



Yeşil Araç Rotalama Problemlerinin Entegre Pisagor Bulanık AHP ve EDAS Yöntemleri ile Analizi

Gözde BAKIOĞLU^{1*}

¹Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/05/2024
Düzeltilme: 19/10/2024
Kabul: 21/10/2024

Anahtar Kelimeler

Yeşil Araç Rotalama
Problemi
Pisagor Bulanık AHP
EDAS
Sürdürülebilirlik

Article Info

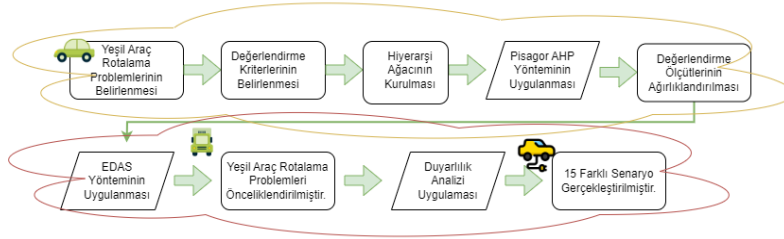
Research article
Received: 08/05/2024
Revision: 19/10/2024
Accepted: 21/10/2024

Keywords

Green Vehicle Routing
Pythagorean fuzzy AHP
EDAS
Sustainability

Grafik Özet (Graphical/Tabular Abstract)

Bu çalışmada yeşil araç rotalama problemleri entegre çok kriterli karar verme yöntemleri kullanılarak önceliklendirilmiş olup, yöntemin kararlılığını test etmek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. / Green Vehicle Routing Problems are prioritized using hybrid multi-criteria decision-making methods, and sensitivity analysis is conducted to test the stability of the method.



Şekil A: Çalışmanın Amacı / Figure A: Flowchart of research

Önemli noktalar (Highlights)

- Değerlendirme ölçütleri Pisagor bulanık AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. / The evaluation criteria have been weighted using the Pythagorean fuzzy AHP method.
- EDAS yöntemi uygulanarak yeşil araç rotalama problemleri önceliklendirilmiştir. / The EDAS method has been applied to prioritize green vehicle routing problems.
- 15 farklı senaryo uygulanarak önerilen metodun duyarlılığı test edilmiştir. / The sensitivity of the proposed method has been tested using 15 different scenarios.

Amaç (Aim): Bu çalışmanın amacı, yeşil araç rotalama problemlerini inceleyerek çevre dostu ve sürdürülebilir ulaşım çözümlerini belirlemek ve bu çözümler arasında en uygun seçimi yapmaktır. / The aim of this study is to examine green vehicle routing problems to identify environmentally friendly and sustainable transportation solutions, and to make the most suitable selection among these solutions.

Özgünlük (Originality): Literatürde, yeşil araç rotalama problemlerinin tüm kısıtları ve kriterleri kapsayan sistematik bir modellemeyle sunulmamış olması ve optimizasyon problemlerinin ÇKKV yöntemleri ile değerlendirildiği çalışmaların eksikliği, bu araştırmanın özgünlüğünü ve yenilikçiliğini öne çıkarmaktadır. / The absence of a systematic modeling that encompasses all constraints and criteria of green vehicle routing problems in the literature, along with the lack of studies evaluating optimization problems using multi-criteria decision-making (MCDM) methods, highlights the originality and innovativeness of this research.

Bulgular (Results): Uygulanan yöntem sonucunda, "Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi" en yüksek önceliği alırken, "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütü de yeşil araç rotalama problemlerinin değerlendirilmesinde birinci sırada yer almıştır. Ayrıca, duyarlılık analizi sonuçları, önerilen entegre bulanık karar verme yönteminin tutarlı olduğunu göstermiştir. / As a result of the applied method, the 'Low Emission Vehicle Routing Problem' received the highest priority, while the 'Emission Reduction Potential' criterion ranked first in the evaluation of green vehicle routing problems. Additionally, the results of the sensitivity analysis demonstrated that the proposed integrated fuzzy decision-making method is consistent.

Sonuç (Conclusion): Önceliklendirilen yeşil araç rotalama problemleri, uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine önemli katkılar sağlamaktadır. / The prioritized green vehicle routing problems contribute significantly to long-term sustainability goals.



Yeşil Araç Rotalama Problemlerinin Entegre Pisagor Bulanık AHP ve EDAS Yöntemleri ile Analizi

Gözde BAKIOĞLU^{1*}

¹Marmara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

Makale Bilgisi

Araştırma makalesi
Başvuru: 08/05/2024
Düzeltilme: 19/10/2024
Kabul: 21/10/2024

Anahtar Kelimeler

Yeşil Araç Rotalama
Problemi
Pisagor Bulanık AHP
EDAS
Sürdürülebilirlik

Öz

Günümüzde, iklim değişikliği, hava kirliliği ve doğal kaynakların tükenmesi gibi çevresel sorunlar, küresel ölçekte artan bir endişe kaynağı olmuştur ve bu sorunlar çevresel sürdürülebilirlik için acil önlemlerin alınmasını gerektirmektedir. Ulaşım endüstrisi, çevresel etkilere önemli ölçüde katkı sağlayan sektörlerden biridir. Yeşil araç rotalama problemleri, düşük emisyonlu ve çevre dostu araçların tercih edilmesiyle çevresel etkileri minimize ederek sürdürülebilir ulaşım sistemlerinin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada, yeşil araç rotalama problemleri, çok kriterli karar verme problemi olarak ele alınmış, karar vericilere çeşitli senaryolar ve ağırlıklandırma seçenekleri sunulularak karar sürecinin şeffaflığı artırılmıştır. Bu bağlamda, göreceli olarak yeni bir yaklaşım olan Pisagor Bulanık Kümeler ortamında genişletilmiş Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) ve EDAS (Ortalama Çözüm Uzaklığına Dayalı Değerlendirme) entegre modeli üzerine çalışılmış ve 6 değerlendirme ölçütü ile 5 yeşil araç rotalama problemi arasında seçim yapılmıştır. Bununla birlikte, farklı ölçüt ağırlıkları altında karar verme probleminin nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve önerilen metodun duyarlılığı 15 farklı senaryo üzerinde test edilmiştir. Bu çalışmanın sonuçları, araştırmacılara çeşitli yeşil araç rotalama senaryolarını değerlendirme ve analiz etme imkânı sağlarken, endüstri profesyonellerine ve lojistik yöneticilerine maliyeti düşüren, operasyonel verimliliği arttıran, çevre dostu çözümleri sunmaktadır.

Analysis of Green Vehicle Routing Problems with Integrated Pythagorean Fuzzy AHP and EDAS Methods

Article Info

Research article
Received: 08/05/2024
Revision: 19/10/2024
Accepted: 21/10/2024

Keywords

Green Vehicle Routing
Pythagorean fuzzy AHP
EDAS
Sustainability

Abstract

Nowadays, environmental issues such as climate change, air pollution and depletion of natural resources are of increasing concern on a global scale and require urgent measures for environmental sustainability. The transportation industry is one of the sectors that contributes significantly to environmental impacts. Green vehicle routing problems facilitate the establishment of sustainable transportation systems by minimizing environmental impacts through the preference of low-emission and eco-friendly vehicles. In this study, green vehicle routing problems are considered as a multi-criteria decision-making problem, enhancing decision-making transparency by providing decision-makers with various scenarios and weighting options. In this context, an extended Analytic Hierarchy Process (AHP) and EDAS (Evaluation Based on Average Distance to Solution) integrated model in Pythagorean Fuzzy Sets environment, which is a relatively new approach, was carried out and 5 green vehicle routing problems were selected with 6 evaluation criteria. Furthermore, sensitivity analysis was conducted to assess how the decision-making problem is influenced by varying criteria weights, and the robustness of the proposed method was tested across 15 different scenarios. The results of this study provide researchers with the opportunity to evaluate and analyze various green vehicle routing scenarios, while providing industry professionals and logistics managers with environmentally friendly solutions that reduce costs and increase operational efficiency.

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Araç rotalama problemi, bir veya birden fazla aracın belirli kısıtlar altında, genellikle müşteri noktalarını ziyaret ederek en verimli rotayı belirleme sürecidir. Bu kısıtlar arasında araç kapasitesi, zaman sınırları ve noktalar arası mesafeler yer alır. Bu tür bir optimizasyon, genellikle lojistik, dağıtım ve taşımacılık endüstrilerinde karşılaşılar. İşletmeler, araç rotalama problemlerini çözerek teslimat maliyetlerini azaltabilir, teslimat sürelerini optimize edebilir ve kaynakları daha etkin bir şekilde kullanabilir.

Dünya Enerji Serisinin 2024 raporuna göre, Asya'daki güçlü talebin etkisiyle küresel enerji tüketimi 2024 yılında %1,8 oranında artacağı, yenilenebilir enerjiye olan talebin ise %11 oranında yükseleceği belirtilmektedir [1]. Dijital teknolojilerdeki ilerlemeler ve yenilenebilir enerji kaynaklarında maliyet azaltmaları, bazı enerji güvenliği sorunlarını ortadan kaldırırken, enerji geçişlerinde büyük fırsatlar sunmaktadır. Sürdürülebilir kalkınma senaryolarında hidrojen ve yenilenebilir enerjilerin doğrudan kullanımına ek olarak, 2040'a kadar elektriğin tüketiminde bir artış yaşanacağı öngörülmektedir [2]. Avrupa Komisyonu, sera gazı emisyonlarını 2030'a kadar %40 oranında azaltmayı hedeflemekte olup, ulaştırma sektörünün bu emisyonların %20'sinden sorumlu olduğunu belirtmektedir [3].

Kentlere göçlerin artmasıyla birlikte, şehirlerde hava kalitesi giderek daha fazla önem kazanmaktadır. Bu durum, sürdürülebilir yakıt kullanımı ve emisyon salınımını içeren çözümlerin önemini artırmaktadır. Yeşil araç rotalama problemleri, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik ilkelerinin entegrasyonuna odaklanan bir alt dal olarak geleneksel araç rotalama problemlerinden türemiştir [4]. Enerji ve yakıt tüketimini, sera gazı salınımını azaltmayı hedefleyen yeşil araç rotalama problemleri, sürdürülebilir ulaşımı teşvik etmeyi amaçlamaktadır.

Araç rotalama problemleriyle ilgili son yıllarda birçok çalışma gerçekleştirilmiştir. Chen vd. [5], bir dağıtım merkezi ile birden fazla ön depo arasındaki taşımacılık rotalarını optimize etmek amacıyla soğuk zincir lojistiğine yönelik bir araç rotalama problemini ele almıştır. Palacio ve Rivera [6], her düğümde malzemenin arz ve talep miktarlarını bilerek, araçların toplam seyahat mesafesini en aza indiren bir rota planı elde etmeyi amaçlayan bir teslimat gezgin satıcı problemini tanıtmıştır. Zhang ve Woensel [7], gerçek zamanlı rotalama

problemlerini büyük ölçekli yol ağlarında incelemiş ve bu bağlamda dinamik ve anlık müşteri taleplerini karşılamak üzere araçların rota değiştirme yeteneğini araştırmışlardır. Son olarak, Li ve Yang [8], çoklu işletmelere yönelik büyük ev eşyalarının son kilometre teslimatını gerçekleştiren bir lojistik hizmet sağlayıcısının karşılaştığı araç rotalama problemini ele almışlardır.

Yeşil araç rotalama problemleriyle ilgili yapılan yazın taramasında, optimizasyon problemlerinde sera gazı emisyonu, yakıt tüketimi, enerji tüketimi ve seyahat karakteristikleri gibi özelliklerde kısıtlamalara rastlanmaktadır. Tablo 1 yazın taraması sonucu öne çıkan yayınları ve kullandıkları kısıtları göstermektedir. Bektaş ve Laporte [9], geleneksel araç rotalama problemlerini genişleterek seyahat süresi ve mesafesinin yanı sıra fosil yakıt tüketimini düşürmek amacıyla yakıt maliyeti ve sera gazı emisyonu gibi faktörleri ele almıştır. Erdogan ve Miller [4], müşteri ve istasyon konumunu aynı anda ele alarak, araç yakıtının tükenme olasılığını en aza indirmek için iki farklı sezgisel yöntem kullanmışlardır.

