



POLİTEKNİK DERGİSİ

JOURNAL of POLYTECHNIC

ISSN: 1302-0900 (PRINT), ISSN: 2147-9429 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.org.tr/politeknik>



Endüstriyel sektörlerden kaynaklanan atıkların sürdürülebilirlik açısından geri dönüşüme katkısının araştırılması: Bulanık MCDM tabanlı bir yaklaşım

Investigating the contribution of waste from industrial sectors to recycling in terms of sustainability: A fuzzy MCDM based approach

Yazar(lar) (Author(s)): Mesliha GEZEN UÇAR

ORCID: 0000-0002-6034-2227

To cite to this article: Gezen Uçar M., “Endüstriyel Sektörlerden Kaynaklanan Atıkların Sürdürülebilirlik Açısından Geri Dönüşüme Katkısının Araştırılması: Bulanık MCDM Tabanlı Bir Yaklaşım”, *Journal of Polytechnic*, 29(3):290310:1-16 (2026).

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz: Gezen Uçar M., “Endüstriyel Sektörlerden Kaynaklanan Atıkların Sürdürülebilirlik Açısından Geri Dönüşüme Katkısının Araştırılması: Bulanık MCDM Tabanlı Bir Yaklaşım”, *Politeknik Dergisi*, 29(3):290310:1-16 (2026).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.org.tr/politeknik/archive>

DOI: 10.2339/politeknik.1696267

Endüstriyel Sektörlerden Kaynaklanan Atıkların Sürdürülebilirlik Açısından Geri Dönüşüme Katkısının Araştırılması: Bulanık MCDM Tabanlı Bir Yaklaşım

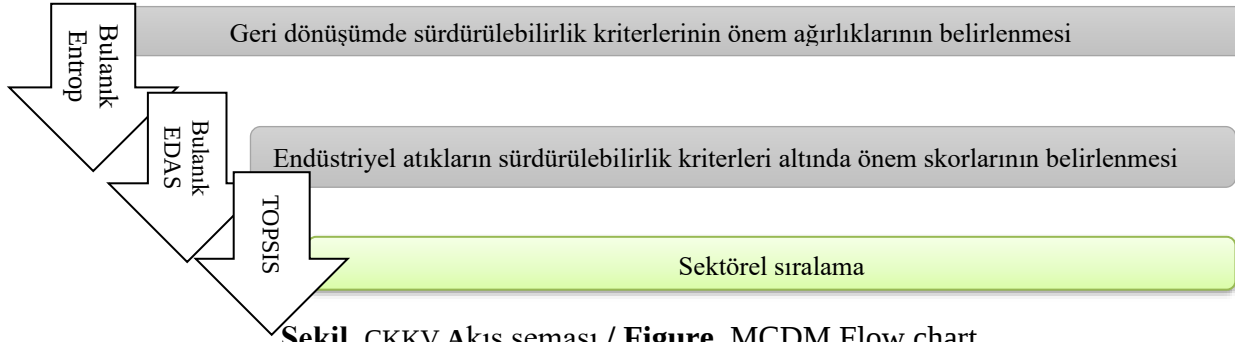
Contribution of Waste from Industrial Sectors to Recycling in Terms of Sustainability: A Fuzzy MCDM Based Approach

Önemli noktalar (Highlights)

- ❖ Geri dönüşümde teknik ve çevresel faktörler ön planda olmalıdır. / Technical and environmental factors should be at the forefront in recycling.
- ❖ Sürdürülebilirlik kriterlerine göre geri dönüşümde öne çıkan endüstri sektörleri sıralanmıştır. / The prominent industrial sectors in recycling are listed according to sustainability criteria.

Grafik Özet (Graphical Abstract)

Endüstriyel atıklar için üç katmanlı bir sürdürülebilir geri dönüşüm yapısı oluşturulmuştur ve analiz için bir entegre ÇKKV çerçevesi önerilmiştir. A three-layer sustainable recycling structure for industrial waste is established and an integrated MCDM framework is proposed for analysis.



Şekil. ÇKKV Akış şeması / Figure. MCDM Flow chart

Amaç (Aim)

Endüstriyel atıkların sürdürülebilir geri dönüşüm sürecindeki önceliklerini belirlemek ve politika önerileri sunmaktır. / To identify the priorities of industrial waste in the sustainable recycling process and to provide policy recommendations

Tasarım ve Yöntem (Design & Methodology)

Çalışmada bulanık ÇKKV yöntemleri ile sürdürülebilirlik boyutları değerlendirilmiştir. / In the study, sustainability dimensions were evaluated with fuzzy MCDM methods.

