

PİSAGOR BULANIK SAYILARA DAYALI CRITIC-MARCOS YÖNTEMİ İLE OTONOM FORKLİFT SEÇİMİ

Elif ÇALOĞLU BÜYÜKSELÇUK^{1*}

¹ Fenerbahçe Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul,
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-5976-6727>

Anahtar Kelimeler	Öz
Otonom forklift Pisagor bulanık sayılar CRITIC MARCOS Çok kriterli karar verme	Üretim ve depolama işletmelerinde forkliftler işletmenin verimliliğini arttırmak amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle son yıllarda teknolojiye yaşanan gelişmeler ve Endüstri 4.0 uygulamaları ile otonom forkliftler modern işletmelerde klasik forkliftlerin yerini almaktadır. Çevre dostu ve 24 saat çalışabilen bu araçlar ile işletme bünyesinde verim artırılırken aynı zamanda insan hatasından kaynaklı kazalar da önlenmektedir. Bu çalışma, modern işletmelere otonom forklift belirleme sürecinde destek olmak üzere geliştirilmiştir. Bu araçların seçiminde hangi kriterlerin dikkate alınması gerektiği literatür taraması sonucunda belirlenmiştir. Bu süreçte yaşanabilecek belirsizlik ve sübjektifliğin etkilerini en aza indirebilmek amacıyla Pisagor bulanık sayılardan yararlanarak problem çözülmüştür. CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) yöntemi ile kriterlere ait ağırlıklar belirlendikten sonra MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution) yöntemi kullanılarak alternatifler değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, belirlenen sekiz farklı kriter içerisinde şarj süresi, dönme yarıçapı ve maksimum kaldıracağı yük miktarı en önemli kriter olarak belirlenmiştir. Farklı değerlendirme kriterleri için en iyi alternatif olarak Kuzey Amerika'da üretilen A7 alternatifi belirlenmiştir.

PYTHAGOREAN FUZZY-BASED CRITIC-MARCOS METHOD FOR AUTONOMOUS FORKLIFT SELECTION

Keywords	Abstract
Autonomous forklift Pythagorean fuzzy numbers CRITIC MARCOS Multi-criteria decision-making	In production and storage facilities, forklifts are commonly used to increase the efficiency of operations. Particularly in recent years, advancements in technology and the implementation of Industry 4.0 practices have led to the adoption of autonomous forklifts in modern enterprises, replacing conventional forklifts. These environmentally friendly and 24/7 operational vehicles not only enhance productivity within the organization but also mitigate accidents stemming from human error. This study has been developed to support modern enterprises in the process of selecting autonomous forklifts. The criteria for selecting these vehicles have been determined through a review of the literature. To minimize the impact of uncertainties and subjectivity in this process, the problem has been solved using Pythagorean fuzzy numbers. After determining the weights of the criteria with the CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) method, the alternatives were evaluated using the MARCOS (Measurement of Alternatives and Ranking according to COmpromise Solution) method. In conclusion, among the eight specified criteria, charging time, turning radius, and maximum load capacity have been identified as the most significant criteria. As the optimal alternative for different evaluation criteria, the A7 alternative produced in North America has been determined.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 05.06.2024

Submission Date : 05.06.2024

Kabul Tarihi : 12.10.2024

Accepted Date : 12.10.2024

* Sorumlu yazar: elif.buyukselcuk@fbu.edu.tr
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1496123>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Giriş

Pandemi ile tüketici davranışları değişmiş, yaygın olan e-ticaret faaliyetleri daha da geniş kitlelere yayılmıştır. Hızla gelişen e-ticaret faaliyetleri işletmelerin tedarik zinciri ve lojistik faaliyetlerinin karmaşık ve yoğunlaşmasına neden olmuştur. Ancak artan faaliyetlere rağmen işgücünde azalmalar meydana gelmiştir. Persol Araştırma ve Danışmanlık Şirketi ile Chuo Üniversitesi 2018 yılında yaptıkları araştırmada 2030 yılında Japonya'da işgücü talebinin yaklaşık 71 milyona ulaşacağını ve sonuçta 6,5 milyon işgücü kıtlığı ile karşılaşacağını öngörmüşlerdir (Bhat, Kai, Suzuki, Shiroshima ve Yoshida, 2023). Bunun sonucu olarak işletmeler operasyonlarını yeniden gözden geçirerek tasarlamakta ve uzaktan erişilebilir, otomatik kontrol edilebilir daha yenilikçi ve teknolojik sistemler kurmaktadır. Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye'de de hemen hemen her iş kolunda işgücü yetersizliği ile karşı karşıya kalınmaktadır. Bu nedenle, işletmeler depo ve operasyonel süreçlerinde yenilikçi yaklaşımları takip ederek otonom araçların kullanımına yönelmişlerdir. Bu araçların denilince akla sadece fabrika ve depolar gelmemeli, hastane, otel, okul, bakımevleri gibi hizmet üreten işletmeler de gelmelidir (Lopez, Zalama ve Gomez-Garcia-Bermejo, 2022).

Yapay zekâ, nesnelerin interneti, bulut teknolojisi, büyük veri analitiğini kapsayan Endüstri 4.0 hareketleri ile işletmeler akıllı fabrikalar yaratmak üzere harekete geçmişlerdir. Bu geçişin temelinde ise daha verimli, daha düşük maliyetli, daha çevreci, daha yenilikçi ve sürdürülebilir sistem anlayışı yatmaktadır (Chen, Zhong, Mumtaz, Zhou ve Zhu, 2023; Ahmed, Jeon ve Piccialli, 2022; Dey, Bhuniya ve Sarkar, 2021). Akıllı fabrikalar denilince kamera ve sensörlerle donatılmış otonom araçlar, otonom forkliftler, otonom mobil robotların süreçlerde yer aldığı işletmeler akla gelmelidir. Depolarda ve tesis içerisinde malların taşınmasında kullanılan otonom forkliftler verimlilik, güvenlik, esneklik ve maliyet açısından birçok avantaj sağlamaktadırlar (Mohammadpour ve diğ., 2024).

Geleneksel forkliftler bir operatör tarafından kullanılan ve operatörün hatası sebebiyle kaza oranlarının yüksek olduğu araçlardır. Karmaşık, dar alanlı depo ve işletmelerde bu kazaların oranları daha da artmaktadır. Bu da daha kaliteli operatörlere ihtiyaç duyulacağı anlamına gelmektedir. Kazaların önüne geçilmesi için alınacak önlemler, operatörlerin niteliğinin artırılması maliyetlerin yükselmesine neden olmaktadır. Üstelik bu maliyetlere karşılık verimlilik yüksek olmamaktadır. Bu nedenle de otonom forkliftlerin kullanımı gün geçtikçe yaygınlaşmaktadır (Abdellatif, Shoeir, Talaat, Gabalah, Elbably ve Saleh, 2018; Choi, Ahn ve Seo, 2020; Shete, Kakade ve Dhanvijay, 2021). Yapılan araştırmalarda yaklaşık 3.6 milyon dolar olan otonom forklift pazarının 2032 yılına kadar yaklaşık 9.7 milyona çıkması öngörülmektedir (Market Research Future, 2024).

Otonom forkliftler ise programlanmış rotalarda çalıştılarından daha güvenli ve öngörülebilir bir şekilde hareket ederler. Dolayısıyla geleneksel forkliftlere göre insan hatasından kaynaklı kaza riskleri en aza indirgenmekte hatta sıfırlanmaktadır. Otonom forkliftler enerjileri olduğu müddetçe yorulmadan, dinlenmeden 7/24 çalışabilirler. Geleneksel forkliftlerde ise operatör mutlaka belli saat dilimlerinde mola vererek çalışmalıdır. Aksi takdirde operatör kaynaklı hatalara bağlı kaza riskleri artmaktadır. Geleneksel forkliftlerde operatör maaşları, eğitim, sigorta vb. masraflar ile karşılaşmaktadır. Bu da işletme maliyetlerinin artmasına neden olmaktadır. Otonom forkliftlerde ise işletme maliyetleri daha düşüktür. Otonom forkliftlerde insan gücünden kaynaklanan gecikmeler ve hatalar olmadığından operasyonlar daha etkili ve verimli yönetilmektedir. Otonom forkliftler sayesinde tesis içi güvenlik artmaktadır. Operatör tarafından yönetilen forkliftlerde ise çarpışma ve yaralanma riskleri sebebiyle tesis içi güvenlik seviyesi düşüktür. Otonom forkliftlerdeki sensörler ve kameralar bu kazaların önlenmesine yardımcı olmaktadır. Otonom forkliftler elektrik veya alternatif yakıtlarla çalışabildiğinden çevre dostu ve sürdürülebilirlik hedeflerini desteklemeye yardımcı olan araçlardır (Abuzied, Nazih ve Sahbel, 2024).

Bu kadar avantajı sebebiyle işletmeler süreçlerinde bu araçlardan faydalanmak istemektedirler. Ayrıca giderek artan pazar büyüklüğü ve her alanda otomasyona yönelik yenilikçi faaliyetlerin uygulanması işletmelerin otonom forkliftlere geçişini zorunlu kılmaktadır. Ancak günümüzde farklı markalara ait otonom forkliftlerin piyasada bulunması, işletmelerin seçim sürecinde akıllarının karışmasına neden olmaktadır. Yöneticiler karar verme sürecinde hangi kriterleri dikkate alacaklarını bilmek ve bu kriterler ışığı altında doğru alternatifi belirlemek isterler. Dinamik iş çevresi içerisinde yüksek belirsizlik ve risk ortamlarında karar vermek durumunda kalan yöneticiler doğru hareket etmek durumundadırlar. Bu da çok kriterli karar verme (ÇKKV) problemlerini karşımıza çıkarmaktadır. ÇKKV problemlerinin çözümü için literatürde çok sayıda yöntem bulunmaktadır. Bu çalışmada da en iyi otonom forkliftin belirlenmesinde hangi kriterler göz önünde bulundurulmalı sorusunun yanıtı aranırken, belirlenen kriterlere göre alternatifler değerlendirilecek ve en iyisi tespit edilecektir. Belirsizlik ve öznel değerlendirmeleri en aza indirgeyebilmek adına bulanık mantık kullanılacaktır. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde Pisagor bulanık sayılara dayanan CRITIC yöntemi ve alternatiflerin sıralanmasında ise MARCOS yöntemi uygulanacaktır. Bundan sonraki bölümde literatür taraması, daha sonra çalışmada kullanılan yöntemler tanıtılacaktır. Daha sonra alternatif ve kriterler Pisagor bulanık sayılara dayalı CRITIC-MARCOS yöntemleri ile değerlendirilecek ve bulgular tartışılacaktır. Sonuç bölümünde ise çalışmadan elde edilen sonuçlar

verilirken, çalışmada karşılaşılan sınırlılıklar ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara değinilecektir.

