

## RAYLI ULAŞIM SİSTEMLERİNDE BAKIM YÖNTEMLERİNİN VERİMLİLİK AÇISINDAN ÖNCELİKLENDİRİLMESİ

Bahadır Furkan KINACI<sup>1</sup>, Cevat ÖZARPA<sup>2</sup>, İsa AVCI<sup>3</sup>

### ÖZET

**Amaç:** Yapılan çalışmada, raylı ulaşım sistemlerinde kullanılan bakım yöntemlerini verimlilik açısından değerlendirebilmek için literatürdeki çalışmalar, raylı sistemler verimlilik hesaplama kriterleri incelenerek çok kriterli karar verme metotları (ÇKKV) ile önceliklendirme yapılması amaçlanmıştır.

**Yöntem:** Bakımın verimlilik üzerindeki etkisi belirlenmiş, uygulanan bakım metotları ve bakım metotlarının ulaşım verimliliğini etkilediği kriterler belirlenmiştir. Belirlenen kriterler ÇKKV metotları ile hesaplanmıştır.

**Bulgular:** Çalışmamızda, bakımın arıza oluşumu ilişkisi nedeniyle verimliliği etkilediği ve verimliliği etkileyen 10 ayrı bakım kriteri olduğu, AHP uygulaması sonucunda, 10 kriter arasında %23,96 etki ağırlığı ile bakım maliyetinin en yüksek etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. PROMETHEE uygulamasında, tercih edilmesi gereken bakım yöntemleri olarak izleme yöntemi ile bakımın 0,8634 ortalama akım değeri ile ilk sıradaki yöntem olduğu, bu yöntemi aktif bakım (0,2437), periyodik bakım (0,1377), önleyici bakım (0,0685) ve fırsat bakım (0,0396) uygulamalarının takip ettiği tespit edilmiştir. Negatif yönlü ortalama akım değerine sahip operatör bakımı (-0,4353), yerinde bakım (-0,4549) ve düzeltici bakım (-0,4627) uygulamalarının tercih önceliği bulunmadığı tespit edilmiştir.

**Özgünlük:** Çalışmada PROMETHEE uygulamasının, raylı ulaşım sistemlerinde kullanılan bakım yöntemlerinin verimliliği üzerinde kullanılmadığı görülmüştür. Çalışmanın raylı ulaşım sistemlerinde verimliliği etkileyen diğer başlıklar üzerinde uygulanabileceği ve literatüre katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Raylı Ulaşım, Bakım, Verimlilik, ÇKKV, AHP, PROMETHEE.

**JEL Kodları:** C02, L15, L91.

## PRIORITIZATION OF MAINTENANCE METHODS IN RAIL TRANSPORTATION SYSTEMS IN TERMS OF EFFICIENCY

### ABSTRACT

**Purpose:** This study is aimed to prioritize rail systems with multi-criteria decision-making methods (MCDM) by examining the studies in the literature to evaluate the maintenance methods used in rail transportation systems in terms of efficiency.

**Methodology:** By examining the effects of maintenance methods on efficiency, the criteria that affect transportation efficiency are determined. The determined criteria were calculated by MCDM methods.

**Findings:** In this study, efficiency in terms of maintenance was analyzed and the priority of 10 criteria to affect efficiency was determined. As the maintenance methods to be preferred in PROMETHEE results, predictive maintenance is the first method with an average current value of 0.8634 and other maintenance applications; active maintenance (0.2437), periodic maintenance (0.1377), preventive maintenance (0.0685), and opportunity maintenance (0.0396) follow it. It has been determined that operator maintenance (-0.4353), on-site maintenance (-0.4549), and corrective maintenance (-0.4627) applications with negative average current values are not preferred.

**Originality:** The PROMETHEE application applied in the study is an original study on the efficiency of the maintenance methods used in rail transportation systems.

**Keywords:** Rail Transportation, Maintenance, Productivity, MCDM, AHP, PROMETHEE.

**JEL Codes:** C02, L15, L91.

<sup>1</sup> Öğr. Gör., Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Raylı Sistemler Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye, furkankinaci@karabuk.edu.tr, ORCID: 0000-0001-6872-2630 (*Sorumlu Yazar-Corresponding Author*).

<sup>2</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye, cevatozarpa@karabuk.edu.tr, ORCID: 0000-0002-1195-2344.

<sup>3</sup> Dr. Öğr. Üyesi, Karabük Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Karabük, Türkiye, isaavci@karabuk.edu.tr, ORCID: 0000-0001-7032-8018.

## 1. GİRİŞ

Ulaşım sistemleri, gelişen kentleşme ve artan ulaşım ihtiyacı ile hızla büyüme eğiliminde bulunmuş ve büyümesine devam etmektedir. Ulaşım sistemleri içerisinde toplu ulaşım yapısı, taşıma kapasitesi, temiz enerji, verimlilik, ses kirliliğinin önlenmesi benzeri sebepler ile raylı sistem taşımacılığının önemli bir noktaya gelmesine olanak sağlamıştır. Dünyanın birçok yerinde olduğu gibi ülkemizde de raylı ulaşım sistemlerinin kurulumu, yüksek zaman ve maliyet ihtiyacı duyan, yapılan yatırımı karşılması zor olan ve beklenmeyen hizmet yatırımları olarak karşımıza çıkmaktadır. Toplumsal hizmet amaçlı yapılan bu yatırımlar, kurulum ve işletme anındaki maliyetlerin en düşük, risksiz seviyelere indirilebilmeleri için ilk andan başlayarak kaynak yönetimi, takip ve bakım işlemlerinin iyi bir mühendislik uygulamasıyla gerçekleştirilmesini zorunlu hale getirmiştir. Bir sistem kurulumu sağlanırken ürünün temin edilmesi ve işletmeye alınması ile ilgili ortaya çıkan maliyetlere ek olarak ürünün yaşam ömrü boyunca oluşturacağı maliyetlerde dikkate alınmaktadır. Raylı ulaşım sistemlerinde yapılan bakım uygulamalarının doğru ve efektif olarak seçilmesi, çalışan, malzeme ve süreçlerinin doğru metot ve yazılım destekleri ile işletilmesi verimliliği artıran noktalardır. Verimlilik ve bakım ilişkisi sadece raylı ulaşım sistemlerinde değil aynı zamanda diğer sektörlerde de ele alınması gereken önemli bir konudur. Özellikle taşımacılık alanında hava yolu taşımacılığı, raylı sistemler taşımacılığı, gemi taşımacılığı ve karayolu taşımacılığı alanları açısından da değerlendirilmesi gerekmektedir. Verimlilik açısından bakım türleri ve etki eden bakım kriterleri tespit edilerek belirlenen metotlarla önceliklendirilmesi uygulanacak bakım yönteminin seçiminde önemli bir parametre olarak karşımıza çıkmaktadır. Verimlilik ve bakım ilişkisi ele alınarak en uygun ve sürdürülebilir yöntemler belirlemek için bu alanda çalışma yapmış uzmanlardan destek alınması gerekmektedir (Thun, 2006).

Literatürde yapılan ulaşım ile ilgili çalışmalar incelendiğinde hava, deniz ve demiryolu uygulamaları ile ilgili bakım ile verimliliğin araştırıldığı ve çok kriterli karar verme metotlarının kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Raylı sistemler ile ilgili yapılan bir çalışmada, 90'lı yılların sonunda Hollanda'da uygulanan bakım uygulamalarının, bakım miktarını azaltmadan bakım uygulamasının maliyetinin azaltılmasına yönelik çalışmalar seferlerde dakikliği artırmış bu sayede bakım miktarının azaltılmayarak maliyeti azaltmak için geliştirilmiş efektif uygulamaların başarılı sonuçlar verdiği ve verimliliği artırdığı ortaya konulmuştur (Budai ve diğerleri, 2004). Aydınlar ve Kubilay tarafından yapılan bir çalışmada, ampirik yöntem benimsenerek 641 bakım sektör profesyoneline uygulanan anket ile elde edilen veriler sistem ve bütüncül yaklaşımlar ışığında parametrik olmayan Kruskal Wallis ve Mann Whitney fark testlerine tabi tutulmuştur (Aydınlar, Kubilay, 2022). Raylı ulaşım sistemleri ile ilgili yapılan diğer çalışmalarda, teknoloji gelişimi ile birlikte verimliliğin artırılması amaçlı, akıllı alt çözümler, yönetim uygulamaları ve yazılımlar kullanılmaya başlanmıştır. Kullanılan bu sistemler arasında RAMS (Güvenirlilik, kullanılabilirlik, bakım ve güvenlik) yönetim uygulaması, ERP kurumsal kaynak yönetimi yazılımları, LCC yaşam döngüsü maliyeti analizi ve Bakım Önleme (Maintenance Prevention) uygulamaları bulunmaktadır (Türk Standartları Enstitüsü, 2018; Kant ve Odabaş, 2019; International Electrotechnical Commission, 2017; Thun, 2006).

