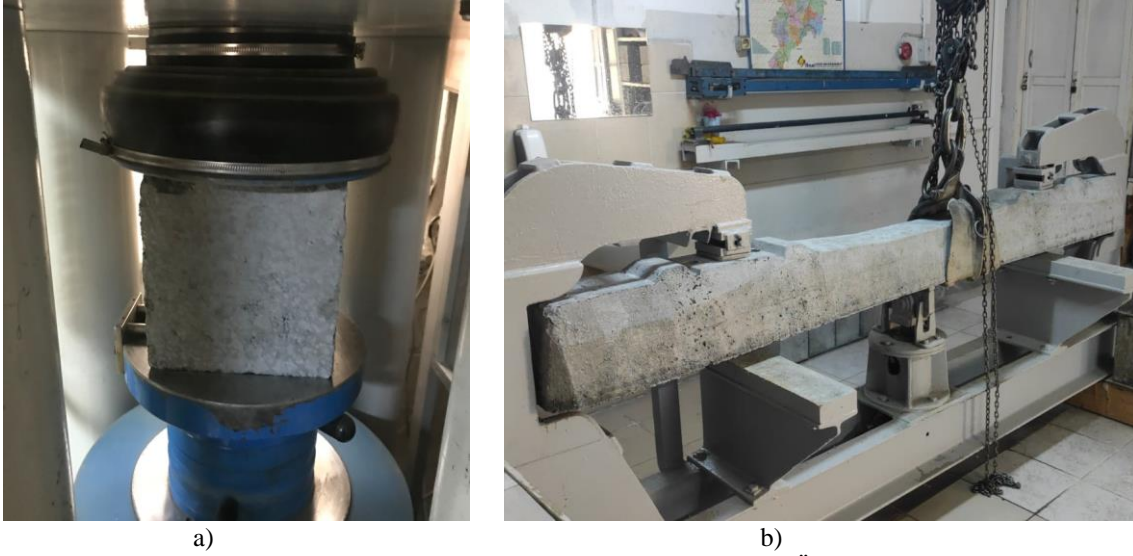
Kullanılan bu cam elyaf malzemeler ile B70 tipi beton traverslerde kullanılan çelik donatının bazı mekanik özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Buna göre yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda cam elyaf tercih edilebilirken yapısal sağlamlık ve dayanıklılık söz konusu olduğunda çeliğin daha avantajlı olacağı değerlendirilmiştir.

Tablo 1. Cam elyaf ve çeliğin bazı mekanik özelliklerin karşılaştırılması

Parametre	Çelik	Cam elyaf
Çekme Mukavemeti (MPa)	1570	2400
Elastisite Modülü (GPa)	205	69
Yoğunluk (gr/cm ³)	7,85	2,6

2.5. Uygulanan testler

İmalatı yapılan test küp numuneleri Şekil 5.a'daki gibi basınç dayanım testine, beton traversler ise Şekil 5.b'deki gibi üç nokta eğilme testine tabi tutulmuştur.



Şekil 5. Uygulanan test düzenekleri a) Basınç dayanım testi b) Üç nokta eğilme testi

3. Bulgular

İmalatı yapılan her bir küp testi numunesi 1 ve 28 günlük teste tabi tutulduğunda elde edilen sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. Yapılan çalışmaya göre cam elyaf keçe kumaş ile cam elyaf kırptılarının 1 günlük test sonucu Dywidag öngerilimli beton traverslere mahsus ani kalıptan çıkarma usulüne göre imalat talimatında [19] belirtilen minimum değerleri olan 480 kgf/cm² nin altında kaldığı, cam elyaf dokuma kumaş ve cam elyaf çubukların sonuçlarının ise minimum değer üzerinde olduğu gözlemlenmiştir. Yine cam elyaf keçe kumaş ve cam elyaf kırptılarının 28 gün sonraki testlerinde Dywidag Normu minimum değeri olan 600 kgf/cm² nin altında kaldığı, diğer donatıların ise bu değer üzerinde sonuçlar elde edildiği gözlemlenmiştir. Cam elyaf kırptılarının üretim sırasından homojenize olarak dağıtılamaması ve kırptı içeren setlerin küpü kesitinde bir engel oluşturarak Şekil 6.’daki gibi küp numunesinde meydana getirdiği çatlaklar nedeniyle dayanımını düşürdüğü değerlendirilmiştir. Cam elyaf keçe kumaşın da yine numune içerisinde bir katman oluşturduğu ve betona nüfuz edemediği için yine küp numunelerinin dayanımını düşürdüğü değerlendirilmiştir. Buna göre çalışmalarda kullanılan cam elyaf içeren bu malzemelerin travers betonunda farklı proseslerle kullanılabileceği mümkün olmakla birlikte, bu çalışmada uygulanan teknikle üretimlerinin adı geçen normda istenilen basınç dayanım değerleri açısından sorun oluşturacağı söylenebilir.

Tablo 2. 1 ve 28 günlük beton basınç deneyi sonuçları

Kullanılan Cam Elyaf Türleri	1 Günlük (kgf/cm ²)	28 Günlük (kgf/cm ²)
Dywidag Normuna Göre olması gereken minimum değer	480	600
Dokuma Kumaş	482	639
Keçe Kumaş	314	507
3 mm Kırptı	416	577
12 mm Kırptı	430	599
Cam Elyaf Çubuk	657	673



Şekil 6. Basınç testi sırasında küp numunelerinin arasındaki setler boyunca meydana gelen çatlaklar

İmalatı yapılan beton traverslerin üç nokta eğilme testi sonuçları Tablo 3’de verilmiştir. Yapılan çalışmaya göre hiçbir beton travers numunesinin Dywidag Normunda [19] belirtilen minimum 4500 Kg yüke ulaşmadan kırıldığı tespit edilmiştir. Bunlardan cam elyaf dokuma kumaş donatının beton dökümü sırasında kalıp içerisinde yer alması gereken plastik dübellere nedeniyle kesilmesi nedeniyle mukavemetinde düşüş meydana geldiği, ayrıca tel-kumaş setlerinin kalıp içerisinde bir engel oluşturduğu, bunun yanında dökülen beton reçetesindeki su oranının da çok düşük olması nedeniyle beton ile cam elyafın tam olarak nüfuz edemediği (aderansın düşük kaldığı) değerlendirilmiştir. Cam elyaf çubuklarından imal edilen beton traverslerde yine dökülen beton içerisindeki su oranının düşük olması veya donatıların yüzeyinde nervür veya kumlama olmaması veya donatıların çelik malzemeye göre elastisite modülünün çok daha düşük kalması nedeniyle performansının düşük kaldığı değerlendirilmiştir. Ancak küp numunelerine uygulanan basınç testlerinde beklenenin üzerinde bir mukavemet göstermesi ileride çubuk yüzey özellikleri, çapı, sayısı ve dizilişinde yapılacak değişikliklerle yeniden teste tabi tutularak beklenen mukavemetin sağlanması araştırılması gereken konular olarak belirlenebilir. Ayrıca karşılaştırma esnasında öngörülmesi gereken beton traverslerden istenilen yük kapasitesi değerleri kullanılmıştır. Halbuki üretilen traversler öngörülmesiz bir beton travers kategorisine girmektedir. Ancak günümüze kadar öngörülmesiz beton traversler genellikle Fransız ekolüyle ikiz blok geometri ile üretilmiş ve yekpare (monoblok) bir öngörülmesiz beton travers TCDD hatlarında kullanılmamış olduğundan buna yönelik bir taşıma kapasitesi değeri henüz belirlenmemiştir. Dolayısıyla farklı donatı tip ve özellikleriyle araştırmaların genişletilmesi önerildiği gibi, yekpare geometri beton traversler için dizayn kriterleri belirlenmesi yönünde de çalışmaların genişletilmesi faydalı olacaktır.

Tablo 3. Üç Nokta Eğilme deneyi sonuçları

Kullanılan Cam Elyaf Türleri	Göçme Gerçekleşinceye Kadar Ulaşılan En Yüksek Yük Değeri (Kg)
Dywidag Normuna Göre olması gereken minimum değer	4500
Dokuma Kumaş	1150
Keçe Kumaş	1000
3 mm Kırpıntı	956
12 mm Kırpıntı	1023
Cam Elyaf Çubuk	1204

4. Sonuç

Bu çalışmada demiryolu beton traverslerinde hali hazırda kullanılan çelik donatılar yerine farklı malzemeler kullanılarak gerek traversin dayanımını gerekse maliyetini düşürmek için cam elyaf

ürünlerinden dokuma kumaş keçe kumaş, çeşitli boyutlarda kırpıntı (kesik elyaf) ve cam elyaf çubuklar kullanılarak test küpü numuneleri ve beton traversler üretilmiştir. Çelik donatı kullanılmaksızın üretilen bu traverslerde, donatı olarak kullanılan 300 gr/m² cam elyaf keçe kumaş ile 3 mm ve 12 mm ölçülerinde cam elyaf kırpıntılarında imal numuneler, gerek test küpü numunesinin 1 ve 28 günlük basınç testlerinden gerekse beton traverslerin üç nokta eğilme testinden geçemediği tespit edilmiştir. Donatı olarak 300 gr/m² cam elyaf dokuma kumaş kullanıldığında basınç testlerinden olumlu netice alınsa da üç nokta eğilme testinden ön gerilmeli beton traversler için Dywidag normunda istenilen taşıma kapasitesinin çok altında değerler elde edildiği tespit edilmiştir. Son olarak çapı 5 mm olan cam elyaf çubukların donatı olarak kullanıldığı basınç testinde Dywidag normunda istenilen kapasite değerinin üzerine çıkılsa da eğilme testinde nispeten daha iyi olmakla birlikte adı geçen normda ön gerilmeli beton traversler için istenen değer çok altında sonuçlar alınmıştır. Bu sonuçların muhtemel sebepleri olarak beton reçetesindeki su oranının çok düşük olması, kullanılan ürünlerin beton yerleştirilebilirliği açısından sorunlar meydana getirmesi, cam elyaf donatıların nervür veya kumlamanın olmaması, bu donatının çelik malzemeye göre elastisite modülünün çok daha düşük olması olarak değerlendirilmiştir. Buna göre; çalışmada kullanılan tüm cam elyaf ürünlerinin travers betonunda farklı proseslerle kullanılabilmesi mümkün olmakla birlikte, bu çalışmada uygulanan tekniklerle üretimlerinin adı geçen normda istenilen dayanım kriterlerini sağlamak adına yetersiz kalacağı anlaşılmaktadır. Dolayısıyla çalışmaların farklı donatı tip ve özellikleriyle ve yekpare geometri ve/veya kompozit donatılı beton traversler için yeni dizayn kriterleri belirlenmesi dahil genişletilmesi önerilir.

Teşekkür

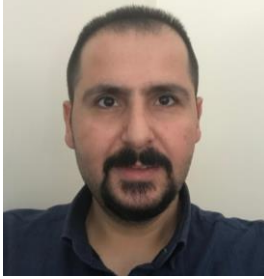
Bu çalışmadaki katkılarından dolayı TCDD Afyon Beton Travers Fabrikası Müdürü Serkan ORUÇ, fabrika teknik personelinden Erdoğan MUTLU ve Ümit AKCİ ile birlikte tüm çalışma arkadaşlarına teşekkürlerimizi bildiririz.

Kaynakça

- [1] R.H.Crawford, "Greenhouse gas emissions embodied in reinforced concrete and timber railway sleepers," *Environmental Science & Technology*, vol. 43, no.10, pp. 3885-3890, June 2009, doi: 10.1021/es8023836
- [2] W. Ferdous, A. Manalo, G. V. Erp, T. Aravinthan, S. Kaewunruen, A. Remennikoy, "Composite railway sleepers – Recent developments, challenges and future prospects," *Composite Structure*, vol. 134, pp. 158-168, Sep 2015, doi: 10.1016/j.compstruct.2015.08.058
- [3] G. Tacim, "Öngermeli beton travers üretiminde kendiliğinden yerleşen beton kullanımının araştırılması," Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Afyon Kocatepe Üni., Afyonkarahisar, 2019
- [4] T.C. Devlet Demiryolları İşletmesi Genel Müdürlüğü, "Faaliyet raporu 2023," 2023.[Çevrimiçi]. Erişilebilir: <https://static.tcdd.gov.tr/webfiles/userfiles/files/istrapor/2023faaliyetrpr.pdf> [Erişim tarihi:02.07.2024]
- [5] B. Aktaş, F. Çeçen, H. Öztürk, M.B. Navdar, İ.Ş. Öztürk, "Comparison of prestressed concrete railway sleepers and new LCR concrete sleepers with experimental modal analysis," *Engineering Failure Analysis*, vol. 131, 105821, Jan 2022, doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105821
- [6] F. Çeçen, B. Aktaş, "Yeni Nesil Demiryolu Traversleri ve Yerli FRP Donatı Kullanımının Deneysel Araştırması," *Demiryolu Mühendisliği*, vol.13, pp.53-64, Ocak 2021, doi: 10.47072/demiryolu.803452
- [7] F. Çeçen, B. Aktaş, "Lamine CFRP donatılı traverslerin deneysel ve sonlu eleman analizleriyle incelenmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, vol.14, pp.26-38, Temmuz 2021, doi: 10.47072/demiryolu.869946
- [8] F. Çeçen, B. Aktaş, "Modal and harmonic response analysis of new CFRP laminate reinforced concrete railway sleepers," *Engineering Failure Analysis*, vol.127, 105471, May 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105471

- [9] F. Çeçen, B. Aktaş, “B70 Tipi Demiryolu Traverslerinde Polipropilen Fiber Kullanımının Deneysel İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol.15, pp. 158-169, Ocak 2022, doi: 10.47072/demiryolu.990316
- [10] F. Çeçen, B. Aktaş, “Incremental LUR tests of new LCR concrete railway sleepers,” *Engineering Failure Analysis*, vol.130, 105793, Sep 2021, doi: 10.1016/j.engfailanal.2021.105793
- [11] F. Çeçen, B. Aktaş, H.Öztürk, İ.Ş.Öztürk, M.B. Navdar, “Karbon-Fiber Plaka Donatılı Traverslerin, B70-Tipi Öngerilmeli Beton Traverslerle Karşılaştırmalı İncelenmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol.15, pp. 97-110, Ocak 2022, doi: 10.47072/demiryolu.1028740
- [12] F. Çeçen, B. Aktaş, H.Öztürk, M.B. Navdar, İ.Ş.Öztürk, “Behaviour of new LCR and ordinary prestressed concrete railway sleepers under repeated impact loads,” *Construction and Building Materials*, vol.319, 126151, Dec 2021, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.126151
- [13] F. Çeçen, B. Aktaş, H.Öztürk, İ.Ş.Öztürk, M.B. Navdar, “Comparison of new LCR and ordinary prestressed concrete railway sleepers with LUR tests,” *Construction and Building Materials*, vol. 321, 126414, Jan 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.126414
- [14] W. Ferdous, A. Manalo, O. Alajarmeh, A.A. Mohammed, C. Salih, P.Yu, M. M.Khotbehsara, P. Schubel, “Static behaviour of glass fibre reinforced novel composite sleepers for mainline railway track,” *Engineering Structures*, vol.229, 111627, Dec 2020, doi:10.1016/j.engstruct.2020.111627
- [15] A.S.Hameed, A.P. Shashikala, “Suitability of rubber concrete for railwaysleepers,” *ScienceDirect*, vol.8, pp. 32-35, Feb 2016, doi: 10.1016/j.pisc.2016.01.011
- [16] X.F. Li, S.I. Doh, G.Q. Jing, B.W. Chong, A.L. Suil, S.C. Chin, “A comparative review on American, European and Chinese standard for railway concrete sleeper,” *Physics and Chemistry of the Earth*, vol. 124, 103073, Sep 2021, doi: 10.1016/j.pce.2021.103073
- [17] M.M. Shokrieh, M. Rahmat, “On the reinforcement of concrete sleepers by composite materials,” *Composite Structures*, vol. 76, no.4. pp. 326-337, 2006, doi: 10.1016/j.compstruct.2005.05.005
- [18] G. Tacim, C. Gürer, A.R. Boğa, “Öngermeli beton traverslerde karşılaşılan sorunlar ve çözüm önerleri,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 9, pp. 10-19, 2019
- [19] Dywidag, *Öngerilmeli beton traverslere mahsus ani kalıptan çıkarma usulüne göre imalat talimatı*, 1976

Özgeçmiş



Reşat KÖROĞLU

TCDD Uşak Emniyet ve Kalite Yönetimi (EKAY) Kontrolörlüğünde EKAY Kontrolörü olarak görev yapan yazar, Uşak Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde yüksek lisans eğitiminin tez aşamasındadır. Demiryollarındaki 25 yıllık iş tecrübesiyle milli ve ekonomik demiryolu beton traversleri geliştirmek adına çalışmalar yapmaktadır.

E-Posta: resatkoroglu@tcdd.gov.tr



Ömer Faruk ERKENDİRCİ

Lisans eğitimini ODTÜ, Yüksek Lisans eğitimini Gaziantep Üniversitesinde, Doktora eğitimini Selçuk Üniversitesinde tamamlamış, Beykent ve İstanbul Aydın Üniversitelerinde yaptığı çalışmalar sonrasında halen Uşak Üniversitesi Mühendislik Ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünde çalışmaktadır.

E-Posta: omer.erkendirci@usak.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Reşat KÖROĞLU: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım. Ömer Faruk ERKENDİRCİ: Kaynaklar, Doğrulama, Kontrol.



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, Yayımlama/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:

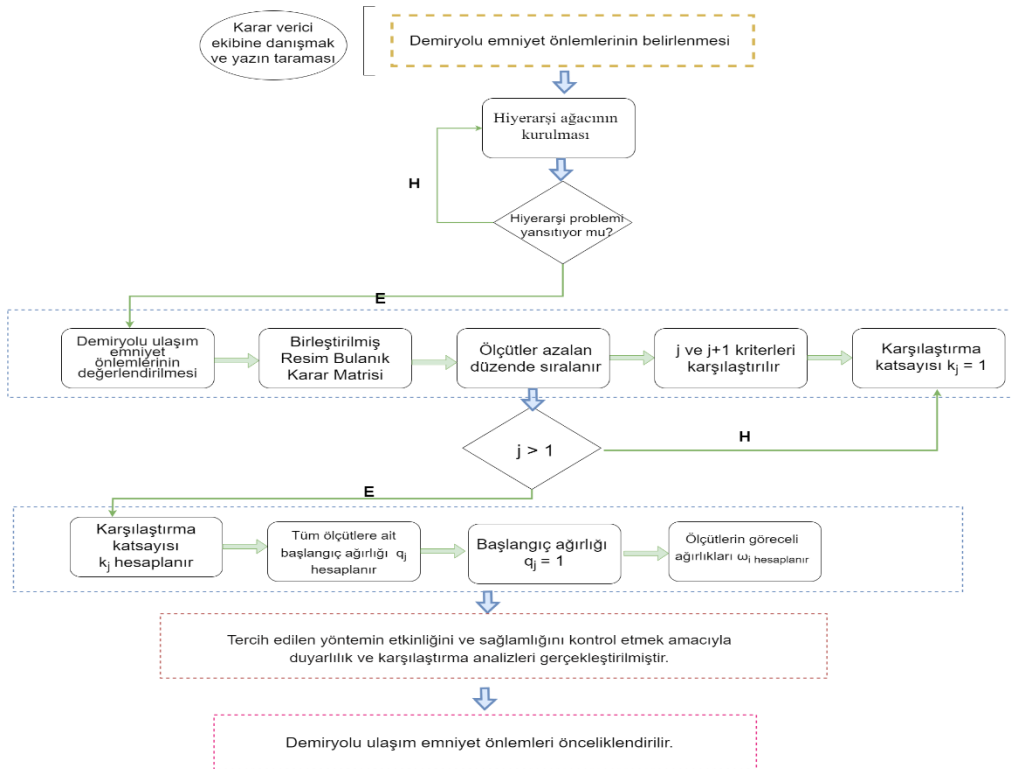
- Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları çalışanları ve akademisyenlerin oluşturduğu uzman ekip ve kapsamlı bir yazın taraması sonucunda 8 adet demiryolu emniyet önlemi ortaya çıkarılmıştır.
- Demiryolu ulaşım emniyet önlemlerinin sıralanması bir ÇKKV problemidir ve emniyet önlemlerinin değerlendirilebilmesi 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 ÇKVV 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]:

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

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

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

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

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 seyrüseferini engelleyecek dış etkenlerin girişini önlemektedir. Bu önlem, demiryolu hatlarının çevresel emniyetini artırıp, 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

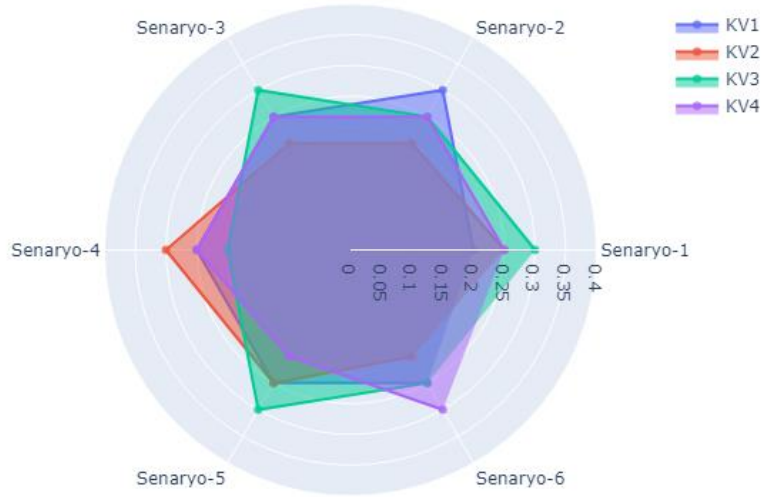
Demiryolu Emniyet Önlemleri	S_j	k_j	q_j	w_j	Önlemlerin Sıralaması
Demiryolu Altyapısının Periyodik Bakımı (K5):	0,815	1,000	1,000	0,206	1
Demiryolu Üstyapısının Periyodik Bakımı (K4):	0,771	1,044	0,958	0,197	2
Demiryolu Taşıtlarının Periyodik Bakımı (K2):	0,447	1,324	0,724	0,149	3
Tren Emniyet Teknolojilerinin 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

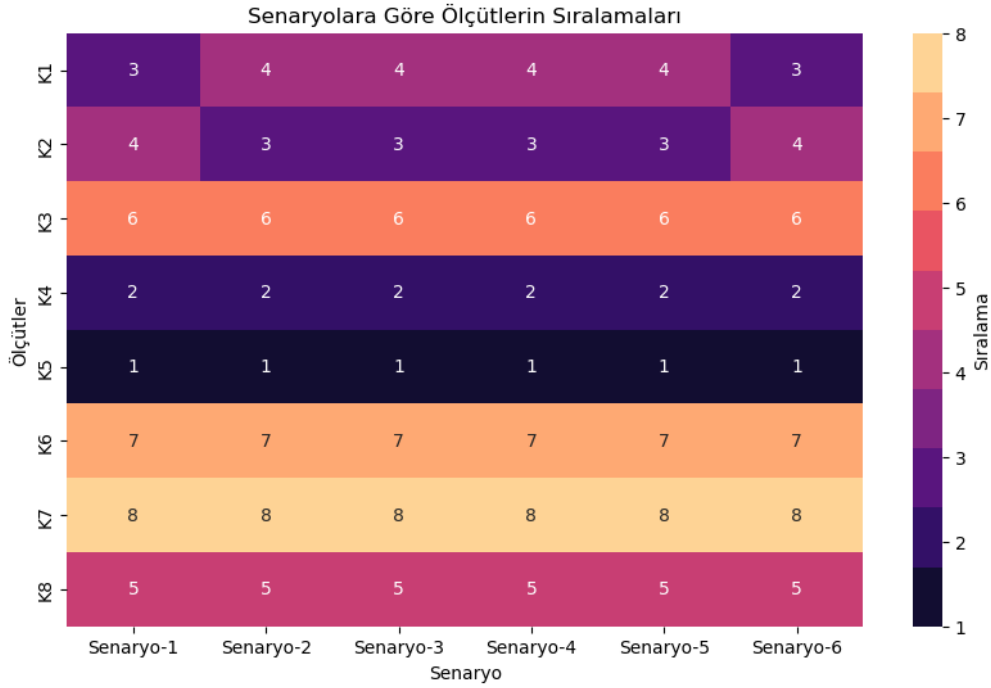
Duyarlılık analizi, farklı ağırlıklar altında her bir ölçütün karar verme süreci üzerindeki etkisini ölçmektedir. Böylece önerilen metodun ağırlık değişikliklerine karşı dayanıklılığını veya hassasiyetini ve metodun doğruluğunu test etmeye yardımcı olmaktadır. Ağırlıklarda meydana gelen değişim, ölçütlerin 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 önlemi bu senaryolarda dördüncü sıraya denk gelmektedir. Duyarlılık analiz sonuçları ve ölçütlerin aldığı sıralamalar Şekil 3’te gösterilen ısı haritası yardımıyla görselleştirilmiştir.



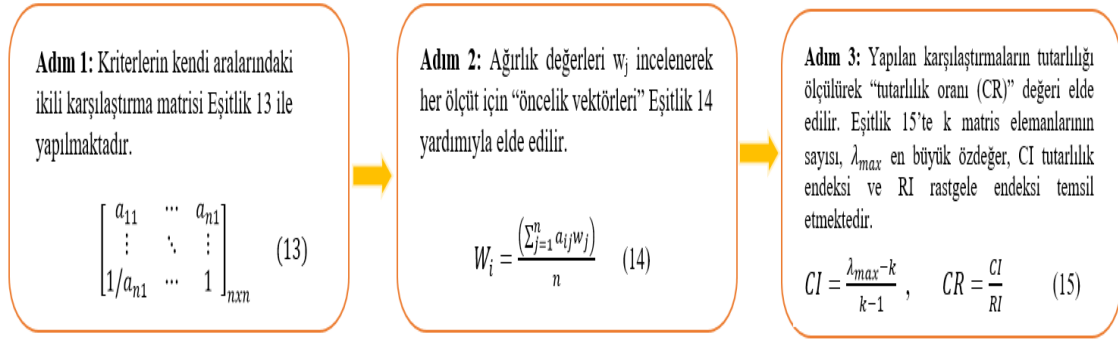
Şekil 3. Duyarlılık analiz sonuçları

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.

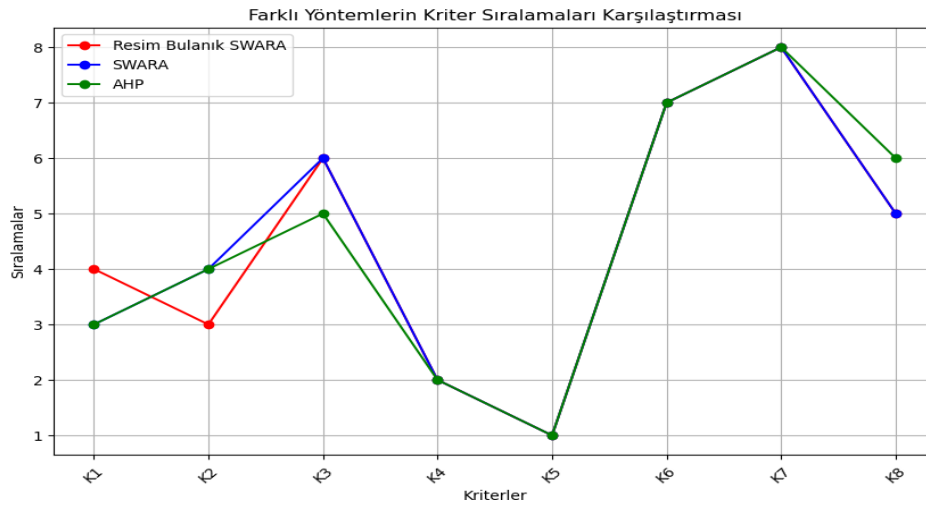
3.2. Karşılaştırma analizi

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. Caspele & 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.



Demiryollarında Jeolojik Tehlikelerin Belirlenmesi ve Afet Risk Yönetimine Katkısı

Emre Aytuğ ÖZSOY^{ORCID}

Eskişehir Teknik Üniversitesi, Porsuk Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Yapı Denetim Programı, Eskişehir, Türkiye

eaoszoy@eskisehir.edu.tr

(Alınış/Received: 30.05.2023, Kabul/Accepted: 10.07.2024, Yayımlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Günümüzde iklim değişikliği ve küresel ısınmanın etkisiyle her geçen gün yaşanan afet sayısı artmaktadır. Afetlerin dünya ölçeğinde dağılımına bakıldığında Deprem şüphesiz ilk sırayı almaktadır. Bilindiği üzere ülkemiz 11 ilimizi yakından etkileyen 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerini yaşamıştır. Kısa aralıklarla ve şiddeti yüksek olan bu iki deprem sonrası can ve mal kayıplarımız üzücü bir tablo haline gelmiştir. Deprem sonrası Ulaştırma-Lojistik açısından incelediğimizde 11 ilin kara-hava ve demir yolu bağlantıları afetin ilk 72 saatinde maalesef sekteye uğramıştır. Demiryolları özelinde bu tabloyu incelediğimizde Demiryollarında Jeolojik Tehlikelerin belirlenmesinin önemi bir kez daha ortaya çıkmıştır: Deprem, Heyelan, Oturma-Çökme ve Taşkın-çamur akması gibi jeolojik etkenler demiryollarında jeolojik tehlike risklerinin önde gelenidir. Bu riskler tekil olmayıp deprem sırasında ikili üçlü etkiler yaratabilmektedir. Yapılan bu çalışmada Demiryollarında Jeolojik olası riskler belirlenerek bu risklerin afet risk yönetimine katkısı incelenmiş ve bu kapsamda çözüm önerileri sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Demiryolu, Jeolojik Tehlikeler, Deprem, Afet Risk Yönetimi, K. Maraş Depremleri

Identification of Geological Hazards in Railways and Its Contribution to Disaster Risk Management

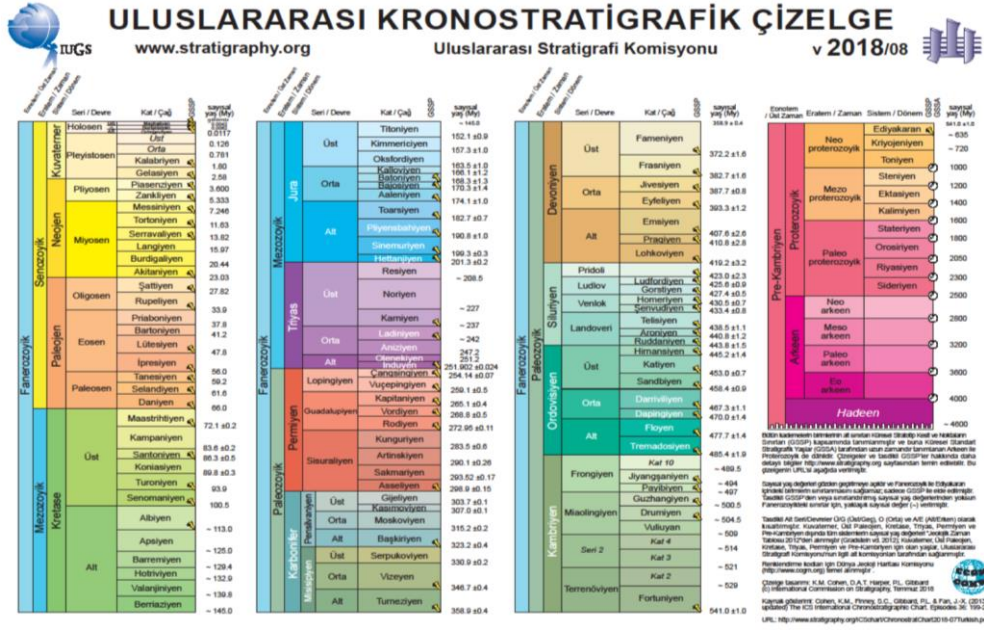
Abstract: Nowadays, the number of disasters is increasing day by day due to the effects of climate change and global warming. When looking at the distribution of disasters on a world scale, Earthquake undoubtedly ranks first. As it is known, our country experienced the Kahramanmaraş earthquake on February 6, 2023, which closely affected 11 provinces. After these two earthquakes that occurred at short intervals, our loss of life and property became a sad picture. When we examine the aftermath of the earthquake in terms of Transportation-Logistics, unfortunately the land-air and railway connections of 11 provinces were disrupted in the first 72 hours of the disaster. When we examine this table specifically for railways, the importance of determining Geological Hazards in Railways has once again emerged: Geological factors such as Earthquake, Landslide, Subsidence-Collapse and mud flow are the leading geological hazard risks in railways. These risks are not singular, but can create double or triple effects during an earthquake. In this study, possible geological risks in railways were determined and the contribution of these risks to disaster risk management was examined and solution suggestions were presented in this context.

Keywords: Railway, Geological Hazards, Earthquake, Disaster Risk Management, K. Maras Earthquakes

1. Giriş

Jeoloji bilimi dünyanın oluşumundan günümüze kadar geçen yaklaşık 4,5 milyar yıllık süreçte tanıklık etmektedir. Jeolojik zaman cetveline bakıldığında Jeoloji ve Jeolojik Zaman üzerine kafa yoran kişilerin göreceli geniş düşünceli olduklarına dair değerlendirmeler yaygındır. Bilgi tabanlı toplum yaratmanın da en kestirme yolu bireylerin doğayı ve yaşadıkları çevreyi algılamalarını sağlamaktır. Şekil 1. de gösterilen Jeolojik Zaman Çizelgesi bu yönde yararlı bir araç olabilir ve başarı ile kullanılabilir [1].

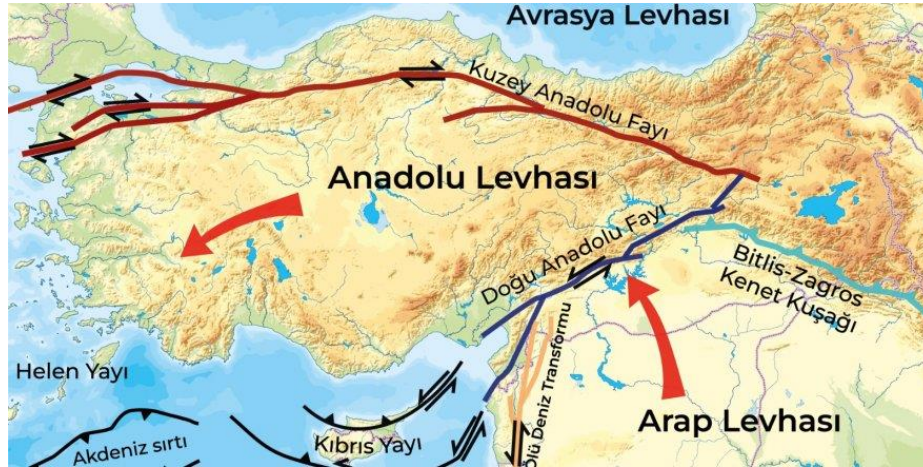
Atıf için/Cite as: E.A. Özsoy, "Demiryollarında jeolojik tehlikelerin belirlenmesi ve afet risk yönetimine katkısı," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 123-140, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1307133



Şekil 1. Türkçeleştirilmiş jeolojik zaman çizelgesi [1]

Jeolojik Zaman Çizelgesi, tam adı ile “Uluslararası Kronostratigrafik Çizelge”, adeta matruşka oyuncakları gibi iç içe geçmiş bilgileri bulundurmaktadır. Oradaki her çizgi, her işaret ve her rakamın temsil ettiği ayrı hususlar vardır. Her Eratem, Sistem, Seri ve kat adının etimolojik ve stratigrafik hikâyesi ayrıdır [2].

Geçen 4,5 milyar yılın özeti şeklinde olan çizelge jeolojik tehlikeleri belirmemizde bizlere yol gösteren bir kaynaktır. Holosen devresi son yaşadığımız dönemi içermektedir. Bu süreç devam ederken paralelinde levha (plaka) tektoniği denilen sistem kıtaların oluşumu ve gelişimine devam etmektedir. Günümüzde yaşanan depremlerin haritası bu sistemin sonucudur. Ülkemiz özelinde bunu incelediğimizde üç ana unsur göze çarpmaktadır:

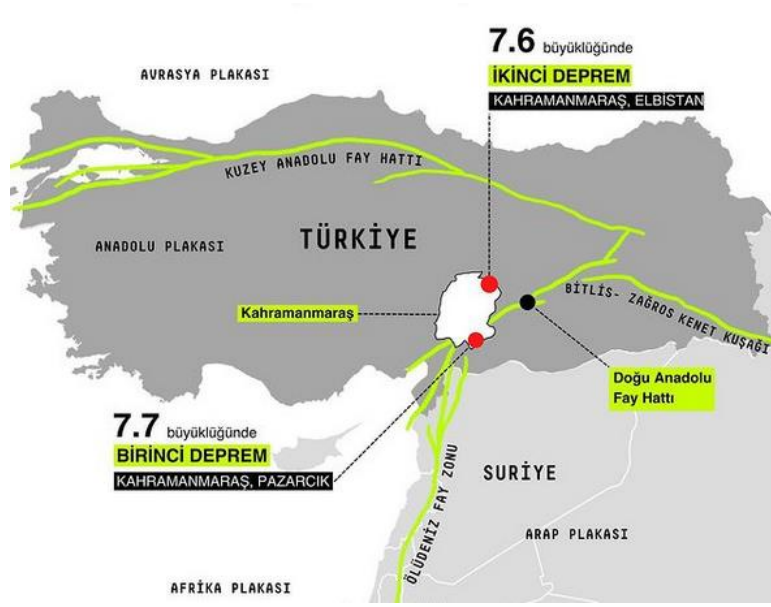


Şekil 2. Türkiye Levha Tektoniği haritası [3]

Birincisi ülkemizin yüz ölçümünün dörde üçünü oluşturan Anadolu levhası; kuzeyde Avrasya levhası ve güneydoğumuzda Arap levhası. Arap levhasının haritada gösterildiği şekilde Anadolu levhasına bindirmesi sonucu her yıl saat istikametinin tersi yönünde Anadolu Levhası yılda 2-3 mm Egeye doğru kaymaktadır. Bununla birlikte kapalı bir sistem özelinde bunu düşündüğümüzde bu fiziğin temel kurallarından etkiye tepki mekanizmasıyla Bitlis-Zagros kuşağı ve Avrasya

levhasının direnciyle Kuzey Anadolu Fay Zonu ve Doğu Anadolu Fay Zonu meydana gelmiştir. Bu sıkışma sonucu aynı zamanda Afrika levhasının uzantısı Akdeniz sırtı Ege levhasının direncine karşılık Egedeki Horst Graben fay sistemlerini meydana getirmiştir [3].

Bu bağlamda yaşadığımız 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Pazarcık ve Elbistan depremlerinin odak noktalarını bu sistem üzerine aktardığımızda karşımıza Şekil 3. deki bu harita çıkmaktadır:



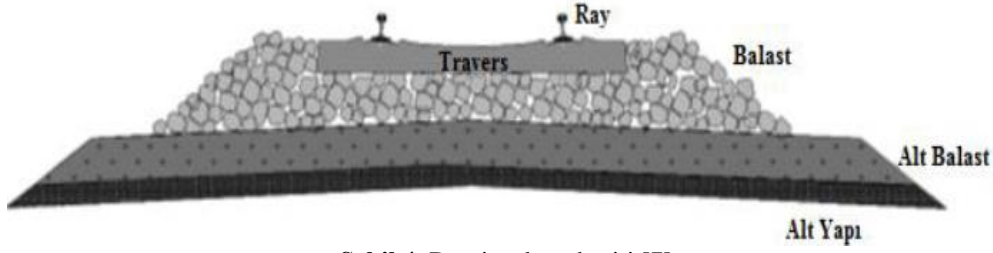
Şekil 3. 6 Şubat 2023 K. Maraş depremlerinin DAF fay zonundaki yerleri [4]

Görüldüğü üzere meydana gelen depremler Doğu Anadolu Fay zonu üzerinde veya kollarında meydana gelmiştir. Bu noktadan hareketle depremler asla tesadüf değildir. Her depremin özelinde depremin kökeni ve istatistiksel parametreleri vardır. Bunlara bağlı olarak Jeolojik tehlikeler belirlenir.

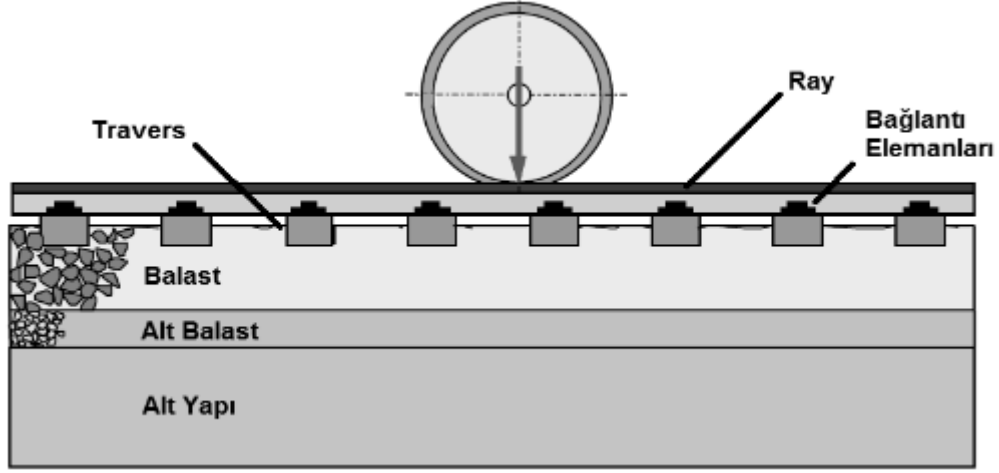
2. Demiryolu Altyapısı ve Jeolojik Tehlikeler

Demiryolu yapısal sistemi, trafik ve iklim etkilerine dayanacak şekilde, yolu ve altyapıyı gelen yüklere karşı korumak, demiryolu taşıtlarının işletme maliyetlerini, yolcuların güvenliğini ve konforunu kabul edilebilir limitlerde tutmak için tasarlanır. Daha hızlı trenler ve yüksek dingil yüklerinin bir arada kullanılması ile maliyetlerin düşürülmesi gereksinimi, sistemin daha iyi anlaşılması ve bunun altyapının davranışı üzerindeki etkisini anlama gereksinimini ortaya çıkarmıştır. Bu nedenle, modern demiryollarının tasarımında jeolojik tehlikelerin geoteknik açıdan değerlendirilmesi ve ekonomik ilkeleri birleştiren akılcı yaklaşımlara gerek duyulmaktadır [5].

Günümüzde, tekerlekli demiryolu taşıtları, balastlı ve balastsız olarak anılan iki tür üst yapı üzerinde hareket etmektedir. Balastlı demiryolu hatları Şekil 4 ve 5' de gösterilen rayların ve traverslerin oluşturdukları yol çerçevesi, bu çerçevenin altına döşenmiş balast-alt balast adı verilen kırma taş tabakaları ve bunların altındaki altyapı adı verilen değişik zemin tabakaları ya da köprü, viyadük, tünel vb. sanat yapılarından oluşmaktadır [6].



Şekil 4. Demiryolu enkesiti [7]

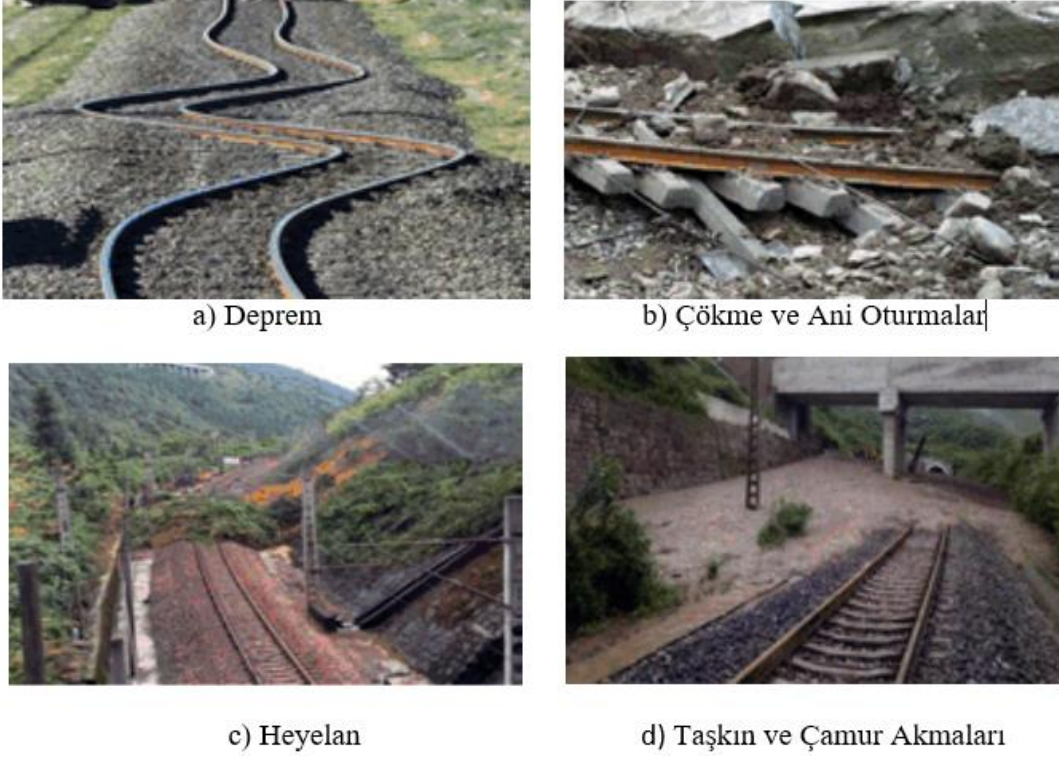


Şekil 5. Demiryolu boykesiti [7]

Alt yapıyı oluşturan jeolojik birimler için Koridor, Güzergâh, Kesin Hat, Ön Proje ve Kesin proje aşamalarında jeolojik-jeoteknik etütler istenmektedir [8]. Bu şartnameye göre Jeolojik etüt çalışması 1/25.000 ölçekli haritalar üzerinde yapılır. Jeolojik etüt:

- Jeolojik formasyonların litolojik, paleontolojik, mineralojik ve petrografik özellikleri,
- Jeolojik formasyonların alansal dağılımı,
- Jeolojik formasyonların istifsel ilişkisi (tarihsel jeolojisi),
- Yapısal özelliklerin harita, tip kesit ve şekillerle açıklanması,
- Ana süreksizlik (tabaka, fay, eklem, uyumsuzluk, dokanak v.b.) sistemlerinin haritalanması,
- Özellikle güncel tektonik açısından araştırmalardan oluşmaktadır.

Şartnamedeki Jeolojik birimler yani formasyonlar Şekil 6'da incelendiğinde Demiryolu açısından Jeolojik Tehlikeler şu şekilde karşımıza çıkar: Deprem (a), Çökme ve Ani Oturmalar (b), Heyelan (c), Taşkın ve Çamur Akmaları (d).

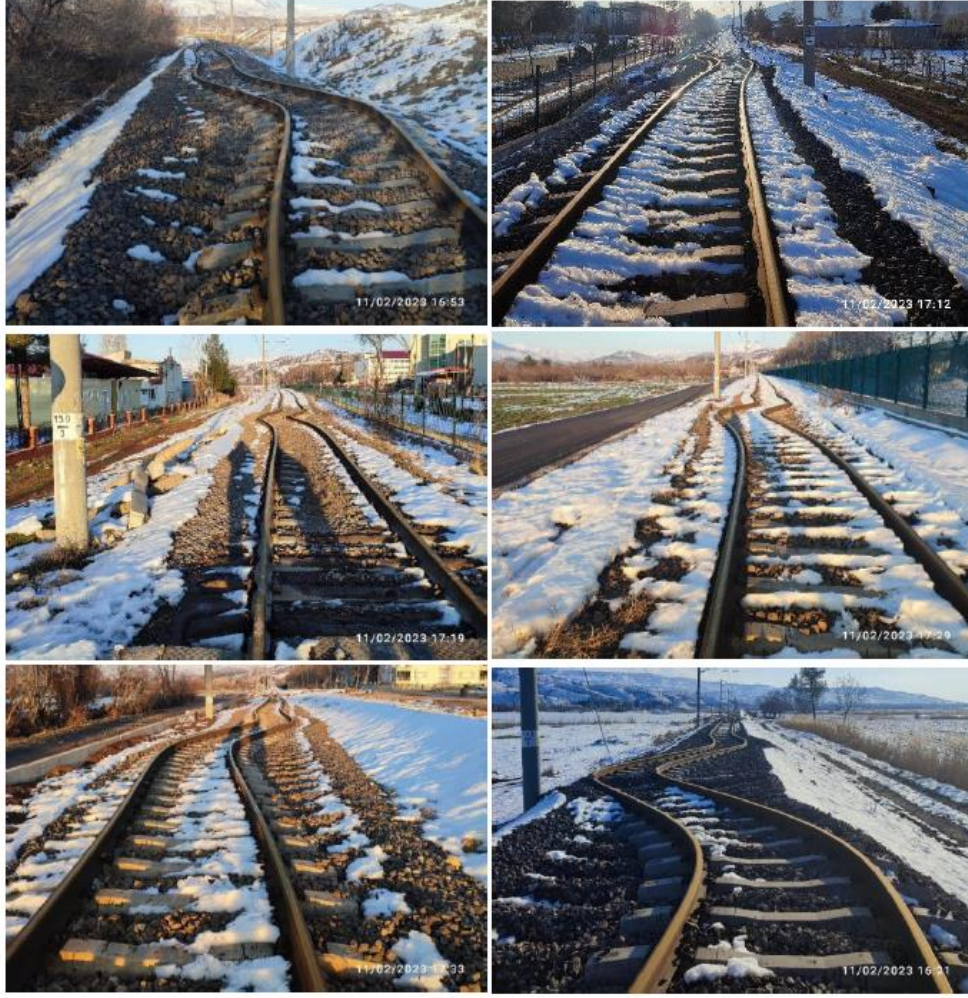


Şekil 6. demiryollarında jeolojik tehlikeler [9]

2.1. Deprem

Afet dediğimizde hiç şüphesiz ilk sırada deprem yer almaktadır. Yerkürenin doğal bir devinimi olan bu süreç günümüzde teknolojinin gelişmesine karşın halen “Ne zaman deprem olacak?” sorusunu cevapsız bırakmaktadır. Ancak var olan jeolojik verileri ve istatistiksel analizleri kullanarak bu afete karşı önlemler alınması gerekmektedir.

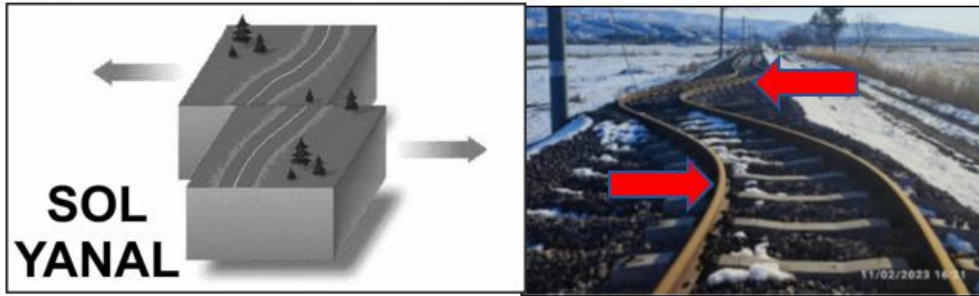
Demiryolları özelinde jeolojik bu risk her daim yaşadığımız depremler sonrasında karşımıza çıkmaktadır. Son yaşadığımız 6 Şubat 2023 K. Maraş depremleri sonrasında Pazarcık ve Gölbaşı tren istasyonlarında deprem etkisine bağlı Şekil 7’de gösterilen yapısal deformasyonlar oluşmuştur [10].



Şekil 7. Fayın yapısal özelliğine bağlı olarak üstyapıdaki deformasyonlar [10]

[10]'nin saha gözlemlerini incelediğimizde Şekil 7' de görülen üst yapı salınımlarının aktörü fayın karakteristik özelliğinde bulunmaktadır. Depremin olduğu bu nokta Şekil 3' de gösterilen haritada Doğu Anadolu Fay Zonu (DAF) üzerinde meydana gelmiştir.

Bu fayın karakteristik özelliği sol yanal doğrultu atımlı olmasıdır. S-tipi yanal atım diye adlandırılan bu olay fayın bir doğrultu üzerinde iki bloğun farklı yönlerde hareketi sonucudur. Bir başka deyişle bu tür faylarda fay aynasını karşımıza aldığımızda, Şekil 8'de gösterilen biçimde bulunduğumuz taraftaki blok sağa, karşı blok sola hareket etmiştir.



a) Şematik

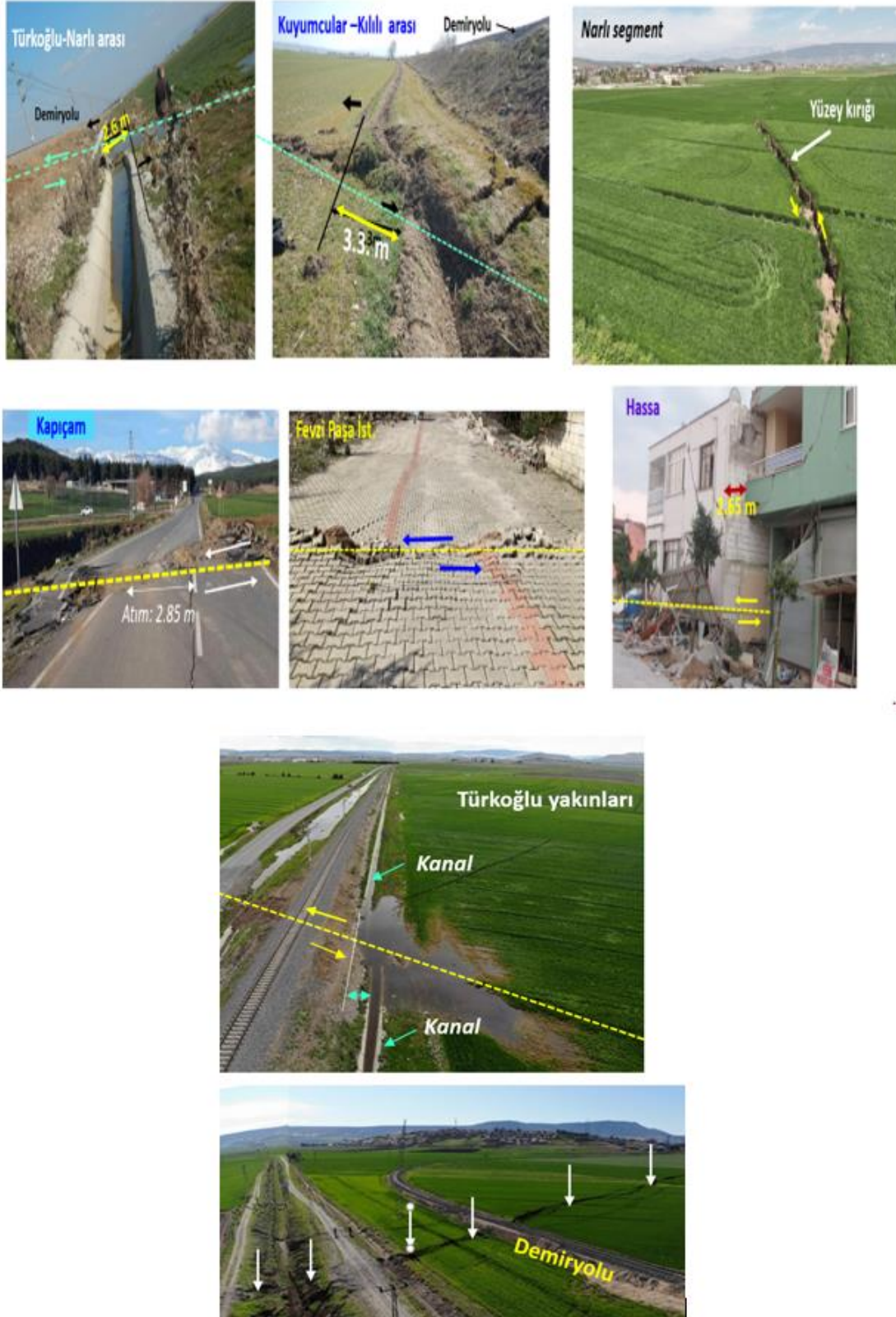
b) Saha [10]

Şekil 8. Doğrultu atımlı sol yanay fayın şematik (a) ve saha (b) görüntüleri

Aynı depremlerde Islahiye -Fevzi paşa Tren istasyonunda yerel zemin özelliklerine bağlı olarak yüksek yer ivmeleri sonucu Şekil 9 gösterilen lokomotif ve vagonlar devrilmiştir.