2. Bilimsel Yazın Taraması

Çalışmaya konu olan otonom forkliftler ve çalışmada kullanılan ÇKKV yöntemleri hakkında yapılan kapsamlı literatür taraması sonuçları bu bölümde özetlenecektir.

2.1. Forkliftler Hakkındaki Çalışmalar

Literatürde farklı araştırmacılar tarafından otonom forkliftler üzerine yapılan az sayıda araştırmaya rastlanmıştır. Zhang, Li, Fang, Luo ve Cao (2024) yaptıkları çalışmada, otonom forkliftler için maliyet değerlendirmesini de dikkate alan hareket planlama stratejisi geliştirmişlerdir. Önerilen ortak sevk ve planlama yöntemi çarpışmayı önleyen ve hızlı bir çözüm geliştiren bir yöntemdir. Strateji belirlenirken yapılmaktadır. Amio, Ahmed, Jeong, Jung ve Nam (2024) yaptıkları çalışmada, otonom bir forkliftin hareket kabiliyetini kolaylaştırmak amacıyla mekanum tekerlekler kullanarak model bazlı hızlı kontrol algoritması tasarlamışlardır. Mohammadpour ve diğ. (2024) ise otonom forkliftlerde enerji verimliliğini artırmaya yönelik bir hareket planlama stratejisi geliştirmişlerdir. Geliştirdikleri strateji derin sinir ağlarını kullanarak otonom forklift kinetik modeli ile enerji tasarrufu sağlamaktadır. Akıllı fabrika ve depoların önem kazanması ile otonom robotlar her alanda kendini göstermeye başlamıştır. Depo ortamlarında otonom forkliftlerin navigasyon ve kontrolünü sağlamak üzere geliştirilen model işletmenin verimliliğini artırmayı hedeflemektedir (Vorasawad, Park ve Kim, 2023). Lopez ve diğ. (2022) yaptıkları çalışmada, otomatik yönlendirmeli araçlara dayalı taşıma sistemlerini simüle etmek için esnek bir çerçeve sunmaktadırlar. Simülasyonu gerçekleştirmek için kullanılan çerçeve aynı zamanda küresel kontrol sistemindeki farklı politikaların ve algoritmaların uygulanmasına da hizmet etmektedir.

Literatürde forklift seçim problemi için yapılan pek çok araştırmaya rastlanmıştır. Bunlardan biri Toktaş Palut ve Okçuoğlu tarafından (2019) yapılan çalışmadır. Çalışmada, etkin bir depo tasarımı ve yerleşimi için forklift seçiminin önemine vurgu yapılmıştır. Bir beyaz eşya firması için forklift seçim problemi ele alınmıştır. Seçim kriterleri belirlendikten sonra alternatifler bu kriterlere göre değerlendirilmiştir. Kriter ağırlıkları AHP (Analytical Hierarchy Process) ile belirlenmiş ve alternatifler TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) yöntemi ile sıralanmıştır. Forkliftin fiyatı, çalışma süresi ve kaldırma yüksekliği en önemli kriterler olarak belirlenmiştir. En uygun forklift seçildikten sonra beklenen toplam taşıma mesafelerini en küçükleme amacıyla bir model kurulmuş ve hangi ürünün nerede depolanacağına dair bilgiler elde edilmiştir.

Sarıçalı ve Kundakçı (2017) yaptıkları çalışmada bir tekstil firması için forklift seçim problemini ele almışlar ve KEMIRA-M (KEmeny Median Indicator Rank Accordance-Modified) yöntemi ile alternatifleri değerlendirmişlerdir. Alternatiflerin değerlendirilmesi için faktörleri iç ve dış olmak üzere iki grup altında incelemişlerdir. Dış dönüş yarıçapı, asansör yüksekliği ve üst koruyucu yüksekliği iç faktörler arasında yer alırken; birim fiyat, marka güvenilirliği, servis ağı ve garanti süresi dış faktörler arasında yer almıştır. İç faktörler arasında yer alan dış dönüş yarıçapı en yüksek önceliğe sahipken onu sırasıyla asansör yüksekliği ve üst koruyucu yüksekliği takip etmiştir.

Ulutaş, Topal, Karabasevic ve Balo (2023) yaptıkları çalışmada ise bir kargo şirketi için forklift seçim problemi ele alınmıştır. Alternatiflerin değerlendirilmesi için bulanık MCRAT (Multiple Criteria Ranking by Alternative Trace) yöntemi kullanılırken, kriter ağırlıklarının belirlenmesinde bulanık BWM (Best Worst Method) yöntemi uygulanmıştır. Bu çalışma ile yeni bir bulanık ÇKKV yöntemi (bulanık MCRAT) literatüre kazandırılmıştır.

Fazlollahtabar, Smailbašić ve Stević (2019) tarafından bir depoda kullanılmak üzere forklift seçim problemi ele alınmış ve WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment)-FUCOM (Full Consistency Method) yöntemleri ile sonuç elde edilmiştir. Forklift seçim problemi için kriterler olarak satış fiyatı, forklift üretim yılı, maksimum yükleme kapasitesi, çalışma süresi, maksimum kaldırma yüksekliği, yedek parça tedariki, çalışma koşulları belirlenmiştir. Çalışma süresi ve maksimum yükleme kapasitesi en önemli kriterler olarak belirlenmiştir.

Pamučar ve Ćirović (2015) yaptıkları çalışmada forkliftleri farklı kriterlere göre değerlendirmişler ve MABAC (Multi-Attributive Border Approximation area Comparison) yöntemini kullanmışlardır. Kriterler arasında satış fiyatı, üretici garantisi, servis ağı, yedek parça tedariki, ortalama bakım maliyeti, yakıt tüketimi, maksimum taşıma kapasitesi, maksimum kaldırma kapasitesi, yüklü ve yüksüz forklift hızı, yük kaldırma ve indirme hızı yer almaktadır.

Demirci ve Manavgat (2021) tarafından yapılan bir çalışmada veri zarflama analizi, TOPSIS ve VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) yöntemleri kullanılarak en iyi forkliftin seçim problemi ele alınmıştır. Forklift alternatifleri fiyat, yakıt sarfiyatı, yükleme kapasitesi, motor ömrü ve satış sonrası destek kriterlerine göre değerlendirilmiş ve her üç yöntem için de sonuç aynı bulunmuştur. Yakıt sarfiyatı en önemli kriter olarak belirlenirken fiyat ve yükleme kapasitesi ikinci ve üçüncü sırada yer almıştır.

Keleş (2023) yaptığı çalışmada forklift seçim probleminde 13 alternatifini 6 seçim kriterine göre değerlendirmiştir. Forklift fiyatı, ağırlığı, yükleme

kapasitesi, hız, kaldırma yüksekliği, motor gücü kriterler arasında yer almıştır. Motor gücü, fiyat ve yükleme kapasitesi en önemli kriterler olarak belirlenmiştir.

Görçün, Ulutaş, Topal ve Ecer (2024), beş farklı teleskopik forklift; yükleme kapasitesi, kaldırma yüksekliği, ikinci el satış fiyatı, forklift fiyatı, bakım maliyeti ve yakıt tüketimi gibi kriterlere göre değerlendirilmiştir. Forklift fiyatı, yükleme kapasitesi ve kaldırma yüksekliği en önemli kriterler arasında yer almıştır.

2.2. CRITIC Yöntemi Hakkındaki Çalışmalar

ÇKKV problemlerinin çözümünde kullanılan kriterlerin ağırlıklarını belirlemek üzere literatürde karşımıza farklı yöntemler çıkmaktadır. Bu yöntemlerden biri de CRITIC yöntemidir.

Zafar, Alamgir ve Rehman (2021) yaptıkları çalışmada, uygun halka açık blok zincir platformlarını sıralamak ve özetlemek için ÇKKV yaklaşımını kullanmaktadırlar. Bu amaçla, Entropi ve CRITIC yönteminin birleşimi olan yeni bir ağırlık atama tekniği olan ECWM (Entropy-CRITIC Weight Method)'yi sunmaktadırlar. Gurralla, Helmy ve Ndiaye (2022) yaptıkları araştırmada, gıda ambalaj sektöründe, fiziksel, mekanik, optik, termal, yenilebilir film hazırlama için en uygun biyo-kompozitin seçimine yönelik ÇKKV uygulanmasını gerçekleştirmişlerdir. Bu nedenle, çalışma, farklı özellikler sergileyen bir dizi film örneği için CRITIC ve TOPSIS yöntemlerinden formüle edilmiş bir Hibrit ÇKKV yöntemini kullanmayı amaçlamaktadır. Saxena, Kumar ve Ram (2022) optimum SRGM'yi (software reliability growth model) seçmek için CRITIC ve TOPSIS temeline dayanan bütünleşmiş bir teknik geliştirmişlerdir. Kriterlerin ağırlıkları CRITIC yöntemiyle elde edilir ve SRGM'ler TOPSIS yöntemi kullanılarak sıralanmaktadır. Ertemel, Menekse ve Camgoz Akdag (2023) ergenlerin akıllı telefon bağımlılığı düzeyini değerlendirmek için Pisagor bulanık kümelerine dayanan bütünleşmiş bir bulanık ÇKKV metodolojisini sunmaktadırlar. Kriterlerin önem düzeylerinin objektif bir şekilde belirlenmesi amacıyla CRITIC yöntemi kullanılmakta, seçilen adayların akıllı telefon bağımlılık düzeyleri ise TOPSIS kullanılarak sıralanmaktadır. Karar uzmanlarının kriterlerinde ve ağırlıklarında meydana gelen değişikliklerin aday sıralamalarında neden olduğu değişiklikleri incelemek için de duyarlılık analizi yapılmıştır. Ayrıca karşılaştırmalı analiz kapsamında elde edilen bulguların doğrulanması amacıyla EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution) yaklaşımı kullanılmıştır. Tuş ve Aytaç Adalı (2019) yaptıkları çalışmada, özel hastane personelinin zaman ve devamına yönelik olan yazılım seçimi problemi için CRITIC ve WASPAS yöntemlerine dayanan yeni birleştirilmiş karar verme yaklaşımı kullanmaktadırlar. Kriterlerin ağırlıkları CRITIC yöntemiyle belirlenmekte ve alternatifler WASPAS yöntemiyle sıralanarak en

