

Araştırma Makalesi | Research Article

Çevresel Sürdürülebilirlik Perspektifinden Şehir İçi Akıllı Ulaşım Sistemlerinin TOPSIS Analizi ile Değerlendirilmesi

Rukiye Gizem Öztaş Karlı¹ 

¹ Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, Türkiye

Öz

Bu çalışma, çevresel sürdürülebilirlik perspektifinden akıllı ulaşım sistemlerinin performanslarını değerlendirmek amacıyla TOPSIS (İdeal Çözüme Benzerlik ile Tercih Sıralama Tekniği) yöntemini kullanmıştır. Elektrikli otobüs sistemi (EOS), paylaşımlı elektrikli skuter sistemi (PESS), otonom araç paylaşım sistemi (OAPS) ve akıllı bisiklet paylaşım sistemi (ABPS) olmak üzere dört farklı ulaşım sistemi analiz edilmiştir. Analiz; karbon emisyonlarının azaltılması, enerji verimliliği, kaynak kullanımı, hava kalitesine etki ve yenilenebilir enerji kullanımı kriterleri doğrultusunda gerçekleştirilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, EOS en yüksek göreceli yakınlık değeriyle en iyi performansı sergilemiştir. EOS, karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji verimliliği konularında üstün performans göstermekte ve fosil yakıt kullanımını azaltarak kaynak kullanımını optimize etmektedir. ABPS ikinci sırada yer alarak çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. OAPS üçüncü sırada yer almakta olup, enerji verimliliği ve kaynak kullanımı açısından diğer sistemlere göre daha düşük performans sergilemektedir. PESS ise en düşük performansı göstermiştir. Bulgular, şehir plancıları ve politika yapıcılar için önemli bilgiler sunmakta olup, akıllı ulaşım sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda en uygun seçeneklerin belirlenmesine katkı sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: akıllı bisiklet paylaşım sistemi, elektrikli otobüs sistemi, otonom araç paylaşım sistemi, paylaşımlı e-skuter sistemi, TOPSIS

Evaluation of Urban Intelligent Transportation Systems from an Environmental Sustainability Perspective Using the TOPSIS Method

Abstract

This study uses the TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) method to evaluate the performance of intelligent transportation systems from an environmental sustainability perspective. Four different transportation systems were analyzed: electric bus system (EBS), shared electric scooter system (SESS), autonomous vehicle sharing system (AVSS) and intelligent bicycle sharing system (IBSS). The analysis was carried out in line with the criteria of carbon emission reduction, energy efficiency, resource utilization, impact on air quality and use of renewable energy. According to the analysis results, the EBS performed the best with the highest relative proximity value. EBS shows superior performance in terms of carbon emission reduction and energy efficiency, and optimizes resource use by reducing fossil fuel use. IBSS ranked second and stands out as an environmentally friendly alternative. The AVSS ranks third and performs lower than the other systems in terms of energy efficiency and resource utilization. The SESS performed the lowest. The findings provide important information for urban planners and policy makers and contribute to the identification of the most appropriate options in line with the environmental sustainability goals of intelligent transportation systems.

Keywords: intelligent bicycle sharing system, electric bus system, autonomous vehicle sharing system, shared electric scooter system, TOPSIS

¹ İletişim / Contact: Rukiye Gizem Öztaş Karlı, Peyzaj Mimarlığı Bölümü, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Bartın Üniversitesi, Bartın, Türkiye. E-Posta / E-mail: rozta@bartin.edu.tr.

Gönderildiği tarihi / Date submitted: 07.06.2024, Kabul edildiği tarih / Date accepted: 05.11.2024

Alıntı / Citation: Öztaş Karlı, R. G. (2025). Çevresel sürdürülebilirlik perspektifinden şehir içi akıllı ulaşım sistemlerinin TOPSIS analizi ile değerlendirilmesi. *Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.38002/tuad.1496774>



Çevresel Sürdürülebilirlik Perspektifinden Şehir İçi Akıllı Ulaşım Sistemlerinin TOPSIS Analizi ile Değerlendirilmesi

1. Giriş

Günümüzde hızla artan kentleşme ve nüfus yoğunluğu, şehir içi ulaşım sistemlerinde sürdürülebilir çözümlere olan ihtiyacı daha da belirgin hale getirmiştir. Çevresel sürdürülebilirlik, doğal kaynakların korunması, çevresel dengenin sağlanması ve ekosistemlerin korunması gibi hedefleri içeren geniş kapsamlı bir kavramdır. Çevresel sürdürülebilirlik, karbon emisyonlarının azaltılması, enerji verimliliğinin artırılması, doğal kaynakların korunması ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının teşvik edilmesi gibi unsurları içermektedir (Camodeca ve Almici, 2021; Carter ve Rogers, 2008). Sürdürülebilir ulaşım sistemleri, kentsel alanlarda çevresel etkilerin azaltılmasına yardımcı olarak, şehirlerin gelecekte yaşanabilirliğini artırma konusunda önemli bir rol oynamaktadır.

Ulaşım sektörünün çevre üzerindeki etkileri, fosil yakıt kullanımından kaynaklanan emisyonlar ve kaynak tüketimi göz önünde bulundurulduğunda, şehirlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasında Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS) kritik bir rol oynamaktadır (Elassy vd., 2024; Öztaş Karlı ve Çelikyay, 2022). AUS, teknolojik yenilikler ve veri analizlerine dayalı çözümler sunarak trafik yönetimi, toplu taşıma ve bireysel mobilitayı daha verimli ve sürdürülebilir hale getirmeyi amaçlamaktadır (Crawford, 2021; Tektaş ve Tektaş, 2019). Elektrikli otobüsler, paylaşımlı elektrikli skuterler, otonom araç paylaşım sistemleri ve akıllı bisiklet paylaşım sistemleri gibi farklı AUS türleri, şehirlerdeki karbon emisyonlarını azaltmak, enerji verimliliğini artırmak ve hava kalitesini iyileştirmek için kullanılmaktadır (Du ve Kommalapati, 2021; Öztaş Karlı vd., 2022; Qiu ve He, 2018).

Bu bağlamda, çevresel sürdürülebilirlik, yalnızca karbon salımını azaltmakla kalmayıp aynı zamanda enerji verimliliğini ve yenilenebilir enerji kullanımını da teşvik eden bir yaklaşımdır. Sürdürülebilir ulaşım çözümleri, toplu taşıma sistemlerinin modernizasyonu, araçlarda kullanılan yakıt türlerinin çevre dostu olması ve daha az enerji tüketen teknolojilerin geliştirilmesi gibi konuları içermektedir (Browne vd., 2012; Geels vd., 2012). Bu hedeflere ulaşmada AUS sistemlerinin uygulanması kritik bir öneme sahiptir.

Bu çalışmanın amacı, çevresel sürdürülebilirlik çerçevesinde farklı şehir içi AUS performanslarını karşılaştırmak ve bu sistemlerin çevreye olan katkılarını değerlendirmektir. Özellikle karbon emisyonlarının azaltılması, enerji verimliliği, kaynak kullanımı, hava kalitesine etki ve yenilenebilir enerji kullanımı gibi kriterler dikkate alınarak, en sürdürülebilir AUS'un belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu amaç doğrultusunda, EOS, PESS, OAPS ve ABPS, kentsel ulaşım koşullarında TOPSIS yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

Bu çalışma, AUS'un çevresel sürdürülebilirlik kriterleri açısından karşılaştırılmasına odaklanmaktadır. Literatürde, AUS'un genel faydaları ve uygulama alanları üzerine birçok çalışma yapılmış olmasına rağmen, farklı AUS türlerinin çevresel sürdürülebilirlik kriterleri açısından sistematik bir değerlendirmesi sınırlı kalmıştır. Özellikle karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji verimliliği gibi kritik sürdürülebilirlik kriterleri göz önüne alınarak yapılacak bu değerlendirme, şehir plancıları, ulaşım plancıları ve politika yapıcılar için önemli bilgiler sunacaktır.

