

**Akıllı Şehir Kapsamında Demiryollarında Kullanılan LPWAN Teknolojilerinin
İncelenmesi: Çok Kriterli Karar Verme Yöntemleri Uygulaması**

Eren KAMBER^{*}, Gonca Gül TÜRKİYILMAZ, Destan YÜZGÜLEN, Ufuk AYDOĞMUŞ, Hacer YUMURTACI AYDOĞMUŞ

*Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi, Rafet Kayış Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği
Bölümü, Antalya, Türkiye*

**eren.kamber@alanya.edu.tr*

(Alınış/Received: 04.06.2025, Kabul/Accepted: 03.11.2025, Yayımlama/Published: 20.01.2026)

Öz: Bu çalışmanın amacı, akıllı şehir kapsamında kritik bir öneme sahip bir bileşen olan akıllı ulaşım sistemlerinde kullanılabilecek en uygun LPWAN (Low Power Wide Area Network) teknolojilerinin değerlendirilmesidir. Özellikle demiryolu taşımacılığı gibi geniş ölçekli ve kritik altyapı sistemlerinde, bu teknolojilerin doğru seçimi ve uygulanması, akıllı ulaşımın etkinliğini doğrudan etkilemektedir. Akıllı ulaşım kapsamında uygulanacak olan LPWAN teknolojileri ile trafik güvenliği ile ulaşım verimliliğinin artırılması, bilgi akışının hızlandırılması ve kullanıcı memnuniyetinin sağlanması gibi konularda öncelikle iyileşmeler hedeflenmektedir. Çalışmada, şehirlerin sürdürülebilirlik ve teknolojik gelişmeler doğrultusunda yeniden şekillenmesi sürecinde, düşük enerji tüketimi ve geniş kapsama alanı gibi avantajları ile ön plana çıkan LPWAN teknolojilerinden LoRa, Sigfox, NB-IoT, Nwave, DASH7, Qowiso ve LTE-M teknolojileri incelenmiştir. Analiz sürecinde, çok kriterli karar verme yöntemlerinden Entropi ile kriter ağırlıkları belirlenmiş, ardından RAM ve CURLI-2 sıralama yöntemleri kullanılarak, çalışma kapsamında belirlenen kriterler doğrultusunda söz konusu teknolojilerin önem düzeyleri karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Araştırma sonuçlarında ise hem CURLI-2 hem de RAM yöntemleriyle yapılan analizler, demiryollarında LPWAN teknolojilerinden hangilerinin tercih edilmesi gerektiğine dair tutarlı ve karşılaştırmalı bulgular sunmakta, yöntemlerin doğrulayıcı nitelikte sonuçlar ürettiğini göstermektedir. Sonuç olarak, çalışma, akıllı ulaşım sistemlerinde kaynak kullanımını optimize eden ve yaşam kalitesini artıran LPWAN teknolojilerinin önceliklendirilmesini sağlayarak, karar vericilere stratejik planlama açısından önemli bir katkı sunmaktadır. Uzun vadede şehir planlamasında bu tür teknolojilere yönelik yatırımların artırılması, sürdürülebilir kentleşme hedefleri açısından daha rasyonel bir yaklaşım olacaktır.

Anahtar kelimeler: Sürdürülebilirlik, Akıllı ulaşım, LPWAN, RAM, CURLI-2, Entropi

**Investigation of LPWAN Technologies Used in Railways within the Scope of Smart Cities:
Application of Multi-Criteria Decision Making Methods**

Abstract: The objective of this study is to evaluate the most suitable LPWAN (Low Power Wide Area Network) technologies that can be used in intelligent transportation systems, which are a critical component of smart cities. Especially in large-scale and critical infrastructure systems such as rail transportation, the correct selection and application of these technologies directly affects the effectiveness of intelligent transportation. LPWAN technologies, which will be implemented within the scope of intelligent transportation, primarily aim to improve traffic safety, accelerate information flow, increase transportation efficiency and ensure user satisfaction. In this study, LPWAN technologies such as LoRa, Sigfox, NB-IoT, Nwave, DASH7, Qowiso, and LTE-M, which stand out due to their advantages such as low energy consumption and wide coverage area, were examined in the context of cities being reshaped in line with sustainability and technological developments. During the analysis process, the weights of criteria were determined using the Entropy method from multi-criteria decision-making methods, and then the RAM and CURLI-2 ranking methods were used to compare and analyze the importance levels of the technologies in question according to the determined criteria within the scope of the study. The research results show that both the CURLI-2 and RAM analyses provide consistent and comparative findings on which LPWAN technologies should be preferred in intelligent transportation systems, demonstrating that the methods

Atıf için/Cite as: E. Kamber, G.G. Türkiylmaz, D. Yüzgülen, U. Aydoğmuş, H. Yumurtacı Aydoğmuş, "Akıllı şehir kapsamında demiryollarında kullanılan LPWAN teknolojilerinin incelenmesi: çok kriterli karar verme yöntemleri uygulaması" *Demiryolu Mühendisliği*, sy. 23, no. 1713150, 2026, doi: 10.47072/demiryolu.1713150

produce valid results. In conclusion, the study provides an important contribution to decision makers in terms of strategic planning by prioritizing LPWAN technologies that optimize resource use and improve quality of life in intelligent transportation systems. In the long term, increasing investments in such technologies in urban planning would be a more rational approach in terms of sustainable urbanization goals.

Keywords: Sustainability, Smart transportation, LPWAN, RAM, CURLI-2, Entropy

1. Giriş

Akıllı şehir kavramı ilk olarak, 1990'lı yılların başlarında şehir kelimesinin önüne "akıllı" ifadesinin eklenmesiyle başlamıştır ancak, bu kavramın tarihçesinde 1880'lerin ortalarında Amerika Birleşik Devletleri akıllı şehir kavramını “kendini yönetebilen yeni kent oluşumu” olarak tanımlamıştır. Sürdürülebilirliğin ve yenilikçiliğin birleşmesiyle “akıllı şehir” kavramı ortaya çıkmış ve bu çerçevede “akıllı ulaşım” sistemleri gibi alt bileşenler de gelişim göstermeye başlamıştır [1]. Akıllı ulaşım sistemleri (AUS), bilgi ve iletişim alanlarındaki teknolojik yeniliklerle birlikte ulaşımın ağlarını birleştirerek şehirde yaşayanların hayatlarını kolaylaştırmayı hedeflemiştir. Ulaşımın güvenli ilerlemesi, verimli olması ve çevre dostu bir düzeye gelmesi amacıyla harekete geçilmiş ve bu amaç doğrultusunda optimizasyon çalışmaları yapılmıştır. Akıllı ulaşım sistemleri aynı zamanda sürdürülebilirlik alanıyla da yakından ilişkilendirilmiş olup kalkınma hedefleri doğrultusunda akıllı dönüşüm süreçlerinde önemli bir rol oynamaktadır.