uygun alternatifin bulunması sağlanmaktadır. Liaw, Hsu ve Lo (2020) ise yaptıkları çalışmada, sistematik yeşil dış kaynak kullanımı değerlendirmesi için bir dizi ÇKKV yaklaşımı önermektedirler. Öncelikle kriterler arasındaki karşılıklı bağımlı ilişkileri tartışmak üzere uzmanlardan oluşan bir ekip kurulmuş ve öznel etki ağırlıkları oluşturmak için DEMATEL (The Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) tekniği uygulanmıştır. Daha sonra, dış kaynak sağlayıcılarından büyük miktarda veri toplanmış ve objektif etki ağırlıklarını elde etmek için CRITIC yöntemi aracılığıyla kriterlerin ağırlığı belirlenmiştir. Son olarak, yeşil dış kaynak sağlayıcılarının performansını bütünleştirmek ve bunları dört seviyeye sınıflandırmak için TOPSIS yöntemi önerilmiştir.

2.3. MARCOS Yöntemi Hakkındaki Çalışmalar

Son yıllarda MARCOS yöntemi farklı alanlarda karşılaşılan problemlerin çözümünde kullanılmaktadır (Birkocak Acar, Bakadur, Ütebay ve Özdağoğlu, 2023; Mishra, Rani, Pamucar ve Saha, 2023; Ulutaş, Karabasevic, Popovic, Stanujkic, 2020). Trung (2022) tarafından yapılan çalışmada, beş farklı veri normalizasyon yöntemleri MARCOS yöntemiyle birleştirilerek üç farklı durum altında değerlendirilmiştir. MARCOS yöntemiyle birleştirilerek en uygun veri normalleştirme yöntemleri tanımlandıktan sonra iki yeni veri normalleştirme yöntemi önerilmiştir. Stević, Pamučar, Puška ve Chatterjee (2020) ise yaptıkları çalışmada, özel sağlık sektöründe sürdürülebilir tedarikçilerin seçilmesi için MARCOS yönteminin nasıl kullanılacağı açıklanmaktadır. Çalışma, sağlık sektöründe sürdürülebilir tedarikçi seçimine ilişkin bir örnek olay çalışması ile sürdürülebilirliğin tüm yönleri için 21 kritere göre sekiz alternatifin sıralanmasını içermektedir. Yeni yöntemin sonuçları ve doğrulanması kapsamlı bir duyarlılık analizi yoluyla gerçekleştirilmiştir. Kriterlerin ağırlık değerlerinin değiştiği 21 senaryo oluşturulmuş, 1'den 9'a kadar olan ölçüm skalası 1-5 aralığında değiştirilmiş, altı farklı ÇKKV yöntemiyle karşılaştırma yapılmıştır.

Mitra (2022) ise yaptığı çalışmada belirlenen kriterlere göre MARCOS yöntemini kullanarak pamuk dokuma seçim problemini ele almaktadır. Liu (2023) MOW (mixed objective weighting) yöntemini geliştirerek ve MARCOS yöntemini genişleterek (alternatiflerin ölçülmesi ve buna göre sıralama) yenilenebilir tuzdan arındırma alternatiflerini çok boyutlu değerlendirme ve veri belirsizliği perspektifinden değerlendirmek için çok kriterli bir karar verme çerçevesi önermiştir.

3. Materyal ve Yöntem

Belirsizlik ve kesin olmayan bilginin daha anlamlı ve güvenilir bir veri seti olarak oluşturulmasında bulanık sayılardan faydalanılır. CRITIC yöntemi kriterler

arasındaki ilişkiyi dikkate alarak daha gerçekçi ve objektif sonuçlar elde edilmesine imkân sağlar. MARCOS yöntemi ise kalitatif ve kantitatif kriterleri dikkate alarak alternatiflerin değerlendirilmesinde etkili, kapsamlı ve anlaşılır sonuçlar verir. Bu bölümde, çalışmada kullanılacak olan Pisagor bulanık sayılar ile bu sayılara dayanan ve ağırlıkları belirlemek üzere kullanılacak olan CRITIC yöntemi, alternatifleri sıralamada kullanılacak olan MARCOS yöntemi ve bu yöntemlere ait işlem adımları tanıtılacaktır.

3.1. Pisagor Bulanık Sayılar

Bulanık mantık belirsizliklerle baş edebilmek için geliştirilen ve temelde bir önermenin tamamen doğru veya yanlış olmadığını, bir dereceye kadar doğru veya yanlış olduğunu ifade etmektedir. Zadeh (1965) tarafından geliştirilen bulanık kümeler, klasik kümelerin bir uzantısı olarak önerilmiştir. Literatürde farklı bulanık kümeler ile karşılaşılmaktadır: aralık değerli bulanık kümeler, kararsız bulanık kümeler, sezgisel bulanık kümeler, nötrosofik bulanık kümeler, Pisagor bulanık kümeler gibi (Atalık ve Senturk, 2019).

Pisagor bulanık sayılar, bulanık mantıkta kullanılan bir tür bulanık sayıdır ve ismini Antik Yunan matematikçisi Pisagor'dan alır. Pisagor bulanık sayılar, bulanık kümelerin tanımlanmasında ve belirsizlikle başa çıkmada kullanılır. Bu sayılar mühendislik, yapay zekâ, denetim sistemleri ve karar verme gibi birçok alanda uygulama bulur. Özellikle belirsizlik içeren problemleri modellemek ve çözmek için yaygın olarak kullanılırlar. Pisagor bulanık sayıları, bulanık mantık tabanlı sistemlerde gelişmiş karar verme süreçlerinin tasarlanması ve uygulanması için önemli bir araç olarak kabul edilir (Zhang ve Wang, 2023).

$$D(Y_1, Y_2) = \sqrt{\frac{1}{2} \left[\left((\mu_{x_1})^2 - (\mu_{x_2})^2 \right)^2 + \left((v_{x_1})^2 - (v_{x_2})^2 \right)^2 + \left((\hbar_{x_1})^2 - (\hbar_{x_2})^2 \right)^2 \right]} \quad (7)$$

Burada \hbar_{x_i} tereddüt derecesini ifade eder ve Denklem (8) kullanılarak hesaplanır.

$$\hbar_{x_i} = \sqrt{1 - (\mu_{x_i})^2 - (v_{x_i})^2} \quad (8)$$

Bir Y_1 Pisagor bulanık sayısı için skor ve doğruluk fonksiyonları Denklem (9) ve Denklem (10)'daki gibi tanımlanmaktadır.

$$sco(Y_1) = (\mu_{x_1})^2 - (v_{x_1})^2, sco(Y_1) \in [-1, 1] \quad (9)$$

$$acc(Y_1) = (\mu_{x_1})^2 + (v_{x_1})^2, acc(Y_1) \in [0, 1] \quad (10)$$

Yager (2014) X sonlu kümesi için Y Pisagor bulanık sayısını Denklem (1) ile tanımlamaktadır.

$$Y = \{ \langle X_i, Y(\mu_Y(x_i), v_Y(x_i)) \rangle | x_i \in X \} \quad (1)$$

Burada $X \rightarrow [0, 1]$ aralığı için μ_Y ve v_Y sırasıyla üyelik ve üyelik olmama derecelerini gösterirken Denklem (2) koşulunu sağlarlar.

$$0 \leq (\mu_Y(x_i))^2 + (v_Y(x_i))^2 \leq 1 \quad (2)$$

Tanımlanan iki farklı Y_1 ve Y_2 gibi Pisagor bulanık sayısı için temel işlemler Denklem (3) ve Denklem (4)'teki gibi elde edilir.

$$Y_1 + Y_2 = \left(\sqrt{\mu_{x_1}^2 + \mu_{x_2}^2 - \mu_{x_1}^2 \mu_{x_2}^2}, v_{x_1} v_{x_2} \right) \quad (3)$$

$$Y_1 \otimes Y_2 = \left(\mu_{x_1} \mu_{x_2}, \sqrt{v_{x_1}^2 + v_{x_2}^2 - v_{x_1}^2 v_{x_2}^2} \right) \quad (4)$$

ρ , sıfırdan büyük bir sabit olarak tanımlandığında Denklem (5) ve Denklem (6) aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

$$\rho Y_1 = \left(\sqrt{1 - (1 - \mu_{x_1}^2)^\rho}, v_{x_1}^\rho \right) \quad (5)$$

$$Y_1^\rho = \left(\mu_{x_1}^\rho, \sqrt{1 - (1 - v_{x_1}^2)^\rho} \right) \quad (6)$$

İki farklı Pisagor bulanık sayısı için mesafe ölçüsü ise Denklem (7) yardımıyla hesaplanır.

3.2. CRITIC Yöntemi

CRITIC yöntemi Diakoulaki, Mavrotas ve Papayannakis (1995) tarafından geliştirilen ve standart sapma hesaplama temeline dayanan bir yöntemdir. Bu yöntemde kriterler arasındaki standart sapma ile kriterler arasındaki korelasyon da dikkate alınmaktadır. Karar vericiler tarafından yapılan değerlendirmelerde ortaya çıkan subjektifliği elimine edebilmede bu yöntem oldukça etkilidir (Ersoy, 2022).