Araştırma kapsamında, dört farklı şehir içi ulaşım sistemi, belirlenen çevresel sürdürülebilirlik kriterleri kullanılarak TOPSIS yöntemi ile analiz edilmiştir. TOPSIS yöntemi, çeşitli alternatiflerin belirli kriterler doğrultusunda ideal çözüme olan yakınlıklarına göre sıralanmasını sağlayan Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemlerinden biridir. Analiz sürecinde, uzman görüşlerine dayalı kriter ağırlıkları kullanılmıştır. Ulaşılan sonuçlar, farklı AUS türlerinin çevresel sürdürülebilirlik performanslarını karşılaştırarak en uygun sistemin belirlenmesine olanak tanımaktadır.

1.1. Akıllı Ulaşım Sistemleri (AUS)

AUS, ulaşım altyapısını ve hizmetlerini daha verimli, güvenli ve sürdürülebilir hale getirmek amacıyla bilgi ve iletişim teknolojilerini entegre eden çözümleri ifade etmektedir (Guerrero-Ibanez vd., 2015; Lin vd., 2017; Ministère de la Transition écologique et solidaire- Ministère chargé des Transports [MTES/MCT], 2017; Qi, 2008). AUS, şehir içi ulaşımında trafik yoğunluğunu azaltmak, yol güvenliğini artırmak ve çevresel etkileri en aza indirmek için yenilikçi yöntemler sunmaktadır (Barth vd., 2015; Pojani ve Stead, 2015). Teknolojiye dayalı çözümlerle AUS, şehirlerde sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin geliştirilmesinde kritik rol oynamaktadır.

AUS; trafik yönetim sistemleri, toplu taşıma yönetim sistemleri, araç-arac ve araç-altyapı iletişim sistemleri, yolcu bilgilendirme sistemleri ve elektronik ücret toplama sistemleri gibi birçok bileşenden oluşmaktadır. Bu bileşenler, ulaşım ağının farklı parçalarını birbirine bağlayarak entegre bir sistem yaratmaktadır (Auer vd., 2016; Desertot vd., 2012). Örneğin, trafik yönetim sistemleri, sinyalizasyon ve akıllı kavşaklar yoluyla trafik akışını optimize etmekte ve trafik sıkışıklığını azaltmaktadır (De Oliveira vd., 2020; Lee ve Chiu, 2020; Zaghal vd., 2017). Bunun yanı sıra, toplu taşıma yönetim sistemleri, otobüs ve metro gibi toplu taşıma araçlarının hareketlerini izleyerek bu araçların etkinliğini artırmaktadır (Makarova vd., 2021; Welch ve Widita, 2019).

AUS ayrıca, araçlar arası iletişim ve araç-altyapı iletişim sistemleri ile kazaların azaltılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, araçlar arasında ve altyapı ile bilgi paylaşımını sağlayarak daha güvenli ve sürdürülebilir bir ulaşım ortamı yaratmaktadır (Du ve Dao, 2014; Milanese vd., 2012). Yolcu bilgilendirme sistemleri, yolculara seyahat planlama, güzergâh bilgileri ve toplu taşıma araçlarının gerçek zamanlı konumlarını sunarak, yolcuların daha bilinçli ve verimli ulaşım kararları almalarını sağlamaktadır (Akande vd., 2018; Ganesh vd., 2012). Aynı şekilde, elektronik ücret toplama sistemleri, toplu taşıma araçları, köprü ve otoyol geçiş ücretlerinin tahsilatını elektronik ortamda gerçekleştirerek, ulaşımın hızını ve verimliliğini artırmaktadır (Chandruppa vd., 2023; Lee vd., 2008).

AUS'un sunduğu faydalar, şehirlerin sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşmasında önemli rol oynamaktadır. Akıllı ulaşım çözümleri, trafik akışını optimize ederek ve alternatif güzergâh önerileri sunarak trafik sıkışıklığını azaltmaktadır (Brennan vd., 2019; Cheng vd., 2020; Uluçay ve Tanyaş, 2023). Ayrıca, bu sistemler araçların daha verimli çalışmasını sağlayarak yakıt tüketimini ve karbon emisyonlarını azaltmaktadır (Elassy vd., 2024; Lv ve Shang, 2023). Gerçek zamanlı trafik bilgileri ve akıllı sensörler, kazaların önlenmesine ve acil durum müdahalesinin hızlanmasına yardımcı olmaktadır (Cho vd., 2022; Karmakar vd., 2020). Yolculara sağlanan anlık bilgiler ve daha etkili ulaşım hizmetleri, kullanıcı memnuniyetini artırmaktadır (Brakewood ve Watkins, 2019; Tyrinopoulos ve Antoniou, 2020).

Buna ek olarak, trafikte olay yönetimi ve otoyol olay yönetim sistemleri, acil durumlar ve kazalar gibi

trafikle ilgili olayların hızlıca çözülmesine yardımcı olmakta ve yolların güvenliğinin artırılmasına katkı sağlamaktadır. Bu sistemler, trafik akışını hızla eski haline getirmek ve kaza sonrası güvenlik risklerini azaltmak amacıyla gelişmiş yönetim teknikleri ve iş birliği ile çalışmaktadır (National Operations Center of Excellence [NOCOe], 2010). Yol üstyapı yönetim sistemleri, yol bakım ve onarım süreçlerini optimize ederek yolların uzun ömürlü ve güvenli olmasını sağlamaktadır. Tünel yönetim ve işletme sistemleri ise tünel içi trafiği kontrol etmek, acil durum müdahalesini hızlandırmak ve tünel güvenliğini artırmak amacıyla gelişmiş sensörler ve kontrol sistemleri kullanmaktadır (Fleming, 2009). Bu sistemler, özellikle uzun tünellerde ve yoğun trafik alanlarında güvenli bir trafik akışı sağlanmasında önemli rol oynamaktadır.

AUS'un sunduğu bu çözümler, şehirlerin ulaşım ihtiyaçlarını karşılamakla kalmayıp, sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarına da yardımcı olmaktadır. Örneğin, elektrikli otobüsler, sıfır emisyonla çalışarak çevreye duyarlı bir toplu taşıma çözümü sunmakta ve karbon emisyonlarının azalmasına katkıda bulunmaktadır (Du ve Kommalapati, 2021). Paylaşımlı elektrikli skuterler, kısa mesafeli seyahatler için sürdürülebilir bir seçenek olarak şehirlerdeki trafik yoğunluğunu ve emisyonları azaltmaktadır (Kopplin vd., 2021). Otonom araç paylaşım sistemleri, insan hatalarından kaynaklanan trafik kazalarını azaltarak güvenliği artırmakta ve aynı zamanda enerji verimliliği sağlamaktadır (Fagnant ve Kockelman, 2014). Bisiklet paylaşım sistemleri ise fosil yakıt kullanmayan, sağlıklı ve çevre dostu bir ulaşım alternatifi sunarak, bireysel araç kullanımını azaltmaktadır (Qiu ve He, 2018).

1.2. Çevresel Sürdürülebilirlik

Çevresel sürdürülebilirlik, doğal kaynakların korunması, enerji verimliliğinin artırılması, karbon emisyonlarının azaltılması ve hava kalitesinin iyileştirilmesi gibi unsurları içeren geniş kapsamlı bir kavramdır (Camodeca ve Almici, 2021; Elassy vd., 2024). Özellikle ulaşım sektörü, fosil yakıt kullanımı nedeniyle küresel karbon emisyonlarının %25'inden sorumlu olup, çevresel sürdürülebilirlik için büyük bir tehdit oluşturmaktadır (Camodeca ve Almici, 2021). Bu bağlamda, şehirlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarında AUS önemli bir çözüm olarak öne çıkmaktadır.

AUS, fosil yakıt kullanımını azaltan, enerji verimliliğini artıran ve doğal kaynakların daha etkin

kullanımını sağlayan çözümler sunmaktadır (Barth vd., 2015). Örneğin, elektrikli otobüsler, sıfır emisyonla çalışarak şehirlerde hava kalitesini iyileştirmekte ve karbon salımını azaltmaktadır (Du ve Kommalapati, 2021). Benzer şekilde, bisiklet paylaşım sistemleri ve paylaşımlı elektrikli skuterler, bireysel araç kullanımını azaltarak karbon emisyonlarını düşürmekte ve şehir içi ulaşımında çevre dostu alternatifler sunmaktadır (Kopplin vd., 2021).