Tablo 1. Yeşil araç rotalama yazın taraması
(Literature review on green vehicle routing)

Referanslar	Karbon (CO2) Emisyonu	Yakıt Tüketimi	Enerji - Minimum	Seyahat süresi ve mesafesi
Bektaş ve Laporte [5]	✓	✓		✓
Erdogan ve Miller [4]		✓		✓
Kopfer vd. [6]		✓		
Adiba vd. [7]	✓			✓
Psychas vd. [8]		✓	✓	✓
Desaulniers [9]		✓	✓	✓
Ashtineh ve Pishvaei [10]	✓	✓		✓
Amiri vd. [11]		✓	✓	

Kopfer vd. [10], yakıt tüketimini azaltmayı hedefleyerek farklı araç sınıflarına göre, yük ve araç olmak üzere iki ölçütü dikkate almışlardır. Adiba vd. [11], CO₂ emisyonlarını geleneksel araç rotalama problemlerine entegre etmek için yeni bir genetik algoritma sunmuşlardır. Psychas vd. [12], enerji minimum araç rotalama problemlerinin çok amaçlı bir versiyonunu önererek seyahat süresi, mesafe ve yakıt tüketimi de dahil olmak üzere üç farklı amaç fonksiyonunu dikkate almışlardır. Desaulniers vd. [13], elektrikli araç rotalama için tam ve kısmi şarj dolumunu, istasyonları ve seyahat zamanını dikkate alarak bir algoritma geliştirmişlerdir. Ashtineh ve Pishvae [14], farklı alternatif yakıtların araç rotalama problemlerindeki performanslarını değerlendirmiş ve yakıt değişiminin; NO_x, HC, CO gibi emisyonlarda %37 oranında azalışa sebep olduğunu gözlemlemiştir. Güncel çalışmalara bakıldığında, Amiri vd. [15], dizel ve elektrikli kamyonlar için istasyonların şarj gücü ve yoğunluğunu dikkate alarak yeşil araç rotalama problemine metasezgisel bir çözüm getirdikleri görülmüştür. Lou vd. [16], hız dalgalanmaları, yol koşulları ve zamanı içeren düşük karbonlu araç rotalama problemini tanıtarak, bu sorunu çözmek için adaptif değişken komşuluk araması ile bir hibrit genetik algoritma önermiş ve yöntemlerini Jingzhou, Çin'deki lojistik ve trafik verileri ile doğrulamıştır. Garside vd. [17], 2016 yılından 2023'e kadar 458 çalışmayı kapsayan güncel bir yeşil araç rotalama problemi literatür incelemesi sunarak, metasezgisel ve hibrit yöntemleri incelemiştir.

Yeşil araç rotalama problemlerini çözmek için geliştirilen algoritmaların yanı sıra, Asghari vd. [18], içten yanmalı motorlu araçlar, alternatif yakıtlı araçlar ve hibrit elektrikli araçlar bağlamında rotalama problemleri için yazın taraması yapmıştır. Moghdani vd. [19], derlediği literatür çalışması sonucunda, yeşil araç rotalama problemlerinin yeni bir konu olduğunu ve hala doldurulması gereken alanlar olduğunu belirtmiştir. Sistematik olarak derlenen yazın taraması, kullanılabilir tüm kısıtları içeren ve tüm yeşil araç rotalama problemlerini bir arada sunan bir çalışmanın bulunmadığını göstermektedir. Bunun yanı sıra, çok kriterli karar verme (ÇKKV) yöntemleri kullanılarak modellenen yeşil araç rotalama problemlerinin literatürde bulunmaması, bu çalışmanın motivasyonu olmuştur. Geleneksel olarak, yeşil araç rotalama problemleri optimizasyon problemleri olarak ele alınmaktadır, çünkü bu problemler genellikle maliyet, mesafe

veya emisyonları minimize etmeye odaklanır. Ancak, bu problemlerin uygulanması, yalnızca tek bir optimizasyon kriterine dayanmak yerine, birden fazla ve bazen çelişen kriterin dikkate alınmasını gerektiren karmaşık bir süreçtir. Bu nedenle, bu çalışmanın ana motivasyonu, yeşil araç rotalama problemlerini bir ÇKKV problemi olarak ele alarak, çeşitli çevresel, ekonomik ve teknolojik kriterleri dengeleyebilecek daha kapsamlı ve sürdürülebilir çözümler sunmaktır. Literatürde bir optimizasyon probleminin ÇKKV yöntemleri ile değerlendirildiği çalışmalara rastlanmaması, bu çalışmanın özgünlüğünü ve yenilikçiliğini de vurgulamaktadır. Bu bağlamda, çalışmanın amacı yeşil araç rotalama problemlerini ortaya çıkartmak ve önerdiğimiz bir yöntemle sıralayarak literatürde bulunan bilgi boşluğunu doldurmaktır. Çalışmanın araştırma soruları şu şekildedir: (i) Sürdürülebilir ulaşım için hangi yeşil araç rotalama probleminin tercih edilmesi gerekmektedir? (ii) Hangi ölçütler, yeşil araç rotalama probleminin seçiminde öncelikli olarak dikkate alınmalıdır? (iii) Farklı senaryolar altında hangi yeşil araç rotalama problemi, sürdürülebilirlik ve verimlilik açısından en uygun seçimdir? Çalışma kapsamında, yeşil araç rotalama problemleri entegre Pisagor bulanık AHP & EDAS yöntemleri kullanılarak önceliklendirilmiş olup, çalışmanın katkıları aşağıdaki şekilde sıralanmıştır:

- Yeşil araç rotalama problemleri, çalışma kapsamında ÇKKV problemi olarak ele alınmış, böylece birbirleriyle çelişen ve etkileşimi olan faktörler arasında denge kurulmuştur. Ayrıca, karar vericilere farklı senaryolar ve ağırlıklandırma seçenekleri sunularak karar süreci daha şeffaf hale getirilmiştir.
- Yeşil araç rotalama problemleri, yazın taraması ve karar verme ekibi tarafından tanımlanmış ve bu problemleri değerlendirmek için çalışma kapsamında çeşitli ölçütler belirlenmiştir.
- Değerlendirme ölçütleri Pisagor bulanık AHP yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmıştır. Bununla birlikte, ikili karar matrisinin ve verilen kararların geçerliliğini ölçmek için tutarlılık analizi gerçekleştirilmiştir.
- Pisagor bulanık AHP yönteminden elde edilen ağırlıklar kullanılarak EDAS yöntemi uygulanmış ve yeşil araç rotalama problemleri önceliklendirilmiştir.
- Farklı ölçüt ağırlıkları altında karar verme probleminin nasıl etkilendiğini belirlemek için duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş, 15

farklı senaryo uygulanarak önerilen metodun duyarlılığı test edilmiştir.

Bu çalışmanın sonuçları, araştırmacılara çeşitli yeşil araç rotalama senaryolarını değerlendirme ve analiz etme imkânı sağlarken, endüstri profesyonellerine ve lojistik yöneticilerine maliyeti düşüren, operasyonel verimliliği arttıran, çevre dostu çözümleri sunmaktadır.

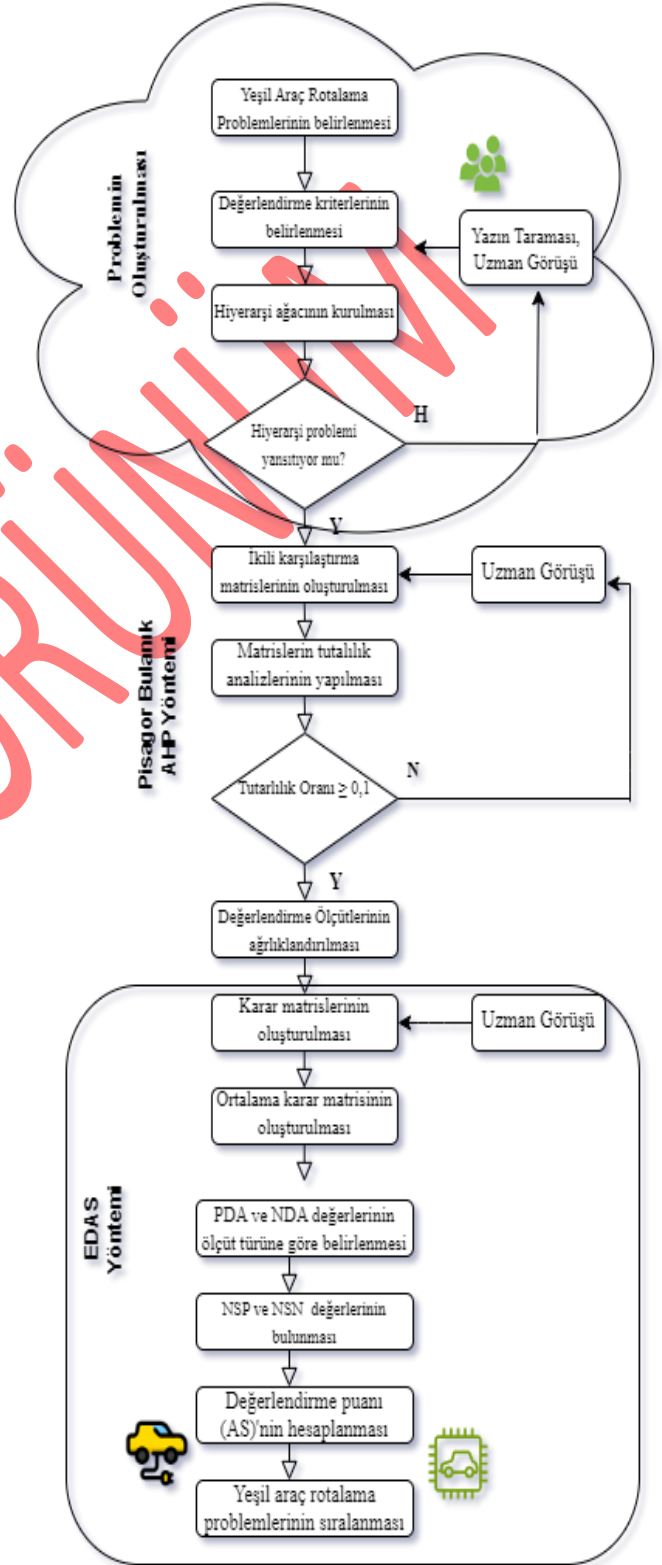
Bu makalenin geri kalan bölümleri şu şekilde organize edilmiştir: İkinci bölümde, çalışma kapsamında tercih edilen Pisagor bulanık kümeler, Pisagor AHP yöntemi ve EDAS yöntemi detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Üçüncü bölümde, yeşil araç rotalama problemleri ve değerlendirme kriterleri detaylı bir şekilde açıklanmış ve ardından bu problemler ve kriterler doğrultusunda tercih edilen yöntem uygulanmıştır. Aynı bölümde, yöntemin etkinliğini ve sağlamlığını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilen duyarlılık analizi ve sonuçlara ilişkin tartışmalar sunulmuştur. Son bölümde ise, çalışmanın sonuçları, kısıtlılıkları ve gelecek çalışmalar için öneriler yer almaktadır.

