



An integrated approach for transformer maintenance service of a production facility

Hande Belenköylü¹, Hacer Güner Gören^{2*}

¹Scania, İsveç

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Pamukkale University, 20160, Kınıklı, Denizli

Highlights:

- A new multi-criteria decision making approach
- Integrating Fuzzy FUCOM and Fuzzy MAIRCA
- A real life case study is conducted for transformer maintenance service problem

Keywords:

- Fuzzy FUCOM
- Fuzzy MAIRCA
- Multi-criteria decision making
- Supplier Selection

Article Info:

Research Article

Received: 28.03.2025

Accepted: 13.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1667616

Acknowledgement:

This article is derived from Hande Belenköylü's master's thesis study conducted in the Department of Industrial Engineering at Pamukkale University, Graduate School of Natural and Applied Sciences. We sincerely thank the employees of the company where the application was carried out for their data sharing and assistance

Correspondence:

Author: Hacer Güner Gören
e-mail: hgoren@pau.edu.tr
phone: +90 258 296 30 08

Graphical/Tabular Abstract

This study proposes a new integrated approach combining Fuzzy FUCOM and Fuzzy MAIRCA as given in Figure A for addressing the solution of the transformer maintenance service problem. First, the weights of criteria are determined using Fuzzy FUCOM and then the best alternative is chosen using Fuzzy MAIRCA. Finally, a sensitivity analysis is carried out to see the effects of changes on the weights of criteria.

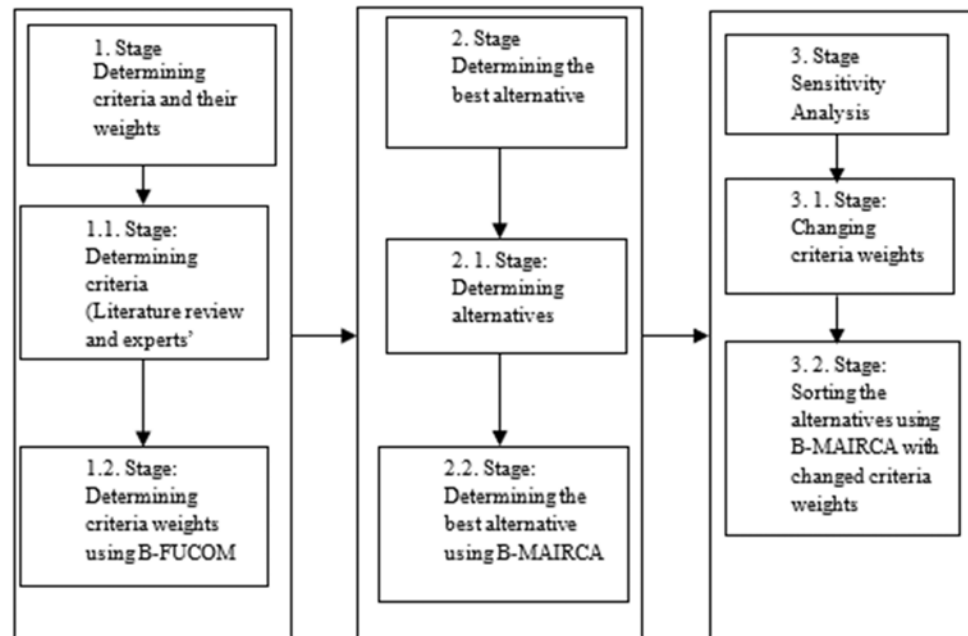


Figure A. The proposed approach

Purpose: In this study, a new multi-criteria decision making approach has been proposed. The proposed approach integrates Fuzzy FUCOM and Fuzzy MAIRCA methods for addressing the solution of the transformer maintenance service problem. This problem is a typical example of a supplier selection problem since the goal is to determine the best service supplier meeting the requirements of the firm under different criteria. From this perspective, up to our knowledge this study is the first using this integrated approach for the supplier selection problem for the first time in literature.

Theory and Methods: The proposed approach combines Fuzzy FUCOM and Fuzzy MAIRCA methods. The weights of criteria have been calculated using Fuzzy FUCOM where the alternatives have been evaluated using Fuzzy MAIRCA. Lastly, a sensitivity analysis has been carried out to see the effects of changes of criteria.

Results: According to the results obtained, the most important criterion is the experienced maintenance staff following due date and reporting.

Conclusion: The proposed approach helps decision makers to transform their subjective judgments into meaningful results utilizing two multi-criteria decision-making approaches. The proposed approach does not need too many comparisons and easy to implement to other multi criteria decision making problems.



Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi

Journal of The Faculty of Engineering
and Architecture of Gazi University

Elektronik / Online ISSN : 1304 - 4915
Basılı / Printed ISSN : 1300 - 1884

Bir üretim tesisinin trafo bakım hizmetine yönelik bütünleşik bir yaklaşım

Hande Belenköylü¹, Hacer Güner Gören^{2*}

¹Scania, İzveç

²Pamukkale Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, 20160, Kınıklı, Denizli, Türkiye

Ö N E Ç İ K A N L A R

- Yeni çok kriterli karar verme yaklaşımı
- Bulanık FUCOM ve Bulanık MAIRCA yöntemlerinin birleştirilmesi
- Trafo bakım hizmeti problemi için gerçek hayat vaka çalışması

Makale Bilgileri

Araştırma Makalesi

Geliş: 28.03.2025

Kabul: 13.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1667616

Anahtar Kelimeler:

Trafo bakım hizmeti,
çok kriterli karar verme,
bulanık FUCOM,
bulanık MAIRCA,
tedarikçi seçimi

ÖZ

Yoğun rekabet ortamında işletmelerin üretim devamlılığının sağlanması, büyük oranda makine ve ekipmanlarının sürekliliğine bağlıdır. Bu sebeple, bakım faaliyetleri bir işletme için kritik faaliyetler kapsamında yer alır. Bakım faaliyetleri için alınacak hizmetin işletme ihtiyaçlarını karşılayabilecek nitelikte olan tedarikçilerden alınması ve bu bağlamda uygun olanlarının performanslarını değerlendirmek koşuluyla uygun tedarikçiyi belirleme konusu büyük önem arz etmektedir. Tedarikçi seçimi, işletmelerin ihtiyaçları, çalışma koşulları, tecrübeleri ve faaliyet alanları göz önünde bulundurularak belirlenen kriterler ve alternatifler doğrultusunda en uygun alternatifin seçilmesi süreci olarak ifade edilebilir. Bu çalışmada, Denizli’de faaliyet gösteren bir işletmenin alacağı trafo bakım hizmeti problemi ele alınmış ve bütünleşik bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemde, kriter ağırlıklandırma Bulanık FUCOM (Tam Tutarlılık Yöntemi) ve alternatiflerin değerlendirilmesinde Bulanık MAIRCA (Çok Nitelikli İdeal-Gerçek Karşılaştırmalı Analiz) yöntemi kullanılmıştır. Sonuçların tutarlılığı için duyarlılık analizi yapılmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Her senaryoda beşinci tedarikçinin tutarlı sonuçlar verdiği ve hizmet alınabilecek en iyi alternatif olduğu; buna karşılık, üç ve dört numaralı tedarikçilerden ise hizmet alınmamasının uygun olacağı sonucu çıkmıştır.

An integrated approach for transformer maintenance service of a production facility

H I G H L I G H T S

- A new multi-criteria decision making approach
- Integrating Fuzzy FUCOM and Fuzzy MAIRCA
- A real life case study conducted for transformer maintenance service problem

Article Info

Research Article

Received: 28.03.2025

Accepted: 13.06.2025

DOI:

10.17341/gazimmfd.1667616

Keywords:

Transformer maintenance
service,
multi-criteria decision
making,
fuzzy FUCOM,
fuzzy MAIRCA,
supplier selection

ABSTRACT

In an intensely competitive environment, ensuring the continuity of production of enterprises largely depends on the continuity of their machinery and equipment. Therefore, maintenance activities are considered critical operations for a business. It is crucial to procure maintenance services from suppliers that can meet the business’s requirements, in this context to determine the most appropriate supplier by evaluating the performance of the eligible ones. Supplier selection can be expressed as the process of determining the most appropriate alternative based on criteria and alternatives determined by considering the requirements, working conditions, experience, and fields of activity. In this study, the problem of transformer maintenance service procurement of an enterprise operating in Denizli has been addressed and an integrated method has been proposed. In the proposed method, Fuzzy FUCOM (Full Consistency Method) is used in the weighting of criteria and Fuzzy MAIRCA (Multi-Attribute Ideal-Actual Comparative Analysis) method is used in the evaluation of alternatives. A sensitivity analysis is carried out to analyse the robustness of the results and compared. In each scenario, it can be concluded that the fifth supplier provides consistent results and the best alternative that the service can be taken; however, it will be appropriate not to take any service from suppliers numbered three and four.

1. Giriş (Introduction)

Küreselleşen dünyada hızla ilerleyen teknolojik gelişmeler, endüstriyel işletmelerin rekabet gücünü artırmak ve pazar paylarını korumak adına üretim süreçlerini sürekli iyileştirmesini zorunlu kullmaktadır. Özellikle geniş bir makine parkuruna sahip ve müşteri taleplerine hızla yanıt vermek durumunda olan işletmelerde, üretim kapasitesinin artırılmasıyla birlikte bakım faaliyetlerinin önemi de giderek artmaktadır. Sürekli üretimin gerçekleştiği tesislerde, makine ve ekipmanlar zaman içinde yıpranmakta ve bu durum, bakım ve onarım ihtiyacını kaçınılmaz hale getirmektedir. Plansız duruşlara neden olan arızalar, önlem alınmadığı takdirde üretim hattının tamamını etkileyerek ciddi kayıplara yol açabilir. Bu nedenle işletmeler, arızaları en aza indirmek ve üretimde sürekliliği sağlamak adına, bakım faaliyetlerini stratejik bir şekilde planlamalıdır. Bu bağlamda, optimal bakım politikalarının temel bileşeni olan planlı ve periyodik bakım uygulamaları kritik bir rol oynamaktadır. Aksi halde, makinelerde meydana gelebilecek beklenmedik duruşlar yalnızca üretimi değil; sipariş teslim sürelerini, lojistik süreçlerini ve işletme içindeki diğer bölümleri de olumsuz etkileyebilir. Bu tür riskleri en küçükleme ve bakım maliyetlerini kontrol altına almak için işletmelerin, planlı bakım süreçlerini benimsemesi ve etkin şekilde uygulaması gerekmektedir. Çoğu işletme, rutin bakım faaliyetlerini kendi ekipleri aracılığıyla yürütse de jeneratör ve trafo gibi kritik ekipmanların bakımı genellikle dış hizmet alımı yoluyla gerçekleştirilmektedir.