Çevresel sürdürülebilirlik açısından AUS, karbon emisyonlarını düşürme ve enerji verimliliğini artırma potansiyeli taşımaktadır. Trafik yönetim sistemleri, şehirlerde trafik akışını optimize ederek dur-kalk trafik yoğunluğunu ve dolayısıyla enerji israfını azaltmakta, bu da hem karbon salımını hem de yakıt tüketimini düşürmektedir (Brennand vd., 2019; Cheng vd., 2020). Ayrıca, toplu taşıma yönetim sistemleri toplu taşımanın daha etkin kullanılmasını sağlayarak, fosil yakıt tüketimini azaltmakta ve enerji verimliliğini artırmaktadır (Makarova vd., 2021).

Ulaşım literatüründe, AUS'un çevresel sürdürülebilirlik açısından büyük bir potansiyele sahip olduğu ve şehirlerin sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmalarında kritik bir rol oynadığı sıkça vurgulanmaktadır. Barth ve diğerleri (2015), AUS'un trafik akışını iyileştirerek karbon emisyonlarını %20 oranında azaltabileceğini ortaya koymuştur. Aynı şekilde, Cheng ve diğerleri (2020), AUS'un enerji verimliliğini artırarak fosil yakıt kullanımını büyük ölçüde düşürebileceğini belirtmektedir. Bu nedenle, AUS'un yaygınlaşması, şehirlerin çevresel etkilerini azaltarak sürdürülebilir ulaşım hedeflerine ulaşmalarında önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

Bu çalışma, AUS'un çevresel sürdürülebilirlik kriterlerine göre performanslarını analiz ederek literatüre katkı sağlamayı hedeflemektedir. Çalışmanın sonuçları, şehir plancıları, ulaşım plancıları ve politika yapıcılar için AUS'un çevresel etkilerini daha iyi anlamalarını sağlayacak ve sürdürülebilir ulaşım stratejilerinin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. AUS'un sunduğu çözümler, sadece yerel düzeyde değil, küresel ölçekte de büyük çevresel faydalar yaratma potansiyeline sahiptir.

2. Yöntem

Bu çalışmada, farklı şehir içi akıllı ulaşım sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi amacıyla TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. TOPSIS, ilk olarak 1981 yılında Ching-Lai Hwang ve Yoon tarafından geliştirilen bir

ÇKKV yöntemidir (Aslan vd. 2015; Urfalıoğlu ve Genç, 2013). TOPSIS, alternatiflerin ideal ve negatif-ideal çözümlere olan benzerliklerine dayanarak sıralama yapmakta, bu da her bir alternatifin en iyi ve en kötü potansiyel durumları göz önünde bulundurarak kapsamlı bir değerlendirme sağlamaktadır (Bhaskar vd. 2021; Kamalakannan vd. 2020).

Diğer ÇKKV yöntemleri yerine TOPSIS yönteminin tercih edilmesinin dört nedeni bulunmaktadır. Bunlardan ilki karşılaştırmalı analiz kolaylığıdır. TOPSIS, alternatifleri birbirleriyle değil, ideal çözüme olan yakınlıklarına göre değerlendirmektedir. Bu yaklaşım, alternatifler arasındaki farklılıkları net bir şekilde ortaya koymakta ve daha objektif bir karşılaştırma sağlamaktadır (Hwang ve Yoon, 1981; Opricovic ve Tzeng, 2004). İkincisi anlaşılması ve uygulanması kolay bir yöntemdir. TOPSIS yöntemi, diğer çok kriterli karar verme yöntemlerine göre daha anlaşılır ve uygulaması daha basittir (Chen ve Hwang, 1992). Bu, araştırma sonuçlarının hem akademik hem de pratik açıdan kolaylıkla yorumlanabilmesini sağlamaktadır. Üçüncü neden ise etkili sonuçlar vermesidir. TOPSIS, hem ideal hem de negatif-ideal çözümlere göre uzaklıkları hesaplayarak çalıştığı için kriterler arasındaki göreceli önemi ve alternatiflerin bu kriterlerdeki performansını dengeli bir şekilde değerlendirmektedir (Shih vd., 2007). Son olarak ise kabul görme düzeyi oldukça yüksektir. TOPSIS yöntemi, farklı sektörlerde ve karar verme problemlerinde geniş bir kullanım alanına sahiptir (Behzadian vd., 2012). Bu da yöntemin güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini artırmaktadır.

Çalışmada EOS, PESS, OAPS ve ABPS olmak üzere 4 farklı şehir içi akıllı ulaşım sistemi değerlendirilmiştir. Literatür taraması sonucunda dört farklı akıllı ulaşım sistemini çevresel sürdürülebilirlik açısından değerlendirmek için önerilen kriterler ve değerler Tablo 1'de verilmiştir. Kriter değerlerinin belirlenmesinde ABD Çevre Koruma Ajansı, Avrupa Çevre Ajansı, Uluslararası Enerji Ajansı, Birleşmiş Milletler Çevre Programı, McKinsey & Company, Uluslararası Taşımacılık Forumu, Ulusal Yenilenebilir Enerji Laboratuvarı, Ulaşım Araştırma Kurulu ve UC Davis Ulaşım Çalışmaları Enstitüsü'nün raporlarından faydalanılmıştır. Analiz süreci, belirlenen kriterler doğrultusunda sistemlerin performansını karşılaştırmayı hedeflemektedir. Çalışmada kullanılan kriterler, fayda yönlü ve maliyet yönlü

olarak ikiye ayrılmaktadır. Fayda yönlü kriterlerde, yüksek değerler sistemin daha iyi performans gösterdiğini ifade ederken, maliyet yönlü kriterlerde düşük değerler tercih edilmektedir. Bu çerçevede, karbon emisyonlarının azaltılması, enerji verimliliği, hava kalitesine etki ve yenilenebilir enerji kullanımı fayda yönlü kriterler olarak tanımlanmış, kaynak kullanımı ise maliyet yönlü kriter olarak belirlenmiştir. Kriterlerin detayları ve yönleri Tablo 1'de verilmiştir.

Kriterlerin ağırlıklarının belirlenmesinde uzman görüşlerine başvurulmuştur. Uzmanlara, Excel formatında ikili karşılaştırma matrisleri e-posta yoluyla iletilmiştir. Uzmanlar, bu matrisleri doldurarak, belirlenen kriterlerin karşılaştırmalı ağırlıklarını belirlemişlerdir. Toplanan bu veriler daha sonra analiz sürecinde kullanılmıştır.

Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde, üç farklı uzmanın görüşleri alınmıştır. En az 15 yıllık deneyime sahip bu uzmanlardan biri çevresel sürdürülebilirlik ve enerji yönetimi alanında, diğeri ulaştırma politikaları üzerine çalışan bir akademisyen, üçüncüsü ise ulaştırma sistemleri planlaması ve şehir içi ulaşım altyapısı konusunda sektörde deneyime sahip bir profesyoneldir. Bu farklı uzmanlık alanları, değerlendirmede daha geniş bir bakış açısı sunarak kriterlerin dengeli bir şekilde ele alınmasını sağlamıştır.

Literatürde benzer çalışmalar, uzman sayısının 3 ile 5 arasında olmasının yeterli olduğunu bildirmektedir (Liu vd., 2012; Pathak vd. 2020). Özellikle, Saaty (1980) ve Ishizaka ve Labib (2011) tarafından yapılan çalışmalarda, çok kriterli karar verme yöntemlerinde uzman sayısının küçük tutulmasının yeterli olduğu ve bu sayede daha hızlı ve etkili sonuçlar elde edilebileceği belirtilmiştir. Bu doğrultuda, çalışmamızda üç uzmanın görüşleri, analizin güvenilirliği ve geçerliliği açısından yeterli kabul edilmiştir. Uzmanların kriterlere verdikleri ağırlıklar ortalamaları alınarak belirlenmiştir (Tablo 2). Bu ağırlıklar, TOPSIS analizinde kullanılarak her bir ulaşım sisteminin çevresel sürdürülebilirlik performansı değerlendirilecektir.