Özgünlük (Originality)

Bu çalışma, endüstriyel sektörler için üç katmanlı sürdürülebilir geri dönüşüm çerçevesi öneren ilk araştırmadır. / This is the first study to propose a three-layer sustainable recycling framework for industrial sectors.

Bulgular (Findings)

Plastik, kâğıt ve metal atıkları geri dönüşümde teknik ve ekonomik açıdan en avantajlı atıklar olarak belirlenmiştir. / Plastic, paper, and metal wastes were identified as the most advantageous in terms of technical and economic sustainability.

Sonuç (Conclusion)

Sürdürülebilirlik kriterlerine göre önceliklendirilen sektörlere yönelik politikalar, etkili geri dönüşüm sistemleri geliştirmeye yardımcı olabilir. / Policies targeting sectors prioritized by sustainability criteria can help develop effective recycling systems.

Etik Standartların Beyanı (Declaration of Ethical Standards)

Bu makalenin yazarı çalışmada kullandığı materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel bir izin gerektirmediğini beyan ederler. / The author(s) of this article declare that the materials and methods used in this.

Endüstriyel Sektörlerden Kaynaklanan Atıkların Sürdürülebilirlik Açısından Geri Dönüşüme Katkısının Araştırılması: Bulanık MCDM Tabanlı Bir Yaklaşım

Araştırma Makalesi / Research Article

Mesliha GEZEN UÇAR^{1,2*}

¹Oltu Beşerî ve Sosyal Bilimler Fakültesi, İşletme Bölümü, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye

²Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, İstatistik Bölümü, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye

*Yazarın asıl kadrosu Atatürk Üniversitesindedir ve şu anda geçici bir araştırma görevlendirmesi kapsamında Süleyman Demirel Üniversitesinde çalışmaktadır.

(Geliş/Received : 12.05.2025 ; Kabul/Accepted : 13.11.2025 ; Erken Görünüm/Early View : 01.01.2026)

ÖZ

Kentsel nüfus artışı ve ekonomik büyüme ile birlikte artan tüketim, doğal kaynakların hızla tükenmesine neden olmaktadır. Kaynakların sınırlı olması, geri dönüşümü etkin bir atık yönetimi stratejisinin vazgeçilmez unsuru haline getirmektedir. Etkin bir atık yönetimi; ekonomik, çevresel, teknik ve sosyal boyutlarıyla, farklı paydaşların iş birliği çerçevesinde çok boyutlu olarak ele alınmalıdır. Bu bağlamda, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri, bu tür karmaşık sistemlerin eşzamanlı değerlendirilmesinde başarılı bir şekilde uygulanmaktadır. Bu çalışmanın temel amacı, endüstriyel sektörleri sürdürülebilir geri dönüşüm sürecine yapacakları katkılara göre sıralamaktır. Bu kapsamda entegre bir ÇKKV yaklaşımı benimsenmiştir: kriterlerin önem dereceleri Bulanık Entropi yöntemiyle belirlenmiş, sektörlerin performans değerlendirmesi Bulanık EDAS yöntemiyle yapılmış ve nihai sıralama TOPSIS yöntemiyle elde edilmiştir. Bulgular, sürdürülebilir tedarik, işlem maliyeti, enerji kullanımı, ürün kârlılığı, geri dönüşüm oranı ve su tüketiminin sürdürülebilir atık yönetiminde öne çıkan kriterler olduğunu göstermektedir. Endüstriyel atık türleri arasında metal, kâğıt, plastik ve tekstil en etkili bileşenler olarak belirlenmiştir. Ayrıca, petrol rafinerileri, kauçuk ve plastik, kimya, tekstil ve matbaa sektörleri, sürdürülebilirlik açısından öncelikli sektörler olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, sürdürülebilir atık yönetimi alanında politika yapıcılara, yeşil finans uygulamalarına ve geri dönüşüm yatırımlarına yol gösterici nitelikte bulgular sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Sürdürülebilirlik, endüstriyel atık yönetimi, geri dönüşüm, Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV).