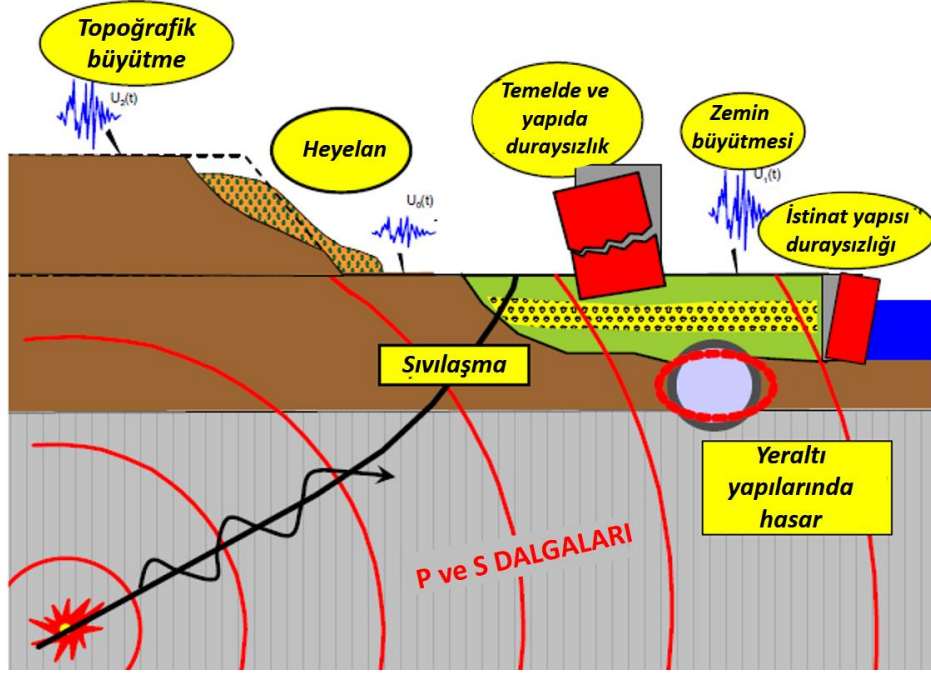
Şekil 9. Devrilen lokomotif ve vagonlar [11]



Şekil 10. Pazarcık depreminin sonrasında meydana atımlar ve saha gözlemleri [11]

Şekil 10'da gösterilen tüm durumlar bölgenin jeolojik yapısı ile ilişkilidir. Bölgede Şekil 1'de gösterilen Jeolojik zaman çizelgesine göre Kuvaterner yaşlı alüvyal çökeller geniş yer kaplar.

Zayıf ve çoğu kez suya doymun zeminler oldukları için Şekil 11’de gösterilen sıvılaşmaya karşı oldukça duyarlılığı yüksektir ve deprem açısından son derece önemlidir.



Şekil 11. Jeolojik açıdan sismik tehlikeler [11]

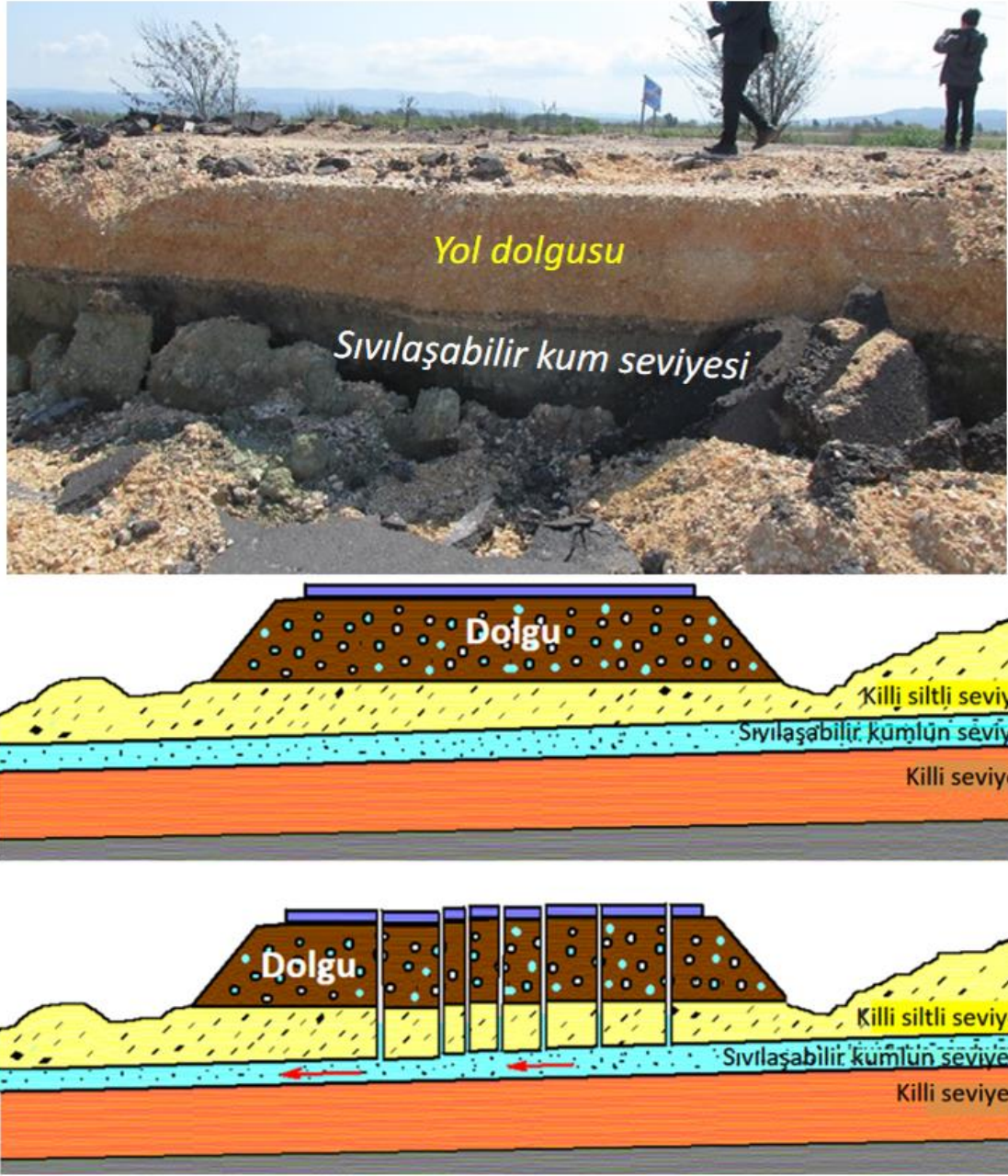
Deprem büyüklüğü arttıkça sıvılaşma deprem kaynağından daha uzak mesafelerde de oluşabilmektedir. Şekil 12 ‘de Gölbaşı tren istasyonunda deprem sonrası sıvılaşma gözlenmiştir.



Şekil 12. Raylarda sıvılaşma Gölbaşı İstasyonu [11]

2.2. Çökme ve ani oturmalar

Depremden sonra Jeolojik tehlikelerinin başında Çökmeler veya Ani oturmalar gelmektedir. Jeolojik katmanların yapısal durumuna göre gelişen bu süreç özellikle dolgu alanlarda Şekil 13’de gösterilen sıvılaşmanın etkisiyle ince taneli malzemelerin (kumlu killi, silt) yeraltı suyu olup olmamasına karşın taşıma güçlerini kaybetmesidir.



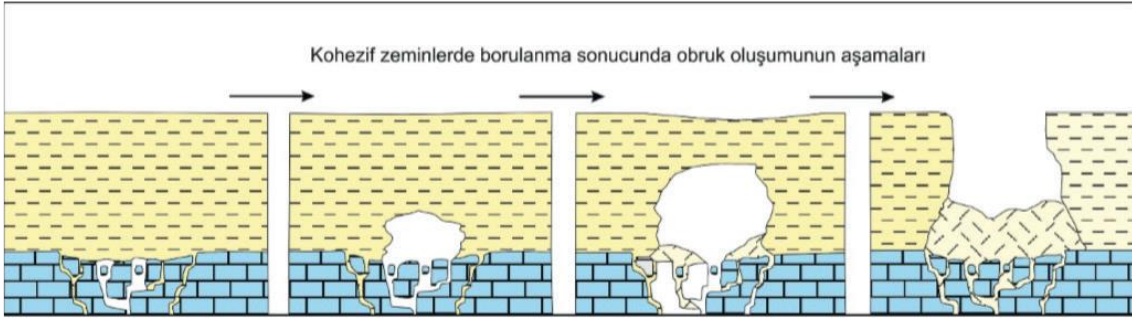
Şekil 13. Sıvılaştırma sonucu dolgu zeminlerde çökmeler [11]

Ani oturmalar grubunda bir başka jeolojik tehlike obruk oluşumlarıdır. Obruk oluşumlarında temel faktörler litolojik, hidrojeolojik, tektonik, klimatolojik vb. gibi doğal unsurlar olup, bazen antropojenik etkiler, yani insan aktiviteleri de bu doğal oluşumu hızlandırmakta ve sayısını artırmaktadır.

Obrukların oluşumlarına etki eden temel faktörler genellikle obrukların içinde oluştuğu kayaçların litolojik özellikleri, çevre kayaçlarla etkileşimleri ve bu kayaçların etkileşim halinde bulunduğu yüzey ve yeraltı suyunun nitelikleri ve kuraklık gibi iklimsel faktörlerdir. Ayrıca fay sistemleri ve insana bağlı olarak değişen ortam şartları obruk oluşumlarını tetikleyici etmenlerdir. [12].

Orta Anadolu’da gerçekleştirilen jeolojik, yapısal jeoloji, jeoteknik, mineralojik, jeokimyasal ve hidrojeolojik araştırmalarda obrukların artmasının temel nedeninin aşırı ve kontrolsüz yeraltısuyu kullanımı ve yeraltısı seviyesindeki düşümlere bağlı olduğu öne sürülmektedir [13].

Kohezyonlu topraklarda çökme ani olarak gelişmekte olup yeraltında bulunan boşluklar zaman içinde büyümektedir. Şekil 14’de görüldüğü üzere boşluklar büyüdükçe tavan birimlerinin tabaka kalınlığı azalmakta ve tavanın incilmesi sonucu çökme gerçekleştiğinde dik ve derin çukurlar oluşmaktadır.

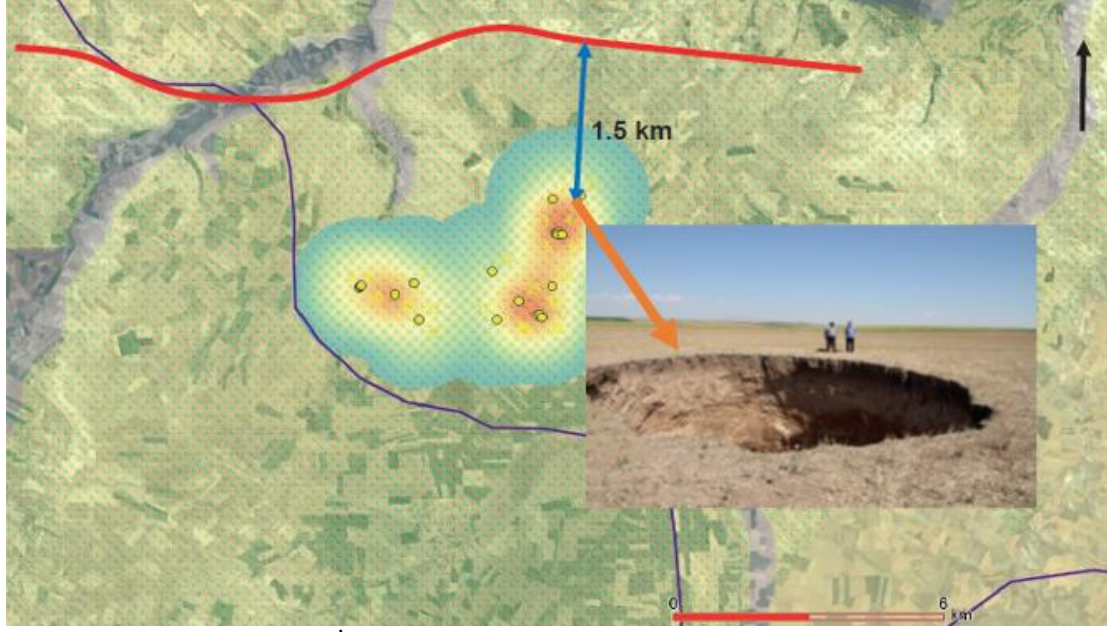


Şekil 14. Kohezyonlu malzeme ile örtülü karstik ortamda ‘külçe’ obruğu oluşum aşamaları [12]

Obruk tehlikesi güncel olarak Eskişehir-Ankara Yüksek Hızlı Tren güzergahına yakın lokasyonlarda meydana gelmektedir. Bunun başlıca nedeni tarımsal sulama adına açılan birçok ruhsatsız kuyudan pompajla aşırı su çekilmesidir. Kuraklığında etkisiyle pompajla çıkarılan suyun yerine aynı hacimde su sirkülasyonu olmadığı için ani oturmalar olmaktadır.

Saha Şekil 15 ‘de gösterilen Eskişehir’e karayolu ile yaklaşık 120 km uzaklıkta Sivrihisar-Emirdağ Karayolunun 35 km doğusunda yer almaktadır. Konya ve Afyon İl sınırlarının kesiştiği noktaya yakındır. Sığırcık Köyüne kadar yol asfalt olup, daha sonra toprak yol olarak devam etmektedir. Obrukların bulunduğu yerler ise tarlalar arasında kaldığı için ulaşım zordur.

Haritada kırmızı çizgi ile gösterilen güzergâh yaklaşık 1.5 km. kuzeyinden Ankara-İzmir Yüksek Hızlı Tren yolu geçmektedir. Şu anda hızlı tren yolu yapım çalışmaları devam etmektedir. Yine sahanın 22 km doğusunda ise DSİ’nin yapmakta olduğu Gökpınar Barajı inşaatının çalışmaları sürmektedir [12].



Şekil 15. Riskli alanın Ankara-İzmir Yüksek Hızlı tren yoluna olan uzaklığı yaklaşık 1.5 km (1/100.000 ölçekli jeoloji haritası) [13]

2.3. Heyelan

Heyelanlar toprak kayması ya da kaya düşmeleri şeklinde karşımıza çıkar. Özellikle ikinci afet olarak en çok görülen jeolojik tehlikedir. Şekil 16’da özellikle yüzey kırıklarına yakın yerler boyunca ve morfolojik olarak yüksek kesimlerde yaygın kaya düşmeleri olmaktadır. Her iki depremde de yüksek ivme değerlerinin gerçekleşmesi nedeniyle bazı yerlerde 4-5 m’den 8-10 m’ye kadar boyutlardaki çok iri bloklar da düşmüştür. Şekil 17 ‘de ayrıca çok iri blokların bile yuvarlanma mesafeleri oldukça uzun olup, bunlar yollara, istinat yapılarına, karayolu çitleri ve bariyerleri ile elektrik direklerine hasar vermiştir. Kaya düşmeleri artçı depremlerle de devam etmiştir.



Şekil 16. Fevzipaşa tren istasyonunda kaya düşmeleri [11]



Şekil 17. Değirmencik, Tevekkeli ve Sakçağöz mevkieindeki kaya düşmeleri [11]

2.4. Taşkın ve çamur akmaları

Taşkın ve Çamur akmaları sadece deprem sonrası yaşanan bir afet çeşidi değildir. Günümüzde iklim değişikliği ve kuraklık nedeniyle ani aşırı yağışlardan dolayı taşkınlar sıkça karşımıza çıkmaktadır. Yakın geçmişe baktığımızda 2018 Temmuz ayında Tekirdağ-Çorlu-Sarılar bölgesinde yaşanan Şekil 18’de gösterilen tren kazasının ana etmenini taşkın akmaları olduğu karşımıza çıkmaktadır. Bölgenin jeolojisini incelediğimizde ince taneli malzeme diye adlandırılan kum-silt-kil ardalı alüvyon bulunmaktadır [14].



Şekil 18. Kaza bölgesi menfezin ve yakındaki akarsuların Google Earth görüntüsü [14]

Kaza yeri, İncirli Deresi'nin tren yolunu kestiği yerdedir. İncirli Deresi, tren yolu altından bir menfezle geçerek, 90 m kuzeydeki Çorlu Çayı'na karışmaktadır. Şekil 19'da görüldüğü gibi Menfezin tabanında çamur akış izi ve yoğun bir çamur yığıntıları gözlenmiştir [14].



Şekil 19. Havza içerisinde gelişmiş sel yarıntısı (a), derenin getirdiği çamur malzemenin tren yolu menbası görünümü (b), tren yolu altındaki menfezin menba ve mansaptan görünümü (c menba, d mansap), askıda kalan raylar (d) ve onarılmaya başlanan rayların (e) görünümü [14]

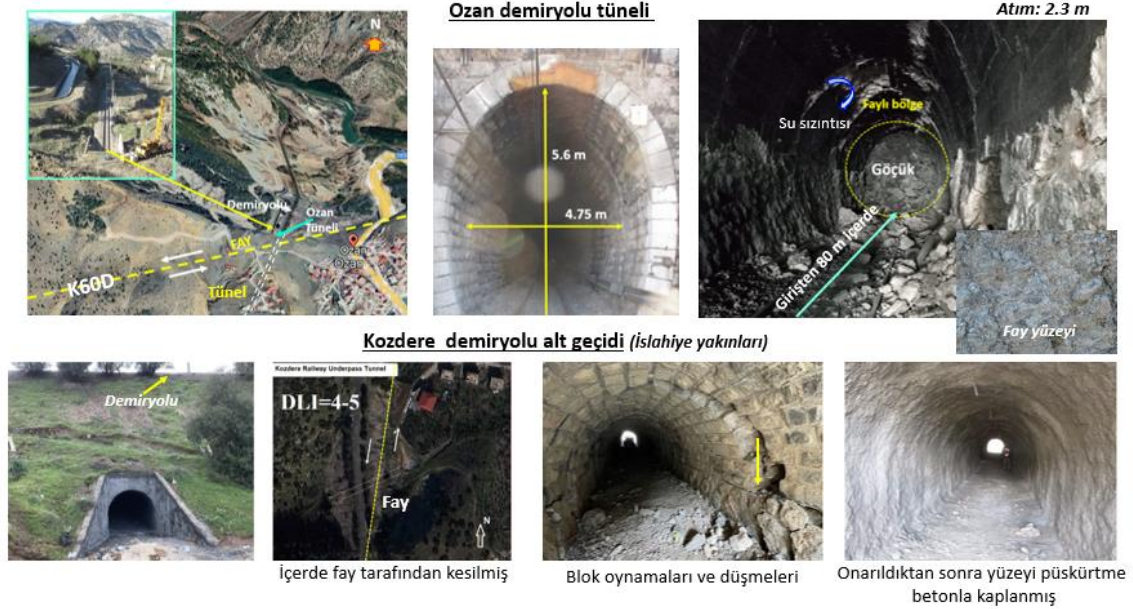
azanın oluştuğu menfezin Şekil 20 görüldüğü gibi çamur ve taşkın akmaları nedeniyle menfez açıklığının yarıya indiği gözlenmiştir [14].



Şekil 20. Rayların altındaki dolgunun boşalması sonrası ortaya çıkan görüntü [14]

2.5. Afetlerin yeraltı yapılarına etkisi

Deprem, Heyelan, Çökme ve ani oturmalar ile taşkın-çamur akmaları gibi afetlerin yeraltı yapılarına etkileri oldukça önemlidir. Yaşanan K. Maraş depremleri özelinde demiryolu açısından incelediğimizde Şekil 21’de görülen yer hareketleri ve kalıcı yer değiştirmeler Gaziantep-İslahiye yanındaki Kozdere Demiryolu alt geçidinde ve Ozan Demiryolu tüneline karşımıza çıkmaktadır.



Şekil 21. Ozan Tüneli ve Kozdere alt geçidi hasar gözlemleri [11]

3. Afet Risk Yönetimi

Demiryolu sistemleri, toplu taşımanın önemli bir bileşeni olarak stratejik bir öneme sahiptir. Bu sistemlerin afetlere karşı dayanıklı hale getirilmesi, kamu güvenliği ve ekonomik istikrar açısından kritik bir gerekliliktir. Afet risk yönetimi, demiryolu altyapısı ve işletmelerinin olası afetlere karşı korunmasını ve bu afetlerin olumsuz etkilerinin en aza indirilmesini amaçlar. Afet türleri doğal etkenlerle ve insan kaynaklı etkenlerle ortaya çıkmaktadır. Afetlerin en büyük özelliği toplumların iş görme kabiliyetini etkilemesi ve toplumların kendi başlarına üstesinden gelememeleridir [15].

Demiryollarında jeolojik tehlikelerin belirlenmesi ve afet risk yönetimine katkısı hem demiryolu güvenliği hem de kamu güvenliği açısından büyük önem taşır. Jeolojik tehlikeler, demiryolu hatlarının geçtiği bölgedeki doğa olaylarına bağlı olarak ortaya çıkar. Bu tehlikelerin belirlenmesi ve yönetilmesi, demiryolu altyapısının mukavemetini artırır ve olası kazaları ve kesintileri minimize eder.

İncelenen jeolojik tehlikeleri afet risk yönetimi çatısı altında şu şekilde toplayabiliriz:

1. Depremler
Tanım: Yer kabuğunda ani enerji boşalımı sonucu meydana gelen sismik aktiviteler.
Belirlenmesi: Sismik risk analizleri, tarihsel deprem kayıtları ve aktif fay hatlarını haritalanması.
2. Heyelanlar
Tanım: Zemin ve Kaya kütlelerinin yer çekimi etkisiyle yamaç boyunca kayması.

- Belirlenmesi: Şev stabilite analizleri, topoğrafik ve jeolojik haritaların arazide gözlemleri
3. Taşkın ve Çamur Akmaları
Tanım: Küresel ısınmaya bağlı olarak ani ve yoğun yağışlar veya nehir taşkınları sonucu demiryolu güzergahında meydana gelen deformasyonlar.
Belirlenmesi: Hidrolojik modeller, yağış verileri ve geçmiş taşkınların analizi.
4. Zemin Sıvılaşması
Tanım: Suya doymuş ve ince taneli zeminlerin sarsıntı etkisiyle taşıma gücünü kaybetmesi.
Belirlenmesi: Sondajla Zemin Etütleri, Laboratuvar testleri ve jeofizik verilerin değerlendirilmesi.

Demiryollarında afet risk yönetimi, altyapının korunması, yolcu güvenliğinin sağlanması ve hizmet sürekliliğinin devam ettirilmesi açısından hayati bir öneme sahiptir. Bu yönetim süreci, ulusal ve uluslararası standartlar ve en iyi uygulamalar doğrultusunda sürekli olarak güncellenmeli ve değişen koşullara uyum sağlamalıdır. Afet risk yönetimi, sadece altyapının korunması için değil, aynı zamanda toplumsal ve ekonomik sürdürülebilirlik için de vazgeçilmez bir unsurdur.

4. Afet risk yönetimine katkısı

Demiryolu altyapıları, ülkelerin ekonomik kalkınmasında ve ulaşım ağlarının etkinliğinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu bağlamda, afet risk yönetimi, demiryolu sistemlerinin güvenliği ve sürdürülebilirliği açısından büyük önem taşımaktadır. Afet risk yönetimi, tehlike tespiti, risk değerlendirmesi, önleyici tedbirler, hazırlık, müdahale ve iyileştirme aşamalarını kapsamaktadır.

1. Risk Değerlendirmesi ve Analizi:

Risk değerlendirmesi, demiryolu altyapısının ve operasyonlarının karşı karşıya olduğu tehlikelerin belirlenmesi ve analiz edilmesi sürecidir. Bu süreçte, doğal afetler (deprem, sel, toprak kayması, fırtına vb.) ve insan kaynaklı tehlikeler (kaza, yangın, terör saldırısı) sistematik olarak incelenir. Risk analizi, bu tehlikelerin demiryolu sistemine etkilerini değerlendirir ve risklerin önceliklendirilmesine yardımcı olur. Bu aşamada kullanılacak bazı yöntemler arasında Hata Türü ve Etkileri Analizi (FMEA), Hata Ağacı Analizi (FTA) ve SWOT analizi bulunmaktadır.

2. Önleyici Tedbirler:

Önleyici tedbirler, olası afetlerin etkilerini minimize etmek amacıyla alınan yapısal ve yapısal olmayan önlemleri içerir. Yapısal önlemler, demiryolu altyapısının fiziksel olarak güçlendirilmesini kapsar. Bu, rayların, köprülerin, tünellerin ve istasyonların dayanıklılığının artırılması ile sağlanabilir. Yapısal olmayan önlemler ise, erken uyarı sistemlerinin kurulması, düzenli bakım ve denetim faaliyetlerinin yürütülmesi gibi teknik ve organizasyonel önlemleri içerir. Erken uyarı sistemleri, özellikle deprem ve sel gibi aniden gelişen afetler için kritik öneme sahiptir.

3. Hazırlık ve Eğitim:

Afetlere hazırlık ve eğitim, demiryolu personelinin ve ilgili paydaşların olası afet durumlarına karşı hazırlıklı olmalarını sağlamayı hedefler. Bu kapsamda, detaylı acil durum planları hazırlanmalı ve düzenli olarak güncellenmelidir. Personelin afet durumlarında görev ve sorumluluklarını bilmesi, etkin bir müdahale için esastır. Eğitim programları ve tatbikatlar, personelin afet anında doğru ve hızlı bir şekilde hareket etmesini sağlar. Eğitimlerde senaryo bazlı tatbikatlar, masa başı tatbikatları ve saha tatbikatları gibi çeşitli yöntemler kullanılabilir.

4. Müdahale ve Kurtarma:

Müdahale ve kurtarma aşaması, afetin hemen ardından gerçekleştirilen acil durum faaliyetlerini kapsar. Eğitimli acil müdahale ekipleri oluşturulmalı ve stratejik noktalarda hazır

bulundurulmalıdır. Afet sonrası hızlı kurtarma ve tahliye operasyonları, yolcu ve personel güvenliğinin sağlanması açısından kritik öneme sahiptir. Bu aşamada, kriz yönetimi ve koordinasyon, hızlı ve etkin müdahalenin sağlanması için gereklidir.

5. İyileştirme ve Yeniden İnşa:

Afet sonrası iyileştirme ve yeniden inşa, hasar tespiti, onarım çalışmaları ve gelecekteki afetlere karşı daha dayanıklı bir altyapının oluşturulmasını içerir. Hasar tespiti sürecinde, afetin demiryolu altyapısına ve operasyonlarına verdiği zarar detaylı bir şekilde değerlendirilir. Onarım ve yeniden inşa çalışmaları, mümkün olan en kısa sürede başlatılmalı ve tamamlanmalıdır. Bu süreçte edinilen deneyimler, gelecekteki risk yönetimi stratejilerine entegre edilmelidir. Yapıların yeniden inşasında modern mühendislik teknikleri ve malzemeler kullanılarak daha dayanıklı yapılar oluşturulabilir.

Örnek Uygulamalar:

Japonya: Japonya, demiryolu sistemlerinde deprem erken uyarı sistemleri ve dayanıklı altyapı yatırımları ile öne çıkmaktadır. Özellikle Shinkansen yüksek hızlı tren sistemi, depreme dayanıklı tasarımı ile dikkat çekmektedir.

Avrupa: Avrupa ülkelerinde, sel ve fırtına gibi doğal afetlere karşı gelişmiş tahliye ve acil durum planları uygulanmakta, altyapı düzenli olarak denetlenmekte ve güçlendirilmektedir.

5. Sonuç ve Öneriler

Demiryollarında jeolojik tehlikelerin belirlenmesinde en büyük faktör depremdir. Yaşadığımız 6 Şubat 2023 K. Maraş depremlerinde $M > 7.6$ olan iki büyük depremin çok kısa aralıkla meydana gelmesi can kaybının ve hasarın artmasında önemli etkenlerden biri olmuştur. Bu depremlerde bugüne değin diğer depremlerde kaydedilenden oldukça yüksek yer ivmeleri gerçekleşmiş olup, bu yüksek değerler hasarlarda rol oynamıştır ve özellikle faya yakın kesimler için deprem yönetmeliğindeki mevcut tasarım spektrumunun gözden geçirilmesinde yarar vardır.

Özellikle her iki depremin neden olduğu yaklaşık 400 km uzunluğundaki yüzey kırığı boyunca çok sayıda kaya düşmeleri ve çok büyük boyutta heyelanlar meydana gelmiş olup çok fazla can kaybına neden olmuştur. Bu nedenle özellikle demir yolu güzergahları ve diğer mühendislik yapıları açısından bu tür duraysızlıklara karşı yapılacak değerlendirmelerde depremlerle ilgili dinamik etkiler de dikkate alınmalıdır. Bununla birlikte demiryolu güzergahlarında sıvılaşmayla ilgili etütlere, analizlere ve uygun yapı ve temel tipi seçimine çok daha fazla önem verilmesinin gerektiği bu depremlerde de bir kez daha görülmüştür.

Deprem bölgesindeki bazı demir yolu tünel ve alt geçitleri özellikle sarsıntı ve yüzey kırığı tarafından kesilmeleri gibi nedenlerle kısa kesimlerde göçme veya blok düşmesi ve tavan veya yan duvarlardan dökülme gibi duraysızlıklara maruz kalmışlardır. Tüneller, kara ve demiryolları, gömülü boru hatları çizgisel yapılar olup, bunların doğrultuları ve uzunlukları da dikkate alındığında faylar tarafından kesilmeleri mümkündür. Bu nedenle özellikle faylı kesim geçilene değin tünelin kesit alanının artırılması veya fay boyunca belirli uzunlukta bağımsız mafsallı segmentler yapılarak, fayın hareketi halinde hareketin bu segmentleri birbirine bağlayan eklemlerde yoğunlaştırılması sağlanabilir.

Demiryollarında raylı sistem altyapı dolguları imal edilirken, dolgunun kayma dayanımının yüksek olması sağlanmalıdır. Bunun için, dolgunun oturtulacağı doğal zemin, taşıma gücü ve izin verilebilir oturmalar açısından araştırılmalı ve yerinde test edildikten sonra nitelikli dolgu kullanılmalıdır. Sahada gerekli sıkıştırma yapılmalı, yerinde sıkışma kontrolleri yapılarak, yanal ve düşey ek gerilmeler oluşması durumunda duyarlılığını yitirmemelidir. Bu uygulama eksiksiz tamamlandıktan sonra üst yapıya geçilmelidir. Demiryolu güzergahlarında suların drene

edilmesini sağlayan menfez yapılarının, günümüz koşullarına uygun, üst yapı yüklerini taşıyabilecek şekilde betonarme olarak inşa edilmesi gereklidir. Tüm mühendislik yapılarında olduğu gibi demiryolu benzeri çizgisel mühendislik yapıları için de mutlaka izleme ve kontrol sistemi kurulmalıdır. Bu sistemler sayesinde Afet Risk yönetimi sağlıklı biçimde yürütülebilir.

Demiryollarında afet risk analizi ve yönetimi, sadece altyapının korunması için değil, aynı zamanda yolcu güvenliğinin sağlanması ve hizmet sürekliliğinin devam ettirilmesi açısından hayati öneme sahiptir. Bu analiz ve yönetim süreçlerinin, ulusal ve uluslararası standartlar ve en iyi uygulamalar doğrultusunda sürekli olarak güncellenmesi gerekmektedir.

Kaynakça

- [1] N. Kazancı, “Doğal Kaynaklar ve Ekonomi Bülteni” 25: 63-66,2018
- [2] A.M.C. Şengör, “Jeolojik Takvim.” Cogita 22 (1), 1-46, 2000
- [3] A.M.C.Şengör ve Y.Yılmaz, “Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach, Tectonophysics “75(3-4):181-190,1981
- [4] AFAD, “<https://www.afad.gov.tr/kahramanmarasta-meydana-gelen-depremler-hk-34>”,2023
- [5] S.N. Yalçın ve A. Erel, “Yüksek Hızlı Demiryollarında Altyapının Önemi ve Tasarım İlkeleri”, 7. Ulaştırma Kongresi, İnşaat Mühendisleri Odası, İstanbul, Türkiye, 2007
- [6] C. Kolukırcık, “Taşıtların Yatay Hareketlerinden Kaynaklı Düşey Yüklerin Matematiksel Değerlendirilmesi”, *Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi*, 2017
- [7] C. Esveld, “Modern Railway Track”, Second Edition, MRT Productions, 2001
- [8] TCDD, Etüt Proje ve Yatırım Dairesi Başkanlığı, “*Demiryolu Güzergâh Jeolojik – Jeoteknik – Geoteknik Etütlerinin Yapılmasına Ait Mühendislik Hizmetleri Teknik Şartnamesi*”,2015
- [9] Yin, L.; Zhu, J.; Li,W.;Wang, J. Vulnerability Analysis of Geographical Railway Network under Geological Hazard in China. ISPRS Int. J. Geo-Inf. 11, 342, 2022
- [10] F. Çeçen, “6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremlerinin demiryolu üstyapısına etkilerinin saha gözlemleri ve sonlu eleman analizleriyle incelenmesi,” Demiryolu Mühendisliği, no. 18, pp. 59-72, July 2023. doi: 10.47072/demiryolu.1294730
- [11] R. Ulusay, “ 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri Saha Gözlemleri”, Çağrılı Konuşmacı, Kil 2023 Ulusal Sempozyum, Eskişehir
- [12] C.Ayday ve H.Alan, “*Eskişehir- Sivrihisar Yht Güzergahında Obruk Oluşumu ve Riskleri Hakkında Rapor*”, Eskişehir Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, 2020
- [13] F. Arık, 2018, “*Obruklar, Orta Anadolu’da Obruk Oluşumları ve Çözüm Önerileri*”. Maden ve İnsan, 1(3), 45-54.9,2018
- [14] JMO, “*Tekirdağ Çorlu Tren Kazası Yeri İnceleme Raporu*” Ankara: Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, ISBN: 978-605-01-1219-1, 2018
- [15] UNISDR, “The United Nations Office for Disaster Risk Reduction” *terminolgy disaster risk*, 2009

Özgeçmiş



Emre Aytuğ ÖZSOY

Eskişehir Teknik Üniversitesi Porsuk Meslek Yüksekokulu İnşaat Bölümü Yapı Denetim Programında Doktor Öğretim Üyesi olarak çalışmaktadır. Lisans ve Yüksek Lisans eğitimini Ankara Üniversitesi’nde, Doktorasını Eskişehir Osmangazi Üniversitesi’nde Jeoloji Mühendisliği Uygulamalı Jeoloji bilim dalında tamamlamıştır. Evli ve 1 çocuk babasıdır.
E-Posta: eaozsoy@eskisehir.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.



Ray Sıcaklığı Takip Sistemleri (RSTS) İçin En Uygun Yerlerin Belirlenmesinde Termal Kameralardan Yararlanılması: Hızlı Analiz Metotları Geliştirilmesi

Ferhat ÇEÇEN¹, Bekir AKTAŞ²

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Göller Bölgesi Teknokent Koordinatörlüğü, Isparta, Türkiye

² Erciyes Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

*cecenferhat@sdu.edu.tr

(Alınış/Received: 26.04.2024, Kabul/Accepted: 28.05.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Küresel ısınma ve iklim değişikliği tüm dünyada etkisini artırmaktadır. Bu nedenle modern demiryollarında anlık/sürekli veri sağlayan ray sıcaklığı takip sistemlerinin (RSTS) kullanılması, artık bir gereklilik hâlini almıştır. Ancak söz konusu cihazların yüzlerce kilometrelik demiryolu hat kesimleri içerisinde nerelere konumlandırılacağı konusunda belirsizlikler söz konusudur. Termal kameraların bu alanda fayda sağlayabileceği öngörülmektedir. Bununla birlikte literatürde bu kameraların ray sıcaklığı ölçümünde hangi prosedürlerle kullanılabileceğine dair çalışmalar oldukça yetersizdir. Bu çalışmada konu hakkında detaylı ölçüm ve analizler gerçekleştirilmiş ve ray gövdesinden termal görüntü alınmasının daha uygun olduğu, analizlerinde yansıyan sıcaklık değeri olarak ortam hava sıcaklığı değerinin, ray gövdesi emisyon katsayısı olarak çalışma içerisinde belirlenen ortalama değerin kullanılmasının gerçek ray sıcaklığı değerleri ile örtüşen sonuçlar sağlayabildiği belirlenmiştir.

Anahtar kelimeler: Ray sıcaklığı, Küresel ısınma, İklim değişikliği, Flambaj, Ray burkulması

Use of Thermal Imaging Cameras to Identify Best Locations For Rail Temperature Monitoring Systems (RTMS): Development of Rapid Analysis Methods

Abstract: Global warming and climate change are having an increasing impact around the world. The use of modern Rail Temperature Monitoring Systems (RTMS), which provide instantaneous/continuous data, has thus become a necessity for railways. However, there is uncertainty about where these measuring and monitoring devices will be located on the hundreds of kilometers of railway lines. Thermal cameras are expected to be useful in this area. Yet, there is a lack of studies in the literature on how these cameras can be used for rail temperature measurement. In this study, detailed measurements and analyses have been carried out on the subject and it has been found that it is more appropriate to take thermal images of the rail web, using the ambient air temperature value as the reflected temperature value in the analyses, and the average value of the rail web emission coefficient which is determined in the study can give results that are consistent with the actual rail temperature values.

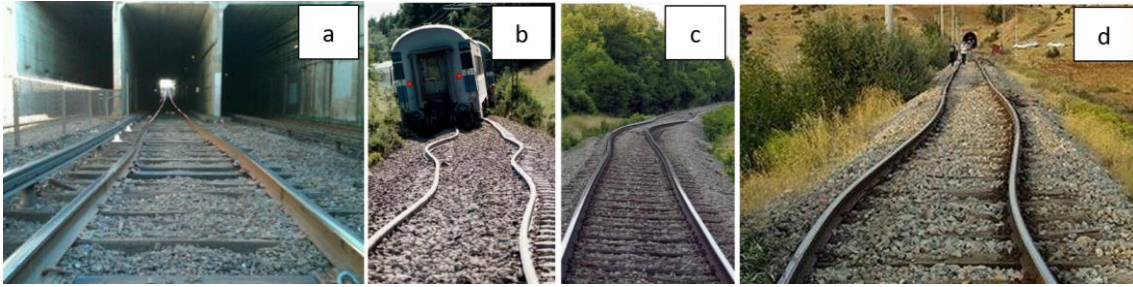
Keywords: Rail temperature, Global warming, Climate change, Sun kink, Rail buckling

1. Giriş

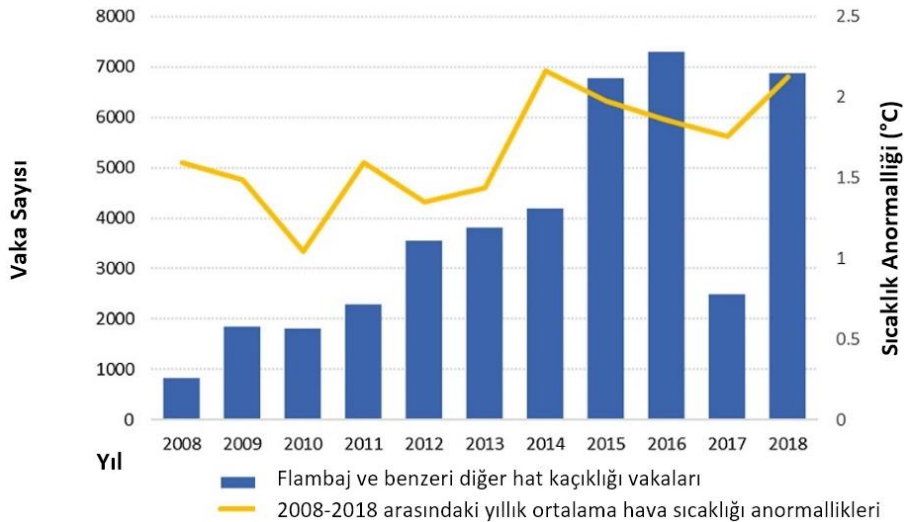
Demiryollarında ray sıcaklığı, seyrüsefer emniyeti açısından kritik bir öneme sahiptir. Bu kapsamda, demiryollarında karşılaşılan en önemli sorunlardan biri “flambaj”dır [1, 2]. Bu terim, Türkçe demiryolu literatürüne Fransızcadan girmiştir (flambage des rails). Genel olarak, “termal etkiler altında rayların burkulması” olarak tanımlanabilecek flambaj vakaları için İngiltere’de “rail buckling”, Amerika’da ise “sun kink” terimleri kullanılmaktadır. Geçmişte, çoğunlukla çöl ikliminin veya ağır karasal iklimin etkin olduğu lokasyonlarda görülen flambaj hadiseleri, günümüzde küresel ısınma ve iklim değişikliğinin de etkisiyle çok daha geniş bir coğrafyada görülebilmektedir [2]. Şekil 1’de, ülkemizde ve dünyada son yıllarda kayıtlara geçen bazı flambaj örnekleri sunulmuştur [3-6]. Şekil 2’de ise Avrupa Birliği (AB) ülkelerinde 2008-2018 yılları arasında kayda geçen flambaj hadiseleri çizgi grafikte, yıllar bazında meydana gelen sıcaklık

Atıf için/Cite as: F. Çeçen, B. Aktaş, “Ray Sıcaklığı Takip Sistemleri (RSTS) için en uygun yerlerin belirlenmesinde termal kameralardan yararlanılması: hızlı analiz metotları geliştirilmesi,” *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 141-154, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1474099

anormallikleri ise sütunlarla gösterilmektedir [7]. Görüldüğü üzere küresel ısınma ile flambaj hadiseleri yıllar içerisinde orantılı bir şekilde artmıştır. Bu durum AB harici diğer ülkelerde de benzerdir. Amerika’da son 40 yıl içerisinde 2100 adetten fazla flambaj hadisesi kayıtlara geçmiştir [8]. Flambaj riski gelecekte de etkisini artıracak bir sorun olarak karşımızda durmaktadır. Elimizdeki meteorolojik verilere göre, flambaj hadiselerinin her 30 yılda ikiye katlanacağı öngörülmektedir [9]. Flambaj sorununun yaygınlaşmasındaki bir diğer önemli etken, modern raylı sistemlerde, ray birleşimlerinin kaynaklı ray birleşimi metoduyla yapılmasıdır [10]. Geçmişte yaygın olarak kullanılan contalı (cebireli) ray birleşimlerinde, cebire delikleri ile bulonlar arasındaki boşluklar sayesinde, rayların soğuk havalarda büzülmesine, sıcak havalarda ise genişlemesine imkân tanınıyordu. Ancak modern demiryollarında, contalı birleşimler terk edilmekte ve raylar, birbirine, kilometrelerce mesafe boyunca kaynatılmaktadır. Bu uygulama, yüksek hız, düşük bakım ve üstün konfor sağlamaktadır [10]. Ancak, rayların sıcaklığı, gerilim olmayan sıcaklık (Stress Free Temperature, SFT) değerinin belirli bir miktar üzerine çıktığında, yani Kritik Ray Sıcaklığı değerine (Critical Rail Temperature, CRT) ulaştığında, eğer tekayyüdat (hız kısıtlaması) gibi çeşitli önlemler zamanında alınmamışsa, tren kazalarına neden olabilecek flambaj hadiseleri ile karşılaşılabilir [2, 11]. Eğer SFT değeri doğru belirlenmemiş ve hat inşa/bakım sürecinde gerilim alma işlemi [10] doğru bir şekilde yapılmamışsa, sıcak havalarda aşırı basınç kuvvetleri kaynaklı burkulmalar görüldüğü gibi, soğuk havalarda da aşırı çekme kuvvetleri kaynaklı ray/kaynak kırılmaları söz konusu olmaktadır [11].



Şekil 1. Dünyada son yıllarda meydana gelen çeşitli flambaj örnekleri: a. Amerika (Washington) [3], b. İsviçre [4], c. Kanada [5], d. Türkiye (Kahramanmaraş) [6]



Şekil 2. Avrupa Birliği ülkelerinde 2008-2018 yılları arasında kayda geçen flambaj hadiseleri ile küresel ısınma ilişkisini gösterir grafik [7]

Demiryollarında ray sıcaklığının ölçümü için ülkemizde ve dünyada yakın zamana dek en yaygın kullanılan yöntem; raylara, geçici süreyle, manuel olarak bağlanan/yönlendirilen, mekanik (analog)/dijital termometrelerdir. Bu uygulamada, CRT takibi için, hava sıcaklıklarının yüksek

seyrettiği günlerde, kritik olduğu düşünülen hat kesimlerine, bir veya birkaç görevli gönderilmekte ve önemli trenler geçmeden önce, rayların gölgede kalacak kısmına yerleştirilen/yönlendirilen termometrelerle (mekanik/analog tiplerde yaklaşık 10 dakikalık bekleme süresi ardından) lokal ölçümler alınarak, tekayyüdat uygulanıp uygulanmayacağına karar verilmektedir. Bu uygulama, düşük işletim kapasiteli hat kesimlerinde hâlen devam ettirilmektedir. Ancak modern demiryolu hatlarında, neredeyse aralıksız bir şekilde tren seferleri söz konusu olduğundan, bu uygulamanın devam ettirilmesi oldukça güçleşmiştir. Öte taraftan, günümüzde flambaj hadiseleri, yıl içerisinde daha sık görülebilen, gün içerisinde risk düzeyi oldukça değişebilen ve daha geniş bir coğrafyada etkisini gösterebilen bir problem hâline gelmiştir [2]. Dolayısıyla, bahsedilen bu konvansiyonel prosedür, özellikle yüksek işletim kapasiteli modern demiryolu işletmeciliği şartları altında, birçok açıdan yetersiz kalmıştır.

Günümüzde çeşitli ülkelerde uygulanmaya başlanan ve ülkemizde de çeşitli kurum ve kuruluşlar tarafından Ar-Ge çalışmaları yürütülen modern ölçüm metodu, çeşitli dijital sıcaklık ölçer sensörlerin, çeşitli veri iletişim ağlarına bağlanarak, ray sıcaklıklarının anlık ve sürekli olarak takip edilmesidir. Söz konusu Ray Sıcaklığı Takip Sistemleri (RSTS) bazı ülkelerde oldukça yaygınlaşmış ve özel altyapılar kurulmuştur. Ancak bu yöntemin de çeşitli dezavantajları mevcuttur. Öncelikle, RSTS cihazları, bazı ülkelerde (ABD [12] vb.), internet erişiminin hâlihazırda mevcut olduğu, tren istasyonları yakınındaki lokasyonlarda kurulmaktadır. Söz konusu sistemlerin test aşamalarında bu tarz uygulamalarla yetinilebilir. Ancak kilometrelerce uzunluğundaki demiryolu hat kesimlerinde, mikro ve makro iklimsel koşullar oldukça değişken olduğundan ve dolayısıyla ray sıcaklıkları, hat boyunca oldukça değiştiğinden [2]; flambaj riski yüksek noktaların önceden belirlenmesi ve RSTS cihazlarının bu noktalara monte edilmesi daha güvenilir sonuçlar sağlayacaktır. Kilometrelerce uzunluğundaki demiryolu ağlarında, ray sıcaklıklarının yüksek seyrettiği lokasyonların belirlenebilmesi için ise; geçmişte flambaj hadiseleri yaşanan sicilli hat kesimlerinin yanı sıra, gelecekte benzer hadiselerin yaşanabileceği riskli alanların da belirlenmesi gerekecektir. Bu esnada ise; çok dar bir alanı temsil eden (noktasal ölçüm alan) ölçüm metotları yerine, geniş bir alandaki (global) sıcaklık verilerini, hassas bir şekilde ölçmeye, kaydetmeye ve analiz etmeye imkân tanıyan termal kameraların kullanılması önemli bir avantaj sağlayacaktır. Bu kameralar, görevliler tarafından yaya turnelerde veya dron ile kullanılabilir gibi, yüksek bir noktadan geniş bir hat kesiminin termal kontrolü için de kullanılabilir. Bu cihazlar, İngiltere’de, yolcu trenlerine dahi monte edilmeye başlanmıştır. Şekil 3’te buna dair bir örnek sunulmuştur.



Şekil 3. Seyir halinde hat analizi gerçekleştiren yolcu treni ve termal kamerayla kaydedilen görüntü [13]

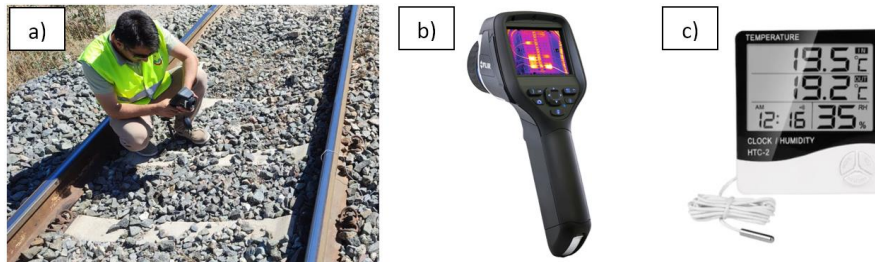
Literatürde demiryollarının termal kameralarla analiz edildiği çalışma sayısı oldukça azdır. Bu konuda erişilebilen ilk kaynak, Ferranti ve ark. (2006)’na aittir [2]. Bu çalışmada, flambaj riski nedeniyle uygulanan uzun mesafeli tekayyüdatların daha kısa mesafelere düşürülebilmesi amacıyla ray sıcaklıklarının seyir halindeki bir tren üzerinden ölçülüp, demiryolu hattının termal haritasının oluşturulması amaçlanmıştır. Çalışma sonunda, üst yüzeyin rayların en soğuk yüzeyi olduğu çıkarımında bulunulmuş ve ray gövdesinden ölçüm alınması önerilmiştir. Nitekim Şekil 3’te görülen, İngiltere’de 2023 yılında kullanımına başlanılan yolcu trenlerindeki örnek bir termal kamera görüntüsü de (-7,4/+7,9 °C) bunu göstermektedir. Ancak gerçekte ray üst yüzeyinin

gövdesine nazaran çok daha soğuk olması gibi bir durum söz konusu değildir. Nitekim Mirkovic ve ark. (2021) tarafından termokupl sensörlerle yürütülen detaylı ölçümler de bunu göstermektedir [14]. Daha doğru bir yaklaşım şudur ki; ray üst yüzeyinin termal kamera analizlerini olumsuz etkileyen bir karakteri söz konusudur. Ray üst yüzeyinin bu yanıltıcı karakteristiği nedeniyle, Şekil 3’te sunulan, post-modern ölçüm treninin “ray üstünden” aldığı termal ölçümler -demiryolu hattının termal haritasının oluşturulması açısından- yetersiz kalacaktır. Termal kameralarla yürütülen bir diğer çalışma ise Berg ve ark. (2015)’na [15] aittir. Bu çalışmada, termal kamera, tren lokomotifinin ön kısmına monte edilmiş ve demiryolu seyir güzergâhında, seyrüsefer emniyetini tehdit edecek herhangi bir engel mevcut olup olmadığı tespit edilmeye çalışılmıştır. Yaman ve Karaköse (2018) [16] ise ray yüzeyindeki anormalliklerin termal kameralarla tespit edilip edilemeyeceğini araştırmışlardır. Bir diğer çalışmada, Stypułkowski (2021) ve ark. [17], termal kameraları, otomatik demiryolu makaslarının ısıtma tertibatlarının kış aylarında doğru bir şekilde çalışıp çalışmadıklarını kontrol etmek amacıyla kullanmışlardır.

Sonuç olarak, demiryollarında ray sıcaklığı ölçümü, seyrüsefer emniyeti açısından kritik bir öneme sahiptir. Konvansiyonel geçici süreli manuel ölçüm yöntemleri ise etkinliğini yitirmiştir. Modern demiryolu işletmeciliğinin ihtiyacı olan ve anlık-sürekli veri sağlayan yeni teknolojilerin (RSTS cihazlarının) kullanılabilmesi için ise, ölçüm cihazlarının konumlandırılacağı en uygun lokasyonların belirlenmesi gerekmektedir. Bu amaçla noktasal ölçüm alan mekanik/dijital sıcaklık ölçerler yerine, global ölçüm sağlayan cihazlara ihtiyaç vardır. Termal kameralar bu alanda oldukça faydalı olabilecektir. Ancak mevcut literatürde, termal kameraların ray sıcaklığı ölçümünde hangi prosedürlerle kullanılabilmesine dair çalışmalar, oldukça az sayıda, kapsam olarak yetersiz ve hatta yanıltıcı bilgiler içerebilmektedir. Dolayısıyla bu çalışmanın amacı, termal kameralarla ray sıcaklığı ölçüm prosedürlerinin belirlenmesi ve mevcut mekanik/dijital termometrelerle ray sıcaklığı ölçümü uygulamalarından çok daha fazla bilgiyi, yüksek hassasiyetle ve daha kısa zamanda elde edebilecek pratik yöntemler ortaya konulmasıdır.

2. Metot

Termal analizler esnasında, Şekil 4.a ve 4.b’de görülen, FLIR E60 termal kamera kullanılmıştır. Üretici firma beyanına göre, bu termal kameranın sıcaklık ölçüm aralığı -20 ile 650 °C, doğruluğu ± 2 °C veya ölçülen değerinin %2’si (hangisi büyükse), kızılötesi çözünürlüğü 320x240 piksel, görüş alanı (FOV) 25°x19° ve uzamsal çözünürlüğü 3,43 mrad’dır. Termal kamerayla alınan görseller, FLIR Tools 6.4 yazılımında analiz edilmiştir. Bu esnada Şekil 4.c’deki HTC-2 Termo-Higrometre de kullanılmıştır. Üretici beyanına göre, cihazdaki dâhili ve hârici (K-tipi) sıcaklık sensörlerinin doğruluğu ± 1 °C, dâhili nem sensörünün doğruluğu ise $\pm 5\%$ ’tir. Cihazdaki dâhili sensörler, ortam iklim parametrelerinin belirlenerek, FLIR Tools yazılımına bilgi girişi amacıyla kullanılmıştır. Cihazın 140 santimetrelik kablosu ucundaki hârici termokupl ise, izole bantla ray yüzeyine yapıştırılarak, FLIR Tools analiz sonuçlarının kontrol edilmesinde ve geriye dönük çözümlene analizi (back-analysis) metoduyla emisyon katsayılarının (emissivity coefficient) belirlenmesinde kullanılmıştır. Bu katsayı hakkında detaylı bilgiler referansı verilen kaynakta [18] mevcuttur.



Şekil 4. a) Termal kamera ile görüntü alınması, b) FLIR E60 termal kamera, c) HTC-2 termo-higrometre

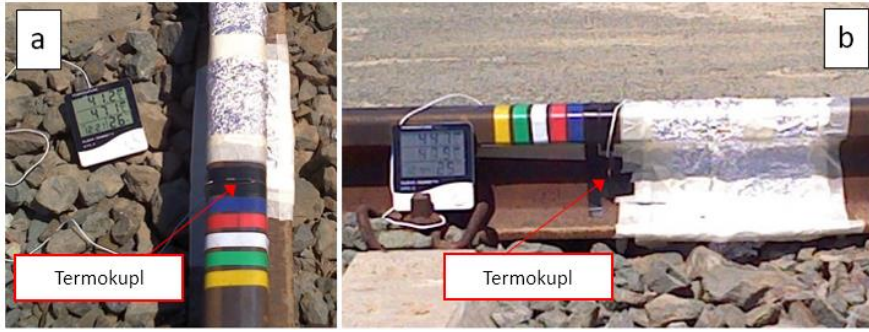
2.1. Yansıyan sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için kullanılan metot

Termal analizlerde ihtiyaç duyulan ilk parametre, yansıyan sıcaklık değeridir (reflected temperature). Gerek demiryolu raylarının değişen düzlemlere sahip topolojisi, gerekse ölçüm alan kişinin termal kamerayı tutma açısına bağlı olarak yansıyan sıcaklık değerleri değişmektedir. Bu durum Şekil 5’te tasvir edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, rayların gökyüzüne dönük yüzeylerinden yansıyan sıcaklık, atmosferin soğuk tabakalarından gelen kızılötesi ışınlar nedeniyle genellikle sıfıra yakın veya negatif değerler almakta, ray gövdesi ve paralelindeki düzlemler söz konusu olduğunda ise, termal kamera açısına bağlı olarak, çevredeki çeşitli nesnelerin (balast, travers, diğer ray, ölçüm yapan kişi vs.) sıcaklıklarından etkilenmektedir.