2. MATERYAL VE METOD (MATERIAL AND METHOD)

ÇKKV, karmaşık karar verme problemlerini ele almak için kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yaklaşım, birden fazla ölçüt veya alternatifin dikkate alındığı karar verme süreçlerinde tercih edilmektedir. Yeşil araç rotalama problemleri de bu tür karmaşık karar verme problemlerinden biridir. Bu problemlerde, çevresel etkiyi azaltmak, enerji verimliliğini artırmak, seyahat süresini minimize etmek gibi birçok farklı amaç veya ölçüt bir arada değerlendirilir. Bu nedenle, yeşil araç rotalama problemlerinde ÇKKV yöntemlerinin kullanılması, karar verme sürecini daha etkili ve optimize hale getirmektedir.

Bu çalışmada, yeşil araç rotalama problemleri ÇKKV yöntemlerinden olan entegre Pisagor AHP ve EDAS yaklaşımlarıyla ele alınmıştır. Bu sayede çeşitli faktörler arasındaki dengeyi sağlamak ve çelişen ölçütler arasında uyum sağlamak mümkün olmuştur. AHP ve EDAS yöntemlerinin entegre kullanımına dair literatürde, bu yöntemlerin lojistik, ulaşım ve enerji alanlarında öne çıktığı görülmektedir. Stevic vd. [20], AHP ve EDAS yöntemlerini birleştirerek dört farklı şehir lojistiği senaryosunu değerlendirmişlerdir. Karatop vd. [21], Türkiye'deki yenilenebilir enerji yatırımlarını analiz etmek için entegre AHP-EDAS yaklaşımlarını kullanmışlardır. Narad ve Joshi [22] ise biyodizel ve dizel karışımlarını değerlendirmek amacıyla AHP

ve EDAS yöntemlerini uygulamış ve en uygun karışımın %20 dizel katkılı biyodizel olduğunu belirlemişlerdir. Önerilen metoda ilişkin akış şeması Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Çalışma metodunun akış şeması (Flowchart of research method)

2.1. PİSAGOR BULANIK KÜMELER (PYTHAGOREAN FUZZY SETS)

Karar vericilerin yeşil araç rotalama problemlerini değerlendirmeleri çeşitli belirsizlikleri ve öznellikleri içerir, bu da problemin analizini zorlaştırmaktadır. Belirsiz bilgileri yönetmek ve belirli sonuçlar alabilmek için Zadeh [23], bulanık küme teorisini ve dilsel değişkenleri önermiştir. Literatürde yer alan son çalışmalarda, karar vericilerin görüşlerindeki belirsizliği daha iyi temsil edebilmek için, sezgisel bulanık kümeler ve Pisagor bulanık kümeler gibi genişletilmiş bulanık kümelere yer verilmiştir [24].

Atanassov'un geliştirdiği sezgisel bulanık kümeler, üyelik, üyelik dışı olma ve tereddüt derecelerini içerir; burada üyelik ve üyelik dışı olma derecelerinin toplamı en fazla 1 olmalıdır. Sezgisel bulanık kümeler uygulamada ortaya çıkan karmaşık belirsizliği modellemekte yetersiz kaldığı için, genelleştirilmiş ve Pisagor bulanık kümeler geliştirilmiştir [16]. Burada üyelik ve üyelik dışı olma derecelerinin toplamı 1'i aşabilir ancak karelerin toplamı aşamaz şeklinde kısıt koşulları tanımlanmıştır. Sezgisel bulanık kümeler ile Pisagor bulanık kümelere ait uzayların geometrik olarak karşılaştırmaları yapıldığında, Pisagor bulanık küme uzayının daha büyük bir alanı kapsadığı görülmektedir. Bu nedenle, Pisagor bulanık kümelerin, belirsizlik ve kesin olmama durumlarını sezgisel bulanık kümelere göre daha etkin bir şekilde ifade ettiği anlaşılmaktadır. Pisagor bulanık kümelerin bazı temel tanımları aşağıda verilmiştir:

Tanım 1: X evrensel kümesi içerisinde x bir eleman olsun. X içerisinde yer alan \tilde{P} Pisagor bulanık kümesi Denklem 1'deki gibi gösterilir [25]:

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

Burada $\mu_P(x) \in [0,1]$ üyelik derecesini, $\nu_P(x) \in [0,1]$ üyelik dışı olma derecesini ifade etmektedir. Bu üyelik dereceleri Denklem 2'de verilen koşulu sağlamaktadır:

$$0 \leq (\mu_P(x))^2 + (\nu_P(x))^2 \leq 1. \quad (2)$$

\tilde{P} kümesine ait Pisagor bulanık bir sayının tereddüt derecesi Denklem 3'te evrilmiştir:

$$\pi_P(x) = \sqrt{1 - (\mu_P(x))^2 - (\nu_P(x))^2} \quad (3)$$

Tanım 2: $\tilde{P}_1 = P(\mu_{P_1}, \nu_{P_1})$ ve $\tilde{P}_2 = P(\mu_{P_2}, \nu_{P_2})$ iki Pisagor bulanık sayı ve λ pozitif bir sayı olmak üzere, Pisagor bulanık kümelerdeki temel işlemler aşağıda gösterilmiştir [26]:

$$\tilde{P}_1 \oplus \tilde{P}_2 = P \left(\sqrt{(\mu_{P_1})^2 + (\mu_{P_2})^2 - (\mu_{P_1})^2 (\mu_{P_2})^2}, \nu_{P_1} \nu_{P_2} \right) \quad (4)$$

$$\tilde{P}_1 \otimes \tilde{P}_2 = P \left(\mu_{P_1} \mu_{P_2}, \sqrt{(\nu_{P_1})^2 + (\nu_{P_2})^2 - (\nu_{P_1})^2 (\nu_{P_2})^2} \right) \quad (5)$$

$$\lambda \tilde{P}_1 = \left(\sqrt{1 - (1 - (\mu_{P_1})^2)^\lambda}, (\nu_{P_1})^\lambda \right), \lambda > 0, \quad (6)$$

$$(\tilde{P}_1)^\lambda = \left((\mu_{P_1})^\lambda, \sqrt{1 - (1 - (\nu_{P_1})^2)^\lambda} \right), \lambda > 0. \quad (7)$$

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

$$\text{PBAO}(\tilde{P}_1, \tilde{P}_2, \dots, \tilde{P}_n) = \left(\left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - (\mu_i^2)^{w_i}) \right)^{1/2}, \left(\prod_{i=1}^n (\nu_i)^{w_i} \right) \right) \quad (8)$$

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

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

$$s(\tilde{P}_1) = \mu_{P_1} - \nu_{P_1}. \quad (9)$$

2.2. PİSAGOR BULANIK AHP YÖNTEMİ (PYTHAGOREAN FUZZY AHP METHOD)

Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP), karar vericilerin karmaşık ve genellikle belirsiz olan kararlarını sistematik bir şekilde analiz etmelerine yardımcı olan ikili kıyaslama esasına dayanan ÇKKV yöntemlerinden biridir [27]. AHP, karmaşık problemleri yönetilebilir parçalara bölmesi, farklı boyutlardaki karar verme problemlerine uygulanabilirliği ve kolayca anlaşılabilir olması bakımından çeşitli avantajlara sahiptir. Bununla birlikte, yeşil araç rotalama problemleri karmaşık kriterler içermekte ve bu kriterler değerlendirilirken karar vericiler arasında bazı belirsizlikler ve kesin olmama durumları ortaya çıkmaktadır. Bu durumları daha etkin bir şekilde ele almak için geleneksel AHP yerine Pisagor Bulanık AHP yönteminin kullanılması daha doğru sonuçlar sağlayabilir. Bu sebeple, çalışma kapsamında, AHP yöntemi Pisagor bulanık kümeler ortamında

genişletilmiştir. Yapılan yazın taraması, Pisagor AHP yönteminin ulaşım, tedarik zinciri ve risk yönetimi gibi alanlarda geniş bir uygulama alanına sahip olduğunu göstermektedir. Sarkar ve Biswas [28], Pisagor AHP yöntemini kullanarak dört farklı ulaşım şirketinin yönetimini değerlendirmişlerdir. Zhou ve Chen [29], Pisagor AHP ve Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje (VIKOR) yöntemlerini kullanarak yeşil tedarikçi seçimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Demir vd. [30], Türkiye demiryolu ulaşım sistemlerini Pisagor AHP ve VIKOR yaklaşımlarını kullanarak analiz etmişlerdir. Farooq [31] ise sürücü davranış kriterlerini Pisagor AHP metodunu uygulayarak incelemiştir. Pisagor Bulanık AHP yönteminin işlem adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: Karar verme problemiyle ilgili ölçütler ve alternatifler tanımlanır.

Adım 2: Hiyerarşi ağacı oluşturularak, problemin amacı, ölçütleri ve alternatifleri hiyerarşik yapı üzerinde belirtilir.

Adım 3: Dilsel terimler kullanılarak ikili karşılaştırma matrisleri $R = (r_{ik})_{m \times m}$ oluşturulur.

Adım 4: Fark matrisleri $D = (d_{ik})_{m \times m}$ Denklem 10 ve Denklem 11 kullanılarak hesaplanır.

$$d_{ikL} = \mu_{ikL}^2 - v_{ikU}^2 \quad (10)$$

$$d_{ikU} = \mu_{ikU}^2 - v_{ikL}^2 \quad (11)$$

Adım 5: İçsel çarpım matrisi $S = (s_{ik})_{m \times m}$ Denklem 12 ve 13 yardımıyla bulunur.

$$s_{ikL} = \sqrt{1000^{dL}} \quad (12)$$

$$s_{ikU} = \sqrt{1000^{dU}} \quad (13)$$

Adım 6: Denklem 14 kullanılarak belirlilik değeri $\tau = (\tau_{ik})_{m \times m}$ hesaplanır.

$$\tau_{ik} = 1 - (\mu_{ikU}^2 - \mu_{ikL}^2) - (v_{ikU}^2 - v_{ikL}^2) \quad (14)$$

Adım 7: Ağırlık matrisi $T = (t_{ik})_{m \times m}$, belirlilik değeri $\tau = (\tau_{ik})_{m \times m}$ ve içsel çarpım matrisinin $S = (s_{ik})_{m \times m}$ çarpımı ile Denklem 15'te gösterildiği gibi elde edilir:

$$t_{ik} = \left(\frac{s_{ikL} + s_{ikU}}{2} \right) \tau_{ik} \quad (15)$$

Adım 8: Normalize edilmiş kriter ağırlıkları ω_i Denklem 16 yardımıyla hesaplanır.

$$\omega_i = \frac{\sum_{j=1}^m \omega_{ij}}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \omega_{ij}} \quad (16)$$

2.2.1. TUTARLILIK ANALİZİ (CONSISTENCY ANALYSIS)

Karar vericilerin verdiği kararların geçerliliğini ölçmek ve karar matrisinin içerdiği tutarsızlıkları ve çelişkileri belirlemek için tutarlılık analizi gerçekleştirilir. Tutarlılık oranı (CR) adı verilen ölçüt hesaplanarak ikili karşılaştırma matrislerinin tutarlı olup olmadığı tespit edilir. Denklem 17 kullanılarak tutarlılık oranı hesaplanmaktadır.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - k}{k - 1}, \quad CR = \frac{CI}{RI} \quad (17)$$

Burada, k matris elemanlarının sayısı, λ_{max} en büyük özdeğer, CI tutarlılık endeksi ve RI rastgele endeksi temsil etmektedir. Tutarlılık oranının maksimum değeri Saaty tarafından 0,1 olarak belirlenmiştir. Matrislere ait CR değerleri bu eşik değerin üzerinde çıkması durumunda, matrisin tutarsız olduğu sonucuna ulaşılmaktadır. Böyle bir durumda karar vericilerden ölçütler hakkında tekrar değerlendirme yapılması istenir.