Bakım hizmetlerinin kalitesi, işletme için en uygun tedarikçinin seçilmesiyle doğrudan ilişkilidir. İşletme yöneticilerinin, bakım hizmeti için bir durum analizi yaparak çeşitli kriterler belirlemesiyle başlayan tedarikçi seçimi süreci, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri ile değerlendirilebilecek önemli bir karar problemidir. İşletmelerin karşı karşıya kaldığı en kritik kararlardan biri de belirsiz koşullar altında belirlenen kriterler doğrultusunda en uygun tedarikçiyi seçmektir. Tedarikçi seçimi, birçok farklı etkenin dikkate alınması gereken karmaşık bir süreç olduğu için işletmeler için stratejik öneme sahiptir. Bu süreçte, doğru ve uygun tedarikçinin belirlenmesi yalnızca maliyet açısından değil, aynı zamanda kalite, güvenilirlik ve sürdürülebilir iş birlikleri açısından da büyük önem taşır. Bu tür çok kriterli karar problemlerinde, bilimsel yöntemlerin kullanılması sürecin daha sistematik ve verimli bir şekilde yönetilmesini sağlar. Tedarik zincirinin en kritik aşamalarından biri olan tedarikçi seçiminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi, işletmelerin uzun vadeli başarısına doğrudan etki eder. Sürecin sağlıklı ilerleyebilmesi için, dikkate alınacak kriterlerin alanında uzman bir ekip tarafından belirlenmesi ve bilimsel analiz yöntemleriyle desteklenmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, işletme yetkililerinin tedarikçi seçim sürecini titizlikle yönetmesi, yalnızca işletmenin beklentilerini karşılamakla kalmaz, aynı zamanda sürecin daha verimli ve güvenilir olmasını sağlar. Doğru yöntemlerin uygulanması, işletmelere rekabet avantajı kazandırırken, uzun vadede güçlü ve sürdürülebilir tedarikçi ilişkileri kurulmasına da yardımcı olur. Tedarikçi seçimine verilen önem, yalnızca işletmenin ihtiyaçlarını karşılamakla kalmaz; aynı zamanda uzun vadede rekabet gücünü artırır ve işçilik ile malzeme maliyetlerinden bağımsız, güçlü bir iş ilişkisi kurulmasına zemin hazırlar. [3].

Bu çalışma, işletmelerde bakım servisi için tedarikçi seçimi problemine bütünlük bir yöntem önermektedir. Yöntemin temelini, son yıllarda bilimsel yazında yeni önerilen Bulanık FUCOM (B-FUCOM) ve Bulanık MAIRCA (B-MAIRCA) adlı iki farklı bulanık ÇKKV yöntemi oluşturmaktadır. Çalışmanın bilimsel yazına konu ve yöntem açısından önemli katkıları bulunmaktadır. İlk olarak, bu alandaki bilimsel yazına bakıldığında işletmelerde bakım konusunda

tedarikçi seçimine yönelik çalışmaların sayısının oldukça az olması konu açısından bu alana sunulan önemli bir katkıdır. İkinci olarak, bilimsel yazında trafo bakım hizmeti tedarikçi seçimi problemine yönelik B-FUCOM ve B-MAIRCA yöntemlerinin bütünlük olarak kullanıldığı hiçbir çalışmaya rastlanmaması yöntem açısından bu çalışmanın katkısı olarak belirtilebilir.

Giriş niteliğindeki bu bölümden sonra çalışma kapsamında ele alınan probleme ilişkin bilimsel yazın araştırmasına yer verilmiştir. Üçüncü bölümde ise önerilen yöntemde bahsedilmiştir. Dördüncü bölüm, önerilen yöntemle elde edilen sonuçları göstermektedir. Sonuç bölümünde elde edilenler özetlenmiş ve gelecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. Trafo Bakım Hizmeti Problemi (Transformer Maintenance Service Problem)

Tam adı transformatör olan trafonun Türkçe anlamı “dönüştürücü”dür. Trafolar elektrik enerjisinin niceliklerini istenilen değere dönüştürmekten sorumludur. Genellikle elektrik enerjisinin iletiminde ve dağıtımında kullanılır. Trafoların verimli şekilde uzun süre boyunca çalışması için periyodik bakımlarının yapılması gereklidir. Bakım faaliyetleri bu alanda uzman yetkililerce yapılmalıdır. Bakım faaliyetleri dikkatli planlanmalı ve tam zamanında uygulanmalıdır. Konuyla ilgili literatür çalışmalarına bakıldığında trafo bakım hizmeti problemi ile ilgili çok çalışmaya rastlanmamıştır. Mevcut çalışmalar incelendiğinde genellikle trafo seçimi [4] ve trafoların satın alınacağı tedarikçi seçimi [5,6] problemlerine yönelik olduğu görülebilir. Bu çalışma kapsamında ele alınan trafo bakım hizmeti problemi, aslında bu hizmeti sağlayan birimler arasında işletme ihtiyaçlarıyla en uyumlu olanı belirlemektir. Bu yönüyle, literatürde yer alan tedarikçi seçim problemine benzetilebilir. Tedarikçi seçim problemi, bir işletmenin değerlendirme kriterleri doğrultusunda ihtiyaçlarını karşılayabilecek uygun tedarikçileri belirleme süreci olarak ifade edilebilir [7]. Tedarikçi seçim problemi, işletme performansını önemli ölçüde etkilediği için literatürde en çok çalışılan problemlerin başında gelmektedir. Konuyla ilgili olarak literatür derleme çalışmalarına [8, 9] bakılabilir. Bu çalışma kapsamında ele alınan probleme yönelik önerilen çözüm yönteminde FUCOM ve MAIRCA yöntemleri kullanıldığı için bu yöntemlerin kullanıldığı çalışmalara odaklanılmıştır. Literatürde B-FUCOM yöntemi ile gerçekleştirilen çalışmaların sayısının oldukça sınırlı olduğu görülmektedir. Bu yöntemi kullanarak analizler yapan araştırmalardan biri, Pamucar ve Ecer [10] tarafından gerçekleştirilmiş olup, çalışmada yeşil tedarikçilerin değerlendirilmesi ele alınmıştır. Taşkent ve Delice [11] ise dekoratif taş sağlayan bir firmanın mevcut tedarikçilerini analiz etmek amacıyla B-FUCOM yöntemini kullanarak kriter ağırlıklarını belirlemiştir. Genel olarak incelendiğinde, FUCOM yönteminin çoğunlukla diğer ÇKKV yöntemleri ile bütünlük şeklinde kullanıldığı çalışmalara rastlanmaktadır. Örneğin, Pamucar vd. [12], B-FUCOM ve D’Bonferroni yöntemlerini bir araya getirerek İstanbul’un kentsel hareketlilik sistemi üzerine bir vaka çalışması yürütmüştür. Xu vd. [13], TOPSIS ve B-FUCOM yöntemlerini kullanarak portföy seçimi konusunda bir çalışma gerçekleştirmiştir. B-FUCOM’un farklı alanlarda kullanımı incelendiğinde, Simic vd. [14] tarafından yapılan çalışmada, iki şeritli yolların belirli bölümlerinin güvenlik seviyeleri belirlenirken karar vericilerin subjektif değerlendirmelerine ihtiyaç duymayan Criteria Importance Through Intercriteria Correlation (CRITIC), Veri Zarflama Analizi (VZA), B-FUCOM ve çok sayıda kriterin uzlaşma yoluyla değerlendirilmesine imkan sağlayan, basit ve esnek bir çözüm yöntemi olan Bulanık MARCOS (B-MARCOS) yöntemleri birlikte değerlendirilmiştir. Bir diğer araştırmada ise envanter sıralaması, B-

FUCOM ve Bulanık EDAS (B-EDAS) yöntemleriyle analiz edilmiştir [15]. Benzer şekilde, Pamucar ve ekibi [16], alternatif yakıtlı araçları değerlendirmek için B-FUCOM ve B-MARCOS yöntemlerinden faydalanmıştır. Son yıllarda gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde, FUCOM yönteminin farklı disiplinlerde başarıyla uygulandığı görülmektedir. Bunlar arasında internet sitesi tasarım kriterlerinin ağırlıklandırılması [17], sürdürülebilir kentsel hareketlilik planları kapsamında ulaşımın neden olduğu kirliliği azaltmaya yönelik politika belirleme çalışmaları [18], sağlık çalışanlarının uygulayacağı en verimli tedavinin seçilmesi [19] ve hastaneler için en uygun organizasyon yapısının belirlenmesi [20] gibi konular öne çıkmaktadır.