Şekil 5. Termal kamera ile raylardan görüntü alınması esnasında yansıyan sıcaklık değerinin değişkenliği

Bu çalışmada, yansıyan sıcaklık değerinin doğru bir şekilde belirlenmesi için, Şekil 6’da görülen, “buruşturulmuş alüminyum folyo ile kaplama” metodu kullanılmıştır. Bu esnada da yaklaşık 30 cm genişliğinde, yaklaşık 10 mikron kalınlığında, tek kat folyo kullanılmıştır. Bu metot, yansıyan sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için çeşitli kaynaklarda [18] önerilen pratik bir metottur. Ancak, ray sıcaklığı ölçümünde kullanıldığı herhangi bir çalışmaya literatürde denk gelinmemiştir. Alüminyum folyo, çevreden gelen kızılötesi ışınları, neredeyse tamamen yansıtan bir karaktere sahiptir (emisyon katsayısı $\leq 0,1$). Buruşturulup düzeltilmesindeki mantalite ise çevre koşullarını daha iyi temsil edebilmesidir. Ayrıca ölçüm yapılacak nesnenin (bu örnekte rayın) geometrik formunu alacak şekilde kaplama yapılabilmesi bir diğer avantajıdır. Tüm bu özellikleri sayesinde, folyo kaplı olmayan paralel düzlemlerden yansıyan sıcaklık değerlerinin olabildiğince gerçeğe yakın bir şekilde belirlenmesini sağlamaktadır. Ancak ölçüm alınırken mümkün mertebe geniş bir alanın sıcaklık değerlerinin ortalamasının alınmasına ve (kamera) ölçüm açısının mümkün mertebe değiştirilmemesine dikkat edilmeli ve yazılım analizinde, emisyon katsayısı 1,00 girilerek analiz yapılmalıdır. Alüminyum folyonun emisyon katsayısı oldukça düşük (sıfıra yakın) olmasına rağmen, yazılıma 1,00 değeri girilmesinin nedeni, alüminyum folyonun değil, çevreden yansıyan sıcaklığın tespit edilmeye çalışılmasıdır.



Şekil 6. Yansıyan sıcaklık ve emisyon katsayısı değerlerinin belirlenmesi için kullanılan ölçüm düzeneği: a) Ray üst yüzeyine, b) Ray gövdesinin orta yüksekliğine termokupl bağlanarak termal görüntü alınması

Bu çalışma kapsamında, analiz yapılacak konuya bağlı olarak, bazen ray üstünden (Şekil 6.a), bazen de ray gövdesinin orta yüksekliğinden (Şekil 6.b) termal ölçümler alınmıştır. Ray üstündeki ve gövdesindeki yüzeylerin düzlemleri farklı olduğundan, her iki yüzeyden de farklı açılarda termal görüntüler alınmıştır. Bu sayede farklı açılardan ölçüm sonuçlarına etkisi ortaya konulmaya çalışılmıştır. Termal görüntüler bilgisayara aktarıldıktan sonra, FLIR Tools yazılımında “analiz alanları” belirlenmiş ve bu alan içerisindeki tüm piksellerin okuduğu sıcaklık değerlerinin ortalaması kullanılmıştır. Bu esnada FLIR Tools yazılımına girilen parametreler ise şu şekildedir:

- Emisyon katsayısı : 1,00
- Yansıyan sıcaklık : 0 °C (emisyon 1.00 olduğundan herhangi bir değer girilebilir)
- Ölçüm mesafesi : 2,0 m
- Ortam hava sıcaklığı : 27.0 °C (HTC-2 dâhili sıcaklık sensörüyle ölçülmüştür)
- Nem : %25 (HTC-2 dâhili nem sensörüyle ölçülmüştür)

Ray üst yüzeyinden ve gövdesinden, çeşitli açılarla alınan termal görsellerin, yukarıdaki yazılım ayarları ile elde edilen analiz sonuçları ise, “3. Bulgular” bölümünde, yorumlanarak sunulmuştur.

2.2. Emisyon katsayılarının belirlenmesi için kullanılan metot

Termal kameralar ile kaydedilen görüntülerin analizinde kullanılan bir diğer önemli parametre emisyon katsayısıdır [18]. Bu amaçla Şekil 6’da görülen “elektrik izolasyon bandı ile kaplama” metodu kullanılmıştır. Bu metot, emisyon katsayısının belirlenmesi için çeşitli kaynaklarda önerilen [18] pratik bir metottur. Bununla birlikte, erişilebilen literatür kaynaklarında, ray sıcaklığı ölçümlerinde kullanıldığı herhangi bir çalışmaya denk gelinmemiştir. Öte taraftan, bu metodun kullanılabilmesi için termal emisyon katsayısı bilinen izolasyon bantları kullanılmaktadır. Ancak bu bantların hem ulaşılabilirliği zor hem pahalı hem de hassas bilimsel çalışmalar için yetersiz görülebileceğinden, bu çalışmada, piyasada rahatlıkla bulunabilen, çeşitli renklerdeki basit elektrikçi bantları (izole bantlar) kullanılmıştır. Bu nedenle, öncelikle kullanılacak elektrik bantlarının emisyon katsayıları, hassas bir şekilde belirlenmiş, ardından ray sıcaklığına dair ölçümlerde kullanılmıştır. Bu kolaylığın sağlanabilmesi için ise, yansıyan sıcaklık belirlemelerinde kullanılan, Şekil 6’daki termo-higrometrenin kullanılması yeterli gelmektedir. Şöyle ki, bu cihazın hârici termokupl sensörü kullanılarak, ölçüm yapılacak ray yüzeyinin sıcaklık değeri ölçülmüştür. Ardından termal kamera ile ilgili yüzeyin termal görüntüsü kaydedilerek FLIR Tools yazılımında “geriye dönük çözümleme analizine” (back analysis) tâbi tutulmuştur. Yani termal görüntüdeki sıcaklık değerinin, termo-higrometre ile ölçülen sıcaklık değeri ile örtüşmesini sağlayan emisyon katsayısı, deneme-yanılma metoduyla, farklı emisyon katsayıları girilerek, belirlenmiştir. Burada dikkat gerektiren bir husus, yansıyan sıcaklık değeri, rayların farklı düzlemlerinde değiştiği gibi, emisyon katsayısı da değişkenlik göstermektedir. Bunun nedeni, ray yüzeylerinin “korozyon” ve “işletim” kaynaklı nedenlerle değişken karakteristikler göstermesidir. Konunun daha iyi anlaşılması için Şekil 7 hazırlanmıştır.



Şekil 7. Ray emisyon katsayılarının işletim sıklığına ve korozyon düzeyine bağlı olarak değişkenliği

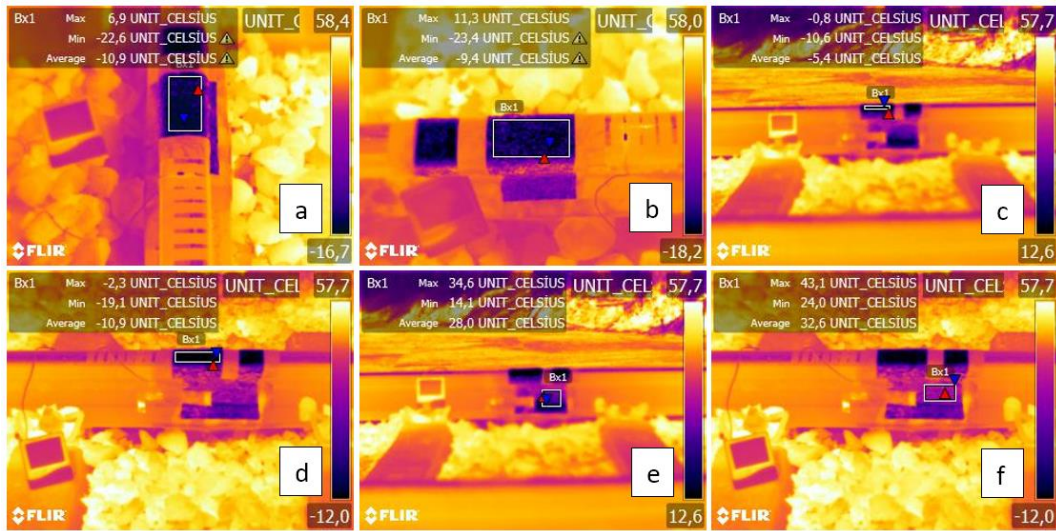
Bilindiği üzere demiryollarında kullanılan raylar, fabrikalarda imal edildiklerinde, yüzeylerinde korozyon tabakası mevcut değildir ve tüm kesitlerde homojen ve ortalama bir emisyon katsayısı söz konusudur (Şekil 7.b). Bu rayların derhal demiryoluna döşenip, hattın kısa sürede işletime açılması halinde, Şekil 7.c’de tasvir edilen bir yapı ortaya çıkmaktadır. Yani ray yüzeyleri henüz korozyon tabakası ile kaplanmadan, ray mantarının, tren tekerleri ile etkileşimde bulunduğu üst-iç yüzeyleri (sürtünme ve aşınma nedeniyle) cilâlanmaktadır (parlak bir yüzeye dönüşmektedir). Bu cilâlı yüzeylerin emisyon katsayısı (alüminyum folyo gibi) oldukça düşük bir değere sahiptir. Şekil 7.b ve 7.c’de tasvir edilen durumlar, demiryollarında, nispeten seyrek görülen hâllerdir. Gerçek hayatta, demiryollarında kullanılacak raylar, çeşitli muayene, kabul, sevkiyat ve ferfiyat süreleri akabinde, çoğunlukla tüm yüzeyleri korozyona maruz kaldıktan sonra yola döşenmekte veya hatta kullanılırken birkaç yıl içinde korozyon tabakası ile kaplanmaktadır (Şekil 7.a). Korozyon ise emisyon katsayısını artıran bir faktördür. Bu nedenle henüz işletime açılmamış, eski raylarla inşa edilen demiryolu hatlarında veya işletime kapatılmış eski hatlarda tüm ray yüzeyleri korozyon (demir oksit) tabakasıyla kaplı ve emisyon katsayısı tüm yüzeylerde yaklaşık olarak eşit ve yüksek hâldedir (Şekil 7.a). Bu demiryolu hatları, işletime açıldıktan sonra ise, ray mantarının üst-iç yüzeyi, yukarıda açıklandığı şekilde zamanla aşınıp cilâlanmakta ve emisyon katsayıları düşmektedir (Şekil 7.d). Şekil 2’deki ölçüm treninin, ray üst yüzeyini, ray gövdesinden çok daha düşük bir sıcaklıkta ölçmesinin nedeni de bu olup, ray üst yüzeyinin bu yanıtıcı karakteristiği nedeniyle literatürdeki önceki çalışmada da [2] ray üst yüzeyinin gövdesinden çok daha soğuk olduğu çıkarımında bulunulmuştur. Konuya ilişkin bulgular ilerleyen bölümde sunulmuştur.

3. Bulgular

3.1. Yansıyan sıcaklık değerinin belirlenmesi ve ölçüm açısının etkisi

Bu bölümde, yansıyan sıcaklık ölçümlerine ilişkin analiz sonuçları incelenmiştir. Önceki bölümde açıklanan şekilde farklı açılardan alınan termal görüntülerin analiz sonuçları, Şekil 8’de

sunulmuştur. Bu şekilde görüldüğü üzere, ölçüm yapılan açıya bağlı olarak yansıyan sıcaklık değerleri az-çok değişmektedir. Örneğin ray mantarı üst yüzeyi için; Şekil 8.a'daki açıyla yapılan ölçümde ortalama (Bx1-Average) $-10.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Celcius) sıcaklık belirlenmiştir. Bu değer, Şekil 5'te izah edildiği üzere, atmosferin yüksek ve soğuk tabakalarından gelen kızılötesi ışınların baskınlığını göstermektedir. Aynı analiz alanında, bu kez ray düzlemine dik istikamette (Şekil 8.b'de görüldüğü şekilde) ölçüm alınmış ve bu kez ortalama $-9.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ sıcaklık ölçülmüştür. Bu değer de negatif olmasına rağmen, farklı açıyla alındığı için önceki değerden yaklaşık $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ farklılık söz konusu olmuştur. Şekil 8.c ve 8.d ise daha yatık açılarla elde edilen analiz sonuçları görülmektedir ($-5,4$ ve $-10,9\text{ }^{\circ}\text{C}$). Görüldüğü üzere ölçüm açısı, ray üstünden alınan ölçümleri az-çok etkilemektedir. Ancak ray üstünden alınan tüm analiz sonuçlarının, yüksek atmosfer tabakalarından etkilendiği bariz bir şekilde ortadadır. Ölçümlerin alındığı Ağustos 2023 ayında ortam hava sıcaklığı $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ civarında olmasına rağmen, ray yüzeyinden yansıyan sıcaklık belirlemelerinin tümü negatif değerlere sahiptir. Ölçüm açısının sonuçları etkilemesi, kısmen de olsa, ray gövdesi için yapılan ölçümler için de geçerlidir. Şekil 8.e ve 8.f'de, bu bölgeye ait farklı açılarla ölçülen 2 farklı termal görüntü sunulmakta olup, ortalama sıcaklıklar sırasıyla $28.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve $32.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ olarak tespit edilmiştir. Görüldüğü üzere; ray gövdesinde, pozitif ve ortam sıcaklığına yakın ($27,0\text{ }^{\circ}\text{C}$) sonuçlar elde edilmiştir. Bunun nedeni, ray gövdesi düzleminin atmosferin yüksek tabakalarına değil, aksine yeryüzüne (sırasıyla balast, traversler, karşı paralel ray, ölçüm yapan kişi, katener direkleri, ağaçlar, binalar, istinat/şev yapıları, tepeler, dağlar vs.) dönük olmasından kaynaklanmaktadır. Tüm bu nesnelerin sıcaklıkları az-çok farklı olmakla birlikte, "ortalamaları" ortam hava sıcaklığına yakındır veya en azından yüksek atmosfer katmanları kadar farklı değildir.

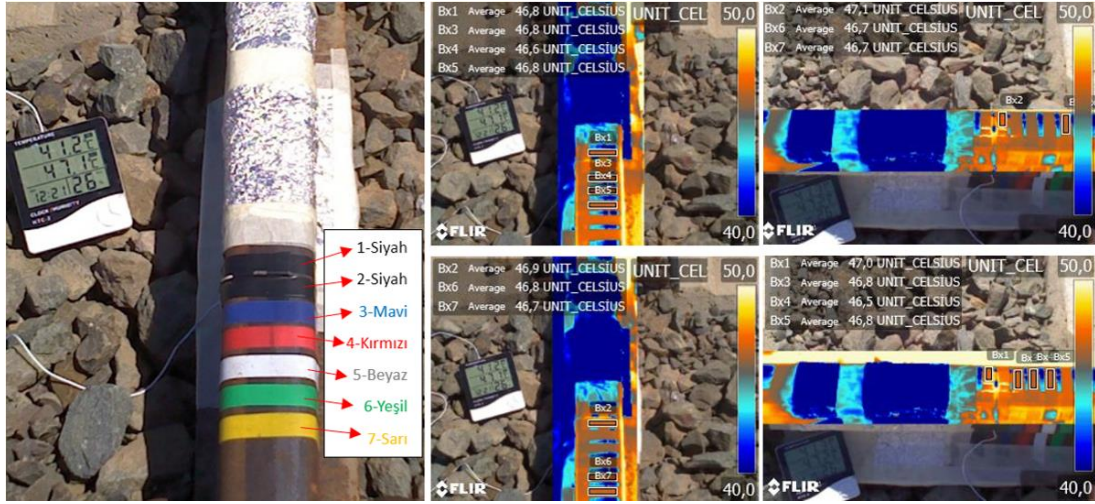


Şekil 8. Alüminyum folyo kullanılarak ray üst yüzeyi ve gövdesinde ölçülen yansıyan sıcaklık değerleri

Sonuç olarak, buruşturulmuş alüminyum folyo kaplaması ile yansıyan sıcaklık belirlemesi, demiryollarında ray sıcaklığının detaylı analizlerinde kullanılabilir bir yöntemdir. Ancak özellikle sık seferler düzenlenen hat kesimlerinde ve/veya uzaktan kontrol edilen ölçümlerde uygulanması mümkün olmayabilecektir. Ray üst yüzeyinin emisyon katsayısı (cilâlanma nedeniyle) hat boyunca değişken ve genel itibarıyla oldukça düşük olduğundan ve düzlemsel olarak yüksek atmosfer tabakalarına dönük olduğundan, daha pratik bir yöntem önerilmesi mümkün olmamıştır. Ancak, ray gövdesine ait yansıyan sıcaklık değerinin, alüminyum folyo kullanılmadan, yaklaşık olarak tahmin edilmesi mümkündür. Daha önce değinildiği üzere; bu sıcaklık, ortam hava sıcaklığı ile yakından ilişkilidir. Bu değerlerin tespiti ise oldukça kolaydır. Dolayısıyla ivedilik arz eden saha ölçümlerinde, ray gövdesinden (rail web) ölçüm alınması şartıyla, yansıyan sıcaklık değeri olarak, ortam hava sıcaklığının kullanılması, gerçeğe yakın sonuçlar sağlayabilecek pratik bir yöntem olarak not edilmelidir.

3.2. Farklı renkteki izole bantların emisyon katsayılarının belirlenmesi

Yansıyan sıcaklık değerlerinin belirlenmesinden sonra sıra, kullanılacak bantların emisyon katsayılarının belirlenmesine gelmektedir. Bu amaçla hazırlanan ölçüm düzeneği Şekil 6 ve 9'da sunulmuş olup, görüldüğü üzere 6 farklı renkte (siyah renk farklı markada 2 adet olmak üzere, toplamda 7 adet) elektrikçi bandı (izole bant) kullanılmıştır. Kullanılan bantların kalınlıkları yaklaşık aynıdır ve tek kat olarak uygulanmıştır. Edinilen tecrübeler göre, yapıştırma esnasında ray ile bant arasında hava boşluğu kalmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca bantlar yapıştırıldıktan sonra bir miktar beklenerek (yaklaşık 10 dk) ray sıcaklığı ile eşitlenmesine imkân tanınmalıdır.



Şekil 9. İzole bantların emisyon katsayılarının belirlenmesi için hazırlanan düzenek ve analiz sonuçları

Şekil 9'daki termal görüntülerde, renk paleti dar bir sıcaklık bandı (40-50 °C) ile kısıtlanmış ve dijital görüntü içinde termal görüntü (picture in picture) modu uygulanmıştır. Bu şekilde, sonuçların daha anlaşılır olması amaçlanmıştır. Ölçümlerde, hârici termokupl, 1 ve 2 numaralı siyah bantların arasında kalacak şekilde raya yapıştırılmıştır. Bunun akabinde, her bir bant için daha önce alüminyum folyo için yapıldığı gibi dikdörtgen analiz alanları belirlenmiştir. Şekilde görülebilen bu işaretli "analiz alanlarındaki" en düşük, en yüksek ve ortalama (average) sıcaklık değerlerinin belirlenmesi için FLIR Tools yazılımına girilen parametreler ise şu şekildedir:

- Yazılıma girilen emisyon katsayıları: 0,90↔0,99,
- Yansıyan sıcaklık: Şekil 9'da raya dik ölçüm açısı için -10,9 °C, raya paralel/yatay ölçüm açısı için ise -9,4 °C (önceki bölümde belirlenen ve Şekil 8'de geçen değerler),
- Ölçüm mesafesi: 2,0 m,
- Ortam hava sıcaklığı: 27,0 °C (Termo-higrometrenin dâhili sensörüyle belirlenmiştir),
- Nem: %26 (Termo-higrometrenin dâhili nem sensörüyle belirlenmiştir).

Geriye dönük çözümlenme analizi akabinde (0,90 ile 0,99 arasında değişen emisyon katsayıları için termo-higrometre ölçümleriyle en yakın örtüşmeyi sağladığı) belirlenen değerler şöyledir:

- Siyah bantların emisyon katsayısı: 0,95 (Şekil 9, No.1/2: 46,8 °C (dikey), 47,0 °C (yatay)),
- Mavi bant emisyon katsayısı: 0,95 (Şekil 9, No.3, 46,8 °C (dikey), 46,8 °C (yatay)),
- Kırmızı bant emisyon katsayısı: 0,95 (Şekil 9, No.4, 46,6 °C (dikey), 46,5 °C (yatay)),
- Beyaz bant emisyon katsayısı: 0,95 (Şekil 9, No.5, 46,8 °C (dikey), 46,8 °C (yatay)),
- Yeşil bant emisyon katsayısı: 0,96 (Şekil 9, No.6, 46,8 °C (dikey), 46,7 °C (yatay)),
- Sarı bant emisyon katsayısı: 0,96 (Şekil 9, No.7, 46,7 °C (dikey), 46,7 °C (yatay)).

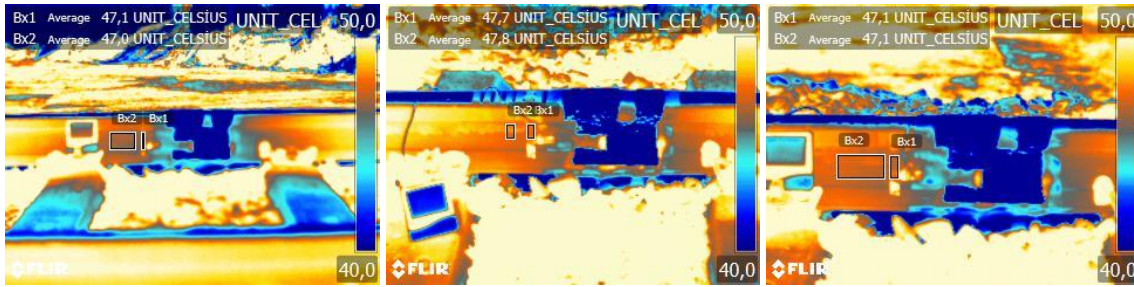
Tespit edilen bu değerler, çeşitli kaynaklarda 3M type 88 siyah vinil elektrikçi bandı için verilen 0,96 emisyon katsayısı ile benzer/eşittir [18]. Sonuçta, yansıyan sıcaklık değerleri, emisyon katsayısından etkilenmemekle birlikte, emisyon katsayısı yüksek bir nesnenin (izole bant gibi) termal kamerayla ölçülen sıcaklık değerinin, yansıyan sıcaklık değerinden etkilenme düzeyi azalmaktadır. Dolayısıyla, farklı renklerdeki izole bantlar, üzerine yapıştırıldığı ray ile aynı sıcaklığa eriştiğinde, aynı dalga boyunda kızılötesi ışın yaymakta ve termal kamerada uygulanan renk paletinde aynı renkle kodlanmaktadır (Şekil 8, 9).

3.3. Ray gövdesinin emisyon katsayısının belirlenmesi

Bu bölüm kapsamında TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası iltisak hattında (S49 tipi raylar kullanılan) ve Sivas-Kayseri demiryolu hattında (UIC 60 E1 tipi raylar kullanılan) termal görüntüler alınmıştır. Bu görüntüler alınırken, HTC-2 tipi termo-higrometrenin hârici termokupl sensörü, önceki bölümde emisyon katsayısı belirlenen siyah izole bantla ray gövde yüzeylerine yapıştırılmış, bu şekilde alınan termal görüntüler FLIR Tools yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Bu suretle, bir yandan dijital sensörle temaslı sıcaklık okunurken, bir yandan da termal görüntüdeki iki farklı analiz alanındaki sıcaklık, senkronize bir şekilde kaydedilebilmiştir. Bu iki analiz alanından ilki, termokupl sensörünün ray yüzeyine yapıştırılmasında kullanılan ve emisyon katsayısı önceki bölümde belirlenen izole bantın üzerinde (Bx1) belirlenmiştir. Diğeri ise sensörün hemen yakınındaki (aynı hizadaki) çıplak ray gövdesi üzerinde (Bx2) işaretlenmiştir. Analizler esnasında FLIR Tools yazılımına girilen parametreler ise şu şekildedir:

- İzole bant üzerindeki alan (Bx1) için tanımlanan emisyon katsayısı: 0,95,
- Yansıyan sıcaklık: 27,0 °C (ortam hava sıcaklığı ile aynı değer kullanılmıştır),
- Ölçüm mesafesi: 2,0 m,
- Hava sıcaklığı: 27,0 °C (Termo-higrometrenin dâhili sensörüyle tespit edilmiştir),
- Nem: %25 (Termo-higrometrenin dâhili nem sensörüyle tespit edilmiştir).

Bu doğrultuda, termal kamera ile farklı açılardan ölçülen ve yukarıdaki analiz ayarları kullanılarak elde edilen termal görüntüler Şekil 10'da sunulmuştur.



Şekil 10. Ray gövdesi emisyon katsayısının belirlenmesi için alınan termal görüntüler (Ağustos 2023)

Görüldüğü üzere, izole bant üzerinden ölçülen sıcaklık değerleri (Bx1 için) 47,1, 47,7 ve 47,1 °C olarak değişmektedir. Bu değerler, Şekil 6'daki termo-higrometre ile ölçülen (ekrandan görülen) 47,5 °C değeri ile büyük oranda örtüşmektedir. Dolayısıyla önceki bölümde, siyah izole bant için belirlenen 0,95'lik emisyon katsayısının doğruluğu tekrar teyit edilmiş olmaktadır. Geriye kalan bilinmeyen, ray gövdesinin emisyon katsayısıdır. Bu amaçla, önceki bölümlerdeki gibi geriye dönük çözümleme analizi yürütülmüş ve Şekil 10'daki termal görüntülerdeki Bx2 alanları için FLIR Tools yazılımı tarafından belirlenen sıcaklık değerlerinin, termo-higrometre ile ölçülen sıcaklık değeri ile örtüşmesini sağlayan emisyon katsayısı belirlenmiştir. Belirlenen değer 0,95 olup, korozyon tabakası ile kaplı ray gövdesinin, izole bantlar ile yaklaşık eşit bir emisyon katsayısı olduğu anlaşılmıştır. Tespit edilen bu değer, çeşitli kaynaklarda, yüksek derecede korozyona uğramış demir/çelik malzemeler için verilen 0,96'lık emisyon katsayısı ile benzerdir [18]. Bu

katsayı ile Bx2 alanları için belirlenen sıcaklık değerleri, Şekil 10'dan görüldüğü üzere 47,0, 47,8 ve 47,1 °C olarak sonuçlanmaktadır. Bu değerlerin ortalaması 47,3 °C olup, termo-higrometre ile ölçülen 47,5 °C değeri ile büyük oranda örtüşmektedir. Dolayısıyla ivedilik arz eden saha ölçümlerinde, yansıyan sıcaklık olarak ortam sıcaklığının kullanılması ve ray gövdesi emisyon katsayısı olarak 0,95 değerinin kullanılması, ayrıca çeşitli açılardan birkaç ölçüm alınarak ortalamasının kullanılması, gerçek değerlerle yüksek oranda örtüşen sonuçlar sağlamaktadır.

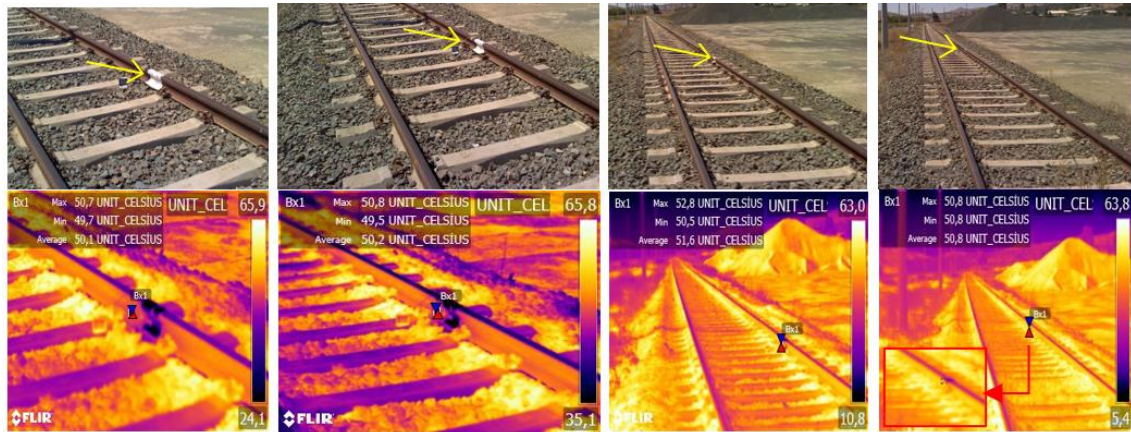
Bu bölümün son aşamasında, önerilen ölçüm-analiz prosedürünün, farklı iklim koşullarında (kış aylarında) da geçerli olup olmadığı kontrol edilmiştir. Şekil 11'de analiz sonuçları sunulmuş olup, ray sıcaklığı termo-higrometrenin hârici sensörü ile 5,0 °C olarak ölçüldüğünde, termal analiz sonuçlarının ortalama 4,5 °C olarak sonuçlandığı tespit edilmiştir. Dolayısıyla, önerilen ölçüm ve analiz metodunun, kış aylarında da kullanılabileceği tespit edilmiştir.



Şekil 11. Önerilen ölçüm ve analiz prosedürünün ilave kontrolü için alınan termal görüntüler (Ocak 2024)

3.4. Ölçüm mesafesinin sonuçlara etkisi

Saha ölçümlerinde pratiklik sağlayacak bir diğer husus, uzak mesafelerden ölçüm alınabilmesidir (manuel veya bilgisayar kontrollü). Bu amaçla; S49 tipi (UIC 60 E1/E2 tipi raylardan daha küçük boyutlu) raylar kullanılan bir demiryolu hattında, 2 metre mesafeden termo-higrometre doğrulamalı sıcaklık ölçümü yapılmış ve ray gövdesinin 50,3 °C sıcaklığa sahip olduğu belirlenmiştir (yansıyan sıcaklık=ortam sıcaklığı=28,0 °C, ray gövdesi emisyon katsayısı: 0,95). Bu lokasyondan, sırasıyla yaklaşık 5, 10, 15 ve 20 metre mesafeden dijital ve termal görüntüler alınıp, aynı ayarlar kullanılarak elde edilen termal analiz sonuçları Şekil 12'de sunulmuştur.



Şekil 12. Ray gövdesi sıcaklığının sırasıyla yaklaşık 5, 10, 15 ve 20 metre mesafeden ölçüm sonuçları

Analiz sonuçlarına göre; 5, 10 ve 15 metrelik mesafelerde, analiz alanı (Bx kodu ile verilen dikdörtgen alanların ortalama) sıcaklığı, birçok termal dedektör piksel ile belirlenirken, 20 metre mesafede tek bir (termal dedektör) pikselin söz konusu olduğu görülmüş ve bu mesafeden sonra ölçüm alınmamıştır. Çünkü bir sonraki mesafede alınacak ölçüm, ray gövdesi hariç diğer nesnelere de içine almaktadır. Analizler sonucunda belirlenen sıcaklık değerleri mesafeye göre

sıralanırsa; 50,1 °C, 50,2 °C, 51,6 °C ve 50,8 °C olarak sonuçlanmıştır. Buna göre kullanılan termal kamera ve analiz ayarları ile her iki yönde (20 metre x 2 yön) toplamda 40 metrelik bir hat kesiminin ray sıcaklığı, hareket etmeksizin, oldukça hassas bir şekilde tespit edilebilmektedir. Görüldüğü üzere, ölçüm mesafesi arttıkça, ölçüm açısı ve dolayısıyla yansıyan sıcaklık değeri değişmesine rağmen, bu şekilde hassas sonuçlar alınabilmektedir. Bu durum, önerilen pratik yöntemin saha ölçüm ve analizlerine uygunluğunu göstermektedir. Şunu belirtmek gerekir ki, termal kameralarda kullanılan lensler, teleskobik lenslerle değiştirilerek ve/veya piksel çözünürlüğü artırılarak, hat geometrisinin ve arazi topolojisinin elverdiği nispette, yüzlerce metre uzaktaki ray sıcaklığı, hassas bir şekilde belirlenebilir. Ancak bu bölümde araştırılmak istenen, FLIR E60 gibi düşük maliyetli, ortalama teknik karakteristiklere sahip bir termal kamera ve cihaz üzerindeki genel kullanım amaçlı lens (25° x 19°) değiştirilmeksizin, ne kadar uzaktaki ray sıcaklığının doğru bir şekilde okunabileceğinin, gerçek saha koşullarında belirlenmesidir.

4. Sonuç

Demiryollarında ray sıcaklığı ölçümü, geçmişten günümüze önemini koruyan bir konudur. Çağımızda ray sıcaklığı ölçümü için artık anlık-sürekli veri sağlayan yeni nesil teknolojilerin kullanılması gerekmekte, birçok ülkede bu alanda önemli yatırımlar yapılmaktadır. Ancak söz konusu cihazların demiryolu güzergâhı boyunca nerelere konumlandırılacağına belirlenmesinde pratik yöntemlere ihtiyaç vardır. Bu bağlamda termal kameraların önemli bir potansiyel avantajı söz konusudur. Ancak literatürde, termal kameraların ray sıcaklığı ölçümünde hangi prosedürlerle kullanılabilmesine dair çalışmalar oldukça yetersizdir. Bu çalışmanın amacı, termal kameralarla ray sıcaklığı ölçüm prosedürlerinin ortaya konulması ve mevcut mekanik/dijital termometrelerle ray sıcaklığı ölçümü uygulamalarından çok daha fazla bilgiyi, yüksek hassasiyetle ve daha kısa zamanda elde edebilecek pratik yöntemler ortaya konulmasıdır. Çalışma kapsamında, TCDD Sivas Beton Travers Fabrikası iltisak hattında ve Sivas-Kayseri demiryolu hattında termal analizler yürütülmüştür. Bu bağlamda, literatürde bir ilk olarak, alüminyum folyo ile ray yüzeyinden yansıyan sıcaklık değerleri, izole bantlar ile de ray emisyon katsayıları belirlenmesi yapılmıştır. Yürütülen ölçüm ve analizler neticesinde; ivedilik gerektiren saha ölçümlerinde, ray gövdesinden termal görüntü alınması ve analizlerinde yansıyan sıcaklık değeri olarak ortam hava sıcaklığı değerinin, ray gövdesi emisyon katsayısı olarak ise (korozyon tabakası ile kaplı ise) 0,95 değerinin kullanılmasının gerçek değerler ile örtüşen sonuçlar sağlayabildiği belirlenmiştir. Bu kameralar, görevliler tarafından yaya turnelerde veya dronlarla kullanılabilmesi gibi, yüksek bir noktadan geniş bir hat kesiminin termal kontrolü için de kullanılabilir. Hatta, bazı ülkelerde, ölçüm trenlerine dahi monte edilmiş durumdadır. Gelecekte çalışmaların bu yönde ilerletilmesi ve geliştirilen metodolojiyle seyir halinde ölçümler gerçekleştirilmesi planlanmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmalardaki katkılarından dolayı TCDD 4. Bölge Müdür Yrd. Sn. Suat OCAK'a, Yol Bak. Onr. Şefi ve Müh. Sn. Erdal MELEMEZ'e, Yol Servis Müd. Müh. Sn. Ahmet ELMA ve Ali PAMUKÇU'ya, TCDD Sivas Beton Trv. Fab. Müd. Yrd. Sn. Fatih ÖZALTIN'a ve Bak. Onr. Grup Müd. Sn. Ahmet DOĞAN'a teşekkürlerimizi sunarız.

Kaynakça

- [1] N T. C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, Türkiye. Raylı Sistemler Teknolojisi: Demiryolu İnşaatı. (2011). Accessed: 10.01.2024. [Online]. Available: https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Demir%20Yolu%20C4%B0n%C5%9Faat%C4%B1.pdf
- [2] E. Ferranti, L. Chapman, C. Lowe, S. McCulloch, D. Jaroszweski, A. Quinn, "Heat-related failures on southeast England's railway network: Insights and implications for heat risk management," *Wea. Climate Soc.*, vol. 8, pp. 177–191, 2016, doi: <https://doi.org/10.1175/WCAS-D-15-0068.1>

- [3] PEBS News Hour, “Heat Wave Causes Kinks in Rail Tracks,” 2010. [Online]. Available: <https://www.pbs.org/newshour/world/heat-wave-causes-kinks-in-rail-tracks>
- [4] K. Dobney, “Quantifying the effects of an increasingly warmer climate with a view to improving the resilience of Great Britain's railway network: Is a new stressing regime the answer?,” PhD Thesis, University of Birmingham, Department of Engineering, School of Civil Engineering, 2010
- [5] Transportation Safety Board of Canada, “Railway Investigation Report R02M0050,” 2002. [Online]. Available: <https://www.bst.gc.ca/eng/rapports-reports/rail/2002/r02m0050/r02m0050.html>
- [6] CNN Türk, “Sıcaktan tren rayları bile genleşti!,” 2010. [Online]. Available: <https://www.cnnturk.com/turkiye/sicaktan-tren-raylari-bile-genlesti-11-12-2018?page=1>
- [7] I. V. Sanchis, R. I. Franco, P. M. Fernandez, P. S. Zuriaga, J. B. F. Torres, “Risk of increasing temperature due to climate change on highspeed rail network in Spain,” *Transportation Research Part D*, vol. 82, ID: 102312, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102312>
- [8] Climate Central, “Derailments May Increase as 'Sun Kinks' Buckle Tracks,” 2014. [Online]. Available: <https://www.climatecentral.org/news/climate-change-warp-railroad-tracks-sun-kinks-17470>
- [9] K. Dobney, C. J. Baker, L. Chapman, A. D. Quinn, “The future cost to the United Kingdom’s railway network of heat-related delays and buckles caused by the predicted increase in high summer temperatures owing to climate change,” *Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 224 (1), pp. 25-34, 2009, doi: <https://doi.org/10.1243/09544097JRRT292>
- [10] T. C. Milli Eğitim Bakanlığı, Ankara, Türkiye. Raylı Sistemler Teknolojisi: UKR (Uzun Kaynaklı Ray). (2013). Accessed: 10.01.2024. [Online]. Available: [https://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/UKR%20\(Uzun%20Kaynaklı%20C4%B1%20Ray\).pdf](https://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/UKR%20(Uzun%20Kaynaklı%20C4%B1%20Ray).pdf)
- [11] B. Işık, A. Cebeci, “Eddy-current fren sisteminin Türkiye’deki yüksek hızlı demiryolu hatları ile uyumunun analizi,” *Demiryolu Mühendisliği*, vol. 11, pp. 86-97, Ocak 2020.
- [12] AMTRAK, “Weather & Rail Temperature Monitoring System,” [Online]. Available: <https://railtemp.amtrak.com/index.jsp> [Accessed 10.01.2024]
- [13] Railway Gazette International, “Northern Intelligent Train rail infrastructure monitoring demonstrator,” 2023. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=wErsctKhcAs> [Accessed 10.01.2024]
- [14] N. Mirkovic, L. Brajovic, Z. Popovic, G. Todorovic, L. Lazarevic, M. Petrovic, “Determination of temperature stresses in CWR based on measured rail surface temperatures,” *Construction and Building Materials*, vol. 284, ID: 122713
- [15] A. Berg., K. Öfjall, J. Ahlberg, M. Felsberg, “Detecting rails and obstacles using a train-mounted thermal camera,” *Lecture Notes in Computer Science*, vol. 9127, 2015
- [16] O. Yaman, M. Karaköse, “Complex fuzzy automata based fault detection approach using thermal images in railways,” in *International Conference on Artificial Intelligence and Data Processing (IDAP)*, Malatya, Turkey, 28-30 September 2018, pp. 1-5
- [17] K. Stypułkowski, P. Gołda, K. Lewczuk, J. Tomaszewska, “Monitoring system for railway infrastructure elements based on thermal imaging analysis,” *Sensors*, vol. 21, ID: 3819, 2021
- [18] FILIR, Online documentation for FLIR Ex series, Reference documentation, Thermography (English), Accessed: 10.01.2024. [Online]. Available: https://support.flir.com/DSDownload/Assets/T810442-en-US_A4.pdf [Online]:

Özgeçmiş



Ferhat ÇEÇEN

TCDD’de geçen 16 yıllık hizmeti akabinde, Süleyman Demirel Üniversitesinde Dr. Öğretim Görevlisi olarak görev yapmaktadır. Demiryolu termal analizleri ve milli demiryolu traversleri geliştirilmesi konulu araştırmaları devam etmektedir. E-Posta: cecenferhat@sdu.edu.tr



Bekir AKTAŞ

Doktora Eğitimini Süleyman Demirel Üniversitesi'nde tamamlayan yazar, Erciyes Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Ulaştırma Anabilim Dalında öğretim üyesidir. Ulaştırma alanında yerli ve yabancı dergilerde yayımlanan birçok makalesi ve patentleri bulunmaktadır.

E-Posta: baktas@erciyes.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayım etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ferhat ÇEÇEN: Metodoloji, Ölçüm, Görselleştirme, Yazılım, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Bekir AKTAŞ: Kavramsallaştırma, Yönetme, Doğrulama, Kaynak ve cihaz sağlama, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.



Yüksek Hızlı Trenlerde (YHT) Sefer-Makinist Eşleştirmesi

Halim DUMAN^{*1}, Fatih ÇAKIR², Hadi GÖKÇEN³

¹ TCDD Taşımacılık A.Ş., Ankara Bölge Müdürlüğü, YHT Yolcu Servis Müd., Ankara, Türkiye

² TCDD Taşımacılık A.Ş., Yolcu Dairesi Başkanlığı, YHT Şube Müd., Ankara, Türkiye

³ Gazi Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

*h_duman84@hotmail.com

(Alınış/Received: 14.06.2024, Kabul/Accepted: 27.06.2024, Yayımlama/Published: 31.07.2024)

Öz: TCDD, 2003 yılında Yüksek Hızlı Tren (YHT) hatlarını ilk olarak Ankara-Eskişehir arasında döşemeye başlamıştır. 13 Mart 2009 tarihinde Ankara-Eskişehir hattının ticari seferlere açılması ile birlikte hızlı tren işletmeciliğine geçilmiştir. Seferler Ankara-Eskişehir arası 2 gidiş 2 geliş olmak üzere günde toplam 4 sefer ile başlamış olup, 04.05.2024 tarihi itibarıyla Ankara, Eskişehir, Konya, İstanbul, Karaman ve Sivas şehirlerine 32 gidiş, 32 geliş olmak üzere toplam 64 sefere ulaşmıştır. Artan sefer sayısı ile birlikte trenlerde görev alan personel sayısı artmış ve bu personelin planlanması da zorlaşmıştır. YHT 'lerde görev alan personelin mevcut seferler için planlaması, ilgili birimler tarafından elle (manuel olarak) yapılmaktadır. Planlamanın manuel yapılması; makinist çalışma sürelerinin dengeli olmaması ve planlamanın yetersizliği sorunlarının yanında, planlama sürecinin uzun sürmesine de sebep olmaktadır. YHT için Ankara, Eskişehir, Konya, İstanbul, Karaman ve Sivas hatlarına ilaveten yakın zamanda Bursa ve İzmir hatlarının da açılacak olması bu süreci daha da karmaşıklaştıracaktır. Bu çalışma ile, YHT trenlerinin optimum sefer eşleştirmesi yapılarak makinist ihtiyacının belirlenmesi sağlanmıştır. Planlama kısmının ilk aşamasında kapasite planlaması yapılmış, ikinci aşamasında ise mevcut personeli optimum çalıştırabilmek için matematiksel modeller geliştirilmiştir. Geliştirilen bu modeller CPLEX Studio IDE programında çözdürülme imkanı var iken, bu tarz programlar, ek maliyet gerektireceğinden, her problem MS Excel VBA programlama dilinde kodlanmış ve MS Excel eklentisi olan OpenSolver kullanılarak çözdürülmüştür. Geliştirilen sistemler, tüm olası durumlar için en iyi çözümleri bulabilmektedir.

Anahtar kelimeler: Çizelgeleme, Küme kapsama, Tam sayılı programlama, Ekip eşleştirme

Trip-Driver Matching in High Speed Trains (HST)

Abstract: TCDD, first started track laying of the High Speed Train between Ankara and Eskişehir in 2003. With the opening of Ankara-Eskişehir line to commercial services in the 13th of March in 2009, speed train management was started. Train services started with a total of 4 trips per day, 2 departures and 2 arrivals, between Ankara and Eskişehir and as of 04.05.2024, it has reached a total of 64 train services, 32 departures and 32 arrivals, to the cities of Ankara, Eskişehir, Konya, İstanbul, Karaman and Sivas. With the increasing number of trips, the number of personnel working on trains has increased and the planning of this personnel has become difficult. In YHTs, the planning of personnel working for the current train services is done manually by the relevant department. Manuel plannig; in addition to the problems of unbalanced machinist working hours and insufficient planning, it also causes the planning process takes a long time. For YHT, in addition to the Ankara, Eskişehir, Konya, İstanbul, Karaman and Sivas lines, Bursa and İzmir lines will soon be opened, which will further complicate this process. With this study, the optimum train service matching of YHT trains were determined and the need for machinist was determined. In the first stage of the planning part, capacity planning was made and in the second stage, mathematical models were developed to optimally employ the existing personnel. While it was possible to solve these developed models in the CPLEX Studio IDE program, since such programs would require additional costs, each problem was coded in the MS excel VBA programming language and solved using OpenSolyer, an MS excel add-in. The developed systems can find the best solutions for all possible situations.

Keywords: Scheduling, Set covering, Integer programming, Crew scheduling

Atıf için/Cite as: H. Duman, F. Çakır, H. Gökçen, "Yüksek hızlı trenlerde (YHT) sefer-makinist eşleştirmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 155-168, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1501204

1. Giriş

Osmanlı Devleti Hakimiyeti sınırları içerisindeki ilk demiryolunun yapımına 1851 yılında Mısır'da İskenderiye-Kahire arasında yapılan demir yolu başlanarak demir yollarının ilk adımı atılmış, 31 Mayıs 1927 tarih ve 1042 sayılı kanun ile merkezi Ankara olmak üzere Devlet Demiryolları ve Limanları İdare-i Umumiyesi adı ile kurularak demiryolları kurumsallaştırılmıştır [1].

Demiryolu taşımacılığının daha verimli ve daha ekonomik olması için, Demiryolu taşımacılığının serbestleştirilmesi ve TCDD'nin yeniden yapılandırılması çalışmaları kapsamında, 1 Mayıs 2013 tarihinde 6461 Sayılı "Türkiye Demiryolu Ulaştırmasının Serbestleştirilmesi Hakkında Kanun" yürürlüğe girmiştir. Bu kanunla TCDD altyapı işletmecisi, TCDD Taşımacılık A.Ş. ise tren işletmecisi olarak tanımlanmıştır [2].

Ülkemizde YHT yolcu taşımacılığı, 13.03.2009 tarihinde Ankara-Eskişehir yüksek hızlı demiryolu hattının işletmeye açılmasıyla birlikte başlamıştır. 2009 yılında açılan Ankara-Eskişehir hattını sıra ile Ankara-Konya, Ankara-İstanbul, Konya-İstanbul, Konya-Karaman, Ankara-Sivas ve Sivas-İstanbul takip etmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Yüksek hızlı tren hatların işletmeye açılış tarihleri

Yüksek hızlı hat kesimi	Açılış tarihi
Ankara-Eskişehir	13.03.2009
Ankara-Konya	24.08.2011
Ankara-İstanbul (Pendik)	27.07.2014
Konya-İstanbul (Pendik)	18.12.2014
Ankara-İstanbul (Söğütlüçeşme/Halkalı)	13.03.2019
Konya-İstanbul (Söğütlüçeşme/Halkalı)	13.03.2019
Konya-Karaman	8.01.2023
Ankara-Sivas	26.04.2023
Sivas-İstanbul	04.05.2024

Yeni açılan YHT hatlarına paralel yolcu sayılarındaki artışlarla birlikte 2009 yılında 2 gidiş, 2 dönüş olmak üzere 4 adet sefer ile başlanılan yolcu taşımacılığı, yıllara göre artış yaşanmış ve 04.05.2024 tarihi itibarıyla 64 sefer sayısına ulaşmıştır (Tablo 2).

Tablo 2. Yüksek hızlı tren güncel sefer sayıları

Güncel YHT sefer sayıları	
YHT hat kesimi	Hafta sonu
Ankara-Eskişehir-Ankara	4 (2+2)
Ankara-Konya-Ankara	14 (7+7)
Ankara-İstanbul-Ankara	28(14+14)
Konya-İstanbul-Konya	10 (5+5)
Eskişehir-İstanbul-Eskişehir	2(1+1)
Ankara-Sivas-Ankara	4(2+2)
Sivas-İstanbul-Sivas	2(1+1)
TOPLAM	64

TCDD Taşımacılık A.Ş 'ye bağlı Yolcu Dairesi Başkanlığı tarafından her yılın aralık ayında yapılan anketler, pazar araştırmaları, yolcu talepleri ve işletme şartları doğrultusunda YHT sefer planları yapılmakta, belirlenen sefer saatlerine göre, trenlerde görev alacak makinist planlaması "Turnist Planı" adı verilen bir yöntem kullanılarak belirlenmektedir.

Turnist planı; seferlerin kalkış-varış saatleri ve yerleri temel alınarak seferlerin birbirleriyle eşleştirmeleri, sonrasında da eşleştirilen seferlere makinist görevlendirilmesi ile oluşturulan çizelgelerdir. Hali hazırda çizelgeleme işlemi sonucunda, seferlerin gerçekleştirilebilmeleri için gerekli olan makinist sayıları hesaplanmakta, daha sonra, planda yer alan seferler için hesaplanan makinist sayısına atölyelerde ve depolarda manevra ve ihtiyat (acil durumlar için yedek) gibi görevler için görevlendirilecek makinist sayısı ilave edilmektedir. Son olarak yıllık izin hastalık gibi kayıplar göz önüne alınarak %20 ilave edilerek ihtiyaç duyulan makinist personel sayısı belirlenmektedir.

YHT seferleri için hazırlanan turnist planının oluşturulması uzun zaman almaktadır. Manuel olarak hazırlandığı için en ufak bir hatada veya alternatiflerin değerlendirilmesi istendiğinde yeniden oluşturulması gerekmektedir. Ayrıca hazırlanan plan, bu planı hazırlayan çalışanın inisiyatifine bağlı olduğu için sistematik bir uygulamaya sokulamamaktadır. Bununla beraber, oluşturulan planın en iyi olup olmadığı değerlendirilemediği için, daha az sayıda makinist ile seferlerin gerçekleşip gerçekleşmeyeceği de bilinmemektedir.

YHT 'lerde görev alan personelin planlanması ve görevlendirilmesinin yapılmasından sorumlu birim amirleri ve birim çalışanları ile yapılan görüşmeler, analizler ve gözlemler sonucunda elde edilen şikayetler aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Turnist planının el ile hazırlanması ve bu yüzden fazla zaman alması,
- Ortaya çıkan planların performansı bilinmemesi, dengeli bir iş yükü oluşturulmaması,
- Giderek artan sefer ve hat sayılarının planlamayı daha da güçleştirmesi,
- Mevcut durum için en uygun (optimal) makinist sayısının belirlenememesi,
- Turnist planı hazırlanırken fazladan harcanan iş gücü ve zaman,
- Makinistin verimli ve adaletli bir şekilde çalıştırılmamasıdır.

TCDD Taşımacılık A.Ş tarafından yayımlanan 205 numaralı genel emirde YHT makinistini, mevzuatla belirlenmiş çalışma süresi ve çalışma kuralları içerisinde emniyetli, konforlu ve ekonomik bir şekilde; iş sağlığı ve güvenliği, emniyet, çevre ve kalite standartları ile mevzuata, iş talimatına uygun olarak, tren setini teslim alan, süren, sevk ve idare eden kişiyi tanımlar.

Her YHT trenine 2 adet makinist personel görevlendirilmiştir. Makinistler seferlerden 1 saat önce görev almak ve seferlerden 30 dakika sonra görevlerini bırakmak zorundadır. Kurumda YHT makinistleri Ankara, Eskişehir, Konya, İstanbul ve Sivas 'da ikamet etmektedir. Turnist planlaması yapılırken; makinistlerin yaşadıkları şehirler dikkate alınmaktadır. Buna göre, makinist günlük çalışma sonrasında yaşadıkları şehre dönecek şekilde turnist planı oluşturulmaktadır. Eğer makinist günlük çalışmasını yaşadığı şehirde tamamlayamıyorsa (geceleme yapıyorsa); konaklama ve yemek ihtiyaçları kurum tarafından karşılanmaktadır.

Makinist personel 399 sayılı kanuna göre kadro karşılığı sözleşmeli personel olarak çalışmakta, haftalık çalışma süresi en fazla 40 saattir. Kurum tarafından yapılan mevzuatlar ve emirler doğrultusunda makinistin tren üzerindeki görevi 11 saati aşmamaktadır. Günlük görevler arasındaki dinlenme süresi en az 11 saat olmak zorundadır.

Çalışma kapsamında, kurumun sahip olduğu problemlerin çözümüne yönelik araştırmalar yapılmış, benzer problemleri konu edinen makale, tez ve kitaplar incelenmiştir. Yapılan araştırmalar sonucunda, problemin çözüm sürecinde yararlanılan çalışmalar çözüm yaklaşımlarına göre kategorize edilip Tablo 3 'de gösterilmiştir.

Tablo 3. İlgili çalışmalar

Yazar	Konu	Problem ve çözüm süreci
Yüceoğlu ve Şahin [3]	Ekip Planlama, Ekip Kapasite Planlama	Ekip kapasite planlama problemi, program büyük ölçekli olduğu için aç gözlü (Greedy) algoritma kullanılarak çözülmüştür. Kapasite hesaplamasında 24 saatlik dinlenmeleri kısıt olarak kullanarak, matematiksel yöntem olarak minimum akış problemi incelenmiştir. Yöntemler karşılaştırıldığında açgözlü algoritmanın daha iyi sayısal sonuç verdiği ortaya çıkmıştır.
Mingozzi et al [4]	Ekip Eşleştirme-Küme Ayırıştırma-Kapsama	Küme ayırıştırma matrisini kullanmadan küme ayırıştırma modelinin doğrusal programlama gevşetmesinin ikiline sezgisel bir çözüm bularak, ekip çizelgeleme problemine bir alt sınır hesaplamışlardır. İkil çözümleri, modeldeki değişken sayısını azaltmada kullanılmışlardır.
Bengtsson, Galia, Gustafsson, Hjorring and Kohl [5]	Ekip Eşleştirme	Eşleştirme probleminde sütun türetme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile en kısa yol numaralandırılmasına dayanarak maliyetlendirme problemi çözülmüştür. El ile yapılan planlamaya göre %15 kar elde edilmiştir.
Ernst ve Jiang [6]	Ekip Çizelgeleme	Ekip çizelgeleme ve ekip listeleme probleminin çözümü için tümleşik optimizasyon modeli önerilmiştir. Problemin geleneksel modellerden farkı her bölgede bulunan mürettebat sayısını da dikkate almasıdır. Elde edilen sayısal sonuçlar, iş gücünün azaltılabileceğini göstermiştir.
Bazargan [7]	Ekip Atama-Eşleştirme	Bir uçağın art arda alabileceği seferlerden oluşan eşleşmeler listesi hazırlanmıştır. İlk olarak, olası bütün eşleşmelerden hangilerinin kullanılacağına karar veren model kurulmuştur. Bu modelin optimal sonucuna dayanarak, karar verilen eşleşmelere uygun ekip atamalarını yapan ikinci model oluşturulmuştur. İkinci modelde, ekibin uygun çalışma gün ve saat bilgisinden yola çıkarak hazırlanan, yeni bir eşleşme kullanılmıştır. Bu yeni eşleşmede, her bir ekip için yer alabileceği olası tüm eşleşmeler kombinasyonu bulunmaktadır
Frisch, Hungerlander ve Jellen [8]	Demiryolu Ekip Çizelgeleme	Gerçek hayatta demiryolu personel planlaması (çizelgeleme problemi) için modelleme çalışması yürütülmüştür. Geniş öncelikli arama yöntemi kullanılarak eşleştirme algoritmalar belirlenmiş ve tam sayılı doğrusal programlama yöntemi kullanılarak ekip eşleştirmeleri oluşturulmuştur. Tüm görevleri sağlayacak minimum sayıdaki eşleşmenin seçilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada kullanılan algoritmalar programlama dilinde yazmış olduğumuz kodlara ışık tutmuştur

Bu çalışmada, YHT sefer-makinist eşleştirme problemimize en uygun kısıtlara ve amaç fonksiyonuna sahip olan Bazargan'ın yaklaşımı, Frisch, Hungerlander ve Jellen çalışmalarında kullanmış olduğu algoritmalar ve küme ayırıştırma-kapsama yöntemi temel alınarak matematiksel modeller oluşturulmuştur.