2.3. EDAS YÖNTEMİ (EDAS METHOD)

EDAS (Evaluation Based on Distance from Average Solution) metodu Keshavarz Ghorabae ve diğ. tarafından 2015 yılında önerilmiştir. EDAS yöntemi, TOPSIS ve VIKOR gibi diğer geleneksel ÇKKV yöntemlerinden farklılık göstermektedir [32]. Optimal çözümü elde etmek için, geleneksel yöntemlerin aksine, EDAS yöntemi, alternatiflerin her bir ölçüte ortalama çözüm mesafesini hesaplamaktadır. Ardından, ortalama değerden pozitif ve negatif uzaklıklar hesaplanır ve optimal sonuca ulaşılır. Bu yaklaşım, pozitif ideal ve negatif ideal çözümlere mesafe hesaplaması yapmadığı için daha pratik ve etkili bir hesaplama süreci sunar. Bu nedenle, yeşil araç rotalama problemini ele alırken EDAS yöntemini kullanmak uygun bulunmuştur. Literatürde, özellikle sürdürülebilir ulaşım üzerine yapılan çalışmalarda EDAS yönteminin yaygın olarak uygulandığı görülmektedir. Simić vd. [33] EDAS yaklaşımını kullanarak petrol taşımacılığında sürdürülebilir rotaları tespit etmişlerdir. Benzer şekilde, okul kampüsleri için sürdürülebilir ulaşım stratejilerinin değerlendirildiği bir çalışmada da EDAS yöntemi tercih edilmiştir [34]. Ayrıca, Krishankumar vd. [35], sürdürülebilir kentsel hareketlilik için sıfır karbon tedbirlerini EDAS yöntemi ile önceliklendirmişlerdir. EDAS yöntemine ait işlem adımları aşağıdaki gibidir:

Adım 1: $C_j (j = 1, 2, \dots, n)$ ölçütler, $x_i (i = 1, 2, \dots, m)$ alternatifler olmak üzere, karar matrisi

$D = (C_j(x_i))_{m \times n}$ Denklem 18'de görüldüğü şekilde oluşturulur.

$$D = (C_j(x_i))_{m \times n} = \begin{matrix} & C_1 & \dots & C_n \\ \begin{matrix} x_1 \\ \vdots \\ x_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} P_{11} & \dots & P_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (18)$$

Adım 2: Ortalama çözüm matrisi Denklem 19 yardımıyla hesaplanır.

$$AV = [AV_j]_{1 \times n} = \left[\frac{\sum_{i=1}^m C_j(x_i)}{m} \right]_{1 \times n} \quad (19)$$

Adım 3: Tüm ölçütler için, ölçüt türüne bağlı olarak, ortalamadan pozitif mesafe (PDA) ve ortalamadan negatif mesafe (NDA) matrisleri hesaplanır. Ölçütlerin türü fayda şeklindeyse Denklem 20 ve Denklem 21 kullanılarak PDA ve NDA hesaplanır; kriterler maliyet türünden ise Denklem 22 ve Denklem 23 yardımıyla PDA ve NDA bulunmaktadır.

$$PDA_{P_{ij}} = \frac{\max(0, ((C_j(x_{ij})) - (AV_j)))}{(AV_j)} \quad (20)$$

$$NDA_{P_{ij}} = \frac{\max(0, ((AV_j) - (C_j(x_{ij}))))}{(AV_j)} \quad (21)$$

$$PDA_{P_{ij}} = \frac{\max(0, ((AV_j) - (C_j(x_{ij}))))}{(AV_j)} \quad (22)$$

$$NDA_{P_{ij}} = \frac{\max(0, ((C_j(x_{ij})) - (AV_j)))}{(AV_j)} \quad (23)$$

Adım 4: SP_i ve SN_i olarak adlandırılan ağırlıklı toplam PDA ve NDA değerleri Denklem 24 ve Denklem 25 kullanılarak hesaplanır. Burada, ω_j ölçütlerin ağırlıklarını temsil etmektedir.

$$SP_i = \sum_{j=1}^n \omega_j PDA_{P_{ij}} \quad (24)$$

$$SN_i = \sum_{j=1}^n \omega_j NDA_{P_{ij}} \quad (25)$$

Adım 5: SP_i ve SN_i değerleri Denklem 26 ve Denklem 27 yardımıyla normalize edilir.

$$NSP_i = \frac{SP_i}{\max(SP_i)} \quad (26)$$

$$NSN_i = 1 - \frac{SN_i}{\max(SN_i)} \quad (27)$$

Adım 6: Tüm alternatifler için Denklem 28 kullanılarak değerlendirme puanı (AS) hesaplanır.

$$AS_i = \frac{1}{2} (NSP_i + NSN_i) \quad (28)$$

Adım 7: Hesaplanan AS değerlerine göre alternatifler azalan şekilde sıralanır. İlk sırada yer alan alternatif, en optimum seçenek olarak kabul edilmektedir.

3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Araç rotalama problemleri, lojistik ve taşımacılık sektörlerinde karşılaşılan temel optimizasyon problemlerinden biridir. Bu problemler, bir dizi müşteriye hizmet sunmak için en verimli araç rotalarını belirleme ihtiyacını ele alır. Optimizasyon, işletme maliyetlerini azaltmak, teslimat sürelerini iyileştirmek ve kaynak kullanımını optimize etmek için kritik öneme sahiptir.

Yeşil araç rotalama problemleri, çevresel etkilerin azaltılması ve sürdürülebilirlik ilkelerinin entegrasyonu üzerine odaklanan bir alt dal olarak geleneksel araç rotalama problemlerinden ayrılmıştır. Bu tür problemlerde, elektrikli, hibrit veya düşük emisyonlu araçlar gibi çevre dostu taşıma araçları tercih edilerek veya düşük emisyonlu rotalar belirlenerek karbon emisyonları ve diğer çevresel etkilerin azaltılması amaçlanır. Temel hedef, çevresel etkileri minimize etmek, doğal kaynakları korumak ve sürdürülebilir bir ulaşım sistemine katkıda bulunmaktır. Yeşil araç rotalama problemlerinin tanımlanması ve sıralanması, çevre dostu taşıma yöntemlerinin benimsenmesini teşvik ederken çevresel etkilerin azaltılmasına ve sürdürülebilir bir ulaşım sistemine geçişin hızlanmasına yardımcı olur. Bu nedenle, çalışma kapsamında yeşil araç rotalama problemleri, literatür taraması ve uzman görüşleri doğrultusunda tanımlanmıştır.

Enerjiyi Minimize Eden Araç Rotalama Problemi (AI): Bu problemde, enerji tüketiminin minimize edilmesi, çevresel etkilerin azaltılması ve işletme maliyetlerinin optimize edilmesi amaçlanmaktadır. Rotalar planlanırken yolun eğimi, trafik koşulları ve seyahat hızı gibi enerji verimliliğini etkileyecek parametreler göz önünde bulundurulur. Amaç fonksiyonunda kullanılmak üzere araçların ağırlığı, seyahat süresi ve taşıma kapasiteleri gibi faktörler kısıt olarak alınabilir [36]. Genellikle matematiksel optimizasyon yöntemleri veya meta sezgisel algoritmalar kullanılarak, verilen kısıtlar altında en iyi çözüm bulunmaya çalışılır.

Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi (A2): Bu problem fosil yakıtlı araçların yerine düşük emisyonlu araçların tercih edilmesini sağlayarak, karbon emisyonları ve çevresel kirliliğin azaltılmasını hedeflemektedir. Düşük emisyonlu araç rotalama probleminin çözümü için marka, model, motor yapısı, yakıt tüketimi, araçların emisyon düzeyleri gibi araç türü kısıtları amaç fonksiyonu içerisinde yer almalıdır [9]. Bu rotalama problemi, hidrojen yakıt hücresi ve doğalgaz gibi az karbon emisyonu üreten, aynı zamanda azot oksit (NOx) ve partikül madde emisyonlarını azaltan araçlar için ihtiyaç duydukları altyapıya göre optimum bir ortalama çözümü sağlamaktadır.

Elektrikli Araç Rotalama Problemi (A3): Bu problemde belirli sayıda elektrikli araçla belirli sayıda müşteriyi ziyaret ederek hizmet taleplerini karşılayan en uygun rotaların belirlenmesi amaçlanır. Problemin çözümü için araç rotalarının optimize edilmesi, şarj istasyonlarının stratejik bir şekilde yerleştirilmesi ve seyahat zamanlarının optimize edilmesi yer alabilir [13]. Bununla birlikte, amaç fonksiyonunda kullanılması gereken kısıtlar arasında, elektrikli araçların menzil sınırlamaları, şarj süreleri, şarj istasyonlarının kapasiteleri, müşteri ziyaret zamanları ve rota uzunlukları gibi faktörler dikkate alınır.

Toplu Taşıma Entegrasyonlu Rotalama Problemi (A4): Bu problemde hem bireysel araç rotaları hem de toplu taşıma rotaları bir arada ele alınarak

çevresel etkilerin azaltılması ve toplu taşıma sistemlerinin verimliliğinin artırılması hedeflenmektedir. Problemin çözümü için bireysel araç rotalarının toplu taşıma hatlarıyla senkronize edilmesi, yolcuların transfer noktalarında kolaylıkla geçiş yapabilmesi için uygun transfer noktalarının belirlenmesi ve araç rotalarının toplu taşıma rotalarıyla entegrasyonunu sağlayacak bütünlüklü bir rota planlama stratejisinin geliştirilmesi yer alabilir.

Yeşil Bölge Rotalama Problemi (A5): Bu problemde çevresel etkilerin azaltılması ve yeşil altyapının korunması gözetilerek, belirli sayıda araçla yeşil bölgeler arasında en verimli rotaların belirlenmesi hedeflenir. Problemin çözümü için, yeşil alanlara erişimi en iyi şekilde sağlayacak rota planlarının tasarlanması ve yeşil altyapıya sahip bölgelerde araç trafiğinin minimize edilmesi yer alabilir. Yeşil alanlardan geçen rotalar, karbon emisyonlarını azaltarak hava kalitesini iyileştirir ve çevresel etkileri minimize eder. Ayrıca, yeşil alanlara yönlendirme ile şehir içi ulaşım daha akıcı hale getirilerek trafik kazaları ve gecikmeler azaltılabilir.

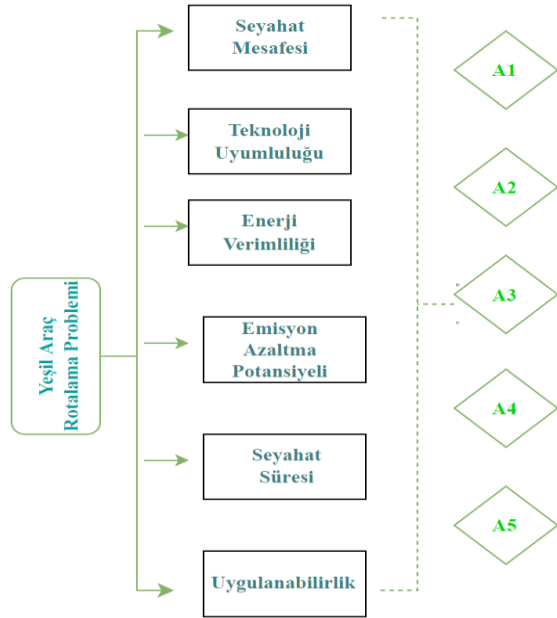
Yeşil araç rotalama problemleri ilk defa bu çalışma kapsamında ortaya çıkartılmıştır. Rotalama problemlerinin değerlendirilmesi ve önerdiğimiz metod ile sıralanması için yazın taraması yapılmış ve değerlendirme ölçütleri Tablo 2’de gösterildiği şekilde belirlenmiştir.