MAIRCA yöntemi ise 2014 yılında Pamucar tarafından geliştirilmiş olup, ideal ve deneysel oranlar arasındaki boşluğun hesaplanması prensibine dayanmaktadır. Esnek yapısı sayesinde farklı yöntemlerle entegre edilebilmesi ve basit bir matematiksel algoritmaya sahip olması, yöntemin avantajları arasında yer almaktadır. Bu avantajları kullanılarak bulanık sayılarla uyumlu hale getirilmiş ve B-MAIRCA yöntemi olarak literatüre kazandırılmıştır. [21]. B-MAIRCA yöntemi ile ilgili çalışmaların literatürde oldukça az olduğu söylenebilir. Bu çalışmalarda, MAIRCA modeli ve türevleri farklı alanlardaki karar verme süreçlerinde etkin bir şekilde kullanılmıştır. Pamucar vd. [22], su engellerini aşmak için ideal iniş operasyon noktası seçimi üzerine yaptıkları çalışmada, Aralık-Tip Bulanık Kaba Küme tabanlı MAIRCA modeli önermiştir. Adar ve Delice [23] ise medikal atık yönetiminde gerekli teknoloji seçimi için tereddütlü bulanık dilsel değerlendirme kriterli MAIRCA ve hibrit MAIRCA modeli geliştirmiştir. Gül ve Ak [24], risk değerlendirme problemini ele alarak Bulanık Analitik Hiyerarşi Süreci (B-AHS), B-MAIRCA ve Bulanık Hata Türü Etki Analizi (B-FMEA) yöntemlerini birleştiren bir model önermiştir. Benzer şekilde, Boral vd. [26], insan sağlığı ve çevre açısından mesleki risklerin değerlendirilmesi için B-MAIRCA ve karşılaştırmalar için daha az süreye ihtiyaç duyan ve AHS'ye göre daha tutarlı ve güvenilir sonuçlar üreten Bulanık Best-Worst Method (B-BWM) yöntemlerini bir araya getirmiştir. Pamucar ve ekibi [12], enerji depolama teknolojilerini önceliklendirmek amacıyla Dombi ağırlıklı geometrik ortalama tabanlı ve yamuksal nötrosofik bulanık sayılar ile entegre edilmiş bir MAIRCA modeli tasarlamıştır. Boral vd. [26] ise risk tabanlı sürdürülebilir üretim stratejilerini belirlemek için Aralıklı Tip-2 ve karar problemindeki elemanlar arasındaki sebep-sonuç ilişkilerini inceleyerek bu elemanlar arasındaki etkileşimleri ölçmeye yarayan The Decision Making Trial And Evaluation Laborator (DEMATEL) tabanlı bir B-MAIRCA modeli geliştirmiştir.

Öte yandan, Gül ve ekibi [24], Fine-Kinney tabanlı risk değerlendirmesi için B-BWM ve B-MAIRCA yöntemlerini birleştirmiştir. Ayadi vd. [27], sürdürülebilir lojistik platformu konum seçimi problemini çözmek için B-FUCOM, B-MAIRCA ve Bulanık The Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (B-PROMETHEE) yöntemlerini içeren bir model geliştirmiştir. Mestanza ve Bakhat [28], COVID-19 salgınının İspanyol turizmi üzerindeki etkilerini analiz ederek, aşırı turizmin yerel halk üzerindeki etkisini ölçmek için B-AHS ve B-MAIRCA yöntemlerini kullanmıştır. Bununla birlikte, Zhu ve ekibi [29], tasarım süreçlerinde biyolojik ilhamın değerlendirilmesi için bulanık kaba sayılar tabanlı DEMATEL-MAIRCA modelini önermiştir. Ecer vd. [30], endüstri 4.0 çağında yatırım kararları için kriptolojisi para birimlerinin değerlendirilmesini ele alarak Borda sayım tabanlı sezgisel bulanık küme uzantılarını EDAS-MAIRCA-MARCOS yöntemleriyle entegre eden bir model geliştirmiştir. Ecer [31], dünyada onaylanmış beş COVID aşısının değerlendirilmesi için sezgisel B-MAIRCA (IF-MAIRCA) yöntemini kullanmıştır. Bozanic vd. [32], savunma sistemlerinde optimal strateji seçim

sürecini iyileştirmek amacıyla sıralanmış kriterler arasındaki ilişki (DIBR) yöntemi ve bulanık sayılarla entegre edilmiş MAIRCA modeli önermiştir. Narayanamoorthy ve ekibi [33] ise LDHF (linear diophantine hesitant fuzzy sets)-SOWIA (Subjective objective integrated weighted approach)-MAIRCA yöntemleriyle sürdürülebilir enerji depolama sistemlerini değerlendiren bir bulanık karar verme modeli geliştirmiştir. Tedarikçi seçimi konusundaki çalışmalar incelendiğinde ise, Ecer [34], sürdürülebilir tedarikçi seçimi için FUCOM sübjektif ağırlıklandırma tabanlı MAIRCA yaklaşımını önermiştir. Wiecekovi vd. [35] ise pil tedarikçisi seçiminde, alternatifleri değerlendirmek için bulanık ortamda ARAS (Additive Ratio Assessment), EDAS, MAIRCA, TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) ve VIKOR (VlseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) yöntemlerini birleştiren bir model kullanmıştır.

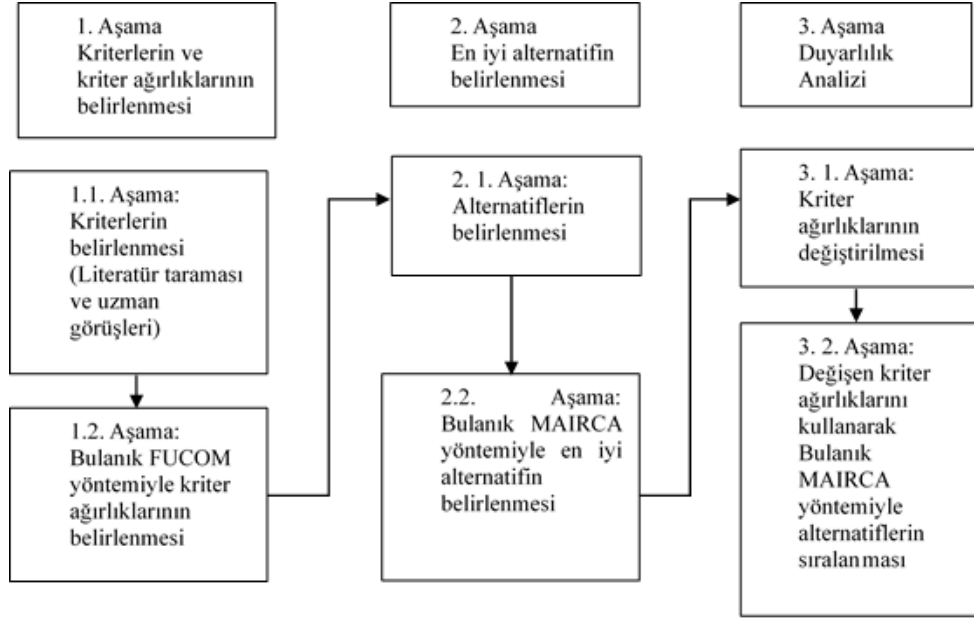
Bilimsel yazına bakıldığında B-FUCOM yönteminin diğer kriter ağırlıklandırma yöntemlerine göre daha tutarlı sonuçlar vermesi [36] ve daha az ikili karşılaştırmaya ihtiyaç duymasından sebeple bu çalışmada kriter ağırlıklarını belirlemede B-FUCOM yöntemi tercih edilmiştir. Alternatifleri sıralamada ise B-MAIRCA yönteminden faydalanılarak ele alınan probleme yönelik bütünlük bir yöntem önerilmiştir. B-MAIRCA yöntemi, karar vericinin kriterlerin niteliği (fayda veya maliyet yönlü) konusundaki tereddütlerini ortadan kaldırarak, karar sürecinde belirsizlikleri minimize etmesine ve daha güvenilir sonuçlar elde etmesine olanak tanımaktadır. [37]. Ayrıca ilgili bilimsel yazına bakıldığında trafo bakım hizmeti problemine yönelik çalışma sayısının az olması sebebiyle, çalışmanın bu açıdan literatüre önemli bir katkısı olduğu söylenebilir. Bir sonraki bölümde bu problem için önerilen yaklaşımın detayları verilmiştir.

3. Önerilen Yaklaşım (The Proposed Approach)

Çalışma kapsamında önerilen yaklaşım üç aşamadan oluşmaktadır (Bakınız Şekil 1). İlk aşamada, kriterlerin ve ağırlıklarının belirlenmesi gerekmektedir. Öncelikle probleme ilişkin kriterlerin belirlenmesi için uzman görüşleri ve literatür taramasından elde edilen bilgilerden yararlanılmıştır. Belirlenen kriterlerin ağırlıkları da B-FUCOM yöntemiyle elde edilmiştir. İkinci aşama, seçim problemi üzerine odaklanmaktadır. İlk olarak probleme özgü uygun alternatifler belirlenir ve en iyi alternatifin seçimi için B-MAIRCA yönteminden yararlanılır. Şekil 1'de de belirtildiği gibi üçüncü aşamada duyarlılık analizine yer verilmektedir. Kriter ağırlıklarının değiştirilmesiyle yapılan bu analiz ile kriter ağırlıklarının elde edilen sonuç üzerindeki etkisi araştırılmaktadır.