Tablo 1. Çevresel sürdürülebilirlik kriterleri ve değerleri

Kriterler	Açıklama	EOS	PESS	OAPS	ABPS	Yön
Karbon Emisyonlarının Azaltılması	Ulaşım sisteminin karbon emisyonlarını ne kadar azalttığını ifade eder.					Fayda yönlü
	Birim: Yıllık CO ₂ azaltımı (Ton CO ₂ /yıl).	2000	1500	1800	2200	
Enerji Verimliliği	Ulaşım sisteminin enerji verimliliği.					Fayda yönlü
	Birim: km/kWh.	5,5	6,0	5,8	6,2	Maliyet yönlü
Kaynak Kullanımı	Ulaşım sisteminin doğal kaynakları (örneğin fosil yakıtlar) ne kadar verimli kullandığını ifade eder.					
	Birim: Yıllık doğal kaynak tüketimi (MJ/yıl).	8000	7500	7800	7200	
Hava Kalitesine Etki	Ulaşım sisteminin hava kalitesini ne kadar iyileştirdiği.					Fayda yönlü
	Birim: Hacim başına PM2.5 azaltımı (mikrogram/m ³).	15	12	14	16	
Yenilenebilir Enerji Kullanımı	Ulaşım sisteminin yenilenebilir enerji kaynaklarını ne kadar kullandığı.					Fayda yönlü
	Birim: Yenilenebilir enerji kullanım oranı %	30	25	35	40	

Tablo 2. Kriter bazında uzman görüşlerinin ağırlıkları

Kriterler	Uzman 1	Uzman 2	Uzman 3	Ortalama
Karbon Emisyonlarının Azaltılması	0,35	0,30	0,25	0,30
Enerji Verimliliği	0,30	0,25	0,25	0,27
Kaynak Kullanımı	0,15	0,15	0,15	0,15
Hava Kalitesine Etki	0,10	0,20	0,15	0,15
Yenilenebilir Enerji Kullanımı	0,10	0,10	0,20	0,13

TOPSIS yönteminin uygulama adımları aşağıda özetlenmiştir (Özkan ve Deliktaş, 2020):

Adım 1: Karar matrisinin oluşturulması

Uzmanların görüşleri doğrultusunda, araştırmacı tarafından oluşturulan karar matrisinde; satırlarda üstünlüklerine göre sıralanmak istenen karar noktalarını gösterirken sütunlarda ise karar vermede kullanılacak değerlendirme faktörleri yer alır (Yurdakul ve İç, 2003). Karar matrisi eşitlik (1)'de gösterilmiştir.

A_{ij} matrisinde m karar noktası sayısını, p değerlendirme faktörü sayısını verir.

$$A_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \dots & a_{mp} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2: Normalizasyon

Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulmasında ilk olarak her bir a_{ij} değerlerinin $(a_{11}, a_{21}, a_{31} \dots a_{m1})$ kareleri alınarak bu değerlerin toplamından oluşan sütun toplamı bulunur. Daha sonra her bir a_{ij} değeri ait olduğu sütun toplamının kareköküne bölünerek normalizasyon işlemi yapılır (Yurdakul ve İç, 2003).

$$N_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m a_{ij}^2}} (i = 1, \dots, m \text{ ve } j = 1, \dots, n) \quad (2)$$

Bu işlemden sonra eşitlik (3)'teki normalize matris elde edilir.

$$N_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1p} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ n_{m1} & n_{m2} & \dots & n_{mp} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Adım 3: Ağırlıklı normalleştirilmiş karar matrisinin hesaplanması

Normalize edilmiş matrisin her bir değeri w_{ij} gibi bir değerle ağırlıklandırılması yapılır. Burada w_{ij} ağırlık değerlerinin toplamı 1 olmalıdır. Başka bir ifadeyle $\sum_{i=1}^n w_i = 1$ 'dir. Daha sonra elde edilen n_{ij} değerleri w_{ij} ağırlıkları ile çarpılarak eşitlik (4)'te belirtilen ağırlıklandırılmış normalize matris bulunur (Yurdakul ve İç, 2003).

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 n_{11} & w_2 n_{12} & \dots & w_p n_{1p} \\ w_1 n_{21} & w_2 n_{22} & \dots & w_p n_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 n_{m1} & w_2 n_{m2} & \dots & w_p n_{mp} \end{bmatrix} \quad \square \quad V_{ij} = \begin{bmatrix} v_{11} & v_{12} & \dots & v_{1p} \\ v_{21} & v_{22} & \dots & v_{2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2} & \dots & v_{mp} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Adım 4: İdeal ve negatif-ideal çözümlerin belirlenmesi

Burada maksimizasyon amaçlanıyorsa her bir sütuna ait maksimum değerler olan pozitif ideal çözüm değerleri belirlenir. Daha sonra ise yine her bir sütuna ait minimum değerler elde edilerek negatif ideal çözüm değerleri belirlenmiş olur. Eğer amaç minimizasyon ise elde edilen değerler tam tersi olacaktır (Shyjith vd., 2008). Pozitif ideal çözümlere (5) ve negatif ideal çözümlere (6) ilişkin eşitlikler aşağıda gösterilmiştir.

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\} \text{ her bir sütuna ait maksimum değerler,} \quad (5)$$

$$(A^-) = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\} \text{ her bir sütuna ait minimum değerler,} \quad (6)$$

Adım 5: Uzaklık değerlerinin hesaplanması

Her bir alternatfin pozitif ve negatif ideal çözüme olan uzaklıkları Öklid Uzaklık fonksiyonundan yararlanılarak hesaplanır (Monjezi vd., 2010). Uzaklığın hesaplanması ile ilgili formül eşitlik (7)'de verilmiştir.

$$d_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^p (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (7)$$

x_{ik} : i. gözlemin k. değişken değeri

x_{jk} : j. gözlemin k. değişken değeri

p : değişken sayısını göstermektedir.

Eşitlik (7)'deki formül genelleştirilerek, pozitif ideal uzaklığın hesaplanmasında eşitlik (8) ve negatif ideal uzaklığın hesaplanmasında eşitlik (9) kullanılır.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad (8)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad (9)$$

Burada karar noktası sayısı kadar S_i^* ve S_i^- olacaktır.

Adım 6: Göreceli yakınlığın elde edilmesi

Her bir karar noktasının ideal çözüme göreceli yakınlığını hesaplanırken pozitif ideal ve negatif ideal uzaklıklardan faydalanılır. İdeal çözüm için göreceli yakınlık C_i^* ile gösterilir. Burada C_i^* değeri $0 \leq C_i^* \leq 1$ aralığında değer alır ve $C_i^* = 1$ ilgili karar noktasının pozitif ideal çözüme yakınlaştığını, $C_i^* = 0$ ise ilgili karar noktasının negatif ideal çözüme yakınlaştığını gösterir (Monjezi vd., 2010). İdeal çözüme nispi yakınlığın hesaplanmasında eşitlik (10) kullanılır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad (10)$$

Adım 7: Sıralama yapılması

Bu adımda göreceli yakınlığa göre bir sıralama yapılır (Monjezi vd., 2010).

3. Bulgular

Bu çalışmada, çevresel sürdürülebilirlik perspektifinden akıllı ulaşım sistemlerinin performanslarını değerlendirmek için TOPSIS yöntemi kullanılmıştır. TOPSIS analizi, her bir alternatife belirlenen kriterler doğrultusunda performansını değerlendirmek ve sıralamak amacıyla gerçekleştirilmiştir.

İlk adımda, kriterler ve alternatifler için karar matrisi oluşturulmuştur. Bu matris, her bir alternatife belirlenen kriterler doğrultusunda performansını sayısal olarak ifade etmektedir. Tablo 3, AUS için karar matrisini göstermektedir.