Investigation of the Contribution of Waste Originating From Industrial Sectors To Recycling in Terms of Sustainability: A Fuzzy MCDM Based Approach

ABSTRACT

Urban population growth and economic expansion have led to a significant increase in consumption, thereby accelerating the depletion of natural resources. The scarcity of these resources makes recycling an indispensable component of effective waste management. An efficient waste management strategy should be addressed in a multidimensional framework economic, environmental, technical, and social while considering the cooperation of various stakeholders. In this context, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM) methods have been widely applied for the simultaneous analysis of such complex systems. The primary objective of this study is to rank industrial sectors according to their contribution to the sustainable recycling process. For this purpose, an integrated MCDM approach is adopted: the importance weights of the evaluation criteria are determined through Fuzzy Entropy, while the sectoral performances are assessed using the Fuzzy EDAS method, and a comprehensive ranking is obtained via the TOPSIS technique. The findings highlight that sustainable supply, processing costs, energy consumption, product profitability, recycling rate, and water usage are the most critical criteria in sustainable waste management. Among industrial waste types, metals, paper, plastics, and textiles are identified as the most influential in recycling. Furthermore, the petroleum refining, rubber and plastics, chemicals, textiles, and printing industries emerge as the leading sectors in terms of sustainability contributions. This study provides systematic insights into sustainable waste management and serves as a guide for environmental policies, green financing practices, and recycling investments.

Keywords: Sustainability, industrial waste management, recycling, Multi-Criteria Decision-Making (MCDM).

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Nüfus artışı, sanayileşme ve kentleşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan atıklar, ekosistemin geleceğini birçok yönüyle tehdit etmektedirler. Atıklar, kentsel alanlarda su

kaynaklarını ve dolayısıyla kanalizasyon sistemlerini kirletmektedirler. Sera gazı, emisyonlarını artırmak suretiyle küresel ısınmayı hızlandırmaktadırlar. Günümüzde özellikle gelişmiş ülkelerin temel

*Sorumlu Yazar (Corresponding Author)
e-posta : meslihaucar@sdu.edu.tr

hedeflerinden biri bu atıkların yönetiminin etkili ve sürdürülebilir bir şekilde planlamaktır.

Sürdürülebilirlik ve atık yönetimi, ekosistemdeki canlıların geleceğini garantiye almanın temel taşlarından biridir [1]. Sürdürülebilir atık yönetimi, kaynakların yenilenemeyen doğasını kabul eder ve bu doğrultuda çevresel zararları en aza indirmeye çalışır ve böylece gelecek nesiller için kullanılabilir kaynakların devamlılığını sağlayarak daha sağlıklı, daha adil bir dünya yaratmayı amaçlar [2]. Sürdürülebilir atık yönetiminin kapsamı, insan sağlığının ve çevrenin korunmasının ötesinde yenilenemeyen doğal kaynakların korunmasını da kapsayacak şekilde genişlemiştir [3]. Sürdürülebilir atık yönetim hiyerarşisi sırasıyla; önleme, tüketimin azaltılması, yeniden kullanılması, geri dönüştürülmesi veya bertarafı ile ilgilidir [4]. Önleme ve azaltma sıfır atık yönetim yaklaşımının öncelikli basamaklarıdır. Teknik, ekonomik ve sosyal disiplinler ile çok yönlü ilişkiler içerisinde olan sürdürülebilir atık yönetiminde atık oluşumunun önlenemediği durumlarda atıkların, bertaraf yerine yeniden kullanımı veya geri dönüşüm yoluyla üretim döngüsünde kalmasının sağlanması esastır. Geri dönüşüm, sosyal normlar ve kamu politikası gibi kurumsal gereklilikleri teşvik eden sürdürülebilir bir uygulamadır [5].

Atık yönetimine verilen öncelik, yaşam standardına verilen öneme göre ülkeler arasında farklılık göstermektedir. Gelişmiş ülkelerde yönetimin amacı yeniden kullanımı teşvik etmektir. Gelişmekte olan ülkelerde ise amaç atık toplamının kapsamını artırmak ve kontrolsüz çöp depolamayı engellemektir [6]. Gelişmekte olan birçok ülkede atık yönetimi sorununun temelinde, finansal kaynaklardaki ve teknik sistemlerdeki yetersizlikler, kapsamlı bir yasal çerçevenin bulunmaması ile halkın bilinçli olmaması yatmaktadır [7]. Düşük ve orta gelirli ülkelerde basit hayatta kalma o kadar baskın bir kaygıdır ki atık yönetimi ülke politikalarında dahi yer almaz [4]. Bu ülkelerde katı atık geri dönüşüm potansiyeli oldukça fazla olmasına rağmen temel öncelik atıkların bertarafı yoludur.