3.1. B-FUCOM (Fuzzy FUCOM)

FUCOM yöntemi, ÇKKV problemlerinde kriter ağırlıklarının belirlenmesinde kullanılmak üzere Pamucar vd. [38] tarafından geliştirilmiştir. FUCOM yöntemi, AHS ve BWM yöntemleriyle karşılaştırıldığında, daha az ikili karşılaştırmaya ihtiyaç duyması sebebiyle personel seçimi [39], kurumsal kaynak planlaması yazılımı seçimi [39], elektrikli araçların şarj istasyonlarının yer seçimi [39], kanalisasyon sistemlerinin sürdürülebilirlik açısından değerlendirilmesi [39] gibi farklı alanlarda çok fazla uygulama olanağı bulmuştur. Yöntem, doğrusal programlamaya dayanmakta ve iki önemli tutarlılık koşulunun sağlanmasını gerektirir [39]. Birinci koşul, kriter ağırlıklarının arasındaki oranların, ikili karşılaştırma matrisinde verilen önceliklere eşit olması; ikinci koşul ise matematiksel geçişlilik özelliği testidir. 2020 yılında Pamucar ve Ecer [10] tarafından B-FUCOM yöntemi olarak literatüre kazandırılmıştır. Yöntemin ilk aşamasında, karar vericiler tarafından belirlenen kriterler, öncelikle dilsel olarak değerlendirilir ve sonra ikili karşılaştırma ile bulanık sayılara dönüştürülür. Bu çalışmada, Tablo 1'de gösterilen bulanık dilsel ölçek kullanılmıştır.



Şekil 1. Önerilen yaklaşım (The proposed approach)

Tablo 1. Bulanık Dilsel Ölçek [40] (Fuzzy Linguistic Scale)

Dilsel Değişken	Üçgen Bulanık Sayı Karşılıkları
Eşit Önem	(1,1,1)
Daha az Önemli	(2/3,1,3/2)
Oldukça Önemli	(3/2,2,5/2)
Çok Önemli	(5/2,3,7/2)
Kuvvetli Önemli	(7/2,4,9/2)

B-FUCOM yönteminin aşamaları aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Aşama 1: Kriterlerin Belirlenmesi ve Sıralanması

Öncelikle, problemde ele alınacak kriterler ve varsa alt kriterler karar vericiler tarafından belirlenir. Kriter sıralamasında, en önemli olan kriter ilk sırada ve en az önemli olan n . sırada olma üzere Eş. 1’de görüldüğü gibi ifade edilir [41].

$$C_{j(1)} > C_{j(2)} > C_{j(3)} > \dots > C_{j(n)} \quad (1)$$

Aynı sıralamaya sahip kriterler olması durumunda, bunlar arasına ‘>’ yerine ‘=’ koyulur [42].

Aşama 2: Kriterlerin Karşılaştırılması

Sıralama işleminden sonra kriterlerin ardışık olarak karşılaştırmaları yapılır. Karşılaştırma işlemi, en önemli kriteri gösteren ilk sıradaki kriter dikkate alınarak yapılır. İlk kriterin kendisiyle karşılaştırılmasından elde edilen dilsel ölçek değeri ‘Eşit Önem’dir [36]. Tablo 1’de yer alan bulanık sayılar eşliğinde tüm kriterler için bulanık kriter anlamlılığını ifade eden $\tilde{w}_{C_{j(k)}}$ değerleri belirlenir ve Eş. 2 kullanılarak kriterlerin karşılaştırmalı önceliği hesaplanır. Hesaplanan karşılaştırmalı öncelik değerlerinden elde edilen karşılaştırmalı öncelik vektörü Eş. 3’te görülmektedir [10, 27].

$$\varphi_{\frac{k}{k+1}} = \frac{\tilde{w}_{C_{j(k+1)}}}{\tilde{w}_{C_{j(k)}}} = \left(\frac{\tilde{w}_{C_{j(k+1)}}^l, \tilde{w}_{C_{j(k+1)}}^m, \tilde{w}_{C_{j(k+1)}}^u}{\tilde{w}_{C_{j(k)}}^l, \tilde{w}_{C_{j(k)}}^m, \tilde{w}_{C_{j(k)}}^u} \right) \quad (2)$$

$$\Phi = \left(\varphi_{\frac{1}{2}}, \varphi_{\frac{2}{3}}, \dots, \varphi_{\frac{k}{k+1}} \right) \quad (3)$$

Aşama 3: Nihai Ağırlıkların Belirlenmesi

Kriterlerin bulanık ağırlık katsayılarının nihai değerleri $(w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)^T$ şeklinde gösterilir ve bu değerler aşağıda belirtilen iki şartı sağlamalıdır [10].

Şart 1: Kriterlerin ağırlık katsayılarının oranı karşılaştırmalı öncelikleri eşit olmalıdır. Eş. 4 yerine getirilerek bu koşul sağlanmış olur [39].

$$\frac{w_k}{w_{k+1}} = \varphi_{\frac{k}{k+1}} \quad (4)$$

Şart 2: Nihai kriter ağırlıkları, matematiksel geçişlilik özelliğini yani $\varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} = \varphi_{k/(k+2)}$ ve $\frac{w_k}{w_{k+1}} \otimes \frac{w_{k+1}}{w_{k+2}} = \frac{w_k}{w_{k+2}}$ eşitliklerini sağlamış olmalıdır (Eş. 5).

$$\frac{w_k}{w_{k+2}} = \varphi_{\frac{k}{k+1}} \otimes \varphi_{\frac{k+1}{k+2}} \quad (5)$$

Tam tutarlılık yani minimum $DFC(\chi)$ ’in sağlanabilmesi, yalnızca kriter ağırlıklarının geçişliliği tam karşılandığında mümkündür. Bu durumda, maksimum tutarlılığın ($\chi=0$) sağlanabilmesi için $\frac{w_k}{w_{k+1}} - \varphi_{k/(k+1)} = 0$ ve $\frac{w_k}{w_{k+2}} - \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} = 0$ olmalıdır yorumu yapılabilir. Bu koşulların sağlanması, $(w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)^T$ ağırlık katsayı değerlerinin, χ değerinin en aza indirilmesiyle beraber $\left| \frac{w_k}{w_{k+1}} - \varphi_{k/(k+1)} \right| \leq \chi$ ve $\left| \frac{w_k}{w_{k+2}} - \varphi_{k/(k+1)} \otimes \varphi_{(k+1)/(k+2)} \right| \leq \chi$ ’in beraber sağlanması ile mümkündür. Eş. (3.12)’de gösterilen doğrusal olmayan model ile kriterlerin ağırlık katsayılarının bulanık değerleri hesaplanır [10].

Burada $w_j = (w_j^l, w_j^m, w_j^u)$ ve $\varphi_{k/(k+1)} = (\varphi_{k/(k+1)}^l, \varphi_{k/(k+1)}^m, \varphi_{k/(k+1)}^u)$ dir.

min χ

$$\begin{cases} \left| \frac{w_k}{w_{k+1}} - \varphi_{\frac{k}{k+1}} \right| \leq \chi, & \forall j \\ \left| \frac{w_k}{w_{k+2}} - \varphi_{\frac{k}{k+1}} \otimes \varphi_{\frac{k+1}{k+2}} \right| \leq \chi, & \forall j \\ \sum_{j=1}^n w_j = 1, & \forall j \\ w_j^l \leq w_j^m \leq w_j^u \\ w_j^l \geq 0, & \forall j \\ j = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (6)$$

3.2. B-MAIRCA (Fuzzy MAIRCA)

MAIRCA yöntemi, ideal ve deneysel (ampirik) derecelendirmeler arasındaki farkları hesaplamaya dayanan bir karar verme tekniğidir. Gigovic vd. [45] tarafından 2016 yılında geliştirilen bu yöntem, alternatiflerin belirli kriterlere göre değerlendirilmesini sağlayarak karar verme sürecine sistematik bir yaklaşım sunar. Yöntemin temel prensibi, her kriter için oluşan farkların (boşlukların) toplanarak her bir alternatif için toplam boşluğun hesaplanmasıdır [45]. Alternatifler, elde edilen toplam boşluk değerlerine göre sıralanır ve en düşük toplam boşluğa sahip olan alternatif, en uygun seçenek olarak belirlenir [45]. MAIRCA yönteminin başlıca avantajları arasında, anlaşılır ve sade bir algoritma yapısına sahip olması ve kriterlerin fayda veya maliyet yönlü olması durumunda ek hesaplamalara ihtiyaç duymaması yer almaktadır [47]. Bu özellikleri sayesinde diğer ÇKKV yöntemleriyle kolayca bütünleştirilebilir ve iş güvenliği risklerinin değerlendirilmesi [48], İran'da bir bölgede su taşkınlarına duyarlılığın değerlendirilmesi [49], savunma sanayisinde farklı stratejilerin seçimi [50] gibi birbirinden oldukça değişik alanlardaki problemlere rahatlıkla uygulanabilir. Geçtiğimiz yıllarda, yöntem Borat vd. [51] tarafından geliştirilerek B-MAIRCA yöntemi adıyla bilimsel literatüre kazandırılmıştır. Bu versiyon, klasik MAIRCA yöntemini genişleterek daha kapsamlı analiz imkânı sunmaktadır.

B-MAIRCA yönteminin işlem aşamaları aşağıdaki gibi özetlenmiştir [26];

Aşama 1: n kriter sayısı, m alternatif sayısı ve k karar verici sayısını göstermek üzere, öncelikle karar vericiler sözel değerlendirmeler ile alternatifleri değerlendirir ve yapılan bu değerlendirmeler bulanık sayılara dönüştürülerek başlangıç dilsel değerlendirme matrisi (D_L) oluşturulur (Eş. 7).

$$D_L = \begin{pmatrix} L_{11}^1 & \dots L_{11}^k L_{12}^1 & \dots L_{12}^k \dots L_{1n}^1 & \dots L_{1n}^k \\ L_{21}^1 & \dots L_{21}^k L_{22}^1 & \dots L_{22}^k \dots L_{2n}^1 & \dots L_{2n}^k \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ L_{m1}^1 & \dots L_{m1}^k L_{m2}^1 & \dots L_{m2}^k \dots L_{mn}^1 & \dots L_{mn}^k \end{pmatrix} \quad (7)$$

Eş. 7'de gösterilen, L_{mn}^k terimi, m tane alternatifin n tane kriter kullanarak k sayıda karar verici tarafından yapılan dilsel değerlendirmeleri göstermektedir.