Tablo 3. Karar matrisi

Kriterler	EOS	PESS	OAPS	ABPS
Karbon Emisyonlarının Azaltılması (Ton CO ₂ /yıl)	2000	1500	1800	2200
Enerji Verimliliği (km/kWh)	5,5	6,0	5,8	6,2
Kaynak Kullanımı (MJ/yıl)	8000	7500	7800	7200
Hava Kalitesine Etki (mikrogram/m ³)	15	12	14	16
Yenilenebilir Enerji Kullanımı (%)	30	25	35	40

İkinci adımda karar matrisindeki değerler, TOPSIS analizi için normalizasyon işlemine tabi tutulmuştur (Tablo 4). Normalizasyon işlemi, kriterler arasındaki farklı birimleri ortadan kaldırarak karşılaştırmayı mümkün kılmaktadır.

Üçüncü adımda normalizasyon matrisindeki değerlere kriter ağırlıkları uygulanarak ağırlıklı normalizasyon matrisi oluşturulmuştur (Tablo 5). Bu matris, kriterlerin önem derecelerini dikkate alarak her bir alternatife performansını daha doğru bir şekilde değerlendirmektedir.

Tablo 4. Normalizasyon matrisi (N_{ij})

Kriterler	EOS	PESS	OAPS	ABPS
Karbon Emisyonlarının Azaltılması	0,484	0,363	0,436	0,533
Enerji Verimliliği	0,446	0,487	0,471	0,504
Kaynak Kullanımı	0,495	0,464	0,483	0,446
Hava Kalitesine Etki	0,474	0,379	0,442	0,505
Yenilenebilir Enerji Kullanımı	0,421	0,351	0,491	0,562

Tablo 5. Ağırlıklı normalizasyon matrisi (V_{ij})

Kriterler	EOS	PESS	OAPS	ABPS
Karbon Emisyonlarının Azaltılması	0,145	0,109	0,131	0,160
Enerji Verimliliği	0,120	0,131	0,127	0,136
Kaynak Kullanımı	0,074	0,070	0,072	0,067
Hava Kalitesine Etki	0,071	0,057	0,066	0,076
Yenilenebilir Enerji Kullanımı	0,055	0,045	0,064	0,073

Dördüncü adımda TOPSIS yönteminde, pozitif ve negatif ideal çözümler belirlenmiştir. Pozitif ideal çözüm, her bir kriter için en yüksek performans değerlerini, negatif ideal çözüm ise en düşük performans değerlerini ifade etmektedir. Aşağıdaki değerler pozitif ve negatif ideal çözümleri göstermektedir.

Pozitif İdeal Çözüm (A^*): {0,160 0,136 0,067 0,076 0,073}

Negatif İdeal Çözüm (A^-): {0,109 0,120 0,074 0,057 0,045}

Beşinci adımda her bir alternatife pozitif ve negatif ideal çözümlere olan uzaklıkları (Tablo 6) hesaplanmıştır.

Tablo 6. Uzaklıkların hesaplanması

Alternatifler	S_i^+	S_i^-
EOS	0,027	0,073
PESS	0,079	0,029
OAPS	0,051	0,049
ABPS	0,046	0,081

Altıncı adımda, her bir alternatife göreceli yakınlık değerleri hesaplanmıştır (Tablo 7). Göreceli yakınlık değeri, bir alternatife pozitif ideal çözüme ne kadar yakın olduğunu göstermektedir.

Son adımda ise göreceli yakınlık değerlerine göre sıralama yapılmıştır. TOPSIS analizi sonucunda, alternatifler arasında en yüksek göreceli yakınlık değerine sahip olan EOS en iyi performansı göstermiş olup sıralama şu şekildedir:

1. EOS: 0,730
2. ABPS: 0,637
3. OAPS: 0,490
4. PESS: 0,269

Tablo 7. Göreceli yakınlık (C_i^*)

Alternatifler	C
EOS	0,730
PESS	0,269
OAPS	0,490
ABPS	0,637

EOS, en yüksek göreceli yakınlık değerine sahip olup, karbon emisyonlarının azaltılması, enerji verimliliği, kaynak kullanımı, hava kalitesine etki ve yenilenebilir enerji kullanımı kriterlerinde diğer sistemlere kıyasla daha iyi performans göstermektedir. ABPS, ikinci sırada yer almakta olup, özellikle karbon emisyonlarının azaltılması ve yenilenebilir enerji kullanımı açısından güçlü bir performans sergilemektedir. OAPS ve PESS, sırasıyla üçüncü ve dördüncü sırada yer almakta olup, diğer sistemlere kıyasla daha düşük performans göstermektedir. Bu sistemlerin, enerji verimliliği ve kaynak kullanımı gibi kriterlerde iyileştirmeler yapması gerekmektedir. Bulgular, elektrikli otobüsler ve akıllı bisikletlerin yüksek sürdürülebilirlik performansları ile öne çıktığını gösterirken, otonom araçlar ve elektrikli skuterlerin belirli alanlarda geliştirme potansiyeline sahip olduğunu ortaya koymaktadır.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma, farklı akıllı ulaşım sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik kriterleri açısından değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Karbon emisyonlarının azaltılması, enerji verimliliği, kaynak kullanımı, hava kalitesine etki ve yenilenebilir enerji kullanımı kriterleri dikkate alınarak dört farklı akıllı ulaşım sistemi (elektrikli otobüs sistemi, paylaşımlı elektrikli skuter sistemi, otonom araç paylaşım sistemi ve akıllı bisiklet paylaşım sistemi) TOPSIS yöntemi ile analiz edilmiştir.

EOS, çevresel sürdürülebilirlik açısından en iyi seçenek olarak belirlenmiştir (Tablo 7). En yüksek göreceli yakınlık değerine (0,730) sahip olan bu sistem, karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji verimliliği konularında üstün performans sergilemektedir (Tablo 5). EOS, fosil yakıt kullanımını azaltarak kaynak kullanımını optimize ederken, hava kalitesine de olumlu katkı sağlamaktadır. Elektrikli otobüslerin karbon emisyonlarının azaltılmasında ve enerji verimliliğinde iyi bir performans gösterdiği, çeşitli çalışmalar tarafından da desteklenmektedir. Du ve Kommalapati (2021), elektrikli otobüslerin sıfır

emisyonla çalıştığını ve fosil yakıt kullanımını minimize ederek hava kalitesini iyileştirdiğini belirtmiştir. Dreier ve diğerleri (2018), Mao ve diğerleri (2020) ve Zhou ve diğerleri (2016), çalışmalarında dizel otobüslerden elektrikli otobüslere geçişte emisyon miktarının azaldığını ortaya koymuştur. Bununla birlikte, elektrikli otobüslerin diğer elektrikli araçlar gibi yaşam döngüsü analizinde belirli aşamalarda emisyon tükettiği de göz ardı edilmemelidir. Mao ve diğerleri (2020), yaşam boyu enerji kullanımı ve sera gazı emisyonlarına yönelik yaptığı çalışmada elektrikli otobüslerin emisyon kaynağının elektrik üretimi (%63,9) ve şarj süreci (%30,9) aşamaları olduğunu bildirmiştir. Ancak, toplu taşıma aracı olarak elektrikli otobüsler, daha fazla yolcu taşıma kapasitesi sebebiyle kişi başına değerler düştüğü için bireysel motorlu taşıtlara kıyasla daha çevre dostu olarak algılanmaktadır. Bu özellikleri, EOS'un diğer sistemler arasında en sürdürülebilir seçenek olduğunu ve bu sistemlerin şehir içi toplu taşımada yaygınlaştırılmasının faydalı olabileceğini göstermektedir. Elektrikli otobüslerin kullanımının yaygınlaştırılması için artık günümüzde hükümetler ve yerel yönetimler tarafından teşvik edici politikalar uygulanmaktadır. Bu teşvikler, finansal destekler, vergi indirimleri ve altyapı yatırımları şeklinde olabilmektedir.