Bir diğer ulaşım sistemi olan deniz yolu ulaşımı üzerine yapılan bir çalışmada, gemi bakımı verimlilik açısından incelenmiş, düşük maliyet, malzemenin uzun ömürlü ve güvenli olması, kaliteli ve çevre bütünlüğü benzeri özellikler, kurulacak sistemler açısından gerekli durumlar olarak tespit edilmiştir (Uzun, 2011, 59-71). Gemiler üzerine yapılmış bir başka çalışmada verimliliğin artırılması için, hata tespiti, durum analizi, bilgisayarlı bakım stratejileri, güvenli ve yönetilebilir bakım merkezleri beklentilerin karşılanması için kullanılan yöntemler arasında olduğu tespit edilmiştir (Erginer, 2003). Marquez tarafından yapılan bir çalışmada, verimliliğin artırılması için yazılım kullanımı, bakımdaki uygunsuzlukların tespiti, üst yönetim tarafından takibin sağlanması ve yönetilmesi, gemilerin bakım-tutum-onarım süreçlerinde yapılan uygulamaların planlanması, mevcut ve gelecekte yapılması planlanan bakımlar hakkında bilginin önceden kullanıcılara sunulması etkili yöntemler olarak belirlenmiştir (Marquez ve diğerleri, 2009).

Bir diğer ulaşım sistemi olan hava yolu ulaşımı bakım uygulamaları ve verimliliği konusunda yapılan bir çalışmada, hangarlarda kullanılan malzemelerin maliyeti, düzenleyici ve önleyici faaliyetler ile kullanılan uygulamalardaki hataların tespitinin verimliliği etkilediği tespit edilmiştir. Özellikle Bakım, Onarım, Gözden Geçirme (MRO) uygulamasında gerçekleştirilen Veri Sarma Analizlerinin (DEA) verimliliğin göreceli ölçümünü sağladığı tespit edilmiş ve uygulama gerçekleştirilebilmesi için karar girdisi olarak, Bakım Süresi (TAT) ve adam x saat olarak uygulanmasının doğru olduğu belirlenmiştir. Bakım Hatası Karar Yardımı (MEDA) programı sayesinde bakım kaynaklı hatalar ve tespitler gerçekleştirilmiş, uçak bakımında hata oranları ve maliyet verimliliğini etkileyen faktörler olarak ele alınmıştır (Bozkurt, 2013, 9-45). Sarac ve diğerleri tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, uçak bakım planlamasında verimliliğin artırılabilmesi için uçağın bakım uygulanmadan uçabileceği yasal uçuş saatinin (cushion time) minimize edilmesi veya uçakların bakımlarının yapılacağı uçuş saatinin maksimum olarak elde edilmesi gerektiği tespit edilmiştir (Sarac ve diğerleri, 2006). Sergio tarafından yapılan çalışmada ise bakım yöntemlerinin, uçaklarda

kullanılabilirliği, yaşam ömrünü, müşteri memnuniyetini etkilediği ve bu bağlamda endüstride kilit bir rol oynadığı tespit edilmiştir (García ve diğerleri, 2021).

Literatürde yapılan çalışmalarda ulaşım sistemlerinin verimliliği ile ilgili birçok örnek olduğu gibi önceliklendirme işlemi gerçekleştirilebilmesi için çok kriterli karar verme metodlarının yoğun bir şekilde kullanıldığı görülmektedir. Çok kriterli karar verme metodları ile yapılan bir çalışmada, kent içi hat belirlemede çok kriterli karar verme metodları kullanılmış ve farklı hatların üstünlük performansları değerlendirilmiştir (Ertugut ve Koç Ustalı, 2021). Solak ve Öcalır tarafından yapılan bir başka çalışmada çok kriterli karar verme metodları kullanılarak Türkiye için raylı sistem alternatiflerinin seçimi analizi yapılmıştır (Solak ve Öcalır, 2021). Özcan ve arkadaşları tarafından yapılan bir çalışmada, AHP-TOPSIS ve PROMETHEE uygulamaları ile oluşturulan hibrit model ile hidroelektrik santrallerde kullanılan 4 farklı bakım stratejisinden sürdürülebilirliğe en fazla katkı sağlayan yöntem belirlenmiştir (Özcan ve diğerleri, 2021). Shafiee ve Animah tarafından yapılan bir çalışmada, yüksek basınç ve sıcaklık altında hizmet veren deniz altı tesislerin ömrünü artırmak amacıyla Hata Modları ve Etkileri Analizi (FMEA) ve hibrit AHP-PROMETHEE uygulaması yapılarak entegre bir risk yönetim değerlendirmesi oluşturulmuştur (Shafiee ve Animah, 2020). Emovon ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, DELPHI-AHP ve PROMETHEE hibrit yapısı kullanılarak, gemi makineleri için uygun bakım stratejisi belirlenmiştir (Emovon ve diğerleri, 2018). Faghihinia ve Mollaverdi yapmış olduğu çalışmada, PROMETHEE II ve PROMETHEE GAIA düzlemini kullanarak bakım politikası oluşturmayı ele almıştır (Faghihinia ve Mollaverdi, 2012). Ighravwe ve Oke tarafından yapılan bir çalışmada, PROMETHEE ve bulanık entropi yöntemleri kullanılarak bakım stratejileri tespit edilmiş ve tespit edilen stratejiler pratikte uygulanarak test edilmiştir (Ighravwe ve Oke, 2017). Yapılan bir çalışmada ise akıllı raylı sistemlerde kullanılmakta olan alt sistemlerin kritiklik seviyeleri çok kriterli karar verme metodu kullanılarak seviyelendirilmiş ve en kritik sistemin belirlenmesi sağlanmıştır (Özarpa ve diğerleri, 2021). Ayrıca yapılmış olan bir diğer çalışmada, kent içi ulaşım yeni hat kurulumu türünün belirlenebilmesi için AHP ve PROMETHEE uygulamaları kullanılmıştır (Özarpa ve diğerleri, 2021).

Bu çalışmada, verimlilik ve bakım arasındaki ilişki ortaya konularak bakım türleri açıklanmıştır. Buna ek olarak raylı ulaşım sistemlerinde verimliliği etkileyen bakım kriterleri belirlenmiştir. Ayrıca, uygulanan bakım yöntemlerinin raylı ulaşım sistemlerinde, taşıma verimliliği üzerine etkisi incelenerek efektif bakım seçimi için çok kriterli karar verme metodlarından AHP ve PROMETHEE uygulamalarının kullanılması ve bakım yöntemleri arasında önceliklendirme yapılması sağlanacaktır.

## 2. VERİMLİLİK ve BAKIM İLİŞKİSİ

Verimlilik, bir sistemde maksimum fayda elde etme olarak ifade edilebilecek olan, günümüz dünyasında enerji, çevre kirliliği benzeri etkiler başta olmak üzere önemli bir parametre olarak karşımıza çıkan bir konudur. Enerji kaynaklarında ortaya çıkabilecek riskler, yoğun şehir yaşamı ve çevre kirliliği artışı sağlayan sistemlerin artışı benzeri konular verimli sistemlerin tasarlanmasını bunlarla birlikte mevcut sistemlerde verimlilik seviyelerinin artırılmasını zorunlu hale getirmiştir. Endüstriyel sistemlerde verimliliği artıran parametreler incelendiğinde, bakım uygulamaları, sistemin ilk alım kriterleri, uzman personel istihdamı, kurumsal yapı, toplum bilinci, akıllı teknolojilerin kullanımı, farklı sistemler ile entegrasyon, yenilikçi yönelim, merkezi yönetim, planlama ve enerji teknolojisi benzeri başlıklar ön plana çıkmaktadır. Mevcut sistemlerde verimliliği etkileyen bakım uygulamalarının geliştirilmesi, sistemlerin yaşam ömrünü, müşteri memnuniyetini, konforlu etkileşimi, ileri yönlü planlama imkânını artırdığı bununla birlikte arıza oranını ve tüketim maliyeti benzeri başlıkları azalttığı gözlemlenmektedir (García ve diğerleri, 2021). Ortaya çıkan etkileşimler ile bakım yöntemleri tüm sistemlerde olduğu gibi raylı ulaşım sistemlerinde de verimliliğin önemli bir parametresi olarak karşımıza çıkmaktadır.