Aşağıda Pisagor bulanık sayılar temeline dayanan CRITIC yöntemine ait işlem adımları verilmektedir (Wang ve diğ., 2024):

Adım 1. Tüm alternatiflerin tüm kriterlere göre değerlendirildiği ve Pisagor bulanık sayılara dayanan başlangıç karar matrisi Tablo 1'de verilen dilsel değişkenler kullanılarak oluşturulur. Daha sonra

Denklem (9) kullanılarak skor fonksiyonu (k_{ij}) hesaplanır.

Adım 2. Normalize edilmiş Pisagor bulanık sayılara dayanan karar matrisi Denklem (11)'deki gibi oluşturulur.

$$\widehat{k}_{ij} = \begin{cases} \frac{k_{ij}-k_j^-}{k_j^+-k_j^-}, j \in C_1 \\ \frac{k_j^+-k_{ij}}{k_j^+-k_j^-}, j \in C_2 \end{cases} \quad (11)$$

Burada C_1 fayda yönlü kriterleri, C_2 ise maliyet yönlü kriterleri ifade etmektedir. k_j^+ , k_{ij} değerleri içerisindeki en büyük skor değerini, k_j^- , k_{ij} değerleri içerisindeki en küçük skor değerini ifade etmektedir.

Tablo 1. Dilsel İfadelere Dayanan Pisagor Bulanık Sayılar

Dilsel İfadeler	Pisagor Bulanık Sayılar	
	μ	ν
Çok çok yüksek değerli (EHV)	0,95	0,20
Çok yüksek değerli (VHV)	0,85	0,35
Yüksek değerli (HV)	0,70	0,40
Ortalama üstü değerli (AAV)	0,65	0,45
Ortalama değerli (AV)	0,50	0,55
Ortalama altı değerli (BAV)	0,40	0,65
Düşük değerli (LV)	0,35	0,75
Çok düşük değerli (VLV)	0,25	0,85
Çok çok düşük değerli (ELV)	0,20	0,95

Adım 3. Her bir kritere ait standart sapma Denklem (12) kullanılarak hesaplanır.

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (\widehat{k}_{ij} - \bar{k}_j)^2}{m}} \quad (12)$$

Burada m alternatif sayısını ifade ederken, \bar{k}_j Denklem (13) kullanılarak hesaplanır.

$$\bar{k}_j = \sum_{i=1}^m \frac{\widehat{k}_{ij}}{m} \quad (13)$$

Adım 4. Kriter çiftleri arasındaki korelasyon katsayısı Denklem (14) ile hesaplanır.

$$r_{jj'} = \frac{\sum_{i=1}^m [(\widehat{k}_{ij} - \bar{k}_j)(\widehat{k}_{ij'} - \bar{k}_{j'})]}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (\widehat{k}_{ij} - \bar{k}_j)^2 \sum_{i=1}^m (\widehat{k}_{ij'} - \bar{k}_{j'})^2}}, j \text{ ve } j' = 1, \dots, n \quad (14)$$

Burada n kriter sayısını ifade eder.

Adım 5. Toplam bilgi (I_j) ise Denklem (15) kullanılarak hesaplanır.

$$I_j = \sigma_j \sum_{j'=1}^n (1 - r_{jj'}) \quad (15)$$

Adım 6. Objektif kriter ağırlıkları (w_j) Denklem (16) ile hesaplanır.

$$w_j = \frac{I_j}{\sum_{j=1}^n I_j} \quad (16)$$

3.3. MARCOS Yöntemi

MARCOS yöntemi sonlu alternatifler ve çatışan kriterler için uygun bir yöntemdir. Stević, Pamučar, Puška ve Chatterjee (2020) tarafından literatüre kazandırılan bu ÇKKV yönteminde en iyi alternatif ideal olana en yakın ve ideal olmayandan en uzak olan alternatif olarak tanımlanır. Bu yöntem çok sayıda alternatifin olduğu karmaşık problemlerde dahi basit çözüm algoritması sayesinde etkili bir çözüm sunan esnek bir yöntemdir (Ayçin ve Arsu, 2022).

Pisagor bulanık sayılara dayanan MARCOS yönteminin işlem adımları aşağıdaki gibi verilmektedir (Wang ve diğ., 2024).

Adım 1. Pisagor bulanık sayılara dayanan başlangıç karar matrisi aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$\check{Y} = [\check{y}_{ij}]_{m \times n} = \begin{matrix} A_1 & \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_n \\ y_{11}^{\check{}} & y_{12}^{\check{}} & \dots & y_{1n}^{\check{}} \\ y_{21}^{\check{}} & y_{22}^{\check{}} & \dots & y_{2n}^{\check{}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1}^{\check{}} & y_{m2}^{\check{}} & \dots & y_{mn}^{\check{}} \end{bmatrix} \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \end{matrix} \quad (17)$$

Adım 2. EEJ ve EJ çözüm değerleri \check{Y} matrisine ilave edilerek genişletilmiş Pisagor bulanık matrisi (L^F) aşağıdaki gibi oluşturulur. EEJ ve EJ sırasıyla ideal ve anti-ideal çözüm değerleri olup Denklem (18)-Denklem (20)'den yararlanılarak elde edilir.

$$L^F = \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \\ EEJ \\ EJ \end{matrix} \begin{bmatrix} c_1 & c_2 & \dots & c_n \\ y_{11}^{\check{}} & y_{12}^{\check{}} & \dots & y_{1n}^{\check{}} \\ y_{21}^{\check{}} & y_{22}^{\check{}} & \dots & y_{2n}^{\check{}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1}^{\check{}} & y_{m2}^{\check{}} & \dots & y_{mn}^{\check{}} \\ y_{ee1}^{\check{}} & y_{ee2}^{\check{}} & \dots & y_{een}^{\check{}} \\ y_{e1}^{\check{}} & y_{e2}^{\check{}} & \dots & y_{en}^{\check{}} \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\check{y}_{eej} = \begin{cases} \min_i \check{y}_{ij}, & \text{if } j \in C_B \\ \max_i \check{y}_{ij}, & \text{if } j \in C_{NB} \end{cases} \quad (19)$$

$$\check{y}_{ej} = \begin{cases} \max_i \check{y}_{ij}, & \text{if } j \in C_B \\ \min_i \check{y}_{ij}, & \text{if } j \in C_{NB} \end{cases} \quad (20)$$

Burada C_B ve C_{NB} fayda ve maliyet kriterler kümesini ifade etmektedir.

Adım 3. Daha sonra Pisagor bulanık karar matrisi normalize edilir.

$$\tilde{y}_{ij}^N = \begin{cases} \tilde{y}_{ij}, j \in C_B \\ (\tilde{y}_{ij})^c, j \in C_{NB} \end{cases} \quad (21)$$

Adım 4. Normalize edilen Pisagor bulanık karar matrisi kriter ağırlıkları kullanılarak ağırlıklandırılır.

$$\tilde{y}_{ij}^W = \tilde{y}_{ij}^N \times w_j = \left((\mu_{\tilde{y}_{ij}^N})^{w_j}, \sqrt{1 - (1 - \tilde{h}_{\tilde{y}_{ij}^N})^{2w_j}} \right) \quad (22)$$

Adım 5. Daha sonra alternatiflerin ideal ve anti ideal çözüme göre fayda dereceleri hesaplanır.

$$K_i^+ = \frac{S_i}{S_{ej}} \quad (23)$$

$$K_i^- = \frac{S_i}{S_{eej}} \quad (24)$$

Burada S_i değeri Denklem (25) kullanılarak hesaplanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n score(\tilde{y}_{ij}^W) \quad (25)$$

Adım 6. Alternatiflerin fayda fonksiyonları belirlenir.

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ - K_i^-}{1 + \frac{1-f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1-f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (26)$$

Burada $f(K_i^+)$ ve $f(K_i^-)$ sırasıyla ideal çözüme ve anti ideal çözüme göre fayda fonksiyonlarını ifade etmekte ve Denklem (27) ve Denklem (28) yardımıyla hesaplanmaktadır.

$$f(K_i^+) = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \quad (27)$$

$$f(K_i^-) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \quad (28)$$

Hesaplanan fayda fonksiyon değerlerine göre bütün alternatifler büyükten küçüğe doğru sıralanır. $f(K_i)$ değeri en yüksek olan ve birinci sırada yer alan alternatif en iyi alternatif olarak belirlenir.

4. Otonom Forklift Seçim Problemi

Bu bölümde piyasada ticari olarak satışı olan farklı marka ve modellere ait olan otonom forkliftler değerlendirilecektir. İlk olarak otonom forkliftlere ait değerlendirme kriterleri belirlenecek ve daha sonra CRITIC yöntemi ile bu kriterler ağırlıklandırılacaktır. Daha sonra belirlenen alternatifler bu kriterlere göre

MARCOS yöntemi kullanılarak sıralanacaktır. Tüm bu yöntemlerde Pisagor bulanık sayılardan yararlanılacaktır. Bulanık sayıların bir uzantısı olan ve geleneksel bulanık sayılara kıyasla yeni bir ayrıntı düzeyi içeren Pisagor bulanık sayılar belirsizlik ve kesin olmaya durumların daha karmaşık olarak temsil edilmesi için kullanılır. Pisagor bulanık sayılar ile belirsizlik daha iyi temsil edilerek kesin olmayan veriler daha iyi modellenir. Pisagor bulanık sayılar daha karmaşık üyelik derecelerini temsil edebilme özelliğine sahiptirler. Özetle Pisagor bulanık sayılar belirsizlik ve kesin olmayan durumlarla başa çıkmada daha ayrıntılı ve esnek bir yaklaşım sunabilme yeteneğine sahiptirler. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

4.1. Kriter ve Alternatiflerin Belirlenmesi

Literatür taraması ve otonom forkliftler hakkında yapılan incelemeler sonucunda değerlendirme kriterleri olarak; satın alma maliyeti (\$), maksimum kaldırma yüksekliği (mm), maksimum yük kaldırma kapasitesi (kg), yüklü iken maksimum hız (m/s), dönme yarıçapı (mm), forkliftin boyutları (uzunluk-genişlik-yükseklik) şarj süresi (dakika), çalışma süresi (saat) belirlenmiştir. Belirlenen kriterler Tablo 2'de açıklanmıştır. Piyasada ticari olarak mevcut olan çok sayıda otonom forklift bulunmaktadır. Bu çalışmada üretim hatlarında ve depolarda malzeme taşıma, kaldırma için kullanılan otonom palet istifleyici forkliftler değerlendirmeye alınacaktır. Bunlar içerisinde de özellikle elektrikle çalışan, maksimum beş tona kadar yük kaldıran ve taşıyabilenler alternatif olarak tercih edilmiştir. Alternatiflere ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir. Seçilen alternatiflerin her birinde sensörler, kameralar vb. gibi akıllı navigasyon sistemleri bulunduğundan değerlendirmede bir kriter olarak dikkate alınmamıştır.