1.1. Sürdürülebilirlik Boyutlarıyla Endüstriyel Atık Yönetimi (Industrial Waste Management with Sustainability Dimensions)

Uluslararası çevre politikalarından doğan yaptırımlar, işletmeleri sürdürülebilir atık yönetimi konusunda planlamalar yapmaya zorlamıştır [8]. İşletmeler atıkları, kullan-at yerine sürekli bir döngü içinde tekrar tekrar kullanılmasını sağlayacak sürdürülebilir döngüsel uygulamaları benimsemişlerdir. Bu, Doğrusal Ekonomi' den Dairesel Ekonomi' ye geçişin anahtar stratejisidir. Dairesel ekonomide atık ürünlerin yeniden kullanılması mümkün olmadığı durumlarda uygun kimyasal, mekanik veya biyolojik işlemlerle yeni ham maddelere dönüştürülmesi gerekir. Döngüsel ekonomide ürünün çeşidine göre farklı taşıma maliyeti, depolama maliyeti ve işleme maliyetleri vardır. Geri dönüşüm sektörü karlarını maksimize edecek şekilde bu maliyetlere katlanırlar.

Atık yönetimi genellikle çevresel kaygılar ön planda tutularak planlansa da uygulamada maliyet etkinliği çoğu zaman çevresel kriterlerin önüne geçebilmektedir. Atık hiyerarşisi; azaltma, yeniden kullanım, geri dönüşüm, enerji kazanımı ve bertaraf aşamalarından oluşur ve çevresel sürdürülebilirliği esas alır. Ancak ekonomik kriterler devreye girdiğinde, daha düşük maliyetli fakat çevresel performansı zayıf yöntemler tercih edilebilmektedir [9]. Özellikle cam gibi bazı endüstriyel atıkların geri dönüşümü, sıfırdan üretime göre daha maliyetli olabildiğinden, ekonomik baskılar çevre dostu seçeneklerin uygulanmasını zorlaştırabilir [10]. Bu nedenle, atık yönetiminde çevresel, ekonomik ve sosyal boyutların bütüncül olarak değerlendirilmesi gerekmektedir. Sürdürülebilir ve etkin bir atık yönetimi için cezalandırıcı veya teşvik edici politika araçlarının uygulanması önerilmektedir; böylece çevresel açıdan üstün yöntemlerin ekonomik olarak da cazip hale getirilmesi sağlanabilir [11]. Literatürde, çok kriterli karar verme ve yaşam döngüsü değerlendirmesi gibi yaklaşımların, atık yönetimi kararlarında tüm sürdürülebilirlik boyutlarının dikkate alınmasına yardımcı olduğu vurgulanmaktadır [9,11].

Bu çalışmada sürdürülebilirliğin ekonomik, teknik ve çevresel boyutlarının ağırlıklı etkileri dikkate alınarak endüstriyel sektörlerin atık yönetimine katkıları araştırılmıştır. Burada nihai amaç, atık yönetiminde sürdürülebilirliğin hangi boyutlarının ön plana çıktığını, hangi atıkların geri dönüşümlerinin daha avantajlı olduğunu ve bu atıkları farklı oranlarda oluşturan endüstrilerden hangilerinin geri dönüşüm sistemine katkılarının daha fazla olduğunu belirlemek üzere kapsamlı bir araştırma yapmaktır. Bu doğrultuda literatürde ilk kez bu makale ile endüstriyel sektörler için üç katmanlı sürdürülebilir bir geri dönüşüm çerçevesi oluşturulmuştur. Sürdürülebilir geri dönüşüm sistemine katkı sağlayacak endüstriyel sektörler, ilk kez bu çalışmada, önemine göre sıralanmıştır. Böylece çevresel politikalara, yeşil finans uygulamalarına ve geri dönüşüm yatırımcılarına kendi hedefleri doğrultusunda öncelik verecekleri atıkları veya sektörleri belirlemelerinde ve etkili yatırımlar yapmalarında yol gösterici olacaktır.

1.2. Literatür Araştırması (Literature Research)

Sürdürülebilir atık yönetimi, uygulama sürecinin her aşamasında çok boyutlu analizleri gerektirir. Sistemin çok boyutlu olarak değerlendirilmesi daha dengeli ve sürdürülebilir yönetim stratejilerinin elde edilmesini sağlar. Bunun için güvenilir bir performans değerlendirme mekanizmasına ihtiyaç duyulur. Performans değerlendirme sisteminin geçerliği ve güvenilirliği kapsamlı bir dizi güvenilir değışkene bağlıdır [12]. Bu değışkelerin/kriterlerin belirlenmesi çok boyutlu problemlerin analiz sürecindeki ilk adımını oluşturur [13]. Literatürde genellikle sürdürülebilirliğin ekonomik, çevresel, teknik ve sosyal gibi ana boyutları dikkate alınmıştır. En kapsamlı çalışmada yedi ana boyut altında 56 kriter belirlenmiştir [12]. Desmond, çevre, ekonomik, sosyal ve idari boyutlar altında 12 alt kriter ile İrlanda'nın atık yönetim sistemini incelemiştir [14].