Tablo 2. Değerlendirme ölçütleri ve açıklamaları (Evaluation criteria and descriptions)

Ölçütler	Açıklamalar	Referanslar
Seyahat Mesafesi (K1)	Rotalama planının, toplam seyahat mesafesini minimize etmesi, yakıt tüketimini azaltması ve operasyonel maliyetleri düşürmesi değerlendirir.	Sarkar ve Biswas [28]; Psychas vd. [12]
Teknoloji Uyumluluğu (K2)	Yeşil araç rotalama problemlerinde kullanılan teknolojik çözümlerin mevcut altyapı ve araç teknolojileri ile uyumlu olma derecesini değerlendirir. Mevcut teknolojiye uyumlu olan rotalama planları, çevresel etkinin artırılmasında önemli bir rol oynamaktadır.	Moghdani vd. [36]
Enerji Verimliliği (K3)	Yeşil araç rotalama problemlerinde kullanılan araçların ve rotaların enerji tüketimini minimize etme kabiliyetini değerlendirir.	Psychas vd. [12]; Desaulniers vd. [13]
Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	Düşük emisyonlu araçların tercih edilmesi ve emisyonların minimize edilmesi yoluyla çevresel sürdürülebilirliğin artırılma potansiyelini değerlendirir.	Bektaş ve Laporte [9]

Seyahat süresi (K5)	Optimal rotaları belirleyen ve mümkün olduğunca kısa seyahat sürelerini sağlayan rotalama problemleri değerlendirilir.	Lou vd. [16]; Desaulniers vd. [13]
Uygulanabilirlik (K6)	Rotalama problemlerinin gerçek dünya koşullarına uygunluğu, pratikte uygulanabilir olup olmadığı, operasyonel gereksinimlere ve kısıtlara ne kadar uygun olduğu değerlendirilir.	Moghdani vd. [19]

Yeşil araç rotalama problemi için değerlendirme kriterleri ve alternatifler belirlendikten sonra hiyerarşik yapının gösterilmesi için hiyerarşi ağacı oluşturulur. Hiyerarşi ağacı, bir karar verme sürecindeki karmaşıklığı azaltmak ve alternatiflerin değerlendirilmesini yapılandırmak için kullanılan bir araçtır. Şekil 2’de yeşil araç rotalama problemi için oluşturulmuş hiyerarşi ağacı görülmektedir.



Şekil 2. Yeşil araç rotalama problemi için hiyerarşi ağacı (Hierarchy tree for the green vehicle routing problem)

3.1. UYGULAMA (APPLICATION)

Yeşil araç rotalama problemlerinin değerlendirilebilmesi için, çalışma kapsamında entegre Pisagor bulanık AHP ve EDAS yöntemleri kullanılacaktır. İlk aşamada değerlendirme ölçütleri Pisagor bulanık AHP yöntemiyle sıralanacak, bunun için Tablo 3’de yer alan dilsel terimlerden yararlanılmaktadır.

Tablo 3. Pisagor bulanık sayılar ve dilsel terimler (Pythagorean fuzzy numbers and linguistic terms)

Dilsel Terimler	Aralıklı Pisagor Bulanık Sayılar			
Kesin Düşük Önem (KD)	0	0	0,9	1
Çok Düşük Önem (ÇD)	0,1	0,2	0,8	0,9
Düşük Önem (D)	0,2	0,35	0,65	0,8
Ortalama Altı Önem (OA)	0,35	0,45	0,55	0,65
Ortalama Önem (O)	0,45	0,55	0,45	0,55
Eşit Önem (E)	0,5	0,5	0,5	0,5
Ortalama Üstü Önem (OÜ)	0,55	0,65	0,35	0,45
Yüksek Önem (Y)	0,65	0,8	0,2	0,35
Çok Yüksek Önem (ÇY)	0,8	0,9	0,1	0,2
Kesin Yüksek Önem (KY)	0,9	1	0	0

Ulaştırma alanında çalışan akademisyen ile ulaştırma sektöründe çalışanlardan oluşan karar verme ekibi Tablo 3’de yer alan dilsel terimlerden yararlanarak Tablo 2’de bulunan ölçütleri değerlendirmişlerdir. Ölçütlerin karar vericiler tarafından değerlendirildiği ikili karşılaştırma matrisi Tablo 4’te gösterilmiştir. Sonraki adıma geçmeden önce, Denklem 17 yardımıyla ikili karşılaştırma matrisinin tutarlılık oranı hesaplanmış ve 0,05 değeri bulunmuştur. Bu değer eşik değer olan 0,1 değerinden küçük olmasından dolayı ikili karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu sonucuna ulaşılmaktadır.

Tablo 4. Ölçütlerin dilsel ifadelerle değerlendirilmesi (Evaluation of criteria with linguistic terms)

	Seyahat Mesafesi (K1)	Teknoloji Uyumluluğu (K2)	Enerji Verimliliği (K3)	Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	Seyahat süresi (K5)	Uygulanabilirlik (K6)
Seyahat Mesafesi (K1)	E	Y	Y	OA	O	Y
Teknoloji Uyumluluğu (K2)	D	E	D	ÇD	D	D
Enerji Verimliliği (K3)	D	Y	E	D	D	OA
Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	OÜ	ÇY	Y	E	OÜ	Y
Seyahat süresi (K5)	O	Y	Y	OA	E	Y
Uygulanabilirlik (K6)	D	Y	OÜ	D	D	E

Şekil 1’de gösterilen akış şemasında bulunan tüm adımlar takip edilmiş, Denklem 10 ve Denklem 15 arasındaki eşitlikler kullanılarak fark matrisleri,

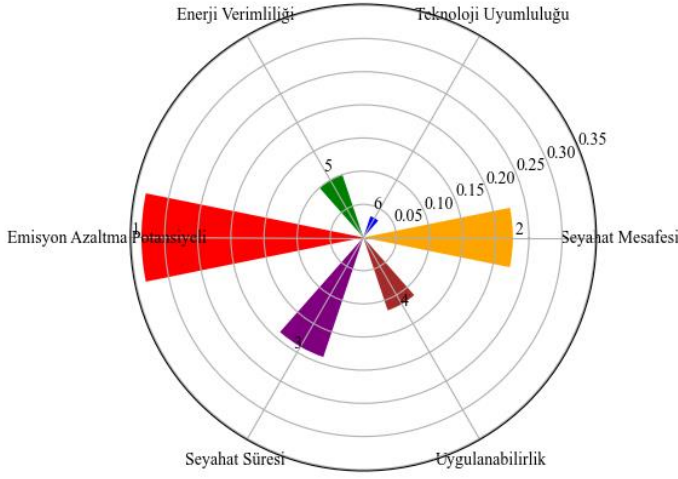
içsel çarpım matrisi, belirlilik değeri ve ağırlık matrisi bulunmuştur. Denklem 15 yardımıyla bulunan ağırlık matrisi Tablo 5’te gösterilmektedir.

Tablo 5. Ölçütlere ait ağırlık matrisi (Weight matrix for the criteria)

	Seyahat Mesafesi (K1)	Teknoloji Uyumluluğu (K2)	Enerji Verimliliği (K3)	Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	Seyahat süresi (K5)	Uygulanabilirlik (K6)
Seyahat Mesafesi (K1)	1,000	4,654	4,654	0,553	1,060	4,654
Teknoloji Uyumluluğu (K2)	0,273	1,000	0,273	0,108	0,553	0,273
Enerji Verimliliği (K3)	0,273	4,654	1,000	0,273	0,553	0,553
Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	2,031	10,231	4,654	1,000	2,031	4,654
Seyahat süresi (K5)	1,060	4,654	4,654	0,553	1,000	2,031
Uygulanabilirlik (K6)	0,273	4,654	2,031	0,273	0,730	1,000

Denklem 16 kullanılarak hesaplanan ölçütlere ait ağırlıklar Şekil 3’de gösterilmektedir. Yeşil araç rotalama problemlerini değerlendirmek için kullanılacak ölçütler, Pisagor bulanık AHP yöntemi uygulanarak ağırlıklandırılmıştır. Buna göre, “Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)” ölçütü 0,335

ağırlığı ile birinci sırada yer alırken; “Seyahat Mesafesi (K1)” ölçütü 0,226 değeri ile ikinci sırada, “Seyahat süresi (K5)” ölçütü 0,190 ağırlığıyla üçüncü sırada yer almaktadır. Bununla birlikte, “Teknoloji Uyumluluğu (K2)” ölçütü 0,034 değeri ile son sırada yer aldığı görülmektedir.



Şekil 3. Pisagor bulanık AHP sonucu ölçütlere ait ağırlıklar (Criteria weights obtained from Pythagorean fuzzy AHP)

Yeşil araç rotalama problemi için değerlendirme ölçütlerinin Pisagor bulanık AHP yöntemiyle ağırlıklandırılması ile ilk aşama tamamlanmıştır. İkinci aşamada EDAS yöntemi kullanılarak yeşil araç rotalama problemleri önceliklendirilecektir. Bunun için ilk aşamada elde edilen ölçütlere ait ağırlık değerleri kullanılmaktadır. Değerlendirme ölçütlerinden “seyahat mesafesi” ve “seyahat süresi” maliyet türünden ölçütler iken; “teknoloji uyumluluğu”, “enerji verimliliği” ve “uygulanabilirlik” fayda türünden ölçütlerdir. Karar verme ekibi, yeşil araç rotalama problemlerini ölçütlere göre değerlendirmiş ve bu değerlendirmeyi 1 ile 5 arasında puanlayarak uygulamışlardır. Tablo 6’da yer alan karar matrisinde, Denklem 19 yardımıyla elde edilen ortalama çözüm (AV) ve ölçütlere ait ağırlıklar gösterilmiştir.

Tablo 6. Karar matrisi ve ortalama çözüm (Decision matrix and average solution)

Ağırlıklar	0,226	0,034	0,100	0,335	0,190	0,116
Yeşil Araç Rotalama Problemi/Ölçütler	Seyahat Mesafesi (K1)	Teknoloji Uyumluluğu (K2)	Enerji Verimliliği (K3)	Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)	Seyahat süresi (K5)	Uygulanabilirlik (K6)
Enerjiyi Minimize Eden Araç Rotalama Problemi (A1):	4	3	5	4	4	4
Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi (A2):	3	4	4	5	3	4
Elektrikli Araç Rotalama Problemi (A3):	4	5	5	5	5	3
Toplu Taşıma Entegrasyonlu Rotalama Problemi (A4):	3	5	4	5	4	3
Yeşil Bölge Rotalama Problemi (A5):	5	4	3	3	5	3
<i>Ortalama Çözüm (AV)</i>	3.8	4.2	4.2	4.4	4.2	3.4

Tüm ölçütler için, ölçüt türüne bağlı olarak, ortalamadan pozitif mesafe (PDA) ve ortalamadan negatif mesafe (NDA) değerleri Denklem 20 ve

Denklem 23 arasındaki tüm eşitlikler kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 7’de, yeşil araç rotalama problemlerine ait PDA ve NDA değerleri gösterilmektedir.