### 2.1. Raylı Ulaşım Sistemlerinde Taşıma Verimliliği

Verimlilik, mümkün olan en düşük kaynak kullanımı ile en yüksek verimin elde edilmesi durumudur. Bir sistemin en düşük maliyet, insan kaynağı, tesis, bakım ve onarım ile en yüksek işletme, sürdürülebilirlik, kapasite ve geliri sağlaması beklenir (Kahya ve Polat, 2007). Matematiksel olarak verimlilik Eşitlik 1'deki gibi ifade edilir.

$$\text{Verimlilik} = \frac{\text{Çıktı}}{\text{Girdi}} \quad (1)$$

Raylı ulaşım sistemlerinde verimlilik hesabı yapılırken, Eşitlik 1'deki verimlilik hesaplaması baz alınarak Eşitlik 2 kullanılır.

$$\text{Verimlilik} = \frac{\text{Gerçekleşen Taşıma}}{\text{Standart Taşıma Kapasitesi}} \quad (2)$$

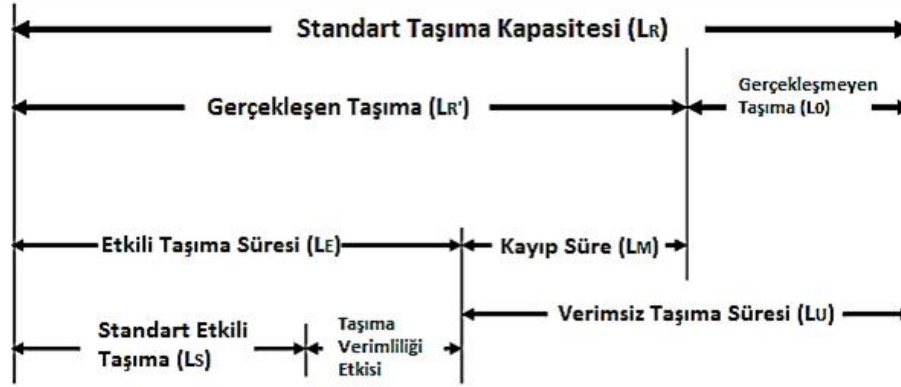
Eşitlik 2'de raylı ulaşım sistemlerinde verimlilik hesabı yapılırken kullanılan gerçekleşen taşıma ifadesi, mevcuttaki bakım onarım, arıza, rötar ve aksamalar sonucu gerçekleştirilen yolcu ve yük taşınma miktarını vermektedir. Diğer bir ifade olan standart taşıma kapasitesi, bir raylı sistem yapısının birim zamanda tam

kapasite ile taşıyabileceği maksimum yolcu ve yük miktarını vermektedir. Literatürde yapılan, 19 farklı OECD (Ekonomik Kalkınma ve İş Birliği Örgütü) üyesi ülkenin raylı ulaşım sistemlerinin verimliliklerinin ölçüldüğü çalışmada, veri değerlendirmeleri taşıyan, “Yolcu-Km” ve “Netton-Km” miktarları ile değerlendirilmiştir (Oum ve Yu, 1994). Eşitlik 3’te “Yolcu,” ve Eşitlik 4’te “Yük Netton-Km” değerlerinin birim miktar için hesaplanması gösterilmiştir. Gerçekleştirilen verimlilik hesabında taşıma miktarları, Eşitlik 3 ve Eşitlik 4’teki hesaplamalara göre gerçekleştirilmiştir.

$$1 (\text{yolcu}) \times \text{mesafe} (1 \text{ km}) = 1 \text{ Yolcu} - \text{Km} \quad (3)$$

$$1 (\text{ton}) \text{ yük} \times \text{mesafe} (1 \text{ km}) = 1 \text{ Yük Netton} - \text{Km} \quad (4)$$

Raylı sistemlerde verimliliği etkileyen bileşenler değerlendirildiğinde altyapı ve taşıtların taşıma kapasiteleri ele alınıp mevcutta gerçekleşen taşıma değeri ile oranı ele alınır. Taşıma kapasitesi değerlendirmeleri sağlanırken, verimlilik ile ilgili literatürde yapılan, iş gücü verimlilik model ve tasarımı uygulaması ele alınmış ve ilişkili veriler raylı ulaşım sistemleri özelinde kullanılmak üzere geliştirilmiştir (Kahya ve Polat, 2007). Verimlilik değerlendirmesi, gerçekleşen taşıma miktarını, gerçekleşmeyen taşıma miktarını, verimsiz süreleri, etkili gerçekleşen taşıma miktarını, standart verimlilik, taşıma etkinliği ve süreç verimi değerlerini elde etmemize imkân tanır. Şekil 1’de verilen verimlilik bileşenlerine göre Eşitlik 5 – 16’da verimlilik bileşenlerinin hesaplamaları paylaşılmıştır.



Şekil 1. Taşıma kapasitesinin verimlilik bileşenleri

$$L_R' = L_R - L_O \quad (5)$$

$$L_E = L_R' - L_M \quad (6)$$

$$L_M = L_R' - L_E \quad (7)$$

$$L_U = L_O + L_M \quad (8)$$

Yukarıda verilen eşitliklerde  $Q$ , belirli bir taşıma sistemi içerisinde belirli bir sürede gerçekleştirilmiş olan taşıma miktarlarının toplamını (toplam gerçekleştirilen taşıma miktarı);  $L_R$ , birim zamanda mevcut taşıma sisteminin tam verimde gerçekleştirilmesi gereken taşıma miktarını ( $Q$  çıktısını üretmek için kullanılan standart taşıma kapasitesi);  $L_O$ , sistem içerisinde zorunlu ve öngörülebilir olarak taşıma gerçekleştirilmeyen taşıma miktarlarını (bakım, ikmal, yolcu veya yük olmayışı benzeri zorunlu kayıp süreler sonucu gerçekleşmeyen taşıma miktarı),  $L_R'$ , toplam kapasite içerisinde taşıma gerçekleşen miktarları;  $L_E$ , etkili gerçekleşen taşıma miktarı,  $L_M$ , yol durumu, bekleme süreleri benzeri taşıma esnasında gerçekleşen kayıp süreleri;  $L_U$ , verimsiz süreleri ve  $L_S$ , standart etkili taşıma miktarını ifade eder. Taşıma kapasite miktarı ve gerçekleştirilen taşıma miktarlarına dayandırılarak sistemin genel ve özel ölçekte verimliliği hesaplanabilir. Genel sistem için, tüm çıktı taşıma kapasitesi oranı Eşitlik 9-17'ye göre hesaplanacaktır.

$$\tau_R = \tau_S \times E_w \times le^{(1)} \times le^{(2)} \quad (9)$$

$$Q/L_R = Q/L_S \times L_S/L_E \times L_E/L_R' \times L_R'/L_R \quad (10)$$

$$\tau_R = Q/L_R \quad (11)$$

$$\tau_S = Q/L_S \quad (12)$$

$$E_w = L_S/L_E \quad (13)$$

$$le^{(1)} = L_E/L_R' \quad (14)$$

$$le^{(2)} = L_R'/L_R \quad (15)$$

$$\tau_R'' = Q/L_S \times L_S/L_E = Q/L_E \quad (16)$$

$$le^{(0)} = le^{(1)} \times le^{(2)} = L_E/L_R' \times L_R'/L_R = L_E/L_R \quad (17)$$

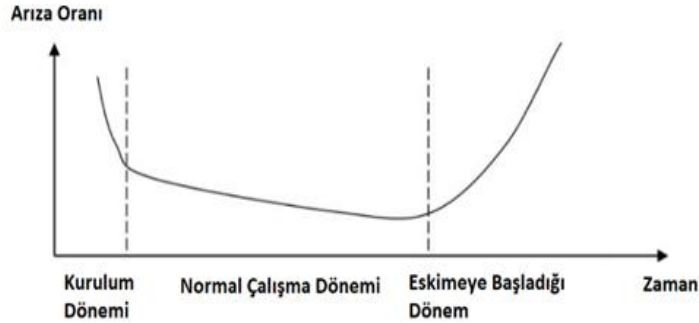
Tüm süreç verimliliği (gerçekleştirilen taşıma miktarı olan Q'nın taşıma kapasitesine olan oranı)  $\tau_R$  ile, standart verimliliği (gerçekleştirilen taşıma miktarı olan Q'nın, etkili taşımaya olan oranı)  $\tau_S$  ile, taşıma etkinliği (mevcut yapının verimliliğe katkısı)  $E_w$  ile, etkili taşıma miktarının, gerçekleşen taşıma miktarına olan oranı  $le^{(1)}$  ile, gerçekleşen taşıma miktarının standart taşıma kapasitesine olan oranı  $le^{(2)}$  ile, süreç verimi (standart verimliliğin taşıma etkinliğine olan oranı)  $\tau_R''$  ile, etkili taşıma süresinin standart taşıma kapasitesine oranı  $le^{(0)}$  ile gösterilmiştir.

Verimlilik bileşenleri Eşitlik 5-17'ye göre hesaplanmıştır (Kahya ve Polat, 2007). Yapılan teorik hesaplamalar sonucu, taşıma sisteminde etki eden tüm verimlilik bileşenlerinin raylı ulaşım sistemleri için hesaplamaları sağlanabilecektir.