Türkiye’de AUS, başta trafik güvenliği olmak üzere farklı ulaşım türleriyle entegre edilerek hızla yaygınlaştırılmıştır. Bu sistemler aracılığıyla bilgi akışının hızlandırılması, ulaşım verimliliğinin artırılması ve kullanıcı memnuniyetinin sağlanması hedeflenmiştir [2]. AUS, hem ulaşım ağlarının daha verimli ve güvenli işletilmesini sağlamak hem de çevresel sürdürülebilirliği desteklemek amacıyla küresel ölçekte gelişimini sürdürmektedir. Bu alandaki iş birlikleri ve teknolojik yeniliklerle yapılan çalışmalar ile daha kapsamlı hale getirilmektedir [3]. İnternete bağlı nesnelerin kullanımının hızla artması ve teknolojisinin gelişmesi, yüksek enerji ihtiyacına gerek duymaksızın nesnelerin hareketli hale gelmesini sağlayan kablosuz iletişim teknolojisi olan LPWAN (düşük güç geniş alan ağı/low power wide area network) sistemlerini ortaya çıkarmıştır [4]. LPWAN teknolojilerinin temel hedefleri, daha yüksek veri hızları ve daha düşük gecikme hedefleyen diğer teknolojilerle karşılaştırıldığında, düşük enerji gereksinimleri ve düşük maliyetle daha geniş kapsama alanı sağlamaktır [5].

Demiryolu taşımacılığı, sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin temel bileşenlerinden biri olarak hem çevresel hem de ekonomik açıdan avantajlı çözümler sunmaktadır. Ancak artan kentleşme, yolcu ve yük taşımacılığındaki dinamik ihtiyaçlar ve dijitalleşen altyapı talepleri, demiryolu ağlarında daha akıllı, güvenli ve verimli sistemlerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Düşük enerji tüketimi ve geniş kapsama alanı gibi avantajlarıyla öne çıkan LPWAN teknolojileri, demiryolu operasyonlarının dijital dönüşümünde kritik bir rol üstlenmektedir. Hat bakımından sensör verilerinin toplanması, lokomotif takibi, yük konteynerlerinin izlenmesi ve yolcu bilgilendirme sistemleri gibi pek çok alanda LPWAN çözümleri, gerçek zamanlı veri akışını mümkün kılarak operasyonel verimliliği artırmakta ve güvenlik düzeyini iyileştirmektedir [6], [7]. Bu çalışma, LPWAN teknolojilerinin demiryolu sistemlerinde akıllı ulaşım çerçevesinde nasıl etkin biçimde kullanılabileceğini çok kriterli karar verme (ÇKKV) yaklaşımlarıyla değerlendirmeyi amaçlamaktadır.

Literatürde yer alan kablosuz iletişim teknolojilerinin seçimiyle ilgili yapılan ÇKKV çalışmalarından Juneja vd. [8], 11 kablosuz iletişim teknolojisini yedi parametre doğrultusunda değerlendirmişlerdir. Prithiviraj vd. [9] ise kesintisiz erişim ve en iyi hizmet kalitesi sağlamak için radyo erişim teknolojileri arasından en iyi ağları seçmek amacıyla, çok kriterli bulanık tabanlı

bir algoritma kullanarak gelişmiş bir dikey devir karar verme programı sağlamıştır. LPWAN teknolojileri seçimine odaklanan çalışmalarından Ochoa-Zezzatti vd. [10], akıllı, otonom ve heterojen cihazları bağlamak için verimli çözümler sunan LPWAN teknolojilerini kapsamlı ve karşılaştırmalı bir şekilde TOPSIS yöntemiyle ele almıştır. Martinez vd. [11], hayvancılık sektörüne odaklanmışlar, Sigfox, LoRa ve NB-IoT teknolojilerini karşılaştırmalı şekilde kırsal alanlarda hayvancılığın geliştirilmesi amacıyla IoT teknolojisinin kullanımında AHP yöntemiyle uygulama ve seçim yapmıştır. Özetle literatür incelendiğinde kablosuz iletişim teknolojilerinin ÇKKV yöntemleriyle değerlendirilmesine yönelik çalışmalar bulunmakta olup, doğrudan LPWAN teknolojilerinin demiryollarında değerlendirildiği bir çalışma bulunmamaktadır. Demiryolları için ÇKKV yaklaşımıyla ilk defa uygulama yapılmasıyla çalışma literatüre katkı sağlamaktadır. Çalışmada, akıllı ulaşım sistemlerinin en yenilikçi bileşenlerinden biri olan LPWAN teknolojileri incelenmiştir. LoRa, Sigfox, NB-IoT, Nwave, DASH7, Qowisio ve LTE-M olmak üzere yedi farklı LPWAN teknoloji türü, düşük enerji tüketimi ve geniş kapsama alanı gibi avantajlarıyla AUS'ne önemli katkılar sağlamaktadır. Bu teknolojiler arasından en uygun alternatiflerin belirlenmesi sürecinde ÇKKV yaklaşımı kapsamlı bir değerlendirme süreci sunmaktadır.

ÇKKV yöntemleri aracılığıyla, alternatifler sistematik şekilde değerlendirilerek en uygun alternatifin belirlenmesi sağlanmaktadır, bu doğrultuda çalışmada ÇKKV yöntemlerinden güncel ve etkili metotlar olan Entropi, RAM (Root Assessment Method) ve CURLI-2 (Collaborative Unbiased Rank List Integration) tercih edilmiştir. Söz konusu sıralama yöntemlerinin uygulanmasında ilk olarak, karar kriterlerinin önem derecelerinin nesnel biçimde belirlenebilmesi için Entropi yöntemiyle kriter ağırlıkları hesaplanmıştır. Bu sayede her bir kriterin karar sürecine olan etkisi, istatistiksel temellere dayalı olarak değerlendirilmiştir. Ardından, alternatiflerin sıralanması için RAM ve CURLI-2 yöntemleri kullanılmıştır. Temel amacı alternatifler arasından en uygun olanı seçmek olan RAM yöntemi sezgisel olmayan sonuçlara daha rasyonel bir yaklaşım sunmaktadır. CURLI-2 yöntemi ise alternatifleri farklı kriter aşamalarıyla bütünsel olarak analiz etmekte ve sıralama yapmaktadır. Yapılan değerlendirmeler sonucu, akıllı ulaşım sistemlerinin verimliliğini artıracak en uygun LPWAN teknolojilerinin belirlenmesi çalışmada hedeflenmiştir.

2. Metot

LPWAN teknolojilerinin değerlendirilmesinde literatürde ve teknolojilerin teknik özelliklerini gösteren dökümanlarda farklı etkenlerin göz önünde bulundurulması gerektiği görülmüştür. Örneğin bant genişliği, maliyet gibi etkili kriterler mevcuttur. Bu doğrultuda farklı kriterlerin dikkate alınarak tercih yapılması önem taşımaktadır. Bu seçim probleminin farklı kriter ve alternatifler barındıran yapısı ÇKKV problemi olarak ele alınmasına imkân sağlamaktadır. Bu çalışmada, LPWAN teknolojilerinin değerlendirilmesine yönelik olarak objektif kriter ağırlıklandırması ve ÇKKV yaklaşımları bütüncül bir yapı içerisinde uygulanmıştır. Araştırma kapsamında Entropi yöntemi ile kriter ağırlıkları belirlenmiş, ardından karar alternatiflerinin sıralanması için RAM ve CURLI-2 yöntemleri kullanılarak LPWAN teknolojileri performansları açısından sıralanmıştır.