2. Metot

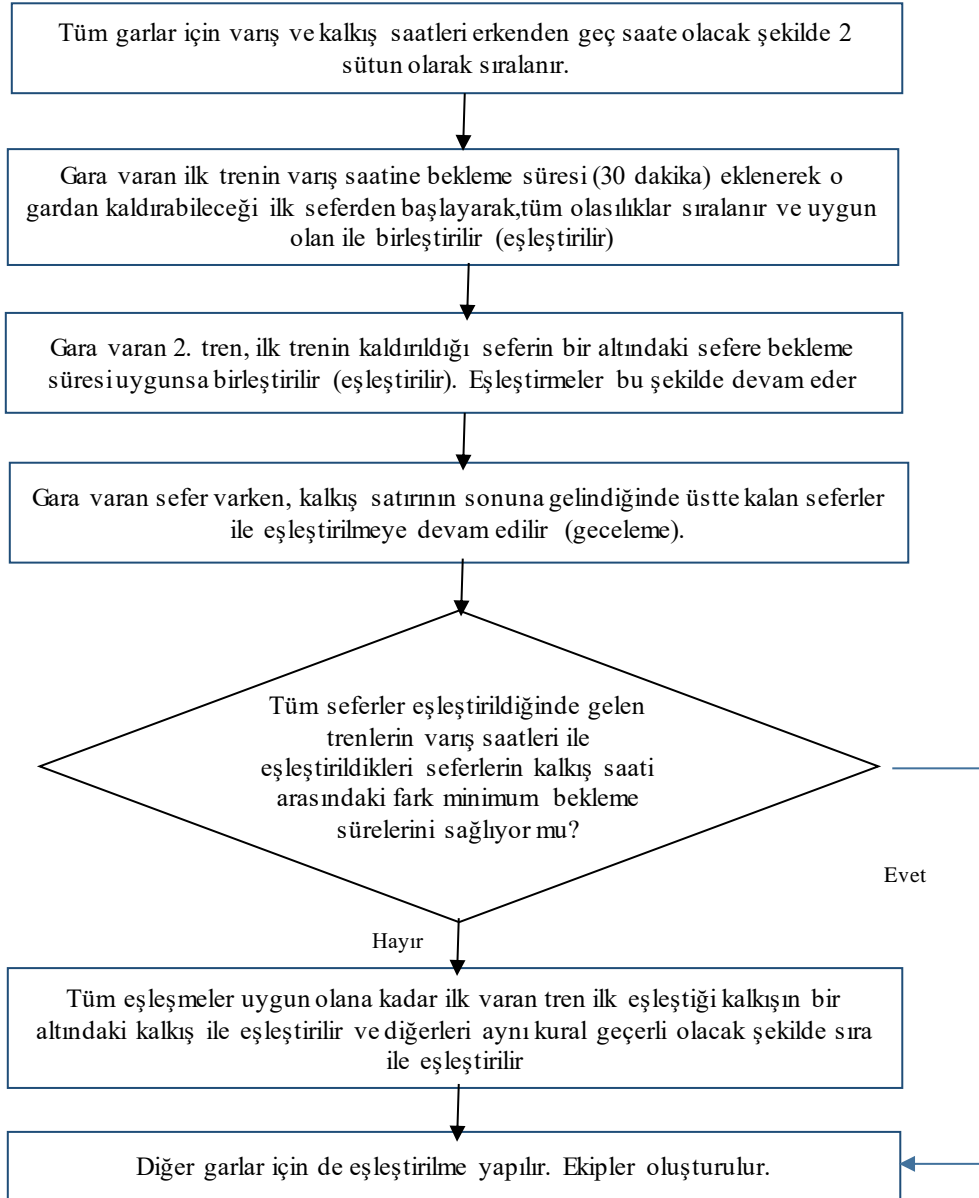
Demiryolu ekip çizelgeleme için, Ball and Roberts problemi bir dizi alt probleme ayırıştırarak, küme ayırıştırma'yı bir şebeke üzerinde gerçekleştiren bir yordam önermişlerdir [9, 10]. Öncelik atamalı aylık bir ekip çizelgeleme problemini çözmek için, şebeke boyama ve tabu arama algoritması tabanlı bir yöntem kullanmıştır.

YHT hattı için Sefer-makinist planlaması (turnist planı) oluşturma işleminin adımları aşağıdaki gibidir:

- 1) Sefer-makinist eşleştirilmesi.
- 2) İhtiyaç duyulan makinist personel sayısının belirlenmesi.

2.1. Sefer-makinist eşleştirmesi ve matematiksel modeller

Bir trenin seferini tamamladığı istasyondan sırada hangi seferi alacağını belirlediği çalışma planına eşleştirme denir. Eşleştirmede trenlerin hareket saatleri ve ara bekleme süreleri ve personelin günlük en fazla çalışma süresi (11 saat) dikkate alınır; alacakları bir sonraki sefer ve varacakları istasyon belirtilir. Sefer eşleştirmesi aynı zamanda da makinist eşleştirmesi anlamındadır. Kurum personelinin manuel yapmış olduğu ekip eşleştirmesine ilişkin süreç akış şeması Şekil 1’de verilmektedir.



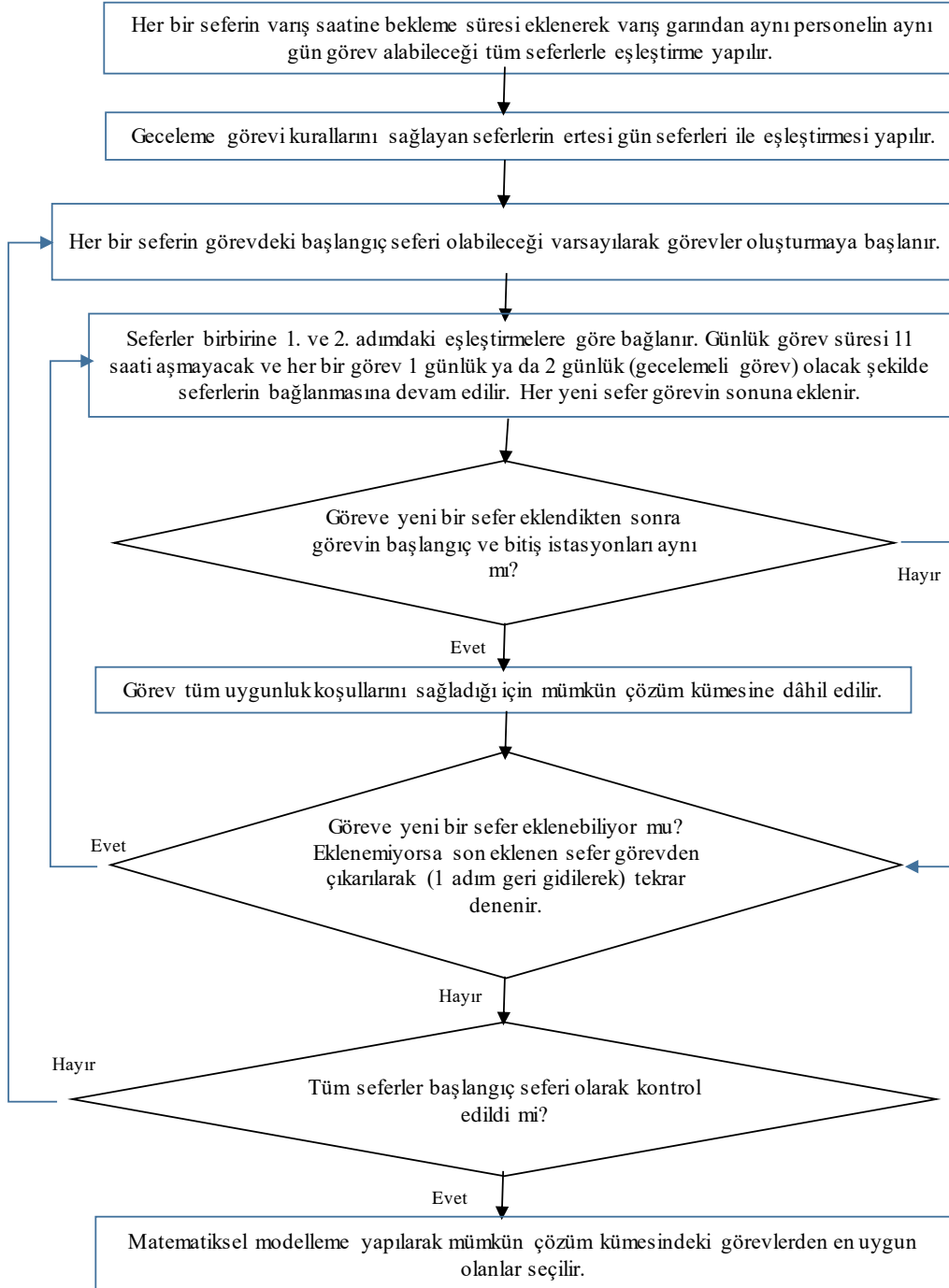
Şekil 1. Eşleştirme süreç akış şeması

Süreç akış şemasından da anlaşılacağı üzere;

- Seferlerin kalkış ve varış saatleri en erken saatten en geç saate doğru sıralanır.

- Gara varan ilk tren, varış saatine bekleme süresi de eklenerek o gardan kaldırabileceği ilk seferle eşlenir. Buna paralel olacak şekilde gara varan ikinci tren, ilk trenin atandığı seferden bir sonraki sefere atanır. Sıra ile bütün atamalar bu şekilde yapılır.
- Eşleşmelerde kalkış sütununun sonuna gelindiğinde, sıradaki eşleşmeyen varış seferi en baştaki kalkış seferi ile eşleşir. Aynı sırayı takip ederek atanamayan diğer seferlerin eşleşmesi gerçekleştirilir.

Bu çalışma kapsamında yapılan eşleştirmeye ilişkin eşleştirme ve matematiksel modelleme süreç akış şeması Şekil 2’de verilmektedir.



Şekil 2. Eşleştirme ve matematiksel modelleme süreç akış şeması

Bu çalışmada kullanılan bazı kavramların tanımları aşağıda verilmiştir:

Tren seferi; belirli bir şehirden başka bir şehre giden, kalkış ve varış zamanı ile seyir süresi belirli olan aralıksız bir tren seferini ifade eder.

İş alış merkezi; çizelgeleme yapılacak YHT makinistlerinin ikamet ettiği şehirdir. Tren seferlerini gerçekleştirecek olan ekiplerin, göreve iş alış merkezin' den başlayıp yine aynı şehirde görevlerinin son bulması gerekmektedir. İş alış merkezleri Ankara, Eskişehir, Konya, İstanbul ve Sivas şehirleridir.

Görev; personel için günlük iş değeridir.

Görev süresi; birbirinden kısa dinlenme süreleri ile ayrılan birden fazla tren seferinin toplam süresini ifade eder.

Görev süresine dâhil olan iş alma ve iş bırakma süresi; sırasıyla, makinistin görev aldıktan sonra trenin hareket saatine kadar geçen süre ile trenin varış saatinden itibaren makinistin görevi bırakmasına kadar geçen süreleri ifade eder [11].

Toplam görev süresi; kısaca iş alma ile iş bırakma süresi arasında geçen zamanların toplamıdır.

$$\text{Toplam görev süresi (iş yükü)} = \sum(\text{Toplam Görev Süreleri} + \text{Toplam Kısa Dinlenme Süreleri} + \text{İş Alma ve İş Bırakma Süreleri}) \quad (1)$$

Kendi merkezinden uzakta geçen zaman (KMUGZ); bir eşleştirmedeki görev süreleri arasında bulunan gece dinlenmelerini içeren toplam zaman olarak tanımlanır. Eşleştirmede kendi şehirden uzakta geçen toplam zamanı ifade eder [12].

$$\text{KMUGZ} = \sum \text{Toplam görev süreleri} + \sum \text{Uzun dinlenme(geceleme) süreleri} \quad (2)$$

Eşleştirme içinde ardışık iki görev süresi arasında gerçekleşen dinlenme süreleri uzun dinlenme, bir görev süresi içerisindeki ardışık iki tren seferi arasında gerçekleşen dinlenmeler ise kısa dinlenme olarak adlandırılmaktadır.

Kısıtlar: TCDD Taşımacılık A.Ş. 'nin 08.11.2023 tarihli 505531 sayılı "Makinist personelin çalışma ve dinlenme saatleri hakkında" Genel Müdürlük yazısı ile "makinistlerin günlük 8 saat çalıştırılması 3 saat fazla çalışma ile toplam 11 saat çalışmasını geçmeyecektir." ve "Makinistlere kendi merkezlerinde ve harici merkezlerde en az 11 saatlik dinlenme süresi verilecektir." denilmektedir. Buna göre bir görev süresi içerisinde kendi ve harici merkezde en az dinlenme süresi 11 saat (660 dk.) ve toplam görev süresi en fazla 11 saat (660 dk.) olmalıdır.

Matematiksel modeller:

a) Optimal makinist sayısının belirlenmesi (Kapasite planlama):

Küme kapsama modeli, tüm tren seferleri en az bir ekip eşleştirmesi tarafından kapsanacak şekilde toplam makinist eşleştirmesini (makinist sayısını) en küçükmeyi amaçlamaktadır. Sonuç tam sayılı bir çözüm olup, en iyi çözümde aynı tren seferi birden fazla eşleştirme tarafından kapsanabilmektedir [13]. Model, tüm YHT seferlerinin kalkış ve varış yerlerini, kalkış ve varış saatlerini, toplam sefer sayısını, sefer sürelerini ve bir makinist bir günde alabileceği seferlerden oluşan eşleşmelerin sayısını parametre olarak ele almaktadır. Model için veriler Tablo 4 'den elde edilmiştir.

Tablo 4. Yüksek hızlı tren sefer saatleri

No	Ank	Esk	Süre	No	Esk	Ank	Süre	No	Halk	Esk	Süre
81001	06:00	07:18	1:18	81002	09:03	10:27	1:24	81006	07:10	11:09	3:59
81003	06:50	08:11	1:21	81004	10:05	11:26	1:21	81008	08:50	12:47	3:57
81005	07:30	08:48	1:18	81006	11:14	12:38	1:24	81304	08:20	12:23	4:03
81007	08:35	09:56	1:21	81458	11:47	13:06	1:19	No	Esk	Halk	Süre
81009	09:50	11:08	1:18	81008	12:52	14:16	1:24	81023	18:08	21:53	3:45
81011	11:00	12:21	1:21	81012	13:37	14:58	1:21	81025	18:46	22:33	3:47
81013	12:05	13:23	1:18	81014	14:13	15:37	1:24	81307	19:00	22:47	3:47
81015	13:10	14:31	1:21	81016	15:20	16:41	1:21	No	Ank	Kar	Süre
81017	14:15	15:33	1:18	81018	16:03	17:27	1:24	81201	06:30	09:11	2:41
81019	15:10	16:31	1:21	81020	17:18	18:42	1:24	81207	16:30	19:11	2:41
81459	15:52	17:08	1:16	81022	18:01	19:25	1:24	No	Kar	Ank	Süre
81023	16:45	18:03	1:18	81024	19:29	20:50	1:21	81206	10:50	13:31	2:41
81025	17:20	18:41	1:21	81026	20:33	21:57	1:24	81212	20:10	22:51	2:41
81027	18:25	19:46	1:21	81028	21:41	23:05	1:24	No	Ank	Kon	Süre
81029	19:35	20:53	1:18	81030	22:27	23:48	1:21	81203	09:15	11:01	1:46
81101	11:40	13:01	1:21	81100	06:36	08:00	1:24	81205	12:20	14:06	1:46
81103	17:50	19:11	1:21	81104	14:40	16:04	1:24	81209	18:10	19:57	1:47
No	S.çeş	Esk	Süre	No	Esk	S.çeş	Süre	81211	20:25	22:12	1:47
81002	06:00	08:58	2:58	81501	06:35	09:36	3:01	81213	21:10	22:56	1:46
81004	07:15	10:00	2:45	81301	07:49	10:46	2:57	No	Kon	Ank	Süre
81458	08:40	11:42	3:02	81303	10:34	13:25	2:51	81200	06:25	08:10	1:45
81012	10:35	13:32	2:57	81305	14:09	17:07	2:58	81204	09:15	11:01	1:46
81014	11:10	14:08	2:58	81309	20:24	23:22	2:58	81208	15:25	17:10	1:45
81016	12:20	15:15	2:55	81001	07:23	10:05	2:42	81210	17:30	19:15	1:45
81018	13:00	15:58	2:58	81003	08:16	11:21	3:05	81214	21:30	23:15	1:45
81020	14:20	17:13	2:53	81005	08:53	11:47	2:54	No	Kon	Esk	Süre
81022	14:50	17:56	3:06	81007	10:01	12:59	2:58	81301	06:00	07:44	1:44
81024	16:30	19:24	2:54	81009	11:15	14:10	2:55	81303	08:45	10:29	1:44
81026	17:30	20:28	2:58	81011	12:26	15:27	3:01	81305	12:20	14:04	1:44
81028	18:35	21:36	3:01	81013	13:28	16:15	2:47	81309	18:35	20:19	1:44
81030	19:35	22:22	2:47	81015	14:36	17:29	2:53	No	Esk	Kon	Süre
81302	06:30	09:28	2:58	81017	15:38	18:26	2:48	81302	09:33	11:19	1:46
81306	11:50	14:46	2:56	81019	16:36	19:33	2:57	81306	14:51	16:37	1:46
81308	15:30	18:35	3:05	81459	17:13	20:08	2:55	81308	18:40	20:26	1:46
81310	19:05	22:08	3:03	81027	19:51	22:48	2:57	81310	22:13	23:59	1:46
81502	20:35	23:47	3:12	81029	20:58	23:46	2:48	No	Kar	Esk	Süre
No	Ank	Siv	Süre	No	Siv	Ank	Süre	81307	16:15	18:55	2:40
81402	07:35	10:13	2:38	81401	07:30	10:07	2:37	No	Esk	Kar	Süre
81458	13:20	15:58	2:38	81459	13:00	15:37	2:37	81304	12:28	15:09	2:41
81404	18:40	21:18	2:38	81403	18:00	20:37	2:37				

Matematiksel modelin çözüm için kullanacağı veri, bir makinistin bir günde alabileceği seferlerden oluşan olası tüm eşleşmeleri gösteren bir uygunluk matrisi olarak MS Excel VBA'da oluşturulmuştur. Buna göre, bir makinist alabileceği seferin kalkış yeri ve varış yeri aynı olmak koşuluyla, kullanıcı tarafından belirlenen kalkış ve varış saatleri arasında minimum bekleme süresi (30 dakika) ve yönetmelikte belirtilen bir makinistin günlük en az 11 saat dinlenmesi göz önünde bulundurularak uygunluk değeri 1, aksi halde 0 olacaktır.

Kurulan modelin amaç fonksiyonu; tüm seferleri sağlayacak minimum sayıdaki eşleşmenin seçilmesidir. Eşleşmeler makinistin bir günde aldığı seferleri gösterdiği için, seçilen her eşleşme 2 makiniste karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, bu modelde kurumun tüm seferleri karşılayacak makinist sayısının en küçüklenmesi amaçlanmıştır. Makinist için geliştirilen günlük eşleşme modeli aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

Kapasite planlama problemi makinist için modellenmiştir. Buna göre T seferler kümesi, P olası tüm eşleşmeler kümesi olarak tanımlanmıştır. a_{pt} parametresi, $p \in P$ eşleşmesi $t \in T$ seferini kapsıyorsa 1 yoksa 0 değerini almaktadır. Ayrıca C_p de her $p \in P$ için eşleşme maliyetini göstermektedir. Diğer yandan her iki problemde de verilecek karar, herhangi bir $p \in P$ eşleşmesinin optimal çözümde (planda) seçilip seçilemeyeceğidir ve,

$$X_p = \begin{cases} 1, p \text{ eşleşmesi seçildiye} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall p \in P$$

şeklinde tanımlanır. Buna göre makinist için kapasite planlama problemleri aşağıdaki gibi oluşturulur:

Makinist kapasitesi ($KP_{makinist}$)

$$\text{Min} \sum_{p \in P} C_p X_p$$

Kısıtlar;

$$\sum_{p \in P} a_{pt} * X_p \geq 1 \quad \forall t \in T \quad (3)$$

$$X_p \in \{0,1\} \quad \forall p \in P$$

Burada amaç, bütün seferlerin kapsanmasını Denklem 3. kısıtla sağlayarak toplam eşleşme sayısını en küçüklemeektir.

b) Mevcut makinist sayısına göre verimli sefer-makinist çizelgesinin elde edilmesi:

Kapasite planlamada kullanılan formüllere ilave olarak Ankara, Eskişehir, Konya, İstanbul ve Sivas'ta yaşayan makinist sayıları da parametre olarak belirlenmiştir. Matematiksel modelin çözüm için kullanacağı veri, bir önceki matematiksel modelde kullanılmış olan uygunluk ve maliyet matrisidir.

Kurulan modelin amaç fonksiyonu, mevcut sistemde bulunan makinist sayısı için tüm seferleri sağlayacak verimli bir çalışma planı oluşturmaktır. Eşleşmeler makinistin bir günde aldığı seferleri gösterdiği için, seçilen her eşleşme bir makiniste karşılık gelmektedir. Dolayısıyla, bu modelde kurumun sahip olduğu makinist sayısı kadar eşleşme seçilmiştir. Makinist için geliştirilen günlük eşleşme modeli aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

Kapasite planlama problemlerinde kullanılan tanımlara ek olarak, $A \subset P$ Ankara makinisti, $E \subset P$ Eskişehir makinisti, $K \subset P$ Konya makinisti, $İ \subset P$ İstanbul makinisti, $S \subset P$ Sivas makinisti tarafından yapılacak eşleşmeleri ifade etmektedir. Ayrıca H_a , H_e , H_i , H_s ve H_k parametreleri sırasıyla Ankara, Eskişehir, İstanbul, Sivas ve Konya'daki makinist sayısını göstermektedir. Her iki problemde de verilecek karar, herhangi bir $p \in P$ eşleşmesinin optimal çözümde (planda) seçilip seçilemeyeceğidir ve,

$$X_p = \begin{cases} 1, p \text{ eşleşmesi seçildiye} \\ 0, \text{diğer durumlarda} \end{cases} \quad \forall p \in P$$

şeklinde tanımlanır. Buna göre mevcut sayıdaki makinist için verimli çizelgeler oluşturma (MMVÇ) problemleri aşağıdaki gibi oluşturulur:

$MMVC_{\text{makinist}}$:

$$\text{Min} \sum_{p \in P} C_p X_p$$

Kısıtlar;

$$\sum_{p \in P} a_{pt} X_p \geq 1 \quad \forall t \in T \quad (4)$$

$$\sum_{p \in A} a_{pt} X_p \geq H_a \quad \forall t \in T \quad (5)$$

$$\sum_{p \in E} a_{pt} X_p \geq H_e \quad \forall t \in T \quad (6)$$

$$\sum_{p \in K} a_{pt} X_p \geq H_i \quad \forall t \in T \quad (7)$$

$$\sum_{p \in K} a_{pt} X_p \geq H_s \quad \forall t \in T \quad (8)$$

$$\sum_{p \in K} a_{pt} X_p \geq H_k \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$X_p \in \{0,1\} \quad \forall p \in P$$

Burada amaç, bütün seferlerin kapsanmasını Denklem 4. ve en az Ankara, Eskişehir, İstanbul, Sivas ve Konya'da mevcut sayıda bulunan makinist kadar eşleşme sağlanmasını Denklem 5., 6., 7., 8. ve Denklem 9. kısıtları sağlayarak verimli bir çalışma planı oluşturmaktır.

Bir şehre gelen ve giden tren sayısının eşit olması, çizelgenin başladığı merkezde sonlanması, kendi merkezinden uzakta (geceleme) dinlenme süresi (en az 11 saat), bir makinistin alabileceği en fazla görev süresi (en fazla 11 saat) ve gün içerisinde iki görev arası en az bekleme (30 dakika) kısıtları MS Excel VBA programlama dilinde kodlanarak oluşturulmuştur.

2.2. İhtiyaç duyulan toplam makinist sayısının belirlenmesi

TCDD Taşımacılık A.Ş idaresi tarafından en son yayınlanan genel müdürlük emrinde personelin günlük çalışma süresi 11 saate düştüğünden personel ihtiyacı doğacağını bununda matematiksel yöntemlerle hesaplanması istenmiştir. Bu talep, çalışmanın amacına uygun olarak eşleştirme sonrası personel sayısı belirlenerek ihtiyaç listesi oluşturulmuştur. Makinist sayısı aşağıda belirtilen hesaplama yöntemi ile belirlenir.

$$\text{Makinist ihtiyacı} = \text{Yıllık toplam iş yükü} / \text{bir makinist (yapabileceği) yıllık iş yükü}$$

$$\text{Yıllık toplam iş yükü} = \text{Eşleşme ile oluşan makinist günlük iş yükü} \times 365 \text{ gün}$$

$$\begin{aligned} \text{Bir makinist yıllık iş yükü} &= \text{Yıllık çalışabileceği gün sayısı} \times \text{günlük çalışma süresi (8 saat)} \\ &= 221 \times 8 = 1768 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Yıllık çalışacağı gün sayısı} &= 365 - (\text{yıllık izin} + \text{haftalık tatil} + \text{resmi tatil}) \\ &= 221 \text{ gün (ortalama)} \end{aligned}$$

Makinistlerin günlük iş yükü; günlük ekip eşleşmesi oluşturulduktan sonra, günlük toplam iş yükü sürelerinin toplamı olarak ifade edilir.

3. Bulgular

YHT sefer-makinist eşleştirme problemimize en uygun kısıtlara ve amaç fonksiyonuna sahip olan Bazargan'ın yaklaşımı, Frisch, Hungerlander ve Jellen çalışmalarında kullanmış olduğu algoritmalar ve küme ayrıştırma-kapsama temel alınarak matematiksel modeller oluşturularak makinistin bir günde alabileceği seferlerden oluşan olası tüm eşleşmeleri gösteren bir uygunluk matrisi MS Excel VBA programlama dilinde kodlanmıştır. Daha sonra modelin kısıtları ve amaç fonksiyonu ile birlikte MS Excel eklentisi olan OpenSolver kullanılarak çözdürülmüştür. Elde edilen veriler Tablo 5, Tablo 6 ve Tablo 7 'de ayrıntılı olarak verilmiştir.

3.1. En iyi sefer-makinist eşleşmesinin elde edilmesi

Bu çalışma kapsamında, Matematiksel modelin çözüm için kullanacağı veri Tablo 4. 'ten elde edilmiştir. Mevcut durumdan bağımsız makinistin bir günde alabileceği seferlerden oluşan olası tüm eşleşmeleri gösteren bir uygunluk matrisi MS Excel VBA programlama dilinde kodlanarak oluşturulmuş ve modelin kısıtları ve amaç fonksiyonu ile birlikte MS Excel eklentisi olan OpenSolver kullanılarak çözdürülmüştür. Program sayesinde kapasite planlaması yapılarak YHT trenleri için en iyi sefer-makinist eşleşmesi yapılmıştır. Yapılan sefer-makinist eşleşmesi sonrası makinist sayıları Tablo 5 'te gösterilmiştir.

Tablo 5. Eşleşme sonrası günlük trenlerde görev alacak optimal makinist sayısı tablosu

İş merkezleri	Ankara	Sivas	Eskişehir	İstanbul	Konya	Toplam
Eşleşme sonrası günlük trenlerde görev alacak makinist sayısı	38	4	24	14	14	94

3.2. Mevcut makinist sayısına göre sefer-makinist eşleşmesinin elde edilmesi

Mevcut sayıdaki (Ankara'da 77, Eskişehir'de 38, Konya'da 16, İstanbul'da 12 ve Sivas'ta 10 makinist) makinistlere göre verimli çalışma çizelgeleri oluşturmak için kurulan matematiksel modeller (bölüm 2.1. (b) 'de verilen matematiksel model), makinistin bir günde alabileceği seferlerden oluşan olası tüm eşleşmeleri (3.197 eşleşme) gösteren bir uygunluk matrisi MS Excel VBA programlama dilinde kodlanarak oluşturulmuş, modelin kısıtları ve amaç fonksiyonu ile birlikte MS Excel eklentisi olan OpenSolver kullanılarak çözdürülmüştür. Mevcut sistemde, yaklaşık 2-3 gün harcanarak yapılan planlama çalışmaları, bu sistem ile yaklaşık 1-2 dakika da çözüm vermektedir. Çözüm sonucunda optimal eşleştirme elde edilmiştir. Ekip sayısına ve günlük eşleşme çizelgesine ilişkin sonuçlar Tablo 6 'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Günlük eşleşme tablosu

Ekp	İş mr	Parkur	Tren no	Kalk.	Variş	Per.	Seyir	G. sür	İş yük
1	Ank.	An-Siv-Ank	81402-81459	07:35	15:37	2	08:02	09:32	19,07
2	Ank.	Ank.-Siv.-Ank.	81458-81403	13:20	20:37	2	07:17	08:47	17,57
3	Ank.	An-Siv-Ank	81001-81012	06:00	14:58	2	08:58	10:28	20,93
4	Ank.	Ank-S.çeş-Ank	81005-81016	07:30	16:41	2	09:11	10:41	21,37
5	Ank.	Ank-Esk-Ank-Esk-Ank	81017-18-27-28	14:15	23:05	2	08:50	10:20	20,67
6	Ank.	Ank-Esk-Kon-Ank	81019-81308-81214	15:10	23:15	2	08:05	09:35	19,17
7	Ank.	Ank-Esk-Ank-Esk-Ank	81101-81014-25-24	11:40	20:50	2	09:10	10:40	21,33
8	Ank.	Ank-Kar-Ank	81201-81206	06:30	13:31	2	07:01	08:31	17,03
9	Ank.	Ank-Kar-Ank	81207-81212	16:30	22:51	2	06:21	07:51	15,70
10	Ank.	Ank-Esk-S.çeş (gec)	81003-81003	06:50	11:21	2	04:31	06:01	12,03
11	Ank.	Halk-Esk-Ank	81006-81458	07:10	13:06	2	05:56	07:26	14,87
12	Ank.	Ank-Esk-S.çeş (gec)	81009-81009	09:50	14:10	2	04:20	05:50	11,67
13	Ank.	Halk-Esk-Ank	81008-81008	08:50	14:16	2	05:26	06:56	13,87
14	Ank.	Ank-Esk-Hal(gec)	81459-81023	15:52	21:53	2	06:01	07:31	15,03
15	Ank.	S.çeş-Esk-Ank	81026-81026	17:30	21:57	2	04:27	05:57	11,90

16	Ank.	Ank-Esk-Hal (gec)	81025-81025	17:20	22:33	2	05:13	06:43	13,43
17	Ank.	S.çeş-Esk-Ank	81022-81022	14:50	19:25	2	04:35	06:05	12,17
18	Ank.	Ank-Esk-S.çeş (gec)	81103-81027	17:50	22:48	2	04:58	06:28	12,93
19	Ank.	S.çeş-Esk-Ank	81028-81030	18:35	23:48	2	05:13	06:43	13,43
20	Siv.	Siv-Ank-Siv	81401-81458	07:30	15:58	2	08:28	09:58	19,93
21	Siv.	Siv-Ank-Siv	81459-81404	13:00	21:18	2	08:18	09:48	19,60
22	Esk.	Esk-S.çeş-Esk	81501-81014	06:35	14:08	2	07:33	09:03	18,10
23	Esk.	Esk-S.çeş-Esk	81017-81030	15:38	22:22	2	06:44	08:14	16,47
24	Esk.	Eskiş-Kar-Esk	81304-81307	12:28	18:55	2	06:27	07:57	15,90
25	Esk.	Esk-S.çeş-Esk	81019-81502	16:36	23:47	2	07:11	08:41	17,37
26	Esk.	Esk-Ank-Esk-S.çeş (gec)	81006-15-81459	11:14	20:08	2	08:54	10:24	20,80
27	Esk.	S.çeşme-Esk.	81308	15:30	18:35	2	03:05	04:35	9,17
28	Esk.	Eski-Ank-Esk-Hal(gec)	81014-23-81307	14:13	22:47	2	08:34	10:04	20,13
29	Esk.	S.çeşme-Esk.	81018	13:00	15:58	2	02:58	04:28	8,93
30	Esk.	Esk-Ank-S.çeş (gec)	81100-81007	06:36	12:59	2	06:23	07:53	15,77
31	Esk.	Halkalı-Esk.	81304	08:20	12:23	2	04:03	05:33	11,10
32	Esk.	Esk-S.çeş-Kon (gec)	81015-81310	14:36	23:59	2	09:23	10:53	21,77
33	Esk.	Kon.-Esk.	81309	18:35	20:19	2	01:44	03:14	6,47
34	S.çeş	S.çeş-Ank-S.çeş	81002-81011	06:00	15:27	2	09:27	10:57	21,90
35	S.çeş	S.çeş-Ank-S.çeş	81004-81013	07:15	16:15	2	09:00	10:30	21,00
36	S.çeş	S.çeşme-Esk-S.çeş	81458-81305	08:40	17:07	2	08:27	09:57	19,90
37	S.çeş	S.çeşme-Ank-S.çeş	81020-81029	14:20	23:46	2	09:26	10:56	21,87
38	S.çeş	S.çeşme-Esk-Kon (gec)	81306-81306	11:50	16:37	2	04:47	06:17	12,57
39	S.çeş	Kon-Esk-S.çeşme	81303-81303	08:45	13:25	2	04:40	06:10	12,33
40	S.çeş	S.çeşme-Esk-S.çeşme	81024-81309	16:30	23:22	2	06:52	08:22	16,73
41	Kon.	Kon.-Ank-Kon.	81204-81205	09:15	14:06	2	04:51	06:21	12,70
42	Kon.	Kon.-Ank-Kon.	81208-81213	15:25	22:56	2	07:31	09:01	18,03
43	Kon.	Kon.-Ank-Kon.	81210-81211	17:30	22:12	2	04:42	06:12	12,40
44	Kon.	Kon.-Ank-Kon.	81200-81203	06:25	11:01	2	04:36	06:06	12,20
45	Kon.	Kon.-Esk-Ank-Kon	81305-81104-81209	12:20	19:57	2	07:37	09:07	18,23
46	Kon.	Kon.-S.çeşme (gec)	81301	06:00	10:46	2	04:46	06:16	12,53
47	Kon.	S.çeşme-Kon.	81302	06:30	11:19	2	04:49	06:19	12,63

3.3 Toplam ihtiyaç duyulan makinist sayısı

Mevcut sistemde kurum Ankara'da 77, Eskişehir'de 38, Konya'da 16, İstanbul'da 12 ve Sivas'ta 10 makinist olmak toplam 153 makinist bulunmaktadır. Bu makinistlerin 28 adeti manevra ve ihtiyatta kullanılmaktadır. Geriye kalan makinistler (125 adet) YHT seferleri, yıllık ve haftalık izin için ayrılmaktadır. Aşağıda yer alan Tablo 7 'de görüleceği üzere bu sayı; seferler ve izinler için yetersiz kalmakta dolayısıyla makinistler aşırı fazla mesai yapmakta ve yeterince dinlenememektedir.

Toplam makinist sayısı bölüm 2.2. 'de verilen hesaplama yöntemi ile hesaplanarak Tablo 6. yer alan verilerden yararlanılarak hesaplanmaktadır. YHT hatlarında çalışan her tren için 2 makinist görevlendirilmektedir. Toplam makinist ihtiyacını Tablo 7 'de verilmiştir.

Tablo 7. YHT trenlerinde görev alacak gerekli makinist sayısı

Güzergah	Ankara	Sivas	Eskişehir	İstanbul	Konya	Toplam
Eşleşme ile trenlere verilen makinist sayısı	38	4	24	14	14	94
Atölye / depo / ihtiyat	12	4	4	6	2	28
Yıllık + haftalık izin	33	7	17	16	7	80
Toplam makinist ihtiyacı	83	15	45	36	23	202

4. Sonuç

YHT 'lerde görev alan personelin mevcut seferler için planlaması ilgili birimler tarafından manuel olarak yapılmaktadır. Planlamanın manuel yapılması; makinist çalışma sürelerinin dengeli olmaması ve planlamanın yetersizliği sorunlarının yanında, planlama sürecinin uzun sürmesine de sebep olmaktadır. Çalışma kapsamında, makinist bir günde alabileceği seferlerden oluşan olası tüm eşleşmeleri (3.197 eşleşme) gösteren bir uygunluk matrisi MS Excel VBA programlama dilinde kodlanarak oluşturulmuş ve modelin kısıtları ve amaç fonksiyonu ile birlikte MS Excel eklentisi olan OpenSolver kullanılarak çözdürülmüş ve 47 ekip (94 adet makinist) çizelgesi oluşturulmuştur. Program olası durumlar için en iyi çözümleri bulabilmektedir.

Bu çalışmanın kuruma sunduğu katkılar aşağıda verilmiştir:

- Kurumun beklentisi üzerine, model sayesinde makinist planlama çizelgeleri oluşturulurken, otomatik bir sistem yardımıyla kişiden bağımsız sistematik bir yaklaşım ele alınmıştır.
- Yapılan bu çalışma ile manuel olarak gerçekleştirilen çizelge hazırlama işleminde çalışanların iş yükleri azalmıştır.
- Makinistlere dengeli ve adaletli bir çalışma çizelgesi sunulmuştur.
- Makinistlerin verimli şekilde çalışması sağlanmıştır.
- Yeni yayımlanan Genel Müdürlük emrine göre hangi merkezlere ne kadar makinist ihtiyacının olduğu belirlenmiştir.
- Yeni sefer ve hat eklenmesi gibi gelecekte görülebilecek birçok durumda, tasarlanan sistem sayesinde dakikalar içinde yeni plan elde edilebilmektedir.
- Gelecekte açılması planlanan Bursa, İzmir, Kayseri gibi hatların eklenmesi durumunda planlamanın elle yapılmasının çok zor olması, yapılırsa bile çok uzun zaman alacak olması engeli ortadan kalkmıştır.

Teşekkür

TCDD Taşımacılık A.Ş. Genel Müdürü Ufuk YALÇIN 'a, Yolcu Dairesi Başkanı Erhan TEPE 'ye ve Yolcu Dairesi Başkan yardımcısı Rahmi Kamil GAYDA 'ya desteklerinden dolayı teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] İ. Yıldırım, "Cumhuriyet Döneminde Demiryolları (1923-1950)", *Atatürk Araştırma Merkezi (ATAM)*, Ankara, 2001
- [2] TCDD Taşımacılık A.Ş, erişim: 1 Haziran 2024, <http://www.tcddtasimacilik.gov.tr/sayfa/hakkimizda/> sitesinden 1 haziran 2024 tarihinde alınmıştır.
- [3] G. Şahin ve B. Yüceoğlu, "Tactical crew planning in railways", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47 (6), 1221-1243, 2011.
- [4] A. Mingozzi, M.A. Boschetti, S. Ricciardelli, Et Al., "A Set partitioning approach to the crew scheduling problem", *Operations Research*, 47 (6): 873-888, 1999.
- [5] L. Bengtsson, R. Galia, T. Gustafsson, C. Hjørring, N. Kohl, "Railway crew pairing optimization", *Algorithmic Methods for Railway Optimization*, 126-144, 2007
- [6] A. T. Ernst, H. Jiang, M. Krishnamoorthy, B. Owens, D. Sier, "An annotated bibliography of personnel scheduling and rostering", *Annals of Operations Research*, 127, 21- 144, 2004.
- [7] Bazargan, Massoud, *Airline Operations and Scheduling*. U.S.A, 2004
- [8] S. Frisch, P. Hungerlander and A. Jellen. "On a real-world railway crew scheduling problem", *Transportation Research Procedia*, 62, 824-831, 2022.
- [9] M. Ball, A. Roberts, "A Graph partitioning approach to airline crew scheduling", *Transportation Science*, 19 (2): 107-126, 1985.

- [10] M. Gamache, A. Hertz, J.O. Ouellet, “A Graph coloring model for a feasibility problem in monthly crew scheduling with preferential bidding”, *Computers & Operations Research*, 34 (8): 2384-2395, 2007.
- [11] Y. Üstündağ, “Ekip çizelgeleme problemi”, *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 1, ss. 72–83, Aralık 2014.
- [12] T. Park, K.R. Ryu, “Crew pairing optimization by a genetic algorithm with unexpressed genes”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 17 (4): 375-383, 2006/a.
- [13] G. Çankaya, M. Arıkan, “Sütun oluşturma algoritması ile bir havayolu ekip çizelgelemesi uygulaması”, *Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der.* 24:1 43-50, 2009.

Özgeçmiş



Halim DUMAN

1984 Ordu doğumludur. 2006 yılı Selçuk Üniversitesi Endüstri Mühendisliği lisans mezunudur. 15 yıllık Demiryolculuk yaşamında YHT Yolcu Servis Müdürlüğünde; tren ve personel planlama, iş geliştirme, süreç iyileştirme, istatistik gibi işlerin yürütülmesinde görev almıştır. Halen bu birimde çalışmaya devam etmektedir.

E-Posta: h_duman84@hotmail.com



Fatih ÇAKIR

1981 Giresun doğumludur. 2006 yılı Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği lisans mezunudur. 13 yıllık Demiryolculuk yaşamında YHT Şube Müdürlüğünde; tren planlama, iş geliştirme, süreç iyileştirme, istatistik gibi işlerin yürütülmesinde görev almıştır. Halen bu birimde çalışmaya devam etmektedir.

E-Posta: fat2019@gmail.com



Hadi GÖKÇEN

1987 yılında Gazi Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden mezun oldu. 1989 ve 1994 yıllarında Gazi Üniversitesi'nden Endüstri Mühendisliği alanında yüksek lisans ve doktora derecelerini aldı. Dr. Gökçen, 1998 yılında imalat ve hizmet sistemleri alanında Doçent unvanını, 2004 yılında ise Profesör unvanını almıştır. Araştırma alanları arasında; Çok Amaçlı Optimizasyon, Doğrusal Programlama, Tamsayılı ve Karma Tamsayılı Programlama, Üretim Planlama ve Kontrol, Karar Destek Sistemleri ve Tedarik Zinciri ve Lojistik Yönetimi yer almaktadır.

E-Posta: hgokcen@gazi.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Halim DUMAN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Kaynaklar, Doğrulama, Yazma-orijinal taslak hazırlama, Görselleştirme, Düzenleme, İnceleme, Yazılım. Fatih ÇAKIR: Kaynaklar, İnceleme, Kontrol, Yazılım. Hadi GÖKÇEN: Kontrol, Düzenleme ve İnceleme.



Ankara İlinde Alternatif Kent İçi Raylı Sistem Güzergâh Planlaması: Sincan-Koru Metro Hattı Örneği

Ömer ÇÖLOVA*^{ID}, Oytun ARSLAN^{ID}, Fevzican GÜLBİTTİ^{ID}

Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye

*omercolova@karabuk.edu.tr

(Alınış/Received: 28.05.2024, Kabul/Accepted: 25.06.2024, Yayınlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Günümüzde hızlı nüfus artışı ve kentleşmeye bağlı olarak yetersiz kalan sokak ve cadde yolları ulaşım sorununu artırmakta ve mevcutta kullanılan toplu taşımalar yetersiz kalmaktadır. Özellikle bu problemlerin olduğu bölgelerde ulaşım amaçlı olarak raylı sistemler tercih edilmektedir. Ankara ili, Türkiye'nin başkenti ve nüfus yoğunluğu bakımından en büyük ikinci şehri olması ve konumu itibarıyla önemli şehirler arasında yer almaktadır. Kentte hızla artan nüfusu, yoğun iş ve ticaret faaliyetleriyle birlikte giderek artan araç sayısı trafik yoğunluğunu arttırmaktadır. Bu durum, yolların kapasitesini zorlamakta ve trafik sıkışıklığına neden olarak zaman kaybı yaşatmaktadır. Oluşan trafik sıkışıklığı sadece zaman kaybına yol açmakla kalmayıp, ekonomik kayıplara da neden olmaktadır. Bu sebeplerden dolayı toplu ulaşımaya yönelim artmaktadır. Nüfus yoğunluğu, kamu kuruluşları ve sanayi kuruluş varlığı, sosyal ve kültürel faaliyet alanları gibi birçok alanların olması Etimesgut ve Sincan'ı Ankara'nın önemli ilçeleri yapmaktadır. Bu bölgelerde son zamanlarda çevresel problemler hızla artmakta ve bu durumlardan dolayı hızlı bir ulaşım alternatifine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu ilçelerin arazi yapısı gereği yollarının dar olması ve toplu taşımaya duyulan yoğun ihtiyaçtan dolayı bölgeye yeni bir metro hattı planlanmaktadır. Bölgenin durumu ve gelecek master planı incelenmiş ve bu doğrultuda Sincan-Koru arasına alternatif hat güzergâhı, istasyonlar ve işletme tablosu sunulmuştur.

Anahtar kelimeler: Kent içi raylı sistemler, Metro, Ankara, Raylı ulaşım, Sincan-Koru

Alternative Urban Rail System Route Planning in Ankara Province: Sincan-Koru Metro Line Example

Abstract: Today, due to rapid population growth and urbanization, inadequate street and avenue roads increase the transportation problem and the existing public transportation is insufficient. Especially in regions with these problems, rail systems are preferred for transportation purposes. Ankara is the capital of Türkiye and the second largest city in terms of population density and is among the important cities due to its location. The rapidly growing population, intensive business and trade activities and the increasing number of vehicles in the city increase the traffic density. This situation strains the capacity of the roads and causes traffic congestion, leading to loss of time. Traffic congestion not only causes loss of time but also economic losses. For these reasons, the tendency towards public transportation is increasing. Population density, the presence of public institutions and industrial organizations, social and cultural activity areas make Etimesgut and Sincan important districts of Ankara. Recently, environmental problems have been increasing rapidly in these regions and a fast transportation alternative is needed due to these situations. A new metro line is planned for the region due to the narrow roads of these districts and the intense need for public transportation. The situation of the region and the future master plan have been examined and in this direction, the alternative line route, stations and operation table between Sincan-Koru are presented.

Keywords: Urban rail systems, Metro, Ankara, Rail transportation, Sincan-Koru

Atıf için/Cite as: Ö. Çölova, O. Arslan, F. Gülbitti, "Ankara ilinde alternatif kent içi raylı sistem güzergâh planlaması: Sincan-Koru metro hattı örneği," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 169-182, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1491173

1. Giriş

Raylı sistemlerin tarihi oldukça eskiye dayanır. İlk demiryolu hatları, 19. yüzyılın başlarında İngiltere'de ve diğer Avrupa ülkelerinde inşa edilmeye başlandı. Bu hatlar, kömür madenlerinden taşınan malzemelerin daha hızlı ve verimli bir şekilde taşınmasını sağlamak amacıyla kullanılmaya başlandı. Demiryolu taşımacılığı, endüstri devrimi sırasında büyük bir gelişme gösterdi ve daha sonra dünya genelinde yaygınlaştı. Günümüzde raylı sistemler, kent içi ulaşımda ve uzun mesafe taşımacılığında önemli bir rol oynamaktadır [1]. Dünya'da önemli bir pazara sahip olan raylı sistemlerde, ülkemizde 2003 yılından itibaren bir yatırım planı oluşturulmuş ve bu ölçüde önemli atılımlar yapılmış ve 2023 yılına kadar gerçekleştirilmesi planlanan hedefler belirlenmiştir. Bu hedefler arasında 10.000 km yüksek hızlı tren, 4.000 km konvansiyonel olmak üzere 25.940 km demiryolu ağına ulaşılması, demiryolu ağına yerli katkının artırılması ve buna bağlı olarak 7.000 adet tramvay, metro ve hafif raylı sistem (HRS) araçlarının temin edileceği belirtilmektedir [2].

Kent içinde en aktif rol oynayan toplu taşıma tiplerinden olan metro sistemleri dünya genelinde farklı şehirlerde ve ülkelerde farklı tarihlerde geliştirilmiştir. Paris Metrosu, dünyanın ilk metro sistemi olarak kabul edilir ve 1900 yılında hizmete girmiştir. Ardından, New York City Metrosu (1904), Londra Metrosu (1863), ve Tokyo Metro (1927) gibi büyük şehirlerde metro sistemleri kurulmuştur. Günümüzde, dünyanın birçok büyük şehrinde metro sistemleri bulunmaktadır ve bu sistemler genellikle şehir içi ulaşımın önemli bir parçasını oluşturur. Metro sistemleri, yoğun şehir trafiğini azaltmak, hızlı ve güvenli ulaşım sağlamak, çevreyi korumak ve şehirlerdeki ekonomik ve sosyal hayatı desteklemek amacıyla kullanılmaktadır. Türkiye'de ise İstanbul, Ankara, İzmir ve Bursa gibi bazı büyük şehirlerde metro sistemleri bulunmaktadır [3].

2. Raylı Sistemlerin Kent İçi Ulaşımındaki Rolü

Raylı sistemler, kent içi ulaşımda önemli bir role sahiptir. Metro, tramvay, hafif raylı sistemler ve banliyö gibi raylı taşıma araçları, yoğun şehir trafiğini azaltmaya, hızlı ve güvenli ulaşım imkânı sunmaya ve çevreyi korumaya yardımcı olur. Kentlerdeki nüfus artışı ve araç sayısındaki artışla birlikte, raylı sistemler toplu taşıma ihtiyacını karşılamakta önemli bir rol oynamaktadır. Raylı sistemler, yüksek kapasiteleri sayesinde birçok kişiyi aynı anda taşıyabilir ve bu sayede trafik sıkışıklığını azaltarak şehir içi hareketliliği artırır. Ayrıca, raylı sistemler genellikle çevre dostu ulaşım araçlarıdır; elektrikle çalıştıkları için karbon emisyonunu azaltır ve şehirlerin hava kalitesini korumaya yardımcı olur. Kent içi ulaşımda raylı sistemler, hızlı ve düzenli seyahat imkânı sunarak zaman tasarrufu sağlar [4].

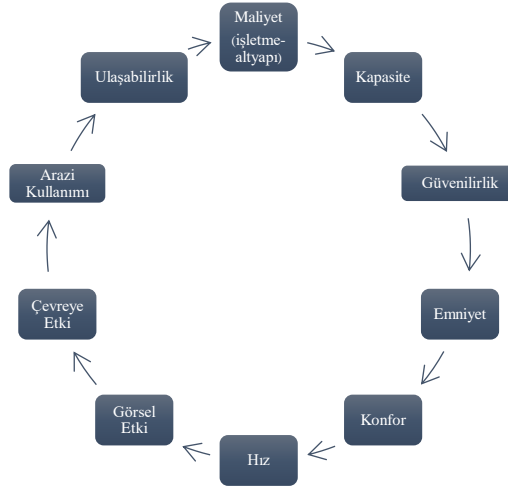
Cadde tramvayı sistemleri, çoğu zaman caddelerde karma trafik içinde işletilen, ancak bazen tercihli uygulama ya da ayrı yol kullanım hakkı ile cadde trafiğinden sınırlı düzeyde ayrılan, 1, 2 ve bazen de 3 araçlı dizilerden oluşur. Yolcu taşıma kapasiteleri taşıt dizisindeki araba sayısına ve sefer sıklığına bağlı olarak azami 10.000 kişi/saat, ortalama ticari hızları 14–16 km/saat olup, durak aralıkları 400-600 m olarak değişen taşıtlardır [5].

Hafif raylı sistemler, esas olarak geleneksel tramvayların modernleştirilmiş halidir. Elektrikle çalışan, yüksek kapasiteli, yolculuk kalitesi yüksek ve gürültüsüz araçların kullanıldığı ve ağırlıklı olarak tahsisli yollarda 1 ila 4 araçlı dizilerle işletilen bu mod son 40 yılda toplu ulaşım modları ailesinin önemli bir üyesi haline gelmiştir. HRS'ler bir sürücü ile sinyalizasyon sistemine uygun olarak yönetilen, her 600-1000 m mesafede özel istasyonlarda yolcu indirip-bindiren, ortalama 18-40 km/saat hızla işletilen raylı toplu taşıma sistemleridir. Hafif raylı sistemlerin saatlik yolcu kapasiteleri 10.000- 20.000 kişi arasında değişmektedir. Bu tür taşıtlar demiryolu şebekesinde de çalışma kabiliyetine sahiptir [5].

Metro sistemleri, yer altında veya yerüstünde hareket eden ve yol kesişmesi olmayan bu sistem, kendi içinde kapalı bir ulaşım şebekesidir. Dünyada yaygın olarak metropollerde kullanılan toplu taşıma sistemleridir. Diğer türlerin ulaşamadığı yüksek hızlara ulaşabilen, tam korumalı metro sistemleri genellikle 2-10 vagon dan oluşan ve diğerlerine göre en yüksek kapasiteye sahip olan (60.000 kişi/saat) taşıma sistemidir [5].

Banliyö tren sistemleri ise, metropollerin merkezi ile yakın hattındaki semtlerini ve ilçelerini birbirine bağlayan yüksek kapasite, konfor, hız ve güvenlik sağlarlar. Durak aralıklarının fazla olması nedeniyle kent merkezi için çekici değildir. Banliyö trenleri işletmenin verimliliğini yitirdiği uzaklıklarda ve yeterli sıklık sağlandığında, hız ve düzenlilik gibi avantajlarıyla tercih edilir. İşletme giderleri ve enerji tüketimi oldukça düşüktür [5].

Şekil 1'de bir kente raylı sistemler hattı kurulabilmesi için gerekli olan önemli parametreler verilmiştir. Burada maliyet (altyapı-işletme), kapasite, güvenilirlik, emniyet, konfor, hız, görsel etki, çevreye etki, arazi kullanımı ve ulaşılabilirlik kriterleri planlamada önemli yer tutmaktadır.



Şekil 1. Kent içi raylı sistem kurulumunda önemli kriterler

3. Şehirlerde Raylı Sistem Uygulama Çalışmaları

Raylı sistemler, şehirlerdeki toplu taşıma sistemlerinin önemli bir parçası haline gelmiştir. Bunlar, genellikle yoğun nüfuslu bölgelerdeki trafik sıkışıklığını azaltmak, çevresel etkileri azaltmak ve hızlı, verimli ve konforlu bir ulaşım sağlamak için tercih edilir. Raylı sistem uygulama çalışmaları ise belli adımlarda aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir [6].

Planlama: Raylı sistemlerin uygulanması, öncelikle şehir planlaması ve ulaşım altyapısı planlaması yapılıır. Uzmanlar, mevcut trafik akışını, nüfus yoğunluğunu, tahmini ulaşım talebini ve diğer faktörleri göz önünde bulundurarak uygun bir raylı sistem planı geliştirirler.

Altyapı İnşaatı: Raylı sistemler altyapı inşaatı gerektirir. Bu inşaatlar istasyonlar, depo ve bakım tesisleri gibi bileşenleri içerir. Bu aşama, genellikle mühendislik ve yapısal çalışmaları içerir.

Ekipmanlar: Raylı sistemler için gerekli olan ekipmanlar, raylar, araçlar, sinyalizasyon sistemleri ve diğer bileşenleri içerir. Bu ekipmanlar, genellikle yerel veya uluslararası tedarikçilerden temin edilir.

İstasyon ve Araçlar: Raylı sistemler için istasyonlar ve tren araçları, kullanıcıların rahat ve güvenli bir şekilde seyahat etmelerini sağlamak için özel olarak tasarlanır. İstasyonlar, erişilebilirlik, güvenlik ve konfor açısından önemli unsurları içermelidir [6].

Test ve Entegrasyon: İnşa süreci sona erdikten sonra, genellikle kapsamlı testler ve entegrasyon süreçleri gerektirir. Bu süreç, tüm sistem bileşenlerinin uyumlu bir şekilde çalıştığından ve güvenli bir şekilde işletilebildiğinden emin olmak için yapılır.

İşletim: Raylı sistemlerin işletmesi, personel eğitimi, güvenlik protokolleri ve işletim prosedürlerini içerir. İşletim aşaması, sistemlerin günlük olarak yönetilmesi, bakımı ve güncellenmesiyle ilgilenir.

Sürdürülebilirlik: Bir raylı sistem uygulandıktan sonra, düzenli bakım ve sürdürülebilirlik çalışmaları gereklidir. Bu, sistemlerin verimli bir şekilde çalışmasını sağlamak, güvenliğini arttırmak ve ömrünü uzatmak için önemlidir.

3.1. Ankara'da kent içi raylı sistem ulaşımı

Ankara, Türkiye'nin İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan bir il ve aynı zamanda ülkenin başkentidir. Coğrafi konumu itibarıyla, Ankara'nın batısında Eskişehir, kuzeybatısında Bolu, kuzeyinde Çankırı, doğusunda Kırıkkale, güneyinde ise Konya ve Aksaray illeri yer almaktadır. Ankara'nın ekonomisi çeşitli sektörlerde faaliyet gösteren büyük ve küçük ölçekli işletmeler tarafından desteklenmektedir. Tarım, hayvancılık, sanayi ve hizmet sektörleri Ankara ekonomisinin temelini oluşturur. Ankara, Türkiye'nin en kalabalık ikinci şehri konumundadır. 2023 yılı verilerine göre Ankara'nın nüfusu yaklaşık olarak 5,8 milyon kişidir. Bu nüfus içerisinde şehir merkezi ve çevresindeki ilçelerde yaşayan yerli halkın yanı sıra, farklı bölgelerden gelen göçmenler de bulunmaktadır. Ankara'nın nüfusu, başkent olması, sanayi ve ticaret olanakları, eğitim imkanları gibi faktörlerin etkisiyle sürekli artış göstermektedir. Ulaşımında ise Ankara, önemli bir altyapıya sahiptir ve raylı sistem uygulamaları diğer illere oranla daha gelişmiş olmakla beraber geçen her yılda hızla gelişmeye devam etmektedir [7].