Tablo 7. Yeşil araç rotalama problemlerine ait PDA ve NDA değerlerini (PDA and NDA values of green vehicle routing problems)

Alternatifler	Seyahat Mesafesi (K1)		Teknoloji Uyumluluğu (K2)		Enerji Verimliliği (K3)		Emisyon Azaltma Potansiyeli (K4)		Seyahat süresi (K5)		Uygulanabilirlik (K6)	
	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA	PDA	NDA
Enerjiyi Minimize Eden Araç	0,000	0,053	0,000	0,286	0,190	0,000	0,000	0,091	0,048	0,000	0,176	0,000

Rotalama Problemi (A1):												
Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi (A2):	0,211	0,000	0,000	0,048	0,000	0,048	0,136	0,000	0,286	0,000	0,176	0,000
Elektrikli Araç Rotalama Problemi (A3):	0,000	0,053	0,190	0,000	0,190	0,000	0,136	0,000	0,000	0,190	0,000	0,118
Toplu Taşıma Entegrasyonlu Rotalama Problemi (A4):	0,211	0,000	0,190	0,000	0,000	0,048	0,136	0,000	0,048	0,000	0,000	0,118
Yeşil Bölge Rotalama Problemi (A5):	0,000	0,316	0,000	0,048	0,000	0,286	0,000	0,318	0,000	0,190	0,000	0,118

SP_i ve SN_i olarak adlandırılan ağırlıklı toplam PDA ve NDA değerleri Denklem 24 ve Denklem 25 kullanılarak, ardından NSP ve NSN değerleri Denklem 26 ve Denklem 27 yardımıyla hesaplanmıştır. Değerlendirme puanı (AS), Denklem 28 yardımıyla hesaplanır ve elde edilen

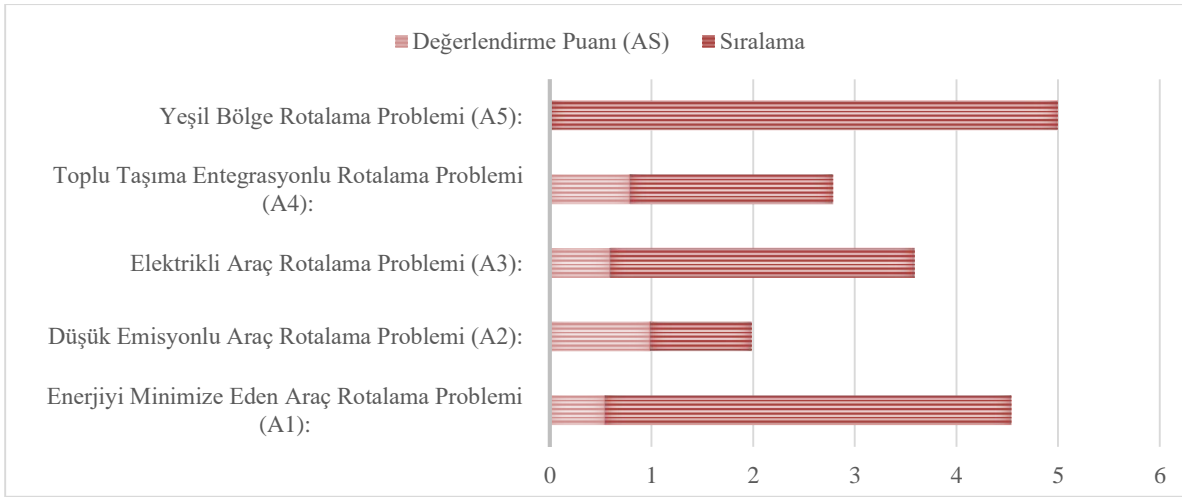
sonuçlara göre yeşil araç rotalama problemleri sıralanır. Pisagor bulanık AHP yönteminden elde edilen ölçüt ağırlıkları kullanılarak hesaplanan EDAS yöntemine ait sonuçlar Tablo 8’de gösterilmiştir.

Tablo 8. EDAS yöntemi sonuçları (EDAS method results)

Yeşil Araç Rotalama Poblemleri	SP	SN	NSP	NSN	Değerlendirme Puanı (AS)	Sıralama
Enerjiyi Minimize Eden Araç Rotalama Problemi (A1):	0,048	0,052	0,288	0,798	0,543	4
Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi (A2):	0,168	0,006	1,000	0,975	0,988	1
Elektrikli Araç Rotalama Problemi (A3):	0,071	0,062	0,423	0,761	0,592	3
Toplu Taşıma Entegrasyonlu Rotalama Problemi (A4):	0,109	0,018	0,647	0,929	0,788	2
Yeşil Bölge Rotalama Problemi (A5):	0,000	0,258	0,000	0,000	0,000	5

Şekil 4, EDAS yöntemi sonucunda elde edilen değerlendirme puanını ve yeşil araç rotalama problemlerinin sıralamasını göstermektedir. Entegre Pisagor bulanık AHP ve EDAS yöntemleri sonucunda, “Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi” birinci sırada yer alırken, “Toplu Taşıma

Entegrasyonlu Rotalama Problemi” ikinci sırada yer aldığı görülmektedir. Ardından sırasıyla, “Elektrikli Araç Rotalama Problemi”, “Enerjiyi Minimize Eden Araç Rotalama Problemi” ve “Yeşil Bölge Rotalama Problemi” önceliklendirilmiştir.



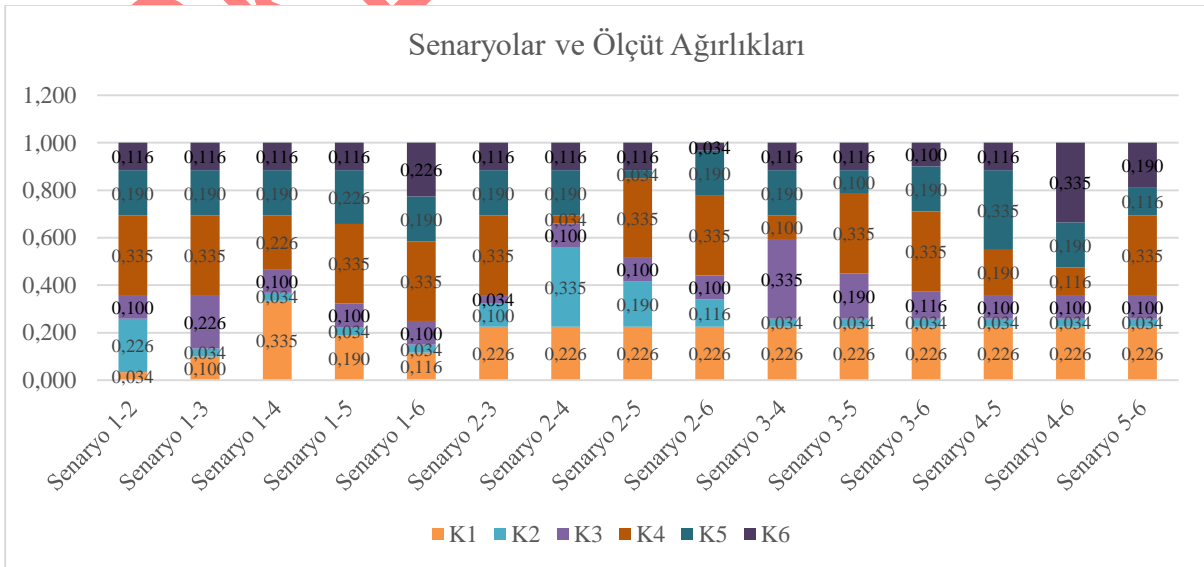
Şekil 4. EDAS sonucu değerlendirme puanı (AS) ve sıralama (Appraisal score and ranking)

3.2. DUYARLILIK ANALİZİ (SENSITIVITY ANALYSIS)

Duyarlılık analizi, farklı ölçüt ağırlıkları altında karar verme probleminin nasıl etkilendiğini belirlemek için kullanılmaktadır. Karar vericiler, ölçütlere ait ağırlıkların değişimleriyle karar verme sürecinin nasıl değiştiğini bu analiz ile gözlemleyebilmektedir. Bununla birlikte, karar verme problemi için önerilen yöntemin, ölçüt ağırlıklarındaki değişikliklere karşı ne kadar duyarlı olduğunu veya olmadığını göstermesine yardımcı olmaktadır. Kriter ağırlıklarında yapılan herhangi bir değişiklik, ölçütlerin sıralama düzeninde değişikliğe yol açtığında, sonucun duyarlı olduğu kabul edilmektedir.

gerçekleştirilmiştir. Bu analizde, ölçütlere ait ağırlıklar birbirleriyle değiştirilerek entegre Pisagor bulanık AHP-EDAS sonuçları her senaryo için yeniden hesaplanmıştır. Örneğin, Senaryo 1-2’de birinci kriterine ait ağırlık değeri ile ikinci kriterine ait ağırlık değeri yer değiştirilmiştir. Benzer şekilde, Senaryo 2-3’te ise ikinci ölçüte ait ağırlık değeri ile üçüncü ölçüte ait ağırlık değeri yer değiştirilmiştir. Her bir senaryo için, yer değiştirilen ağırlık değerleri kullanılarak EDAS yöntemi tekrar uygulanmıştır. Ölçüt ağırlıklarının değiştirilmesiyle elde edilen 15 farklı senaryoda bulunan her bir kriterine ait ağırlık değerleri Şekil 5’te gösterilmiştir.

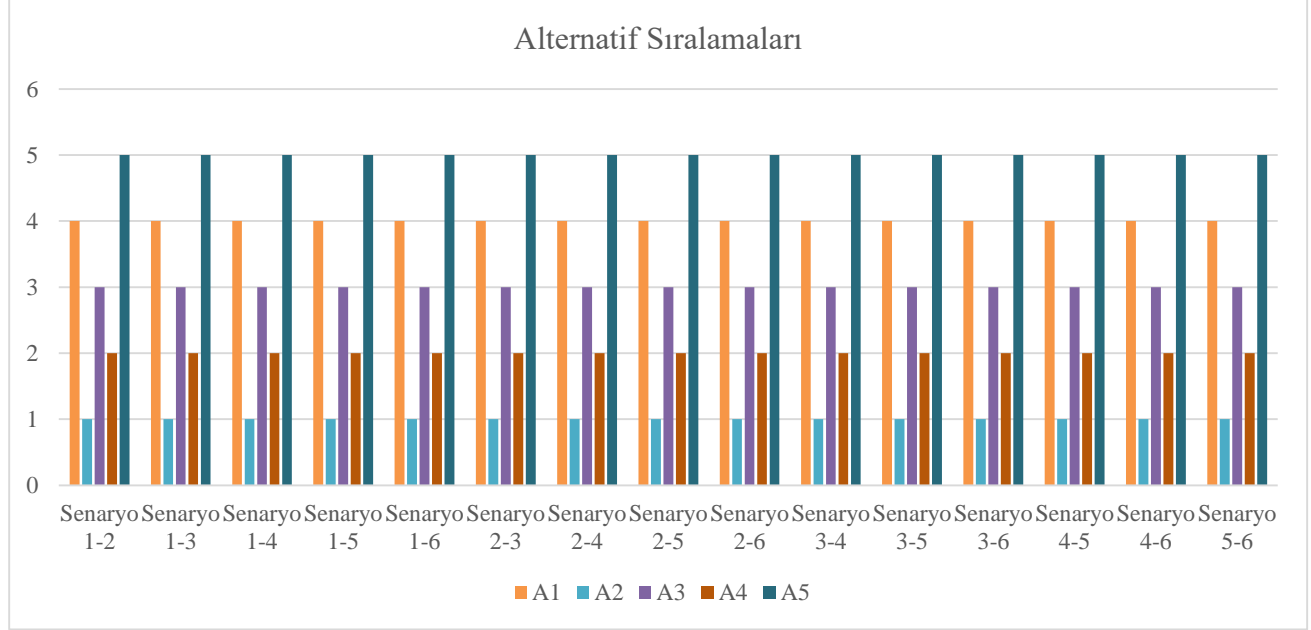
Yeşil araç rotalama problemi için önerdiğimiz entegre Pisagor bulanık AHP ve EDAS yöntemi kapsamında bir duyarlılık analizi



Şekil 5. On beş farklı senaryoda yer alan ölçütlere ait ağırlıklar (Weights of criteria in 15 different scenarios)

Duyarlılık analizi kapsamında 15 farklı senaryo uygulanmış ve yeşil araç rotalama problemlerinin bu senaryolar altında sıralama değişimleri gözlemlenmiştir. Tüm kriter ağırlıkları 15 senaryonun her birinde değişiklik göstermesine karşın yeşil araç rotalama problemlerinin sıralamasında herhangi bir değişiklik olmadığı

gözlemlenmiştir. Şekil 6'da duyarlılık analizi sonucunda, yeşil araç rotalama problemlerinin aldığı sıralamalar gösterilmektedir. Analiz sonucunda, "Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi (A2)" ilk sırada yer alırken, "Yeşil Bölge Rotalama Problemi (A5)" son sırada yer aldığı anlaşılmaktadır.