RAM yöntemi, mevcut ÇKKV yöntemlerinin bir karar probleminde güvenilir bir sonuç elde etme konusundaki eksikliklerinden ve ayrıca karar vericinin olası hesaplama hatalarından kaçınabilmek için tüm karar verme sürecini anlaması gerekliliğini vurgulamaktadır. RAM'in avantajları olarak, sıralama sonucu ek parametrelerden etkilenmesi, fayda ve maliyet yönlü kriterlerin herhangi bir dönüşüm olmaksızın aynı anda değerlendirilebilmesi ve çiftler halinde karşılaştırmaların kullanılmasına ihtiyaç duyulmaması sıralanmaktadır [12]. Alternatiflerin sıralanmasında CURLI-2 yöntemi, verileri normalleştirmeye gerek kalmadan karmaşıklığı ortadan kaldıran hızlı ve basit olmasıyla avantaj sunmaktadır [13]. Üstünlükleri göz önünde bulundurularak çalışmada adı geçen yöntemlerle uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Alt başlıklar

halinde Entropi, RAM ve CURLI-2 yöntemlerinin temel tanımları ve uygulama adımları sunulmuştur.

2.1. Entropi yöntemi

Bilgi teorisi temeline dayanan Entropi yöntemi, kriterlerin ağırlıklarının veriye bağlı olarak nesnel şekilde belirlenmesini sağlar. Kriterler arasındaki değişkenlik arttıkça, bilgi katkısı da yükseldiğinden bu kriterlere daha yüksek ağırlık verilir. Yöntem, öznel etkileri en aza indirerek çok kriterli karar verme süreçlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir [14]. Bakır ve Atalık [14] tarafından özetlenen uygulama adımları aşağıda verilmiştir:

Adım 1: Karar matrisi oluşturulur. Bu aşamada alternatifler ‘*i*’, kriterler ‘*j*’ harfi ile gösterilir ve X_{ij} karar matrisi elde edilir.

Adım 2: Fayda ve maliyet kriterlerine göre Denklem 1 ve 2 yardımıyla gerçekleştirilen hesaplamalar sonucunda $R=[r_{ij}]$ normalize edilmiş karar matrisi elde edilir.

$$r_{ij} = \frac{X_{ij}}{\sum_{i=1}^m X_{ij}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

$$r_{ij} = \frac{\min X_{ij}}{X_{ij}} \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (2)$$

Adım 3: Kriterlere ilişkin entropi değeri Denklem 3’te gösterildiği şekilde hesaplanır. $k = \ln(n)^{-1}$ entropi katsayısını, r_{ij} normalize edilen değerleri, e_j entropi değerini göstermektedir.

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n r_{ij} * \ln(r_{ij}) \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \text{ ve } j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$

Adım 4: Bilginin farklılaşma derecesi olan d_j Denklem 4’te gösterildiği şekilde hesaplanır.

$$d_j = 1 - e_j, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

Adım 5: Ağırlıkların hesaplanması Denklem 5’te gösterilmiştir.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j}, \sum_{j=1}^n w_j = 1, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (5)$$

Burada hesaplanan w_j değeri kriterlerin önem düzeylerinin göstergesi olan ağırlık değerlerini ifade etmektedir. Entropi olasılık değerlerinin toplamı daima 1’e eşittir.

2.1. RAM yöntemi

RAM, sistem performansını etkileyen temel unsurlar ile bu unsurların kriterler üzerindeki etkilerini analiz etmeye yönelik geliştirilmiş bir yöntemdir. Bu yöntem, sistem başarısızlıklarının kök nedenlerini belirleme ve kritik bileşenleri tanımlama amacı taşır. Bu çalışmada, RAM yöntemi LPWAN teknolojilerindeki sıralamasını belirlemek için kullanılmıştır. Entropi yöntemiyle hesaplanan kriter ağırlıkları RAM analizine girdi olarak aktarılmış ve en uygun teknoloji seçimi için sıralama yapılmıştır. Yöntemin uygulama adımları aşağıda verilmiştir [12]:

Adım 1: Karar matrisini doğrusal toplam normalizasyon formülüne göre normalize edilir.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

Adım 2: Kriterlerin ağırlıkları kullanılarak ağırlıklı normalize karar matrisi hesaplanır.

$$y_j = r_{ij} \times w_j \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

Adım 3: i 'nci alternatifin faydalı ve faydalı olmayan kriterlerine ait ağırlıklı normalize edilmiş puanlarının toplamı Denklem 8 kullanılarak hesaplanır. S_{+i} fayda yönlü kriterlerin ağırlıklı normalize edilmiş değerlerinin toplamını, S_{-i} ise maliyet yönlü kriterlerin ağırlıklı normalize edilmiş değerlerinin toplamını ifade eder.

$$S_{+i} = \sum_{j=1}^n y_{+ij}, \quad S_{-i} = \sum_{j=1}^n y_{-ij} \quad (8)$$

Adım 4: Denklem 9'da verilen birleştirme (toplama) fonksiyonunu kullanarak her bir alternatifin toplam (genel) puanını belirlenir.

$$RI_i = \sqrt[2+S_{-i}]{2 + S_{+i}} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (9)$$

Adım 5: Alternatifler, RI_i değerini kullanarak sıralanır. Daha büyük bir RI_i , A_i 'nin daha yüksek önceliğe sahip olduğunu gösterir.

2.3. CURLI-2 yöntemi

Alternatiflerin sıralanmasında kullanılan CURLI-2 yöntemi, verileri normalleştirmeye gerek kalmadan karmaşıklığı ortadan kaldıran hızlı ve basit olmasıyla avantaj sunmaktadır [13]. Yöntemin uygulanmasında izlenen adımlar şu şekildedir [13]:

Adım 1: İlk aşamada, karar verme problemine ilişkin veriler bir karar matrisi içerisinde düzenlenir. İlk adım olarak m alternatif ve n kriter içeren bir karar matrisi oluşturulur.

Adım 2: Her bir kriter için ayrı bir puanlama matrisi oluşturulur. Bu matrisler, alternatiflerin ikili karşılaştırmalarına dayanır. Bir kriterdeki puanlama kuralları şu şekildedir:

- i . alternatifin j . alternatiften daha iyi performans gösterdiği durumlarda, (i, j) hücresine -1 atanır.
- i . alternatifin j . alternatiften daha kötü performans gösterdiği durumlarda, (i, j) hücresine 1 atanır.
- i . ve j . alternatiflerin eşit performans gösterdiği durumlarda, (i, j) hücresine 0 atanır matrisin köşegenine ($i = j$) 0 atanır.
- Ters fayda olan durumlarda ise verilen kuralların tam teri biçimi geçerlidir.

Adım 3: Her kriter için oluşturulan puan matrisleri (PA), Denklem 10 kullanılarak birleştirilir. Sonuçta, tüm kriterlere göre puan matrislerini bir araya getiren bir matris elde edilir; bu matrise PA matrisi denmektedir.

$$S_i = \sum_{j=1}^n S_i^j, \quad i = 1 \div m \quad (10)$$

Adım 4: Son olarak, PA matrisindeki her bir alternatifin toplam puanı hesaplanır ve alternatifler bu puanlara göre sıralanır. En düşük toplam puana sahip olan alternatif, en iyi alternatif olarak belirlenir.