4.2. Kriter Ağırlıklarının Belirlenmesi

Bu çalışmada, farklı firmalara ait 7 otonom forklift modeli alternatif olarak belirlenmiştir. Alternatiflerin değerlendirme kriterlerine göre performanslarını gösteren başlangıç karar matrisi Tablo 4'te verildiği gibidir. Alternatiflere ait teknik özellikler ve bilgiler, ürünlerin resmi internet sayfalarından ve satış danışmanlarından elde edilmiştir. Elde edilen veriler Tablo 1'de verilen dilsel değişkenler kullanılarak Pisagor bulanık sayılara dönüştürülmüştür. Pisagor bulanık sayılara dayanan CRITIC yöntemi kullanılarak kriter ağırlıkları belirlenmiştir.

Tablo 2. Değerlendirme Kriterleri ve Açıklamaları

Kriter Adı	Kriter Kodu	Açıklama
Satın alma maliyeti (\$)	C ₁	Ürüne ait birim satın alma maliyetini ifade etmektedir.
Maksimum kaldırma yüksekliği (mm)	C ₂	Maksimum kaldırma yüksekliği, bir otonom forkliftin belirli bir yükü ne kadar yükseğe kaldırabileceğini belirler. Bu özellik, depo yönetiminde verimlilik sağlamak ve yüksek yoğunluklu depolama sistemlerinde kullanımı optimize etmek için önemlidir.
Maksimum yük kaldırma kapasitesi (kg)	C ₃	Bir otonom forkliftin güvenli ve etkili bir şekilde taşıyabileceği maksimum ağırlığı belirler. Bu, depo operasyonlarında güvenlik sağlamak ve ağır yükleri verimli bir şekilde taşımak için önemlidir.
Maksimum hız (m/s)	C ₄	Bir otonom forkliftin bir saniyede alacağı yolu ifade eder. Otonom forkliftlerin maksimum hızı, depo içindeki taşıma işlemlerini hızlandırmak ve verimliliği artırmak için önemlidir.
Dönme yarıçapı (mm)	C ₅	Dönme yarıçapı, forkliftin arka tekerleklerinin sabit bir dönme merkezine (genellikle arka aksın ortası) göre döndüğü bir daireyi ifade eder. Daha küçük bir dönme yarıçapı, depo içindeki dar alanlarda çalışırken daha fazla manevra kabiliyeti sağlar ve işletme verimliliğini artırabilir.
Ebat (mmxmmxmm)	C ₆	Bir otonom forkliftin ebatları, uzunluğu, genişliği ve yüksekliği gibi özelliklerini tanımlar. Bu bilgiler, forkliftin belirli bir alan içinde kullanılabilirliğini ve manevra kabiliyetini belirlemek için önemlidir.
Şarj süresi (saat)	C ₇	Şarj süresi, bataryanın kullanılabilirliğini ve işletme verimliliğini etkileyebileceği için önemlidir. Bataryanın %10-%80 dolması için gerekli olan süreyi ifade eder.
Çalışma süresi (saat)	C ₈	Tam dolu bir batarya ile kesintisiz olarak çalışılabilen süreyi ifade eder. İşletme planlaması ve operasyonel verimlilik için önemlidir.

Tablo 3. Otonom Forklift Alternatifleri

Alternatif kodu	Açıklama
A ₁	Amerikan kökenli olan işletme, robotik ve otonom çözümler ile üretim ve depolama süreçlerine çözümler geliştirmektedir.
A ₂	Avusturya menşeli firma, müşterilerine lojistik süreçlerinin verimliliğini artırmaya yönelik çözümler geliştirmektedir.
A ₃	Dünyanın pek çok ülkesinde hizmet veren işletme, 1200'den fazla işbirlikçisi ile endüstriyel çözümler geliştirerek verimliliği arttırmaktadır.
A ₄	Yirmi yılı aşkın süredir geliştirdikleri sistemler ile üç farklı kıtada hizmet üretmektedirler.
A ₅	Türkiye'de faaliyet gösteren işletme 20 yılı aşkın süredir başarılı otomasyon projelerine imza atmışlardır.
A ₆	2020 yılında kurulan Çinli işletme otonom forkliftleri ile endüstrilere çözümler sunmaktadır.
A ₇	50 yılı aşkın süredir Kuzey Amerika'da faaliyetlerine devam eden işletme pek çok farklı sektörde başarılı projeler gerçekleştirmiştir.

Tablo 4. Başlangıç Karar Matrisi

	C ₁		C ₂		C ₃		C ₄		C ₅		C ₆		C ₇		C ₈	
	μ	ν	μ	ν	μ	ν	μ	ν	μ	ν	μ	ν	μ	ν	μ	ν
A ₁	0,40	0,65	0,70	0,40	0,35	0,75	0,95	0,20	0,70	0,40	0,25	0,85	0,70	0,40	0,95	0,20
A ₂	0,65	0,45	0,50	0,55	0,50	0,55	0,40	0,65	0,20	0,95	0,35	0,75	0,95	0,20	0,70	0,40
A ₃	0,50	0,55	0,25	0,85	0,95	0,20	0,65	0,45	0,65	0,45	0,50	0,55	0,95	0,20	0,40	0,65
A ₄	0,35	0,75	0,85	0,35	0,65	0,45	0,70	0,40	0,50	0,55	0,40	0,65	0,70	0,40	0,65	0,45
A ₅	0,85	0,35	0,20	0,95	0,50	0,55	0,50	0,55	0,25	0,85	0,95	0,20	0,25	0,85	0,35	0,75
A ₆	0,70	0,40	0,50	0,55	0,40	0,65	0,35	0,75	0,95	0,20	0,85	0,35	0,95	0,20	0,85	0,35
A ₇	0,25	0,85	0,95	0,20	0,85	0,35	0,95	0,20	0,65	0,45	0,70	0,40	0,85	0,35	0,70	0,40

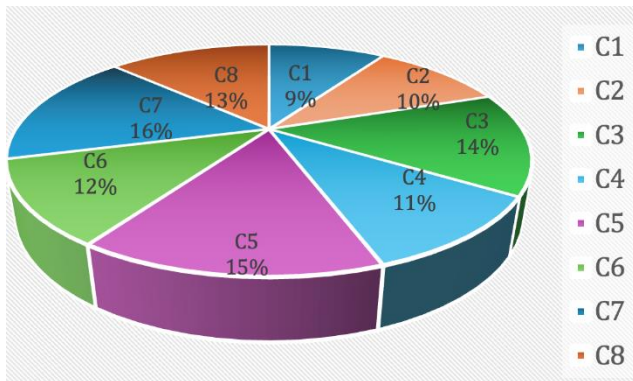
Başlangıç karar matrisinden Denklem (9) kullanılarak skor değerleri ve Denklem (11) kullanılarak normalize edilmiş matris elde edilir. Normalize edilmiş matris Tablo 5'te verildiği gibidir. Belirlenen kriterlerden satın

alma maliyeti, dönme yarıçapı, ürünün boyutları ve şarj süresi maliyet yönlü tanımlanırken, geriye kalan kriterler fayda yönlü olarak tanımlanmıştır.

Tablo 5. Normalize Edilmiş Karar Matrisi

\widehat{k}_{ij}	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
A ₁	0,6845	0,6913	0,0000	1,0000	0,3087	1,0000	0,3498	1,0000
A ₂	0,3016	0,4696	0,2975	0,1363	1,0000	0,8555	0,0000	0,5910
A ₃	0,5179	0,1174	1,0000	0,5067	0,3725	0,6010	0,0000	0,1360
A ₄	0,8254	0,8478	0,5067	0,5912	0,5304	0,7389	0,3498	0,5070
A ₅	0,0000	0,0000	0,2975	0,2975	0,8826	0,0000	1,0000	0,0000
A ₆	0,2143	0,4696	0,1363	0,0000	0,0000	0,1724	0,0000	0,7980
A ₇	1,0000	1,0000	0,7985	1,0000	0,3725	0,3498	0,1724	0,5910

Normalize karar matrisi elde edildikten sonra, her bir kritere ait standart sapma ve kriter çiftleri arasındaki korelasyon katsayısı sırasıyla Denklem (12) ve Denklem (14) kullanılarak elde edilmiştir. Daha sonra Denklem 15 kullanılarak Toplam bilgi (I_j) hesaplanmıştır. Denklem (16) kullanılarak objektif kriter ağırlıkları hesaplanmış ve sonuçlar Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kriter Ağırlıkları

Şekil 1 incelendiğinde şarj süresi (0,163) en önemli kriter olarak belirlenmiştir. Bir otonom forkliftin bataryasının bitip iş yapamaz hale gelmesi ve yeniden

bataryanın şarj edilmesi için geçen süre yapılacak olan işi etkileyeceğinden bu kriter önemli bir kriterdir. İkinci sırada ise dönme yarıçapı (0,148) gelmektedir. Otonom forklift ne kadar küçük bir dönme yarıçapına sahipse o kadar esnek ve hızlı hareket edecektir. Bu da operasyonların daha etkili ve verimli olarak yönetilmesine etki edecektir. Üçüncü sırada ise otonom forkliftin maksimum olarak kaldırabileceği yük miktarı (0,144) kriteri gelmektedir. Operasyon esnasında taşınabilecek maksimum yük miktarına bağlı olarak çalışma süresi değişecektir. Bu kriterler içerisinde en düşük ağırlık değerine sahip olan ürün satın alma maliyetidir. İşletmeler yoğun rekabet ve ileri teknolojik gelişmeler ile yenilikçi ve rekabetçi projelere yatırım yaparken maliyet kalemini göz ardı edebilmektedirler. Yapılan bu yatırım ile işletmeler daha fazla kazanç sağlayabilmektedirler.