Aşama 2: Birinci adımda oluşturulan başlangıç dilsel değerlendirme matrisi (D_L), bulanık sayılardan oluşan Eş. 8'de verilen değerlendirme matrisine dönüştürülür.

$$\tilde{D}^1 = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11}^{(1)} & \tilde{A}_{12}^{(1)} & \dots & \tilde{A}_{1n}^{(1)} \\ \tilde{A}_{21}^{(1)} & \tilde{A}_{22}^{(1)} & \dots & \tilde{A}_{2n}^{(1)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{m1}^{(1)} & \tilde{A}_{m2}^{(1)} & \dots & \tilde{A}_{mn}^{(1)} \end{pmatrix}, \dots, \tilde{D}^k = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11}^{(k)} & \tilde{A}_{12}^{(k)} & \dots & \tilde{A}_{1n}^{(k)} \\ \tilde{A}_{21}^{(k)} & \tilde{A}_{22}^{(k)} & \dots & \tilde{A}_{2n}^{(k)} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{m1}^{(k)} & \tilde{A}_{m2}^{(k)} & \dots & \tilde{A}_{mn}^{(k)} \end{pmatrix} \quad (8)$$

Aşama 3: Bu adımda Eş. 9'da gösterilen bütünleşik karar matrisi oluşturulur.

$$\tilde{D} = \begin{pmatrix} \tilde{A}_{11} & \tilde{A}_{12} & \dots & \tilde{A}_{1n} \\ \tilde{A}_{21} & \tilde{A}_{22} & \dots & \tilde{A}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{A}_{m1} & \tilde{A}_{m2} & \dots & \tilde{A}_{mn} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Bu denklemde yer alan $\tilde{A}_{11}$, $\tilde{A}_{11} = \frac{\tilde{A}_{11}^{(1)} + \tilde{A}_{11}^{(2)} + \dots + \tilde{A}_{11}^{(k)}}{k}$ şeklinde hesaplanır.

Aşama 4: Karar vericinin bir alternatifin seçimi konusunda tarafsız olduğu anlamına gelen P_{A_i} alternatiflerinin seçimine göre tercihler tanımlanır. Yani herhangi bir alternatif eşit olasılıkla seçilebildiğinden, tercihler alternatiflerin her biri için Eş. 10'daki gibi ifade edilebilir.

$$P_{A_i} = \frac{1}{m}; \sum_{i=1}^m P_{A_i} = 1 \quad (10)$$

Aşama 5: Alternatiflere göre yapılan tercihler (P_{A_i}) ile tanımlanan ağırlıklar çarpılarak bulanık teorik değerlendirme matrisini gösteren $\tilde{T}_{PA}$ elde edilir (Eş. 11).

$$(\tilde{T}_{PA}) = \begin{pmatrix} \frac{1}{m} \tilde{w}_1 & \frac{1}{m} \tilde{w}_2 & \dots & \frac{1}{m} \tilde{w}_n \\ \frac{1}{m} \tilde{w}_1 & \frac{1}{m} \tilde{w}_2 & \dots & \frac{1}{m} \tilde{w}_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{m} \tilde{w}_1 & \frac{1}{m} \tilde{w}_2 & \dots & \frac{1}{m} \tilde{w}_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{t}_{p11} & \tilde{t}_{p12} & \dots & \tilde{t}_{p1n} \\ \tilde{t}_{p21} & \tilde{t}_{p22} & \dots & \tilde{t}_{p2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{t}_{pm1} & \tilde{t}_{pm2} & \dots & \tilde{t}_{pmn} \end{pmatrix} \quad (11)$$

Aşama 6: Bu adımda, zor hesaplamaların karmaşıklığını azaltmak ve sayısal gösterimin doğruluğunu arttırmak için, yeni tip normalizasyon tekniği kullanılır (Eş. 12, Eş. 13, Eş. 14).

$$n_{ij}^l = \frac{a_{ij}^l}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(a_{ij}^l)^2 + (a_{ij}^m)^2 + (a_{ij}^u)^2]}} \quad (12)$$

$$n_{ij}^m = \frac{a_{ij}^m}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(a_{ij}^l)^2 + (a_{ij}^m)^2 + (a_{ij}^u)^2]}} \quad (13)$$

$$n_{ij}^u = \frac{a_{ij}^u}{\sqrt{\sum_{i=1}^m [(a_{ij}^l)^2 + (a_{ij}^m)^2 + (a_{ij}^u)^2]}} \quad (14)$$

Aşama 7: Normalize karar matrisi öğeleri ile teorik hesaplama matris öğeleri çarpılarak, teorik hesaplama matrisi ($\tilde{T}_{rA}$) elde edilir (Eş. 15).

$$\tilde{T}_{rA} = \begin{pmatrix} \tilde{t}_{r11} & \tilde{t}_{r12} & \dots & \tilde{t}_{rn1} \\ \tilde{t}_{r21} & \tilde{t}_{r22} & \dots & \tilde{t}_{rn2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{t}_{rm1} & \tilde{t}_{rm2} & \dots & \tilde{t}_{rmn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \tilde{n}_{11} \otimes \tilde{t}_{p11} & \tilde{n}_{11} \otimes \tilde{t}_{p12} & \dots & \tilde{n}_{11} \otimes \tilde{t}_{pn1} \\ \tilde{n}_{21} \otimes \tilde{t}_{p21} & \tilde{n}_{21} \otimes \tilde{t}_{p22} & \dots & \tilde{n}_{21} \otimes \tilde{t}_{pn2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \tilde{n}_{m1} \otimes \tilde{t}_{pm1} & \tilde{n}_{m1} \otimes \tilde{t}_{pm2} & \dots & \tilde{n}_{m1} \otimes \tilde{t}_{pmn} \end{pmatrix} \quad (15)$$

Aşama 8: Sekizinci aşamada, her alternatifin fiili ve teorik değerlendirmesi arasındaki boşluk değeri kriter bazında hesaplanır ve toplam boşluk matrisi Eş. 16 kullanılarak hesaplanır:

$$g_{ij} = \sqrt{\frac{1}{3}[(\tilde{t}_{pij_l} - \tilde{t}_{rij_l})^2 + (\tilde{t}_{pij_m} - \tilde{t}_{rij_m})^2 + (\tilde{t}_{pij_u} - \tilde{t}_{rij_u})^2]} \quad (16)$$

Aşama 9: Son aşamada ise, tüm alternatiflerin boşluk değerleri toplanarak kriter fonksiyonlarının nihai değerleri Eş. 17 kullanılarak elde edilir. Bu işlem, her kriter bazında yapılır. Elde edilen değerlere göre sıralama yapılarak en düşük boşluk değerine sahip alternatifin, en iyi alternatif olduğu söylenir.

$$Q_i = \sum_{j=1}^n g_{ij}, i = 1, 2, \dots, m \quad (17)$$

4. Sayısal Sonuçlar (Numerical Results)

Önerilen yaklaşım, Denizli’de faaliyet gösteren, bakır tel üretimi yapan bir şirketin, alacağı trafo bakım hizmeti probleminde uygulanmıştır. Ele alınan işletmenin makine parkuru oldukça geniştir ve her yıl mevcut 16 adet güç trafosunun planlı ve periyodik bakımlarının yapılması büyük önem taşımaktadır. Bakım hizmeti alınacak olan tedarikçinin seçimi bu sebeple kritik bir karar olarak öne çıkmaktadır. Bu karar sürecine şirketin satın alma, enerji ve bakım bölümlerinde çalışan üst düzey yöneticilerinden oluşan uzman ekip yön vermiş ve bu uzman ekibin ortak görüşleri ile öncelikle kriterler belirlenmiştir. Seçilen uzmanların tümü Yüksek Gerilim (YG), trafo ve bakım alanında yeterli bilgi ve tecrübeye sahip uzman kişilerdir. Bu probleme, önerilen yaklaşım ile çözüm aranmıştır. Yöntemdeki, B-FUCOM yönteminde kriter ağırlıkları Lingo 18 programı, B-MAIRCA yöntem çözümleri ise Microsoft Excel programı kullanılarak elde edilmiştir.

4.1. Kriterlerin ve kriter ağırlıklarının belirlenmesi (Determining criteria and criteria weights)

Uzman ekip tarafından belirlenen kriterler aşağıda kısaca özetlenmiştir.

Tecrübeli teknik ekip (C1): Mevcut işletme tehlikeli sınıf grubunda değerlendirildiği için bakım hizmetini üstlenecek olan teknik personellerin kalifiye olması gerekmektedir.

İş Teslim Süresi (C2): Mevcut işletmede bakım faaliyetleri her sene yılbaşı tatili ve takip eden günlerde (1-3 gün) yapılmaktadır. Bu sebeple, bu faaliyetlerin çok kısa sürede tamamlanması ve sisteme tekrar enerji verilmesi gerekmektedir.

Tedarikçinin Güvenilirliği (C3): Tedarikçinin şartnamede belirtilen hususlara bağlı olacak şekilde bakım faaliyetlerini yerine getirmesi gerekmektedir.

Bakım Sonrası Destek (C4): Tedarikçilerin bakım faaliyetleri sonrasında oluşabilecek olan sorunlara dair destek hizmeti sunması beklenmektedir.

Ödeme Yöntemleri (C5): Bakım faaliyetleri bedeli için ödeme kolaylığının olması beklenmektedir.

Hizmet Bedeli (C6): Bakım faaliyetleri (işletme sınırları içinde bulunan 16 tane trafo ve OG hücrelerinin analiz ve testleri) için ödenen hizmet bedelidir.

Yılbaşı Tatilinde Çalışabilme Esnekliği (C7): İş teslim süresi kriterinde belirtildiği gibi bakım faaliyetleri işletmenin üretimini etkilememek adına yılbaşı öncesi ve onu takip eden günlerde yapılmaktadır. Bu sebeple, tedarikçi firmada görev alan teknik ekibin de belirtilen günlerde çalışması beklenmektedir.