Marinello ve Gamberini, ekonomik ve sosyal yönleri ile Brezilya'nın e-atık yönetim seçeneklerini araştırmıştır [15]. Bu kriterlere ek olarak politikalar, kurumsal ortamlar, finansal mekanizmalar, teknoloji seçimi ve paydaş katılımı gibi sürdürülebilirlik kriterleri de eklenmiştir [13]. Endonezya için yapılan bir araştırmada katı atık artımı için çevresel etki kriterinin en önemli ana kriter olduğu sonucuna varılmıştır [16]. E-atığın geri dönüşümü aşamasında çevresel kriterler ön plana çıkmıştır [17]. Elektronik ekipmanlardan oluşan atıkların geri dönüşümünde teknik kriterler ön plana çıkmaktadır [13]. Belediyelerin katı atık performans ölçümüne ilişkin bir çalışmada en önemli kriterlerin sırasıyla toplama maliyeti, nakliye maliyeti, halk hizmetleri, halk katılımı ve çevresel etki olduğu rapor edilmiştir [18]. ÇKKV yöntemleri çok kriterli problemlerin çelişkili doğasını etkili bir şekilde ele alabilir. Atık yönetimi araştırmalarında karar kriterlerinin ve alternatiflerin türüne göre çeşitli ÇKKV yöntemleri kullanılmıştır [19,20]. Atık yönetimi seçeneklerini konu alan bir literatür incelemesine göre çalışmaların çoğunda AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) (%47) kullanıldığı ve daha sonra sırasıyla TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) (%13), VIKOR (Vise Kriterijumska I Kompromisno Optimizacija Resenje) (%7), DEMATEL (Decision Making Trial and Evaluation Laboratory) (%5) ve diğer yöntemlerin uygulandığı raporlanmıştır [9]. Organik atıkların kompostlama sürecinin sürdürülebilirliği PROMETHEE ile araştırılmıştır [21]. Sağlık hizmetlerinde atık artıma sistemlerinin sürdürülebilirliğini değerlendirmek için PROMETHEE (Preference Ranking Organization METHod for Enrichment Evaluations) kullanılmıştır [21]. Plastik atıkların geri dönüşüm alternatiflerinin sürdürülebilirliğini değerlendirmek için Çoklu Nitelikli Değer Teorisi (MAVT) kullanılmıştır [22]. Atık yönetimindeki problemlere sürdürülebilir çözümler üretmek için [23] ve atıkların enerjiye dönüştürülmesini sağlayan teknolojilerin seçilmesinde [24] oyun teorisi yaklaşımı kullanıldı. Bulanık EDAS (Evaluation based on Distance from Average Solution) yöntemi genellikle bertaraf sahası seçiminde [25], atık arıtma ve bertaraf yönetimi seçiminde [26], ülkelerin mevcut atık yönetim sisteminin performansının karşılaştırılmasında [27] kullanılmıştır.

Literatürde ÇKKV yöntemlerinden bazıları birlikte çalıştırılarak atık yönetim süreci analizleri çeşitlendirilmiştir. Elimination and Choice Translating Reality English (ELECTRE) ve AHP yöntemleri, inşaat ve yıkım atıklarının geri dönüşümü için gerekli olan tesis yerinin belirlenmesi amacıyla Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) ile birleştirilmiştir [24]. Genişletilmiş TOPSIS ve VIKOR (Vise Kriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje) yöntemleri, belediye katı atık yönetim modeli geliştirmek için birleştirilmiştir [28]. Bertaraf senaryolarının çevresel, ekonomik ve teknik yönleriyle araştırılması amacıyla TOPSIS yöntemi PROMETHEE ile birleştirilmiştir [29]. E-atıkların yönetimi sürecindeki zorlukların ve çözümlerin

belirlenmesinde Delphi, Hybrid Best–Worst ve TOPSIS metotları entegre edilmiştir [30]. Ülkelerin atık yönetim performanslarının karşılaştırılmasında BWM ile Bulanık EDAS yöntemi birleştirilmiştir [27]. TOPSIS ve AHP atık yakma tesis yeri seçmek, TOPSIS ve BWM (The Best–Worst Method) E-atıkların depolama alanlarının en uygun konumlarını belirlemek amacıyla birleştirilmiştir [31,32]. Kâğıt atıklarının geri dönüşüm programlarının seçimi için AHP ve TOPSIS yöntemleri entegre edilmiştir [33]. Kompost tesisi yatırımcısı için kuruluş yeri seçimi entegre K-Means ve ARAS (Additive Ratio Assessment) yöntemi ile belirlenmiştir [34].