3. Bulgular

LPWAN teknolojilerinin akıllı ulaşım sistemlerindeki uygulanabilirliğini değerlendirmek amacıyla kriterler, literatürde öne çıkan teknik avantajlar esas alınarak belirlenmiştir. Bu kapsamda, enerji verimliliği, uzun menzil, düşük maliyet ve sınırlı bant genişliği gibi özelliklere odaklanan çalışmalar incelenmiştir [10], [15], [16], [17], [18], [19], [20], [21]. Sigfox, LoRa, DASH7, NB-IoT, Nwave, Qowisio, LTE-M teknolojilerine ilişkin üretici dokümanları, standart belgeler ve teknik forum içerikleri incelenerek alternatifler ile ilgili veriler belirlenmiştir. Bu kapsamda; veri paket uzunluğu, modül maliyeti, frekans, maksimum veri hızı, menzil, bant genişliği ve pil ömrü gibi teknik parametreler esas alınmıştır (Tablo 1). Belirlenen bu yedi kriter, hem yüksek veri iletimine ihtiyaç duyan uygulamalar hem de düşük enerji tüketimi gerektiren sabit sensör sistemleri için karşılaştırma imkânı sunmaktadır. Tüm alternatif teknolojiler bu kriterler doğrultusunda değerlendirilmiştir.

Tablo 1. LPWAN teknolojileri seçim kriterleri

Kriter Adı	Kriter Yönü	Açıklama
Bant Genişliği (bps)	Fayda	Bant genişliği, her bir özel uygulama için saniye başına bit cinsinden ölçülen gerekli veri aktarım hızıyla tanımlanmaktadır [22].
Frekans (hz)	Fayda	Frekans, Hertz (Hz) cinsinden, saniyedeki olay veya döngü sayısı olarak tanımlanır [23].
İndirme Hızı (bps)	Fayda	İndirme hızı ise, verilerin kullanıcı tarafından belirlenen sunucudan çekilip alınabilme hızının bayt/saniye (bps) cinsinden ifadesidir. Daha yüksek indirme hızları tercih edilir [24]. Merkez ağ geçidinin, gerektiğinde her bir düğüme mesaj göndermesine veya süreç içinde saha cihazının çalışabilirliğini belirleyen bir sinyal olarak kullanılmasına olanak tanır [10]
Yükleme Hızı (bps)	Fayda	Yükleme hızı, verilerin kullanıcının cihazlarından uzak veya yerel sunucuya aktarılma hızının bayt/saniye (bps) cinsinden ifadesidir. Daha yüksek yükleme hızları tercih edilir [24].
Modül Maliyeti	Maliyet	Proses içerisinde tek bir ünitenin kurulumu ve bakımı olarak verilmiştir [10]
Menzil (kırsal/km)	Fayda	Harekât menzili hem uzun menzilli hem de kısa menzilli haberleşmeyi gerektirir [21].
Pil Ömrü (yıl)	Fayda	LPWAN'lar kaynak açısından kısıtlı ağlardır ve uzun pil ömrü için kritik gereksinimlere sahiptirler [21].

Bu çalışmada, akıllı ulaşım sistemlerinin gereksinimlerine en uygun LPWAN teknolojisinin belirlenmesi amacıyla, nesnel ve çok kriterli bir değerlendirme yaklaşımı benimsenmiştir. Bu doğrultuda, ilk aşamada karar kriterlerinin göreceli önem düzeylerinin belirlenmesi için bilgi teorisine dayalı Entropi yöntemi kullanılmış; böylece her bir kriterin veri seti üzerindeki varyasyonuna göre hesaplanan ağırlıkları nesnel biçimde elde edilmiştir. Ardından, bu ağırlıklar doğrultusunda yedi farklı LPWAN teknolojisi, performans ölçütlerine göre karşılaştırılmış ve sıralanmıştır. Sıralama işlemi için literatürde giderek daha fazla kabul gören iki yenilikçi çok kriterli karar verme yöntemi olan RAM ve CURLI-2 birlikte uygulanmıştır.

RAM yöntemi, karar alternatiflerinin fayda ve maliyet yönlü kriterler temelinde normalize edilmesini sağlayarak, her bir alternatifin genel performans skorunu hesaplamaya odaklanmıştır. Bu sayede, her teknolojinin pozitif ve negatif ideal çözümlere olan yakınlığı esas alınarak bir sıralama elde edilmiştir. Öte yandan, CURLI-2 yöntemi ise farklı kriterlerin ikili karşılaştırmalarla bütünleştirilmesine olanak sağlayarak, daha yapısal bir sıralama üretmiş ve sistematik belirsizliklerin karar sürecine olan etkisini azaltmıştır.

Tüm analizler Microsoft Excel programı kullanılarak gerçekleştirilmiş olup, veri matrisi düzenlemesinden normalizasyon işlemlerine, ağırlıklandırmadan sıralama hesaplamalarına kadar her aşama dikkatli biçimde yapılandırılmıştır. Excel'in işlevsel olanakları sayesinde hem sayısal doğruluk hem de yöntemsel şeffaflık sağlanmış, analiz süreçleri kolaylaştırılmış ve elde edilen bulguların yeniden üretilebilirliği garanti altına alınmıştır. Bu yönüyle çalışma hem metodolojik derinliğe hem de pratik faydaya sahip olup, karar destek sistemlerinin tasarımı açısından örnek teşkil etmektedir. Çalışmada karşılaştırmaya tabi tutulan yedi LPWAN teknolojisine ait teknik parametreler Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Kriter ve alternatifler (karar matrisi)

Alternatif \ Kriter	Bant Genişliği	Frekans	İndirme Hızı	Yükleme Hızı	Modül Maliyeti	Menzil	Pil Ömrü
Qowiso	100	891,5	100	100	2	15	11
Nwave	100	891,5	100	100	2	10	11
Sigfox	100	891,5	350	600	1	10	5
LoRa	50	891,5	250	260	2	15	10
LTE-M	100	800	100	100	2	11	10
NB-IoT	60	800	106	790	3	22	10
DASH7	166,667	869	555	960	2	5	10

Tablo 2'de verilen teknik veriler doğrultusunda, her bir kriterin karar sürecine olan etkisini nesnel biçimde belirlemek amacıyla Entropi yöntemi uygulanmıştır. Bu yöntemde, alternatifler arasında daha fazla varyasyon gösteren kriterler daha yüksek bilgi düzeyine sahip sayıldığından daha yüksek ağırlıklarla değerlendirilmiştir. Hesaplanan kriter ağırlıkları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Entropi yöntemi ile hesaplanan kriter ağırlıkları

Kriter	Bant Genişliği	Frekans	İndirme Hızı	Yükleme Hızı	Modül Maliyeti	Menzil	Pil Ömrü	Toplam
e_j	0,968	0,999	0,877	0,827	0,972	0,959	0,988	6,590
d_j	0,032	0,001	0,123	0,173	0,028	0,041	0,012	0,410
w_i	0,079	0,001	0,300	0,423	0,068	0,099	0,029	1

Entropi yöntemi ile yapılan analiz sonucunda, her bir kriterin alternatifler arasındaki varyasyonuna bağlı olarak bilgi düzeyleri (e_j), bilgi miktarları (d_j) ve normalize edilmiş ağırlık değerleri (w_j) hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

En düşük entropi değeri $e_j=0,827$ ile yükleme hızı kriterine ait olup, bu durum söz konusu kriterin alternatifler arasında en yüksek bilgi değerine ($d_j=0,173$) sahip olduğunu göstermektedir. Buna bağlı olarak, bu kriter en yüksek ağırlık ($w_j=0,423$) atanmıştır. Frekans kriteri $e_j=0,999$ değeri ile sistemdeki bilgi katkısı en düşük olan kriter olmuş ve yalnızca $w_j=0,001$ ağırlığı ile değerlendirilmiştir. Elde edilen ağırlıklara göre; yükleme hızı (%42,3), indirme hızı (%30,0) ve bant genişliği (%7,9) kriterleri, karar sürecinin büyük kısmını oluşturmaktadır.