## 2.2. Raylı Ulaşım Sistemlerinde Bakım

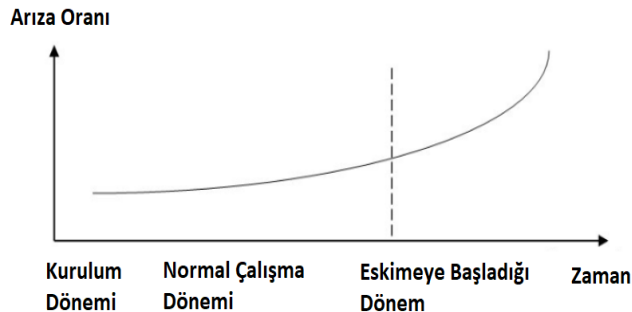
Gerçekte raylı ulaşım sistemlerinin kullanımı açısından emniyet ve dakiklık en önemli unsurlardandır. Raylı ulaşım sistemlerinde emniyet ve dakiklığı tesis edebilmek için kullanılan bakım uygulamaları, beklenmeyen arızaların mümkün olduğunca azaltılması ve önlenmesi için önemli bir yere sahiptir. Raylı ulaşım sistemlerinde bir bütün olarak alt ve üst yapı bakım sürecinde birlikte değerlendirilmeli ve bakım sistemlerinin uygulanması gerekmektedir. Bakım uygulamaları sağlanırken planlamanın mümkün olduğunca bir merkez ağ yapısı ile gerçekleştirilmesi, takip ve efektif işletme açısından önemli bir yere sahiptir. Bir ağ yapısı ile merkezi olarak gerçekleştirilen bakım uygulamalarının daha az maliyetli ve daha az aksayan trafiğin oluşmasına sebep olmaktadır. (Budai ve diğerleri, 2004; Kumar ve diğerleri, 2000). Raylı ulaşım sistemlerinde bakım uygulamaları, gelişen teknoloji ve malzeme biliminde ortaya çıkan gelişmeler ile, daha az bakım ihtiyacı duyan sistemler olma yolunda ilerlemektedir. Sistem yönetim metodu gelişmeleri, dijital bakım takip uygulamalarının uygulanması gibi ilave kolaylıkları da sistemlerin daha takip edilebilir verimli sistemler olmasını sağlamaktadır. Bu gelişmeler olmasına rağmen raylı sistemlerin bakım ihtiyaçları sınırlanmamış ve çalışma yapılma ihtiyacı devam eden sistemler olarak durumunu sürdürmektedir.

Raylı sistemlerde kullanılan tüm sistem ve alt sistemlerin kullanıma alındığı andan itibaren arızalar ile karşılaşmaya başlayıp yaşam döngüsü boyunca arızalar oluşmaya devam etmektedir. Şekil 2'de kullanılan elektrik ve elektronik sistemlerin kurulum anından itibaren yaşam döngüsü esnasında ortalama arıza oranları grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 2. Elektrik ve elektronik sistemleri yaşam döngüsü boyunca zamana bağlı arıza oranları

Şekil 3'te kullanılan mekanik sistemlerin kurulum anından itibaren yaşam döngüsü esnasında ortalama arıza oranları grafiksel olarak gösterilmiştir.



Şekil 3. Mekanik sistemlerin yaşam döngüsü boyunca zamana bağlı arıza oranları

Temel bakımlar raylı ulaşım sistemlerinde sistem, altyapı veya taşıtların arıza vermeden kullanım ömrü boyunca sürdürülebilir olarak yönetilmesini sağlayan bakım yöntemleridir. Mevcut sistemler yoğunlukla periyodik koruyucu bakım uygulaması ile birlikte arıza veya hasar oluşması durumunda düzeltici bakım metodu uygulanarak işletilmektedir. Gelişen teknoloji ve dijitalleşmenin etkisi ile dijital bakım yöntemlerinden olan izleme yöntemi ile bakım uygulama alanı oluşturmaya başlamış ve bu sayede daha maliyeti etkin ve verimli uygulamalar elde edilmiştir. Raylı ulaşım sistemlerinde sistem, altyapı veya taşıtlar için uygulanan tamamlayıcı bakım uygulamaları, kendine has bakım yöntemini veya temel bakım yöntemlerinin alt yöntemlerini oluşturan yapılardır. Raylı ulaşım sistemleri birçok farklı bakım katmanını ayrı ayrı veya birlikte uygulamayı gerektirmektedir. Tablo 1’de bakım uygulamaları ile ilgili detaylar aktarılmıştır (Türk Standartları Enstitüsü, 2018; Thun, 2006; Alman Standartları Enstitüsü, 2019).

**Tablo 1. Bakım türleri**

<i>Bakım Türleri</i>	<i>Açıklama</i>
Periyodik Koruyucu Bakım	Bir sistemin temel belirli periyotlara ayrılmış bir şekilde yapılan değişim ve onarım işlemlerinin gerçekleştiği bakım türüdür. Değişim gerçekleştirilen elemanların arıza veya hasar durumu oluşturmasını önlemek amaçlı yapılır.
Düzeltilici Bakım	Vaktinde gerçekleştirilmeyen bakım uygulamaları sonucu ortaya çıkan arıza veya herhangi bir kaza durumunda hasarın giderilebilmesi ve sistemin çalışabilir bir duruma tekrar getirilebilmesi açısından uygulanan bakım türüdür.
İzleme Yöntemiyle Bakım	Kestirimci bakım uygulaması olarak da ifade edilen çeşitli teknolojik ve yazılımsal enstrümanlardan oluşan yenilikçi bakım metodudur. Bakım gerçekleştirilecek olan eleman çeşitli yöntemler ile takip edilip en doğru zamanda müdahale edilerek düşük maliyetli ve sorunsuz bakım uygulaması sağlanır.
Fırsat Bakımı	Zamandan bağımsız olarak süresi geçmiş veya henüz süresi gelmemiş bakımın, başka amaçla sistem veya taşıta müdahale edildiği esnada yapılması durumudur.
Aktif Bakım	Bir parçanın işlevini yerine getirmeye devam edebilmesi için bakıma ayrılmadan yapılan düzeltici veya önleyici bakım türüdür.
İyileştirme Bakımı	Bir parçanın orijinal işlevini değiştirmeden işlevselliğini artırmak amacıyla yapılan teknik işlem türüdür.
Modifikasyon	Bir parçanın bir veya daha fazla fonksiyonunu değiştirerek işlevselliğini artırmak amacıyla yapılan teknik işlem türüdür.
Modernizasyon	Ekipman veya parçada yeni talep ve gelişmeleri sağlayabilmek amacıyla yapılan değişiklik ve yenilikler bütünüdür.
Önleyici Bakım	Sistem veya parçanın işlevselliğinin sürdürülebilir olması ve arıza vermesinin önlenmesi amacıyla önceden planlanarak yapılan bakım türüdür.
Yerinde Bakım	Parçanın bulunduğu yerden herhangi bir bakım merkezine taşınmadan yapılan bakım türüdür.
Operatör Bakımı	Bakım faaliyetlerinin taşıt veya cihazı kullanan operatör tarafından yapılan bakım türüdür.

### 2.2.1. Raylı Ulaşım Sistemlerinde Verimliliği Etkileyen Bakım Kriterleri

Verimlilik yapısı incelendiğinde, uygulanan bakım türlerinin verimliliği etkileyen önemli bir faktör olduğu karşımıza çıkmaktadır. Raylı ulaşım sistemlerinde bakım türlerinin verimliliğe olan etkilerini incelemek için çeşitli kriterler öne çıkmaktadır. Yapılan çalışmada, verimliliği etkileyen bakım kriterleri olarak; bakım maliyeti, bakıma kadar yapılan kilometre, güvenli seyir süresine etki, sürdürülebilirlik, taşıtın seferde kalma süresi, arıza oranı, taşıtın yaşam ömrü, personel ihtiyacı, geçmiş verilerin takibi ve malzeme stok maliyeti ön plana çıkmıştır (Kutlu, 2019; Nebati ve diğerleri, 2021; Özdemir, Özcan, 2020; Elden, 2020). Yapılan detaylı literatür araştırmasında bu kriterler tespit edilmiştir. Tablo 3’te verimliliği etkileyen bakım kriterlerinin detayları açıklanmıştır.