ABPS, ikinci en yüksek göreceli yakınlık değerine (0.637) sahiptir (Tablo 7). ABPS, fosil yakıt kullanmaması ve tamamen yenilenebilir enerji ile çalışması nedeniyle çevresel sürdürülebilirlik açısından güçlü bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Karbon emisyonlarını azaltma ve enerji verimliliği konularında çok etkili olan bu sistem, hava kalitesini iyileştirme konusunda da önemli katkılar sağlamaktadır (Tablo 5). Akıllı bisiklet paylaşım sistemleri de literatürde çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır (Fan ve Zheng, 2020; Hamilton ve Wichman, 2018; Wang ve Zhou, 2017). Qiu ve He (2018), bisiklet paylaşım sistemlerinin kısa mesafeli yolculuklar için etkili ve ekonomik bir ulaşım sağladığını, böylece karbon emisyonlarını ve enerji tüketimini azaltmada önemli katkılar sunduğunu ifade etmektedir. Bu bağlamda, çalışmanın bulguları ile literatürdeki veriler arasında tutarlılık gözlenmektedir. Bisiklet paylaşım sistemlerinin altyapısının geliştirilmesi ve bireysel ulaşımında çevre dostu bir seçenek olarak desteklenmesi, şehirlerin çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmasına yardımcı olabilir.

OAPS, üçüncü sırada yer almakta ve ortalama bir performans sergilemektedir (Tablo 7). OAPS, karbon emisyonlarının azaltılması ve enerji verimliliği konularında makul bir performans göstermesine rağmen, kaynak kullanımı ve yenilenebilir enerji kullanımı açısından diğer iki sisteme göre daha az avantajlıdır. Hava kalitesine katkısı ve çevresel sürdürülebilirlik açısından ortalama bir performans sergileyen bu sistem, geliştirilmesi gereken alanlara sahiptir. Otonom araç paylaşım sistemleri konusunda literatür daha karmaşık sonuçlar sunmaktadır. Otonom araçların çevreyi olumlu yönde etkileyecek özerklik derecesine ulaşmayı sağlayacak teknoloji hâlâ geliştirilme aşamasındadır (Society of Automotive Engineers, 2018). Fagnant ve Kockelman (2014), Patella ve diğerleri (2019) ve Wadud ve diğerleri (2016), otonom araçların potansiyel olarak emisyon miktarını azaltabileceğini ve enerji verimliliğini artırabileceğini belirtirler de, enerji verimliliği ve kaynak kullanımı açısından henüz beklenen performansı tam olarak sağlayamadığını vurgulamışlardır. Çalışmada da OAPS'ın diğer sistemlere göre daha düşük performans sergilediği gözlemlenmiş olup (Tablo 5) bu bulgu literatür ile tutarlıdır. Otonom araçların enerji verimliliğini ve çevresel performansını artırmak için teknoloji geliştirme ve yenilikçi çözümler araştırılmalıdır. Bu araçların elektrikli versiyonlarının yaygınlaştırılması, çevresel etkilerini olumlu yönde etkileyecektir.

PESS, en düşük göreceli yakınlık değerine (0.269) sahip olup çevresel sürdürülebilirlik açısından en az avantajlı sistem olarak belirlenmiştir (Tablo 7). PESS, enerji verimliliği ve karbon emisyonlarının azaltılması konularında belirli faydalar sağlasa da, kaynak kullanımı ve hava kalitesine etki konularında yeterince güçlü değildir (Tablo 5). Ayrıca, yenilenebilir enerji kullanımı da diğer sistemlere göre daha düşüktür (Tablo 5). Paylaşımlı elektrikli skuter sistemleri, literatürde hem avantajları hem de dezavantajları ile ele alınmaktadır. Reis ve diğerleri (2023), elektrikli skuterlerin kısa mesafeli yolculuklar için sürdürülebilir bir çözüm sunduğunu ancak bu araçların enerji verimliliği ve uzun ömürlülük açısından bazı zorluklar yaşadığını ifade etmektedir. Birçok çalışma paylaşımlı elektrikli skuterlerin sürüş sırasındaki emisyon miktarlarının sifıra eşit olmasına rağmen sistemin yaşam döngüsü sürecinde emisyon miktarının arttığı konusunda hemfikirlerdir (Hollingsworth vd., 2019; Moreau vd., 2020; Severengiz vd., 2020). Hollingsworth ve diğerlerine (2019) göre paylaşımlı e-skuter

emisyonlarının ana nedeni, malzeme ve üretim aşamasından (%50) kaynaklanmakta olup bu aşamayı da e-skuterlerin günlük olarak toplanması ve yeniden dağıtılması aşaması (%43) takip etmektedir. Ayrıca yazarlara göre paylaşımlı e-skuterlerin çevresel etkileri en çok paylaşımlı e-skuterin günlük kullanımına, skuter kullanım ömrüne, yeniden dengeleme için kat edilen mesafeye ve araç yakıt verimliliğine duyarlıdır (Hollingsworth vd., 2019). Paylaşımlı elektrikli skuterlerin pilleri geri dönüştürülmez ve doğal olarak bozulursa metan gazı üretmekte ve daha fazla çevresel kirliliğe (su, toprak, hava vb.) neden olmaktadır (Chen vd., 2017). Kısa hizmet ömrü ve çevre kirliliği tehlikeleri nedeniyle, paylaşımlı elektrikli mikromobilité araçları pillerinin geri dönüşümü ve yeniden kullanımı oldukça önemlidir. Kazmaier ve diğerlerine (2020) göre paylaşımlı e-skuterların hizmet ömrünü artırarak sera gazı emisyonları e-skuter başına toplamda %72 oranında azaltılabilmektedir. Çalışmanın bulguları da PESS'in en düşük performansı sergileyerek literatürdeki bu değerlendirmeleri desteklemektedir. Bu sistemlerin performansının artırılması için kullanıcı davranışları üzerinde çalışmalar yapılmalı ve teknolojik iyileştirmeler gerçekleştirilmelidir. Ek olarak, elektrikli skuterlerin batarya ömrü ve verimliliği artırılmalıdır. Daha uzun ömürlü ve çevre dostu bataryaların kullanılması, bu sistemlerin sürdürülebilirliğini artıracaktır.

Bu çalışma, şehir plancıları, ulaşım plancıları, politika yapıcılar, yerel yönetimler ve ilgili muadil tüm aktörler için akıllı ulaşım sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik hedefleri doğrultusunda en uygun seçeneği belirlemede önemli bilgiler sunmaktadır. Akıllı ulaşım sistemlerinin çevresel sürdürülebilirlik performanslarının değerlendirilmesi, sürdürülebilir şehir içi ulaşım politikalarının geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Gelecekteki çalışmalar, bu değerlendirmeleri genişleterek ekonomik ve sosyal sürdürülebilirlik kriterlerini de içermeli ve daha kapsamlı analizler yapılmalıdır. Bu sayede, akıllı ulaşım sistemlerinin tüm yönleriyle değerlendirilmesi mümkün olacaktır.

Etik Kurul Onay Beyanı

İlgili çalışmada insan veya hayvan katılımcılardan veri toplanmadığı için etik kurul izni gerekmemektedir.