Entropi yöntemi ile hesaplanan ağırlıklar kullanılarak, RAM yöntemi uygulanmış ve her bir LPWAN teknolojisi için toplam skor değerleri hesaplanmıştır. RAM yöntemi, alternatiflerin her bir kriter göre normalize edilmiş değerlerini ve ağırlıklarını dikkate alarak sıralama yapmaktadır. Elde edilen sonuçlar Tablo 4'te sunulmaktadır.

Tablo 4. RAM metodu ile hesaplanmış alternatifler

Alternatif	Qowiso	Nwave	Sigfox	LoRa	LTE-M	NB-IoT	DASH7
$Si+$	0,0673	0,0617	0,1797	0,1131	0,0624	0,1715	0,2758
$Si-$	0,0098	0,0098	0,0049	0,0098	0,0098	0,0147	0,0098
RI	4,3044	4,2809	4,7694	4,4980	4,2836	4,7694	5,2209
Normalize	0,0270	0	0,6294	0,2446	0,0032	0,5001	1

RI Sıralama	5	7	2	4	6	3	1
-------------	---	---	---	---	---	---	---

Normalize edilmiş göreceli önem (RI) değerlerine göre, DASH7 teknolojisi RI=1,000 ile en yüksek skoru alarak ilk sırada yer almıştır. Bu sonuç, DASH7'nin pozitif ideal çözüme en yakın, negatif ideal çözümden ise en uzak alternatif olduğu görülmektedir. Bu nedenle en yüksek önceliğe sahip teknoloji olarak sıralamanın ilk sırasında yer almıştır. Sigfox ve NB-IoT teknolojileri sırasıyla ikinci ve üçüncü sırada yer alarak görece yüksek performans sergilemiştir.

Buna karşılık, Nwawe ve LTE-M teknolojileri en düşük RI değerlerini alarak sırasıyla yedinci ve altıncı sırada yer almıştır. Özellikle Nwawe'nin bazı kriterlerde pozitif ideale yakın olmasına rağmen düşük ağırlıklı kriterlerde yetersiz kalması, genel sıralamada dezavantaj oluşturmuştur. Elde edilen sonuçlar, alternatiflerin güçlü ve zayıf yönlerini dengeleyen çok kriterli karar verme yaklaşımının, karar sürecine nesnel katkı sağladığını göstermektedir.

RAM yöntemiyle elde edilen sıralamaların farklı sıralama mantıklarıyla desteklenmesi amacıyla, literatürde yer alan CURLI-2 yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yöntem, alternatiflerin birden fazla sıralama sonucu üzerinden değerlendirilmesiyle daha dengeli ve bütüncül bir sıralama elde edilmesini sağlar. CURLI-2 yöntemi, her alternatifin önem düzeyini (RI) esas alarak bu değerleri normalize eder ve karşılaştırmalı sıralama skorlarını hesaplar. Elde edilen skorlar kullanılarak nihai sıralama oluşturulmaktadır.

Yöntemde, her bir kriter için ikili karşılaştırmalara dayalı hesaplamalar yapılmaktadır. Bu hesaplama sürecine ait örnek uygulamalar Tablo 5 ve Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 5. CURLI-2 yöntemi ile Modül Maliyeti kriteri için puanlama matrisi

Alternatif	Qowiso	Nwawe	Sigfox	LoRa	LTE-M	NB-IoT	DASH7
Qowiso	0	0	1	0	0	-1	0
Nwawe	0	0	1	0	0	-1	0
Sigfox	-1	-1	0	-1	-1	-1	-1
LoRa	0	0	1	0	0	-1	0
LTE-M	0	0	1	0	0	-1	0
NB-IoT	1	1	1	1	1	0	1
DASH7	0	0	1	0	0	-1	0

Tablo 6. CURLI-2 yöntemi ile Bant Genişliği kriteri için puanlama matrisi

Alternatif	Qowiso	Nwawe	Sigfox	LoRa	LTE-M	NB-IoT	DASH7
Qowiso	0	0	0	-1	0	-1	1
Nwawe	0	0	0	-1	0	-1	1
Sigfox	0	0	0	-1	0	-1	1
LoRa	1	1	1	0	1	1	1
LTE-M	0	0	0	-1	0	-1	1
NB-IoT	1	1	1	-1	1	0	1
DASH7	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0

Yapılan hesaplamalar sonucunda PA (Performans Ağırlığı) matrisi elde edilmiştir. Alternatif LPWAN teknolojilerine ait normalize edilmiş RI değerleri, kriter bazlı puanlamalar ve nihai sıralama sonuçları detaylı biçimde Tablo 7'de sunulmaktadır.

Tablo 7. CURLI-2 yöntemi ile alternatif LPWAN teknolojilerinin sıralaması

Alternatif	Qowiso	Nwawe	Sigfox	LoRa	LTE-M	NB-IoT	DASH7	Toplam
Qowiso	0	-1	1	0	-3	-3	0	-6
Nwawe	1	0	2	1	-3	-3	0	-2
Sigfox	-1	-2	0	-2	-2	-1	1	-7
LoRa	0	-1	2	0	-3	0	1	-1

LTE-M	3	1	2	3	0	-1	3	11
NB-IoT	1	1	1	0	-1	0	4	6
DASH7	0	0	-1	-1	-3	-4	0	-9

Tablo 7’de sunulan toplam puanlara göre, DASH7 teknolojisi -9 değeriyle en düşük skoru alarak en iyi alternatif olarak belirlenmiştir. Bu durum, özellikle düşük modül maliyeti ve kısa menzil gibi kriterlerde sağladığı avantajlara işaret etmektedir. Aldığı 11 puan ile en yüksek değere sahip olan LTE-M teknolojisi ise son sırada yer almıştır. LTE-M teknolojisi bazı kriterlerde yüksek performans göstermiş olsa da zayıf yönlerinin genel puan üzerindeki olumsuz etkisi nihai sıralamasında belirleyici olmuştur. CURLI-2 yöntemi, LPWAN teknolojilerini çok kriterli bir yapı altında nesnel ölçütlerle değerlendirmiş ve alternatifler arasında veriye dayalı, bütüncül bir sıralama oluşturmuştur. Bu yöntem, güçlü ve zayıf yönler arasındaki dengeyi sağlayarak karar vericilere daha tutarlı ve rasyonel bir önceliklendirme sunmaktadır.