**Tablo 2. Verimliliği etkileyen bakım kriterleri**

<i>Kriterler</i>	<i>Açıklama</i>
Bakım Maliyeti	Bakım süresince ortaya çıkan yedek parça, işçilik vb. maliyetler
Bakıma Kadar Yapılan kilometre	2 bakım arasında taşıtın yapabileceği kilometre
Bakımın Güvenli Seyir Süresine Etkisi	Bakım işleminin taşıtın güvenli olarak seyir gerçekleştirmesine olan etkisi
Sürdürülebilirlik	Bakım yönteminin taşıt ve sistem üzerinde sürdürülebilirlik etkisi
Taşıtın Seferde Kalma Süresi	Bakım yönteminin taşıtın arıza ve zaman kaybına uğramadan seferde çalışır durumda hareketli veya hareketsiz (durak beklemeler vb.) kalma süresine olan etkisi
Arıza Oranı	Bakım yöntemi uygulandıktan sonra taşıtta ortaya çıkan kilometre başına arıza oranı
Taşıtın Yaşam Ömrü	Bakım yönteminin taşıtın kullanıma alınarak hurdaya çıkacağı zamana kadar olan süreye etkisi
Personel İhtiyacı	Bakım yönteminin uygulanması sırasında ihtiyaç duyulan personel
Geçmiş verilerin takibi	Bakım yöntemi uygulandıktan sonra geçmiş verilerin takibi, oluşabilecek yeni arıza ve onarımlar için detay oluşturacaktır.
Malzeme Stok Maliyeti	Bakım yöntemi uygulanması amacıyla ihtiyaç duyulan malzemelerin stok maliyetleri

### 3. MATERYAL ve METOT

Yapılan çalışmada, raylı sistemlerde uygulanan bakım yöntemleri karşılaştırılıp, bakım uygulamalarının verimlilik açısından öncelik sıralaması çok kriterli karar verme metodu ile gerçekleştirilmiştir. Çok kriterli karar verme yöntemleri arasında nicel ve nitel değerlendirmeleri kullanarak çözümler üretilmesine olanak sağlaması, alternatifler arasında seçilen kriterleri kullanarak tercih fonksiyonlarının ikili olarak karşılaştırılıp kriterlerin alternatifler bazında birbirlerine olan üstünlüklerinin belirlenmesine sağlanması gibi üstünlüklerinden dolayı PROMETHEE yöntemi kullanılmıştır (Soba, 2012). PROMETHEE uygulaması gerçekleştirmek için ihtiyaç duyulan kriterlerin etki ağırlıkları AHP metodu ile hesaplanmış ve elde edilen değerler PROMETHEE uygulamasında kullanılmıştır (Ozdemir, Özcan, 2020). Bu bölümde kullanılan yöntemler ve yöntemlerin uygulanma detayları aktarılacaktır. Yapılan uygulamalarda çok kriterli karar verme metodları kullanılırken 4 ayrı uzman görüşü alınıp uygulamalar gerçekleştirilmiştir.

#### 3.1. Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) Metodu

Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) Alpert ve Myers'in ortaya çıkarması ve Saaty'in 1977 yılında bir model olarak geliştirmesi sonucu tamamlanmış bir metottur. Oluşan gelişmeler ile çok kriterli karar problemlerinde kullanılabilir hale gelmiştir. AHP metodu bir karar probleminin tanımlanması, değişken kriterlerin belirlenmesi ve değişken kriterlerin etkilerinin yüzdelik dağılımlarının belirlenmesi olarak açıklanabilir. Uzman görüşlerinin alınması ile tecrübe ve bilgiye dayalı olarak karmaşık bir problemin hiyerarşik olarak çözümlenmesine olanak sağlamaktadır (Hamurcu ve Eren, 2018; Sarımeahmet ve diğerleri, 2020).

Uygulama gerçekleştirilirken, ilk olarak çok kriterli çözüm aranan problem belirlenir. Bu problemin çözümü için gerekli kriter ve alternatifler belirlenir. Sonrasında ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulur. Matrisler standardize edilerek önem ağırlıkları belirlenir. Önem ağırlıkları sıralanıp kriterlerin arasında önem sıralaması tamamlanmış olur. Köşegen elemanları 1 olan bir kare matris olan ikili karşılaştırma matrisleri Eşitlik 18 kullanılarak oluşturulur. İkili karşılaştırmalarda 1 ile 9 arasında önem derecesinde değerler alan ölçek kullanılır. Oluşturulan karşılaştırma matrisleri, Tablo 3'te belirtilen önem değerlerine göre değerler alır.

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ \cdot & & & \cdot \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (18)$$

**Tablo 3. AHP değer tanımlamaları**

Önem Değerleri	Değer Tanımları
1	İki faktörün eşit öneme sahip olması durumu
3	1. Faktörün 2. faktörden daha önemli olması durumu
5	1. Faktörün 2. faktörden çok önemli olması durumu
7	1. Faktörün 2. faktöre nazaran çok güçlü bir öneme sahip olması
9	1. Faktörün 2. faktöre nazaran mutlak üstün bir öneme sahip olması
2,4,6,8	Ara değerler

İkili karşılaştırma matrisleri Eşitlik 19 kullanılarak normalize edilir.

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}} \quad (19)$$

Normalize edilen karşılaştırma matrisi değişkenlerin birbirlerine göre önem seviyelerini gösterir. Tüm matris içerisinde değişkenlerin yüzdelik olarak önem derecelerini belirlemek için karşılaştırma matrislerini oluşturan sütun vektörlerinden yararlanılır. Eşitlik 20'de bulunan sütun vektörü kullanılarak bileşenlerin tüm değişkenler içerisinde yüzde önem oranları belirlenir.

$$B_i = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ b_{n1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Sütun vektörünün hesaplanması için Eşitlik 21'den faydalanılır.

$$b_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (21)$$

### 3.2. PROMETHEE Yöntemi

PROMETHEE (Perforence Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation) "Zenginleştirme Değerlendirme İçin Tercih Sıralaması Organizasyon Yöntemi" ile ifade edilen çok kriterli karar verme metodudur. Jean-Pierre Brans tarafından 1982 yılında geliştirilmiş, 1985 yılında Brans ve Vincke ikilisi tarafından gelişimi olgunlaşmış bir metottur (Genç, 2013). Çok kriterli karar verme metotları içerisinde en son geliştirilenlerden birisidir. Literatürde kullanılan çok kriterli karar verme metotlarında yaşanan zorlukları çözümlemek amacıyla geliştirilmiş analiz sonrası geometrik olarak gösterimi olan GAIA düzlemini kullanan ve bu sayede görsel olarak sonuçları açıklayan çok kriterli karar verme metodudur (Dağdeviren ve Eraslan, 2008). GAIA (Geometrical Analysis for Interactive Aid) düzlemi karar verme probleminde PROMETHEE sonuçlarının karar vericiye grafik olarak sunulan bir gösterimdir. GAIA düzlemi karar probleminde çelişen kriterlerin sonuçlarını karar vericiye bir düzlem üzerinde gösterilmesini ve daha kolay önem sıralamasının gerçekleşmesini sağlar (Taş ve diğerleri, 2017; Sarımehtmet ve diğerleri, 2020).

PROMETHEE yöntemi kullanılırken,  $(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$  alternatifleri ile  $(q_1, q_2, \dots, q_k)$  kriterleri kullanılarak karar matrisi oluşturulur. Oluşturulan bu karar matrisi sonrası her bir kriter için, 6 farklı tercih fonksiyonundan biri seçilerek (Olağan, U-tipi, V-tipi, Seviyeli, Doğrusal ve Gaussian), alternatifler bu tercih fonksiyonlarına göre ikili olarak karşılaştırılır. Alternatifler arasında tercih fonksiyonu  $P_j(a, b)$  genel görünümü Eşitlik 22'de gösterilmiştir.  $f(a)$  ve  $f(b)$  fonksiyonları değişkenlerin fonksiyonları ifade etmektedir.

$$P_j(a, b) = \begin{cases} 0, & f(a) \leq f(b) \\ p[f(a) - f(b)], & f(a) > f(b) \end{cases} \quad (22)$$

Seçilen tercih fonksiyonuna göre alternatiflerin ikili karşılaştırmaları yapılarak tercih indeksleri belirlenmektedir. Tercih indekslerinin belirlenmesi Eşitlik 23 ve 24'te gösterilmiştir.  $W_j$  kriterlerin etki ağırlıklarını ifade etmektedir.

$$\pi(a, b) = \sum_{j=1}^n W_j \cdot P_j(a, b) \quad (23)$$

$$\pi(b, a) = \sum_{j=1}^n W_j \cdot P_j(b, a) \quad (24)$$

Karar matrisine göre oluşan pozitif (çıkan) akımlar Eşitlik 25 ve negatif (giren) akımlar Eşitlik 26'ya göre belirlenir. Pozitif akım bir  $a$  alternatifinin diğer alternatifler üzerinde olan üstünlüklerini belirlerken, negatif akım diğer alternatiflerin  $a$  alternatifine sağladığı üstünlüğü göstermektedir.



$$\Phi^+(a) = \frac{1}{n-1}, \Sigma \pi(a, b), b \in A \quad (25)$$

$$\Phi^-(a) = \frac{1}{n-1}, \Sigma \pi(b, a), b \in A \quad (26)$$

Oluşturulan çözümlerler sonucunda GAIA düzleminde görselleştirilerek çözüme ulaşılabacaktır (Ekin ve Okutan, 2021).

#### 4. BULGULAR

Bu çalışmada, çok kriterli karar verme yöntemi kullanılarak verimlilik için en etkili bakım yöntemine karar verilmesi hedeflenmektedir. Uygulama gerçekleştirilirken PROMETHEE uygulaması çözümlerinde ihtiyaç duyulan kriterlerin etki ağırlıkları AHP metodu ile hesaplanarak elde edilen ağırlık değerleri kullanılmıştır. Değerlendirme işlemi belirlenen kriterlere göre 4 ayrı uzmanın tercihlerinin ortalaması alınarak yapılmıştır. AHP uygulaması sonucunda, bakım maliyetinin kriterler içerisinde %23,96 ile en yüksek önem ağırlığına sahip olduğu tespit edilmiştir. Bakım maliyeti kriterini, %18,45 ile bakıma kadar yapılan kilometre, %15,59 ile sürdürülebilirlik, %14,27 bakımın güvenli seyir süresine etkisi olarak hesaplanmıştır. Belirlenen 4 farklı kriter toplamda %72'lik kısmı oluşturmuştur. Tablo 4'te AHP uygulaması ile elde edilen bakım kriterlerinin etki ağırlıkları gösterilmiştir.