Kaynakça

- Akande, N. O., Arulogun, O. T., Ganiyu, R. A. ve Adeyemo, I. A. (2018). Improving the quality of service in public road transportation using real time travel information system. *World Review of Intermodal Transportation Research*, 7(1), 57-79. <https://doi.org/10.1504/WRITR.2018.089529>
- Aslan, H. M., Yıldız, M. S. ve Uysal, H. T. (2015). Application of fuzzy TOPSIS method on location selection of disaster stations: A location analysis in Düzce. *Journal of Politics, Economics and Management Research*, 3(2), 111-128.
- Auer, A., Feese, S., Lockwood, S. ve Hamilton, B. A. (2016). *History of intelligent transportation systems*. United States Department of Transportation. <https://rosap.ntl.bts.gov/view/dot/30826>
- Barth, M. J., Wu, G. ve Boriboonsomsin, K. (2015). Intelligent transportation systems and greenhouse gas reductions. *Current Sustainable/Renewable Energy Reports*, 2(3), 90-97. <https://doi.org/10.1007/s40518-015-0032-y>
- Behzadian, M., Otaghsara, S. K., Yazdani, M. ve Ignatius, J. (2012). A state-of the-art survey of TOPSIS applications. *Expert Systems with Applications*, 39(17), 13051-13069. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.05.056>
- Bhaskar, A. S., Khan, A. ve Patre, S. R. (2021). Application potential of fuzzy embedded TOPSIS approach to solve MCDM based problems. *Intelligent manufacturing içinde* (ss. 99-121), Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-50312-3_5
- Brakewood, C. ve Watkins, K. (2019). A literature review of the passenger benefits of real-time transit information. *Transport Reviews*, 39(3), 327-356. <https://doi.org/10.1080/01441647.2018.1472147>
- Brennand, C. A., Filho, G. P. R., Maia, G., Cunha, F., Guidoni, D. L. ve Villas, L. A. (2019). Towards a fog-enabled intelligent transportation system to reduce traffic jam. *Sensors*, 19(18), 3916, 1-29. <https://doi.org/10.3390/s19183916>
- Browne, M., Allen, J. ve Leonardi, J. (2012). Evaluating the use of an urban consolidation centre and electric vehicles in central London. *IATSS Research*, 35(1), 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.iatssr.2011.06.002>
- Camodeca, R. ve Almici, A. (2021). Digital transformation and convergence toward the 2030 agenda's sustainability development goals: Evidence from Italian listed firms. *Sustainability*, 13(21), 11831-11849. <https://doi.org/10.3390/su132111831>
- Carter, C. R. ve Rogers, D. S. (2008). A framework of sustainable supply chain management: Moving toward new theory. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 38(5), 360-387. <https://doi.org/10.1108/09600030810882816>
- Chandrappa, S., Guruprasad, M. S., Kumar, H. N., Raju, K. ve Kumar, D. S. (2023). An IoT-based automotive and intelligent toll gate using RFID. *SN Computer Science*, 4(2), 154, 1-15. <https://doi.org/10.1007/s42979-022-01569-0>
- Chen, S. J. ve Hwang, C. L. (1992). *Fuzzy multiple attribute decision making: Methods and applications*. Springer-Verlag.
- Chen, F., Yang, B., Zhang, W., Ma, J., Lv, J. ve Yang, Y. (2017). Enhanced recycling network for spent e-bicycle batteries: A case study in Xuzhou, China. *Waste Management*, 60, 660-665. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2016.09.027>
- Cheng, Z., Pang, M. S. ve Pavlou, P. A. (2020). Mitigating traffic congestion: The role of intelligent transportation systems. *Information Systems Research*, 31(3), 653-674. <https://doi.org/10.1287/isre.2019.0894>
- Cho, S., Shrestha, B., Salah, B., Ullah, I. ve Salem, N. M. (2022). A proposed waiting time algorithm for a prediction and prevention system of traffic accidents using smart sensors. *Electronics*, 11(11), 1765, 1-19. <https://doi.org/10.3390/electronics11111765>
- Crawford, D. (2021). *Benefits of ITS*. Road Network Operations Intelligent Transport Systems. <https://rno-its.piarc.org/en/its-basics/benefits-its>

- De Oliveira, L. F. P., Manera, L. T. ve Da Luz, P. D. G. (2020). Development of a smart traffic light control system with real-time monitoring. *IEEE Internet of Things Journal*, 8(5), 3384-3393. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2020.3022392>
- Desertot, M., Lecomte, S., Gransart, C. ve Delot, T. (2012). Intelligent transportation systems. *Computer Science and Ambient Intelligence*, 285-306. <https://doi.org/10.1002/9781118580974.ch13>
- Dreier, D., Silveira, S., Khatiwada, D., Fonseca, K. V., Nieweglowski, R. ve Schepanski, R. (2018). Well-to-Wheel analysis of fossil energy use and greenhouse gas emissions for conventional, hybrid-electric and plug-in hybrid-electric city buses in the BRT system in Curitiba, Brazil. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 122-138. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.015>
- Du, H. ve Kommalapati, R. R. (2021). Environmental sustainability of public transportation fleet replacement with electric buses in Houston, a megacity in the USA. *International Journal of Sustainable Engineering*, 14(6), 1858-1870. <https://doi.org/10.1080/19397038.2021.1972491>
- Du, L. ve Dao, H. (2014). Information dissemination delay in vehicle-to-vehicle communication networks in a traffic stream. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 16(1), 66-80. <https://doi.org/10.1109/TITS.2014.2326331>
- Elassy, M., Al-Hattab, M., Takruri, M. ve Badawi, S. (2024). Intelligent transportation systems for sustainable smart cities. *Transportation Engineering*, 16, 100252-100270. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2024.100252>
- Fagnant, D. J. ve Kockelman, K. M. (2014). The travel and environmental implications of shared autonomous vehicles, using agent-based model scenarios. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 40, 1-13. <https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.12.001>
- Fan, Y. ve Zheng, S. (2020). Dockless bike sharing alleviates road congestion by complementing subway travel: Evidence from Beijing. *Cities*, 107, 102895, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102895>
- Fleming, G. (2009). *Best practices for implementing quality control and quality assurance for tunnel inspection..* <https://transportationops.org/research/best-practices-implementing-quality-control-and-quality-assurance-tunnel-inspection#downloads>
- Ganesh, K., Thrivikraman, M., Kuri, J., Dagale, H., Sudhakar, G. ve Sanyal, S. (2012). Implementation of a real time passenger information system. *arXiv preprint arXiv:1206.0447*, 1-14. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1206.0447>
- Geels, F. W., Kemp, R., Dudley, G. ve Lyons, G. (2012). *Automobility in transition? A socio-technical analysis of sustainable transport*. Routledge.
- Guerrero-Ibanez, J. A., Zeadally, S. ve Contreras-Castillo, J. (2015). Integration challenges of intelligent transportation systems with connected vehicle, cloud computing, and internet of things technologies. *IEEE Wireless Communications*, 22(6), 122-128. <https://doi.org/10.1109/MWC.2015.7368833>
- Hamilton, T. L. ve Wichman, C. J. (2018). Bicycle infrastructure and traffic congestion: Evidence from DC's capital bikeshare. *Journal of Environmental Economics and Management*, 87, 72-93. <https://doi.org/10.1016/j.jeem.2017.03.007>
- Hollingsworth, J., Copeland, B. ve Johnson, J. X. (2019). Are e-scooters polluters? The environmental impacts of shared dockless electric scooters. *Environmental Research Letters*, 14(8), 084031, 1-10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab2da8>
- Hwang, C. L., ve Yoon, K. (1981). Methods for multiple attribute decision making. *Multiple attribute decision making* içinde (Cilt 186, ss 58-191). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-48318-9_3
- Ishizaka, A. ve Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, 38(11), 14336-14345. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2011.04.143>