Her iki yönteme ait sıralama sonuçlarına Tablo 8’de karşılaştırmalı olarak yer verilmiştir. Hem CURLI-2 hem de RAM yöntemleri, DASH7 teknolojisini en iyi alternatif olarak belirlemiştir. Bu durum, iki yöntemin güçlü uyumuna ve DASH7’nin genel üstünlüğüne işaret etmektedir. Buna karşılık, Qowiso ve Nwawe gibi bazı alternatifler için yöntemler arasında sıralama farklılıkları gözlemlenmiştir. Örneğin, RAM yönteminde Qowiso 5. sıradayken, CURLI-2 sonuçlarına göre 3. sırada yer almaktadır. Bu farklılık, yöntemlerin değerlendirme mantıklarındaki yapısal farklılardan kaynaklanmaktadır. Her iki yöntem de kendi içlerinde tutarlıdır; ancak CURLI-2 yöntemi, kriterler arası ikili karşılaştırmalara dayandığı ve daha bütüncül bir bakış açısı sunduğu için çoklu sıralama analizlerinde daha esnek sonuçlar verebilmektedir. RAM ve CURLI-2 farklı bilgi türlerini kullanmaktadır. RAM, nicel büyüklükleri ve Entropi ile türetilmiş ağırlıkları doğrudan toplamsal bir fayda puanına dönüştürmektedir [25]. Bu nedenle ağırlık vektörüne ve normalizasyon adımlarına duyarlıdır; büyük ağırlık taşıyan kriterlerdeki uç değerler sıralamayı belirgin etkilemektedir [26]. CURLI-2 ise her kriterde ikili karşılaştırmaların işaretine (-1, 0, +1) dayanır; büyüklük bilgisini büyük ölçüde soyutlayarak sıralamayı işaret desenleri üzerinden kurmaktadır [27]. Bu, ölçek ve tekdüze dönüşümlere karşı daha dayanıklı kılarken, beraberlikler ve işaret eşiklerine duyarlılığı artırmaktadır. Bu yapısal fark, yöntemlerin kimi alternatiflerde ayrışmasına yol açmaktadır [28]. Örneğin, NB-IoT RAM’de yükleme/indirme hızı kriterlerinin yüksek Entropi ağırlıkları ($w_j \approx 0.423$ ve $w_j \approx 0.300$) sayesinde yükselirken, CURLI-2’de modül maliyeti gibi kriterlerdeki çoklu olumsuz ikili karşılaştırmalar puanı aşağı çeker. Benzer biçimde Qowiso’nun CURLI-2’de öne çıkması, birkaç kritik kriterde artı işaretlerinin birikmesiyle (büyüklükten bağımsız) açıklanabilir; RAM’de ise aynı kriterlerdeki mutlak farkların sınırlı kalması toplam puanı daha az artırır. Bu bulgu, Tablo 2–3’teki veri ve ağırlık desenleriyle tutarlıdır.

Tablo 8. CURLI-2 ve RAM yöntemleri ile elde edilen sıralamalar

Alternatif	CURLI-2 Sıralaması	RAM Sıralaması
Qowiso	3	5
Nwawe	4	7
Sigfox	2	2
LoRa	5	4
LTE-M	7	6
NB-IoT	6	3
DASH7	1	1

4. Sonuç

Demiryolu sistemleri gibi geniş alanlara yayılan, bakım ve izleme gereksinimi yüksek olan altyapılarda, LPWAN teknolojileri, düşük enerji tüketimi ve uzun menzil avantajları sayesinde önemli bir fark yaratmaktadır [6]. Bu teknolojiler sayesinde sensörler, yıllarca batarya

değişimine gerek duymadan çalışmakta, uzak bölgelerde veri toplayarak ağ boyunca bakım ihtiyaçlarını optimize etmektedir. Hem sinyalizasyon sistemlerinde hem de hareketli unsurların takibinde sağladığı veri temelli yaklaşım, operasyonel kararların daha hızlı ve doğru alınmasını sağlamaktadır [7]. Raylı ulaşım sistemlerinde akıllı ulaşım sistemlerinin kullanılması, işletme ve sistem güvenlik kolaylıklarını sağlamakta ve bu sayede kazalar önlenmeye çalışılmaktadır [29]. LPWAN tabanlı sistemler, raylardaki ivme verilerini toplayarak gerçek zamanlı durum izleme ve karar destek mekanizmalarını mümkün kılmaktadır. Bu yönüyle, LPWAN çözümleri demiryolu taşımacılığında dijitalleşme ve sürdürülebilirlik hedeflerinin kesişim noktasında konumlanmakta, özellikle gelişmekte olan ülkeler için maliyet etkin ve uygulanabilir alternatifler sunmaktadır [30].

Bu çalışma, akıllı şehir vizyonunun önemli yapı taşlarından biri olan akıllı ulaşım sistemlerinde kullanılabilecek LPWAN teknolojilerinin sistematik biçimde değerlendirilmesini amaçlamış ve bu doğrultuda Entropi, RAM ve CURLI-2 gibi ÇKKV yöntemleri bütüncül bir yaklaşımla uygulanmıştır. Akıllı ulaşım sistemlerinin etkinliği, gerçek zamanlı veri iletimi, düşük enerji tüketimi, uzun menzil ve maliyet etkinliği gibi çok boyutlu performans ölçütlerine bağlıdır. Bu nedenle, sadece teknik özelliklere değil, aynı zamanda stratejik planlama açısından karar vericilere yön gösterebilecek kriterlere de dayalı bir analiz yapılması gerekli görülmüştür.

Analiz sürecinde ilk olarak, LPWAN teknolojilerinin karar kriterlerine olan etkileri Entropi yöntemiyle nesnel biçimde ağırlıklandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, özellikle yükleme hızı kriterinin en yüksek bilgi değeri taşıdığını ve karar sürecinde baskın bir role sahip olduğunu ortaya koymuştur. Bu bulgu, akıllı ulaşım sistemlerinde anlık veri paylaşımının ne denli kritik olduğunu ve veri akışındaki gecikmelerin sistem performansını doğrudan etkileyebileceğini göstermektedir. İndirme hızı ve bant genişliği gibi diğer veri iletim parametrelerinin de yüksek ağırlıklarla değerlendirilmiş olması, iletişim altyapısının taşıdığı stratejik önemi teyit etmektedir.

RAM yöntemi ile gerçekleştirilen sıralama analizinde, DASH7 teknolojisi en yüksek göreceli önem (RI) değerine sahip olarak ilk sırada yer almış, Sigfox ve NB-IoT ise onu takip etmiştir. Bu sonuç, DASH7'nin düşük maliyet, kabul edilebilir pil ömrü ve makul veri hızları gibi dengeli özellikler sunması sayesinde sistem verimliliği açısından avantajlı olduğunu göstermektedir. Benzer biçimde, CURLI-2 yöntemi ile yapılan bütünsel sıralamada da DASH7 ilk sırada yer almış ve bu durum, iki farklı yöntemin birbirini doğrulayıcı sonuçlar üretmesi bakımından çalışmanın güvenilirliğini pekiştirmiştir. Sıralama sonuçları arasında bazı farklılıklar bulunsa da özellikle üst sıralarda yer alan alternatiflerin benzerliği, kullanılan yöntemlerin karar verme sürecinde tutarlı çıktılar sunduğunu göstermektedir.

Bulgular, LPWAN teknolojileri arasında yapılacak tercihlerin yalnızca teknik performans kriterleriyle değil, aynı zamanda kullanım senaryosuna özgü ihtiyaçlara göre değerlendirilmesi gerektiğini ortaya koymuştur. Bu bağlamda, DASH7 teknolojisinin düşük modül maliyeti ve makul veri iletim kapasiteleri ile sensör tabanlı uygulamalarda uygun bir seçenek sunduğu, Sigfox'un ise geniş kapsama alanı ve enerji verimliliği ile mobil çözümler için öne çıktığı anlaşılmaktadır. LTE-M gibi bazı teknolojiler ise yüksek veri hızına rağmen diğer kriterlerdeki yetersizlikler nedeniyle daha alt sıralarda yer almıştır.