Hizmet Sonrası Raporlama (C8): Bakım faaliyetleri sonrasında yapılan faaliyetlerinin sonuçlarının detaylı şekilde raporlanması ve işletmeye gönderilmesi istenmektedir.

Ekip tarafından belirlenen bu kriterler önem derecesine göre sıralanmış, sözel değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan bu sözel değerlendirmeler sonrasında Tablo 2’de gösterilen üçgen bulanık sayılara çevrilerek sayısallaştırılmıştır.

Uzmanlar tarafından belirlenen kriterlerin kişisel düşünce ve tecrübeleri doğrultusunda görüş birliği ile önem derecelerine göre en önemliden en az önemliye doğru yapılan sıralama Eş. 18’de verilmiştir.

$$C_1 > C_2 > C_7 > C_3 > C_8 > C_4 > C_6 > C_5 \quad (18)$$

Gösterilen sıralamadan görüldüğü üzere en önemli kriterin “Tecrübeli Teknik Ekip” kriteri olduğu görülmektedir. Kriter sıralamaları yapıldıktan sonra karşılaştırmalar yapılır. Bu karşılaştırma, en önemli kriterle göre yapılmaktadır. Kriterlerin önem dereceleri önce dilsel olarak ifade edilir sonra Tablo 2’deki üçgen bulanık sayılara dönüştürülür. Kriterlerin birbirleriyle ardışık karşılaştırılmasından sonra, bulanık kriter anlamlılığını ifade eden $\omega_{Cj(k)}$ değeri her bir kriter için hesaplanır.

Kriterlerin karşılaştırmalı önemine göre, karşılaştırmalı anlamlılık vektörü Eş. 3’e göre aşağıda gösterilen şekilde oluşturulur:

$$\Phi = \begin{pmatrix} (0,67; 1; 1,5), (1; 2; 3,75), (0,6; 1; 1,67), (0,6; 1; 1,67), \\ (1; 1,5; 2,33), (1; 1,33; 1,8), \\ (0,78; 1; 1,29) \end{pmatrix} \quad (19)$$

Kriter ağırlıklarının optimum değerleri, oluşturulan bulanık doğrusal model, maksimum tutarlılıktan sapma amacıyla çözülmüştür. Bulanık ağırlık katsayıları ($\tilde{w}_j$) Eş. 20’de verilmiştir.

$$\tilde{w}_j = \begin{pmatrix} 0,1144 & 0,2209 & 0,2209 \\ 0,1199 & 0,2155 & 0,2155 \\ 0,0410 & 0,1282 & 0,1315 \\ 0,0443 & 0,0952 & 0,0952 \\ 0,0589 & 0,1024 & 0,1068 \\ 0,0423 & 0,0853 & 0,0853 \\ 0,0465 & 0,1095 & 0,1095 \\ 0,0541 & 0,1367 & 0,1367 \end{pmatrix} \quad (20)$$

Daha sonra durulaştırma işlemi yapılmış ve net ağırlıklar Eş. 21’de verilen şekilde elde edilmiştir. Buna göre C_1 kriteri, “Tecrübeli Teknik Ekip” en önemli kriter olarak belirlenmiştir.

$$w_j = (0,2031; 0,1995; 0,1142; 0,0867; 0,0959; 0,0782; 0,0990; 0,1230) \quad (21)$$

Tablo 2. Kriterlerin Dilsel Değerlendirilmeleri ve Üçgen Bulanık Sayı Karşılıkları
(Linguistic Assessment of Criteria and Corresponding Triangular Fuzzy Numbers)

Kriterler	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
Dilsel Değişkenler	EÖ	DAÖ	OÖ	OÖ	OÖ	ÇÖ	KÖ	KÖ
Üçgen Bulanık Sayı	(1,1,1)	(2/3,1,3/2)	(3/2,2,5/2)	(3/2,2,5/2)	(3/2,2,5/2)	(5/2,3,7/2)	(7/2,4,9/2)	(7/2,4,9/2)

4.2. Alternatiflerin Değerlendirilmesi (Evaluating Alternatives)

Kriter ağırlıkları belirlendikten sonra, işletme bakım hizmetini üstenecek olan beş firmadan (A_1, A_2, A_3, A_4, A_5) teklif almıştır. Şirket, bu tedarikçilerden bazılarında daha önceden bakım hizmeti almıştır. Alternatiflerin karşılaştırılması için B-MAIRCA ile kullanılarak tedarikçi sıralaması yapılmıştır. Kriterler içinde C_6 dışındaki kriterler fayda kriteridir. C_6 kriteri ise maliyet kriteridir. Alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılan sözel değişkenler ve bunlara karşılık gelen üçgen bulanık sayılar Tablo 3'te sunulmuştur. Kriter bazında alternatiflerin değerlendirilmesinde kullanılan sözel değişkenler Tablo 4'te, bu değişkenlere karşılık gelen üçgen bulanık sayılar ise Tablo 5'te gösterilmiştir.

Tablo 3. Alternatiflerin Değerlendirilmesinde Kullanılan Sözel Değişkenler ve Üçgen Bulanık Sayı Karşılıkları [52]
(Linguistic Variables in Assessing Alternatives and their corresponding Triangular Fuzzy Numbers)

Sözel Değişkenler	Üçgen Bulanık Sayı Karşılıkları
Çok Düşük (ÇD)	(0;0;1)
Düşük (D)	(0;1;3)
Orta Düşük (OD)	(1;3;5)
Orta (O)	(3;5;7)
Orta Yüksek (OY)	(5;7;9)
Yüksek (Y)	(7;9;10)
Çok Yüksek (ÇY)	(9;10;11)

Tablo 4. Alternatiflerin Kriterlere Göre Sözel Değişkenler ile Değerlendirilmesi
(Assesing Alternatives based on Criteria using Linguistic Variables)

		Alternatifler				
		A1	A2	A3	A4	A5
Kriterler	C1	ÇY	Y	Y	Y	ÇY
	C2	ÇY	ÇY	Y	Y	Y
	C3	ÇY	ÇY	Y	ÇY	ÇY
	C4	OY	Y	OY	O	Y
	C5	OY	Y	OY	Y	Y
	C6	ÇY	ÇY	Y	Y	Y
	C7	OY	OY	Y	OY	Y
	C8	Y	OD	OY	OY	Y

Alternatiflerin her biri için tercihler Eşitlik (10) kullanılarak hesaplanır; beş tane alternatif olduğu için $P_{Ai} = 0,20$ 'dir. Bu tercih değerleri, kriter ağırlıkları ile çarpılarak teorik hesaplama matrisi oluşturulur. Elde edilen teorik hesaplama matrisinden normalize

edilmiş karar matrisi ve bulanık gerçek değer matrisi Eşitlik (14) kullanılarak Tablo 5 elde edilir. Tablo 6'da gösterilen kriter fonksiyonlarının nihai değerleri elde edilmiştir. MAIRCA yönteminde Q_i değerine yani en düşük boşluk değerine sahip olan alternatif en iyi alternatif olduğundan, alternatif sıralaması $A_5 > A_1 > A_3 > A_2 > A_4$ olarak elde edilmiş ve en iyi alternatifin A_5 alternatifi olduğu bulunmuştur.

4.3. Duyarlılık Analizi (Sensitivity Analysis)

Duyarlılık analizi, seçim veya sıralama temelli uygulamalarda alternatiflerin farklı senaryolar altında nasıl değiştiğini inceleyerek kapsamlı sonuçlar elde edilmesine olanak tanımaktadır. Kriterlerin değerlendirilmesi ve ağırlıklarının belirlenmesi, alternatiflerin sıralamasını önemli ölçüde etkilediğinden, farklı senaryolar altında ağırlıklardaki değişimler gözlemlenmelidir [53]. Bu çalışmada, kriterlerdeki değişkenliğin alternatiflerin sıralaması üzerindeki etkisini ortaya koymak amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde, kriterlerin değişkenlikleri hesaplanırken yalnızca ana kriterlerin ağırlık değerleri değiştirilmiş ve farklı senaryoların sonuçları üzerindeki etkisi incelenmiştir. Tablo 7'de gösterildiği üzere, duyarlılık analizi kapsamında kriter ağırlıkları 10 farklı senaryo için değerlendirilmiştir. Her bir senaryo için B- MAIRCA yöntemi kullanılarak hesaplamalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda alternatiflerin sıralaması belirlenmiştir. Böylece, farklı koşullar altında alternatiflerin nasıl bir değişim gösterdiği analiz edilerek daha güvenilir ve esnek bir karar süreci sağlanmıştır.

İlk sekiz senaryoda, sadece ilgili kriterin ağırlığı bir olup diğerleri sıfır olarak ele alınmıştır. Dokuzuncu senaryo ise kriter ağırlıklarının eşit olduğu durumu araştırmaktadır. Son senaryoda ise işletme için en önemli iki ana kriter olan "Tecrübeli teknik ekip" ve "İş teslim süresi" için ağırlıklar 0,5, diğer kriter ağırlıkları sıfır olarak alınmıştır.

B-MAIRCA yönteminde Tablo 7'deki kriter ağırlık değerleri on senaryo için uygulandığında elde edilen değerler, her bir senaryo ve her bir alternatif için Tablo 8'de verilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre oluşan alternatif sıralamaları Tablo 9'da görülmektedir.