4.3. Alternatiflerin Değerlendirilmesi

Bu bölümde çalışmaya konu olan farklı markalara ait yedi otonom forklift Pisagor bulanık sayılara dayanan MARCOS yöntemi kullanılarak değerlendirilmiş ve alternatif olan forkliftler sıralanmıştır. Probleme ait başlangıç karar matrisi Tablo 4'te verildiği gibidir.

Başlangıç karar matrisine ideal ve anti ideal çözüm değerleri ilave edilerek genişletilmiş Pisagor bulanık sayılara dayalı karar matrisi oluşturulur. Denklem (19) ve (20) kullanılarak ideal ve anti ideal çözüm kümeleri elde edilir. Denklem (21) kullanılarak hesaplanan normalize karar matrisi kriter ağırlıkları ile çarpılarak

(Denklem (22)) ağırlıklandırılmış normalize karar matrisi elde edilir. Denklem (23) ve (24) kullanılarak alternatiflerin ideal ve anti ideal çözüme göre fayda dereceleri hesaplanır. Daha sonra Denklem (26) kullanılarak fayda fonksiyonu hesaplanır. Sonuçlar Tablo 6'da verildiği gibidir.

Tablo 6. Alternatiflere ait Değerlendirme Sonuçları

Alternatifler	S_i	K_i^+	K_i^-	$F(K_i^+)$	$F(K_i^-)$	$F(K_i)$	Sıralama
A ₁	6,7189	1,0168	1,0110	0,4986	0,5014	0,0060	2
A ₂	6,4446	0,9753	0,9698	0,4986	0,5014	0,0053	4
A ₃	6,2414	0,9445	0,9392	0,4986	0,5014	0,0048	6
A ₄	6,6743	1,0101	1,0043	0,4986	0,5014	0,0058	3
A ₅	6,2858	0,9513	0,9459	0,4986	0,5014	0,0049	5
A ₆	5,9663	0,9029	0,8978	0,4986	0,5014	0,0042	7
A ₇	6,8696	1,0396	1,0337	0,4986	0,5014	0,0064	1

Tablo 6 incelendiği zaman hesaplanan fayda fonksiyon değerlerine göre bütün alternatifler büyükten küçüğe doğru sıralanmış ve ilk sırada A₇ alternatifinin olduğu tespit edilmiştir. Farklı sektörlerde ve farklı ürünlerle Kuzey Amerika'da faaliyet gösteren firmaya ait olan otonom forklift belirlenen kriterler ışığı altında en iyi alternatif olarak belirlenmiştir. Fayda fonksiyon değerlerine göre elde edilen sıralama A₇>A₁>A₄>A₂>A₅>A₃>A₆ şeklindedir.

4.4. Duyarlılık Analizi

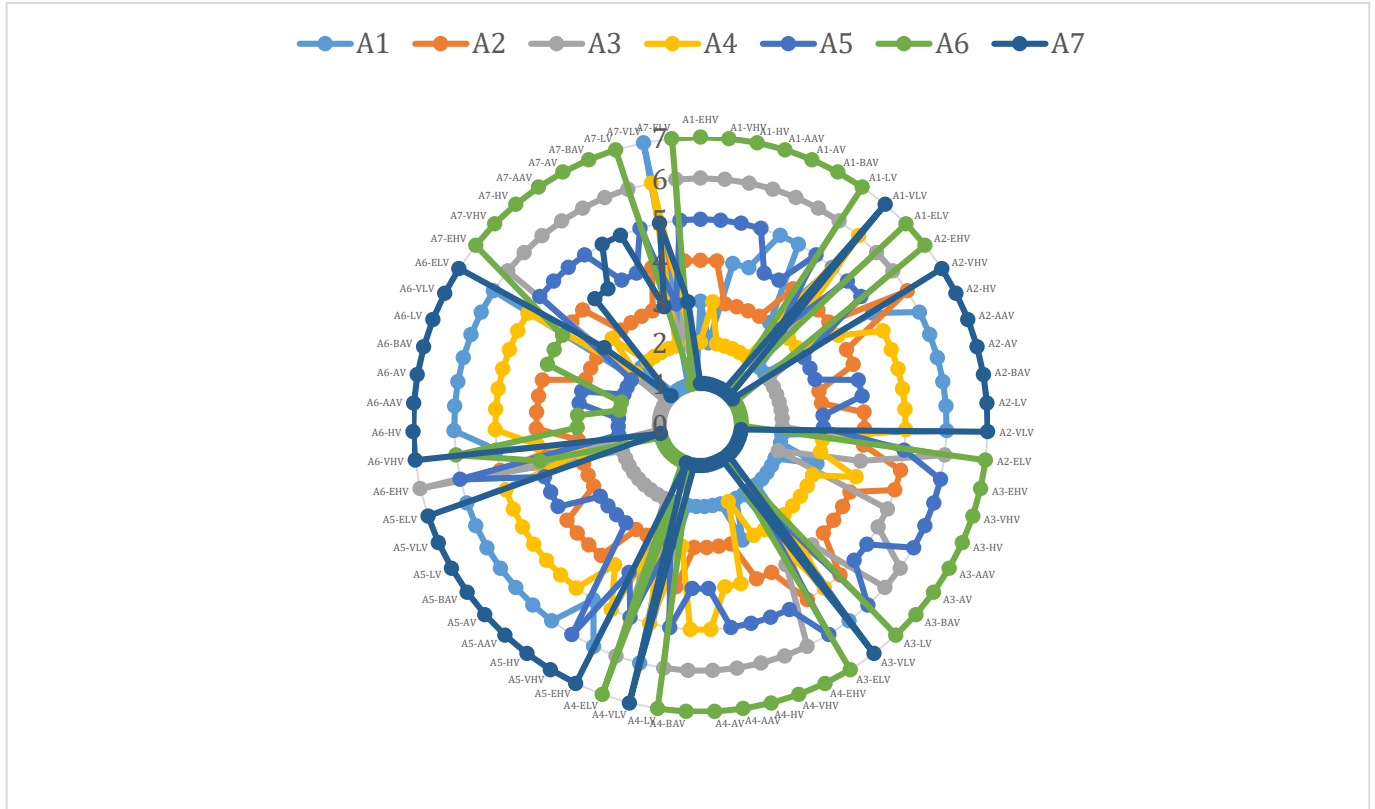
Duyarlılık analizi, parametrelerin değiştirilmesi ile çözümün nasıl etkileyeceğinin analizidir. Bu bağlamda, bu bölümde alternatiflerin her bir kriterle değerlendirme ölçekleri "çok çok yüksek değerli (EHV)" "çok çok düşük değerli (ELV)" kadar değiştirilmiş ve alternatiflerin sıralamalarında meydana gelen değişim Şekil 2'de verildiği gibi elde edilmiştir. Şekil 2 incelendiğinde normalde ilk sırada yer alan A₇ alternatifi, A₁ alternatifinin "EHV", "VHV", "HV", "AAV", "AV", "BAV", "LV", ve "ELV" değerleri alması durumunda; A₂ alternatifinin "ELV" ve "EHV" değerleri alması durumunda; A₃ alternatifinin "ELV", "LV", "BAV", "AV", "AAV", "HV", "VHV", "EHV" alması durumunda; A₄ alternatifinin ise "ELV", "LV", "BAV", "AV", "AAV", "HV", "VHV", "EHV" alması durumunda yine ilk sırada yer almıştır. İkinci sırada yer alan A₁ alternatifi yalnızca A₇ alternatifinin tüm kriterler için "HV", "AAV", "AV", "BAV", "LV" ve "ELV" değerleri için ilk sırada yer almış, onun dışındaki değerlendirmeler için en iyi ikinci sırada yer almak üzere farklı sıralamalar da elde edilmiştir. A₇ ve A₁ alternatiflerinin sıralamalarının aldıkları değerlere göre birbirini etkilediği görülmektedir.