Karar verme süreçlerinde belirsizliğin yaygın olması araştırmacıların klasik ÇKKV yöntemleri yerine bulanık ÇKKV yöntemlerini tercih etmelerinin başlıca nedenidir. Gerçek hayattaki kararlar genellikle kesin sayısal değerlerle değil, uzmanların deneyimlerine dayalı dilsel ifadelerle (örneğin "yüksek", "orta", "düşük") yapılır. Bu tür belirsizlikleri modellemek için bulanık mantık daha uygundur [35]. Bulanık ÇKKV yöntemleri, insan düşüncesindeki belirsizliği daha iyi temsil ederek daha güvenilir sonuçlar sunar [36]. Bu nedenle özellikle karmaşık, çok kriterli ve öznel verilerin yoğun olduğu alanlarda tercih edilmektedir. Atık yönetimi de bu alanların başında gelmektedir. Farklı paydaşların görüşleri, maliyet, çevresel, teknik ve toplumsal kabul gibi faktörler belirsizlik içermektedir. Bu bağlamda, Bulanık ÇKKV yöntemleri atık yönetiminde belirsizlik ve uzman görüşlerindeki farklılıkları dikkate alarak strateji, teknoloji ve sistem seçimi gibi karar süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [37]. Atık yönetiminde Bulanık ÇKKV yöntemleri, belirsizlik ve uzman görüşlerindeki farklılıkları dikkate alarak strateji, teknoloji ve sistem seçimi gibi karar süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son yıllarda yapılan çalışmalar arasında; IoT tabanlı akıllı atık toplama sistemlerinin değerlendirilmesinde Entropi ve ÇKKV yöntemlerinin birleştirildiği modeller [38], tıbbi atık arıtma teknolojilerinin seçimi için fuzzy BWM-VIKOR [39] ve fuzzy Bonferroni Mean operatörleri [40], inşaat ve yıkım atıklarının yönetiminde ise bulanık IDOCRIW (Indices of Distance-Based Objective Criteria Weighting) ve WASPAS (Weighted Aggregated Sum Product Assessment) yöntemlerinin hibrit olarak kullanıldığı yaklaşımlar öne çıkmaktadır [41]. Ayrıca, akıllı sürdürülebilir atık yönetimi stratejilerinin belirlenmesinde bulanık AHP-TOPSIS [42], katı atık yönetiminde fuzzy DEMATEL ve Choquet integral [43], tıbbi atık yönetiminde intuitionistic fuzzy tabanlı karar destek sistemleri [36], atıktan enerji üretimi için bulanık AHP-CoCoSo (Combined Compromise Solution) [44], plastik atık yönetiminde Fermatean probabilistic hesitant fuzzy set (FPHFS) ile AHP-CODAS (Combinative Distance-based Assessment) [45] ve sağlık atığı arıtma teknolojilerinin değerlendirilmesinde Pythagorean fuzzy SWARA (Step-wise Weight Assessment Ratio Analysis) ve ARAS [46] gibi farklı Bulanık MCDM yaklaşımları uygulanmıştır. Bu çalışmalar, sürdürülebilirlik, maliyet, çevresel etki, operasyonel uygunluk ve sosyal kabul gibi

çoklu kriterlerin belirsizlik ortamında bütüncül olarak değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır.