**Tablo 4. AHP uygulaması etki ağırlıkları sonucu**

<i>Bakım Kriterleri</i>	<i>Etki Ağırlıkları (%)</i>
Bakım Maliyeti	23,96
Bakıma Kadar Yapılan Km	18,45
Sürdürülebilirlik	15,59
Bakımın Güvenli Seyir Süresine Etkisi	14,27
Taşıtın Seferde Kalma Süresi	8,44
Arıza Oranı	6,94
Taşıtın Yaşam Ömrü	6,15
Personel İhtiyacı	3,14
Geçmiş Verilerin takibi	1,73
Malzeme Stok Maliyeti	1,33
<b>Toplam</b>	<b>100,00</b>

Bakım yöntemlerinin raylı ulaşım sistemlerinde verimlilik açısından önceliklendirmesi yapılırken, çok kriterli karar verme metodlarından olan PROMETHEE metodu tercih edilmiştir. Yapılan bu çalışmada, farklı bakım yöntemleri verimlilik açısından karşılaştırılarak bakım kriterleri belirlenmiştir. Her kriter için değerlendirme yapısına göre farklı değerlendirme birimleri kullanılmıştır. Değerlendirme işlemi uygulanırken, 4 ayrı uzman görüşüne başvurulmuştur. Kullanılan değerlendirme birimleri arasında, 9 seviye (1 – 9 aralığında seviyelendirme), 5 seviye (Çok Kötü, Kötü, Ortalama, İyi, Çok İyi), Etki (Çok Düşük, Düşük, Ortalama, Yüksek, Çok Yüksek) ve Km (Birimsel değerlendirme kriteri) birimleri bulunmaktadır. Tercihlerde geçerli yön belirlenirken verimliliği artıran yönün bakım kriterinde minimum ve maksimum olarak hangi tarafta olduğu belirlenmiştir. Bakım kriterlerinin değerlendirildiği tercih fonksiyonları, kriterlerin özelliklerine göre seviye, doğrusal ve olağan fonksiyonlar arasından seçilmiştir. Tablo 5'te analiz gerçekleştirilen yazılımdaki veri tanımlamaları gösterilmektedir.

Tablo 5. Visual PROMETHEE yazılımı veri tanımlamaları

Bakım Yöntemleri	Bakım Maliyeti	Bakıma Kadar Yapılan Km	Bakımın Güvenli Seyir Süresine Etkisi	Sürdürülebilirlik	Taşıtın Seferde Kalma Süresi	Arıza Oranı	Taşıtın Yaşam Ömrü	Personel İhtiyacı	Geçmiş Verilerin takibi	Malzeme Stok Maliyeti
Birim	9 Seviye	Km	9 Seviye	5 Seviye	5 Seviye	9 Seviye	9 Seviye	9 Seviye	5 Seviye	Etki
<b>Tercihler</b>										
Geçerli Yön	Min	Max	Max	Max	Max	Min	Max	Min	Max	Min
Etki Ağırlığı	23,96	18,45	14,27	15,59	8,44	6,94	6,15	3,14	1,73	1,33
Tercih Fonksiyonu	Seviye	Doğrusal	Seviye	Olağan	Seviye	Olağan	Seviye	Olağan	Olağan	Olağan
Q	0	2146	0	n/a	0	n/a	0	n/a	n/a	n/a
P	2,719	3646	3,4	n/a	2,6	n/a	3,62	n/a	n/a	n/a
S	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
<b>İstatistikler</b>										
En az	5	9000	4	2	1	2	3	4	2	3
En çok	9	15000	9	5	5	9	9	9	5	5
Ortalama	7,25	10500	6,1	3,1	3	6,13	6,38	6,75	3,38	4,13
Standart Sapma	1,299	1732	1,6	1,1	1,2	1,96	1,73	1,48	0,86	0,60
<b>Ölçüm / Değerlendirme</b>										
Periyodik Bakım	7	10000	7	Ortalama	Ortalama	6	7	7	İyi	Yüksek
İzleme Yöntemiyle Bakım	5	15000	9	Çok iyi	Çok iyi	2	9	5	Çok İyi	Ortalama
Düzeltilici Bakım	9	10000	4	Kötü	Kötü	8	5	9	Ortalama	Yüksek
Fırsat Bakımı	8	10000	6	İyi	İyi	6	7	7	Ortalama	Yüksek
Aktif Bakım	6	10000	7	İyi	İyi	5	8	7	Ortalama	Yüksek
Önleyici Bakım	7	9000	7	Ortalama	Ortalama	6	6	7	İyi	Yüksek
Yerinde Bakım	9	10000	5	Kötü	Kötü	7	6	8	Ortalama	Çok Yüksek
Operatör Bakımı	7	10000	4	Kötü	Çok Kötü	9	3	4	Kötü	Çok Yüksek

Yapılan çalışmada yazılım tarafında çözümler sağlandıktan sonra, bakım alternatiflerinin tüm kriterler için ayrı olacak şekilde diğer bakım alternatiflere göre üstünlüklerini gösteren akım değerleri Eşitlik 24 ve Eşitlik 25'e göre hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucu her kriter için alternatiflerin akım değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 6. Bakım alternatiflerinin kriterlere göre akım değerleri

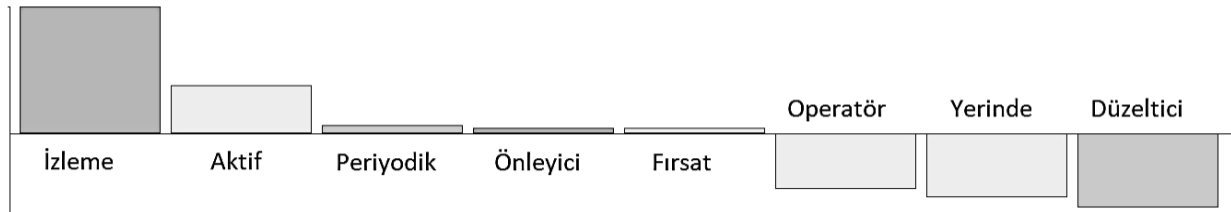
Alternatiflerin Akım Değerleri	Bakım	Bakıma Kadar Yapılacak Km	Bakımın Etkisi	Sürdürülebilirlik	Seferde Kalma	Arıza Oranı	Yaşam Ömrü	Personel İhtiyacı	Geçmiş Verilere Erişim	Malzeme Stok
Periyodik Bakım	0,0714	-0,1429	0,2143	0,0000	0,0000	0,1429	0,2143	0,0000	0,5714	0,1429
İzleme Yöntemiyle Bakım	0,7143	1,0000	0,7143	1,0000	0,7143	1,0000	0,6429	0,7143	1,0000	1,0000
Düzeltilici Bakım	-0,5714	-0,1429	-0,5000	-0,7143	-0,3571	-0,7143	-0,4286	-1,0000	-0,2857	0,1429
Fırsat Bakımı	-0,2857	-0,1429	-0,0714	0,5714	0,3571	0,1429	0,2143	0,0000	-0,2857	0,1429
Aktif Bakım	0,5000	-0,1429	0,2143	0,5714	0,3571	0,7143	0,4286	0,0000	-0,2857	0,1429
Önleyici Bakım	0,0714	-0,1429	0,2143	0,0000	0,0000	0,1429	-0,1429	0,0000	0,5714	0,1429
Yerinde Bakım	-0,5714	-0,1429	-0,2857	-0,7143	-0,3571	-0,4286	-0,1429	-0,7143	-0,2857	-0,8571
Operatör Bakımı	0,0714	-0,1429	-0,5000	-0,7143	-0,7143	-1,0000	-0,7857	1,0000	-1,0000	-0,8571

Bakım yöntemleri ile ilgili gerçekleştirilen çözümler sonucu, kriterlerin tamamının ele alınması ile ortaya çıkan bakım yönteminin tüm kriter ortalamalarına göre genel pozitif ( $\Phi^+$ ) ve genel negatif ( $\Phi^-$ ) akım değerleri hesaplanmıştır. Yapılan hesaplama sonucu genel pozitif ( $\Phi^+$ ) ve genel negatif ( $\Phi^-$ ) akım değerlerine göre ortalama akım değeri ( $\Phi$ ) elde edilmiştir. Tablo 7'de her bir bakım alternatifinin, tüm bakım alternatiflerine göre genel pozitif ( $\Phi^+$ ), genel negatif ( $\Phi^-$ ) ve ortalama akım değerleri ( $\Phi$ ) gösterilmiştir.