B-MAIRCA yöntemi duyarlılık tablosunda (Tablo 9) gösterilen sıralamalar, alternatiflerin her duruma göre ne kadar iyi performans gösterdiğini yani o duruma karşı ne kadar duyarlı olduğunu göstermektedir. Sıralamalarda, beşinci alternatifin, yedi senaryoda bir puan geri kalanında iki puan almış olduğu görülmektedir. Bu durum, bu alternatifin değişkenliklere karşı daha az duyarlı ve en iyi tedarikçi

Tablo 5. Dilsel Değerlendirmelerin Üçgen Bulanık Sayı Karşılıklarına göre oluşturulan Karar Matrisi
(The Decision Matrix formed based on linguistic assessments using fuzzy triangular numbers)

	C1			C2			C3			C4			C5			C6			C7			C8		
A1	9	10	10	9	10	10	9	10	10	5	7	9	3	5	7	9	10	10	5	7	9	7	9	10
A2	7	9	10	9	10	10	9	10	10	7	9	10	7	9	10	9	10	10	5	7	9	1	3	5
A3	7	9	10	7	9	10	7	9	10	5	7	9	5	7	9	7	9	10	7	9	10	5	7	9
A4	7	9	10	7	9	10	9	10	10	3	5	7	7	9	10	7	9	10	5	7	9	5	7	9
A5	9	10	10	7	9	10	9	10	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10	7	9	10

Tablo 6. Nihai Değerler ve Sıralama (Final results and ranking)

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
A1	0,030	0,029	0,017	0,013	0,016	0,011	0,015	0,017
A2	0,031	0,029	0,017	0,012	0,014	0,011	0,015	0,022
A3	0,031	0,030	0,017	0,013	0,015	0,012	0,014	0,019
A4	0,031	0,030	0,017	0,014	0,014	0,012	0,015	0,019
A5	0,030	0,030	0,017	0,012	0,014	0,012	0,014	0,017

Tablo 7. Duyarlılık Analizi Sonuçları (Results of sensitivity analysis)

Kriterler	Kriter Ağırlıkları	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
Tecrübeli Teknik Ekip (C1)	0,203	1	0	0	0	0	0	0	0	0,125	0,5
İş Teslim Süresi (C2)	0,200	0	1	0	0	0	0	0	0	0,125	0,5
Tedarikçi Güvenilirliği (C3)	0,114	0	0	1	0	0	0	0	0	0,125	0
Bakım Sonrası Destek (C4)	0,087	0	0	0	1	0	0	0	0	0,125	0
Ödeme Yöntemleri (C5)	0,096	0	0	0	0	1	0	0	0	0,125	0
Hizmet Bedeli (C6)	0,078	0	0	0	0	0	1	0	0	0,125	0
Bakım Ekibinin Yılbaşında Çalışabilmesi(C7)	0,099	0	0	0	0	0	0	1	0	0,125	0
Hizmet Sonrası Raporlama (C8)	0,123	0	0	0	0	0	0	0	1	0,125	0

Tablo 8. Senaryolara göre B-MAIRCA ile elde edilen alternatif değerleri
(Values of alternatives obtained using F-MAIRCA according to scenarios)

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
A1	0,14539	0,14539	0,14748	0,15248	0,16752	0,14539	0,15434	0,13919	0,14964	0,14539
A2	0,15118	0,14539	0,14748	0,14091	0,14333	0,14539	0,15434	0,17922	0,15090	0,14828
A3	0,15118	0,15118	0,15304	0,15248	0,15442	0,15118	0,14324	0,15110	0,15098	0,15118
A4	0,15118	0,15118	0,14748	0,16614	0,14333	0,15118	0,15434	0,15110	0,15199	0,15118
A5	0,14539	0,15118	0,14748	0,14091	0,14333	0,15118	0,14324	0,13919	0,14524	0,14828

Tablo 9. Duyarlılık Analizine göre elde edilen alternatif sıralamaları (Ranking of alternatives based on sensitivity analysis)

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10
A1	1	1	1	2	3	1	2	1	2	1
A2	2	1	1	1	1	1	2	3	3	2
A3	2	2	2	2	2	2	1	2	4	3
A4	2	2	1	3	1	2	2	2	5	3
A5	1	2	1	1	1	2	1	1	1	2

konumunda olduğunu ifade etmektedir. Aynı bakış açısıyla, birinci ve ikinci alternatifler ise en iyi tedarikçinin ardından gelen tercih edilebilir tedarikçi firmalardır. Buna karşılık, üçüncü ve dördüncü tedarikçiler arasında büyük bir fark gözlemlenmemiş olup bu alternatiflerden hizmet alımı yapılmaması önerilebilir. Özetle, bu sıralamalar doğrultusunda beşinci, birinci ve ikinci tedarikçilerin hizmet alımı için tercih edilebilir tedarikçiler olduğu buna karşılık üçüncü ve dördüncü alternatiflerin ise çalışılmaması gereken tedarikçiler olduğu belirtilebilir.

5. Sonuçlar (Conclusions)

Bu çalışmada, bakır tel üretim sektöründe faaliyet gösteren bir işletmenin trafo bakım hizmeti tedarik problemi ele alınmış ve bu problem için bütünsel bir karar verme yöntemi önerilmiştir. Önerilen yaklaşım, iki farklı ÇKKV yönteminin entegrasyonuna dayanmaktadır. İlk aşamada, B-FUCOM yöntemi kullanılarak kriter ağırlıkları belirlenmiş, ardından B-MAIRCA yöntemi ile en uygun alternatif tedarikçi seçilmiştir. Ayrıca, farklı senaryolar altında alınabilecek kararların değerlendirilmesi amacıyla duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Literatür taraması sonucunda, işletmelerde bakım hizmetleri için tedarikçi seçimine yönelik çalışmaların sınırlı olduğu, özellikle B-FUCOM ve B-MAIRCA yöntemlerinin bütünsel olarak kullanıldığı herhangi bir çalışmaya rastlanmadığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, çalışmanın bilimsel yazına önemli bir katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

Bununla birlikte, bakım hizmetleri için tedarikçi seçimi problemi, farklı sektörlerdeki işletmelerin bakım kapsamı, beklentileri ve tesis koşulları dikkate alınarak farklı karar verme yöntemleriyle de ele alınabilir. Gelecek araştırmalarda, farklı ÇKKV yöntemleri entegre edilerek daha kapsamlı analizler yapılabilir veya mevcut yöntemler yeni tekniklerle birleştirilerek daha güçlü modeller oluşturulabilir. Önerilen yöntem pompa, motor veya jeneratör gibi farklı bakım

türlerine ya da farklı sektörlerle uyarlanabilecek özelliklere sahiptir. Bu sebeple, farklı bakım senaryolarında bu yöntem test edilebilir. Ayrıca, her işletmenin üretim ölçeği ve operasyonel dinamikleri farklılık gösterdiğinden, uygulamanın yapılacağı işletmeye yönelik yeni kriterler eklenerek daha geniş bir bakış açısı sunulabilir. Son olarak, bu çalışmada bütünsel olarak kullanılan yöntemlerin, yalnızca tedarikçi seçimi ile sınırlı kalmayıp, işletmelerde farklı ekipman veya personel seçimi problemlerine de uyarlanabileceği değerlendirilmektedir.

Teşekkür (Acknowledgement)

Bu makale Hande BELENKÖYLÜ'nün Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalında yapmış olduğu yüksek lisans tez çalışmasından üretilmiştir. Uygulamanın yapıldığı işletme çalışanlarına veri paylaşımı ve yardımlarından dolayı çok teşekkür ederiz.

Kaynaklar (References)

1. Demir H., H., İmalat sektöründe bulanık TOPSIS yöntemiyle tedarikçi seçimi, Yayınlanmış Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, 2010.
2. Dağdeviren M., Erarslan E., Supplier selection using promethee sequencing method, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 23 (1), 69-75, 2008.
3. Dağdeviren M., Erarslan E., Koç M., Dizdar, N. E., Tedarikçi Seçim Problemine Analitik Ağ Süreci ile Alternatif Bir Yaklaşım, Teknoloji, 8 (2), 115-122, 2005.
4. Khan M. Ahfaz, Sharma A. K., Transformer Condition Ranking Using Fuzzy AHP, International Journal of Electrical, Electronics and Computer Engineering, 7 (1), 35-41, 2018.
5. Dioka K., Transformer and Reactor Supplier Selection, Transformer and Reactor Procurement, Editör: Bastos G.M., Breckenridge T., Lamb M., MacArthur TL., Ryder S., CIGRE Green Books. Springer, İsviçre, 179-204, 2022.