- Kamalakaran, R., Ramesh, C., Shunmugasundaram, M., Sivakumar, P. ve Mohamed, A. (2020). Evaluatation and selection of suppliers using TOPSIS. *Materials Today: Proceedings*, 33, 2771-2773. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.02.105>
- Karmakar, G., Chowdhury, A., Kamruzzaman, J. ve Gondal, I. (2020). A smart priority-based traffic control system for emergency vehicles. *IEEE Sensors Journal*, 21(14), 15849-15858. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3023149>
- Kazmaier, M., Taefi, T. T. ve Hettesheimer, T. (2020). Techno-economical and ecological potential of electric scooters: Life cycle analysis. *European Journal of Transport and Infrastructure Research*, 20(4), 233-251. <https://doi.org/10.18757/ejtir.2020.20.4.4912>
- Kopplin, C. S., Brand, B. M. ve Reichenberger, Y. (2021). Consumer acceptance of shared e-scooters for urban and short-distance mobility. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 91, 102680, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102680>
- Lee, W. H., Tseng, S. S. ve Wang, C. H. (2008). Design and implementation of electronic toll collection system based on vehicle positioning system techniques. *Computer Communications*, 31(12), 2925-2933. <https://doi.org/10.1016/j.comcom.2008.05.014>
- Lee, W. H. ve Chiu, C. Y. (2020). Design and implementation of a smart traffic signal control system for smart city applications. *Sensors*, 20(2), 508, 1-18. <https://doi.org/10.3390/s20020508>
- Lin, Y., Wang, P. ve Ma, M. (2017, 26 Mayıs). *Intelligent transportation system (ITS): Concept, challenge and opportunity* [Konferans sunumu]. IEEE 3rd International Conference On Big Data Security On Cloud (Bigdatasecurity), Beijing, China.
- Liu, P. (2012). An approach to group decision making based on 2-dimension uncertain linguistic information. *Technological and Economic Development of Economy*, 18(3), 424-437. <https://doi.org/10.3846/20294913.2012.702139>
- Lv, Z. ve Shang, W. (2023). Impacts of intelligent transportation systems on energy conservation and emission reduction of transport systems: A comprehensive review. *Green Technologies and Sustainability*, 1(1), 100002, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.grets.2022.100002>
- Makarova, I., Shubenkova, K. ve Pashkevich, A. (2021). Efficiency assessment of measures to increase sustainability of the transport system. *Transport*, 36(2), 123-133. <https://doi.org/10.3846/transport.2021.14996>
- Mao, F., Li, Z. ve Zhang, K. (2020). Carbon dioxide emissions estimation of conventional diesel buses electrification: A well-to-well analysis in Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123048, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123048>
- Milanes, V., Villagra, J., Godoy, J., Simó, J., Pérez, J. ve Onieva, E. (2012). An intelligent V2I-based traffic management system. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 13(1), 49-58. <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2178839>
- Monjezi, M., Dehghani, H., Singh, T. N., Sayadi, A. R. ve Gholinejad, A. (2012). Application of TOPSIS method for selecting the most appropriate blast design. *Arabian Journal of Geosciences*, 5(1), 95. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0133-2>
- Moreau, H., de Jamblinne de Meux, L., Zeller, V., D'Ans, P., Ruwet, C. ve Achten, W. M. (2020). Dockless e-scooter: A green solution for mobility? Comparative case study between dockless e-scooters, displaced transport, and personal e-scooters. *Sustainability*, 12(5), 1803, 1-17. <https://doi.org/10.3390/su12051803>
- Ministère de la Transition écologique et solidaire-Ministère chargé des Transports (MTES/MCT). (2017). *Les Systèmes de transport intelligents: L'expertise française*. https://www.idrrim.com/ressources/documents/9/5218-14085_Transport-intelligent_Web_pla.pdf
- National Operations Center of Excellence (NOCoe). (2010). *Traffic incident management handbook*. <https://transportationops.org/publications/traffic-incident-management-handbook>

- Oprić, S. ve Tzeng, G. H. (2004). Compromise solution by MCDM methods: A comparative analysis of VIKOR and TOPSIS. *European Journal of Operational Research*, 156(2), 445-455. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00020-1](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00020-1)
- Özkan, G. ve Deliktaş, E. (2020). Banka performanslarının topsis yöntemiyle analizi. *İzmir Katip Çelebi Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 3(1), 31-40.
- Öztaş Karlı, R. G. ve Çelikyay, H. (2022). Akıllı ulaşım sistemleri (AUS) üzerine Türkiye'deki politikaların araştırılması. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 5(2), 1-14. <https://doi.org/10.51513/jitsa.1090659>
- Öztaş Karlı, R. G., Karlı, H. ve Çelikyay, H. S. (2022). Investigating the acceptance of shared e-scooters: Empirical evidence from Turkey. *Case studies on Transport Policy*, 10(2), 1058-1068. <https://doi.org/10.1016/j.cstp.2022.03.018>
- Patella, S. M., Scrucca, F., Asdrubali, F. ve Carrese, S. (2019). Carbon Footprint of autonomous vehicles at the urban mobility system level: A traffic simulation-based approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 74, 189-200. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.08.007>
- Pathak, D. K., Verma, A. ve Kumar, V. (2020). Performance variables of GSCM for sustainability in Indian automobile organizations using TOPSIS method. *Business Strategy & Development*, 3(4), 590-602. <https://doi.org/10.1002/bsd2.124>
- Pojani, D. ve Stead, D. (2015). Sustainable urban transport in the developing world: Beyond megacities. *Sustainability*, 7(6), 7784-7805. <https://doi.org/10.3390/su7067784>
- Saaty, T. L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill.
- Shih, H. S., Shyur, H. J. ve Lee, E. S. (2007). An extension of TOPSIS for group decision making. *Mathematical and Computer Modelling*, 45(7-8), 801-813. <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2006.03.023>
- Shyjith, K., Ilangkumaran, M. ve Kumanan, S. (2008). Multi-criteria decision-making approach to evaluate optimum maintenance strategy in textile industry. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 14(4), 375-386. <https://doi.org/10.1108/13552510810909975>
- Qi, L. (2008, 2-3 Ağustos). *Research on intelligent transportation system technologies and applications* [Konferans sunumu]. 2008 Workshop on Power Electronics and Intelligent Transportation System IEEE, Guangzhou, China.
- Qiu, L. Y. ve He, L. Y. (2018). Bike sharing and the economy, the environment, and health-related externalities. *Sustainability*, 10(4), 1145, 1-10. <https://doi.org/10.3390/su10041145>
- Reis, A. F., Baptista, P. ve Moura, F. (2023). How to promote the environmental sustainability of shared e-scooters: A life-cycle analysis based on a case study from Lisbon, Portugal. *Journal of Urban Mobility*, 3, 100044, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.urbmob.2022.100044>
- Society of Automotive Engineers. (2018). *Taxonomy and definitions for terms related to driving automation systems for on-road motor vehicles*. https://www.sae.org/standards/content/j3016_201806/
- Severengiz, S., Finke, S., Schelte, N. ve Forrister, H. (2020). Assessing the environmental impact of novel mobility services using shared electric scooters as an example. *Procedia Manufacturing*, 43, 80-87. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.114>
- Tektaş, M. ve Tektaş, N. (2019). Akıllı ulaşım sistemleri (AUS) uygulamalarının sektörlere göre dağılımı. *Akıllı Ulaşım Sistemleri ve Uygulamaları Dergisi*, 2(1), 32-41.
- Tyrinopoulos, Y. ve Antoniou, C. (2020). Review of factors affecting transportation systems adoption and satisfaction. C. Antoniou, D. Efthymiou ve E. Chaniotakis (Ed.) *Demand for emerging transportation systems* içinde (ss. 11-36). Elsevier.
- Uluçay, U. ve Tanyaş, M. (2023). Trafik akışı iyileştirmesinin trafik sıkışıklığını azaltmaya etkisi: Simülasyonlu alternatif bakış. *Trafik ve Ulaşım Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 96-110. <https://doi.org/10.38002/tuad.1274489>

- Urfalıoğlu, F. ve Genç, T. (2013). Çok kriterli karar verme teknikleri ile Türkiye'nin ekonomik performansının Avrupa Birliği üye ülkeleri ile karşılaştırılması. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 35(2), 329-360. <https://doi.org/10.14780/iibdergi.201324469>
- Wadud, Z., MacKenzie, D. ve Leiby, P. (2016). Help or hindrance? The travel, energy and carbon impacts of highly automated vehicles. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 86, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.12.001>
- Welch, T. F. ve Widita, A. (2019). Big data in public transportation: A review of sources and methods. *Transport Reviews*, 39(6), 795-818. <https://doi.org/10.1080/01441647.2019.1616849>
- Yurdakul, M. ve İç, Y. (2003). Türk otomotiv firmalarının performans ölçümü ve analizine yönelik TOPSIS yöntemini kullanan bir örnek çalışma. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(1), 1-18.
- Zaghal, R., Thabatah, K. ve Salah, S. (2017, 18-20 Temmuz). *Towards a smart intersection using traffic load balancing algorithm* [Konferans sunumu]. 2017 Computing Conference IEEE, London, UK.
- Zhou, B., Wu, Y., Zhou, B., Wang, R., Ke, W., Zhang, S. ve Hao, J. (2016). Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. *Energy*, 96, 603-613. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.041>