4.5. Karşılaştırmalı Analiz

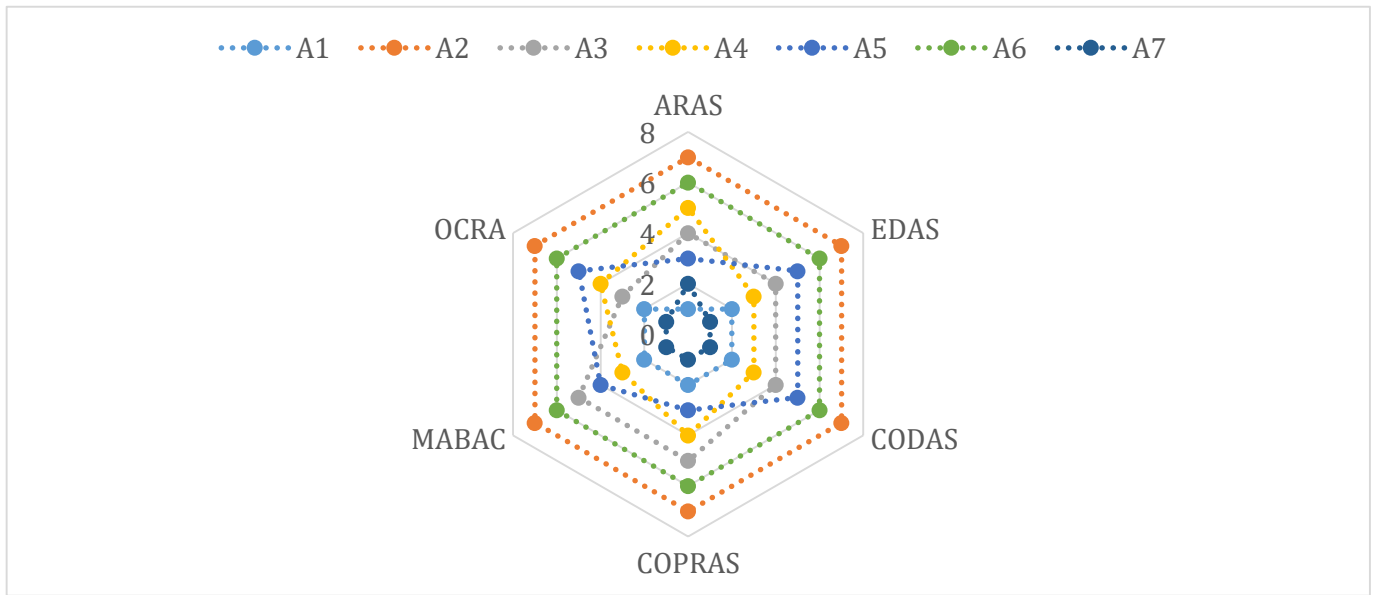
Aynı problem farklı ÇKKV yöntemleri ile de çözülmüş ve alternatif sıralamaları Şekil 3'te verildiği gibi elde edilmiştir. Problemden kullanılan farklı ÇKKV yöntemlerinin çözümü için Python programlama dili kullanılmıştır. Kullanım esnasındaki kolaylığı ve yüksek işlevselliği nedeniyle Python dili kullanılarak farklı ÇKKV yöntemleri için problemin çözümü yapılmıştır. Bu sayede problem kısa sürede farklı senaryolar ışığı altında kolaylıkla çözülebilmektedir. Karşılaştırmalı analiz için kullanılan yöntemlere ait özellikler Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Karşılaştırma Analizde Kullanılan Yöntemlerin Temel Özellikleri

Yöntem	Özellik
OCRA (Operational Competitiveness Rating)	İdeal çözüm ile benzerlik analizi temeline dayanır.
CODAS (COMbinative Distance-based ASsessment)	Uzlaşık çözümler sunma temeline dayanır.
COPRAS (Complex Proportional Assessment)	Orantılı değerlendirme yapma temeline dayanır.
EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution)	Ortalama çözüme olan mesafe temeline dayanır.
ARAS (AdditiveRatioASsessment))	Toplam oranları değerlendirme temeline dayanır.
MABAC (Multi-Attributive Border App- roximation Area Comparison))	Sınırların yaklaşıma göre karar verme temeline dayanır.



Şekil 2. Duyarlılık Analizi Sonuçları



Şekil 3. Farklı ÇKKV Yöntemlerine Göre Alternatiflerin Sıralanması

Tüm yöntemler için A₇ alternatifi ilk sırada yer alırken sadece ARAS (AdditiveRatioAssessment) yönteminde ikinci sırada yer almıştır. A₂ alternatifi ise tüm ÇKKV yöntemleri için hep en son sırada yer almıştır. A₁ alternatifi ise tüm yöntemler için ikinci sırada yer alırken sadece ARAS yönteminde ilk sırada yer almıştır. MARCOS yönteminde elde edilen sıralama ile diğer ÇKKV yöntemleri için Spearman's sıralama korelasyon katsayısı hesaplandığında, MARCOS-ARAS sıralamaları

için orta dereceli (0,57) ilişki tespit edilmişken, diğer tüm yöntemler ile MARCOS sıralaması arasında (>0,75) güçlü bir ilişki tespit edilmiştir. Her ÇKKV yönteminin işlem adımları, belirsizlik ve hata toleransları farklı olduğundan farklı sıralama sonuçları elde edilebilir. ARAS yönteminde alternatiflere ait fayda fonksiyonu optimum durumdaki alternatifin fayda fonksiyonu değeri ile kıyaslanmaktadır. Bu tür farklılıklar nedeniyle alternatif sıralamalarda bazı değişiklikler olabilir.

5. Sonuçlar

Gelişen teknoloji ve artan rekabet koşulları altında işletmeler tedarik zincirleri ve tüm operasyonlarının sürdürülebilirliği için yenilikçi yaklaşımları benimsemektedirler. Bu noktada işletmeler yatırım yapmaktan çekinmemektedirler. Bu yeni yaklaşımlar ile verimlilik artırılırken ayrıca işletmenin devamlılığını sağlanmaktadır. Tüm bu faaliyetler de çevreyi korumak için de çaba sarf edilmektedir.

İşletme içi ve depolarda yaygın olarak kullanılmaya başlayan otonom forkliftler de bu uygulamalara örnek olarak verilebilir. İşletmeler daha uzun soluklu, daha verimli ve efektif çalışma koşulları için bünyelerine bu uygulamaları dahil etmektedirler. Bu çalışmada, piyasada ticari olarak satışı mevcut olan, farklı üreticilere ait olan otonom forkliftlerin değerlendirilmesi ele alınmıştır. Bir işletme sahibi, otonom bir forklift almak istediğinde bu karar verme sürecinde nelere dikkat etmelidir ve en iyi olanı nasıl belirlemelidir sorularının yanıtını vermek üzere bu çalışma gerçekleştirilmiştir.

Tipik bir ÇKKV problemi kategorisinde yer alan bu problemde farklı üreticiler tarafından satışı olan yedi farklı otonom forklift belirlenen sekiz farklı kriter için değerlendirilmiştir. Bu sekiz farklı kriterin belirlenmesinde üreticilerin satış danışmanlarından ve literatürden faydalanılmıştır. Çalışılan problemdeki belirsizlik ve subjektifliğin üstesinden gelebilmek için ise bulanık mantık kullanılmıştır. Değerlendirme kriterleri olarak satın alma maliyeti, maksimum kaldırma yüksekliği, maksimum yük kaldırma kapasitesi, yüklü iken maksimum hız, dönme yarıçapı, forkliftin boyutları, şarj süresi, çalışma süresi belirlenmiştir. Kriter ağırlıklarının belirlenmesinde Pisagor bulanık sayılara dayanan CRITIC yöntemi kullanılmış ve sonuç olarak şarj süresi (0,163) en önemli kriter olarak belirlenmiştir. İkinci sırada ise dönme yarıçapı (0,148) ve üçüncü sırada ise otonom forkliftin maksimum olarak kaldırabileceği yük miktarı (0,144) kriteri gelmektedir. Literatürde yapılan çalışmalar ile kıyaslandığında otonom olmayan forkliftlerin seçiminde genellikle ürün maliyeti, kaldırma yüksekliği, yükleme kapasitesi, forklift hızı, motor gücü gibi kriterler seçim kriterleri olarak belirlenmiştir. Bu kriterlere göre yedi farklı alternatif için Pisagor bulanık sayılara dayanan MARCOS yöntemi kullanılmış ve Kuzey Amerika'da üretilen ve küresel ölçekte marka tanınırlığı olan A7 alternatifi en iyi otonom forklift olarak belirlenmiştir. Aynı problem farklı ÇKKV yöntemleri ile de çözüldüğünde benzer sonuçlar elde edilmiştir. Problemde farklı değerlendirme sonuçlarına göre çözümün nasıl değişeceğini göstermek üzere duyarlılık analizi yapılmış ve çoğunlukla A7 alternatifi en iyi alternatif olma özelliğini korumuştur.

Çalışma için karşılaşılan en büyük zorluk verinin toplanması sürecinde olmuştur. Piyasada mevcut farklı

üreticilere ait daha fazla sayıda otonom forkliftler mevcuttur. Ancak üreticiler ile sağlıklı iletişim kurulamamış ve istenilen bilgilere ulaşılamamıştır.

Gelecek dönemler için aynı problem daha fazla kriterler dikkate alınarak daha fazla sayıda alternatif için çalışılabilir. Otonom forkliftleri kullanmış ve deneyimlemiş tecrübeli kullanıcılar tarafından oluşturulan bir karar verici takım ile sadece ürüne ait teknik özellikler değil ayrıca kullanıma yönelik farklı kriterler de probleme dahil edilebilir. Örneğin forkliftlere ait geri ödeme süreci, garanti şartları, bakım maliyetleri gibi farklı kriterlerinde probleme ilave edilmesi daha sağlıklı olacaktır. Ayrıca farklı bulanık kümeler için de aynı problem çözülerek sonuçlar karşılaştırılabilir.

Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Elif ÇALOĞLU BÜYÜKSELÇUK, bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması, yazılması, görselleştirilmesi, tüm yöntemlerin uygulanması, makalenin sonuçlarının hazırlanması konularında katkı sağlamıştır.

Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

Kaynaklar

- Abdellatif, M., Shoeir, M., Talaat, O., Gabalah, M., Elbably, M., & Saleh, S. (2018). Design of an autonomous forklift using kinect, MATEC Web Conference, 1-5, Malezya. doi: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201815304005>
- Abuzied, H., Nazih, N., & Sahbel, A. (2024). Design and simulation of eco-friendly smartphone controlled forklift. Heliyon, 10, e30682. doi: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e30682>
- Ahmed, I., Jeon, G., & Piccialli, F. (2022). From artificial intelligence to explainable artificial intelligence in industry 4.0: A survey on what, how, and where. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 18(8), 5031-5042. doi: <https://doi.org/10.1109/TII.2022.3146552>
- Amio, F. F., Ahmed, N., Jeong, S., Jung, I., & Nam, K. (2024). Optimizing precision material handling: Elevating performance and safety through enhanced motion control in industrial forklifts. Electronics, 13(9), 1732. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics13091732>

- Atalık, G. & Senturk, S. (2019). A new ranking method for triangular intuitionistic fuzzy number based on gergonne point. *Nicel Bilimler Dergisi*, 1(1), 59-73. doi: <https://orcid.org/0000-0002-9503-7388>
- Ayçin, E. ve Arsu, T. (2022). Sosyal gelişme endeksine göre ülkelerin değerlendirilmesi: MEREC ve MARCOS yöntemleri ile bir uygulama. *İzmir Yönetim Dergisi*, 2(2), 75-88. doi: <https://doi.org/10.56203/iyd.1084310>
- Bhat, A., Kai, N., Suzuki, T., Shiroshima, T., & Yoshida, H. (2023). An advanced autonomous forklift based on a networked control system. *IFAC Papers Online*, 56(2), 11444-11449. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.432>
- Birkocak, D. T., Acar, E., Bakadur, A. Ç., Ütebay, B., & Özdağoğlu, A. (2023). An application of the MARCOS method within the framework of sustainability to determine the optimum recycled fibre-containing fabric. *Fibers and Polymers*, 24(7), 2595-2608. doi: <https://doi.org/10.1007/s12221-023-00197-6>
- Chen, Y., Zhong, J., Mumtaz, J., Zhou, S., & Zhu, L. (2023). An improved spider monkey optimization algorithm for multi-objective planning and scheduling problems of PCB assembly line. *Expert Systems with Applications*, 120600. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120600>
- Choi, M., Ahn, S., & Seo, J. O. (2020). VR-Based investigation of forklift operator situation awareness for preventing collision accidents. *Accident Analysis and Prevention*, 136, 105404. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105404>
- Demirci, A. ve Manavgat, G. (2021). Veri zarflama analizi, TOPSIS ve VIKOR teknikleriyle forklift aracı seçimi: Karma model önerisi. *Hacettepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(1). <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/1223229>
- Dey, B. K., Bhuniya, S., & Sarkar, B. (2021). Involvement of controllable lead time and variable demand for a smart manufacturing system under a supply chain management. *Expert Systems with Applications*, 184, 115464. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115464>
- Diakoulaki, D., Mavrotas, G., & Papayannakis, L. (1995). Determining objective weights in multiple criteria problems: The critic method. *Computers & Operations Research*, 22(7), 763-770. doi: [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(94\)00059-H](https://doi.org/10.1016/0305-0548(94)00059-H)
- Ersoy, N. (2022). Kriter ağırlıklandırma yöntemlerinin ÇKKV sonuçları üzerindeki etkisine yönelik gerçek bir hayat uygulaması. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 11(4), 1449-1463. doi: <https://doi.org/10.33206/mjss.1026666>
- Ertemel, A. V., Menekse, A., & Camgoz Akdag, H. (2023). Smartphone addiction assessment using Pythagorean fuzzy CRITIC-TOPSIS. *Sustainability*, 15(5), 3955. doi: <https://doi.org/10.3390/su15053955>
- Fazlollahtabar, H., Smailbašić, A., & Stević, Ž. (2019). FUCOM method in group decision-making: Selection of forklift in a warehouse. *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 2(1), 49-65. doi: <https://doi.org/10.31181/dmame1901065f>
- Görçün, Ö. F., Ulutaş, A., Topal, A., & Ecer, F. (2024). Telescopic forklift on through a novel interval-valued Fermatean fuzzy PIPRECIA-WISP approach. *Expert Systems with Applications*, 255, 124674. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124674>
- Gurralla, K. R., Helmy, M., & Ndiaye, M. (2022). Edible packaging selection employing hybrid CRITIC and TOPSIS method, 2022 International Conference On Decision Aid Sciences And Applications (DASA), 822-826, Tayland. doi: <https://doi.org/10.1109/DASA54658.2022.976501>
- Keleş, N. (2023). A multi-criteria decision-making framework based on the MEREC method for the comprehensive solution of forklift selection problem. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi İİBF Dergisi*, 18(2), 573-590. doi: <https://doi.org/10.17153/oguibf.1270016>
- Liaw, C. F., Hsu, W. C. J., & Lo, H. W. (2020). A hybrid MCDM model to evaluate and classify outsourcing providers in manufacturing. *Symmetry*, 12(12), 1962. doi: <https://doi.org/10.3390/sym12121962>
- Liu, Z. (2023). Selecting renewable desalination using uncertain data: an MCDM framework combining mixed objective weighting and interval MARCOS. *Water Supply*, 23(4), 1571-1586. doi: <https://doi.org/10.2166/ws.2023.049>
- Lopez, J., Zalama, E., & Gomez-Garcia-Bermejo, J. (2022). A simulation and control framework for AGV based transport systems. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 116, 102430. doi: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2021.102430>

- Market Research Future. (2024). Erişim adresi: https://www.marketresearchfuture.com/reports/autonomous-forklift-market-21410/?utm_term=&utm_campaign=&utm_source=adwords&utm_medium=ppc&hsa_acc=2893753364&hsa_cam=20993525697&hsa_grp=159373415435&hsa_ad=690148612733&hsa_src=g&hsa_tgt=dsa-2295322977996&hsa_kw=&hsa_mt=&hsa_net=adwords&hsa_ver=3&gad_source=1
- Mishra, A. R., Rani, P., Pamucar, D., & Saha, A. (2023). An integrated Pythagorean fuzzy fairly operator-based MARCOS method for solving the sustainable circular supplier selection problem. *Annals of Operations Research*, 1-42. doi: <https://doi.org/10.1007/s10479-023-05453-9>
- Mitra, A. (2022). Cotton fibre selection based on quality value using measurement of alternatives and ranking according to compromise solution (MARCOS) method. *Research Journal of Textile and Apparel*, 28(2), 299-316. doi: <https://doi.org/10.1108/RJTA-03-2022-0030>
- Mohammadpour, M., Kelouwani, S., Gaudreau, M. A., Zeghmi, L., Amamou, A., Bahmanabadi, H. ... Graba, M. (2024). Energy-efficient motion planning of an autonomous forklift using deep neural networks and kinetic model. *Expert Systems with Applications*, 237, 121623. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.121623>
- Pamučar, D. & Ćirović, G. (2015). The selection of transport and handling resources in logistics centers using multi-attributive. *Expert Systems with Applications*, 42(6), 3016-3028. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2014.11.057>
- Sarıçalı, G. ve Kundakçı, N. (2017). Forklift alternatiflerinin KEMIRA-M yöntemi ile değerlendirilmesi. *Optimum Ekonomi ve Yönetim Bilimleri Dergisi*, 4(1), 35-53. doi: <https://doi.org/10.17541/optimum.285053>
- Saxena, P., Kumar, V., & Ram, M. (2022). A novel CRITIC-TOPSIS approach for optimal selection of software reliability growth model (SRGM). *Quality and Reliability Engineering International*, 38(5), 2501-2520. doi: <https://doi.org/10.1002/qre.3087>
- Shete, R. G., Kakade, S. K., & Dhanvijay, M. (2021). A blind-spot assistance for forklift using ultrasonic sensor, 2021 IEEE International Conference on Technology, Research, and Innovation for Betterment of Society (TRIBES), 1-4, Hindistan. doi: <https://doi.org/10.1109/TRIBES52498.2021.9751672>
- Stević, Ž., Pamučar, D., Puška, A., & Chatterjee, P. (2020). Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COMPROMISE solution (MARCOS). *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106231. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106231>
- Toktaş Palut, P. ve Okçuoğlu, F. (2019). Depo tasarımı ve yerleşimi: Bir gerçek hayat uygulaması. *Beykent Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(2), 14-22. doi: <https://doi.org/10.20854/bujse.577992>
- Trung, D. D. (2022). Development of data normalization methods for multi-criteria decision making: applying for MARCOS method. *Manufacturing Review*, 9, 22. doi: <https://doi.org/10.1051/mfreview/2022019>
- Tuş, A. & Aytaç Adalı, E. (2019). The new combination with CRITIC and WASPAS methods for the time and attendance software selection problem. *Opsearch*, 56, 528-538. doi: <https://doi.org/10.1007/s12597-019-00371-6>
- Ulutaş, A., Karabasevic, D., Popovic, G., Stanujkic, D., Nguyen, P. T., & Karaköy, Ç. (2020). Development of a novel integrated CCSD-ITARA-MARCOS decision-making approach for stackers selection in a logistics system. *Mathematics*, 8(10), 1672. doi: <https://doi.org/10.3390/math8101672>
- Ulutaş, A., Topal, A., Karabasevic, D., & Balo, F. (2023). Selection of a forklift for a cargo company with fuzzy BWM and fuzzy MCRAT methods. *Axioms*, 12(5), 467. <https://doi.org/10.3390/axioms12050467>
- Vorasawad, K., Park, M., & Kim, C. (2023). Efficient navigation and motion control for autonomous forklifts in smart warehouses: LSPB trajectory planning and MPC implementation. *Machines*, 11(12), 1050. doi: <https://doi.org/10.3390/machines11121050>
- Wang, Y., Wang, W., Wang, Z., Deveci, M., Roy, S. K., & Kadry, S. (2024). Selection of sustainable food suppliers using the Pythagorean fuzzy CRITIC-MARCOS method. *Information Sciences*, 664, 120326. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2024.120326>
- Yager, R. R. (2014). Pythagorean membership grades in multicriteria decision-making. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22, 958-965. doi: <https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2013.2278989>
- Zadeh L. A. (1965). Fuzzy Sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353. doi: <https://doi.org/10.2307/2272014>

Zafar, S., Alamgir, Z., & Rehman, M. H. (2021). An effective blockchain evaluation system based on entropy-CRITIC weight method and MCDM techniques. *Peer-to-Peer Networking and Applications*, 14(5), 3110-3123. doi: <https://doi.org/10.1007/s12083-021-01173-8>

Zhang, D. & Wang, G. (2023). Geometric score function of Pythagorean fuzzy numbers determined by the reliable information region and its application to group decision-making. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 121, 105973. doi: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.105973>

Zhang, T., Li, H., Fang, Y., Luo, M., & Cao, K. (2023). Joint dispatching and cooperative trajectory planning for multiple autonomous forklifts in a warehouse: A search-and-learning-based approach. *Electronics*, 12(18), 3820. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics12183820>