Literatürde benzer problemi ele alan çalışmalar [8, 9, 11] farklı kriter kümeleriyle gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada yedi teknik kriter kullanılmış ve ağırlıklar Entropi yöntemiyle nesnel olarak türetilmiştir. Yükleme ve indirme hızı kriterlerinin bilgi düzeyi yüksektir, buna bağlı ağırlıklar büyüktür. Bu durum, nihai sıralamayı doğrudan etkilemektedir. Literatürdeki diğer çalışmalarda ele alınan LPWAN alternatifleri de farklılık göstermektedir. Bu çalışmada yedi LPWAN teknolojisi değerlendirilmişken, Juneja ve Juneja [8] çalışmalarında DASH7 ve LoRaWAN alternatiflerinin de dahil olduğu 11 farklı kablosuz iletişim teknolojisini ele almış, Martínez [11], Sigfox, LoRa, NB-IoT olmak üzere üç farklı LPWAN teknolojisine odaklanmış,

son olarak Prithiviraj [9] ise LPWAN ile kablosuz iletişim teknolojileri arasında (Wi-Fi, WiMAX, UMTS, WLAN) seçim yapmıştır. Bu çalışma literatürdeki çalışmalardan kullanılan güncel ÇKKV yöntemleri (RAM, CURLI-2) açısından da farklılık göstermektedir.

Çalışmada akıllı ulaşım sistemlerinde kullanılabilecek LPWAN teknolojilerinin çok kriterli değerlendirmesi konusunda literatüre yenilikçi bir katkı sunulmakta ve hem teorik hem de uygulamalı açıdan anlamlı çıktılar üretilmektedir. Çalışmada kullanılan Entropi, RAM ve CURLI-2 yöntemleri birlikte değerlendirildiğinde, karar vericilere daha dengeli, esnek ve nesnel bir önceliklendirme çerçevesi sunulmaktadır. Bu çerçevede, şehir planlamacıları, mühendisler ve politika yapıcılar, LPWAN teknolojilerine yönelik yatırımlarını daha stratejik ve rasyonel biçimde yönlendirebileceklerdir. Uzun vadede, akıllı ulaşım sistemlerinin daha çevreci, enerji verimli ve veri odaklı altyapılarla güçlendirilmesi için bu tür sistematik analizlere duyulan ihtiyaç daha da artacaktır. Bu bağlamda, çalışma sadece mevcut teknolojilerin karşılaştırmalı değerlendirmesini sunmakla kalmayıp, aynı zamanda sürdürülebilir ulaşım politikaları için karar destek aracı niteliği taşımaktadır.

Çalışmanın kapsamı LPWAN teknolojileriyle sınırlıdır. Performans verileri üretici/standart belgeleri ve teknik kaynaklardan derlenmiş, dolayısıyla kriter seti yedi teknik özellik içerecek şekilde literatür yardımıyla oluşturulmuştur. Güvenlik, güvenilirlik ve servis gibi bağlamsal nitelikler kapsam dışı kalmıştır. Bu gibi farklı kriterlerin eklenmesiyle, alanında sektörel ve akademik tecrübeli uzmanların görüşlerinin Likert ölçeği gibi değerlendirme yöntemleriyle ele alınması, gelecekteki çalışmaların kapsamını genişletebilir ve daha ayrıntılı analizlere imkan sağlayabilir. Bu doğrultuda, teknolojik gelişmelerin ilerlediği göz önünde bulundurularak söz konusu teknolojilerin seçimi daha farklı alanlarda gelecek çalışmalarda uygulanabilir. Ayrıca kriter setinin kapsamı değiştirilerek veya farklı ÇKKV yöntemleriyle de çalışma gerçekleştirilebilir.

Kaynakça

- [1] Ö. Ünsal, S. Avcı, “Akıllı şehir tartışmaları üzerine bir değerlendirme ve Türkiye,” *Mavi Atlas*, vol. 11, no. 1, pp. 87–104, Nisan. 2023, doi: 10.18795/gumusmaviatlas.1229850.
- [2] M. Tektaş, K. Korkmaz, H. Erdal, “Akıllı ulaşım sistemlerinin geleceği (ekonomik ve çevresel faydaları),” *Balkan Sosyal Bilimler Dergisi*, no. Özel Sayı, pp. 561–577, Dec. 2016. [çevrimiçi]. Erişim linki: <https://dergipark.org.tr/en/pub/bsbd/issue/43860/539514>.
- [3] M. Tektaş, N. Tektaş, “Akıllı ulaşım sistemleri (AUS) uygulamalarının sektörlere göre dağılımı,” *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, vol. 2, no. 1, pp. 32–41, Nisan. 2019.
- [4] E. Duman, M. Altıntaş, İ. Gül, M. Dolu, “LPWAN teknolojileri ve uygulama alanlarının karşılaştırmalı incelemesi,” *Veri Bilimi*, vol. 5, no. 1, pp. 34–44, Oct. 2022.
- [5] Y. Kabalcı, M. Ali, “Emerging LPWAN technologies for smart environments: An outlook,” in *Proc. 2019 1st Global Power, Energy and Communication Conf. (GPECOM)*, Cappadocia, Turkey, Jun. 12–15, 2019, doi: 10.1109/GPECOM.2019.8778626.
- [6] R. Dirnfeld Turocy, F. Flammini, S. Marrone, R. Nardone, V. Vittorini, “Low-power wide-area networks in intelligent transportation: Review and opportunities for smart-railways,” in *Proc. IEEE Intell. Transp. Syst. Conf. (ITSC)*, Sept. 2020, doi: 10.1109/ITSC45102.2020.9294535.
- [7] J. Sramota, A. Skavhaug, “RailCheck: A WSN-based system for condition monitoring of railway infrastructure,” presented at the *DESTINATIONRAIL EU Project*, Norwegian Univ. of Science and Technology, 2018.
- [8] A. Juneja, S. Juneja, V. Bali, S. Mahajan, “Multi-criterion decision making for wireless communication technologies adoption in IoT,” *International Journal of System Dynamics Applications (IJSDA)*, 10.1 (2021) 1-15.
- [9] A. Prithiviraj, A. Maheswari, D. Balamurugan, V. Ravi, M. Krichen, R. Alroobaea, S. Rubaiee, et al, “Multi-criteria fuzzy-based decision making algorithm to optimize the VHO performance in hetnets,” *Computers, Materials & Continua*, 70.1 (2022).