6. Mungroo S., Implementing a World-Class Sourcing Process at Eskom with Specific Reference to the Supplier selection process for large transformers, Yüksek Lisans Tezi, KwaZulu-Natal Üniversitesi, Tedarik Zinciri Yönetimi Ticaret Yüksek Lisansı, Gauteng, Güney Afrika, 2005.
7. Bhutta K.S., Huq F., Supplier selection problem: a comparison of total cost of ownership and analytic hierarchy process approaches, Supply Chain Management, 7 (3), 126-135, 2002.
8. Junyi C., Ngai Eric W. T., Decision-making techniques in supplier selection: Recent accomplishments and what lies ahead, Expert Syst. Appl., 140, 2020.
9. Vanessa B. S., Luciana P. Barros C., Fernando S., Approaches for supporting sustainable supplier selection - A literature review, J. Cleaner Prod., 273, 2020.
10. Pamucar D., Ecer F., Prioritizing the weights of the evaluation criteria under fuzziness: The fuzzy full consistency method-FUCOM-F, Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering, 18 (3), 419-437, 2020.
11. Taşkent M. C., Kılıç Delice E., Bulanık FUCOM Metodu ile Tedarikçi Değerlendirme Kriterlerinin Ağırlıklarının Belirlenmesi, European Journal of Science and Technology, 28, 863-868, 2021.
12. Pamučar D., Deveci M., Canitez, F., Božanić D., A fuzzy Full Consistency Method-Dombi-Bonferroni model for prioritizing transportation demand management measures, Appl. Soft Comput. 87, 2020.
13. Xu D., Ren J., Dong L., Yang, Y., Portfolio selection of renewable energy-powered desalination systems with sustainability perspective: A novel MADM-based framework under data uncertainties, J. Cleaner Prod., 275, 124114, 2020.
14. Simi'c J. M., Stevi'c Ž., Zavadskas E. K., Bogdanovi'c V., Suboti'c M., Mardani A., A Novel CRITIC-Fuzzy FUCOM-DEA-Fuzzy MARCOS Model for Safety Evaluation of Road Sections Based on Geometric Parameters of Road, Symmetry, 12 (12), 2020.
15. Vukasović D., Gligović D., Terzić S., Stević Ž., Macura P., A Novel Fuzzy MCDM Model for Inventory Management in order to Increase Business Efficiency, Technological and Economic Development of Economy, 27 (2), 386-401, 2021.
16. Pamucar D., Ecer F., Deveci M., Assessment of Alternative Fuel Vehicles for Sustainable Road Transportation of United States Using Integrated Fuzzy FUCOM and Neutrosophic Fuzzy MARCOS Methodology, Sci. Total Environ., 788, 2021.
17. Atçı S. H., Atalay K. D., Web sitesi tasarım aşamasındaki kriterlerin önem derecelerinin GB-FUCOM ile belirlenmesi, Journal of Turkish Operations Management (JTOM), 6 (1), 1010-1027, 2022.
18. Demir G., Damjanović M., Matović B., Vujadinović R., Toward Sustainable Urban Mobility by Using Fuzzy-FUCOM and Fuzzy-CoCoSo Methods: The Case of the SUMP Podgorica. Sustainability, 14 (9), 1-27, 2022.
19. Saha A., Mishra A. R., Rani, P., Hezam I. M., Cavallaro F., A q-rung orthopair fuzzy FUCOM double normalization-based multi-aggregation method for healthcare waste treatment method selection, Sustainability, 14 (7), 4171, 2022.
20. Khosravi M., Haqbin A., Zare Z., Shojaei P., Selecting the most suitable organizational structure for hospitals: an integrated fuzzy FUCOM-MARCOS method, Cost Effectiveness and Resource Allocation, 20 (1), 1-16, 2022.
21. Boral S., Howard I., Chaturvedi S. K., McKee K., Naikan V. N. A., An integrated approach for fuzzy failure modes and effects analysis using fuzzy AHP and fuzzy MAIRCA, Eng. Fail. Anal., 108, 2020.
22. Pamučar D. S., Čirović G., Božanić D., Application of interval valued fuzzy-rough numbers in multi-criteria decision making: The IFRN-MAIRCA model, Yugoslav Journal of Operations Research, 29 (2), 221-247, 2019.
23. Adar T., Delice E. K., New integrated approaches based on MC-HFLTS for healthcare waste treatment technology selection, Journal of Enterprise Information Management, 32 (4), 688-711, 2019.
24. Gul M., Ak M. F., Assessment of occupational risks from human health and environmental perspectives: a new integrated approach and its application using fuzzy BWM and fuzzy MAIRCA, Stochastic Environ. Res. Risk Assess., 34 (8), 1231-1262, 2020.
25. Gul M., Mete S., Serin F., Celik E., Gul M., Mete S., Celik E., Fine-Kinney-based occupational risk assessment using fuzzy best and worst method (F-BWM) and fuzzy MAIRCA. Studies in Fuzziness and Soft Computing, 13-30, 2021.
26. Boral S., Howard I., Chaturvedi S. K., McKee K., Naikan V.N.A., A novel hybrid multi-criteria group decision making approach for failure mode and effect analysis: An essential requirement for sustainable manufacturing, Sustainable Prod. Consumption, 21, 14-32, 2020.
27. Ayadi H., Hamani N., Kermad L., Benaissa M., Novel fuzzy composite indicators for locating a logistics platform under sustainability perspectives, Sustainability, 13 (7), 2021.
28. Mestanza J.G., Bakhat R., A Fuzzy AHP-MAIRCA Model for Overtourism Assessment: The Case of Malaga Province, Sustainability, 13 (11), 2021.
29. Zhu G. N., Ma J., Hu J., Evaluating biological inspiration for biologically inspired design: An integrated DEMATEL-MAIRCA based on fuzzy rough numbers, Int. J. Intell. Syst., 36 (10), 6032-6065, 2021.
30. Ecer F., Böyükaslan A., Zolfani S. H., Evaluation of cryptocurrencies for investment decisions in the era of Industry 4.0: A borda count-based intuitionistic fuzzy set extensions EDAS-MAIRCA-MARCOS multi-criteria methodology, Axioms, 11 (8), 2022.
31. Ecer F., An extended MAIRCA method using intuitionistic fuzzy sets for coronavirus vaccine selection in the age of COVID-19, Neural Comput. Appl., 34 (7), 5603-5623, 2022.
32. Božanić D., Tešić D., Puška A., Štilić A., Muhsen Y.R., Ranking Challenges, Risks and Threats Using Fuzzy Inference System, Decision Making: Applications in Management and Engineering, 6 (2), 933-947, 2023.
33. Narayanamoorthy S., Brainy J. V., Shalwala R. A., Alsenani T. R., Ahmadian A., Kang D., An enhanced fuzzy decision making approach for the assessment of sustainable energy storage systems, Sustainable Energy, Grids Networks, 33, 2023.
34. Ecer F., Sürdürülebilir tedarikçi seçimi: FUCOM subjektif ağırlıklandırma yöntemi temelli Mairca yaklaşımı. Journal of Mehmet Akif Ersoy University Economics and Administrative Sciences Faculty, 8 (1), 26-48, 2021.
35. Więckowski J., Kizielewicz B., Shekhovtsov A., Sałabun W., How do the criteria affect sustainable supplier evaluation: A case study using multi-criteria decision analysis methods in a fuzzy environment, Journal of Engineering Management and Systems Engineering, 2 (1), 37-52, 2023.
36. Peker B.N., Görener A., Tesis Yeri Seçiminde Kriterlerin Önem Ağırlıklarının Bulanık FUCOM Yöntemiyle, İstanbul Ticaret Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, 21 (45), 1512-1536, 2022.
37. Supçiller A.A., Öktem T., Bir kablo firması için bulanık CRITIC ve bulanık MAIRCA ile ekstrüder hattı seçimi, Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 29 (8), 833-841, 2023.
38. Pamucar D., Željko S., Siniša S., A New Model for Determining Weight Coefficients of Criteria in MCDM Models: Full Consistency Method (FUCOM), Symmetry, 10, 393, 2018.
39. Tešić D., Delibašić B., Božanić D., Lojić R., Pamučar D., Balassa B. E., Application of the FUCOM-FUZZY MAIRCA Model in Human Resource Management, Acta Polytechnica Hungarica, 20 (3), 2023.
40. Şahin Y., Karagül K., FUCOM ve COPRAS Yöntemleriyle ERP Yazılımı Seçimi, 4th International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences, Konya, Türkiye, 785-791, 10-13 Kasım 2022.
41. Gökler S. H., Optimal site selection for electric vehicle charging stations: Analysis with hybrid FUCOM and geographic information systems, Energy, (30), 2024.
42. Tang C., Xu D., Chen N. Sustainability prioritization of sewage sludge to energy scenarios with hybrid-data consideration: a fuzzy decision-making framework based on full consistency method and fusion ranking model, Environ Sci and Pollut Res, 28, 5548-5565, 2021.
43. Gölcük İ., Durmaz Duygu E., Şahin R., Prioritizing occupational safety risks with fuzzy FUCOM and fuzzy graph theory-matrix approach, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 38 (1), 57-69, 2023.
44. Guo S., Zhao H., Fuzzy best-worst multi-criteria decision-making method and its applications, Knowledge-Based Syst., 121, 23-31, 2017.
45. Gigović L., Pamučar, Bajić D., Milićević M., The combination of expert judgment and GIS-MAIRCA analysis for the selection of sites for ammunition depots, Sustainability, 8 (4), 1-30, 2016.
46. Pamucar D., Gigovic L., Bajic Z., Janosevic M., Location selection for wind farms using GIS multi-criteria hybrid model: an approach based on fuzzy and rough numbers, Sustainability, 9 (8), 1315, 2017.

47. Badi I., Ballem M., Supplier selection using the rough BWM-MAIRCA model: A case study in pharmaceutical supplying in Libya, *Decision Making: Applications in Management and Engineering*, 1 (2), 16-33, 2018
48. Gül M., Ak M. F., Assessment of occupational risks from human health and environmental perspectives: a new integrated approach and its application using fuzzy BWM and fuzzy MAIRCA, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 34, 1231-1262, 2020.
49. Hadiana S., Tabarestania E. S., Pham Q. B., Multi attributive ideal-real comparative analysis (MAIRCA) method for evaluating flood susceptibility in a temperate Mediterranean climate, *Hydrological Sciences Journal*, 67 (3), 401-418, 2022.
50. Tešić D., Božanić D., Stojković D., Puška A., Stojanović I., DIBR–DOMBI–FUZZY MAIRCA Model for Strategy Selection in the System of Defense, *Discrete Dynamics in Nature and Society*, 2023, <https://doi.org/10.1155/2023/4961972>.
51. Boral, S., Howard, I., Chaturvedi, S. K., McKee, K., Naikan, V. N. A., An Integrated Approach for Fuzzy Failure Modes and Effects Analysis Using Fuzzy AHP and Fuzzy MAIRCA. *Engineering Failure Analysis*, 108, 2020.
52. Chen C.T., Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment, *Fuzzy Sets and Syst.*, 114 (1), 1–9, 2000.
53. Lee H. C., Chang C., Comparative Analysis of MCDM Methods for Ranking Renewable Energy Sources in Taiwan, *Renewable and Sustainable Energy Rev*, 883–896, 2018.