Bu gelişmeyle birlikte Ankara'da metro hattı inşaatı ilk olarak 1984 yılında başladı. Ancak, Ankara'da ilk metro hattı olan Batıkent- Kızılay metro hattının açılışı 28 Aralık 1997 tarihinde gerçekleşti. Bu hat, Ankaray adıyla da bilinmekte olup, şehirdeki ilk raylı sistem ulaşım hattıdır. O tarihten bu yana Ankara'da metro ağı sürekli genişlemiş ve yeni hatlar eklenmiştir. Ankara'da şu anda Kızılay-Batıkent, Kızılay-Koru, Batıkent-OSB/Törekent, AKM-Şehitler ve Dikimevi-Aşti olmak üzere toplam beş kent içi raylı sistem hattı bulunmaktadır. Yenimahalle-Şentepe arası ise teleferik olarak hizmet vermektedir [8].



Şekil 2. Ankara raylı sistem güzergâh haritası

Ankara'da ulaşım konusunda bazı sorunlar yaşanabilmektedir. Şehirdeki yoğun trafik, özellikle iş saatlerinde ve belirli noktalarda sıkışıklıklara neden olabilmektedir. Bu durum bazı durumlarda ulaşımın yavaşlamasına ve zaman kaybına yol açabilmektedir. Ayrıca, bazı bölgelerde toplu taşıma araçlarının yetersiz olması veya sefer sayılarının az olması da Ankara'da ulaşım sorunlarına neden olabilmektedir. Özellikle şehir merkezi dışındaki bölgelerde toplu taşıma araçlarına erişimde zorluklar yaşanabilmektedir. Ankara'da ulaşım sorunlarının çözümüne yönelik olarak bakanlık ve belediyeler sürekli olarak çalışmalar yürütmektedir. Yeni metro hatları ve otobüs seferlerinin artırılması gibi projelerle ulaşımın daha etkin hale getirilmesi hedeflenmektedir. Ayrıca, bisiklet yollarının genişletilmesi ve yaygınlaştırılması gibi çevre dostu ulaşım alternatifleri de geliştirilmektedir.



Şekil 3. Yapılması planlanan yeni hat ve istasyonlar

Bu çalışmada Şekil 3'te de görüldüğü üzere mevcut metro istasyonu olan Kuru istasyonundan başlayarak Sincan bölgesine yeni bir hat planı oluşturulmak istenmektedir. İlerleyen bölümlerde neden bölgeye en uygun ulaşım sistemini metro seçildiği anlatılmaktadır.

4. Metot

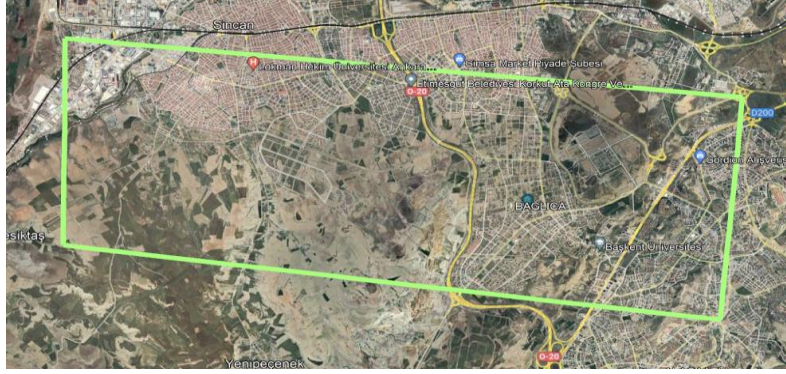
4.1. Planlanan hattın konumu

Şekil 4'te planlanmış metro güzergahının alanı gösterilmektedir. Bu güzergahın seçilmesindeki en önemli faktörler;

- Nüfus yoğunluğu

- Kamu kuruluşların varlığı
- Sanayi kuruluşun varlığı
- Sosyal ve kültürel faaliyet alanları olarak listelenmektedir.

Planlanmış güzergâhın Etimesgut ve Sincan olmak üzere iki ilçeden geçmesi hedeflenmektedir.

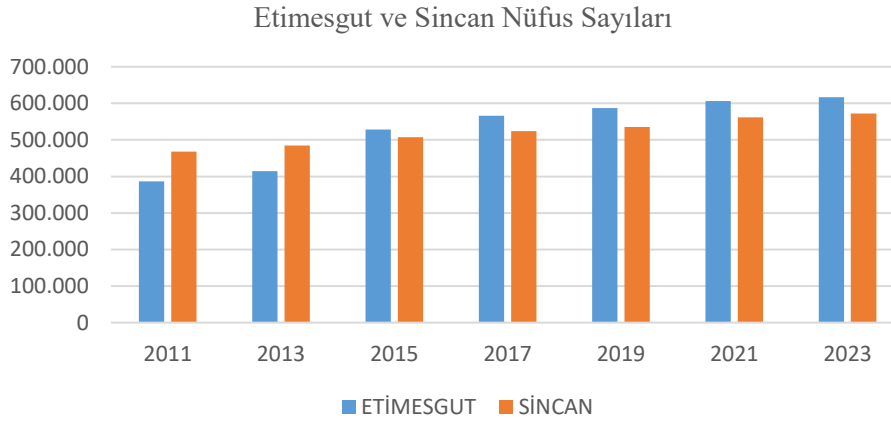


Şekil 4. Planlanan güzergahın kuş bakışı görüntüsü

4.2. Planlanan hattaki nüfus sayısı

Şekil 5'te

Etimesgut ve Sincan ilçelerinin 2013-2023 arasındaki nüfusları verilmiştir. Nüfusa bakıldığında Etimesgut bölgesinde 2013 yılında toplamda 469.626 kişi yaşarken, Sincan bölgesinde bu rakam 484.694 kişidir. 2023 yılında ise bu rakam Etimesgut bölgesi için 617.229, Sincan bölgesi için 571.889 kişidir. Etimesgut ilçesinde nüfus düzenli artarken, Sincan ilçesinde 2018 ve 2023 yıllarında düşüş gözlemlenmiştir [9].



Şekil 5. Sincan ve Etimesgut ilçelerinin yıllara oranla nüfus değişimi

Tablo 1'de belediye otobüslerine ait sefer sıklığı ve otobüsün aldığı kişi kapasite bilgisi verilmiştir [10]. Otobüsler ortalama 22 dakikada bir sefer kaldırmaktadır. Pik saatte bu sayı 10 dakikada bir olmaktadır. Ankara'da şu anda mevcutta bulunan otobüsler ortalama 153 yolcu almaktadır. Bunun dışında bu bölgede düzenli olarak dolmuş geçmektedir. Otobüslerin yetersiz kalmasından ve özel taşıt tercihinden dolayı trafik çok yoğun olmasıyla birlikte bu bölgede trafik çok üst düzey seviyededir.

Tablo 1. Planlanan güzergahtan geçen otobüs hatları

Otobüs Hat Numarası	Hareket Süresi	Yolcu Kapasite (6 kişi / m ²)
511	Her 20 dakika bir sefer	153 kişi
510	Her 20 dakika bir sefer	153 kişi
566	Her 20 dakika bir sefer	68 kişi
512	Her 20 dakika bir sefer	68 kişi
514	Her 30 dakika bir sefer	114 kişi
632	Her 30 dakika bir sefer	153 kişi
612	Her 30 dakika bir sefer	153 kişi
524	Her 20 dakika bir sefer	114 kişi
597	Her 45 dakika bir sefer	114 kişi
587	Her 45 dakika bir sefer	114 kişi
573	Her 30 dakika bir sefer	153 kişi
567	Her 30 dakika bir sefer	153 kişi
507	Her 20 dakika bir sefer	153 kişi
513	Her 20 dakika bir sefer	153 kişi
514	Her 20 dakika bir sefer	114 kişi
521	Her 20 dakika bir sefer	153 kişi
524	Her 30 dakika bir sefer	114 kişi
530	Her 20 dakika bir sefer	114 kişi

4.3. Planlanan hattaki önemli konular

Şekil 'da Saraycık bölgesi gösterilmektedir. Bu bölge yeni gelişmekte olup şu anda 19.668 nüfusa sahiptir [9]. Bu doğrultuda inşaatlar hızla ilerlemekte ve çok hızlı nüfusun artışına neden olmaktadır. Ayrıca bu artışa bağlı olarak ek otobüsler gerektirmekte ve şu an kullanılan mevcut yolların yeniden yenilenmesi gerekmektedir. Bu da ek masraflara yol açmaktadır. Planlanan güzergâh bu bölgenin yakınından geçmekte ve birçok masraftan kurtarmaktadır [11].



Şekil 6. Saraycık bölgesinin görünüşü a) Haritadaki konumu b) Havadan görüntüsü

Şekil 7'de planlanan güzergâh üzerinde bulunan Başkent Üniversitesi ve MİT (Milli İstihbarat Teşkilâtı) binası gösterilmektedir. MİT binası önemli bir kamu kuruluşu olup fazlaca çalışmanı bulunmaktadır [12]. Ayrıca bu bölgede trafiğin olması güvenlik açısından problem teşkil

etmektedir. MİT binasının yakınında bulunan Başkent Üniversitesinde toplamda 11.572 öğrencisi bulunmaktadır. Bu durumda öğrenci hareketliliğini arttırmakta ve o bölgeyi yoğunlaştırmaktadır [13].



Şekil 7. Planlanan güzergâh üzerindeki bazı kamu kurumları a) Başkent Üniversitesi b) MİT binası

Şekil 8'de planlanan güzergâh üzerinde bulunan birçok sosyal tesisler gösterilmektedir. Sosyal tesisler, genellikle bir topluluğun sosyal ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanmış ve işletilen mekanlardır. Bu tesisler genellikle kamusal veya özel sektör tarafından işletilir ve çeşitli amaçlar için kullanılabilirler. Genellikle insanların bir araya gelip etkileşimde bulunabilecekleri, dinlenip eğlenebilecekleri, spor yapabilecekleri veya toplumsal etkinliklere katılabilecekleri yerlerdir. Tasarlanmış olan metro hattı güzergâhında sosyal tesislerin yakınında istasyon konulmuş olup, bu durumda hem metronun yoğunluğunu arttıracak ve bu tesislerin yoğunluğu artacaktır [14].



Şekil 8. Planlanan güzergâh üzerindeki alanlar a) Atakent tesisi b) Türk Tarih Müzesi ve park c) Konser alanı d) Kütüphane ve spor kompleksi

Şekil 9’da planlanan güzergâh üzerinde bulunan Etimesgut Belediyesi ve Ankara Batı Adliyesi verilmiştir. Bu kamu kurumları da sürekli olarak insan hareketliliğinin yaşanmasına etken olmaktadır. Planlanmış olan güzergâhta bu etkenler düşünülmüş olup, bu bölgelere durak konulmuştur.



a)

b)

Şekil 9. Planlanan güzergâh üzerindeki bazı kamu kurumları a) Etimesgut Belediyesi b) Batı Adliye Sarayı

Şekil 10’da planlanan güzergâh üzerinde bulunan Sincan oto sanayisini ve Sincan ASO (Ankara Sanayi Odası) 1 sanayi sitesini göstermektedir. Bu bölgede şu anda aktif çalışmakta olan 281 fabrika bulunmaktadır. Ayrıca birçok küçük işletme faaliyet göstermektedir. Bu bölge halen gelişmekte olup, birçok fabrika hizmete girmeye devam etmektedir. Bu fabrikaların hem personel bulmasında hem de personellerin rahat seyahati için planlanan güzergahta son durak olarak sanayi durağı konulmuştur [15].



a)

b)

Şekil 10. Planlanan güzergâh üzerindeki bazı kurumlar a) Sincan Oto Sanayi b) Sincan ASO 1

Şu an aktif çalışmakta olan Kuru metrosu birçok ilçeyi birleştirmekte olup, insanların konforlu, hızlı ve rahat ulaşım yapmasını sağlamaktadır. Bu iki ilçede de birçok otobüs Kuru metrosuna hizmet vermektedir. Ancak bu mevcut durum vakit kaybına, otobüslerde yaşanan sıkışıklık ve otobüse binememe durumuna, trafiğin yoğunluğu problemine ve çevresel problemlere neden olmaktadır. Tasarlanmış olan metro projesinde bu faktörlerin hepsi ortadan kalkmış olup, özellikle yoğun saatlerde kişiler hızlı ve güvenli şekilde Ankara’nın birçok bölgesine erişim sağlayabilecektir.

4.4. Planlanan metro hattı ve istasyonları

Şekil 11’de planlanan metro güzergahı verilmiştir. Güzergâh mevcut hatta bulunan Kuru durağı ile başlamakta ve Sanayi durağı ile son bulmaktadır. Hatta toplam 18 adet durak bulunmaktadır.



Şekil 11. Planlanan metro hattının güzergahı

Planlanmış olan Tablo 2’de yer alan istasyonlar mevcut yoğunluğa esas olarak alınmıştır. Bu bölgelerde önemli kuruluşlar, hastane, kamu kurumları, sanayi kuruluşları ve eğlence alanları gibi sık kullanılan yerler oluşturmuştur. Genellikle metro hatlarında 1000 metre ile 1500 metre aralığında önerilen metro istasyonları burada durakların konumu ve ulaşılabilirlik gibi etkenlerden dolayı 597 metreye kadar indirilmiştir. Güzergahın toplam mesafesi 18.453 metredir. En kısa istasyon arası mesafe, Etimesgut belediyesi istasyonu ile Süvari mahallesi istasyonu arası 597 metre ve en uzun istasyon arası mesafe, Kuru istasyonu ile MİT istasyonu 1950 metredir. İstasyonlar arası ortalama mesafe ise 1025 metredir.

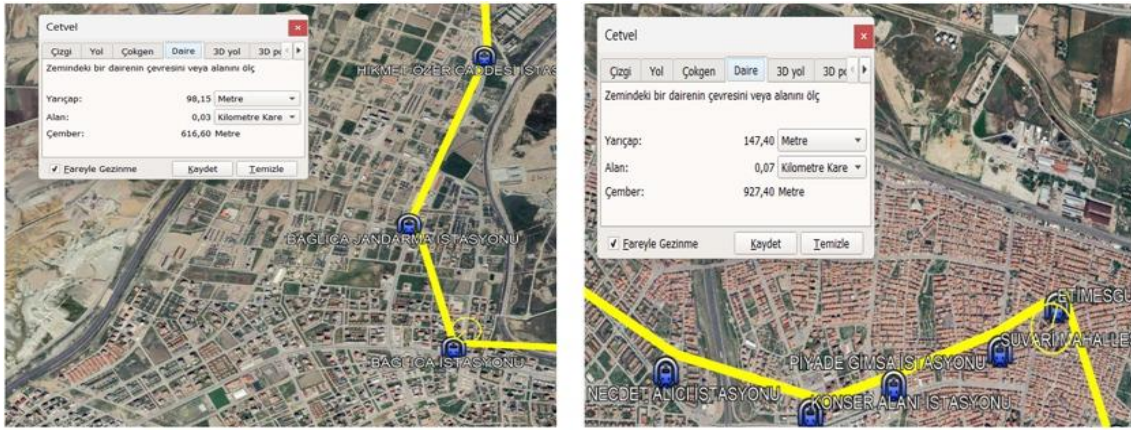
Tablo 2. Planlanan metro hattının istasyon isimleri

Sıra	İstasyon	İstasyonlar arası mesafe (km)
1	Kuru İstasyonu	0+00 km
2	MİT İstasyonu	1,95 km
3	Bağlıca İstasyonu	1,72 km
4	Bağlıca Jandarma İstasyonu	1,14 km
5	Hikmet Özer Caddesi İstasyonu	1,53 km
6	Etimesgut Halk Ekmek İstasyonu	1,13 km
7	Stadyum İstasyonu	0,78 km
8	Etimesgut Belediyesi İstasyonu	0,93km
9	Süvari Mahallesi İstasyonu	0,597 km
10	Piyade Gimsa İstasyonu	0,78 km
11	Konser Alanı İstasyonu	0,64 km
12	Şehit Necdet Alıcı İstasyonu	1,79 km
13	Batı Adliyesi İstasyonu	1,55 km
14	Maraşal Mahallesi İstasyonu	0,97 km
15	Nafiz Körez Hastanesi İstasyonu	0,692 km
16	12. Cadde İstasyonu	0,937 km

17	Çimşit İstasyonu	1,6 km
18	Sanayi İstasyonu	1,129 km

4.5. Kurp hesaplamaları

Kurplar farklı doğrultudaki doğru yolları birleştiren, yolun eğri kısımlarıdır. Aliyman (düz yol) olan yol ikinci bir aliyman ile kesiştiğinde demiryolu araçları köşeli olan bu kısımdan geçemeyeceği için ancak adına kurp (eğri) denilen yollar ile geçebilmektedir. En düzgün eğri de bir dairenin yayı olacağı için demiryolundaki kurplar da yarıçapı belli olan bir dairenin yayıdır. İki tür kurp türü vardır. Bunlar yatay kurp ve düşey kurplardan oluşmaktadır [16]. Bu çalışmamızda güzergâh boyunca en dar iki kurp bölgesi belirlenmiş ve yarıçap hesabı yapılmıştır. Tramvaylarda 15-20 metreye kadar düşen minimum kurp yarıçapları, metrolarda 100-200 m arasında uygulanmaktadır [5]. Bu doğrultuda uygulanacak olan metro projesi için uygun kurp değerleri belirlenmesi gerekmektedir.



a)

b)

Şekil 12. Kurp hesabı yapılan bölgeler a) Bağlıca bölgesi b) Etimesgut bölgesi

4.6. Bölgenin master planı

Etimesgut ve Sincan, Ankara'nın önemli ilçelerindedir. İki ilçe de Ankara'nın gelişmekte olan bölgelerinden ve birçok yönden dikkate değer özelliklere sahiptir. Etimesgut, son yıllarda altyapı ve sosyal yaşam alanlarında önemli gelişmeler kaydetmiştir. Yeni konut projeleri, alışveriş merkezleri ve eğitim kurumları ile bölge, yaşam kalitesini artırmaya yönelik çabalarını sürdürmektedir. Aynı zamanda Ankara'nın ulaşım ağı içinde stratejik bir konuma sahip olması, Etimesgut'un önemini daha da artırmaktadır. Sincan ise, sanayi ve ticaretin önemli merkezlerinden biridir. İlçe, tarihi boyunca ticaret yolları üzerinde bulunması sebebiyle ekonomik açıdan canlı bir yapıya sahiptir. Bununla birlikte, son yıllarda Sincan, sanayi ve teknoloji alanlarında da hızla gelişen bir bölge haline gelmiştir. Bu sebeplerden dolayı nüfus hızla artmakta ve bu durum konut ihtiyacını arttırmakta ve buna bağlı olarak ulaşım problemini doğurmaktadır [17].



a) b)
Şekil 13. İmara açılan bölgeler a) Saraycık bölgesi b) Sanayi bölgesi

Şekil 13'te planlanan güzergâh üzerinde bulunan Saraycık bölgesi ve Sincan sanayi bölgesi gösterilmektedir. Bu bölgede yeni imara açılmış olup şu an ki nüfus sayısı 10.000 civarındadır. Bu bölgede yatırımlar hızla devam etmekte ve nüfus sayısı artmaktadır. İleride bu bölgeye hastane, okul ve sosyal tesis yapılması planlanmaktadır. Sincan Sanayi Bölgesi, Ankara'nın sanayi üretimine katkı sağlayan önemli merkezlerden biridir. Bu bölgede birçok farklı sektörde faaliyet gösteren işletmeler bulunmaktadır. Sincan Sanayi Bölgesi, özellikle metal, makine, tekstil, gıda, plastik ve kimya gibi sektörlerde faaliyet gösteren birçok fabrika ve işletmeye ev sahipliği yapmakta ve bu işletmeler hem Türkiye içinde hem de uluslararası alanda rekabetçi ürünler üretirken Türkiye'nin ekonomisine katkı sağlamaktadır. Bu durumdan dolayı Sincan Sanayisi büyümektedir. Bu durum ise daha fazla personel ihtiyacı doğurmaktadır. Bunun sonucunda büyük araç trafiği oluşacağı için planlanan hat Sincan Sanayi Sitesinden geçmektedir [11].

4.7. Planlanan işletme tablosu

Tablo 3. Planlanan İşletme Tablosu

Araç ve hat özellikleri	Veriler
Tek Hat Sefer Süresi	28 dakika
Toplam Tur Süresi	56 dakika
Toplam Gerçek Tur Süresi	74 dakika
İstasyon Sayısı	18 adet
Toplam Hat Uzunluğu	18,5 km
Sefer Sıklığı	4,5 dakika
Minimum Araç Sayısı	14 adet
İstasyonda bekleme süresi	30 saniye
İlave Araç Sayısı	1 adet
Ticari Hız	40 km/saat
Maksimum Hız	80 km/saat
İşletme Saatleri	06.00-01.00
Hat Voltajı	750 V DC
Araçtaki Dizi Sayısı	6 adet
Araç Kapasitesi (6 kişi/m ²)	300
Doruk Süresi	2 saat
(Sabah: 7.00-9.00 Akşam: 17.00- 19.00)	

Tablo 3'te planlanan hattın işletme tablosu verilmiştir. İşletme tablosunda yer alan bilgiler, Ankara'da mevcut metro hatlarında kullanılan araçların teknik özellikleri dikkate alınarak

hazırlanmıştır. Bu tabloya göre nüfusun yoğunluğu göz önüne alınarak metro kullanımı tercih edilmiş, çalışma saatleri 06.00-01.00 olarak planlanmış ve buna göre; toplam istasyon sayısı 18, istasyonda ortalama bekleme süresi 30 saniye, metro aracı toplam 6 dizi, bir vagon (6 kişi/m²) de 300 kişi almakta, metro aracının ticari hızı 40 km/saat, maksimum hızı 80 km/saat, hattın sefer süresi 28 dakika, git-gel tur süresi 56 dakika, buna ilave istasyonlar da bekleme süresi ile birlikte toplam gerçek tur süresi 74 dakika ve sefer sıklığı 4,5 dakikada bir olarak hesaplanmıştır. Sefer sıklığına bağlı olarak ortalama saatte 50.000 yolcu taşınabilecek şekilde planlanmıştır. Buna bağlı olarak bu hat için toplamda 14 araç ve 1 adet yedek araç planlanmaktadır.

5. Sonuç

Etimesgut ve Sincan ilçelerinde trafiğin büyük bir problem olduğu belirlenmiş ve toplu taşımanın da alınan veriler ile yetersiz kaldığı tespit edilmiştir. Bu problem için kalıcı çözüm olarak Sincan-Koru güzergahına yeni bir metro hattı planlaması yapılmıştır. İşletmenin ihtiyaç duyduğu araç ve hat için çalışmalar yapılmış ve güzergâh boyunca karşılaşılabilecek dar kurpların hesaplamalarının planlanması yapılmıştır. Planlanan bu metro güzergahı iki ilçenin büyük bir bölümünden geçerek ulaşılabilirliği kolaylaştırmaktadır. Aynı zamanda hat birçok önemli güzergahtan geçerek metronun kullanımına da önemli ölçüde katkı sağlayacağı düşünülmektedir. Sincan- Koru raylı sistem hattı sayesinde bölgede hem ekonomik hem de sosyal yön artışları ön görülmektedir.

Teşekkür

Bu makalede her türlü desteğini esirgemeyen Öğr. Gör. Muhammed Emin Arı'ya sonsuz saygı ve şükranlarımızı sunarız. Ayrıca bize hem maddi hem de manevi desteğini esirgemeyen ailelerimize teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] “Ülkelerin raylı sistem tarihi”. <https://makerc.com/blog/2021/05/05/ulkelerin-rayli-sistem-tarihi/>
- [2] İ. Pektaş, “Raylı ulaşım sistemleri sektör analizleri 2018,” 2019.
- [3] M. E. Arı and İ. Esen, “Design of a metro train and structural analysis of the metro vehicle body by finite element method,” *Railway Engineering*, no. 15, pp. 30–45, Jan. 2022
- [4] İ. Şenlik, E. Mühendisliği, D. Yayın, and K. Üyesi, “2016 Eylül • Sayı-458”.
- [5] V. R. Vuchic, Kent içi toplu ulaşım ve yaşanabilir şehirler, vol. 1, 2 vols. İstanbul: İstanbul Ulaşım A.Ş., 2015.
- [6] P. Ilıcalı, B. Üniversitesi İnşaat Mühendisliği, Y. Öngel, and M. Çağrı Kızıltaş, “Sürdürülebilir bir ulaştırma sistemi ve demiryolu yatırımları”.
- [7] M. Kürşat Çubuk *et al.*, “Ankara’da raylı ulaşım,” *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, vol. 18, no. 1, pp. 125–144, Mar. 2013
- [8] M. Masoumi and E. V. Öcalır-Akünel, “Türkiye’deki kent içi raylı ulaşım sistemlerinin performanslarının veri zarflama analizi ile karşılaştırılması,” *Journal of Polytechnic*, Feb. 2018
- [9] “Türkiye nüfusu il ve ilçelere göre nüfus bilgileri.” <https://www.nufusu.com/>
- [10] “Ego genel müdürlüğü” <https://www.ego.gov.tr/>
- [11] “Sincan Belediyesi imar durumu sorgulama | E-İmar | İmar Sorgula.” <https://imarbilgileri.com/e-imar/imar-durumu/sincan-belediyesi-imar-durumu-sorgulama/>
- [12] C. Taşdan, “MİT’in yeni binası ‘KALE’ hizmete açılıyor,” www.aa.com.tr, Jan. 2020, <https://www.aa.com.tr/tr/turkiye/mitin-yeni-binasi-kale-hizmete-aciliyor/1692920>
- [13] <https://ogrisl.baskent.edu.tr/>
- [14] “Park ve bahçeler müdürlüğü.” <https://www.etimesgut.bel.tr/mudurlukler/park-ve-bahceler-mudurlugu-12.aspx>
- [15] “Ankara Sanayi Odası 1.Organize Sanayi Bölgesi.” <https://www.aosb.org.tr/>
- [16] M. Kozak, “Demiryolunda dever uygulaması ve güvenliğe etkisi,” *Journal of Engineering Sciences and Design*, vol. 4, no. 1, pp. 41–48, Apr. 2016

[17]H. Çuğ ve M. Dursunlar, “Termit ve yakma alın kaynağı ile birleştirilmiş R260 kalite rayın mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Demiryolu Mühendisliği, sy. 14, ss. 167–179, Temmuz 2021, doi: 10.47072/demiryolu.944266

Özgeçmiş



Ömer ÇÖLOVA

1996 yılında Karabük’te doğmuştur. Raylı Sistemler Mühendisliği Lisans ve Makine Mühendisliği Yüksek Lisans eğitimini Karabük Üniversitesinde tamamlamış, halen bu üniversitede Doktora eğitimine devam etmektedir. Karabük Üniversitesi Eskipazar Meslek Yüksek Okulunda öğretim görevlisi olarak çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları Taşıt Teknolojileri, Raylı Sistemler ve Demiryolu Malzemelerinin Davranışları olarak sıralanabilir.

E-Posta: omercolova@karabuk.edu.tr



Fevzican GÜLBİTTİ

2000 yılında Ankara’da doğmuştur. İlkokul ve lise eğitimini Ankara’da tamamlamıştır. Lisans eğitimine Karabük Üniversite Raylı Sistemler Mühendisliği (İngilizce) son sınıf olarak devam etmektedir.

E-Posta: fevzicangulbitti@gmail.com



Oytun ARSLAN

2001 yılında Ankara’da doğmuştur. İlkokul ve liseyi Ankara’da tamamlamıştır. Lisans eğitimini Karabük Üniversite Raylı Sistemler Mühendisliği (İngilizce) son sınıf olarak devam etmektedir.

E-Posta: oytunarslan@yahoo.com

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Ömer ÇÖLOVA: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Doğrulama, Düzenleme.

Fevzican GÜLBİTTİ: Kaynaklar, Doğrulama, Yazma, Metodoloji, Görselleştirme. Oytun

ARSLAN: Görselleştirme, Düzenleme, Yazma, Kaynaklar.



Raylı Ulaşım Sistemleri İçin Sefer Planlama ve Personel Yönetimi Sistemi Geliştirilmesi

Hülya AKÇA¹, Kübra SİNAN², Aleyna KARSLI³, Hüsnâ YILDIZ⁴, Hikmet YİĞİT⁵,
Furkan KARAKUŞ⁶, Hüseyin DOĞAN⁷

Metro İstanbul A.Ş., AR&GE, İstanbul, Türkiye

furkan.karakus@metro.istanbul

(Alınış/Received: 15.04.2024, Kabul/Accepted: 11.06.2024, Yayımlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Bu çalışma, teknolojik ilerlemeler ve şehirleşme eğilimleri nedeniyle küresel ekonomide önemli bir yere sahip olan ulaşım sektöründeki raylı sistemlerin karşılaştığı operasyonel zorluklara odaklanmaktadır. Şehirlerdeki nüfus artışı ulaşım altyapısını zorlamakta ve raylı sistemler, trafik sıkışıklığını azaltma ve sürdürülebilir kentsel yaşamı destekleme açısından kritik öneme sahip olmaktadır. Bu bağlamda, demiryolu sektöründe karşılaşılan operasyonel sefer planlama yönetimi gibi zorluklar, etkili çözümlerle üstesinden gelinmesi gereken kritik konular arasında yer almaktadır. Çalışmada, raylı sistem işletmeleri için geliştirilen bir sefer planlama sistemine odaklanılmıştır. Çalışmanın temel amacı, yolcu ihtiyaçları ve işletme kapasitelerine uygun biçimde sefer planlarının oluşturulmasını ve vardiyalı personelin görev dağılımlarının dengeli bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamaktır. Geliştirilen sistem, .NET 4.8 framework'ünü destekleyen ve Windows işletim sistemi tabanlı bilgisayarlarda işlev gösterecek şekilde tasarlanmış bir masaüstü yazılımdır. Yazılımın özellikleri arasında çevrimdışı çalışabilme kapasitesi ve dışa aktarılabilir tarife üretme yeteneği bulunmaktadır. Tarife hazırlık aşamasında farklı tablo çıktıları sunabilme ve personel görevlerini otomatik olarak atayabilme özelliklerine sahip olmaktadır. Yazılım, M1A (Yenikapı – Atatürk Havalimanı) ve M1B (Yenikapı – Kirazlı) metro hatlarında uygulanmakta, bu süreç işgücü optimizasyonu yoluyla personel maliyetlerinde %3 oranında azalma sağlayarak maliyet tasarrufuna katkıda bulunmaktadır. Aynı zamanda, sefer planlama süreçlerini geleneksel yöntemlere kıyasla önemli ölçüde hızlandırıp ve hata oranlarını azaltmaktadır. İyileştirmeler sonucunda, %97.2 oranında bir zaman tasarrufu elde edilmektedir.

Anahtar kelimeler: Operasyonel optimizasyon, Otomatik sefer planlama, Personel yönetimi, Raylı ulaşım sistemi

Development of a Scheduling and Personnel Management System for Rail Transport Systems

Abstract: This study focuses on the operational challenges encountered in the rail systems of the transportation sector, which occupies a significant position in the global economy due to technological advancements and urbanization trends. The increase in urban populations puts pressure on transportation infrastructure, making rail systems critically important in reducing traffic congestion and supporting sustainable urban living. In this context, challenges such as operational timetable management in the railway sector are critical issues that need to be addressed with effective solutions. The study centers on a timetable planning system developed for rail system operations. The main goal of the study is to create schedules that meet passenger needs and operational capacities and to ensure that shift-based personnel distributions are balanced. The developed system is a desktop software designed to function on computers based on the Windows operating system, supporting the .NET 4.8 framework. Features of the software include the capacity to operate offline and the ability to generate exportable timetables. During the timetable preparation phase, the software can provide various table outputs and automatically assign personnel tasks. The software is implemented on the M1A (Yenikapı – Atatürk Airport) and M1B (Yenikapı – Kirazlı) metro lines, contributing to cost savings by achieving a 3% reduction in personnel costs through workforce optimization. It significantly accelerates the timetable planning processes compared to traditional methods and reduces error rates. As a result of the improvements, a time saving of 97.2% is achieved.

Keywords: Operational optimization, Automatic scheduling, Staff management rail transport systems

Atıf için/Cite as: H. Akça, K. Sinan, A. Karşı, H. Yıldız, H. Yiğit, F. Karakuş, H. Doğan, "Raylı sistemler için sefer planlama ve personel yönetimi sistemi geliştirilmesi," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 183-201, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1465865

1. Giriş

Günümüzde ulaşım sektörü, küresel ekonominin önemli bir dayanağı olarak öne çıkmaktadır. Hızla gelişen teknoloji, küresel ticaretin artması ve nüfusun şehirleşme eğilimleri, ulaşımın stratejik bir önem kazanmasına neden olmaktadır. Dünya genelinde nüfusun kırsal alanlardan kentsel alanlara taşınması şehir yaşamında bazı zorlukları da beraberinde getirmektedir. Artan nüfus, özellikle ulaşım altyapısının sınırlı olduğu kentsel bölgelerde, yoğun trafik ve ulaşım sorunlarına neden olmaktadır. Bu durum, kent içi ulaşım ağlarının kapasitesinin aşıldığı ve dolayısıyla gecikmeli ve rahatsız edici seyahat deneyimlerinin yaşandığı bir ortam yaratmaktadır [1]. Öte yandan, konforlu seyahat imkânları ve zamanında ulaşım, bireyleri toplu taşıma araçlarını tercih etmeye teşvik etmektedir. Bu durum, bireylerin özel araç kullanımından vazgeçmelerine ve toplu taşıma sistemlerine olan güvenlerini artırmalarına neden olmaktadır. Bu bağlamda, konforlu seyahat imkânları ve zamanında ulaşımın ötesinde, raylı sistemler kent içi ulaşımın temel taşlarından birini oluşturmaktadır. Özellikle metro, tramvay ve metro hatları gibi raylı sistemler, toplu taşıma ağlarının ana omurgasını oluşturarak şehirlerdeki yoğunluğu daha etkili bir şekilde yönetmeyi sağlamaktadır. Bu sistemlerin geniş kapasiteleri, pik saatlerde ve yoğun kullanım bölgelerinde bile etkili bir hizmet sunmalarına olanak tanımaktadır.

Raylı sistemlerin kullanımı, sadece bireyleri toplu taşıma araçlarını tercih etmeye teşvik etmekle kalmamakta, aynı zamanda kentsel ulaşımın sürdürülebilirliği açısından önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, özel araç kullanımını azaltarak trafik yoğunluğunu hafifletmekte ve bu da çevresel etkileri en aza indirmeye yardımcı olmaktadır. Kentsel raylı ulaşım ağının büyümesi, konforlu, hızlı ve zamanında seyahat özellikleri sunarak, daha fazla yolcunun ilgisini çekmektedir [2]. Kent içi raylı ulaşım ağlarının genişlemesi, şehirlerin daha yaşanabilir ve çevreci hale gelmesine katkıda bulunarak sürdürülebilir bir şehir ulaşımı modeli oluşturmaktadır. Bu bağlamda, raylı ulaşım sistemleri, modern şehir planlamasının vazgeçilmez bir unsuru olarak öne çıkmaktadır. Şehir raylı taşıma organizasyonunun temelini oluşturan faktör, raylı sistem araç işletme planıdır. Raylı sistem işletme planının hayati önemi, şehirlerin sürekli büyümesi, nüfus artışı ve ulaşım ihtiyaçlarının karmaşıklığının arttığı bağlamda ortaya çıkmaktadır. Bu plan, şehirdeki raylı taşıma altyapısının en etkili şekilde kullanılmasını sağlayarak, yolcu talebinin karşılanabilmesi için uygun taşıma kapasitesini belirlemektedir. Bu uyum, planın doğru bir şekilde oluşturulması ve güncellenmesi ile mümkün olur. Bir işletme planının mantıklı olabilmesi için, taşıma kapasitesinin yolcu talebiyle uyumlu olması gerekmektedir [3]. Bu, toplu taşıma sistemlerinin gereksinimlere doğru şekilde yanıt vermesi ve kullanıcılarına güvenilir bir hizmet sunabilmesi için temel bir prensip olmaktadır.

Demiryolu sektörü, karmaşıklığı ve çeşitliliği nedeniyle çeşitli programlama problemleri ile mücadele etmektedir. Bu problemler, sektörün genel verimliliğini, kapasitesini ve hizmet kalitesini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu bağlamda, demiryolu sektöründeki programlama problemleri, genellikle operasyonel planlama, araç işletme planlama ve sefer planlaması gibi temel alanlarda ortaya çıkmaktadır ve bu problemler, sektörün temel faaliyetlerine yönelik stratejik çözümleri içermektedir. En önemli çalışmalar, operasyonel planlama, araç işletme planlama ve sefer planlamasıyla ilgili süreç olmaktadır. Operasyon planlama, bir raylı sistem araçlarının işletme şeması ortaya çıkarmaktadır. Araç işletme planlaması, raylı sistem araçların atanmasını belirlemekte ve sefer planlaması, sefer üyeleri için bir plan oluşturmaktadır [4]. İşgücü maliyetleri, demiryolu şirketlerinin operasyonel maliyetlerinin önemli bir kısmını oluşturmaktadır [5]. Bu sebeple, maliyetlerin etkili bir şekilde yönetilmesi, şirketlerin sürdürülebilirlik ve rekabet avantajı elde etmesi açısından kritiktir. Doğru ve etkili bir sefer planlaması, iş gücü kaynaklarını optimum bir şekilde kullanarak fazla personel maliyetlerini azaltmakta ve operasyonel maliyetleri kontrol altında tutmaktadır. Demiryolu sisteminin verimli ve düzenli bir şekilde işleyebilmesi için kritik bir rol oynayan bir diğer önemli kavram da sefer planlamasıdır. Sefer planlaması, belirli bir zaman dilimi içinde bir demiryolu sisteminde gerçekleşmesi beklenen tüm raylı sistem araç hareketlerinin bir planıdır [6]. Sefer planlamalarının

karmaşıklığı, demiryolu sistemlerinde bir dizi faktörün bir araya gelmesiyle ortaya çıkmaktadır. Bu karmaşıklık; coğrafi bölgedeki yolcu talepleri, seyahat düzeni, demiryolu altyapısı, raylı sistem araç kapasitesi, ve sefer planlama sorunu (SPS) gibi teknik ve operasyonel unsurların entegre edilmesini gerektirmektedir. Son zamanlarda, sefer planlamalarının karmaşık hale gelmesi nedeniyle, SPS da karmaşık ve büyük ölçekli bir sorun haline gelmektedir [7]. Özellikle, lojistik, taşımacılık ve ulaşım hizmeti sunan işletmeler, sefer planlama ve personel yönetimi gibi kritik süreçlerde zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu süreçlerin manuel olarak yönetilmesi, zaman ve verimlilik kaybına neden olmaktadır. Bu noktada, yazılım tabanlı çözümler, ulaşım sektöründeki işletmelere önemli avantajlar sağlamak adına geliştirilmeye başlanmaktadır.

1.1. Literatür taraması

Ulaşım sektöründeki etkin planlama, hizmet verimliliği, maliyet optimizasyonu, çevresel sürdürülebilirlik ve yolcu memnuniyeti gibi kilit faktörleri etkileyerek sektörün başarılı bir şekilde işletilmesini sağlamaktadır. Ulaşım hizmetlerinin karmaşıklığı ve büyüklüğü göz önüne alındığında, etkili planlama, kaynakların doğru ve verimli bir şekilde kullanılmasını sağlamakta, aynı zamanda operasyonel süreçleri düzenlemekte ve performansı artırmaktadır. Bu öneme binaen, ulaşım planlamasıyla ilgili birçok araştırma ve çalışma yapılmıştır. Literatürdeki bu çalışmalar, farklı ulaşım modları ve sistemleri için çeşitli planlama stratejilerini ele almaktadır. Yapılan çalışmalara bakıldığında raylı sistemlerde optimum sefer planlaması, araç rotalama problemleri, ekip programlaması gibi konular üzerinde yoğunlaşan araştırmalar, raylı ulaşım sektöründeki planlama süreçlerini daha etkili ve verimli hale getirmeyi amaçlamaktadır.

Çin'deki yük raylı sistem aracı demiryolu sistemlerinde günlük işletme planlamasını optimize etmek için bir raylı sistem araç yolu seçimi optimizasyon modeli geliştiren Li ve ark. [8] modelde Tabu arama algoritması kullanmaktadır. Menghua demiryolu verileri üzerinde test edilen bu modelle, toplam raylı sistem araç seyahat süresini azaltma ve sevkiyatların zamanında teslimini sağlama konusunda başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Zhang ve Yue [9] tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ise değişken zamanlı yolcu talepleri altında raylı sistem araç sefer tablosu optimizasyonu ele alınarak kentsel raylı ulaşımın rekabetçi tavrını artırmak hedeflenmiştir. Kübik spline interpolasyon yöntemiyle uyarlanan yolcu talep fonksiyonu, tavlama benzetim algoritması kullanılarak minimize edilen bir optimizasyon modeline entegre edilmiş ve Xi'an Metro Hattında başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Bunun yanı sıra Sagawa vd. [4] tarafından demiryolu tarifelerini düzenleme sorununu çözmek için geleneksel Max-Plus-Linear (MPL) sistemini genişleten bir model geliştirildi. Yerel ve ekspres raylı sistem araçlarının etkileşimini içeren bu model, demiryolu sistemlerinde esnek zaman çizelgeleri oluşturarak, çeşitli hizmetleri başarıyla planlayabilmekte ve sayısal deneylerle geçerliliğini kanıtlamaktadır. Yu ve ark. [10] demiryolu işletmelerinde karşılaşılan raylı sistem tarifesi optimizasyonu sorununu çözmek için yolcu çiftlerinin erişilebilirliği ve denge faktörlerini dikkate alınarak geliştirilen model Beijing-Shanghai yüksek hızlı demiryolunda uygulanmıştır. Bu uygulama sonucunda 92 raylı ulaşım aracıyla optimum tarife elde edilmiş, başlangıç-bitiş hizmet sıklığı ve denge iyileştirmelerine katkı sağlanmıştır. Ceylan ve ark. [11], hafif raylı ulaşım sistemlerinde makinist görev çizelgesi oluşturarak toplam çalışma süresini ve vardiya sayısını dengeli bir biçimde optimize etmeyi amaçlamışlardır. Geliştirilen matematiksel model, GAMS/CPLEX programı ile çözümlenerek adil görev ataması ve çalışan memnuniyeti ile hizmet kalitesinde artış sağlanmıştır.

Cingöz ve Aytemiz [1] tarafından gerçekleştirilen çalışmada, şehir içi toplu taşıma hizmetlerinin etkin planlanması ve yönetilmesi için bir çerçeve sunulmuştur. Özellikle otobüs toplu taşıma sistemlerinin sefer sıklığı ve zaman çizelgesinin optimize edilmesini amaçlayan bu çalışma, kullanıcı memnuniyetini artırmayı, çevresel etkileri minimize etmeyi ve toplu taşıma hizmetlerini daha verimli hale getirmeyi hedeflemektedir. Nagy ve Tick [12] tarafından yapılan çalışmada, toplu taşıma işletmelerinin otobüs taşımacılığı operasyonlarını etkinleştirmek ve

maliyetleri azaltmak amacıyla otobüs filo araçları ve sürücülerinin programlaması, araç/sefer planlama problemi (ASPP) temelli bir matematiksel model ve çözüm yöntemiyle ele alınmaktadır. Ayrıca, açık kaynaklı ve ticari çözümlerin genel bir değerlendirmesini sunarak, bu alandaki çözüm yöntemlerini tartışmaktadır. Yazıcı ve ark.[13], Kırşehir ilindeki şehir içi otobüs hatlarında görev yapan şoförlerin adil ve dengeli bir şekilde çizelgelenmesi amaçlanmıştır. Hedef programlama yöntemi uygulanarak her bir şoförün ay boyunca hangi gün, hatta ve vardiyada çalışacağı belirlenmiş ve dengeli bir iş dağılımı sağlanmıştır. Model, ILOG CPLEX kullanılarak çözülmüş ve kadın şoförlerin gece vardiyasında çalışmaması gibi kısıtlar dikkate alınmıştır. Elde edilen sonuçlar, şoförler arasında adil bir çalışma düzeni tesis edilerek personel verimliliğinin artırılacağını öngörmektedir. Cai ve ark. [3] tarafından yürütülen çalışma, şehir içi raylı transit sistemlerinin günlük raylı sistem araç işletme planlarını optimize etmeyi amaçlamaktadır. Shenzhen metrosu üzerinde uygulanan matematiksel optimizasyon modeli, dinamik raylı sistem araç işletme planları oluşturarak maliyetleri azaltmanın ve ekonomik faydaları artırmanın önemini vurgulamaktadır.

Wang ve Guo [14] tarafından yapılan analizde, sefer planlama problemi (SPP) adım adım optimize edilerek, uzay-zaman ağı ve çok amaçlı optimizasyon modeli kullanılarak algoritmalar geliştirilmiştir. Bu algoritmaların etkinlikleri Beijing-Tianjin şehirlerarası demiryolu durum analiziyle doğrulanmıştır. Gelecek çalışmalar, SPP'nin başlangıç aşamasındaki çözümleri geliştirmeyi ve özellikle yüksek hızlı raylı sistem araç sürücülerinin planlama zorluklarına odaklanmayı amaçlamaktadır. Demiryolu sefer planlaması probleminde Bakteriyel Foraj Algoritması Tabanlı Demiryolu Sefer Planlama Optimizasyonu (BFATDSP) yönteminin üstünlüklerini değerlendirildiği Pang ve Chen [5] tarafından yapılan çalışmada ise BFATDSP, GA (Genetik Algoritma) ve PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) yöntemlerine kıyasla daha yüksek çözüm kalitesi, hızlı hesaplama süresi, tutarlı performans, global konverjans yeteneği ve düşük hesaplama maliyeti sağladığı belirtilmiştir. Bu avantajlar, demiryolu SPP'nde BFATDSPO'nun etkili bir çözüm sunduğunu ve GA ile PSO'ya göre daha üstün bir performans sergilediğini vurgulamaktadır. Bu durum gerçek zamanlı karar destek sistemleri için potansiyel bir çözüm sunmaktadır.

Kokubo ve ark. [15], pratik raylı sistem araç SPP için tasarlanmış bir tabu arama yönteminin etkinliğini değerlendirmektedir. Yöntem, etkili bir arama yöntemi için yeni bir amaç fonksiyonu ve komşuluk programları için yeni nesil yöntemler içermektedir. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin tüm kısıtlamalara uygun bir program üretebildiğini ve mevcut zaman çizelgesine göre amaç fonksiyonu değerlerini önemli ölçüde azaltabildiğini göstermektedir. Ayrıca, önerilen yöntemin tabu listesi uzunluğu konusunda sağlam bir performans sergilediği belirlenmiştir. Bu çalışma, demiryolu SPP'lerde daha etkili ve optimize edilmiş çözümler elde etmek için geliştirilmiş bir tabu arama yönteminin başarılı bir şekilde uygulanabileceğini vurgulamaktadır. Kokubo ve Fukuyama [16] tarafından yürütülen çalışma, pratik raylı sistem araç ekibi programlama problemlerinin hızlı çözümü için paralel tabu arama yöntemini öne çıkarmaktadır. Özellikle raylı sistem araç SPP'yi ve ekibi iyileştirme problemleri için geliştirilen bu yöntem, paralel hesaplama tekniklerini kullanarak %4.6 oranında hızlanma sağlayarak demiryolu ekibi programlama problemlerine etkili bir çözüm sunma potansiyeli taşımaktadır.

Literatürde incelenen çalışmalar Tablo 1'de ayrıntılı şekilde sınıflandırılmıştır. Mevcut çalışmalarda çeşitli yenilikçi yaklaşımlar ve katkılar sunulduğu görülmektedir. Ancak yapılan pek çok çalışma, raylı sistemlerde sefer sürelerini optimize etmeye ve maliyetleri düşürmeye odaklanmıştır. Ancak, bu çalışmada geliştirilen yazılım, sefer planlama süreçlerini otomatikleştirerek ve kullanıcı dostu arayüzü ile işletmelerin günlük operasyonlarında hızla benimsenmesini sağlamaktadır. Yazılımımız, çevrimdışı çalışma kapasitesi ve dışa aktarılabilir tarife üretme yeteneği ile işletmelere esneklik ve verimlilik kazandırmaktadır. Geleneksel

yöntemlere kıyasla, sefer planlama sürecinde büyük bir zaman tasarrufu sağlayarak operasyonel verimliliği artırmaktadır.

Tablo 1. Önerilen çalışmayla ilgili yapılan çalışmaların sınıflandırılması

Referans	Algoritma/Model	Amaç Fonksiyonu	Uygulama Alanı
Li ve ark., (2020)	Tabu arama algoritması	Raylı sistemlerde seyahat ve sevkiyat süresi minimizasyonu	Raylı Ulaşım Sistemleri
Zhang & Yue, (2020)	Kübik spline interpolasyon yöntemi	Yolcu bekleme süresi, Raylı sistem araç çalışma süresi ve kullanılan raylı sistem araç sayısı minimizasyonu	Raylı Ulaşım Sistemleri
Sagawa ve ark., (2020)	Max-Plus-Linear(MPL)	Demiryolu sefer saatlerinin optimize edilmesi ve overtaking durumlarına göre düzenlenmesi	Raylı Ulaşım Sistemleri
Yu ve ark. (2022)	Yuvarlanan ufuk yaklaşımı	Toplam raylı sistem seyahat süresini minimizasyonu	Raylı Ulaşım Sistemleri
Ceylan vd., (2021)	-	Hedef değerden sapma değer minimizasyonu	Raylı Ulaşım Sistemleri
Cingöz ve Aytemiz, 2023	-	Kullanıcı memnuniyeti maksimize ve çevresel etki minimizasyonu	Otobüs Toplu Taşıma Sistemi
Nagy ve Tick (2020)	-	Otobüs taşımacılığı operasyon maliyeti minimizasyonu	Otobüs Toplu Taşıma Sistemi
Cai ve ark.(2020)	-	Sistem maliyet minimizasyonu	Raylı Ulaşım Sistemleri
Wang ve Guo (2023)	Set bölme yöntemiyle çok amaçlı optimizasyon modeli	Sefer boş süre minimizasyonu	Raylı Ulaşım Sistemleri
Pang ve Chen, 2023	BFATDSP yöntemi	Toplam sefer maliyeti minimizasyonu	Raylı Ulaşım Sistemleri
Kokubo ve ark. (2017),	Tabu arama algoritması	Sefer çalışma saatlerinin minimizasyonu	Raylı Ulaşım Sistemleri
Kokubo ve Fukuyama (2018)	Paralel tabu arama algoritması	Sefer atanma sayısı, genel çalışma süreleri ve mola süreleri arasındaki farkın minimizasyonu	Raylı Ulaşım Sistemleri

1.2. Katkılar ve çalışmanın organizasyonu

Bu çalışma, raylı sistem araçlarının (RSA) sefer planlamasının otomatikleştirilmesine yönelik mevcut çalışmaları analiz ederek, RSA çakışmalarını önleme, operasyonel verimliliği artırma ve personel kaynaklarını optimize etme odaklı yenilikçi bir çözüm sunmaktadır. .NET 4.8 temelli bir masaüstü yazılım geliştirilmiş olup, bu platform üzerinden sefer parametrelerinin esnek bir

şekilde yönetilmesine olanak tanımaktadır. Yazılım, operasyonel riskleri minimize ederken, sefer planlama süreçlerinin verimliliğini ve hizmet kalitesini artırma potansiyeline sahiptir.

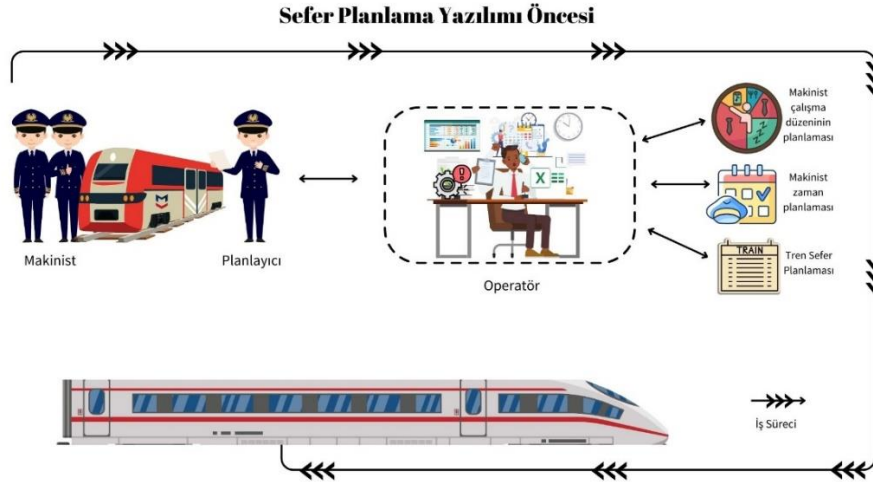
Türkiye'de sefer planlamasının ilk defa bir yazılım bünyesinde yapılmasını sağlamaktadır. İşletmeler, bu süreci genellikle manuel ORER tabloları veya Excel tabloları üzerinden yürütmekte ve bu durum zaman ve verimlilik kaybına yol açmaktadır. Örneğin, bir ORER tablosunun hazırlanması 10-15 gün sürerken, Excel ile uzman personel tarafından yapılan çalışmalar 1-2 gün sürebilmektedir. Geliştirilen yazılım, bu süreci otomatikleştirerek işletmelerin zaman ve verimlilik açısından önemli kazançlar elde etmelerine öncülük etmektedir. Geleneksel yöntemlerle yapılan sefer planlamalarında, kaç personelin gerektiği sağlıklı bir şekilde hesaplanamamakta ve çoğu zaman fazla personel veya minimum personele aşırı yüklenme gibi dengesiz planlamalar yapılmaktadır. Geliştirilen yazılım, minimum kriterler girildiğinde personel sayısını otomatik olarak hesaplayarak bu sorunun önüne geçmektedir.

Çalışma, veri bilimi, planlama ve yazılım uzmanlarının bir araya gelmesiyle oluşturulan bilgi birikimi sayesinde, uluslararası muadil yazılımların maliyetlerine göre daha ekonomik bir çözüm sunarak işletmelerin bütçe planlaması avantajı elde etmelerine önemli bir katkı sağlamaktadır. Aynı zamanda, ortak bir yazılım kullanımıyla sektörel standardizasyonu destekleyerek iş birliği ve entegrasyonu kolaylaştırmıştır. Bu durum, sektördeki paydaşların bir araya gelerek daha uyumlu ve verimli bir çalışma ortamı oluşturmalarına olanak sağlamaktadır. Projenin modüler tasarımı, ölçeklenebilirlik ve sefer planlama esnekliği sağlamış, böylece işletmelerin değişen ihtiyaçlarına uygun özelleştirmeleri mümkün kılmıştır. Bu da proje kullanıcılarına daha kişiselleştirilmiş çözümler sunma imkanı vererek adaptasyon süreçlerini kolaylaştırmıştır.

Makalenin kalan kısmı şu şekilde düzenlenmiştir: Bölüm 2'de projenin yöntem kısmı anlatılmaktadır. Bu bölümde sefer planlama yazılımı sürecinde kullanılan yöntem, matematiksel model ve detaylar ele alınmaktadır. Bölüm 3'te projenin bulguları ve analiz kısmı anlatılmaktadır. Bu bölüm, demiryolu taşımacılığı sektöründe sefer planlama yazılımının personel ve zaman yönetimi üzerindeki olumlu etkilerini detaylı bir şekilde ele almaktadır. Son bölüm olan Bölüm 4'te ise projenin sonuç kısmı anlatılmaktadır.