Şekil 6. Duyarlılık analizi sonuçları (Sensitivity analysis results)

3.3. TARTIŞMA (DISCUSSION)

Çevresel kaygıların ve sürdürülebilirlik hedeflerinin öne çıktığı bir dönemde, bu çalışmanın bulguları büyük önem taşımaktadır. Çalışma kapsamında önerilen alternatifler, kriterler ve yöntemlerle yeşil araç rotalama problemleri çözülmekte, daha çevre dostu ve enerji bakımından daha verimli rotalar belirlenerek, emisyon azaltımı ve kaynakların daha etkin kullanımı gibi sürdürülebilirlik hedeflerine katkı sağlanmaktadır.

Yeşil araç rotalama problemleri entegre Pisagor bulanık AHP ve EDAS yöntemi uygulanarak önceliklendirilmiş ve "Düşük Emisyonlu Araç Rotalama Problemi" birinci sırada yer almıştır. Hidrojen yakıt hücresi ve doğalgaz gibi az karbon emisyonu üreten aynı zamanda azot oksit (NO_x) ve partikül madde emisyonlarını azaltan araçlar, içten yanmalı motorlu araçlara kıyasla daha az emisyon yaymaktadır. Literatürde bulunan bazı çalışmalar bu bulguyu destekler niteliktedir. Ashtineh ve Pishvae [14], alternatif-yakıtlı araç rotalama problemlerinin çevresel performansını değerlendirerek, biyodizel kullanımı ile sera gazı emisyonlarında %37'lik bir azalma sağlanabileceğini ortaya koymuşlardır. Benzer şekilde, Adiba vd. [11], klasik kapasiteli araç rotalama problemini CO₂ emisyonlarını minimize

edecek şekilde ele alarak, sera gazı emisyonlarının azaltılmasının çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmada önemli olduğunu vurgulamışlardır. Bu problem ile düşük emisyonlu araç kullanımı teşvik edilebilir. Düşük emisyonlu araç kullanımının desteklenmesi için ayrıca vergi indirimleri ve sınırlamalar gibi politika önlemleri getirilebilir. Karar vericiler, düşük emisyonlu araç rotalama problemlerine odaklanarak, karbon ayak izini azaltma, hava kirliliğini ve çevresel etkileri minimize etme konusunda daha etkili politikalar ve stratejiler geliştirebilirler.

Önerilen metodun uygulanması sonucunda "Toplu Taşıma Entegrasyonlu Rotalama Problemi" ikinci sırada yer almıştır. Toplu taşıma sistemleri entegrasyonunun karmaşık bir planlama ve optimizasyon süreci gerektirmesi ve buna bağlı hesaplama zorlukları sebebiyle ikinci sırada yer aldığı görülmektedir. Belediye yöneticileri ve yerel yönetimler bu problemin çözümüne odaklanıp aktarma sürelerini minimuma indirip seyahat sürelerini optimize ederek sürdürülebilir ulaşım stratejileri geliştirebilirler. Yazın taramasında yer alan güncel çalışmalar toplu taşıma entegrasyonlu rotalama probleminin sürdürülebilir ulaşım üzerindeki olumlu etkileri vurgulanmıştır. Polimeni ve Vitetta [37], toplu taşıma sistemlerinin

entegrasyonunu içeren karmaşık planlama ve optimizasyon süreçleri için entegre bir yaklaşım önermiştir. Bu çalışma, ağ tasarımı ve araç rotalama süreçlerinin bir arada ele alınmasıyla, şehir içi ulaşımda maliyetlerin ve ağ üzerindeki tıkanıklıkların azaltılabileceğini ortaya koymaktadır. Schmidt [38] ise toplu taşıma ağında yolcu verilerinin planlama sürecine entegre edilmesinin, yolcuların toplam seyahat süresini minimize ederek toplu taşıma sistemlerinin optimizasyonunda önemli bir rol oynadığını göstermiştir.

"Elektrikli Araç Rotalama Problemi" ise, modelleme sonucunda üçüncü sırada yer aldığı görülmektedir. Mevcut altyapı eksikliği, teknolojik kısıtlamalar ve henüz elektrikli araçların geniş çapta kullanılmaya başlanmaması gibi sebepler, bu problemin üçüncü sırada yer almasını sağlamıştır. Bu problemin üst sıralarda yer alması, karar vericilere elektrikli araçlar ve şarj altyapısı için yatırım yapmanın sürdürülebilir ulaşım ve çevresel koruma hedeflerine ulaşmada etkili bir strateji olabileceğini göstermektedir. Desaulniers vd. [13], elektrikli araç rotalama probleminin mevcut altyapı ve teknolojik kısıtlamalar nedeniyle karmaşık bir süreç olduğunu, ancak rotalama maliyetlerini ve kullanılan araç sayısını azaltmak için çoklu ve kısmi şarj imkânlarının etkili stratejiler olabileceğini vurgulamıştır. Amiri vd. [15], elektrikli araçların şarj altyapısının iyileştirilmesiyle taşıma maliyetlerinin %5 oranında düşürülebileceğini ve sera gazı emisyonlarının %18 oranında azaltılabileceğini göstererek, elektrikli araç rotalama probleminin önemini vurgulamaktadır.

Bu çalışmada, Pisagor bulanık AHP yöntemi kullanılarak, yeşil araç rotalama problemlerini değerlendirmek amacıyla kullanılan ölçütler ağırlıklandırılmıştır. Modelleme sonucunda ilk üç sırada sırasıyla "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütü, "Seyahat Mesafesi" ölçütü ve "Seyahat Süresi" ölçütü yer almaktadır. "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütü, yeşil araç rotalama problemlerinde en önemli hedeflerden biri olan çevresel etkinin ölçümünü sağlamaktadır. Bu nedenle, bu ölçütün en yüksek ağırlığa sahip olması beklenir. Psychas vd. [12], araç rotalama problemlerinde "seyahat süresi", "seyahat mesafesi" ve "yakıt tüketimi" gibi ölçütlerin, taşıma süreçlerinde zaman ve maliyet optimizasyonu açısından kritik öneme sahip olduğunu vurgulamaktadır. Benzer şekilde, Bektaş ve Laporte [9], araç rotalama problemlerinde emisyon azaltma potansiyelinin, taşıma maliyetleri ve çevresel etkiler üzerinde önemli bir rol oynadığını ve bu faktörlerin değerlendirilmesinin çevre dostu stratejilerin

geliştirilmesinde kritik olduğunu ortaya koymaktadır. "Seyahat Mesafesi" ve "Seyahat Süresi" ise operasyonel etkinlik ve maliyet açısından önemli olmakla birlikte, doğrudan çevresel etkiye odaklanan "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütü kadar belirleyici olmayabilir. "Seyahat Mesafesi" ve "Seyahat Süresi" ölçütleri, "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütünün gerisinde kalmasına karşın; sürdürülebilirlik, maliyet etkinliği ve hizmet kalitesi gibi farklı perspektifleri temsil etmesi açısından önemini korumaktadır.

Bu çalışma kapsamında belirlenen ölçütler ile yeşil araç rotalama problemlerinin nasıl değerlendirileceği konusu aydınlatılmaya çalışılmıştır. Bununla birlikte, yeşil araç rotalama problemlerinin ortaya çıkarılması, enerji verimliliğini artırmak, emisyonları azaltmak ve operasyonel maliyetleri düşürmek gibi hedeflere daha etkili bir şekilde ulaşılmasına olanak tanımaktadır. Önceliklendirilen yeşil araç rotalama problemleri, uzun vadeli sürdürülebilirlik hedeflerine önemli katkılarda bulunurken, düşük emisyonlu araçların kullanımı veya daha etkili rota planlaması gibi önlemlerle operasyonel maliyetleri düşürebilir ve teslimat sürelerini optimize edebilmektedir.

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Yeşil araç rotalama problemleri, karbon emisyonlarının azaltılması, hava kalitesinin artırılması ve sürdürülebilir ulaşım sistemleri açısından büyük önem taşımaktadır. Yapılan yazın taraması, yeşil araç rotalama problemlerini kapsayan ve tüm kısıtları içeren bir çalışmanın mevcut olmadığını, ayrıca bu problemlerin ÇKKV yöntemleriyle modellenmesine dair literatürde eksiklikler olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum, çalışmanın temel motivasyonunu oluşturmaktadır.

Ulaşım sektörü çalışanları ile akademisyenlerin görüşü ve yapılan literatür taraması sonucunda 6 farklı değerlendirme ölçütü ve 5 yeşil araç rotalama problemi ortaya çıkartılmıştır. Pisagor bulanık AHP yöntemi kullanılarak değerlendirme ölçütlerinin ağırlıkları belirlendikten sonra, yeşil araç rotalama problemleri EDAS yöntemiyle önceliklendirilmiştir. Bununla birlikte, farklı ölçüt ağırlıkları altında karar verme probleminin nasıl etkilendiğini belirlemek amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiş ve önerilen metodun duyarlılığı 15 farklı senaryo üzerinde test edilmiştir.

Çalışmanın bulguları, yönetsel ve pratik anlamda önemli katkılar sunmaktadır. Düşük emisyonlu araç

rotalama probleminin ilk sırada yer alması, şirketlerin karbon emisyonlarını azaltarak çevresel sorumluluklarını yerine getirmelerine ve yasal düzenlemelere uyum sağlamalarına yardımcı olacağı düşünülmektedir. Düşük emisyonlu araçların entegrasyonu, uzun vadeli sürdürülebilirlik stratejilerinin temel bir bileşeni olarak değerlendirilebilir ve bu da gelecekteki çevresel düzenlemelere ve toplumsal beklentilere karşı hazırlıklı olmayı sağlayacaktır. Araçların emisyon düzeylerine göre optimize edilen rotalama çözümleri, gerekli altyapı yatırımlarını belirleyerek, hidrojen yakıt hücresi ve doğalgazlı araçlar için gerekli olan şarj istasyonları ve bakım merkezlerinin planlanmasına yardımcı olacaktır.

Toplu taşıma entegrasyonlu rotalama probleminin ikinci sırada yer alması, sürdürülebilir ulaşım stratejilerinin geliştirilmesinde önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir. Bu bulgu, toplu taşıma sistemlerinin bireysel araç rotalarıyla uyumlu bir şekilde entegrasyonunu vurgulamaktadır. Yönetimsel olarak, belediye yöneticileri ve yerel yönetimler, aktarma sürelerini azaltarak ve seyahat sürelerini optimize ederek toplu taşıma sistemlerinin verimliliğini artırabilirler. Ayrıca, uygun transfer noktalarının belirlenmesi ve araç rotalarının toplu taşıma hatlarıyla senkronize edilmesi, yolcuların toplu taşıma sistemini daha etkin bir şekilde kullanmalarını sağlayacaktır. Pratik açıdan, bu entegrasyon yolcu memnuniyetini artırabilir ve toplu taşıma sistemlerinin daha tercih edilebilir hale gelmesine katkıda bulunabilir. Bunun yanı sıra, toplu taşıma sistemlerinin etkin yönetimi, trafik sıkışıklığını azaltarak çevresel etkilerin minimize edilmesine yardımcı olacaktır.

Elektrikli araç rotalama probleminin üçüncü sırada yer alması, elektrikli araçların ve şarj altyapısının geliştirilmesinin sürdürülebilir ulaşım stratejileri açısından önemini ortaya koymaktadır. Yönetimsel olarak, bu bulgu karar vericilere ve endüstri profesyonellerine, elektrikli araçlar ve şarj altyapısına yapılacak yatırımların çevresel koruma hedeflerine ulaşmada etkili bir strateji olabileceğini göstermektedir. Elektrikli araç rotalama probleminin çözümü, araç rotalarının optimize edilmesi, şarj istasyonlarının stratejik olarak yerleştirilmesi ve seyahat sürelerinin minimize edilmesi gerekliliğini vurgulamaktadır. Bu, aynı zamanda mevcut altyapının geliştirilmesi, teknolojik yeniliklerin benimsenmesi ve geniş çapta elektrikli araç kullanımının teşvik edilmesi gibi pratik uygulamaları desteklemektedir. Dolayısıyla, bu bulgu, elektrikli araçların daha etkin kullanımı ve şarj altyapısının iyileştirilmesi yoluyla operasyonel

verimliliğin artırılmasına ve çevresel etkilerin azaltılmasına katkıda bulunacaktır.