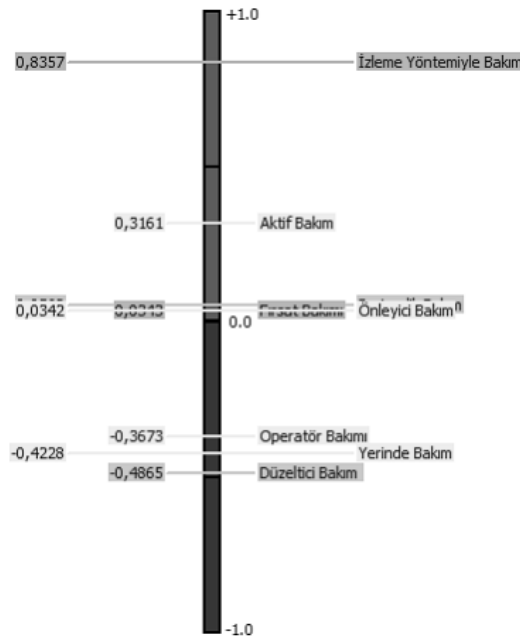
**Tablo 7. Bakım alternatiflerinin tüm alternatiflere göre genel ortalama, genel pozitif ve genel negatif yönlü akım değerleri**

Bakım Yöntemi	$\Phi$	$\Phi^+$	$\Phi^-$
İzleme Yöntemiyle Bakım	0,8357	0,8402	0,0045
Aktif Bakım	0,3161	0,4307	0,1146
Periyodik Bakım	0,0562	0,2539	0,1976
Önleyici Bakım	0,0343	0,2793	0,2450
Fırsat Bakımı	0,0343	0,2407	0,2064
Operatör Bakımı	-0,3673	0,0827	0,4500
Yerinde Bakım	-0,4228	0,0620	0,4848
Düzeltilici Bakım	-0,4865	0,0266	0,5131

Şekil 4'te PROMETHEE uygulaması sonucu elde edilen akım değerlerine göre hesaplanması sağlanan GAIA düzlemi grafiksel gösterimleri verilmiştir. Tercih edilmesi önceliklendirilen bakım yöntemleri pozitif yönlü olarak değerlendirilirken önceliklendirmede geride kalan bakım yöntemleri negatif yönlü olarak verilmiştir.

**Şekil 4. Bakım alternatiflerinin seçilme tercihlerinin GAIA düzleminde gösterimi**

Şekil 5'te PROMETHEE uygulaması sonucu elde edilen akım değerlerine göre hesaplanması sağlanan GAIA düzleminde akım değerleri gösterimi verilmiştir.

**Şekil 5. Bakım alternatiflerinin GAIA düzleminde akım değerleri gösterimi**

İncelenen bulgular sonucu 0,8357 genel ortalama akım değerine sahip olan "izleme yöntemi ile bakım" yöntemi tüm bakım yöntemleri içerisinde en öncelikli yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. 0,3161 ile "aktif bakım", 0,0562 ile "periyodik bakım", 0,0343 ile "önleyici bakım" ve 0,0343 ile "fırsat bakımı" pozitif yönlü genel ortalama akım değerine sahip bakım yöntemlerinden olduğu tespit edilmiştir. -0,3673 ile "Operatör Bakımı", -0,4228 ile "Yerinde Bakım" ve -0,4865 ile "Düzeltilici Bakım" uygulamaları negatif yönlü genel ortalama akım değerine sahip bakım yöntemlerinden olduğu tespit edilmiştir.

## 5. SONUÇ ve DEĞERLENDİRME

Raylı ulaşım sistemlerinde kullanılan bakım uygulamalarının ulaşım verimliliği bağlamında önceliklendirildiği bu çalışmada, günümüzde enerji kaynakları ile ilgili yaşanan sorunlar ve çevre kirliliği benzeri nedenler öncülüğünde verimliliğin önemli bir konu olduğu, bununla birlikte yeni kurulan sistemlerin yanı sıra mevcut sistemlerin verimlilik seviyelerinin artırılması için çalışmalar yapılması gerektiği anlaşılmıştır. Literatürde yapılan araştırmalarda, raylı ulaşım sistemleri ile birlikte hava yolu ulaşımı, deniz yolu ulaşımı ile ilgili ulaşım verimliliği çalışmalarının mevcut olduğu ve raylı ulaşım sistemleri özelinde bakım etkisi ile ilgili yeterli araştırmaların bulunmadığı belirlenmiştir. Ayrıca bakım uygulamalarının, sistem alım kriterleri, uzman personel istihdamı, kurumsal yapı, toplum bilinci, akıllı teknolojilerin kullanımı, farklı sistemler ile entegrasyon, yenilikçi yönelim, merkezi yönetim, planlama ve enerji teknolojisi benzeri başlıklar ile birlikte raylı ulaşım sistemleri üzerinde verimliliği etkileyen önemli bir parametre olduğu tespit edilmiştir. Bakım yöntemlerinin verimlilik ile en önemli ilişkisi, zaman bazlı olarak sistemlerde meydana gelen arıza artışı ile doğrudan ilgili olmasıdır.

Raylı ulaşım sistemlerinin konforlu ve arıza ortaya çıkarmadan yaşam ömrünü sürdürebilmesi için genellikle, periyodik bakım, izleme yöntemi ile bakım, düzeltici bakım, fırsat bakımı, aktif bakım, önleyici bakım, yerinde bakım ve operatör bakımı metotlarının kullanıldığı tespit edilmiştir. Ayrıca bakım uygulamalarının verimlilikleri incelenirken değerlendirilen, verimliliği etkileyen bakım kriterlerinin; bakım maliyeti, bakıma kadar yapılan kilometre, güvenli seyir süresine etki, sürdürülebilirlik, taşıtın seferde kalma süresi, arıza oranı, taşıtın yaşam ömrü, personel ihtiyacı, geçmiş veri takibi ve malzeme stok maliyeti olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmada elde edilen veriler, çok kriterli karar verme metotlarından olan PROMETHEE ile 4 ayrı uzman görüşü alınarak gerçekleştirilmiştir. PROMETHEE uygulaması için gerekli olan kriterlerin etki ağırlıkları Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) uygulanarak belirlenmiştir. AHP uygulaması sonucu, %23,96 oran ile bakım maliyetinin en yüksek etkiye sahip kriter olduğu tespit edilmiştir. Bakım maliyeti kriterini, %18,45 ile bakıma kadar yapılan kilometre, %15,59 ile sürdürülebilirlik, %14,27 ile bakımın güvenli seyir süresine etkisi, %8,44 ile taşıtın seferde kalma süresi, %6,94 ile arıza oranı, %6,15 ile taşıtın yaşam ömrü, %3,14 ile personel ihtiyacı, %1,73 ile geçmiş verilerin takibi, %1,33 ile malzeme stok maliyeti olarak belirlenmiştir.

PROMETHEE uygulaması sonucunda, izleme yöntemi ile bakım 0,8357 ortalama akım değeri ile ilk tercih edilmesi gereken bakım yöntemi olduğu, 0,3161 ortalama akım değeri ile aktif bakım, 0,0562 ortalama akım değeri ile periyodik bakım, 0,0343 ortalama akım değeri ile önleyici bakım ve 0,0343 ortalama akım değeri ile fırsat bakımının izleme yöntemi ile bakımı takip ettiği tespit edilmiştir. Negatif ortalama akım değerleri ortaya çıkan, -0,3673 ortalama akım değeri ile operatör bakımı, -0,4228 ortalama akım değeri ile yerinde bakım, -0,4865 ortalama akım değeri ile düzeltici bakım uygulamalarının tercih önceliğinin bulunmadığı tespit edilmiştir.

Yapılan çalışma raylı ulaşım sistemleri özelinde verimlilik başlığını, etkileyen kriterleri ve bakım uygulamalarının ulaşım verimliliği sıralaması bağlamında değerlendirilmesini sağlamıştır. Çalışma sonucu, bakım maliyetinin bakımı etkileyen en önemli kriter olduğu, yenilikçi yaklaşımlardan olan izleme yöntemi ile bakımın öncelikli bakım uygulaması olduğu ve gerekli bakım uygulamasının doğru gerçekleştirilmediği takdirde ortaya çıkan düzeltici bakımın tercih önceliğinde son sırada olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu çalışma ile akıllı raylı ulaşım sistemlerinde bakım yöntemlerinin verimlilik analizleri yapılarak hangi bakım yönteminin verimlilik açısından daha önemli olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuçlar ile kurum ve kuruluşların bakım konusunda verimliliği artırıcı yöntemlere öncelik vererek maliyetler açısından kazanım sağlamaları mümkündür. Bu çalışmada yapılan araştırmalar neticesinde elde edilen bilgilere göre raylı ulaşım sistemleri ve bakım ilişkisi ile ilgili çalışmaların yetersiz olduğu, bu alanda yeterli sayıda uzmanın bulunmadığı ve yenilikçi bakım türlerini uygulayan raylı sistem yapılarının beklenen seviyede olmadığı tespit edilmiştir. Bu nedenler ile sonraki çalışmalarda raylı sistemlerin verimlilik açısından bakım uygulamaları fiziksel olarak uygulanarak değerlendirilmesi ve bakım dışında farklı alanlarda verimliliğin incelenmesi hedeflenmelidir.