Sonuç olarak, atık yönetiminde ÇKKV ve Bulanık ÇKKV yöntemlerinin çeşitli kombinasyonlarla uygulanarak farklı süreçlerin analiz edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, mevcut çalışmalar genellikle belirli atık türleri (ör. inşaat, tıbbi, elektronik) veya belirli karar aşamalarına odaklanmakta; endüstriyel atık türlerinin sürdürülebilirlik kriterlerine göre çok boyutlu bir şekilde değerlendirilmesi ve bu önceliklerin ilgili sektörler ile ilişkilendirilmesi konusunda sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. Ayrıca, elde edilen önceliklerin çevresel politika, yeşil finans ve geri dönüşüm yatırım kararlarına nasıl yol göstereceğine dair uygulamalı rehberler sınırlıdır. Bu boşluğu doldurmak amacıyla, çalışmamızda atık türleri ve bunları üreten endüstri sektörleri, Bulanık Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) yöntemleri kullanılarak analiz edilmiştir. Bu çalışma, çevresel politikalar, yeşil finans uygulamaları ve geri dönüşüm yatırımlarına yol gösterme potansiyeline sahiptir. Elde edilen bulgular, karar alıcıların ve politika yapıcıların hangi atık türleri ve sektörlerin öncelikli olduğunu belirlemesine imkân tanımakta; çevresel politika tasarımı, yeşil finans yönlendirmesi ve geri dönüşüm yatırımlarının stratejik planlanması için veri temelli bir rehber sunmaktadır. Örneğin, hangi atık türlerinin daha acil müdahale gerektirdiği, hangi sektörlerde geri dönüşüm yatırımlarının ekonomik ve çevresel açıdan daha etkili olacağı ve sürdürülebilir finansman stratejilerinin hangi alanlara öncelik vereceği bu analizler sayesinde daha şeffaf ve bilimsel bir temele oturtulabilmektedir. Böylece çalışma hem literatüre hem de uygulamaya yönelik somut katkılar sağlamaktadır.

2. MATERYAL ve METOT (MATERIAL and METHOD)

2.1. Entegre Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri (Integrated Multi-Criteria Decision Making Techniques)

Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri, birbiriyle çelişen kriterlerden oluşan çok boyutlu problemlerin tutarlı bir şekilde çözülmesinde karar vericilere destek sunar [47]. Ayrıca karar verici paydaşların farklı bakış açılarının eş zamanlı dikkate alınmasında da etkili yöntemler içerir. Bu bakış açıları sayısal değerlerle değil, sözel puanlamalarla ifade edildiğinden dolayı belirsizlik altında karar vermeyi içeren bulanık yöntemler kullanılır [48]. Bu çalışmada Bulanık ENTROPY, Bulanık EDAS ve TOPSIS yöntemleri kullanılmıştır. Bulanık Entropy yöntemi sürdürülebilirliğin boyutlarındaki veri belirsizliğini dikkate alarak objektif ağırlıkları hesaplaması açısından avantajlıdır. Keshavarz Ghorabae ve arkadaşları tarafından geliştirilmiş olan EDAS yöntemi, nispeten yeni bir ağırlıklandırma tekniğidir [49]. Maliyet ve fayda olmak üzere birbirleri ile çelişen kriterlerin pozitif ve negatif çözüm uzaklığına göre alternatifleri değerlendirir. Bulanık EDAS mesafe ölçüsünü ortalama çözümü dikkate almasıyla fark yaratmıştır [26]. Pozitif uzaklık matrisinin daha yüksek

değerleri ve negatif uzaklık matrisinin daha düşük değerleri optimum çözüm olarak birleştirilir. Çelişen kriterlerle başa çıkma konusunda başarılı bir yöntem olup karar vericilere daha objektif bir sıralama sunar (Trung ve diğ. 2023). TOPSIS pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak alternatifin seçilmesine dayanan bir tekniktir [50]. TOPSIS farklı kriterlerin etkilerinin birlikte değerlendirilmesinde etkili bir yöntemdir. Bu çalışmada sürdürülebilirliğin çelişen boyutları arasında objektif ve dengeli bir değerlendirme yapılması, hesaplama kolaylığı ve anlaşılabilirlik açısından avantajlı olması nedeniyle çalışmamızda bulanık EDAS-TOPSIS entegre yöntemi tercih edilmiştir. EDAS yöntemi ile atık türlerinin sürdürülebilirlik kriterleri ağırlıklandırılmış, daha sonra bu ağırlıklar kullanılarak TOPSIS yöntemiyle endüstriyel sektörler sıralanmıştır. Kriterlerin ağırlıklandırılmasında ve karar alternatiflerinin sıralanmasında bu yöntemler entegre edilerek her iki yöntemin güçlü yönlerinden faydalanılmıştır. Bu çok aşamalı entegrasyon sistemi ile, karar sürecinde yöntemsel sağlamlığın ve güvenilirliğin sağlanması amaçlanmıştır.

2.2. Entropi Temelli Bulanık EDAS-TOPSIS Entegre Yöntemi (Entropy Based Fuzzy EDAS-TOPSIS Integrated Method)

Adım 1: Kriterler ve alternatiflerden oluşturulan bir karşılaştırma matrisi her bir uzman tarafından puanlanır. Bunun için ‘Çok Yüksek (7,9,9), Yüksek (5,7,9), Orta (3,5,7), Düşük (1,3,5), Çok Düşük (1,3,3)’ sözel ifade skalası kullanılmıştır [51].