- [10] A. Ochoa-Zezzatti, R. Contreras-Masse, and J. Mejía, “Multicriteria analysis for LPWAN selection for Industry 4.0 based on TOPSIS and a model of proportionality”, *Computational Intelligence for Business Analytics. Cham: Springer International Publishing*, 2021. 15-46.
- [11] M. A. Q. Martinez, G. A. L. González, M. D. G. Rios, et al, “Selection of LPWAN technology for the adoption and efficient use of the IoT in the rural areas of the province of Guayas USING AHP method”, *International Conference on Applied Human Factors and Ergonomics. Cham: Springer International Publishing*, 2020.
- [12] A. Sotoudeh-Anvari, “Root Assessment Method (RAM): A novel multi-criteria decision making method and its applications in sustainability challenges”, *Journal of Cleaner Prod.*, 423 (2023) 138695.
- [13] T. V. Dua, “Development of a new multi-criteria decision-making method”, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3.4 (2023) 123.
- [14] M. Bakır, Ö. Atalık, “Entropi ve Aras yöntemleriyle havayolu işletmelerinde hizmet kalitesinin değerlendirilmesi”, *İşletme Araştırmaları Dergisi*, 10(1), 617-638, 2018.
- [15] M. Mekik, M. Bajic, T. Chaxel, F. Meyer, “A comparative study of LPWAN technologies for large-scale IoT deployment”, *ICT Express*, vol. 3, no. 1, pp. 1–7, 2017.
- [16] L. Centenaro, L. Vangelista, A. Zanella, M. Zorzi, “Long-range communications in unlicensed bands: The rising stars in the IoT and smart city scenarios,” *IEEE Wireless Communications*, 23(5) (2016) 60-67.
- [17] A. Augustin, J. Yi, T. Clausen, W. M. Townsley, “A study of LoRa: Long range & low power networks for the internet of things,” *Sensors*, 16 (9) (2016) 1466.
- [18] R. Sariningrum, P.D.P Adi, Y.Y. Maulana, T. Adiprabowo, S.H. Wibowo, N. Fitria, H. Novita et al, “Non-Terrestrial Networks LPWAN IoT Satellite Communication for Medical Application”, 2025 *International Conference on Smart Computing, IoT and Machine Learning (SIML). IEEE*, 2025.
- [19] F. Sánchez Sutil, and A. Cano-Ortega, “Smart public lighting control and measurement system using LoRa network”, *Electronics*, 9.1 (2020) 124.
- [20] M. Suryanegara, “Technology Progress and Adoption” in Chen,L.,K.Ramli,F.F.Hastiadi, and M.Suryanegara (eds.), *Accelerating Digital Transformation in Indonesia: Technology, Market and Policy*. Jakarta: ERIA, (2023), 37-76.
- [21] B.S. Chaudhari, M. Zennaro, and S. Borkar, “LPWAN technologies: Emerging application characteristics, requirements, and design considerations”, *Future Internet*, 12.3 (2020) 46.
- [22] Y. Chen, T. Farley, and N. Ye, “QoS requirements of network applications on the Internet”, *Information Knowledge Systems Management*, 4.1 (2004) 55-76.
- [23] P. Singh, and S. Dutt Joshi, “Some studies on multidimensional Fourier theory for Hilbert transform, analytic signal and AM–FM representation”, *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 38.12 (2019) 5623-5650.
- [24] B. Nancy, C.W.G. Loh, M.R. Bazin, T.M. Panceras, “A case study: Broadband over powerline for rural area deployment in Sarawak”, *E3S Web of Conferences*. Vol. 242. EDP Sciences, 2021.
- [25] C. Mi, B. Liu, “The Research and Application of Fuzzy Entropy Weight Comprehensive Evaluation Method in Paper Quality Evaluation”, (2011) https://doi.org/10.1007/978-3-642-27503-6_38
- [26] S. T. Mhlanga, M. Lall, “Influence of Normalization Techniques on Multi-criteria Decision-making Methods”, *Journal of Physics: Conference Series*, 2224 (1) (2022) IOP Publishing.
- [27] F. Arvin, A. E. Turgut, N. Bellotto, S. Yue, “Comparison of different cue-based swarm aggregation strategies”, *International Conference in Swarm Intelligence*. Cham: Springer Intern. Publishing, (2014)
- [28] J. J. Starns, J. E. Olchowski, “Shifting the criterion is not the difficult part of trial-by-trial criterion shifts in recognition memory”, *Memory & Cognition*, 43.1 (2015): 49-59.
- [29] C. Özarpa, İ. Avcı, İ., & B. F. Kınacı, “Akıllı raylı sistemlerde kullanılan alt sistemlerin kritik seviye analizi”, *Demiryolu Mühendisliği*, 14 (2021):143-153.
- [30] M. Donadio, “Monitoring system for a railway infrastructure,” in *Proc. 2018 Int. Conf. Smart Infrastructure and Construction*, 2018.

Özgeçmiş**Eren KAMBER**

Lisans derecesini 2009 yılında İTÜ Endüstri Mühendisliği bölümünden, Yüksek Lisans derecesini 2019 yılında Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi İşletme Mühendisliği bölümünden almıştır. 2023 yılında İTÜ Endüstri Mühendisliği alanında Doktora derecesini tamamlamıştır. 2018 yılından bu yana Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nde akademik kariyerine Doktor Öğretim Üyesi olarak devam etmektedir. Kamber'in akademik araştırmaları makine öğrenme, çok kriterli karar verme yöntemleri ve bulanık mantık teknikleri üzerine yoğunlaşmaktadır.

E-Posta: eren.kamber@alanya.edu.tr

**Gonca Gül TÜRKİYILMAZ**

Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini almıştır. Optimizasyon, çok kriterli karar verme yöntemleri otomotiv sektörü ilgi alanına giren araştırma konulardır.

E-Posta: goncaturkyilmaz17@gmail.com

**Destan YÜZGÜLEN**

Lisans eğitimimi Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi Endüstri mühendisliği bölümünde tamamlamıştır. Veri Analizi, veri görselleştirme ve optimizasyon ilgi alanlarına giren araştırma konularıdır.

E-Posta: destanyuzgulen@gmail.com

**Ufuk AYDOĞMUŞ**

Lisans derecesini Selçuk Üniversitesi Endüstri Mühendisliği bölümünden ve Yüksek Lisans derecesini Osmangazi Üniversitesi'nden almıştır. 2013'ten beri Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesi'nde Öğretim Görevlisi olarak çalışmaktadır. Araştırma ilgi alanları arasında tedarik zinciri yönetimi, çok kriterli karar verme ve Endüstri 4.0 yer almaktadır.

E-Posta: ufuk.aydogmus@alanya.edu.tr

**Hacer YUMURTACI AYDOĞMUŞ**

2001 yılında Selçuk Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden Lisans derecesini almıştır. Yıldız Teknik Üniversitesi İşletme Yönetimi Bölümü'nden Yüksek Lisans ve İstanbul Üniversitesi Endüstri Mühendisliği Bölümü'nden Doktora derecelerine sahiptir. Alanya Alaaddin Keykubat Üniversitesinde Doçent olarak çalışmaktadır. Akademik araştırmaları çok kriterli karar verme yöntemleri, makine öğrenme ve bulanık mantık teknikleri üzerine yoğunlaşmaktadır.

E-Posta: haker.aydogmus@alanya.edu.tr

Beyanlar:

Bu makalede bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yazarların katkıları: Eren KAMBER: Kavramsallaştırma, Metodoloji, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Gonca Gül TÜRKYILMAZ: Kaynaklar, Doğrulama, İnceleme, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Desten YÜZGÜLEN: Kaynaklar, Görselleştirme, İnceleme, Yazma-orijinal taslak hazırlama. Ufuk AYDOĞMUŞ: Kavramsallaştırma, Kontrol, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme. Hacer YUMURTACI AYDOĞMUŞ: Kavramsallaştırma, Metodoloji, İnceleme, Yazma-gözden geçirme ve düzenleme.