### Yazar Katkıları / Author Contributions

*Bahadır Furkan Kınacı:* Literatür taraması, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Veri Derleme, Analiz, Makale Yazımı-rijinal taslak *Cevat Özarpa:* Modelleme, Makale Yazımı-inceleme ve düzenleme *İsa Avcı:* Literatür taraması, Kavramsallaştırma, Metodoloji, Makale Yazımı-inceleme ve düzenleme

### Çatışma Beyanı / Conflict of Interest

Yazarlar tarafından herhangi bir potansiyel çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

**Fon Desteđi / *Funding***

Bu alışma herhangi bir resmi, ticari ya da kâr amacı gütmeyen organizasyondan fon desteği almamıştır.

**Etik Standartlara Uygunluk / *Compliance with Ethical Standards***

Yazarlar tarafından, çalışmada kullanılan araç ve yöntemlerin Etik Kurul izni gerektirmediği beyan edilmiştir.

**KAYNAKÇA**

- Alman Standartları Enstitüsü. (2019). "DIN 31051 - Fundamentals of Maintenance", GmbH, Berlin, Germany.
- Aydiner, A.S., Kubilay, B. (2022). "Türkiye'deki Bakım Yönetim ve Kestirimci Bakım Bilişim Sistemlerinin Firmalara Özgü Durumları Üzerine Bir Saha Araştırması", *Verimlilik Dergisi*, 1, 123-140.
- Bozkurt, Y. (2013). "Uçak Bakımında İnsan Faktörü İlişkili Göreceli Verimlilik", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Budai, G., Huisman, D. ve Dekker, R. (2004). "Scheduling Preventive Railway Maintenance Activities", *Econometric Institute Report EI 2004-41*.
- Dağdeviren, M., Eraslan, E. (2008). "PROMETHEE Sıralama Yöntemi ile Tedarikçi Seçimi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 69-75.
- Ekin, E., Okutkan, C. (2021). "PROMETHEE Yöntemi ile Tesis Yeri Seçim Problemine İlişkin Bir Uygulama", *Gaziantep Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 3(1), 46-58.
- Elden, B. (2020). "Demiryolu Bakım İzleme Sistemleri" Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
- Emovon, I., Norman, R.A., Murphy, A.J. (2018). "Hybrid MCDM Based Methodology for Selecting the Optimum Maintenance Strategy for Ship Machinery Systems", *Journal of Intelligent Manufacturing*, 29, 519-531.
- Erginer K.E. (2003). "Armatör İşlemelerinin Teknik Kabiliyetlerinin Arttırılmasında Bilgi Sistemleri Yaklaşımı ve Uluslararası Güvenlik Yönetimi (ISM) Uygulamaları", Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, İzmir.
- Erturgut, R., Koç Ustalı, N. (2021). "Kent İçi Raylı Ulaşım Performansını Değerlendirmede SWARA ve ARAS Yöntemleri İle Bir Model Önerisi", *Verimlilik Dergisi*, 3, 35-53.
- Faghihinia, E., Mollaverdi, N. (2012). "Building a Maintenance Policy Through A Multi-Criterion Decision-Making Model", *Journal of Industrial Engineering International*, 8(14), 1-15.
- García, S., García, J., García, M. (2021). "Development of a Maintenance and Spare Parts Distribution Model for Increasing Aircraft Efficiency", *Applied Sciences*, 11, 1333.
- Genç, T. (2013). "PROMETHEE Yöntemi ve GAIA Düzlemi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 15(1), 133-154.
- Hamurcu, M., Eren, T. (2018). "Transportation Planning with Analytic Hierarchy Process and Goal Programming", *International Advanced Researches and Engineering Journal*, 2(2), 92-97.
- Ighravwe, D.E., Oke, S.A. (2017). "A Multi-Hierarchical Framework for Ranking Maintenance Sustainability Strategies Using PROMETHEE and Fuzzy Entropy Methods", *Journal of Building Pathology and Rehabilitation*, 2(9), 1-18.
- International Electrotechnical Commission (2017). "IEC 60300-3-3 Dependability Management", Part 3-3: Life Cycle Costing Analysis- Application Guide.
- Kahya, E., Polat, O. (2007). "Bir İşletmenin Mekanik İşler Atölyesi'nde Oranlarla İş Gücü Verimlilik Yönetim Sistemi (WPMR) Tasarımı", *Verimlilik Dergisi*, 2, 9-36.
- Kant, B., Odabaş, M.S. (2019). "ERP Sistemlerinin Farklı Uygulama Alanlarında Kullanımının Kronolojik İncelenmesi". *Black Sea Journal of Engineering and Science*, 2 (3), 106-111.
- Kumar, U., Crocker, J., Knezevic, J., El-Haram, M. (2000). "Reliability, Maintenance and Logistic Support - A Life Cycle Approach", Kluwer Academic Publishers, Boston/Dordrecht/London.
- Kutlu, B.H. (2019). "Türkiye ve Avrupa Birliğinde Kent İçi Raylı Sistem Etkinliğinin Arttırılmasına Yönelik Yatırım Kriterleri Etkileşim Gücünün Belirlenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara
- Marquez, A.C., Moreu de Leon P., Fernandez J.F.G. (2009). "The Maintenance Management Framework", *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 15, 167-178.
- Nebati, E., Yürük, H., Kenar, Z. (2021). "Bir Otobüs İşletmesi İçin Tedarikçi Seçimi", *Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 4(1), 1-14.
- Oum, T.H., Yu, C. (1994). "Economic Efficiency of Railways and Implications for Public Policy: A Comparative Study of the OECD Countries Railways", *Journal of Transport Economics and Policy*, 28(2), 21-38.
- Özarpa, C., Kınacı, B.F. Avcı, İ. (2021). "Kent İçi Akıllı Ulaşımında Karma Çok Kriterli Karar Verme Yöntemi ile Yeni Hat Kurulumunun Belirlenmesi", *Kent Akademisi*, 14(4), 995-1006.
- Özarpa, C., Avcı, İ., Kınacı, B.F. (2021). "Akıllı Raylı Sistemlerde Kullanılan Alt Sistemlerin Kritik Seviye Analizi", *Demiryolu Mühendisliği*, 14, 143-153.
- Özcan, E., Gür, Ş., Eren, T. (2021). "A Hybrid Model to Optimize the Maintenance Policies in the Hydroelectric Power Plants", *Politeknik Dergisi*, 24(1), 75-86.

- Özdemir, S., Özcan, E.C. (2020). "AHP, COPRAS ve Tamsayı Programlama Entegrasyonu ile Demiryolu Araçlarında Bakım Planlaması", *Demiryolu Mühendisliği Dergisi*, 12, 1-12.
- Sarac, A., Batta, R., Rump, C.M. (2006). "A Branch-and-Price Approach for Operational Aircraft Maintenance Routing", *European Journal of Operational Research*, 175, 1850-1869.
- Sarımeahmet, B., Hamurcu, M., Eren, T. (2020). "Çok Kriterli Karar Verme: Kırıkkale YHT İstasyonu - Şehir Bağlantısının Sağlanması", *Demiryolu Mühendisliği*, 11, 26-40.
- Shafieea, M., Animahb, I. (2020). "An Integrated FMEA and MCDA Based Risk Management Approach to Support Life Extension of Subsea Facilities in High-Pressure–High-Temperature (HPHT) Conditions", *Journal of Marine Engineering & Technology*, 21(4), 189-204.
- Soba, M. (2012). "PROMETHEE Yöntemi Kullanarak En Uygun Panelvan Otomobil Seçimi ve Bir Uygulama", *Journal of Yasar University*, 28(7), 4708-4721.
- Solak, K., Öcalır, E.V. (2021). "Türkiye için Raylı Sistem Alternatifleri Seçiminin Çok Ölçütlü Değerlendirme Yöntemi ile Analizi", *Demiryolu Mühendisliği*, 14, 189-201.
- Taş, M., Özlemiş, Ş.N., Hamurcu, M. (2017). "Ankara'da AHP ve PROMETHEE Yaklaşımıyla Monoray Hat Tipinin Belirlenmesi", *JEBPIR*, 3(1), 65-89.
- Thun, J.H. (2006). "Maintaining Preventive Maintenance and Maintenance Prevention: Analysing the Dynamic Implications of Total Productive Maintenance", *System Dynamics Review*, 22(2), 163-179.
- Türk Standartları Enstitüsü (2018). "TS EN 50126-1 Demiryolu Uygulamaları - Güvenilirlik, Kullanılabilirlik, Bakım ve Güvenlik (RAMS) Belirleme ve Gösterme - Bölüm 1: Genel RAMS İşlemi".
- Uzun, A. (2011). "Bakım Planlaması Teknikleri ve RCM", Nobel Yayıncılık, Ankara.