Yeşil araç rotalama problemlerini değerlendirmek için "Emisyon Azaltma Potansiyeli", "Seyahat Mesafesi" ve "Seyahat Süresi" ölçütleri ilk sıralarda yer almaktadır. Yönetimsel açıdan, "Emisyon Azaltma Potansiyeli" ölçütünün en yüksek ağırlığa sahip olması, çevresel etkilerin öncelikli olarak ele alınması gerektiğini vurgulamaktadır. Bu, karar vericilere yeşil araç rotalama stratejilerinde çevresel performansın öncelikli hedef olarak belirlenmesi gerektiğini göstermektedir. Ayrıca, "Seyahat Mesafesi" ve "Seyahat Süresi" ölçütlerinin de dikkate alınması, operasyonel verimlilik ve maliyet yönetimi açısından önemlidir. Bu ölçütler, araç rotalarının planlanmasında sürdürülebilirlik ve hizmet kalitesini artırma hedefleri doğrultusunda dengeli bir yaklaşım sağlayacaktır. Pratikte, bu sıralama, yeşil araç rotalama stratejilerinin uygulanması sırasında hangi kriterlerin öncelikli olarak değerlendirileceği konusunda net bir rehber sunacak, böylece operasyonel süreçlerin ve maliyetlerin optimize edilmesine yardımcı olacaktır.

Bu çalışma, çeşitli yeşil araç rotalama senaryolarının incelenmesini sağlarken, endüstriyel profesyonellere ve lojistik yöneticilere maliyet-etkin ve çevre dostu çözümler sunmaktadır. Ayrıca, yeşil araç rotalama problemlerinin tanımlanması, enerji verimliliğinin artırılması ve operasyonel maliyetlerin düşürülmesi gibi sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşmada önemli bir adım olarak öne çıkmaktadır. Çalışma kapsamında ortaya çıkartılan yeşil araç rotalama problemleri, verilen kısıtları göz önüne alarak bir optimizasyon problemine dönüştürülüp, gelecek çalışmalarda kullanılabilir.

Bu çalışmanın kısıtlılıkları, güvenilirliğini ve uygulanabilirliğini artırmak için dikkate alınması gereken önemli noktalar. İlk olarak, çalışma kapsamında tercih edilen kriterler arasındaki etkileşim dikkate alınmamıştır. Gerçek dünyadaki karar verme süreçlerinde, kriterler genellikle birbirleriyle bağımlıdır ve bu bağımlılıklar sıralama sonuçlarını önemli ölçüde etkileyebilir. Ayrıca, kriterlerin ağırlıklandırılması ve yeşil araç rotalama problemlerinin değerlendirilmesi için sınırlı sayıda uzmana danışılmıştır. Karar verici sayısının artırılması, özellikle farklı bölümlerden uzman ve akademisyenlerin dâhil edilmesi, değerlendirme sürecinin daha kapsamlı olmasına katkı sağlayacaktır. Gelecek araştırmalarda, bu çalışma kapsamında tanımlanan her bir yeşil araç rotalama problemi, sürdürülebilir ulaşım ve lojistik alanlarında karar verme problemi olarak ele alınıp incelenebilir. Çalışmada tercih edilen Pisagor

bulanık AHP ve EDAS yöntemleri, paylaşımlı ve otonom ulaşım gibi konularda uygulanabilir. Ayrıca, sonraki çalışmalarda TOPSIS, VIKOR gibi farklı ÇKKV yöntemleri kullanılarak, bu metotlar tip-2 bulanık kümeler veya kaba kümeler ortamında genişletilebilir.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Bu makalenin yazarı çalışmalarında kullandıkları materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler.

The author of this article declares that the materials and methods they use in their work do not require ethical committee approval and/or legal-specific permission.

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Gözde BAKIOĞLU: Literatür, yöntem, analiz, görselleştirme, tartışma ve makalenin yazım işlemini gerçekleştirmiştir.

She conducted the processes of literature review, methodology, analysis, visualization, discussion, and writing of the article.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Bu çalışmada herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

There is no conflict of interest in this study.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] World energy outlook, 2024; <https://www.eiu.com/n/campaigns/energy-in-2024/#:~:text=Global%20energy%20consumption%20will%20grow,energy%20will%20rise%20by%2011%25>
- [2] Höök, M, Li, J, Johansson, K, Snowden, S. Growth rates of global energy systems and future outlooks. *Nat. Resour. Res.* 2012; 21: 23–41.
- [3] European Commission. Report from the Commission to the European Parliament and the Council – Progress towards Achieving the Kyoto and EU2020 Objectives. European Commission. 2014
- [4] Erdogan, S, Miller-Hooks, E. A green vehicle routing problem. *Transp. Res. E Logist. Transp. Rev.* 2012; 48 (1): 100–114.
- [5] Chen, J, Liao, W, Yu, C. Route optimization for cold chain logistics of front warehouses based on traffic congestion and carbon emission. *Computers & Industrial Engineering.* 2021; 161: 107663.
- [6] Palacio, J. D, Rivera, J. C. A multi-start evolutionary local search for the one-commodity pickup and delivery traveling salesman problem. *Annals of Operations Research.* 2022; 316(2): 979-1011.
- [7] Zhang, J, Van Woensel, T. Dynamic vehicle routing with random requests: A literature review. *International Journal of Production Economics.* 2023; 256: 108751.
- [8] Li, Y, Yang, J. The last-mile delivery vehicle routing problem with handling cost in the front warehouse mode. *Computers & Industrial Engineering.* 2024; 190: 110076.
- [9] Bektaş, T, Laporte, G. The pollution-routing problem. *Transp. Res. Part B Methodol.* 2011; 45 (8): 1232-1250.
- [10] Kopfer, H,W, Schönberger, J, Kopfer, H. Reducing greenhouse gas emissions of a heterogeneous vehicle fleet. *Flex. Serv. Manuf. J.* 2014; 26 (1): 221-248.
- [11] Adiba, E, E, Aahmed, E, A, Youssef, B. The green capacitated vehicle routing problem: optimizing of emissions of greenhouse gas. In: 2014 International Conference on Logistics Operations Management. 2014; 161-167.
- [12] Psychas, I-D, Marinaki, M, Marinakis, Y. A Parallel Multi-Start NSGA II Algorithm for Multiobjective Energy Reduction Vehicle Routing Problem. Springer International Publishing, Cham. 2015; 336-350.
- [13] Desaulniers, G, Errico, F, Irnich, S, Schneider, M. Exact algorithms for electric vehicle-routing problems with time windows. *Oper. Res.* 2016; 64 (6): 1388–1405.
- [14] Ashtineh, H, Pishvae, M,S. Alternative fuel vehicle-routing problem: a life cycle analysis of transportation fuels. *J. Clean. Prod.* 2019; 219: 166-182.
- [15] Amiri, A, Amin, S, H, Zolfagharinia, H. A bi-objective green vehicle routing problem with a mixed fleet of conventional and electric trucks: Considering charging power and density of stations. *Expert Systems with Applications.* 2023; 213: 119228.
- [16] Lou, P, Zhou, Z, Zeng, Y, Fan, C. Vehicle routing problem with time windows and carbon emissions: a case study in logistics distribution. *Environmental Science and Pollution Research.* 2024; 1-21.
- [17] Garside, A, K, Ahmad, R., Muhtazaruddin, M, N, B. A Recent Review of Solution Approaches for Green Vehicle Routing Problem and its variants. *Operations Research Perspectives.* 2024; 100303.
- [18] Asghari, M, Al-e, S, M, J, M. Green vehicle routing problem: A state-of-the-art review. *International Journal of Production Economics.* 2021; 231: 107899.

- [19] Moghdani, R, Salimifard, K, Demir, E, Benyettou, A. The green vehicle routing problem: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 279: 123691.
- [20] Stević, Ž, Tanackov, I, Vasiljević, M, Vesković, S. Evaluation in logistics using combined AHP and EDAS method. In *Proceedings of the XLIII international symposium on operational research*. Belgrade, Serbia. 2016; 20-23.
- [21] Karatop, B, Taşkan, B, Adar, E, Kubat, C. Decision analysis related to the renewable energy investments in Turkey based on a Fuzzy AHP-EDAS-Fuzzy FMEA approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2021; 151: 106958.
- [22] Narad, A, Josh, M. Selection of Optimum Fuel Blend Using AHP and EDAS Analysis. Available at SSRN 3712853. 2020.
- [23] Zadeh, L.A. Fuzzy sets, *Inf. Control*. 1965; 8 (3): 338–353.
- [24] Zhang, X. Multicriteria pythagorean fuzzy decision analysis: a hierarchical qualiflex approach with the closeness index-based ranking methods, *Inform. Sci*. 2016; 330: 104–124.
- [25] Yager, R, R. Pythagorean fuzzy subsets, in: *IFSA World Congress and NAFIPS Annual Meeting (IFSA/NAFIPS)*, IEEE. 2013; 57–61.
- [26] Zeng S, Chen, J, Li, X. A hybrid method for Pythagorean fuzzy multiplecriteria decision making, *Int. J. Inf. Technol. Decis. Mak*. 2016; 15 (02): 403–422.
- [27] Saaty, T, L, Bennett, J, P. A theory of analytical hierarchies applied to political candidacy. *Behavioral Science*. 1977; 22: 237-245.
- [28] Sarkar, B, Biswas, A. Pythagorean fuzzy AHP-TOPSIS integrated approach for transportation management through a new distance measure. *Soft Computing*. 2021; 25(5): 4073-4089.
- [29] Zhou, F, Chen, T, Y. An integrated multicriteria group decision-making approach for green supplier selection under Pythagorean fuzzy scenarios. *IEEE Access*. 2020; 8: 165216-165231.
- [30] Demir, E, Ak, M, F, Sari, K. Pythagorean fuzzy based AHP-VIKOR integration to assess rail transportation systems in Turkey. *International Journal of Fuzzy Systems*. 2023; 25(2): 620-632.
- [31] Farooq, D. Application of pythagorean fuzzy analytic hierarchy process for assessing driver behavior criteria associated to road safety. *Journal of Soft Computing and Decision Analytics*. 2024; 2(1): 144-158.
- [32] Ghorabae, M, K, Zavadskas, E K, Olfat, L., Turskis, Z. Multi-criteria inventory classification using a new method of Evaluation Based on Distance from Average Solution (EDAS). *Informatica*. 2015; 26(3): 435–451.
- [33] Simić, V, Milovanović, B, Pantelić, S, Pamučar, D, Tirkolae, E, B. Sustainable route selection of petroleum transportation using a type-2 neutrosophic number based ITARA-EDAS model. *Information Sciences*. 2023; 622: 732-754.
- [34] Bakioğlu, G. Selection of sustainable transportation strategies for campuses using hybrid decision-making approach under picture fuzzy sets. *Technological Forecasting and Social Change*. 2024; 206: 123567.
- [35] Krishankumar, R, Pamucar, D, Devenci, M, Ravichandran, K. S. Prioritization of zero-carbon measures for sustainable urban mobility using integrated double hierarchy decision framework and EDAS approach. *Science of The Total Environment*. 2021; 797: 149068.
- [36] Moghdani, R, Salimifard, K, Demir, E, Benyettou, A. The green vehicle routing problem: A systematic literature review. *Journal of Cleaner Production*. 2021; 279: 123691.
- [37] Polimeni, A, Vitetta, A. Network design and vehicle routing problems in road transport systems: Integrating models and algorithms. *Transportation Engineering*. 2024; 16: 100247.
- [38] Schmidt, M, E. Integrating routing decisions in public transportation problems. New York: Springer. 2014.