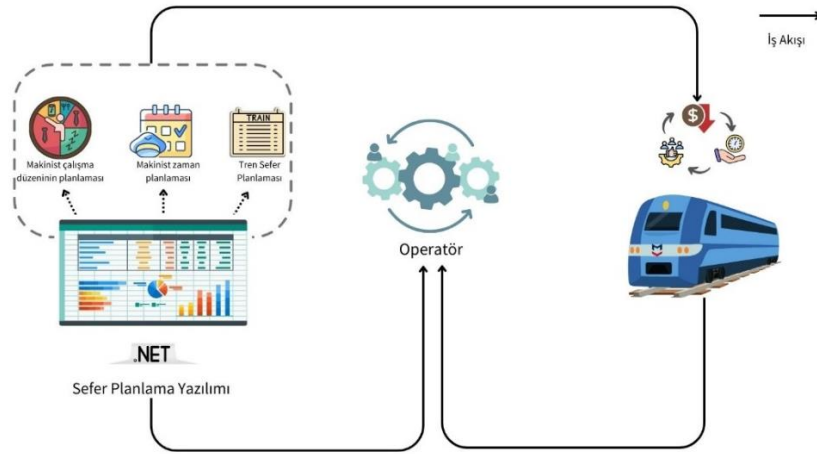
2. Metot

Geleneksel RSA sefer planlama sistemi (SPS) süreci, esas olarak operatörlerin yönetiminde gerçekleşen, yoğun emek ve zaman gerektiren bir işlem dizisidir. Şekil 1'de, iş planlama yazılımı öncesi iş akışı gösterilmiştir. Bu süreçte makinistlerin çalışma düzenlerini, zamanlamalarını ve RSA seferlerini manuel olarak planlamaktadır. Kullanılan temel araçlar arasında detaylı bilgiler içeren Excel tabloları ve çizelgeler yer almaktadır. Bu tablolar, seferlerin zamanlaması, makinistlerin çalışma saatleri ve RSA'ların durumu gibi kritik bilgileri içeren detaylı kayıtlar olarak işlev görmektedir. Operatörler, bu tabloları sürekli olarak güncellemekle yükümlüdür. Seferlerin zamanlaması, personelin mevcudiyeti ve demiryolu ağının durumu gibi değişkenler göz önünde bulundurularak bu tablolar düzenli olarak revize edilir. Bu sürekli güncelleme ihtiyacı, operatörlerin iş yükünü önemli ölçüde artırır ve hata yapma riskini yükseltir. Herhangi bir hata, RSA seferlerinde gecikmelere veya daha ciddi sorunlara yol açabilir, bu da yolcu memnuniyeti ve operasyonel verimlilik üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir.



Şekil 1. Sefer planlama yazılımı öncesi iş akışı

Ayrıca, geleneksel sistemde ani durumlara hızlıca yanıt verebilmek için ek personel gereksinimi söz konusudur. Beklenmedik aksaklıklar, hastalıklar veya diğer acil durumlar karşısında, ek makinistler ve planlayıcılar yedek olarak hazır tutulur. Bu personelin varlığı, operasyonel esnekliği sağlamakla birlikte, ek maliyetleri ve iş gücü yönetiminin karmaşıklığını da beraberinde getirir. Yedek personelin bulundurulması, personel maliyetlerini artırır ve iş gücü planlamasını daha zorlu hale getirir. Bu manuel planlama sürecinin karmaşıklığı, RSA işletmecilerini zaman, maliyet ve iş gücü yönetimi açısından önemli zorluklarla karşı karşıya bırakır. Bu nedenle, manuel süreçlerin dijitalleştirilmesi ve otomatikleştirilmesi, demiryolu sektöründe önemli bir ihtiyaç olarak ortaya çıkmaktadır. Gelişmiş planlama yazılımları, bu manuel işlemlerin yerini alarak RSA seferlerinin daha etkin, verimli ve hatasız bir şekilde planlanmasına imkân tanımaktadır.



Şekil 2. Sefer planlama yazılımı sonrası iş akışı

Şekil 2'de SPS süreci sonrası iş akışı gösterilmiştir. Geliştirilen sefer planlama yazılımının uygulanması ile RSA SPS sürecinin otomatikleştirilmesi, demiryolu taşımacılığı alanında operasyonel verimlilik ve etkinlik açısından önemli bir değerler dizisi değişikliğini temsil etmektedir. Bu yazılım, makinistlerin çalışma düzeni, makinistlerin zaman planlaması ve RSA sefer planlaması gibi kritik süreçleri içeren, kapsamlı ve entegre bir otomatik planlama sistemidir. Bu sistem, kullanıcıdan alınan başlangıç verilerine dayanarak, çeşitli planlama görevlerini hızlı ve doğru bir şekilde yerine getirme yeteneğine sahiptir. Geleneksel manuel yöntemlerle gerçekleştirildiğinde 9 saat (540 dakika) süren planlama süreci, yazılım uygulandığında yaklaşık 15 dakikaya indirilmektedir. Bu, sürecin etkinliği ve zaman yönetiminde radikal bir iyileşmeyi

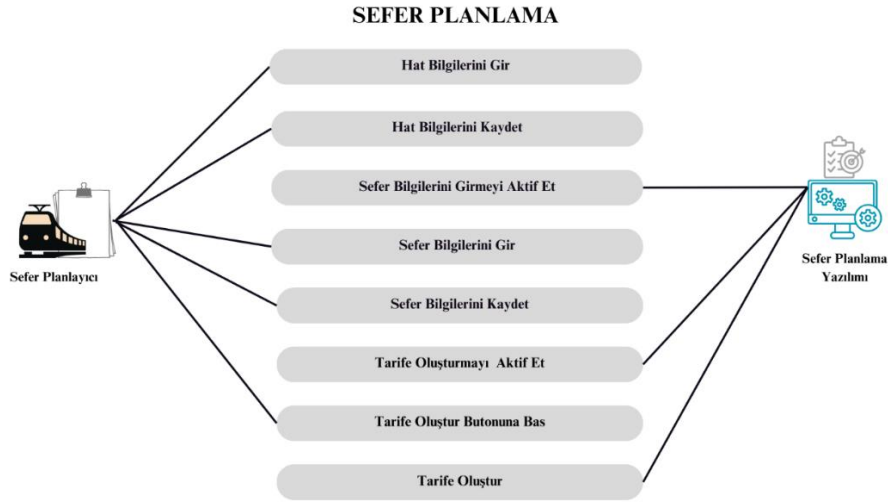
göstermektedir. Yazılımın benimsenmesiyle, yedek personel bulundurma gereksiniminin ortadan kalkması, demiryolu operasyonlarının iş gücü maliyetlerini ve yönetim karmaşıklığını önemli ölçüde azaltmaktadır. Otomatikleştirilmiş sistem, beklenmedik durumlar ve acil müdahale gerektiren senaryolara karşı yüksek düzeyde uyum sağlama ve hızlı tepki verme kapasitesine sahiptir. Ek personel ihtiyacını ortadan kaldırarak, insan kaynakları yönetimi üzerindeki baskıyı azaltmakta ve operasyonel maliyetleri düşürmektedir. Yazılımın kullanımı, aynı zamanda hata yapma olasılığını önemli ölçüde azaltmaktadır. İnsan faktöründen kaynaklanan hatalar, bu otomatize sistemde minimuma indirilmektedir. Yazılım, planlama sürecini standartlaştırarak, tutarlı ve güvenilir sonuçlar üretmektedir. Bu durum, hem operasyonel verimliliği artırmakta hem de yolcu memnuniyetini olumlu yönde etkilemektedir.

Sonuç olarak, SPS yazılımının entegrasyonu, demiryolu taşımacılığında operasyonel verimlilik, maliyet yönetimi ve hizmet kalitesi açısından önemli bir dönüşümü temsil etmektedir. Bu teknolojik ilerleme, demiryolu sektörünün daha verimli, ekonomik ve sürdürülebilir operasyonlarını mümkün kılmak için hayati bir adım olmaktadır. Yazılım, karmaşık planlama işlemlerini basitleştirerek, RSA işletmecilerine kaynaklarını daha etkin bir şekilde yönetme ve müşteri hizmetlerini iyileştirme imkânı sunmaktadır. Geliştirilen SPS modülünün işleyişi Şekil 3'te gösterilmiştir. İlk olarak kullanıcı, uygulamayı açarak Hat Bilgileri Giriş Ekranında başlangıç ve varış istasyonu bilgilerini girer ve isteğe bağlı olarak parkur süresini ekleyebilmektedir. Girilen hat bilgileri sisteme kaydedilip kontrol edilmektedir. Daha sonra, kullanıcı sefer başlangıç ve bitiş saatleri ile sefer aralıklarını girmektedir. Bu bilgiler, çakışma kontrolü için incelenmektedir. Çakışma varsa, kullanıcıya uyarı verilir, çakışma yoksa "Tarife Oluştur" butonu aktif hale gelir ve kullanıcı bu butona basarak hazırlanan tarifeyi görüntüleyebilmektedir. Bu süreç, kullanıcılara kolaylık sunarken ulaşım sisteminin verimliliğini ve düzenini artırmayı hedeflemektedir.



Şekil 3. Sefer planlama modülü akış şeması

Şekil 4'te sunulan sefer planlama sistem akış modeli, sefer planlama sisteminin işlevselliğini, kullanıcı ve yazılım arasındaki lineer etkileşim üzerinden tanımlanır. Süreç, öncelikle kullanıcının seferin operasyonel hat parametrelerini sisteme girmesi ve bu bilgilerin kaydedilmesiyle başlamaktadır. Bu adım, planlamanın temelini oluşturarak ve sonraki aşamalar için zemin hazırlamaktadır. Kullanıcı, daha sonra detaylı sefer zamanları ve frekansları gibi bilgileri girmektedir. Bu bilgilerin başarıyla sisteme eklenmesi, tarife oluşturma işlevini aktif hale getirmektedir. Kullanıcı, "Tarife Oluştur" butonuna basarak sistemin bu bilgilere dayalı bir tarife oluşturmasını sağlamaktadır. Bu süreç, kullanıcı girdileri ile yazılım çıktıları arasındaki doğrudan ilişkiyi ve kullanıcı eylemlerinin yazılım işlevselliğini nasıl etkinleştirdiği gösterilmektedir.



Şekil 4. Sefer planlama sistem akış modeli

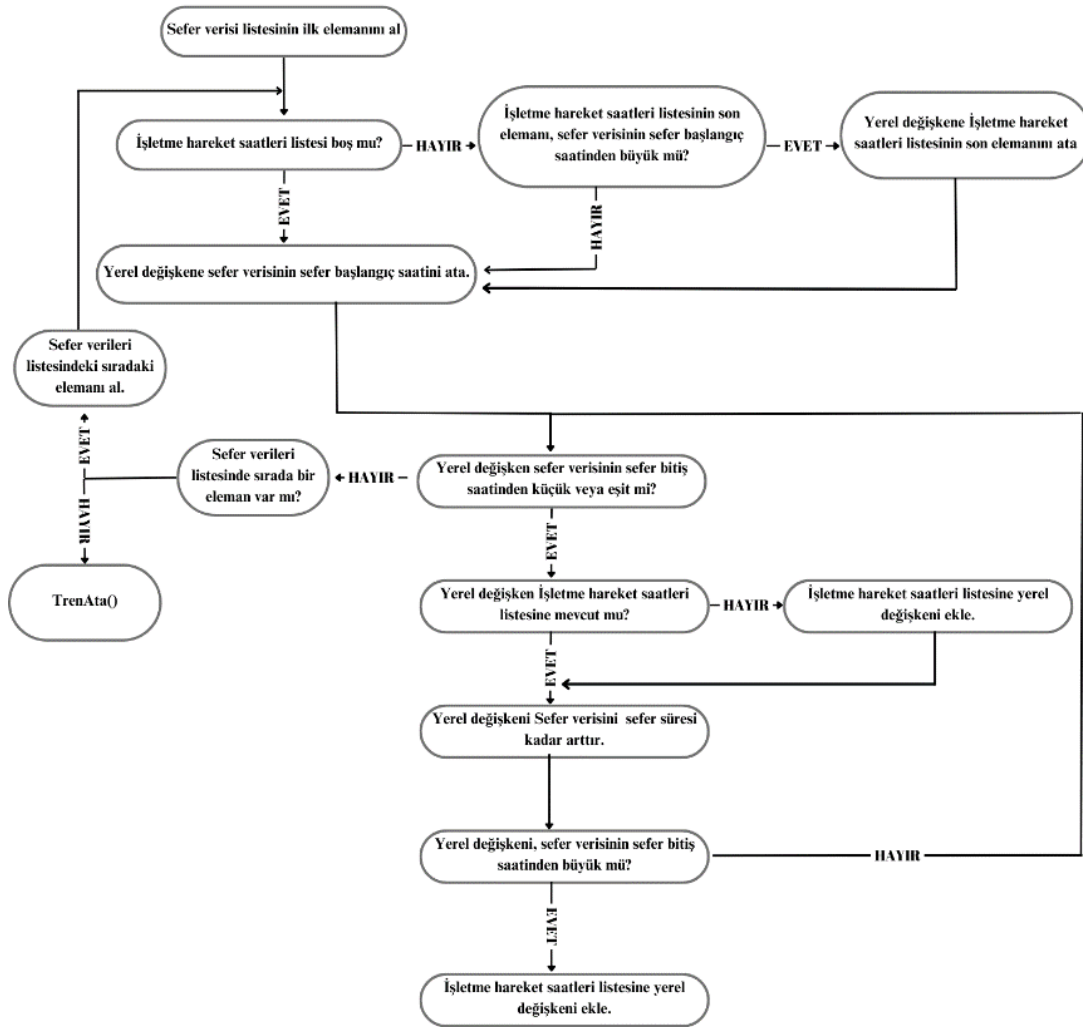
Sefer planlama sisteminde, kullanıcıdan öncelikle "Başlangıç istasyonu", "Varış istasyonu" ve "Parkur süresi" gibi temel bilgiler alınmaktadır. Bu bilgilerin tam ve doğru bir şekilde girilmesiyle "Kaydet" butonu aktifleşmektedir. Bilgilerin kaydedilmesinin ardından "Sefer bilgileri giriş bölümü" etkinleştirilmektedir. Bu bölümde, kullanıcıdan "Sefer başlangıç saati", "Sefer bitiş saati" ve "Sefer süresi" bilgileri istenmektedir. Girilen sefer bilgileri, belirli koşullu ifadelerle sorgulanıp öncelikle, "Sefer başlangıç saati"nin "Sefer bitiş saati"nden küçük olup olmadığı, ardından "Sefer başlangıç saati" ile "Sefer bitiş saati" arasında yeterli "Sefer süresi" farkının bulunup bulunmadığı kontrol edilmektedir. Ayrıca, alınan sefer bilgisinin önceden girilen zaman aralıklarıyla çakışıp çakışmadığı incelenmektedir. Herhangi bir koşul sağlanmazsa, kullanıcı "Sefer bilgileri giriş bölümü"ne geri yönlendirilmektedir.

Tüm koşullar sağlandığında ise sefer bilgisi "Sefer verileri listesi"ne eklenip sonrasında kullanıcıya ek bir seferin olup olmadığı sorulmaktadır. Eğer varsa, işlem "Sefer bilgileri giriş bölümü"nden tekrarlanılmaktadır. Ek bir sefer yoksa "Tarife Oluştur" butonu etkinleştirip ve girilen sefer verilerinin olup olmadığı kontrol edilmektedir. Eğer sefer verisi yoksa, kullanıcıdan sefer bilgileri girmesi istenilip ve "Sefer bilgileri giriş bölümü"ne yönlendirilmektedir. Sefer verisi varsa, girilen sefer verileri "Sefer başlangıç saati"ne göre küçükten büyüğe doğru sıralanmaktadır. Daha sonra her bir sefer verisinin "Sefer başlangıç saati" ile sonraki elemanın "Sefer bitiş saati"nin eşleşip eşleşmediği kontrol edilmektedir. Eğer koşul sağlanmazsa kullanıcı yine "Sefer bilgileri giriş bölümü"ne yönlendirilip koşul sağlandığı takdirde ise "RSASeferTablosuOluştur()" fonksiyonu çağrılarak "Tren sefer tablosu" oluşturulmaktadır.

Şekil 5'te RSA sefer tablosu oluştur fonksiyonu işleyişi gösterilmiştir. Bu fonksiyon, RSA seferlerinin etkin bir şekilde planlanmasını amaçlayan bir algoritmadır. Fonksiyon, belirli adımları izleyerek RSA seferlerinin zamanlamasını optimize etmeyi hedefler ve bu süreç şu şekilde gerçekleştirilir:

İlk adımda, fonksiyon sefer verileri listesinden ilk elemanı alır. Bu eleman, bir RSA seferine ait başlangıç ve bitiş saatleri gibi temel bilgileri içermektedir. Bu, RSA seferlerinin sıralı ve düzenli bir şekilde ele alınması sağlanmakta ve işletmenin ilk adımı oluşturulmaktadır. İkinci adımda, işletme hareket saatleri listesinin durumu kontrol edilir. Eğer bu liste boşsa, bu durum yeni bir seferin programa ilk defa eklenmesi anlamına gelir ve yerel değişkene sefer verisinin başlangıç saati atanmaktadır. Eğer liste doluysa, liste son elemanı yeni seferin başlangıç saatinden büyüklüğü kontrol edilmektedir. Eğer bu durum geçerliyse, yerel değişkene liste son elemanı ve ardından yeni seferin başlangıç saati atanmaktadır. Üçüncü adımda, yerel değişken sefer verisinin

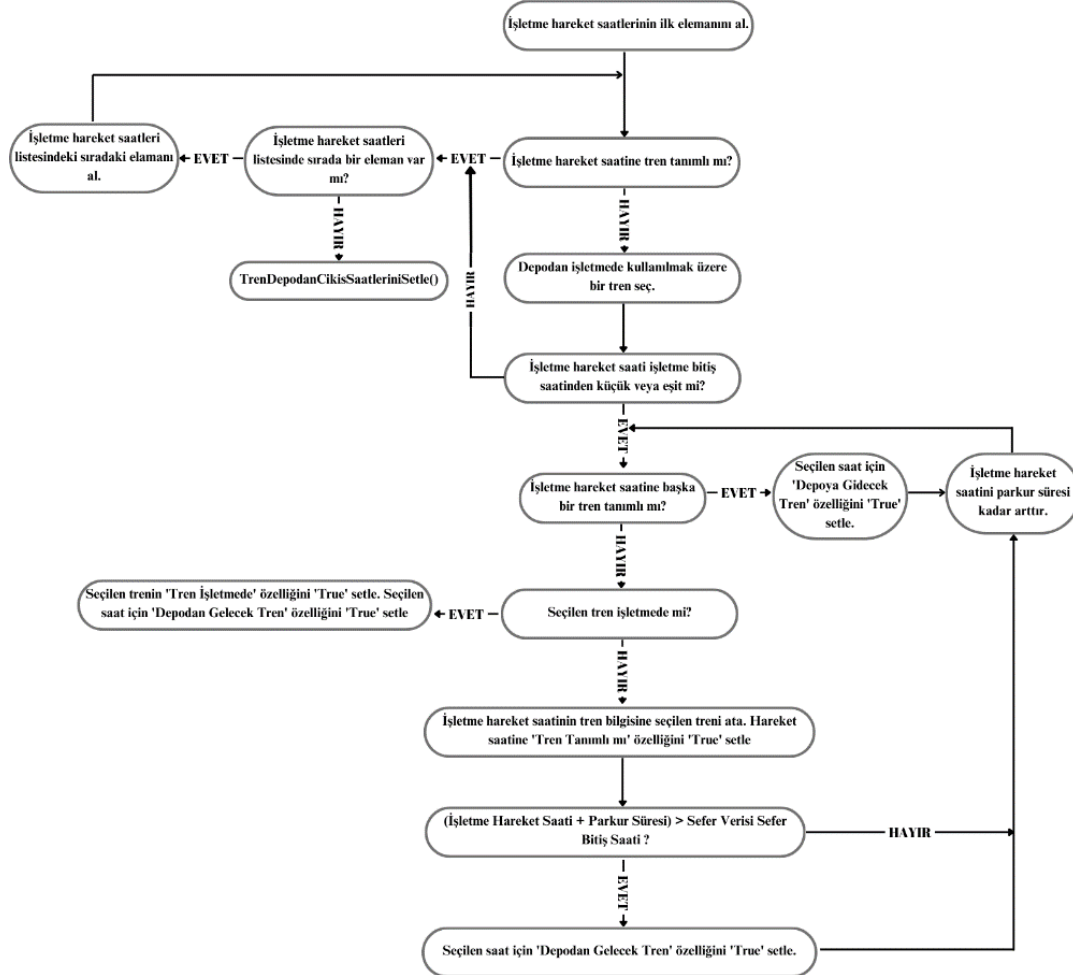
bitiş saatinden küçüklüğü veya eşitliği kontrol edilir. Eğer bu durum geçerli değilse ve sefer verileri listesinde başka bir eleman varsa, fonksiyon bir sonraki sefer verisine geçmekte ve işlem döngüsü yeniden başlamaktadır. Eğer sefer verileri listesinde başka eleman kalmamışsa, bu noktada "TrenAta()" fonksiyonu çağrılır. "TrenAta()" fonksiyonu, işlenen tüm verilere dayanarak, RSA seferlerinin son haliyle programa eklenmesini ve zamanlama tablosunun nihai olarak oluşturulması sağlanmaktadır. Eğer yerel değişken, sefer verisinin bitiş saatinden küçük veya eşitse ve işletme hareket saatleri listesinde mevcut değilse, yerel değişken liste içine eklenip sefer süresi kadar ilerletilir. Eğer yerel değişken, sefer verisinin bitiş saatinden büyükse, işletme hareket saatleri listesine eklenmektedir. Bu süreç, sefer verileri listesindeki tüm elemanlar işlenene kadar devam etmektedir. Fonksiyon, bu adımları takip ederek RSA seferlerinin zamanlamasını etkin bir şekilde yönetmektedir. Bu algoritma, özellikle yoğun trafik ve değişken talep koşullarına sahip kentsel toplu taşıma sistemlerinde kritik bir rol oynamaktadır.



Şekil 5. RSA sefer tablosu oluşturma fonksiyonu akış şeması

Şekil 6'da "RSA ata" fonksiyonunun işleyişi gösterilmektedir. Bu fonksiyon, RSA seferlerinin etkin bir şekilde planlanması ve yönetilmesi için kritik bir süreci takip etmektedir. Bu fonksiyonun amacı, işletme hareket saatleri listesini kullanarak uygun RSA'nın seçilmesi ve atamasıdır. İşleyiş süreci aşağıdaki gibi gerçekleşmektedir:

İlk olarak, fonksiyon işletme hareket saatleri listesinden ilk elemanı alınır. Bu adımla, RSA'ların hareket saatlerinin ve planlanmış seferlerinin yönetimine başlangıç noktası oluşturulur. Daha sonra, işletme hareket saatinde bir RSA'nın tanımlanıp tanımlanmadığı kontrol edilir. Eğer bir RSA tanımlıysa, liste içinde bir sonraki elemana geçilir. Eğer liste tükenmişse, "TrenDepodanCikisSaatleriniSettle()" fonksiyonu çağrılır. Bu fonksiyon, depodan çıkacak RSA'ların hareket saatlerini ayarlar ve seferlere hazırlanmasını sağlar.



Şekil 6. RSA Ata fonksiyonu işleyişi

Eğer işletme hareket saatinde henüz bir RSA tanımlanmamışsa, depodan işletmede kullanılmak üzere bir RSA seçilir. Bu seçim, RSA'ların kullanılabilirlik durumlarına ve sefer gereksinimlerine göre yapılır. Daha sonra, işletme hareket saatinin işletme bitiş saatinden küçük veya eşit olup olmadığı kontrol edilir. Eğer bu durum geçerli değilse, işletme hareket saatinde bir RSA tanımlı olup olmadığı kontrol edilir ve tanımlı ise ilgili adımlar uygulanır. Eğer işletme hareket saati işletme bitiş saatinden küçük veya eşitse ve seçilen saat için başka bir RSA tanımlıysa, seçilen saat için depoya gidilecek RSA özelliği belirlenir. Daha sonra işletme hareket saati, parkur süresi kadar arttırılır ve işletme hareket saati işletme bitiş saatinden küçük veya eşit olana kadar bu süreç tekrarlanır. Eğer işletme hareket saatinde başka bir RSA tanımlı değilse ve seçilen RSA işletmede ise, seçilen RSA'nın işletmede olduğu belirtilir. Eğer seçilen RSA işletmede değilse, işletme hareket saatinin RSA bilgisine seçilen RSA atanır ve hareket saatinde RSA tanımlı olduğu işaretlenir. Daha sonra, işletme hareket saati ve parkur süresinin toplamı, sefer verisi sefer bitiş saatinden büyük olup olmadığı kontrol edilir. Eğer büyükse, seçilen saat için depodan gelecek RSA özelliği belirlenir. Küçükse, işletme hareket saati parkur süresi kadar arttırılır ve bu süreç,

işletme hareket saati işletme bitiş saatinden küçük veya eşit olana kadar tekrarlanır. Bu süreç, RSA'ların etkin bir şekilde atanmasını ve seferlerin zamanında gerçekleşmesini sağlamakta, bu da toplu taşıma sistemlerinin genel verimliliğini ve müşteri memnuniyetini artırma potansiyeline sahip olmaktadır.

“TrenDepodanCikisSaatleriniSettle()” fonksiyonu, RSA'ların depodan çıkış zamanlarını ayarlayarak sefer planlamasında önemli bir işlev görmektedir. İlk olarak, işletme hareket saatleri listesinden bir saat seçilir ve bu saatin depodan gelen bir RSA'yı temsil edip etmediği kontrol edilir. Eğer bu RSA depodan gelmiyorsa, işletme hareket saati ile parkur süresinin toplamı bir değişkene atanır. Eğer depodan gelen bir RSA ise, işletme hareket saatinden parkur süresinin yarısı çıkarılır. Daha sonra, bu süreden daha kısa veya eşit olan bir işletme hareket saati olup olmadığı kontrol edilir. Eğer yoksa, depodan istasyona gidiş süresi işletme hareket saatinden çıkarılır ve bir değişkene atanır. Sonrasında, bu yeni hesaplanan çıkış saati depo hareket saatleri listesinde var mı diye kontrol edilir ve varsa veya depodan gelen RSA özelliği yoksa listeye eklenir. Bu adımlar, liste boyunca tekrarlanarak devam eder. Bu yöntemle, RSA'ların depodan çıkış saatleri etkin bir şekilde yönetilir, böylece RSA'ların zamanında ve düzenli bir şekilde seferlerini gerçekleştirmeleri sağlanmaktadır.

2.1. Matematiksel model

Bu matematiksel model, metro hizmetlerinin zamanlamasını optimize etmek için tasarlanmış bir modeldir. Model, bir metro hattında belirli istasyonlarda hizmetlerin zamanlamasını düzenlerken, hizmet taleplerinin başlangıç ve bitiş zamanlarını, RSA'ların hizmet bitiş zamanlarını, istasyonların iş yoğunluklarını ve parkur sürelerini göz önünde bulundurmaktadır.

Bu çerçevede, her bir metro hattı l , RSA r ve istasyon s için belirli kümeler tanımlanmaktadır. Bir istasyonda hizmetin ne kadar süreceğini gösteren rota tamamlama süresi ($C_{l,s}$), hizmetin parkur süresi ($P_{l,s}^{Parkur}$), hizmet talebinin başlangıç ($S_{l,s}^{Talep}$) ve bitiş zamanları ($F_{l,s}^{Talep}$), istasyonun iş yoğunluğunun sonu ($B_{l,s}^{Istasyon}$) ve belirli bir RSA için hizmetin bitiş zamanı ($F_{l,s,r}^{Tren}$) parametreleri kullanılarak, hizmetin başlangıcı için uygun zaman ($S_{l,s}^{Uygun}$), hizmetin bitiş için uygun zaman ($F_{l,s}^{Uygun}$) ve hizmet için uygun RSA numarası ($R_{l,s}^{Uygun}$) gibi değişkenler belirlenerek model oluşturulmaktadır. Hizmetin bitiş zamanından rota tamamlama süresinin çıkarılmasıyla hizmetin başlangıç zamanının hesaplanmasını denklem (1) de gösterilmektedir. Denklem (2), sağlanan hizmetin, talep edilen hizmet başlangıç zamanından daha erken olmamasını sağlanmaktadır. Bu, hizmetlerin zamanında veya talep edilen zamandan sonra başlamasını sağlayarak müşteri memnuniyetini artırmaya yöneliktir. Denklem (3)'te ise hizmetin başlangıç zamanının, istasyonun iş yoğunluğu sonrası ve parkur süresinden daha sonra olması sağlanmaktadır. Bu durum, RSA'ların etkili bir şekilde hareket etmesini ve istasyonlarda gereksiz yoğunluk oluşmasını önlemeye yardımcı olmaktadır. Bu denklemler, hizmet zamanlamalarının hem verimli hem de pratik olmasını sağlamak üzere tasarlanmaktadır.

$$F_{l,s}^{Uygun} - C_{l,s} = S_{l,s}^{Uygun} \quad (1)$$

$$S_{l,s}^{Uygun} \geq S_{l,s,R}^{Talep} \quad (2)$$

$$S_{l,s}^{Uygun} > B_{l,s}^{Istasyon} + P_{l,s}^{Parkur} \quad (3)$$

$$Min Z = | S_{l,s}^{Uygun} - S_{l,s}^{Talep} | \quad (4)$$

Denklem (4)'te tanımlanan modelin amaç fonksiyonu ise, metro hizmetlerinin zamanlamasını müşteri taleplerine en yakın şekilde optimize etmeyi amaçlamaktadır. Bu fonksiyon, planlanan hizmet başlangıç zamanı ile talep edilen başlangıç zamanı arasındaki mutlak farkı minimize etmeye çalışmaktadır. Yani, amaç mümkün olduğunca talep edilen zamanlara yakın bir hizmet başlangıcı sağlamaktır. Bu yaklaşım, müşterilerin beklentilerini karşılayarak, onların memnuniyetini artırmayı ve aynı zamanda hizmet verimliliğini maksimize etmeyi hedeflemektedir. Planlanan hizmet başlangıç zamanı ile talep edilen başlangıç zamanı arasındaki mutlak farkın minimize edilmesi, metro hizmetlerinin zamanlama planlamasının, yolcuların ihtiyaçlarına ve tercihlerine daha iyi uyum sağlamasına olanak tanınır ve böylece toplu taşıma sisteminin genel etkinliği ve kullanıcı deneyimini iyileştirmektedir.

Bu matematiksel model, metro hizmetlerinin zamanlamasını müşteri talepleri ve istasyonların operasyonel dinamikleriyle uyumlu hale getirmeyi amaçlamaktadır. Hizmetin başlangıç ve bitiş zamanlarını, RSA hareketlerini ve istasyon yoğunluklarını dikkate alarak, hizmetlerin hem verimli hem de yolcu taleplerine uygun olarak planlanması sağlanmaktadır.

3. Bulgular ve Analiz

Bu bölümde, demiryolu taşımacılığı sektöründe uygulanan sefer planlama yazılımının etkileri, detaylı bir şekilde incelenmiştir. Araştırmanın odak noktası, personel yönetimi ve zaman yönetimi üzerindeki iyileştirmelerdir. Aşağıda, bu temel alanlardaki bulgular ve analizler ayrıntılı olarak sunulmuştur.

3.1. Personel yönetimi

Geleneksel sefer planlama yöntemlerinde, sefer planlarına göre gereken personel sayısının sağlıklı bir şekilde hesaplanamaması, sıklıkla fazla personel bulundurulmasına yol açmaktadır. Bu durum, demiryolu işletmelerinde önemli bir maliyet artışı ve iş gücü yönetiminde karmaşıklık yaratmaktadır. Geliştirilen sefer planlama yazılımının M1 hattında uygulanmasıyla elde edilen veriler, bu sorunun çözümüne dair önemli bulgular sunmaktadır. Yazılımın kullanımı sonucunda, günlük operasyonlarda gereksiz yere bulundurulan bir planlamacı ve iki makinistin ihtiyacı ortadan kalkmıştır. Bu değişiklik, toplam personel iş gücünde %3'lük bir kazanım sağlanmakta, böylece işletme maliyetlerinde önemli bir azaltım gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, bu bulgu, personel yönetiminde verimliliğin artırılmasının yanı sıra, işletme maliyetlerinin optimize edilmesinde etkili bir yöntem olarak da değerlendirilebilmektedir.

3.2. Zaman yönetimi

Yazılımın uygulanması sonucunda elde edilen en önemli bulgulardan biri, zaman yönetimi ve iş gücü verimliliği üzerindeki etkileridir. Geleneksel yöntemlerde, sefer planlama süreci genellikle bir sistem tarafından değil, bir kişinin işgücüne bağlı olarak ve Excel tabloları kullanılarak gerçekleştirilmekte olup, bu yöntem yüksek hata potansiyeli taşıyan ve zaman alıcı bir yöntem olarak değerlendirilmektedir. Sefer planlama yazılımında, başlangıç istasyonu, varış istasyonu, parkur süresi, sefer başlangıç saati, sefer bitiş saati ve sefer süresi gibi işletme bilgileri, Metro İstanbul A.Ş. tarafından geliştirilen ve Şekil 7'de gösterilen arayüz ekranı üzerinden girilmektedir. Yazılımın kullanımıyla oluşturulan tarife sonucunda, işletme için gerekli araç sayısı belirlenmiş ve bu süreçteki operasyonel zaman etkin bir şekilde azaltılmıştır. Geliştirilen yazılımın sonuçları arasında, hafta içi bir günün 05:25 ile 12:54 saatleri arasındaki farklı yönlere ait sefer planlama örneği Şekil 8'de sunulmaktadır. Bu yazılım, pilot bölge olarak seçilen M1A Yenikapı-Havalimanı ve M1B Yenikapı-Kirazlı hatlarında uygulanmıştır. Şekil 8'den, belirlenen saat aralığında sefer planına göre araçların seferlerini gerçekleştireceği anlaşılmaktadır.

TimeTableSoftware

Hat Bilgileri Giriş Bölümü

Başlangıç İstasyonu: YENİKAPI Vans İstasyonu: HAVALIMAN Parkur Süresi (dk): 72 Kaydet

Sefer Bilgileri Giriş Bölümü

Sefer Başlangıç Saati: 11:59:59 PM Sefer Bitiş Saati: 11:59:59 PM Sefer Süresi (dk): 9 Ekle

Sefer Başlangıç Saati	Sefer Bitiş Saati	Sefer Süresi	Tren Sayısı
06:00:00	07:30:00	00:09:00	8
07:30:00	10:00:00	00:05:00	14
10:00:00	16:00:00	00:09:00	8
16:00:00	20:00:00	00:05:00	14
20:00:00	23:59:59	00:09:00	8

Temizle Seçili Temizleme

M1A Hatlı Araç Sayısı : 14

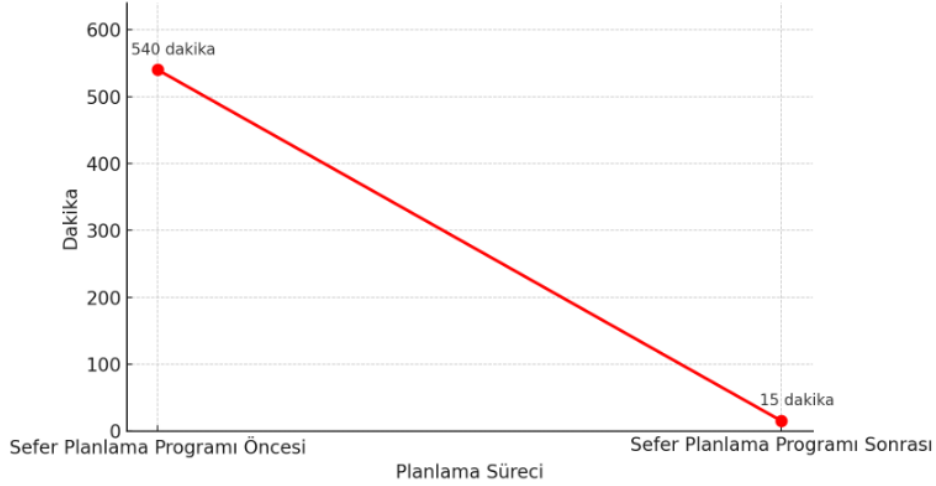
Tarife Oluştur

Şekil 7. Geliştirilen arayüz

ARAÇ	ESENLER	YÖN	ÇIKIŞ BÖLGESİ	GÖREV NO	YENİKAPI	YÖN	KRZ	HVL	GÖREV NO	YENİKAPI	YÖN	KRZ	HVL	GÖREV NO	YENİKAPI	YÖN	KRZ	HVL
1	05:25	HLİ	308 SİNYAL	1				06:00	29	08:24	HLİ		09:02	31	11:42	HLİ		12:20
2	05:27	YNK	308 SİNYAL	2					27	08:27	KRZ	08:57		30	11:45	KRZ	12:15	
3	05:30	KRZ	308 SİNYAL	3			06:00		19	08:30	HLİ		09:08	29	11:48	HLİ		12:26
4	05:32	ATA	164 SİNYAL	4			05:54 (Ataköy'den)		6	08:33	KRZ	09:03		7	11:51	KRZ	12:21	
5	05:35	YNK	308 SİNYAL	5					31	08:36	HLİ		09:14	15	11:54	HLİ		12:32
6	05:37	KRZ	308 SİNYAL	6			06:08		30	08:39	KRZ	09:09		11	11:57	KRZ	12:27	
7	05:40	HLİ	308 SİNYAL	7			06:10		7	08:42	HLİ		09:20	32	12:00	HLİ		12:38
8	05:45	YNK	308 SİNYAL	8					9	08:43	BOŞ	DEPO		14-42	12:03	KRZ	12:33	
9	05:50	HLİ	308 SİNYAL	9			06:20		11	08:45	KRZ	09:15		23	12:06	HLİ		12:44
10	05:55	YNK	308 SİNYAL	10					32	08:48	HLİ		09:26	16	12:09	KRZ	12:39	
11	05:57	KRZ	308 SN. OTOGAR	11			06:18		14-41	08:51	KRZ	09:21		21	12:12	HLİ		12:50
12	06:00	YNK	308 SİNYAL	13					23	08:54	HLİ		09:32	12	12:15	KRZ	12:45	
13	06:02	HLİ	308 SİNYAL	14-41			06:30		21	08:57	KRZ	09:27		2	12:18	HLİ		12:56
14	06:04	KRZ	308 SN. OTOGAR	15			06:28		12	09:00	HLİ		09:38	18	12:21	KRZ	12:51	
15	06:05	YNK	308 SİNYAL	17					15	09:02	BOŞ	DEPO		5	12:24	HLİ		13:02
				12	06:00	HLİ		06:38	16	09:03	KRZ	09:33		22	12:27	KRZ	12:57	
				16	06:05	KRZ	06:38		2	09:06	HLİ		09:44	25	12:30	HLİ		13:08
				2	06:10	HLİ		06:46	18	09:09	KRZ	09:39		1	12:33	KRZ	13:03	
				5	0,2604	KRZ	06:46		8	09:12	HLİ		09:50	4	12:36	HLİ		13:14
16	06:25	HVL	164 SİNYAL YNK 06:10 PEŞİNDEN	18			06:54		5	09:15	KRZ	09:45		20	12:39	KRZ	13:09	
				8	06:20	HLİ		07:00	25	09:18	HLİ		09:56	10	12:42	HLİ		13:20
17	06:30	YNK	308 SİNYAL KRZ 06:18 PEŞİNDEN	19					10	09:21	KRZ	09:51		3	12:45	KRZ	13:15	
				10	06:25	KRZ	06:54		17	09:24	HLİ		10:02	13	12:48	HLİ		13:26
				13	06:30	HLİ		07:06	22	09:27	KRZ	09:57		26	12:51	KRZ	13:21	
18	06:40	YNK	308 SİNYAL KRZ 06:28 PEŞİNDEN	21					28	09:30	HLİ		10:08	24	12:54	HLİ		13:32

Şekil 8. Hafta içi günleri için oluşturulan tarife çizelgesi

Şekil 9'de sefer planlama sürelerindeki değişim gösterilmiştir. Grafikte görüleceği üzere 9 saat süren sefer planlama süresi, yazılım sayesinde 15 dakikaya indirgenmiş, bu da toplam iş gücü zamanından %97.2 oranında bir tasarruf sağlanmıştır. Bu önemli azalma, işletmelerin operasyonel verimliliğini artırırken, aynı zamanda personelin diğer önemli görevlere odaklanabilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 9. Sefer planlama sürelerindeki değişim

3.3. Analizin geniş çaplı etkileri

Bu çalışmada elde edilen bulgular, hem global hem de Türkiye özelinde demiryolu taşımacılığı sektöründe teknolojik yeniliklerin ve otomatikleştirme çözümlerinin operasyonel etkinlik ve maliyet yönetimi üzerindeki önemli etkilerini gözler önüne sermektedir. Ayrıca personel yönetiminde sağlanan iyileştirmeler ve zaman yönetiminde elde edilen büyük tasarruflar, dünyadaki ve Türkiye'deki demiryolu işletmecilerine maliyetleri azaltma ve hizmet kalitesini artırma fırsatı sunmaktadır. Tablo 2'de Sefer Planlama Yazılımı sonrasında elde edilen bulgular sunulmuştur. Bu bulgular, demiryolu taşımacılığının geleceğini şekillendirmede kritik bir rol oynayacak ve sektörün sürdürülebilir büyümesine katkıda bulunacak stratejik kararların alınmasında önemli bir referans noktası oluşturabilecektir. İş gücü optimizasyonu ve zaman yönetimi alanlarında sağlanan ilerlemeler, demiryolu taşımacılığı sektörünün geleceğini belirlemede ve daha verimli, ekonomik ve müşteri odaklı bir yapıya ulaşmada önemli bir etkiye sahip olacağı düşünülmektedir.

Tablo 2. Sefer planlama yazılımı sonrası durum değişimi

Kriter	Sefer Planlama Yazılımı Öncesi	Sefer Planlama Yazılımı Sonrası	Yüzdesel Değişim Oranı
Yedek Personel Zorunluluğu	2 Makinist ve 1 Planlamacı	-	%3 Personel işgücü azalışı
Sefer Planlama Süresi	540 dakika	15 dakika	%97.2 İşgücü zaman azalışı

4. Sonuç

Bu çalışma, demiryolu taşımacılığı sektöründe geliştirilen bir sefer planlama yazılımının Metrop İstanbul A.Ş. bünyesindeki raylı ulaşım araçlarının sefer düzenlemesi, optimize edilmesi ve uygulanmasının etkilerini ele almaktadır. Araştırmanın ana bulguları, personel yönetimi ve zaman yönetimi üzerindeki iyileştirmeler üzerine odaklanmıştır. Yazılımın kullanımı sonucunda, demiryolu taşımacılığı operasyonlarının performansı ve verimliliği belirgin bir şekilde artmıştır. Geliştirilen sistem, eski tarifelerde sıkça karşılaşılan sorunları çözerek İstanbul Metrosu'nun ihtiyaçlarına yanıt vermektedir. İlkel sistemde otomatikleştirilmesi mümkün olmayan işlemler, yeni yazılım kullanılmasıyla otomatikleştirilmiş ve bu sayede büyük tasarruflar sağlanmıştır.

Yazılımın uygulanmasıyla elde edilen personel iş gücü optimizasyonu, işletmeler için maliyet tasarrufu ve iş gücü yönetiminde verimlilik sağlamıştır. Özellikle, M1 hattında yapılan uygulama sonucunda, gereksiz yere bulundurulmuş fazladan personelin azaltılmasıyla %3'lük bir iş gücü kazanımı elde edilmiştir. Bu, demiryolu işletmelerinin maliyet yönetimini optimize etme ve kaynakları daha etkin kullanma yönünde önemli bir adımdır.

Yazılımın sunduğu etkili zaman yönetimi ve iş gücü verimliliği, operasyonel süreçleri hızlandırmış ve hata oranlarını azaltmıştır. Geleneksel yöntemlere kıyasla, bu teknolojik çözüm sefer planlama sürecinde büyük bir iyileşme sağlayarak, süreci önemli derecede kısaltmış ve %97.2'lik bir iş gücü zamanı tasarrufu elde edilmesine olanak tanımıştır.

Böylece hem dünya çapında hem de Türkiye özelinde demiryolu taşımacılığı sektöründe teknolojik yeniliklerin ve otomatikleştirme çözümlerinin operasyonel etkinlik ve maliyet yönetimi üzerindeki önemli etkilerini gözler önüne sermektedir. Yapılan bu çalışma, demiryolu taşımacılığının geleceği açısından stratejik kararlar alınmasında ve sektörün sürdürülebilir büyümesini destekleyecek politikalar geliştirmede önemli bir referans noktası oluşturmaktadır. Son olarak, bu çalışma, Personel yönetiminde sağlanan iyileştirmeler ve zaman yönetiminde elde edilen büyük tasarruflar, demiryolu işletmecilerine maliyetleri azaltma ve hizmet kalitesini artırma fırsatı sunmaktadır. Gelecekteki araştırmalar, yolcu sayısı, ağırlık, sinyalizasyon, eğitim, hız limitleri gibi parametreleri dikkate alarak yapay zekâ ve makine öğrenimi algoritmalarının entegrasyonu ile daha hassas sonuçların elde edilmesini sağlayabilir. Ayrıca, gerçek zamanlı yolcu ve trafik verilerinin kullanılması, sefer planlama yazılımının ve planlama süreçlerinin dinamik olarak güncellenerek tahmin doğruluğunun artırılmasına olanak tanıyabilir.

Teşekkür

Çalışma için gerekli veriler Metro İstanbul A.Ş. tarafından sağlanmıştır. Tüm destekleri için Metro İstanbul A.Ş.'ye teşekkür ederiz.

Kaynakça

- [1] K. Cingöz and T. Aytemiz, "Toplu taşıma araçları sefer sıklığı belirleme ve çizelgeleme problemi," *Kent Akademisi*, vol. 16(2), pp. 1310-1333, 2023, doi: <https://doi.org/10.35674/kent.1134312>
- [2] L. Gao, G. Bai, L. Li and W. Chen, "Timetable optimization based on actual timetable for urban rail transit system," in *12th International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA)*, Xiangtan, China, 2019, pp. 446-451
- [3] Y. Cai, Q. Luo, W. Li and L. Gong, "Optimize train operation plan of urban rail transit including temporal variation of passenger ridership during the day," in *IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, Beijing, China, 2020, pp. 508-512
- [4] K. Sagawa, N. Yoshimura, Y. Shimakawa and H. Goto, "A railway timetable scheduling model based on a max-plus-linear system," in *59th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Chiang, Thailand, 2020, pp. 23-26
- [5] S. Pang and M. Chen, "Optimize railway crew scheduling by using modified bacterial foraging algorithm," *Computers & Industrial Engineering*, vol. 180, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109218>
- [6] G. Caimi, L. Kroon and C. Liebchen, "Models for railway timetable optimization: Applicability and applications in practice," *Journal of Rail Transport Planning & Management*, vol. 6(4), pp. 285-312, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jrtpm.2016.11.002>
- [7] T. Kokubo and T. Fukuyama, "Train crew scheduling using tabu search," in *56th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Kanazawa, Japan, 2017, pp. 63-66
- [8] S. Li, H. Lv, C. Xu, T. Chen and C. Zou, "Optimized train path selection method for daily freight train scheduling," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 40777-40790, 2020, doi: [10.1109/ACCESS.2020.2976904](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2976904)

- [9] B. Zhang and Y. Yue, "Optimal design of train schedule of urban rail transit based on time-varying demand," in *IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Engineering (ICITE)*, Beijing, China, 2020, pp. 518-524
- [10] J. Yu, Z. He, Z. Yao, G. Wang and J. Zhou, "Optimization of high-speed railway train timetable considering origin-destination service quality," in *2nd International Conference on Algorithms, High Performance Computing and Artificial Intelligence (AHPICAI)*, Guangzhou, China, 2022, pp. 380-385
- [11] Z. Ceylan, M. Arslan and T. Arslan, "Bir hafif raylı ulaşım sisteminde makinist çizelgeleme problemi," *İğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, vol. 11, no. 2, pp. 1027-1039, 2021, doi: 10.21597/jist.741162
- [12] A. Nagy and J. Tick, "Modeling of bus transport operative planning tasks," in *IEEE 18th World Symposium on Applied Machine Intelligence and Informatics (SAMII)*, Herlany, Slovakia, 2020, pp. 89-94
- [13] E. Yazıcı, K. Akkaş, S. Mergen, A. Koç, vd., "Toplu ulaşım sistemlerinde çok amaçlı şoför çizelgeleme problemi: Kırşehir ili örneği," *Journal of Turkish Operations Management*, 6(1), 997-1009, 2022
- [14] Y. Wang and Q. Guo, "Optimization method of railway crew planning based on column generation and tabu search," in *IEEE 3rd International Conference on Electronic Technology, Communication and Information (ICETCI)*, Changchun, China, 2023, pp. 338-342
- [15] T. Kokubo, S. Kawaguchi and Y. Fukuyama, "Practical train crew scheduling using improved tabu search," in *IEEE Symposium Series on Computational Intelligence (SSCI)*, Honolulu, HI, USA, 2017, pp. 1-7
- [16] T. Kokubo and Y. Fukuyama, "Practical train crew scheduling problems using parallel tabu search," in *57th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE)*, Nara, Japan, 2018, pp. 1673-1678

Özgeçmiş



Hülya AKCA

1989 yılında İstanbul'da doğdu. Lisans derecesini Beykent Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünden 2013 yılında aldı. Metro İstanbul şirketinde Uzman Ar-Ge Mühendisi olarak Yerli ve Milli Sinyalizasyon projesinde görev almaktadır. İlgi alanları arasında optimizasyon, yapay zeka bulunmaktadır.

E-Posta: hulya.kantar@metro.istanbul



Kübra SİNAN

1994 yılında İstanbul'da doğmuştur. Lisans ve Yüksek Lisans eğitimini Düzce Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliğinde tamamlamıştır. Metro İstanbul Arge Merkezi Müdürlüğünde Uzman Arge Mühendisi olarak çalışmaktadır. İlgi alanına giren çalışma konuları arasında derin öğrenme, ses sinyal işleme, duygu analizi ve optimizasyon bulunmaktadır.

E-Posta: kubra.sinan@metro.istanbul



Aleyna KARSLI

1998 yılında Giresun'da doğdu. Lisans derecesini İstanbul Aydın Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliğinde 2022 yılında aldı. Yüksek Lisans eğitimine Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Tesisleri alanında devam etmektedir. İş hayatına Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş. de Ar-Ge Mühendisi görevinde başlamıştır. Şu an Metro İstanbul A.Ş. de Ar-Ge Mühendisi olarak görevini sürdürmektedir. Araştırma alanları arasında optimizasyon, enerji depolama sistemleri, yenilenebilir enerji teknolojileri, kalibrasyon teknikleri, stokastik modeller ve veri analizi bulunmaktadır.

E-Posta: aleyna.karsli@metro.istanbul



Hüsnâ YILDIZ

2021 yılında Lisans ve 2023 yılında Yüksek lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliğinde tamamladı. Metro İstanbul Arge Merkezi Müdürlüğünde Arge Mühendisi olarak çalışmaktadır. Uzmanlık Alanları; Optimizasyon, Enerji Depolama Sistemleri, Dağıtık Üretim Sistemleri, Elektrikli Araçlar, Enerji Yönetim Sistemleri, Akıllı Şebekeler olarak sıralanabilir.

E-Posta: husna.yildiz@metro.istanbul



Hikmet YİĞİT

1999 tarihinde doğmuştur. Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Metro İstanbul Genel Müdürlüğü AR-GE Biriminde çalışmaktadır. İlgili alanına giren araştırma konuları: görüntü işleme, optimizasyon, veri bilimi, elektrik dağıtım sistemleri, fonksiyonel ve obje yönelimli programlamadır.

E-Posta: hikmet.yigit@metro.istanbul



Furkan KARAKUŞ

2012 yılında Lisans eğitimini Yıldız Teknik Üniversitesi elektrik mühendisliğinde tamamladı. 2018 yılında Yüksek lisans ve 2022 yılında doktora derecelerini Yıldız teknik üniversitesi elektrik mühendisliğinde aldı. Akademik kariyerine paralel olarak, Metro İstanbul A.Ş. de çeşitli pozisyonlarda görev yapmış, 2012'den itibaren Elektrik Sistem Mühendisi olarak başladığı kariyerine, Arge Merkezi Elektrik Sistemler Koordinatörü olarak devam etmektedir. Uzmanlık Alanları: Raylı Sistemler, Enerji Yönetim Sistemleri, Optimizasyon, Enerji Verimliliği olarak sıralanabilir.

E-posta: furkan.karakus@metro.istanbul



Hüseyin DOĞAN

1985 yılında Sandıklı'da doğdu. Lisans derecesini Kocaeli Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliğinde 2008 yılında tamamladı. Yüksek Lisans derecesini Yıldız Teknik Üniversitesi Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği bölümünde 2016 yılında tamamladı. Yıldız Teknik Üniversitesinde doktora öğrenimine devam etmektedir. Metro İstanbul şirketinde Arge Merkezi Müdürlüğünde Elektronik Sistemlerden sorumlu yönetici olarak görev yapmaktadır. Raylı sistem alanında sinyalizasyon sistemleri, haberleşme sistemleri, yolcu bilgilendirme sistemleri ve yapay zeka tabanlı yazılımlar üzerine araştırma ve geliştirme faaliyetlerinde bulunmaktadır.

E-posta: huseyin.dogan@metro.istanbul

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayım etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Hülya AKCA: Kaynaklar, Doğrulama. Kübra SİNAN: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazılım. Aleyna KARSLI: Yazma-orijinal taslak hazırlama. Hüsnâ YILDIZ: Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Hikmet YİĞİT: İnceleme, Kontrol. Furkan KARAKUŞ: İnceleme, Kontrol. Hüseyin DOĞAN: İnceleme, Kontrol.



Paris İklim Anlaşması ve Sürdürülebilir Lojistik Kapsamında Lojistik Köy Yeri Seçimi: Türkiye Örneği

Mustafa Sait KAPLAN¹, Mehmet GÜMÜŞ¹, Emir Hüseyin ÖZDER^{*2}

¹ Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Antalya/Alanya, Türkiye

² Ankara Bilim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

*emir.ozder@ankarabilim.edu.tr

(Alınış/Received: 11.03.2024, Kabul/Accepted: 25.06.2024, Yayımlama/Published: 31.07.2024)

Öz: Ülkemizin de taraf olduğu Paris İklim Anlaşması, küresel ısınma artışının azaltılması amacıyla 2050 yılına kadar sıfır emisyon hedefini taşımaktadır. Bu hedefe doğrultusunda taraf ülkelerden sera gazı emisyonunun azaltılmasına yönelik planlama yapılması beklenmektedir. Sera gazı salınımının önemli bir bölümü lojistik faaliyetlerden kaynaklanmaktadır. Ulusal ve uluslararası geçişlerin yapıldığı kapsamlı merkezler olan lojistik köyler, ülkemizde gerçekleştirilen lojistik faaliyetlerin de ana merkezleri arasında yer almaktadır. Lojistik köy yeri seçimi, trafik yoğunluğunun azaltılması ve çok modlu taşımanın geliştirilmesiyle beraber sera gazı emisyonunun azaltılması açısından önem arz etmektedir. Kamu kaynakları kullanılarak kurulacak lojistik köy yerinin seçimi, Paris İklim Anlaşması'nın gerekliliği olan emisyon azalımı ve sürdürülebilir kalkınma hedeflerine katkı sunacak potansiyele sahiptir. Bu çalışmanın amacı, TCDD'nin Türkiye'de kurmayı planladığı lojistik köy yeri alternatiflerinin sürdürülebilir lojistik kapsamında değerlendirilerek sıralanması ve öncelikli lojistik köy yerlerinin belirlenmesidir. Çalışmada detaylı literatür taraması yapılmış ve sürdürülebilir lojistiğin başta çevresel olmak üzere ekonomik ve sosyal boyutları dikkate alınarak kullanılacak kriterler seçilmiştir. Dört ana ve on beş alt kriter, lojistik alanında çalışan uzmanların görüşüne başvurularak AHP yöntemiyle değerlendirilmiştir. Alternatiflerin sıralanmasında TOPSIS ve Fuzzy TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. TOPSIS yöntemi sonucu Yeşilbayır/İstanbul öncelikli alternatif olurken Fuzzy TOPSIS yöntemiyle Çandarlı/İzmir lojistik köyü en iyi alternatif olarak bulunmuştur. Diğer alternatiflerin her iki yöntemde de sıralaması değişmemiştir.

Anahtar kelimeler: Sürdürülebilir lojistik, Paris İklim Anlaşması, Yeşil lojistik, Lojistik köy yeri seçim

Selection of Logistics-Center Location Within the Scope of Paris Climate Agreement and Sustainable Logistics: The Case of Türkiye

Abstract: Paris Climate Agreement, to which Türkiye is a party, sets the goal of zero emissions by 2050 to mitigate global warming. Accordingly, planning to reduce greenhouse gas emissions is expected from participating countries. A significant portion of greenhouse gas emissions stems from logistics activities. Logistics villages, serving as comprehensive centers for national and international transitions, are key hubs for logistics activities in Türkiye. Selecting the location of a logistics village is crucial for reducing greenhouse gas emissions, alongside decreasing traffic congestion and enhancing multimodal transportation. The selection of a logistics village site using public funds has the potential to contribute to the emission reduction and sustainable development targets mandated by the Paris Climate Agreement. The aim of this study is to evaluate and rank alternative locations for logistics villages planned by TCDD in Türkiye within the scope of sustainable logistics. Through a comprehensive literature review, criteria considering environmental, economic, and social aspects of sustainable logistics were chosen. Four main and fifteen sub-criteria were assessed using the Analytic Hierarchy Process (AHP) method, consulting logistics experts. TOPSIS and Fuzzy TOPSIS methods were employed for ranking alternatives. Yeşilbayır/İstanbul emerged as the priority alternative via the TOPSIS method, while Çandarlı/Izmir logistics village was identified as the best alternative through the Fuzzy TOPSIS method. The rankings of other alternatives have not changed in either method.

Atıf için/Cite as: M.S. Kaplan, M. Gümüş, E.H. Özder, "Paris iklim anlaşması ve sürdürülebilir lojistik kapsamında lojistik köy yeri seçimi: Türkiye örneği," *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 20, ss. 202-229, Temmuz 2024. doi: 10.47072/demiryolu.1451230

Keywords: Sustainable logistics, Paris Climate Agreement, Green logistics, Logistics village site selection

1. Giriş

Dünya genelinde nüfusun hızlı artışı ve motorlu taşıtlara olan bağımlılığın yüksek düzeyde olması nedeniyle yeryüzünde birçok kent trafik sıkışıklığı ve ulaşım sorunlarıyla karşı karşıyadır. Ulaşım için kullanılan taşıt yoğunluğunun artması sonucunda fosil yakıtlarından kaynaklanan zararlı gazların atmosfere bırakılmasının etkisi, küresel ısınma açısından diğer etkenlere kıyasla daha fazladır [1].

1970'li yıllardan bu tarafa, enerji kullanımının artmasıyla beraber küresel ısınma, ülkelerin birçoğu için ortak bir sorun haline gelmiştir [2]. Yerküre atmosferinde sera etkisi yapan sera gazları metan, karbondioksit, diazot monoksit, florlu gazlar ve klorofloro karbonlar olup bu gazların arasında %76'lık oranla en fazla bulunan gazın karbondioksit olduğu bilinmektedir. Enerji sektörü %41 oranla karbondioksit gazını oluşturan sebepler arasında ilk sırayı alırken, %24 oranla taşımacılık sektörü ikinci sırayı almaktadır. Taşımacılık sektöründe de karayolu yük taşımacılığı diğer taşımalara göre çok daha fazla karbondioksite neden olmaktadır [3].

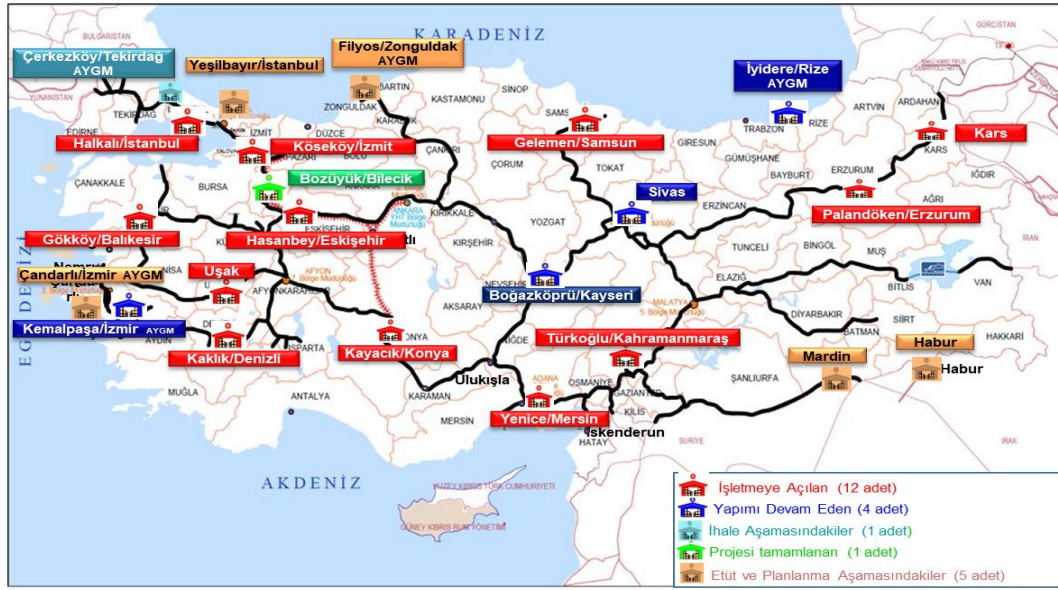
Fosil yakıt kullanımı ve dolayısıyla hava kirliliğinin azaltılması, birçok ülkenin ortak hedefi haline gelmiştir. Bu doğrultuda yapılan ve Türkiye'nin de taraf olduğu Paris İklim Anlaşması, küresel sıcaklık artışının 1.5°C-2°C ile sınırlanmasını hedefler [4]. Bu hedefe ulaşmanın etkenlerinden birisi de taşımacılık sektörü faaliyetlerinin daha az karbon salınımıyla gerçekleştirilmesidir. Karbon salınımına bağlı küresel ısınmanın Paris İklim Anlaşmasında istenen seviyelerde tutulmasına yönelik çalışmalar arasında mevcut ulaştırma altyapısının iyileştirilmesi, trafik sıkışıklığının azaltılması ve kullanılan taşıma modunun çeşitlendirilmesi yer almaktadır [5]. Bu doğrultuda lojistik köylerin konumlandırılması ve tasarımı da önem arz etmektedir.

Lojistik köyler, tüm lojistik faaliyetlerin ticari temele dayandırılarak gerçekleştirildiği ve bu faaliyetlere ilişkin teknik ve sosyal imkânlar sağlayan özel yerlerdir. Bu lojistik merkezler ulusal ve uluslararası taşıma geçişlerinin yapıldığı, otel, depolama, taşıma, elleçleme, ayrıştırma, gümrükleme, alt yapı hizmetleri, konsolidasyon, transit işlemler, ihracat, ithalat, danışmanlık ve üretim, sigorta ve bankacılık gibi işlemlerin birleştirildiği yerlerdir. Lojistik köylerin değişik taşıma türlerinin (liman, karayolu, havaalanları, demiryolu) aynı yerde bulunduğu alanlara kurulması tercih edilebilir. Bunun sebebi taşıma bağlantılarının akışının ve tüm taşıma türleri arasında koordinasyonun sağlanmasıdır. Böylelikle lojistik köyler vasıtasıyla bölgesel ve küresel pazarlara daha etkin olarak erişilebilecektir [6]. Aynı zamanda lojistik faaliyetlerde bekleme süreleri azaltılıp yakıt tasarrufu ve daha düşük emisyon sağlanabilir [7].

Lojistik köy yeri seçimi, sürdürülebilirlik açısından önem arz etmektedir. Paris İklim Anlaşması ile birlikte çevresel boyutun ön plana çıkmasına rağmen sürdürülebilirlik kavramının esasen çevresel, sosyal ve ekonomik olmak üzere üç alt başlığı vardır [8]. Sürdürülebilirliğin ekonomik boyutu, sistemin iç ve dış borçlarının yönetilebilirliğini; çevresel boyutu, sistemin yenilenemeyen kaynaklarının kullanılmasının en aza indirilmesini; sosyal boyutu da sistemin hizmet üretim ve dağıtımında yeterlilik ve eşitlik ilkesiyle hareket etmesini kapsar [9].

Lojistik köyler, trafik ve çevre kirliliği sorunlarını azaltarak sürdürülebilirliğin çevresel boyutuna katkı sağlar. Taşıma modlarının bir araya getirilmesiyle oluşan yüksek verimliliğe, istihdama, bölgesel gelişmeye ve taşımacılık alanında rekabet üstünlüğüne sağladığı katkılarla sürdürülebilirliğin ekonomik boyutuna etki eder. Toplum refahına, ülkenin gelişmesine ve insanların yaşam standartlarının yükselmesine olan katkılarıyla da sürdürülebilirliğin sosyal boyutu üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır [10].

Türkiye’de yük taşımacılığı yüksek oranda karayolu ile yapılmaktadır. Lojistik alanında rekabet gücünü artırmak için karayolunun yanı sıra demiryolu, denizyolu ve havayolunun da olduğu ikili ve daha fazla modlu taşıma kombinasyonların kullanılması önemlidir [11]. Ülkemizde Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD), demiryolu taşımacılığıyla beraber çok modlu taşımacılığın kullanılması için önemli girişimlerde bulunmaktadır. Bunların en önemlileri arasında yeni lojistik köylerin konumlandırılması, açılması ve işletilmesi yer almaktadır. Türkiye’de işletmeye açık halde bulunan 14 lojistik köy bulunmaktadır. Bunlardan Ankara Lojistik Üssü ve Manisa Organize Sanayi Bölgesi lojistik köyü özel sektör tarafından işletilirken kalan 12 tanesi TCDD tarafından işletilmektedir [12]. TCDD’nin işletmeye açtığı 12 lojistik köyle beraber açmayı planladığı lojistik köy yerleri Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil Hata! Belgede belirtilen stilde metne rastlanmadı.. Türkiye'deki TCDD'ye ait lojistik merkezler

[13]

Ülkemizde 7 Ekim 2021 tarihinde Cumhurbaşkanı Kararı ile Paris İklim Anlaşması onaylanmış ve 2053 yılı için sıfır net emisyon hedefi belirlenmiştir. Taraf ülkelerce Paris İklim Anlaşması'nın en bilinen hedefi, sıcaklık artışı 1.5°C-2°C ile sınırlandırmaktır. Ayrıca, taraf ülkelerden düşük emisyonlu sürdürülebilir kalkınmayı teşvik etmeleri ve finans akışlarını buna göre belirlemeleri beklenmektedir. [14]

Sürdürülebilir kalkınmaya önemli katkı sunan lojistik köylerin, sadece ekonomik açıdan değerlendirildiğinde ülkemizde birçok farklı illerinde konumlandırılmaları faydalı olabilir [15]. Ancak, kamu kaynakları kullanılarak kurulacak lojistik köy alternatiflerinin değerlendirilmesinde, ülkemizin taraf olduğu Paris Anlaşmasında belirtilen hedeflerin dikkate alınması önemlidir. Özellikle emisyonla etki eden kriterlerle beraber sürdürülebilir lojistik kriterleri kullanılarak yapılan değerlendirmelerle varılacak sonuçlar, anlaşmada yer alan hedeflere ulaşmada fayda sağlayacaktır.

Bu çalışmanın amacı, TCDD'nin gelecekte işletmeye açmayı planladığı, etüt ve planlama aşamasındaki aday lojistik köy yerlerinin sürdürülebilir lojistik kapsamında belirlenen kriterlerle incelenmesi ve en uygun yerin seçilmesidir. Bu amaca yönelik olarak çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemlerinden Analytic Hierarchy Process (AHP), Technique for Order Preference by

Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) ve Fuzzy TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Paris İklim Anlaşması'nda yer alan düşük emisyon ve sürdürülebilir kalkınma hedefleri ile uyumlu olacak seçme kriterleri, detaylı literatür taraması sonrasında uzman görüşleri ile belirlenmiştir. Çalışmada lojistik köy yeri alternatifleri, etüt ve planlama aşamasında olan Yeşilbayır/İstanbul, Filyos/Zonguldak, Çandarlı/İzmir, Mardin ve Habur olarak belirlenmiştir.

Çalışmada, karar verme süreçlerinin etkinliğini artırmak amacıyla Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP), TOPSIS ve Bulanık TOPSIS yöntemleri tercih edilmiştir. AHP, karmaşık karar problemlerini yapılandırılmış bir şekilde çözme imkânı sunarken, kriterler arasındaki hiyerarşik ilişkileri belirlemede büyük avantaj sağlar. TOPSIS yöntemi, alternatiflerin en iyi ve en kötü ideal çözümlerle olan uzaklıklarını değerlendirerek karar verme sürecini basitleştirir. Bulanık TOPSIS ise, belirsizlik ve bulanıklığın yüksek olduğu durumlarda daha esnek ve güvenilir sonuçlar sunarak karar vericilere yardımcı olur. Diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla, AHP'nin hiyerarşik yapısı ve TOPSIS'in ideal çözüme yakınlık prensibi, belirsizliklerin yoğun olduğu durumlarda Bulanık TOPSIS'in esnekliği ile birleşerek daha kapsamlı ve hassas bir karar verme süreci sağlar. Bu yöntemlerin birlikte kullanılması, karar verme sürecinin daha kapsamlı ve hassas bir şekilde yönetilmesini sağlar. AHP, TOPSIS ve Bulanık TOPSIS yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları detaylı bir şekilde yöntem kısmında ele alınacaktır.

2. Literatür Taraması

Lojistik merkezi yeri seçimi çalışmaları ve yer seçim kriterlerine ilişkin araştırmalar değişik birçok ülkede yapılmıştır. Örneğin Vietnam'da lojistik merkez kurulması düşünülen üç lokasyon için bulanık DELPHİ yöntemiyle seçme kriterlerinin değerlerini belirlemiştir ve bulanık TOPSIS yöntemiyle de lokasyonların sıralaması yapılmıştır [14]. Vietnam'ın Dong Nai eyaletinde dağıtım merkezi yer seçimi için yapılan başka bir çalışmada ANP yöntemiyle kriter ağırlıklarını belirlemiş, TOPSIS yöntemiyle de alternatiflerin sıralanmıştır [22]. Yine Vietnam'da yapılan bir çalışmada çabuk bozulan tarım ürünlerinin dağıtım yeri seçimi için kriter ağırlıklarını küresel bulanık analitik hiyerarşi prosesi (SF-AHP) ile bulmuş, sıralamayı da kombine uzlaşma çözümü (CoCoSo) yöntemiyle yapmışlardır [23].

Çin'in Shangay kenti için yapılan bir çalışmada ortak bir dağıtım merkezi yer seçimi için entegre Fuzzy-EW ve AHP yöntemiyle kriter ağırlıkları belirlemiş, sıralama için de geleneksel ağırlıklandırılmış ölçüt mesafesi kullanılan bir TOPSIS yöntemi önermişlerdir [15]. Çin'de şehir içi lojistiği tasarımı için yapılan başka bir çalışmada AHP yöntemiyle kriterlerin ağırlıkları belirlenmiş ve şirketlerin yeşil yönetimleri gri ilişki analiziyle incelemiştir [21].

İran'da yapılan bir çalışmada bulanık AHP yöntemiyle uluslararası bir firma için depo yeri seçimi yapılmıştır [16]. Doğu Hindistan da yük koridoru üzerinde çok modlu yük terminal yeri seçimi çalışmıştır. O çalışmada kriterlerin önemini belirlemek için sezgisel bulanık Intuitionistic Fuzzy (IF) tabanlı IF-AHP yöntemi kullanılmış, IF-TOPSIS ile de alternatiflerin değerlendirilmesi yapılmıştır [18]. Avustralya için yapılan bir çalışmada aday alanlar arasında en uygun yük konsolidasyon yeri belirlemek için GIS-TOPSIS yöntemi kullanılmıştır [19]. Batı Balkanlar bölgesinde kuru liman terminal yeri seçimi konulu bir çalışmada da Gri Delphi tabanlı Gri AHP yöntemi kullanılmıştır. sıralama ve seçim için birleşik mesafeye dayalı GCODAS yöntemi uygulanmıştır [20].

Lojistikle ilgili literatürde, kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesinde AHP yöntemi kullanılan örnekler vardır. Kayseri ilinde lojistik merkez seçimi için yapılan bir çalışmada kriterlerin önem ağırlıkları AHP yöntemiyle bulunmuştur [24]. Polonya Szczecin şehrinde büyük

boyutlu kargo taşımacılığı için alternatif güzergâhlar arasından seçim yapılan bir çalışmada da kriter ağırlıklarını AHP yöntemiyle belirlemişlerdir [25].

Alternatiflerin kriterlere göre sıralanmasında TOPSIS yöntemi kullanılan çalışmalara ilişkin literatür örnekleri de mevcuttur. Deniz taşımacılığı verimliliğini etkileyen faktörlere göre Çin’de bulunan 5 adet limanın verimliliğini inceleyen bir çalışmada alternatiflerin sıralaması TOPSIS ile yapılmıştır [26]. Yine Çin’de kömür kaynağına dayalı madencilik şehirlerinin yeşil kalkınma seviyelerinin inceleyen çalışmada sıralama TOPSIS yöntemiyle yapılmıştır [27]. TOPSIS yöntemi, Hindistan’ın Ulhas havzasında alternatif baraj yerlerinin sıralanmasında da kullanılmıştır [28].

Alternatiflerin sıralanmasının Fuzzy TOPSIS yöntemiyle yapıldığı çalışmalar da vardır. Örneğin Hindistan’ın Delhi şehrinde bulunan bir cep telefonu üreticisinin tersine lojistik sürecinde, toplanan ürünler için alternatif değerlendirme seçenekleri Bulanık TOPSIS yöntemiyle sıralanmıştır [29]. Aynı yöntem yine Delhi şehrinde, süt tedarikinde üçüncü parti soğuk zincir hizmet sağlayıcılarının sıralanmasında kullanılmıştır [30]. Uşak ilinde alışveriş merkezi seçimi için alternatiflerin sıralanmasında da Bulanık TOPSIS yöntemi kullanılmıştır [31].

Bu çalışmada lojistik köy yer seçimi için kullanılabilir kriterler detaylı bir literatür çalışması ile belirlenmiştir. Literatürde en çok rastlanan kriterlerin bir özeti Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Literatürde lojistik köy yeri seçim kriterleri

Sıra No	Kriterler	Yazarlar (Çalışma)											
		Awasthi ve diğerleri 2011	Awasthi ve Chauhan 2012	Tadić ve diğerleri 2014	Rao ve diğerleri 2015	Pham ve diğerleri 2017	Singh ve diğerleri 2018	Kazançoğlu ve diğerleri 2019	Kumar ve Anbanandam 2019	Aljohani ve Thompson 2020	Tadić ve diğerleri 2020	Nong 2022	Zhao ve diğerleri 2022
1	Yatırım Maliyeti (Kurulum ve arazi dahil)	X	X								X		
2	Yatırım geri ödeme süresi							X					
3	Taşıma maliyeti /Lojistik maliyeti			X		X		X		X	X		
4	Kentsel altyapı												X
5	Müşterilere Yakınlık	X											
6	Tedarikçilere yakınlık	X									X		
7	Çok modlu taşımaya bağlanabilirlik	X						X					
8	Trafik yoğunluğu		X						X	X			
9	İş imkanlarının sağlanması							X	X				
10	Güvenlik /Cevre ve terminal güvenliği	X		X	X			X					
11	Teşvikler/ Bölgesel teşvik						X						
12	Kentin çekiciliği ve gelişimine etkisi			X									
13	Servis kalitesi		X										
14	Bilgi altyapısı									X			
15	İletişim /Akıllı ve engelsiz iletişim												X
16	Genişleme İmkânı /Olası alan genişleme imkanlar	X				X		X	X				
17	Yakınlardaki sakinler üzerine etkisi				X					X			
18	Ekolojik peyzaj üzerindeki etkisi / Peyzaj üzerine etki				X			X	X				
19	Ekonomik gelişme potansiyeli/ Ekonomik gelişme								X	X			
20	Ana pazara yakınlık /Talep piyasasına yakınlık						X				X		
21	Vergi politikası/ Vergi politikaları / Devlet vergileri							X	X				

Tablo 1’de yer alan kriterler daha sonra uzman görüşüne sunulmuştur. Paris İklim Anlaşmasında yer alan hedefler göz önüne alınarak uzmanlar tarafından yapılan değerlendirme sonucu nihai kriter listesi oluşturulmuştur. Sürdürülebilirlik kapsamında yer alan ekonomik, sosyal ve çevresel ana kriterlerine ek olarak Teknolojik ana kriteri uzmanlar tarafından önerilmiştir. Bu 4 ana kriteri detaylandıran toplam 15 alt kriter de uzman görüşleri doğrultusunda belirlenmiştir. Çalışmada kullanılan kriterler ve hiyerarşik yapı Uygulama bölümünde Şekil 3’de gösterilmiştir.

Ülkemizde lojistik köy yeri seçimi üzerine yapılan belli başlı çalışmaların bir özeti Tablo 2’de sunulmuştur. Bu tabloda kullanılan yöntem, seçimi yapılacak lojistik köy yeri alternatifleri ve seçim için kullanılan kriterler listelenmiştir. Bu kriterlerden parantez içerisinde belirtilenler alt kriter, diğerleri çalışmada kullanılan ana kriterlerdir.

Tablo 2. Literatürde Türkiye’de lojistik köy yeri seçimi çalışmaları

Yazar	Kullanılan Yöntem	Alternatifler	Kriterler
Bayraktutan ve Özbilgin (2014)	Bulanık mantık	İstanbul, Kocaeli, Bursa, İzmir, Ankara, Gaziantep, Manisa, Hatay, Adana, Denizli, Kayseri, Sakarya, Mersin, Konya, K.Maraş, Antalya, Zonguldak, Eskişehir, Samsun, Trabzon, Tekirdağ	İllerin dış ticaret hacimleri; İllerdeki ulaştırma türleri
Sürmeli vd. (2015)	Bulanık Mantık	Malatya, Erzurum, Van	Maliyet (yatırım, işletme, ulaşım); Çevresel Faktörler; Bölgedeki Diğer Şehirlere Mesafe; Erişilebilirlik (havaalanı, karayolu)
Uysal ve Gülmez (2015)	Bulanık Serim-Matris Teorisi	Akdeniz Bölgesi İlleri	Teknik; Çevre; Sosyal; Ekonomik; Lojistik Potansiyeli
Hamzaçebi vd. (2016)	MOORA	Karadeniz Bölgesi İlleri	Nüfus; İthalat; İhracat; Endüstri ve Elektrik gücü; Havayolu; Demiryolu; Elleçleme Araç/km; Ton/km; Toplam mesafe
Zaralı vd. (2018)	AHP ve VİKOR	Kayseri ilinde yer alan İncesu, Ambar, Boğazköprü ve Mimarsinan mevkileri	Alan; Genişleme Alanı; Alt yapı olanakları; Kente yakınlık; Endüstri ve ticaret merkezlerine yakınlık; Limana ve Demiryoluna yakınlık; Arazi maliyetleri
Kazançoğlu vd. (2019)	AHP ve PROMETHEE	İzmir ilinde yer alan Torbalı, Aliağa, Torbalı, Çiğli mevkileri	Ekonomik (ulaşım erişimi, arazi maliyeti, genişleme potansiyeli); Çevresel (peyzaj, trafik tıkanıklığı); Sosyal (endüstriye destek, iş olanakları)
Tümenbatur (2021)	AHP ve Ağırlık Merkezi Yöntemi	Kars-Edirne, Kars-İzmir, Kars-Mersin güzergahları	Maliyet; Süre; Çevre; Yük Potansiyeli; Risk
Paçacı vd. (2022)	CBS-AHP	Türkiye’de 51 demiryolu yük istasyonu olan ve 71 Liman başkanlığı olan iller	Çevreye duyarlılık; Güvenilirlik; Riskler

Paçacı vd. (2023)	AHP-CBS	Demiryolu yük istasyonları ve liman başkanlıkları bulunan iller; Liman başkanlıkları ve havaalanı bulunan iller; Demiryolu yük istasyonları, liman başkanlıkları ve havaalanı bulunan iller	Dış Ticaret; Organize Sanayi Bölgeleri; Tarımsal Organize Sanayi Bölgeleri; Sınır Kapıları
Özekenci (2023)	AHP-TOPSIS	Adana, Hatay, Mersin	Yatırım maliyeti; İşgücüne erişim; Güvenlik; Çevreye etki; Doğal kaynaklar; Denizyolu; Demiryolu; Havayolu; Karayolu yakınlık

Türkiye’de lojistik merkezi seçme çalışmaları ya belirli bir şehir özelinde ya da belirli bir bölgede varsayım üzerine yapılan çalışmalardır. Kullanılan alt kriter sayısı kısıtlı olup genelde az sayıda olan ana kriterler üzerinden değerlendirme yapılmıştır. Bu kriterler Paris İklim Sözleşmesi hedeflerine paralel bir şekilde detaylandırılmamıştır. Kriter ağırlıklarını belirlemede AHP kullanılmış, ama yer seçiminde farklı çok kriterli karar verme yöntemleriyle alternatif sonuçların karşılaştırılması kısıtlı olmuştur. Ayrıca mevcut lojistik köylerin verimlilik karşılaştırılması dışında TCDD’nin açmayı planladığı aday lojistik köylerin değerlendirilmesi yapılmamıştır.

Bu çalışmada ise kullanılan alternatifler varsayım olmayıp TCDD’nin etüt ve planlama programında yer alan ve kamu kaynakları kullanılarak gerçekleşmesi olası aday lojistik köy yerleridir. Kullanılan seçme kriterleri, Paris İklim Sözleşmesi hedefleri ile paralel olarak düşük emisyon ve sürdürülebilir lojistik alanlarını kapsayacak detayda belirlenmiştir. Kullanılan yöntemler açısından da alternatiflerin sıralaması için farklı yöntemler kullanılarak sonuçları karşılaştırma imkânı sunulmuştur. Paris İklim Anlaşması’na taraf olan ülkemiz, emisyon azaltımı yükümlülüğünü de üstlenmiştir. Bu bağlamda çalışma, karar vericiler için lojistik köy yeri seçimine yeni bakış açısı geliştirebilme ve farkındalığı artırma açısından katkı sunabilir.

3. Yöntem

Çalışmada AHP yöntemi kullanılarak kriter ağırlıkları belirlenmiştir. TOPSIS ve FUZZY TOPSIS yöntemiyle de alternatiflerin sıralaması yapılmıştır. Bu yöntemlerinin tercih edilmesinin çeşitli nedenleri bulunmaktadır.

AHP, karmaşık karar problemlerini hiyerarşik bir yapıya ayırarak çözümlenmeye olanak tanır. Bu yöntem, karar vericilerin kriterler arasındaki önem derecelerini tutarlı bir şekilde belirlemelerine yardımcı olur ve öznel yargıları kantitatif verilere dönüştürür. AHP’nin en büyük avantajı, kullanıcıların karar verme sürecine katılımını artırarak, kararın kabul edilebilirliğini ve doğruluğunu artırmasıdır. Ancak, büyük veri setleri ve çok sayıda kriter olduğunda karmaşık hale gelebilir ve tutarlılık oranının sağlanması zor olabilir. AHP’nin hiyerarşik yapılandırma ve önceliklendirme yeteneği, bu çalışmanın gereksinimleriyle uyumludur.

TOPSIS yöntemi, alternatifleri değerlendirmek için basit ve etkili bir yöntemdir. TOPSIS’in temel avantajı, karar vericilerin en iyi ve en kötü çözüm noktalarına olan uzaklıkları ölçerek alternatifleri sıralamasıdır. Bu yöntem, hesaplama sürecinin hızlı ve anlaşılır olması nedeniyle sıklıkla tercih edilir. Diğer ÇKKV yöntemlerine kıyasla, TOPSIS’in ideal çözüme yakınlık prensibi, alternatiflerin net bir şekilde sıralanmasını sağlar. Dezavantajı ise, kriterlerin ağırlıklandırılması sürecinde öznel yargıların etkisinin yüksek olabilmesidir.

Bulanık TOPSIS ise belirsizliklerin ve bulanıklıkların yoğun olduğu durumlarda kullanılmak üzere geliştirilmiş bir yöntemdir. Bulanık mantık teorisi üzerine kurulu olan bu yöntem, karar

vericilerin belirsizlikleri ve eksik bilgileri daha iyi yönetmelerine olanak tanır. Bulanık TOPSIS'in avantajı, belirsizlik durumlarında daha esnek ve güvenilir kararlar sunmasıdır. Diğer ÇKKV yöntemleri arasında, Bulanık TOPSIS'in belirsizlikleri yönetme yeteneği öne çıkmaktadır. Ancak, bulanık setlerin tanımlanması ve uygun üyelik fonksiyonlarının seçilmesi gibi adımlar ek zorluklar yaratabilir. Bu çalışmada hem TOPSIS hem de Bulanık TOPSIS yöntemlerine yer verilmesinin amacı, karar verme sürecinde belirsizliklerin yönetilmesi ve alternatiflerin daha doğru bir şekilde değerlendirilmesidir.

AHP, TOPSIS ve Bulanık TOPSIS yöntemleri, bu çalışmanın gerektirdiği detaylı hiyerarşik analiz, net alternatif sıralaması ve belirsizlik yönetimi gibi ihtiyaçlara uygun olarak seçilmiştir. Bu yöntemlerin birlikte kullanılması, karar verme sürecinin daha kapsamlı ve hassas bir şekilde yönetilmesini sağlar.

Çalışmada AHP yöntemi için gereken kriterlerin değerlendirilmesi, TOPSIS yöntemi için gereken alternatiflerin kriterlere göre karşılaştırılması ve Fuzzy TOPSIS yöntemi için gereken kriter ve alternatiflerin dilsel ifadelerle derecelendirilmesi için lojistik alanında çalışan uzmanların görüşlerine başvurulmuştur. Uzman profili Tablo 3'de gösterilmiştir.

Tablo 3. Uzman bilgileri

Uzmanlar	Çalıştığı Kurum Özellikleri	Kurum Merkezi	Tecrübe (Yıl)
Uzman 1	Cok modlu taşımacılık yapan lojistik şirketi	İstanbul	10
Uzman 2	Cok modlu taşımacılık yapan lojistik şirketi	İstanbul	16
Uzman 3	Tek modlu taşımacılık yapan lojistik şirketi	Antalya	25
Uzman 4	Tek modlu taşımacılık yapan lojistik şirketi	İstanbul	20
Uzman 5	Üniversite	Alanya	8
Uzman 6	Üniversite	Ankara	15

Lojistik köy yeri seçim kriterlerin belirlenmesi için Tablo 1'de özeti yer alan kriterler arasından Uzmanlar tarafından seçim yapılmıştır. Sürdürülebilirlik kapsamında yer alan Ekonomik, Sosyal, Çevresel ana faktörlere ek olarak Uzmanlar tarafından Teknolojik ana kriteri de eklenmiştir. Ekonomik ana kriterinin alt kriterleri Yatırım Maliyeti (kurulum ve arazi dahil), Yatırım Geri Ödeme Süresi, Taşıma Maliyeti /Lojistik Maliyeti ve Kentsel Altyapı olarak belirlenmiştir. Çevresel ana kriterinin alt kriterleri olarak Müşterilere Yakınlık, Tedarikçilere Yakınlık, Çok Modlu Taşımaya Bağlanabilirlik ve Trafik Yoğunluğu olarak belirlenmiştir. Sosyal ana kriterin alt kriterleri İş İmkanlarının Sağlanması, Güvenlik /Çevre ve Terminal Güvenliği, Teşvikler/ Bölgesel Teşvik ve Kentin Çekiciliği ve Gelişimine Etkisi şeklinde sıralanmıştır. Teknolojik ana kriterinin alt kriterleri de Servis Kalitesi, Bilgi Altyapısı, İletişim /Akıllı ve Engelsiz İletişim olarak belirlenmiştir. Hiyerarşik yapı Şekil 3'de verilmiştir.

3.1. AHP yöntemi

Çok kriterli karar verme problemlerinin çözümünde kullanılan AHP, ikili karşılaştırmalar yapılarak oran ölçekleri üretmede kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde, ilk olarak alternatifler içerisinde karar vericinin amacına en uygun olanın belirlenebilmesi için değerlendirmelerde kullanılacak tüm kriterler ve varsa alt kriterler belirlenmeli ve karar problemini en iyi temsil eden hiyerarşik yapı oluşturulmalıdır [39].

Daha sonra ikili karşılaştırmalar ve ağırlıkların belirlenmesi yapılır. AHP hiyerarşik yapısındaki faktörlerin birbiriyle karşılaştırılması, tercihlerin göreceli gücünü gösteren Temel Önem Ölçeği yardımıyla ya da gerçek ölçüm değerleriyle gerçekleştirilir [40]. Yapılan ikili karşılaştırmalar neticesinde ortaya çıkan değerlerle oluşturulan A matrisi aşağıdaki gibidir.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Matriste $a_{ik}=a_{ij} \cdot a_{jk}$ 'dır.

Oluşan A matrisinde her bir sütun değeri ayrı ayrı bulunduğu sütun toplamına bölünerek normalize matris elde edilir. Normalize matrisin satır ortalaması o satırdaki kriterin görece önem derecesini ifade eder. Ana kriterlerin görece önem derecesiyle alt kriterlerin görece önem derecelerinin çarpımıyla bütünsel kriter ağırlıkları bulunur.

Daha sonraki aşama tutarlılık hesabıdır. Karar vericinin tutarlı değerlendirme yapması halinde i, k ve j değerleri için oluşacak ikili karşılaştırma matrisinde $a_{ik}=a_{ij} \cdot a_{jk}$ eşitliği sağlanır. Bu durumda matris öz değer vektörü (λ_{max}) ile matris boyutu (n) birbirine eşit olur. Bu da $A=a_{ij} = w_i/w_j$ ve $A \cdot w = n \cdot w$ olarak ifade edilebilir [40]. Oluşan eşitlik şu şekilde ifade edilir:

$$\begin{bmatrix} w_1/w_1 & w_1/w_2 & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & w_2/w_2 & w_2/w_n \\ \dots/\dots & \dots/\dots & \dots/\dots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & w_n/w_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} = n \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \dots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

Ağırlıklar ve tutarlılık için özdeğer vektör çözüm matrisi denklem (2)'de verilmiştir [40]. Tutarlılık oranı (CR) hesaplanırken; tutarlılık indeksi (CI), rassal tutarlılık indeksine (RI) bölünür.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

Tutarlılık indeksi (CI) hesaplaması için ise (4) ve (5) numaralı formüller kullanılır.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij} w_j}{w_i} \quad (5)$$

Rassal tutarlılık indeksi (RI) de Tablo 4 kullanılarak elde edilir.

Tablo 4. Rassal tutarsızlık tablosu

Rassal Tutarsızlık Tablosu										
Boyut (n)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rassal Tutarlılık İndeksi (RI)	0	0	0,58	0,90	1,12	1,25	1,32	1,41	1,45	1,49

Tutarlılık oranı (CR), hesaplama sonunda 0,10 değerinin altında ise kabul edilebilir. Bu oranın üzerinde bir değer çıkarsa karar vericinin değerlendirmesinde bir tutarsızlık olduğu söylenebilir ve değerlendirmesini gözden geçirmesi istenebilir.

3.2. TOPSIS yöntemi

TOPSIS, 1981 yılında geliştirilen bir ÇKKV yöntemidir [41]. Bu yöntemde seçilen alternatifin mesafe yönüyle ideal çözüme en yakın, negatif ideal çözüme de en uzak olması beklenir.

Öncelikle karar matrisi oluşturulur. Karar matrisinin satırlarında sıralaması yapılmak istenen alternatifler, sütunlarında da değerlendirme kriterleri yer alır. Kriter sayısı n olan ve alternatif sayısı m olan matris aşağıda gösterilmiştir.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{m,n} \end{bmatrix} \quad (6)$$

Daha sonra normalize karar matrisi R_{ij} , (7) ve (8) numaralı eşitlikler kullanılarak bulunur.

$$r_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} \quad (i = 1,2,3, \dots, m; j = 1,2,3, \dots, n) \quad (7)$$

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (8)$$

Bir sonraki aşamada ağırlıklı normalize matrisi V_{ij} elde edilir. Bunun için normalize matris, değerlendirme kriterlerinin önem derecelerini gösteren ağırlıklar ile çarpılır.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_1 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Elde edilen ağırlıklı normalize karar matrisinde ağırlıkların toplamı 1'e eşit olmalıdır.

$$(j = w_1, w_2, \dots, w_n), \quad \sum_{j=1}^n = 1 \quad (10)$$

Pozitif ideal çözüm değerleri (A^+), her kriter için alternatiflerin aldığı en iyi değerlerden oluşur. Eğer kriter bir fayda kriteri ise maksimum olan değer en iyi değerdir. Aksi halde minimum değer en iyi değerdir.

$$A^+ = (v_1^+, v_2^+, v_3^+, \dots, v_n^+) \quad (11)$$

Negatif ideal çözüm değerleri (A^-), her kriter için alternatiflerin aldığı en kötü değerlerden oluşur. Eğer kriter bir fayda kriteri ise minimum değer en kötü değerdir. Değilse maksimum değer en kötü değerdir.

$$A^- = (v_1^-, v_2^-, v_3^-, \dots, v_n^-) \quad (12)$$

Öklid uzaklıkları hesaplanarak alternatiflerin ideal çözüme uzaklığı (S_1^+) tespit edilir

$$S_1^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad (13)$$

Benzer olarak alternatiflerin negatif ideal çözüme uzaklığı (S_1^-) tespit edilir.

$$S_1^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (14)$$

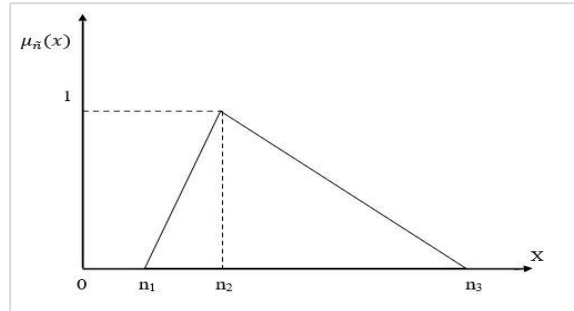
Karar noktalarının ideal çözüme olan göreceli yakınlığı (C_i^*) pozitif ve negatif ideal noktalara uzaklıktan faydalanılarak bulunur.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (15)$$

Formülde $0 \leq C_i^* \leq 1$ arasında değer alır. $C_i^* = 0$ olması alternatifin negatif ideal çözüme mutlak yakınlığını, $C_i^* = 1$ olması alternatifin ideal çözüme mutlak yakınlığını ifade eder. C_i^* ideal çözüme yakınlık değerleri en büyükten en küçüğe doğru sıralanarak tercih edilen alternatifler elde edilir.

3.3. Bulanık TOPSIS yöntemi

Bulanık kümeler teorisi ilk olarak 1965 yılında ortaya konulmuştur [42]. Klasik değişkenlerle yapılan ve kesin sınırlarla belirlenen sınıflandırma, bulanık mantıkla “düşük”, “orta”, “yüksek” gibi kesin sınırlamalar olmaksızın daha çok değişkenle yapılabilmektedir. Bu da gerçek hayattaki belirsizliklerin analizi ve çözümlemesine imkân sağlamaktadır [43]. $\tilde{n} = n_1, n_2, n_3$ şeklinde tanımlanan bir üçgen bulanık sayının gösterimi Şekil 2’deki gibidir.



Şekil 2. Üçgen bulanık sayı (\tilde{n})

Bu üçgen bulanık sayının üyelik fonksiyonu $\mu_{\tilde{n}}(x)$ şu şekilde ifade edilir. [44].

$$\mu_{\tilde{n}}(x) = \begin{cases} 0, & x < n_1 \\ \frac{x - n_1}{n_2 - n_1} & n_1 \leq x \leq n_2 \\ \frac{x - n_3}{n_2 - n_3} & n_2 \leq x \leq n_3 \\ 0, & x \geq n_3 \end{cases} \quad (16)$$

İki üçgen bulanık sayı arasındaki mesafenin ölçülmesinde vertex metodu kullanılabilir. $\tilde{m} = (m_1 + m_2 + m_3)$ ve $\tilde{n} = (n_1 + n_2 + n_3)$ şeklinde iki üçgen bulanık sayı arasındaki mesafe $d(\tilde{m}, \tilde{n})$, (17) numaralı eşitlikle ifade edilir [44].

$$d(\tilde{m}, \tilde{n}) = \sqrt{\frac{1}{3} [(m_1 - n_1)^2 + (m_2 - n_2)^2 + (m_3 - n_3)^2]} \quad (17)$$

Kriterlerin derecelendirilmesinde kullanılan dilsel değişkenler ve bu değişkenlerin karşılık geldiği üçgen bulanık sayılar Tablo 5’de gösterilmiştir [44].

Tablo 5. Kriter ağırlıklarının pozitif üçgen bulanık sayılarla ifadesi

Dilsel Değişkenler	Kriterlerin Önem Ağırlığı
Çok Düşük (ÇD)	(0, 0.1, 0.3)
Düşük (D)	(0.1, 0.3, 0.5)
Orta (O)	(0.3, 0.5, 0.7)
Yüksek (Y)	(0.5, 0.7, 0.9)
Çok Yüksek (ÇY)	(0.7, 0.9, 1.0)

Alternatiflerin derecelendirilmesinde kullanılan dilsel değişkenler ve bu değişkenlerin karşılık geldiği üçgen bulanık sayılar da Tablo 6’da gösterilmiştir [44].

Tablo 6. Alternatiflerin pozitif üçgen bulanık sayılarla ifadesi

Dilsel Değişkenler	Alternatiflerin Önem Ağırlığı
Çok Zayıf (ÇZ)	(0, 1, 3)
Zayıf (Z)	(1, 3, 5)
Orta (O)	(3, 5, 7)
İyi (İ)	(5, 7, 9)
Çok İyi (Çİ)	(7, 9, 10)

Karar verici sayısının k adet olduğu durumda alternatiflerin önem dereceleri (\tilde{x}_{ij}) (18) numaralı eşitlikle, kriterlerin önem dereceleri de (\tilde{w}_j) (19) numaralı eşitlikle hesaplanır.

$$\tilde{x}_{ij} = \frac{1}{k} [\tilde{x}_{ij}^1 + \tilde{x}_{ij}^2 + \dots + \tilde{x}_{ij}^k] \quad (18)$$

$$\tilde{w}_j = \frac{1}{k} [\tilde{w}_{ij}^1 + \tilde{w}_{ij}^2 + \dots + \tilde{w}_{ij}^k] \quad (19)$$

Yöntemin uygulamasında öncelikle bulanık karar matrisi oluşturulur. Alternatif sayısı m ve kriter sayısı n olan bulanık karar matrisi (20) ile gösterilir.

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \dots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \dots & \tilde{x}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \dots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \quad (20)$$

\tilde{x}_{ij} , ($j=1,2,3,\dots,n$), 1’den n ’ye kadar olan dilsel değişkenlerdir. Bunlar $\tilde{x}_{ij} = \tilde{a}_{ij}, \tilde{b}_{ij}, c_{ij}$ şeklinde üçgen bulanık sayılar olarak tanımlanabilir. Kriter sayısı n tane olan bulanık ağırlıklar vektörü şu şekilde gösterilir.

$$\tilde{W} = [\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \dots, \tilde{w}_n] \quad (21)$$

Burada \tilde{w}_j , ($j=1,2,\dots,n$) olmak üzere 1’den n ’ye kadar olan dilsel değişkenlerdir. Bunlar $\tilde{w}_j = \tilde{w}_{j1}, \tilde{w}_{j2}, \tilde{w}_{j3}$ şeklinde üçgen bulanık sayılar olarak tanımlanabilir.

Normalize bulanık karar matrisinin oluşturulmasında B fayda kriterlerini, C maliyet kriterini göstermek üzere üçgen bulanık sayıların normalizasyonu $\tilde{R} = [\tilde{r}_{ij}]_{m \times n}$ şu şekilde elde edilir.

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), \quad c_j^* = \max_i c_{ij} \quad j \in B \quad (22)$$

$$\tilde{r}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}^*}, \frac{a_j^-}{b_{ij}^*}, \frac{a_j^-}{a_{ij}^*} \right), \quad a_j^- = \min_i a_{ij} \quad j \in C \quad (23)$$

Her bir kriterin farklı önem dereceleri için ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi şu formülle bulunur.

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{r}_{ij} \cdot \tilde{w}_j \quad (24)$$

$$\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (25)$$

Pozitif ve negatif ideal çözüm değerleri, Bulanık pozitif ideal çözüm (FPIS)= A^* ve bulanık negatif ideal çözüm (FNIS)= A^- şu şekilde ifade edilir.

$$A^* = (\tilde{v}_1^*, \tilde{v}_2^*, \dots, \tilde{v}_n^*), \quad \tilde{v}_j^* = (1, 1, 1) \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n \quad (26)$$

$$A^- = (\tilde{v}_1^-, \tilde{v}_2^-, \dots, \tilde{v}_n^-), \quad \tilde{v}_j^- = (0, 0, 0) \text{ ve } j = 1, 2, \dots, n \quad (27)$$

Vertex metoduyla bulunan iki bulanık sayı arasındaki mesafe $d(.., ..)$ ile gösterilmek üzere alternatiflerin pozitif ideal çözüme uzaklığı şu şekilde hesaplanır.

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^*), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (28)$$

Vertex metoduyla bulunan iki bulanık sayı arasındaki mesafe $d(.., ..)$ ile gösterilmek üzere alternatiflerin negatif ideal çözüme uzaklığı şu şekilde hesaplanır.

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{v}_{ij}, \tilde{v}_j^-), \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (29)$$

Her bir alternatifin pozitif ve negatif ideal değere yakınlık değerlerine göre ideal çözüme yakınlık dereceleri şu şekilde hesaplanır.

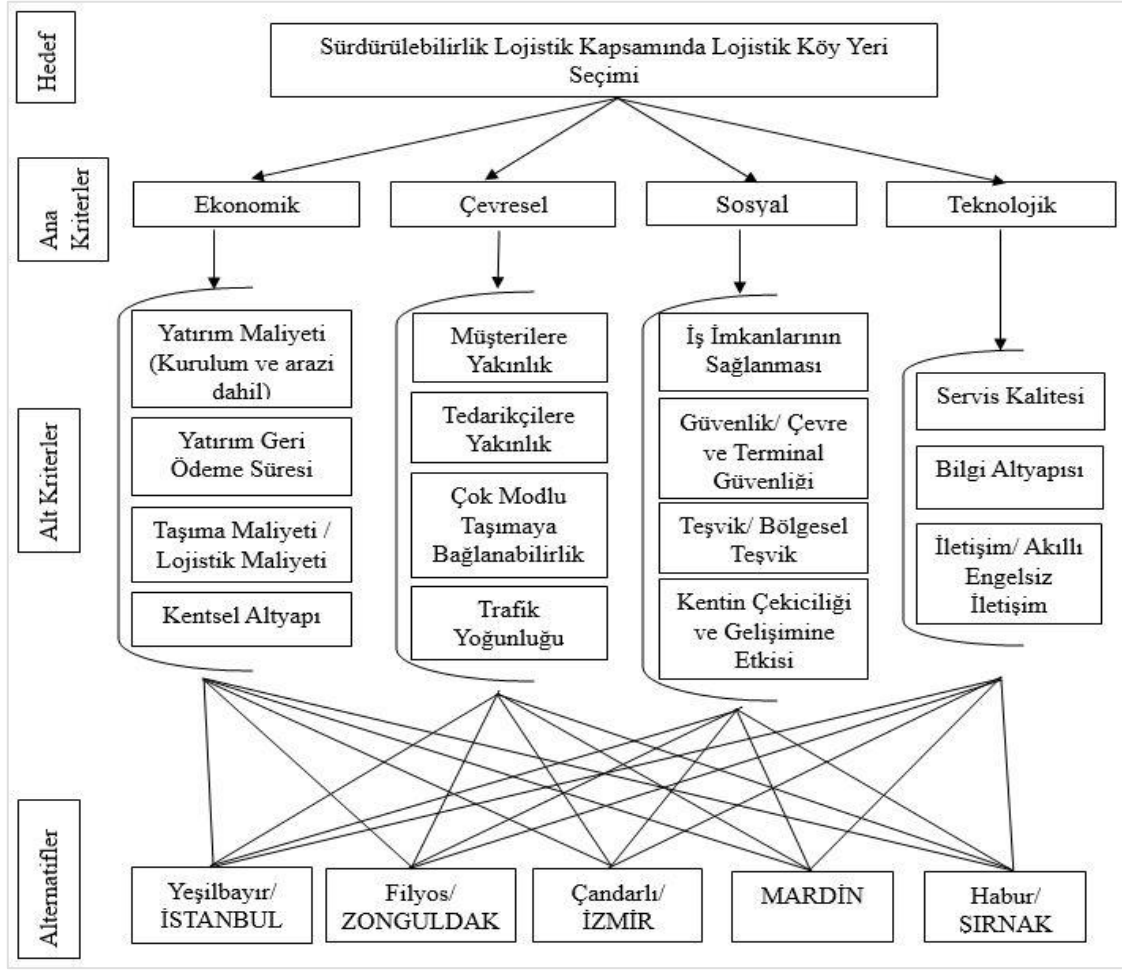
$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-}, \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (30)$$

4. Uygulama

Bu bölümde çalışmada kullanılan AHP, TOPSIS ve Fuzzy TOPSIS yöntemlerinin uygulamaları yer almaktadır.

4.1. AHP yöntemi uygulaması

Sürdürülebilir lojistik köy yeri seçimi hedefine ilişkin ana kriterler, alt kriterler ve alternatiflerden oluşan AHP hiyerarşik yapısı Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. AHP'nin hiyerarşik yapısı

Bir sonraki aşamada uzmanlar, ana ve alt kriterleri ikili karşılaştırma ile değerlendirmişlerdir. Birden fazla uzman görüşünün ortak karar haline getirilmesi için, AHP'nin karşılaştırma kuralı da dikkate alınarak, geometrik ortalama yöntemi kullanılmıştır. Uzmanların yapmış oldukları değerlendirmelerin geometrik ortalaması alınarak bulunan ortak karar değerleri, ana kriterler için Tablo 7'de, alt kriterler için de Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Ana kriterler için uzman ortak karar matrisi

Kriterler	Ana Kriterler			
	Ekonomik	Çevresel	Sosyal	Teknolojik
Ekonomik	1,00	3,65	2,61	3,90
Çevresel	0,27	1,00	0,63	4,00
Sosyal	0,38	1,58	1,00	1,84
Teknolojik	0,26	0,25	0,54	1,00

Tablo 8. Alt kriterler için uzman ortak karar matrisi

Ekonomik Alt Kriterler	Yatırım maliyeti	Yatırım geri	Taşıma maliyeti/	Kentsel
	(kurulum ve arazi dahil)	ödeme süresi	lojistik maliyeti	
Yatırım maliyeti (kurulum ve arazi dahil)	1,00	8,49	0,77	0,14
Yatırım geri ödeme süresi	0,12	1,00	0,34	0,04
Taşıma maliyeti/lojistik maliyeti	1,29	2,92	1,00	0,16

Kentsel altyapı	6,93	25,98	6,12	1,00
Çevresel Alt Kriterler	Müşterilere yakınlık	Tedarikçilere yakınlık	Çok modlu taşımaya bağlanabilirlik	Trafik yoğunluğu
Müşterilere yakınlık	1,00	1,37	0,10	0,07
Tedarikçilere yakınlık	0,73	1,00	0,12	0,09
Çok modlu taşımaya bağlanabilirlik	10,39	8,66	1,00	0,25
Trafik yoğunluğu	14,81	11,23	4,00	1,00
Sosyal Alt Kriterler	İş imkanlarının sağlanması	Güvenlik/ çevre ve terminal güvenliği	Teşvik/bölgesel teşvik	Kentin çekiciliği ve gelişimine etkisi
İş imkanlarının sağlanması	1,00	3,46	9,66	10,25
Güvenlik/ çevre ve terminal güvenliği	0,29	1,00	5,29	8,64
Teşvik/bölgesel teşvik	0,10	0,19	1,00	1,34
Kentin çekiciliği ve gelişimine etkisi	0,10	0,12	0,75	1,00
Teknolojik Alt Kriterler	Servis kalitesi	Bilgi altyapısı	İletişim/ akıllı engelsiz iletişim	
Servis kalitesi	1,00	1,73	6,93	
Bilgi altyapısı	0,58	1,00	5,66	
İletişim/ akıllı engelsiz iletişim	0,14	0,18	1,00	

Tablo 7 ve Tablo 8 yer alan ilişki karşılaştırma matrisleri kriter ağırlıklarını hesaplamada kullanılmıştır. Bunun için Bölüm 3.1’de açıklandığı üzere ilk olarak ana ve alt kriterlere ait normalize karar matrisi oluşturulmuş, daha sonra bu kriterlere ait bütünsel önem ağırlıkları hesaplanmıştır. Ana kriterlerin ağırlıklarına bakıldığında Ekonomik 0,4986, Sosyal 0,2061 Çevresel 0,2005 ve Teknolojik 0,0948 olarak bulunmuştur. Bu ağırlıkların alt kriter önem ağırlıklarıyla çarpılmasıyla elde edilen bütünsel önem ağırlıkları Tablo 9’da yer almaktadır.

Tablo 9. Ana kriter alt kriter bütünsel önem ağırlıkları

Ana kriter	Alt kriter	Ağırlık
Ekonomik	Yatırım maliyeti (kurulum ve arazi dahil)	0,066
	Yatırım geri ödeme süresi	0,014
	Taşıma maliyeti/ lojistik maliyeti	0,057
	Kentsel altyapı	0,362
Çevresel	Müşterilere yakınlık	0,008
	Tedarikçilere yakınlık	0,008
	Çok modlu taşımaya bağlanabilirlik	0,057
	Trafik yoğunluğu	0,127
Sosyal	İş imkanlarının sağlanması	0,127
	Güvenlik/ çevre ve terminal güvenliği	0,058
	Teşvik/ bölgesel teşvik	0,012
	Kentin çekiciliği ve gelişimine etkisi	0,009
Teknolojik	Servis kalitesi	0,053
	Bilgi altyapısı	0,035
	İletişim/ akıllı engelsiz iletişim	0,007

Tablo 9’da yer alan sonuçlar incelendiğinde ana kriterlerin önemleri, ekonomik, sosyal, çevresel ve teknolojik olarak sıralanmıştır. Ekonomik ana kriterinin altında yer alan kentsel altyapı en önemli alt kriteri olarak görülmektedir. Trafik yoğunluğu en önemli çevresel alt kriter, iş

imkânlarının sağlanması en önemli sosyal alt kriter ve servis kalitesi de en önemli teknolojik alt kriter olarak karşımıza çıkmaktadır. Bir sonraki aşamada AHP ile bulunan bu sonuçların tutarlılık kontrolü yapılmıştır. Bölüm 3.1 de açıklanan aşamalar uygulanarak ana ve alt kriterlerin tutarlılık değerleri hesaplanmış ve Tablo 10’ da gösterilmiştir.

Tablo 10. Tutarlılık kontrolü sonuçları

Kriter	Tutarlılık Kontrolü				
	λ_{max}	CI	RI	CR	Durum
Ana kriterler	4.2204	0.0735	0.9	0.0816	CR<0.10 Tutarlı
Ekonomik alt kriterleri	4.1679	0.0560	0.9	0.0622	CR<0.10 Tutarlı
Çevresel alt kriterleri	4.1903	0.0635	0.9	0.0705	CR<0.10 Tutarlı
Sosyal alt kriterleri	4.1061	0.0354	0.9	0.0393	CR<0.10 Tutarlı
Teknolojik alt kriterleri	3.0134	0.0067	0.58	0.0115	CR<0.10 Tutarlı

Tablo 10’da yer alan tutarlılık oranlarının tamamı 0,10’dan küçük olduğu için uzman değerlendirmelerinin tutarlı olduğu kabul edilmiştir. Bundan dolayı AHP ile elde edilen kriter ağırlıkları, sonraki yöntemler olan TOPSIS ve Bulanık TOPSIS’de kullanılmıştır.

4.2. TOPSIS uygulaması

Karar matrisinin oluşturması için uzmanlar, her bir kritere göre alternatifleri 1 ile 5 arasında puanlarla değerlendirmişlerdir. Bu değerlendirmelerin aritmetik ortalaması alınarak uzman ortak kararları bulunmuştur. Ortaya çıkan karar matrisi Tablo 11’de gösterilmiştir.

Tablo 11. Uzman ortak karar

Kriterler	Kriterler	Alternatif Şehirler				
		Yeşilbayır/ İSTANBUL	Filyos/ ZONGULDAK	Çandarlı/ İZMİR	Mardin	Habur ŞİRNAK
Kriterler	Ekonomik Yatırım maliyeti (kurulum ve arazi dahil)	3,50	3,17	3,67	2,83	2,83
	Ekonomik Yatırım geri ödeme süresi	2,67	3,33	3,33	3,33	3,00
	Taşıma maliyeti/ lojistik maliyeti	2,00	3,33	3,33	3,50	4,17
	Kentsel altyapı	4,83	2,83	4,17	2,83	2,17
	Çevresel Müşterilere yakınlık	4,17	2,83	3,17	2,33	1,83
	Çevresel Tedarikçilere yakınlık	3,83	2,50	4,00	2,33	2,00
	Çevresel Çok modlu taşımaya bağlanabilirlik	4,67	2,83	3,67	2,33	2,00
	Çevresel Trafik yoğunluğu	3,33	3,33	4,17	3,00	2,67
	Sosyal İş imkanlarının sağlanması	3,33	3,00	3,83	3,17	3,00
	Sosyal Güvenlik/ çevre ve terminal güvenliği	3,67	3,50	4,00	2,50	2,00
	Sosyal Teşvik/ bölgesel teşvik	2,67	2,50	2,83	2,83	3,00
	Sosyal Kentin çekiciliği ve gelişimine etkisi	2,83	2,33	3,33	2,83	2,83
Teknolojik	Servis kalitesi	4,50	3,83	4,17	2,83	2,50
	Bilgi altyapısı	4,67	3,67	4,50	2,50	2,33
	İletişim/ akıllı engelsiz iletişim	4,67	3,83	4,67	2,67	2,17

Uzman ortak kararlarının toplanmasından sonra, Bölüm 3.2’de yer alan (7) - (10) numaralı eşitliklere kullanılarak ara hesaplama adımları tamamlanmıştır.

Sonraki adımda her bir kriter için ideal çözüm değeri (A^+) ile negatif ideal çözüm değeri (A^-) (11)-(12) numaralı eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Kriter yönleri (maksimum/minimum) ve bu yönler dikkate alınarak yapılan bu hesaplamalar Tablo 12’te gösterilmiştir.

Tablo 12. Kriterlerin yönleri ve ideal ve negatif ideal değerler

Kriterler		Kriterlerin yönü (max/min)	İdeal çözüm değerleri (A ⁺)	Negatif ideal çözüm değerleri
Ekonomik	Yatırım maliyeti (kurulum ve arazi dahil)	Minimum	0,026	0,034
	Yatırım geri ödeme süresi	Minimum	0,005	0,006
	Taşıma maliyeti/ lojistik maliyeti	Minimum	0,015	0,032
	Kentsel altyapı	Maksimum	0,223	0,100
Çevresel	Müşterilere yakınlık	Maksimum	0,005	0,002
	Tedarikçilere yakınlık	Maksimum	0,005	0,002
	Çok modlu taşımaya bağlanabilirlik	Maksimum	0,037	0,016
	Trafik yoğunluğu	Minimum	0,045	0,071
Sosyal	İş imkanlarının sağlanması	Maksimum	0,066	0,052
	Güvenlik/ çevre ve terminal güvenliği	Maksimum	0,032	0,016
	Teşvik/ bölgesel teşvik	Maksimum	0,006	0,005
	Kentin çekiciliği ve gelişimine etkisi	Maksimum	0,005	0,003
Teknolojik	Servis kalitesi	Maksimum	0,029	0,016
	Bilgi altyapısı	Maksimum	0,020	0,010
	İletişim/ akıllı engelsiz iletişim	Maksimum	0,004	0,002

(13)-(14) numaralı eşitlikler kullanılarak da alternatiflerin ideal değere uzaklığı (S_1^+) ve negatif ideal değere uzaklığı (S_1^-) bulunmuştur. Son adım olarak (15) numaralı eşitlik ile karar noktalarının ideal çözüme olan göreceli yakınlığı (C_i^*) elde edilmiştir.

Alternatiflerin ideal çözüme olan uzaklıklarından faydalanılarak bulunan ideal çözüme göreceli yakınlık değerleri ve ideal değere yakınlık sıralaması Tablo 13'te gösterilmiştir. Tablo 13'de yer alan sonuçlara göre TOPSİS yöntemiyle en uygun lojistik köy alternatifi Yeşilbayır/İstanbul olarak bulunurken ikinci sırayı Çandarlı/İzmir almıştır.

Tablo 13. Alternatiflerin ideal çözüme göreceli yakınlığı ve sıralaması

Alternatifler	(C*)	Sıralama
Yeşilbayır/ İSTANBUL	0.891	1
Filyos/ ZONGULDAK	0.288	3
Çandarlı/ İZMİR	0.694	2
Mardin	0.282	4
Habur/ SİRNAK	0.171	5

4.3. Bulanık TOPSIS yöntemi uygulaması

Bu yöntemle de öncelikli uzman görüşü alınarak karar matrisi oluşturulmuştur. Bunun için uzmanlar tarafından Çok Düşük (ÇD), Düşük (D), Orta (O), Yüksek (Y) ve Çok Yüksek (ÇY) şeklinde dilsel ifadelerle derecelendirilen kriterlerin karşılık geldiği üçgen bulanık sayılar oluşturulmuştur. Uzman ortak kararı, bu sayıların ortalamaları alınarak hesaplanmış ve Tablo 14' de gösterilmiştir.

Tablo 14. Kriterlerin üçgen bulanık sayı karşılığı ve ortalama

Kriter	Uzm. 1	Uzm. 2	Uzm. 3	Uzm. 4	Uzm. 5	Uzm. 6	Ortalama
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	----------

(K1)	0.5	0.7	0.9	0.0	0.1	0.3	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5	0.250	0.433	0.617
(K2)	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.133	0.267	0.450
(K3)	0.0	0.1	0.3	0.3	0.5	0.7	0.7	0.9	1.0	0.0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	0.0	0.1	0.3	0.250	0.400	0.583
(K4)	0.5	0.7	0.9	0.5	0.7	0.9	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.5	0.7	0.9	0.7	0.9	1.0	0.467	0.667	0.850
(K5)	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.3	0.5	0.7	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.050	0.167	0.367
(K6)	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.3	0.5	0.7	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.1	0.3	0.5	0.067	0.200	0.400
(K7)	0.7	0.9	1.0	0.1	0.3	0.5	0.3	0.5	0.7	0.0	0.1	0.3	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5	0.217	0.400	0.583
(K8)	0.7	0.9	1.0	0.7	0.9	1.0	0.3	0.5	0.7	0.0	0.1	0.3	0.7	0.9	1.0	0.5	0.7	0.9	0.483	0.667	0.817
(K9)	0.1	0.3	0.5	0.7	0.9	1.0	0.3	0.5	0.7	0.7	0.9	1.0	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.400	0.600	0.767
(K10)	0.5	0.7	0.9	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5	0.3	0.5	0.7	0.3	0.5	0.7	0.233	0.433	0.633
(K11)	0.1	0.3	0.5	0.0	0.1	0.3	0.1	0.3	0.5	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.1	0.3	0.5	0.050	0.200	0.400
(K12)	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.3	0.5	0.7	0.0	0.1	0.3	0.050	0.167	0.367
(K13)	0.1	0.3	0.5	0.0	0.1	0.3	0.3	0.5	0.7	0.7	0.9	1.0	0.5	0.7	0.9	0.0	0.1	0.3	0.267	0.433	0.617
(K14)	0.1	0.3	0.5	0.5	0.7	0.9	0.1	0.3	0.5	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.3	0.5	0.7	0.167	0.333	0.533
(K15)	0.1	0.3	0.5	0.3	0.5	0.7	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.0	0.1	0.3	0.067	0.200	0.400

Benzer şekilde alternatifler için de uzmanların dilsel ifadelerle yaptıkları değerlendirmelere karşılık gelen üçgen bulanık sayılar ve onların ortalamaları da Tablo 15’ de gösterilmiştir.

Tablo 15. Kriterlere göre alternatiflerin üçgen bulanık sayı karşılıkları

Kriter	Alternatif	Uzm.						Ortalama		
		1	2	3	4	5	6	(Bulanık karar matrisi)		
Yatırım maliyeti (Kurulum ve arazi dahil)	(K1) A1	0 1 3	0 1 3	3 5 7	7 9 10	0 1 3	5 7 9	2.500	4.000	5.833
	A2	3 5 7	3 5 7	5 7 9	1 3 5	3 5 7	1 3 5	2.667	4.667	6.667
	A3	0 1 3	0 1 3	5 7 9	5 7 9	0 1 3	3 5 7	2.167	3.667	5.667
	A4	7 9 10	5 7 9	3 5 7	0 1 3	7 9 10	0 1 3	3.667	5.333	7.000
	A5	7 9 10	5 7 9	3 5 7	0 1 3	7 9 10	0 1 3	3.667	5.333	7.000
Yatırım geri ödeme süresi	(K2) A1	0 1 3	0 1 3	7 9 10	7 9 10	7 9 10	3 5 7	4.000	5.667	7.167
	A2	3 5 7	3 5 7	7 9 10	0 1 3	3 5 7	0 1 3	2.667	4.333	6.165
	A3	0 1 3	0 1 3	3 5 7	3 5 7	7 9 10	3 5 7	2.667	4.333	6.167
	A4	7 9 10	5 7 9	5 7 9	0 1 3	0 1 3	0 1 3	2.833	4.333	6.167
	A5	7 9 10	5 7 9	7 9 10	0 1 3	0 1 3	1 3 5	3.333	5.000	6.667
Taşıma maliyeti / lojistik maliyeti	(K3) A1	0 1 3	7 9 10	7 9 10	7 9 10	5 7 9	5 7 9	5.167	7.000	8.500
	A2	3 5 7	1 3 5	5 7 9	1 3 5	5 7 9	0 1 3	2.500	4.333	6.333
	A3	0 1 3	3 5 7	1 3 5	3 5 7	5 7 9	3 5 7	2.500	4.333	6.333
	A4	7 9 10	0 1 3	5 7 9	0 1 3	1 3 5	1 3 5	2.333	4.000	5.833
	A5	0 1 3	0 1 3	7 9 10	0 1 3	1 3 5	0 1 3	1.333	2.667	4.500
Kentsel altyapı	(K4) A1	7 9 10	7 9 10	7 9 10	7 9 10	7 9 10	5 7 9	6.667	8.667	9.833
	A2	5 7 9	1 3 5	5 7 9	3 5 7	3 5 7	0 1 3	2.833	4.667	6.667
	A3	7 9 10	7 9 10	3 5 7	7 9 10	7 9 10	1 3 5	5.333	7.333	8.667
	A4	3 5 7	1 3 5	5 7 9	3 5 7	1 3 5	0 1 3	2.167	4.000	6.000
	A5	0 1 3	0 1 3	5 7 9	0 1 3	0 1 3	0 1 3	0.833	2.000	4.000
Müşterilere yakınlık	(K5) A1	3 5 7	7 9 10	7 9 10	7 9 10	7 9 10	1 3 5	5.333	7.333	8.667
	A2	5 7 9	1 3 5	5 7 9	1 3 5	5 7 9	0 1 3	2.833	4.667	6.667
	A3	3 5 7	3 5 7	1 3 5	5 7 9	5 7 9	3 5 7	3.333	5.333	7.333
	A4	7 9 10	0 1 3	3 5 7	0 1 3	1 3 5	1 3 5	2.000	3.667	5.500
	A5	7 9 10	0 1 3	1 3 5	0 1 3	0 1 3	0 1 3	1.333	2.667	4.500
Tedarikçilere yakınlık	(K6) A1	3 5 7	7 9 10	1 3 5	7 9 10	7 9 10	3 5 7	4.667	6.667	8.167
	A2	5 7 9	1 3 5	3 5 7	0 1 3	3 5 7	1 3 5	2.167	4.000	6.000
	A3	3 5 7	3 5 7	7 9 10	5 7 9	7 9 10	5 7 9	5.000	7.000	8.667
	A4	7 9 10	0 1 3	7 9 10	0 1 3	0 1 3	0 1 3	2.333	3.667	5.333
	A5	7 9 10	0 1 3	3 5 7	0 1 3	0 1 3	0 1 3	1.667	3.000	4.833
Çok modlu taşımaya bağlanabilirlik	(K7) A1	7 9 10	7 9 10	5 7 9	7 9 10	7 9 10	5 7 9	6.333	8.333	9.667
	A2	7 9 10	1 3 5	3 5 7	1 3 5	5 7 9	0 1 3	2.833	4.667	6.500
	A3	7 9 10	3 5 7	1 3 5	5 7 9	7 9 10	3 5 7	4.333	6.333	8.000
	A4	1 3 5	0 1 3	5 7 9	3 5 7	1 3 5	1 3 5	1.833	3.667	5.667
	A5	0 1 3	0 1 3	7 9 10	3 5 7	0 1 3	0 1 3	1.667	3.000	4.833
Trafik yoğunluğu	(K8) A1	0 1 3	1 3 5	5 7 9	7 9 10	0 1 3	3 5 7	2.667	4.333	6.167
	A2	5 7 9	5 7 9	3 5 7	0 1 3	3 5 7	0 1 3	2.667	4.333	6.333
	A3	0 1 3	1 3 5	0 1 3	3 5 7	0 1 3	3 5 7	1.167	2.667	4.667
	A4	7 9 10	7 9 10	3 5 7	0 1 3	5 7 9	0 1 3	3.667	5.333	7.000
	A5	7 9 10	7 9 10	3 5 7	0 1 3	7 9 10	0 1 3	4.000	5.667	7.167
İş imkanlarının sağlanması	(K9) A1	7 9 10	5 7 9	1 3 5	7 9 10	0 1 3	3 5 7	3.833	5.667	7.333
	A2	7 9 10	3 5 7	1 3 5	3 5 7	3 5 7	1 3 5	3.000	5.000	6.833
	A3	7 9 10	5 7 9	7 9 10	7 9 10	0 1 3	3 5 7	4.833	6.667	8.167
	A4	7 9 10	0 1 3	5 7 9	3 5 7	7 9 10	0 1 3	3.667	5.333	7.000

	A5	7.910	0.13	3.57	3.57	7.910	0.13	3.333	5.000	6.667
(K10) Güvenlik / çevre ve terminal güvenliği	A1	3.57	3.57	1.35	7.910	7.910	5.79	4.333	6.333	8.000
	A2	5.79	3.57	3.57	7.910	7.910	0.13	4.167	6.000	7.667
	A3	3.57	5.79	3.57	7.910	7.910	5.79	5.000	7.000	8.667
	A4	1.35	0.13	3.57	3.57	5.79	1.35	2.167	4.000	6.000
	A5	0.13	0.13	3.57	3.57	3.57	0.13	1.500	3.000	5.000
(K11) Teşvik / bölgesel teşvik	A1	3.57	3.57	0.13	7.910	0.13	3.57	2.667	4.333	6.167
	A2	5.79	3.57	1.35	3.57	1.35	0.13	2.167	4.000	6.000
	A3	3.57	3.57	1.35	7.910	0.13	3.57	2.833	4.667	6.500
	A4	7.910	0.13	5.79	0.13	7.910	0.13	3.167	4.667	6.333
	A5	7.910	0.13	5.79	0.13	7.910	1.35	3.333	5.000	6.667
(K12) Kentin çekiciliği ve gelişimine etkisi	A1	7.910	5.79	0.13	0.13	0.13	7.910	3.167	4.667	6.333
	A2	7.910	1.35	1.35	0.13	1.35	1.35	1.833	3.667	5.500
	A3	7.910	5.79	7.910	0.13	0.13	5.79	4.000	5.667	7.333
	A4	7.910	1.35	3.57	1.35	5.79	0.13	2.833	4.667	6.500
	A5	7.910	0.13	3.57	1.35	7.910	0.13	3.000	4.667	6.333
(K13) Servis kalitesi	A1	7.910	5.79	5.79	7.910	7.910	5.79	6.000	8.000	9.500
	A2	7.910	5.79	5.79	7.910	5.79	0.13	4.833	6.667	8.333
	A3	7.910	5.79	5.79	7.910	7.910	1.35	5.333	7.333	8.833
	A4	3.57	3.57	5.79	3.57	1.35	1.35	2.667	4.667	6.667
	A5	1.35	3.57	5.79	3.57	0.13	1.35	2.167	4.000	6.000
(K14) Bilgi altyapısı	A1	7.910	7.910	7.910	7.910	7.910	3.57	6.333	8.333	9.500
	A2	7.910	3.57	3.57	5.79	7.910	1.35	4.333	6.333	8.000
	A3	7.910	7.910	1.35	7.910	7.910	7.910	6.000	8.000	9.167
	A4	3.57	1.35	5.79	1.35	3.57	0.13	2.167	4.000	6.000
	A5	1.35	1.35	5.79	1.35	1.35	1.35	1.667	3.667	5.667
(K15) İletişim / akıllı engelsiz iletişim	A1	7.910	7.910	7.910	7.910	7.910	3.57	6.333	8.333	9.500
	A2	7.910	5.79	5.79	7.910	5.79	0.13	4.833	6.667	8.333
	A3	7.910	7.910	3.57	7.910	7.910	7.910	6.333	8.333	9.500
	A4	3.57	1.35	5.79	3.57	3.57	0.13	2.500	4.333	6.333
	A5	1.35	1.35	5.79	3.57	0.13	0.13	1.667	3.333	5.333

Uzman ortak kararlarının toplanmasından sonra, Bölüm 3.3'de yer alan adımlar takip edilerek kriterlere ait normalize bulanık karar matrisi ve ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi hesaplanmıştır. Ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi değerlerinin ideal çözüm değerlerine ($A^* = [(1,1,1), (1,1,1), \dots, (1,1,1)]$) olan uzaklıklarıdır. Ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi değerlerinin negatif ideal çözüm değerlerine uzaklığı ($A^* = [(0,0,0), (0,0,0), \dots, (0,0,0)]$) değerine olan uzaklıklarıdır. Bulanık sayıların ideal çözüm değerlerine uzaklığı Tablo 16'da gösterilmiştir.

Tablo 16. Bulanık sayıların ideal çözüme uzaklığı ve toplam uzaklık

	A1	A2	A3	A4	A5
K1	0.773	0.798	0.753	0.829	0.829
K2	0.873	0.836	0.836	0.839	0.858
K3	0.923	0.874	0.874	0.864	0.793
K4	0.469	0.682	0.540	0.723	0.836
K5	0.832	0.878	0.865	0.900	0.920
K6	0.823	0.878	0.814	0.889	0.903
K7	0.668	0.795	0.737	0.831	0.856
K8	0.819	0.820	0.684	0.855	0.863
K9	0.605	0.647	0.547	0.622	0.643
K10	0.688	0.700	0.660	0.784	0.826
K11	0.840	0.847	0.831	0.832	0.823
K12	0.861	0.883	0.838	0.860	0.861
K13	0.643	0.693	0.670	0.774	0.801
K14	0.709	0.766	0.720	0.838	0.850
K15	0.807	0.835	0.807	0.881	0.902
Toplam (di*)	11.333	11.935	11.173	12.319	12.563

Son adım olarak alternatiflerin ideal çözüme yakınlık dereceleri (CC_i), (30= numaralı eşitlik ile hesaplanmıştır. Yakınlık dereceleri ve sıralama Tablo 17'de gösterilmiştir. Sonuçlara bakıldığında Fuzzy TOPSİS yöntemine göre en uygun lojistik köy alternatifi alternatifin Çandarlı/İZMİR olmuş, ikinci sırayı Yeşilbayır/İstanbul almıştır.

Tablo 17. Alternatiflerin ideal çözüme yakınlık sırası

Alternatifler	CC _i	Sıralama
Yeşilbayır/İSTANBUL	0,281	2
Filyos/ZONGULDAK	0,238	3
Çandarlı/İZMİR	0,292	1
Mardin	0,211	4
Habur/ŞIRNAK	0,193	5

5. Bulgular

Ana kriterlerin karşılaştırmasında ekonomik kriteri %49,86'lık bir oranla en önemli ana kriter olduğu, bunu %20,61'lik bir oran ile sosyal kriterinin ikinci önemli ana kriter olduğu, %20,05'lik bir oran ile çevresel ana kriterinin üçüncü önemli ana kriter olduğu ve %9,48'lik bir oran ile teknolojik ana kriterinin yer aldığı görülmektedir.

Ekonomik ana kriterine ait alt kriterlerin karşılaştırılmasında da %72,62'lik bir oranla en önemli kriterin kentsel altyapı olduğu, %2,72'lik bir oranla yatırım geri ödeme süresinin ise en düşük öneme sahip kriter olduğu görülmektedir. Çevresel alt kriterlere bakıldığında %63,32'lik bir oranla trafik yoğunluğunun en önemli kriter olurken tedarikçilere yakınlık kriteri ise %3,94'lük bir oranla en önemsiz kriter olarak gözlemlenmiştir.

Sosyal ana kriterinin alt kriterlerinden iş imkanlarının sağlanması %61,47'lik bir oranla en önemli kriter olurken %4,54'lük bir oranla kentin çekiciliği ve gelişimine etkisi kriteri önem olarak en alt sırada yer almıştır. Teknolojik ana kriterine altında yer alan servis kalitesi alt kriterinin %56,21'lik bir oranla en önemli kriter olduğu, %7,27'lik bir oranla da iletişim/ akıllı engelsiz iletişimin en önemsiz kriter olduğu görülmektedir.

Paris İklim Anlaşması, her ne kadar 2050 yılına kadar sıfır emisyon hedefini belirlemiş olsa da, bu hedefin sürdürülebilir kalkınma çerçevesinde yapılması gerekliliğini de vurgulamaktadır. Uzman görüşleri ile elde edilen kriter değerlendirmelerinde sürdürülebilir lojistiğin olarak ekonomik boyutu, buna paralel ön plana çıkmıştır. Ülkemizin gelişmekte olan ülkeler kategorisinde olması, uluslararası rekabet gücünü artırma isteği ve pazar payı artırma arzusu buna etken olmuş olabilir. Bununla beraber Ekonomik kriterinin bazı alt kriterleri, emisyon azalımı ile de dolaylı olarak ilgilidir. Örneğin kentsel altyapının yeterli olmayışı, lojistik köy kurulmadan önce kapsamlı inşaa faaliyetleri gerektirecek ve bu da zararlı sera gazı emisyonunu artıracaktır.

Sürdürülebilir lojistiğin sosyal boyutunun ağırlığı her ne kadar çevresel boyutunun ağırlığından önde olsa da, her iki kriterin de önemleri birbirine yakın ve %20 civarındadır. Bu da Paris İklim anlaşmasının gerekliliği olan emisyon azalımı hedefinin göz ardı edilmediği; trafik yoğunluğunun ve çok modlu taşımaya bağlanabilmenin önemsendiğini göstermektedir.

TOPSIS yöntemine göre alternatiflerin sıralaması gerçekleştirildiğinde 0,8909'lik oranla Yeşilbayır/İSTANBUL ilk sırada yer alırken, 0,6941'lik oranla ikinci sırada Çandarlı/İZMİR, 0,2878'lik oranla üçüncü sırada Filyos/ZONGULDAK, 0,2816'lık oranla dördüncü sırada Mardin ve 0,1713'lük bir oranla Habur/ŞIRNAK son sırada yer almaktadır.

Bulanık TOPSIS yöntemine göre alternatifler sıralandığında ise 0,2920'lik bir oranla Çandarlı/İZMİR ilk sırada yer alırken, 0,2810'luk bir oranla ikinci sırada Yeşilbayır/İSTANBUL, 0,2381'lik oranla üçüncü sırada Filyos/ZONGULDAK, 0,2109'luk oranla dördüncü sırada Mardin ve 0,1927'lik bir oranla Habur/ŞIRNAK son sırada yer almaktadır. Sonuçlar Tablo 18'de özetlenmiştir.

Tablo 18. Çözüm yöntemlerinin karşılaştırılması

Alternatifler	TOPSIS Sıralama	Bulanık TOPSIS Sıralama
Yeşilbayır/İSTANBUL	1	2
Filyos/ZONGULDAK	3	3
Çandarlı/İZMİR	2	1
Mardin	4	4
Habur/ ŞIRNAK	5	5

Ana kriter ağırlıklarının önem sırası doğal olarak lojistik köy yeri için alternatif şehirlerin de sıralanmasında etkili olmuştur. İstanbul ve İzmir şehirlerin tüm alternatifler arasında her iki yöntemle de ilk iki sırayı almaları bundan kaynaklıdır. Diğer alternatif şehirlere nazaran bu iki şehirde de kentsel altyapının çok önde olması, çok modlu taşıma için tüm alternatiflerin bulunması, şehir nüfuslarından dolayı iş imkânlarına yüksek talep olması, teknolojik altyapıdan dolayı da servis kalitesinin daha yüksek olması, sıralamanın belirlenmesine etki etmiştir.

Tablo 19. Kriterlerin karşılık geldiği dilsel ifadeler

Kriterler	Uzm.1	Uzm.2	Uzm.3	Uzm.4	Uzm.5	Uzm.6
(K1) Yatırım maliyeti (kurulum ve arazi	Y	ÇD	D	ÇY	D	D
(K2) Yatırım geri ödeme süresi	D	ÇY	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD
(K3) Taşıma maliyeti/ lojistik maliyeti	ÇD	O	ÇY	ÇD	Y	ÇD
(K4) Kentsel altyapı	Y	Y	O	O	Y	ÇY
(K5) Müşterilere yakınlık	ÇD	ÇD	ÇD	O	ÇD	ÇD
(K6) Tedarikçilere yakınlık	ÇD	ÇD	O	ÇD	ÇD	D
(K7) Çok modlu taşımaya bağlanabilirlik	ÇY	D	O	ÇD	D	D
(K8) Trafik yoğunluğu	ÇY	ÇY	O	ÇD	ÇY	Y
(K9) İş imkânlarının sağlanması	D	ÇY	O	ÇY	O	O
(K10) Güvenlik/ çevre ve terminal	Y	D	D	D	O	O
(K11) Teşvik/ bölgesel teşvik	D	ÇD	D	ÇD	ÇD	D
(K12) Kentin çekiciliği ve gelişimine etkisi	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD	O	ÇD
(K13) Servis kalitesi	D	ÇD	O	ÇY	Y	ÇD
(K14) Bilgi altyapısı	D	Y	D	ÇD	ÇD	O
(K15) İletişim/ akıllı engelsiz iletişim	D	O	ÇD	ÇD	ÇD	ÇD

Tablo 20. Alternatiflerin kriterlere göre dilsel olarak ifadesi

Kriter	Alternatif	Uzm. 1	Uzm. 2	Uzm. 3	Uzm. 4	Uzm. 5	Uzm. 6
(K1) Yatırım maliyeti (Kurulum ve arazi dahil)	Yeşilbayır/İSTANBUL	ÇZ	ÇZ	O	Çİ	ÇZ	İ
	Filyos/ZONGULDAK	O	O	İ	Z	O	Z
	Çandarlı/İZMİR	ÇZ	ÇZ	İ	İ	ÇZ	O
	Mardin	Çİ	İ	O	ÇZ	Çİ	ÇZ
	Habur/ ŞIRNAK	Çİ	İ	O	ÇZ	Çİ	ÇZ
(K2) Yatırım geri ödeme süresi	Yeşilbayır/İSTANBUL	ÇZ	ÇZ	Çİ	Çİ	Çİ	O
	Filyos/ZONGULDAK	O	O	Çİ	ÇZ	O	ÇZ
	Çandarlı/İZMİR	ÇZ	ÇZ	O	O	Çİ	O
	Mardin	Çİ	İ	İ	ÇZ	ÇZ	ÇZ
	Habur/ ŞIRNAK	Çİ	İ	Çİ	ÇZ	ÇZ	Z
(K3) Taşıma maliyeti / lojistik maliyeti	Yeşilbayır/İSTANBUL	ÇZ	Çİ	Çİ	Çİ	İ	İ
	Filyos/ZONGULDAK	O	Z	İ	Z	İ	ÇZ
	Çandarlı/İZMİR	ÇZ	O	Z	O	İ	O
	Mardin	Çİ	ÇZ	İ	ÇZ	Z	Z
	Habur/ ŞIRNAK	ÇZ	ÇZ	Çİ	ÇZ	Z	ÇZ
(K4) Kentsel altyapı	Yeşilbayır/İSTANBUL	Çİ	Çİ	Çİ	Çİ	Çİ	İ
	Filyos/ZONGULDAK	İ	Z	İ	O	O	ÇZ
	Çandarlı/İZMİR	Çİ	Çİ	O	Çİ	Çİ	Z
	Mardin	O	Z	İ	O	Z	ÇZ
	Habur/ ŞIRNAK	ÇZ	ÇZ	İ	ÇZ	ÇZ	ÇZ
	Yeşilbayır/İSTANBUL	O	Çİ	Çİ	Çİ	Çİ	Z

(K5)	Müşteriler e yakınlık	Filyos/ZONGULDAK	İ	Z	İ	Z	İ	ÇZ
		Çandarlı/İZMİR	O	O	Z	İ	İ	O
		Mardin	Çİ	ÇZ	O	ÇZ	Z	Z
		Habur/ ŞIRNAK	Çİ	ÇZ	Z	ÇZ	ÇZ	ÇZ
(K6)	Tedarikçilere yakınlık	Yeşilbayır/İSTANBUL	O	Çİ	Z	Çİ	Çİ	O
		Filyos/ZONGULDAK	İ	Z	O	ÇZ	O	Z
		Çandarlı/İZMİR	O	O	Çİ	İ	Çİ	İ
		Mardin	Çİ	ÇZ	Çİ	ÇZ	ÇZ	ÇZ
(K7)	Çok modlu taşımacılığa bağlanabilirlik	Habur/ ŞIRNAK	Çİ	ÇZ	O	ÇZ	ÇZ	ÇZ
		Yeşilbayır/İSTANBUL	Çİ	Çİ	İ	Çİ	Çİ	İ
		Filyos/ZONGULDAK	Çİ	Z	O	Z	İ	ÇZ
		Çandarlı/İZMİR	Çİ	O	Z	İ	Çİ	O
(K8)	Trafik yoğunluğu	Mardin	Z	ÇZ	İ	O	Z	Z
		Habur/ ŞIRNAK	ÇZ	ÇZ	Çİ	O	ÇZ	ÇZ
		Yeşilbayır/İSTANBUL	ÇZ	Z	İ	Çİ	ÇZ	O
		Filyos/ZONGULDAK	İ	İ	O	ÇZ	O	ÇZ
(K9)	İş imkanlarının sağlanması	Çandarlı/İZMİR	Çİ	İ	Çİ	Çİ	ÇZ	O
		Mardin	Çİ	ÇZ	İ	O	Çİ	ÇZ
		Habur/ ŞIRNAK	Çİ	ÇZ	O	O	Çİ	ÇZ
		Yeşilbayır/İSTANBUL	Çİ	İ	Z	Çİ	ÇZ	O
(K10)	Güvenlik / çevre ve terminal güvenliği	Filyos/ZONGULDAK	Çİ	O	Z	O	O	Z
		Çandarlı/İZMİR	Çİ	İ	Çİ	Çİ	ÇZ	O
		Mardin	O	İ	O	Çİ	Çİ	İ
		Habur/ ŞIRNAK	Z	ÇZ	O	O	İ	Z
(K11)	Teşvik / bölgesel teşvik	Yeşilbayır/İSTANBUL	ÇZ	ÇZ	O	O	O	ÇZ
		Filyos/ZONGULDAK	O	O	Z	O	Z	ÇZ
		Çandarlı/İZMİR	O	O	Z	Çİ	ÇZ	O
		Mardin	Çİ	ÇZ	İ	ÇZ	Çİ	ÇZ
(K12)	Kentnin çekiciliği ve gelişimine etkisi	Habur/ ŞIRNAK	Çİ	ÇZ	O	Z	Çİ	ÇZ
		Yeşilbayır/İSTANBUL	Çİ	İ	ÇZ	ÇZ	ÇZ	Çİ
		Filyos/ZONGULDAK	Çİ	Z	Z	ÇZ	Z	Z
		Çandarlı/İZMİR	Çİ	İ	Çİ	ÇZ	ÇZ	İ
(K13)	Servis kalitesi	Mardin	Çİ	Z	O	Z	İ	ÇZ
		Habur/ ŞIRNAK	Çİ	ÇZ	O	Z	Çİ	ÇZ
		Yeşilbayır/İSTANBUL	Çİ	İ	İ	Çİ	Çİ	İ
		Filyos/ZONGULDAK	Çİ	İ	İ	Çİ	İ	ÇZ
(K14)	Bilgi altyapısı	Çandarlı/İZMİR	Çİ	İ	İ	Çİ	Çİ	Z
		Mardin	O	O	İ	O	Z	Z
		Habur/ ŞIRNAK	Z	O	İ	O	ÇZ	Z
		Yeşilbayır/İSTANBUL	Çİ	Çİ	Çİ	Çİ	Çİ	O
(K15)	İletişim / akıllı engelsiz	Filyos/ZONGULDAK	Çİ	O	O	İ	Çİ	Z
		Çandarlı/İZMİR	Çİ	Çİ	Z	Çİ	Çİ	Çİ
		Mardin	O	Z	İ	Z	O	ÇZ
		Habur/ ŞIRNAK	Z	Z	İ	Z	Z	Z
(K15)	İletişim / akıllı engelsiz	Yeşilbayır/İSTANBUL	Çİ	Çİ	Çİ	Çİ	Çİ	O
		Filyos/ZONGULDAK	Çİ	İ	İ	Çİ	İ	ÇZ
		Çandarlı/İZMİR	Çİ	Çİ	O	Çİ	Çİ	Çİ

Mardin	O	Z	İ	O	O	ÇZ
Habur/ ŞIRNAK	Z	Z	İ	O	ÇZ	ÇZ

6. Sonuç

Türkiye coğrafi konumu, büyüyen ekonomisi ve artan ihracat rakamları ile tarihi ipek yolundan beri geçiş güzergahında bulunmasından dolayı ulaştırma ve lojistik altyapısı ve bunların verimli kullanımının önemi her geçen gün artmaktadır. Buna bağlı olarak lojistik faaliyetlerden kaynaklı çevre kirliliği ve egzoz emisyonlarında da artış kaçınılmazdır. Paris iklim anlaşmasının hedefleri doğrultusunda lojistik köylerin konumlandırılması, düzenlenmesi organizasyonunda optimum şartların sağlanmasına yönelik çalışmalar, lojistik faaliyetlerin daha çevreci gerçekleştirilmesi konusunda önemli bir misyon üstlenmektedir. Lojistik köylerinin trafik yoğunluğunu azaltacak şekilde yerleştirilmesi, daha az emisyon oluşturan taşıma modlarının da rahat bir şekilde kullanılabilirdiği ulaşım altyapısının nispeten daha iyi olduğu lokasyonlarda organize olması, bu bağlamda önem taşımaktadır.

Bu çalışmada Türkiye’de sürdürülebilir lojistik köy yeri seçimi için kriterler belirlenmiş, alternatif yerler arasından AHP, TOPSIS ve Bulanık TOPSIS yöntemleri ile seçim yapılmıştır. Çalışmada kullanılan kriterler daha önce yapılan lojistik köy yeri seçim çalışmalarında kullanılan ölçütler arasından seçilmiş olup, lojistik altyapısının şekillenmesinde Paris iklim anlaşmasının gerekleri de dikkate alınarak sürdürülebilir lojistiğe katkı sağlayacağı düşünülen kriterlerdir. Kullanılan kriterler sürdürülebilirliğin ekonomik, çevresel ve sosyal boyutlarına ek olarak teknolojik ana kriteri altında kategorize edilmiştir.

Lojistik alanında faaliyet gösteren şirketlerin üst düzey yöneticileri ve akademisyenlerden oluşan 6 uzmanın tecrübe ve görüşüne başvurularak kriterlerin ikili karşılaştırmasının yapılması istenmiş ve AHP yöntemiyle kriter ağırlıkları bulunmuş ve bulunan ağırlıklara göre alternatiflerin TOPSIS yöntemi ile sıralaması yapılmıştır. Yine aynı uzmanların kriter ve alternatifleri dilsel ifadelerle derecelendirmesinden elde edilen veriler kullanılarak Bulanık TOPSIS yöntemiyle alternatiflerin yeniden sıralaması yapılmış ve çıkan sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Lojistik köyler için en uygun yerlerin belirlenmesi, lojistik faaliyetlerde çeşitli kolaylıklar sağlayarak verimliliği artıracak, böylelikle hem zaman hem kaynak tasarrufu sağlayacaktır. TCDD ülkemizde şu ana kadar işletmeye açtığı lojistik köylerle karayolunun yanı sıra daha ekonomik ve çevre dostu taşıma modlarının kullanılmasına imkân sağlamakta ve açmayı planladığı yeni lojistik köylerle bu misyonunu geliştirmeye yönelik adımlar atmaktadır. Çalışmamızda alternatif olarak ele aldığımız lojistik köy yerleri, TCDD’nin gelecekte faaliyete geçirmeyi planladığı etüt ve planlama aşamasında olan lojistik köy yerleridir.

Lojistik köy yeri seçim kriterlerini karşılaştırdığımızda en önemli kriterin %36,21’lik bir oranla kentsel altyapı olduğu görülmektedir. Lojistik merkez için kentin yolları, bağlantı noktaları, konaklama, ulaşım ve sosyal imkanları, park yerleri gibi ihtiyaçları karşılayacak altyapıya sahip olması gerekmektedir. Bu kriteri %12,69’luk bir oran ile ikinci en önemli kriter olan trafik yoğunluğu kriteri takip etmektedir. Bilindiği üzere trafikte lojistik araçların sık dur kalk yapması hem yakıt maliyetini arttırmakta buna bağlı fazla egzoz emisyonuna ve trafikte fazladan zaman kaybına yol açacağı için Lojistik köy yerinin trafik yoğunluğu az olduğu yerler tercih edilmektedir. Üçüncü en önemli kriter olan iş imkanlarının sağlanması %12,67’lik bir orana sahiptir. Kurulacak lojistik köyün istihdama katkı sağlaması sosyal açıdan fayda sağlaması önemlidir. Teknolojik olarak akıllı ve engelsiz iletişim kriter ağırlığının %0,69’luk bir oranla tüm kriterler içinde son sırada olması, lojistik köy yeri seçiminde diğer kriterlere göre oldukça etkisiz bir kriter olduğunu göstermektedir.

Kriterleri belirleme sırasında, mesafe yönüyle emisyon azaltmaya pozitif katkısı olacağı düşünülen müşterilere yakınlık ve tedarikçilere yakınlık kriterlerinin ağırlıklarının oldukça düşük çıktığı görülmüştür. Teknolojik imkanlar ve E-Ticaret'in yaygınlaşmasıyla müşteri ve tedarikçiler artık küresel olarak değerlendirilmektedir. Türkiye gibi iki kıtayı birbirine bağlayan, kara, hava, deniz, demiryolu ve boru hattı gibi taşıma modlarının hepsinin kullanımına uygun, büyüyen ekonomiye sahip olan ülkeler için çok daha geçerli bir söylemdir.

Çalışma sonucunda ortaya çıkan sürdürülebilir lojistik değerlendirmelerinde çevresel değil de ekonomik boyutunun daha önemsenmesi, Paris İklim Sözleşmesinde vurgulanan sürdürülebilir kalkınma hedefine aykırı değildir. Bununla beraber çevresel boyutun öneminin %20 civarında oluşu, emisyon azalımı ve iklim değişikliği ile ilgili farkındalığın daha da artırılması gerekliliğinin göstergesi olabilir.

Lojistik köy yeri seçimi TOPSIS yöntemiyle yapıldığında ilk sırada Yeşilbayır/ İSTANBUL, ikinci sırada da Çandarlı/ İZMİR yer almıştır. Bulanık TOPSIS yönteminde ise ilk sırada Çandarlı/ İZMİR ikinci sırada da Yeşilbayır/ İSTANBUL yer almıştır. Diğer alternatiflerin her iki yöntemde de sıralamasının değişmediği görülmektedir. Çalışma sonucunda TCDD'nin etüt ve planlama aşamasında olan 5 adet aday lojistik köy yeri içerisinde işletmeye açılmasına öncelik verilmesi gereken yerlerin, Paris iklim anlaşması ve sürdürülebilir lojistiğe en fazla katkı sağlayacağı düşünülen Yeşilbayır/ İSTANBUL ve Çandarlı/ İZMİR lojistik köyleri olduğu saptanmıştır.

Türkiye'de lojistik merkezi yerini seçme üzerine daha önce yapılan çalışmalarda alternatifler varsayımına dayandırılmış ya da bir şehir özelinde yapılmıştır. Kullanılan kriterler yeterli detayda olmayıp Paris İklim Sözleşmesi hedeflerine paralel bir şekilde belirlenmemiştir. Paris İklim Anlaşması, düşük emisyon ile sıcaklık artışının 1.5°C-2°C ile sınırlandırılmasını hedeflerken sürdürülebilir kalkınma ve buna uygun finans akışlarını da vurgulamaktadır. Kamu kaynakları kullanarak yapılacak lojistik köylerini öncelik sırasına koymak için bu çalışma ve benzerleri kullanılarak kısa ve orta vadede anlaşma hedeflerine en uygun seçimler yapılabilir.

Bu çalışmada kullanılan kriterler ve ağırlıkları, ileride yapılacak sürdürülebilir lojistik merkez ve lojistik köy yeri seçimi çalışmalarına kriter belirlenmesi yönüyle ışık tutabilir. Kriter ağırlıkları, sonraki çalışmalar için araştırmacılara fikir verebilir. Farklı alternatifler üzerinde çalışılarak ya da farklı uzman görüşleri kullanılarak sonuçlar geliştirilebilir. Yeni yöntemler geliştirerek ya da literatürde geçen farklı yöntemler kullanılarak değerlendirmeler çeşitlendirilebilir ve sonuçlar duyarlılık analizleri ile karşılaştırılabilir. Örneğin, HP, TOPSIS ve Bulanık TOPSIS yöntemlerinin diğer çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleriyle karşılaştırılması yapılabilir. VIKOR, ELECTRE veya PROMETHEE gibi yöntemlerin aynı problem üzerinde uygulanması, farklı yöntemlerin sonuçlarının ve etkinliklerinin karşılaştırılması açısından faydalı olacaktır. İkinci olarak, farklı sektörlerde ve uygulama alanlarında bu yöntemlerin geçerliliği ve uygulanabilirliği incelenebilir. Özellikle sağlık, finans, tedarik zinciri yönetimi ve çevre yönetimi gibi alanlarda bu yöntemlerin performansı test edilebilir. Alternatifler bölgesel çalışmalara indirgenerek bölgesel lojistik merkez seçim çalışması yapılabilir.

Literatürdeki mevcut çalışmaların sınırlı olması, karşılaştırma yapma ve bulguları destekleme açısından zorluklar yaratmıştır. Bu durum, çalışmanın teorik temelini güçlendirme sürecinde ek çaba gerektirmiştir. Tüm bu sınırlandırmalar ve zorluklar göz önünde bulundurularak, gelecekte yapılacak çalışmalarda bu sorunların aşılmasına yönelik adımlar atılması önerilmektedir.

Çalışmanın sonuçları, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında, sürdürülebilir lojistik köy yeri seçimi konusunda önemli bir katkı sağladığı görülmektedir. Diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, bu çalışma özellikle sürdürülebilirlik kriterlerinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi sürecinde farklı bir yaklaşım sunmaktadır. Ayrıca, sürdürülebilir lojistik köy yeri seçimi konusunda yapılan çalışmalarda genellikle ekonomik ve sosyal faktörlerin ön planda olduğu görülmektedir. Ancak, bu çalışma çevresel faktörlerin ve teknolojik altyapının da önemini vurgulamaktadır. Bu nedenle, literatürdeki mevcut boşluğu doldurarak, sürdürülebilir lojistik köy yeri seçimi konusunda daha kapsamlı bir değerlendirme sunmaktadır.

Kaynakça

- [1] K. Rahimi and M. Davoudi, “Electric vehicles for improving resilience of distribution systems,” *Sustain. Cities Soc.*, vol. 36, pp. 246–256, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.SCS.2017.10.006
- [2] Y. Geng, W. Ji, Z. Wang, B. Lin, and Y. Zhu, “A review of operating performance in green buildings: Energy use, indoor environmental quality and occupant satisfaction,” *Energy Build.*, vol. 183, pp. 500–514, Jan. 2019, doi: 10.1016/J.ENBUILD.2018.11.017
- [3] A. O. Dünder and A. Kolay, “Karayolu yük ve yolcu taşımacılığının çevresel sürdürülebilirlik bakımından değerlendirilmesi ve Konya ili sera gazı emisyonunun hesaplanması,” *Ömer Halisdemir Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*, vol. 14, no. 1, pp. 317–334, 2021, doi: 10.25287/ohuibf.786463
- [4] T.C. Dışişleri Bakanlığı, “Paris Anlaşması,” no. Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa>, p. Erişim tarihi: 13.03.2023
- [5] P. Loukopoulos, “A Classification of Travel Demand Management Measures,” in *Threats from Car Traffic to the Quality of Urban Life*, Emerald Group Publishing Limited, 2007, pp. 273–292. doi: 10.1108/9780080481449-015.
- [6] G. T. Aydın and K. S. Ögüt, “Avrupa ve Türkiye’de lojistik köyleri,” no. 2. Uluslararası Demiryolu Sempozyumu 15-17 Ekim 2008, İstanbul, pp. 1471–1481, 2008.
- [7] W. P. Wong, K. L. Soh, C. M. Sinnandavar, and N. Mushtaq, “Could the service consumption-production interface lift national logistics performance?,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 128, pp. 222–239, Jan. 2018, doi: 10.1016/J.RESCONREC.2016.10.002
- [8] United Nations, “2005 World Summit Outcome,” no. United Nations, New York, 2005
- [9] J. Holmberg and R. Sandbrook, “Sustainable development: what is to be done?,” in *Policies for a small planet*, Routledge, 2019, pp. 19–38
- [10] Y. Kılıç, M. Aycan Karaatlı, M. F. Demiral, and Y. Pala, “Gelişmekte olan ülkelerde sürdürülebilir kalkınma açısından lojistik köyler: Türkiye örneği,” no. Uluslararası Davraz Kongresi 24-27 Eylül 2009 Isparta, pp. 13–14, 2009
- [11] M. Tanyaş, “Akademi lojistik: Lojistik kavram ve terimleri rehber kitabı,” no. Mersin Ticaret ve Sanayi Odası Yayını, p. 8, 2009
- [12] E. Genç and Ş. Coşmuş, “Lojistik köylerin yönetim özellikleri ve Türkiye’deki lojistik köyler,” *J. Soc. Humanit. Adm. Sci.*, vol. 7, no. 35, pp. 68–79, Jan. 2021, doi: 10.31589/JOSHAS.511
- [13] TCDD, “Lojistik merkezler,” no. <https://www.tcdd.gov.tr/kurumsal/lojistik-merkezler>, p. Erişim tarihi: 08.08.2023
- [14] T.C. Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, “Paris Anlaşması,” no. <https://iklim.gov.tr/db/turkce/dokumanlar/paris-anlasmasi-13-20220808231948.pdf>, p. Erişim tarihi 20.04.2024
- [15] M. Gümüş, H. Yumurtacı Aydoğmuş, and E. H. Özder, “Location and Capacity Planning of Freight Villages: The Case of Türkiye,” *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*, Dec. 2023, doi: 10.30798/makuiibf.1097373
- [16] S. Tadić, M. Krstić, V. Roso, and N. Brnjac, “Dry Port Terminal Location Selection by Applying the Hybrid Grey MCDM Model,” *Sustainability*, vol. 12, no. 17, p. 6983, Aug. 2020, doi: 10.3390/su12176983
- [17] S. Agrawal, R. K. Singh, and Q. Murtaza, “Disposition decisions in reverse logistics by using AHP-fuzzy TOPSIS approach,” *J. Model. Manag.*, vol. 11, no. 4, pp. 932–948, Nov. 2016, doi: 10.1108/JM2-12-2014-0091.

- [18] M. Soba, A. Şimşek, and M. Bayhan, “Bulanık Topsis yöntemi ile alışveriş merkezi kuruluş yeri seçimi: Uşak ilinde bir uygulama,” *Ekon. ve Yönetim Araştırmaları Derg.*, vol. 3, no. 2, pp. 103–132, 2014
- [19] A. Awasthi, S. S. Chauhan, and S. K. Goyal, “A multi-criteria decision making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty,” *Math. Comput. Model.*, vol. 53, no. 1–2, pp. 98–109, Jan. 2011, doi: 10.1016/J.MCM.2010.07.023
- [20] A. Awasthi and S. S. Chauhan, “A hybrid approach integrating Affinity Diagram, AHP and fuzzy TOPSIS for sustainable city logistics planning,” *Appl. Math. Model.*, vol. 36, no. 2, pp. 573–584, Feb. 2012, doi: 10.1016/J.APM.2011.07.033
- [21] S. Tadić, S. Zečević, and M. Krstić, “A novel hybrid MCDM model based on fuzzy DEMATEL, fuzzy ANP and fuzzy VIKOR for city logistics concept selection,” *Expert Syst. Appl.*, vol. 41, no. 18, pp. 8112–8128, Dec. 2014, doi: 10.1016/J.ESWA.2014.07.021
- [22] C. Rao, M. Goh, Y. Zhao, and J. Zheng, “Location selection of city logistics centers under sustainability,” *Transp. Res. Part D Transp. Environ.*, vol. 36, pp. 29–44, May 2015, doi: 10.1016/J.TRD.2015.02.008
- [23] T. Y. Pham, H. M. Ma, and G. T. Yeo, “Application of Fuzzy Delphi TOPSIS to Locate Logistics Centers in Vietnam: The Logisticians’ Perspective,” *Asian J. Shipp. Logist.*, vol. 33, no. 4, pp. 211–219, Dec. 2017, doi: 10.1016/J.AJSL.2017.12.004
- [24] R. K. Singh, N. Chaudhary, and N. Saxena, “Selection of warehouse location for a global supply chain: A case study,” *IIMB Manag. Rev.*, vol. 30, no. 4, pp. 343–356, Dec. 2018, doi: 10.1016/J.IIMB.2018.08.009
- [25] Y. Kazançoğlu, M. Özbiltekin, and Y. D. Özkan-Özen, “Sustainability benchmarking for logistics center location decision: An example from an emerging country,” *Manag. Environ. Qual. An Int. J.*, vol. 31, no. 5, pp. 1239–1260, Nov. 2019, doi: 10.1108/MEQ-08-2019-0177
- [26] A. Kumar and R. Anbanandam, “Location selection of multimodal freight terminal under STEEP sustainability,” *Res. Transp. Bus. Manag.*, vol. 33, p. 100434, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.RTBM.2020.100434
- [27] K. Aljohani and R. G. Thompson, “A multi-criteria spatial evaluation framework to optimise the siting of freight consolidation facilities in inner-city areas,” *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 138, pp. 51–69, Aug. 2020, doi: 10.1016/J.TRA.2020.05.020
- [28] T. N. M. Nong, “A hybrid model for distribution center location selection,” *Asian J. Shipp. Logist.*, vol. 38, no. 1, pp. 40–49, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.AJSL.2021.10.003
- [29] R. Zhao, Y. Gao, F. Jia, and Y. Gong, “Service design of green and low-carbon intracity logistics: an AHP approach,” *Int. J. Logist. Res. Appl.*, pp. 1–22, Oct. 2022, doi: 10.1080/13675567.2022.2129045
- [30] Y. Bayraktutan and M. Özbilgin, “Türkiye’de İllerin Lojistik Merkez Yatırım Düzeylerinin Bulanık Mantık Yöntemiyle Belirlenmesi,” *Erciyes Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg.*, no. 43, p. 1, 2014, doi: 10.18070/euiibfd.67041.
- [31] G. Surmeli, I. Kaya, and M. Erdogan, “A fuzzy multi-criteria decision making approach for choosing a logistics center location in Turkey,” in *2015 6th International Conference on Modeling, Simulation, and Applied Optimization (ICMSAO)*, May 2015, pp. 1–6. doi: 10.1109/ICMSAO.2015.7152195
- [32] F. Uysal and M. Gülmez, “Türkiye’de Akdeniz Bölgesi’nde Lojistik Merkez Yeri Seçimi İçin Bulanık Serim Teori ve Matris Yaklaşımı Uygulaması,” *Veriml. Derg.*, no. 1, pp. 89–104, 2015
- [33] C. Hamzaçebi, G. İmamoğlu, and A. Ahmet, “Selection of logistics center location with MOORA method for Black Sea Region of Turkey,” *J. Econ. Bibliogr.*, vol. 3, no. 1S, pp. 74–82, 2016
- [34] F. Zaralı, H. R. Yazgan, and Y. Delice, “AHP ve VIKOR bütünlük yaklaşımıyla lojistik merkez yer seçimi: Kayseri ili örneği,” *Erciyes Üniversitesi Fen Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 34, no. 3, pp. 1–9, 2018
- [35] A. Tümenbatur, “Orta Koridor Üzerindeki Demir İpekyolu Güzergahı ve Lojistik Merkez Yer Seçimi,” *Çukurova Üniversitesi Sos. Bilim. Enstitüsü Derg.*, vol. 30, no. 3, pp. 102–110, Dec. 2021, doi: 10.35379/cusosbil.977922
- [36] B. Paçacı, S. Erol, and K. Çubuk, “Sürdürülebilir Ulaşım İle Lojistik Merkez Yer Seçimi,” *Toros Üniversitesi İİSBF Sos. Bilim. Derg.*, vol. 9, no. (2. Uluslararası Sürdürülebilir Lojistik Sempozyumu “Döngüsel Ekonomi”) Özel Sayısı, pp. 97–106, Nov. 2022, doi: 10.54709/iisbf.1182554
- [37] B. Paçacı, S. Erol, and K. Çubuk, “Çok Modlu Taşımacılığa Uygun Lojistik Merkez Yer Seçimi İçin Bir Öneri: Türkiye Uygulaması,” *Politek. Derg.*, vol. 26, no. 2, pp. 923–928, Jul. 2023, doi: 10.2339/politek.1099560

- [38] E. K. Özekenci, “AHP-TOPSIS Yöntemine Dayalı Lojistik Merkez Kuruluş Yeri Seçimi: Çukurova Bölgesi Üzerine Bir Araştırma,” Tarsus Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilim. Fakültesi Derg., vol. 4, no. 1, pp. 70–84, Jun. 2023, doi: 10.56400/tarsusiibfdergisi.1273882
- [39] T. L. Saaty, The Analytic Hierarchy Process. paperback edition, RWS Publications, Pittsburgh, P A. First appeared 1980, McGraw Hill, New York., 1990., 1980
- [40] T. L. Saaty, Decision making with dependence and Feedback The Analytic Network Process., RWS Publications, 2001
- [41] C.-L. Hwang and K. Yoon, “Methods for Multiple Attribute Decision Making,” 1981, pp. 58–191. doi: 10.1007/978-3-642-48318-9_3
- [42] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” Inf. Control, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965, doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X
- [43] M. Dağdeviren, “Bulanık Analitik Hiyerarşi Prosesi ile personel seçimi ve bir uygulama,” Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimar. Fakültesi Derg., vol. 22, no. 4, 2007
- [44] C.-T. Chen, “Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment,” Fuzzy Sets Syst., vol. 114, no. 1, pp. 1–9, Aug. 2000, doi: 10.1016/S0165-0114(97)00377-1

Özgeçmiş



Mustafa Sait KAPLAN

1988 tarihinde Antalya’da doğmuştur. Lisans eğitimini Anadolu Üniversitesi İşletme Fakültesi, İşletme bölümünde tamamladıktan sonra Yüksek Lisans Eğitimine Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi İşletme Mühendisliği bölümünde devam etmiştir. Halen Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesinde idari personel olarak çalışmaktadır.

E-Posta: mustafa.kaplan@alanya.edu.tr



Mehmet GÜMÜŞ

Prof. Dr. Mehmet GÜMÜŞ lisans eğitimini Orta Doğu Teknik Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde tamamladıktan sonra yüksek lisans ve doktora eğitimlerini Kanada’da bulunan Waterloo Üniversitesinin Yönetim Bilimleri bölümünde tamamlamıştır. Doktora sonrasında Birleşik Arap Emirlikleri’nin Sharjah Amerikan Üniversitesinde öğretim üyesi olarak çalışmıştır. 2016 yılından bu yana Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Çalışma alanları: Lojistik yönetimi ve ulaştırma, stok yönetimi, tedarik zinciri yönetimi ve matematiksel modelleme konularıdır.

E-Posta: mehmet.gumus@alanya.edu.tr



Emir Hüseyin ÖZDER

Dr. Öğretim Üyesi Emir Hüseyin ÖZDER lisans eğitimini Atılım Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde tamamladıktan sonra Yüksek Lisans eğitimine Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde devam etmiştir. Sonrasında Kırıkkale Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünde Doktora eğitimini tamamlamıştır. Farklı üniversitelerde araştırma görevlisi ve sonrasında doktor öğretim üyesi olarak çalışmış; birçok firmada personel planlama ve verimlilik konularında danışmanlık görevi yürütmüştür. Çalışma alanları: Çizelgeleme, çok ölçütlü karar verme, optimizasyon algoritmaları ve matematiksel modelleme konularıdır.

E-Posta: emir.ozder@ankarabilim.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Mustafa Sait KAPLAN: Yazma-orijinal taslak hazırlama Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, Metodoloji, Yazılım, Kaynaklar, Doğrulama, İnceleme, Kontrol. Mehmet GÜMÜŞ: Kavramsallaştırma, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, İnceleme, Kontrol. Emir Hüseyin ÖZDER: Görselleştirme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme, İnceleme, Kontrol.