Adım 2: Uzmanların puanladığı, alternatifleri kriterlere göre puanlama tablolarından tüm uzman grubunu temsil eden tek bir bütünleştirilmiş değerlendirme matrisi eşitlik (1) kullanılarak oluşturulur [52] (Ek 1).

$$X = [\tilde{x}_{ij}]_{m \times n}$$

$$\tilde{x}_{ij}(l_{ij}, m_{ij}, u_{ij}) = \left(\prod_{e=1}^p \tilde{x}_{ij}^e \right)^{1/p} \quad (1)$$

$$1 \leq i \leq m; 1 \leq j \leq n; e = \{1, 2, \dots, p\}$$

Burada $\tilde{x}_{ij}^p$, herhangi bir uzmanın i alternatifi için j kriterine atadığı puanı gösterir.

Adım 3. Ek 1’de sunulmuş olan birleştirilmiş karar matrisi üzerinden Fuzzy entropy yöntemi kullanılarak sürdürülebilirlik kriterlerinin ağırlıkları hesaplanmıştır [53]. Yöntemin python kodları Ek 2’de sunulmuştur.

Adım 3.1. Fuzzy normalizasyon:

$$r_{ij} = \left(\frac{l_{ij}}{u_j^{max}}, \frac{m_{ij}}{u_j^{max}}, \frac{u_{ij}}{u_j^{max}} \right) \quad (2)$$

Adım 3.2. Fuzzy entropi değeri:

$$E_j = \left(\frac{-1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \right) \quad (3)$$

Adım 3.3. Bilgi faydası (çeşitlilik derecesi)

$$d_j = 1 - E_j \quad (4)$$

Adım 3.3. Kriter ağırlıkları

$$w_{ij} = \left(\frac{d_j}{\sum_{i=1}^n d_j} \right) \quad (5)$$

Adım 4: Bu aşamada 3. adımdan elde edilen ağırlıklar (w_{ij}) kullanılarak Bulanık EDAS yöntemi [54,55] (Eşitlik 6-9) ile endüstriyel atıkların ağırlıklandırılmış sürdürülebilirlik kriterleri altında geri dönüşüm performansları hesaplanmıştır. Yöntemin python kodları Ek 3'de sunulmuştur.

Adım 4.1. Pozitif ve negatif göreceli uzaklıklar

$$PDA_{ij} = \max \left(\frac{\tilde{x}_{ij} - r_{ij}}{r_{ij}}, 0 \right) \quad (6)$$

$$NDA_{ij} = \max \left(\frac{r_{ij} - \tilde{x}_{ij}}{r_{ij}}, 0 \right)$$

Adım 4.2. Ağırlıklı normalize toplam uzaklıklar

$$NSP_i = \frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} PDA_{ij}}{\max(\sum_{j=1}^n w_{ij} PDA_{ij})}$$

$$NSN_i = 1 - \max \left(\frac{\sum_{j=1}^n w_{ij} PDA_{ij}}{\max(\sum_{j=1}^n w_{ij} PDA_{ij})} \right) \quad (7)$$

Adım 4.3. Değerleme skoru

$$AS_i = \frac{1}{2} (NSP_i + NSN_i) \quad (8)$$

Adım 4.4. Kriter ağırlıkları

$$AS_i^{tek} = \frac{AS_i^L + AS_i^M + AS_i^U}{3} \quad (9)$$

Adım 5: Bulanık EDAS ile elde edilen atık performans değerleri kriter ağırlıkları ve endüstriyel sektörlerin bu atıklardan üretme yüzdeleri alternatifler olmak üzere TOPSIS yöntemi [42,56,57] (Eşitlik 10-12) ile endüstriyel sektörlerin sürdürülebilir geri dönüşümdeki katkıları sıralanmıştır. Yöntemin python kodları Ek 4'de sunulmuştur.

Adım 5.1. Ağırlıklı normalize matrisin İdeal A_j^+ ve anti-ideal A_j^- çözümleri

$$A_j^{+/-} = \max/\min_i \left(AS_i^{tek} * \left(\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_i x_{ij}^2}} \right) \right) \quad (10)$$

Adım 5.2. Uzaklıkların hesaplanması

$$S_i^{+/-} = \sqrt{\sum_j AS_i^{tek} * \left(\frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_i x_{ij}^2}} - A_j^{+/-} \right)^2} \quad (11)$$

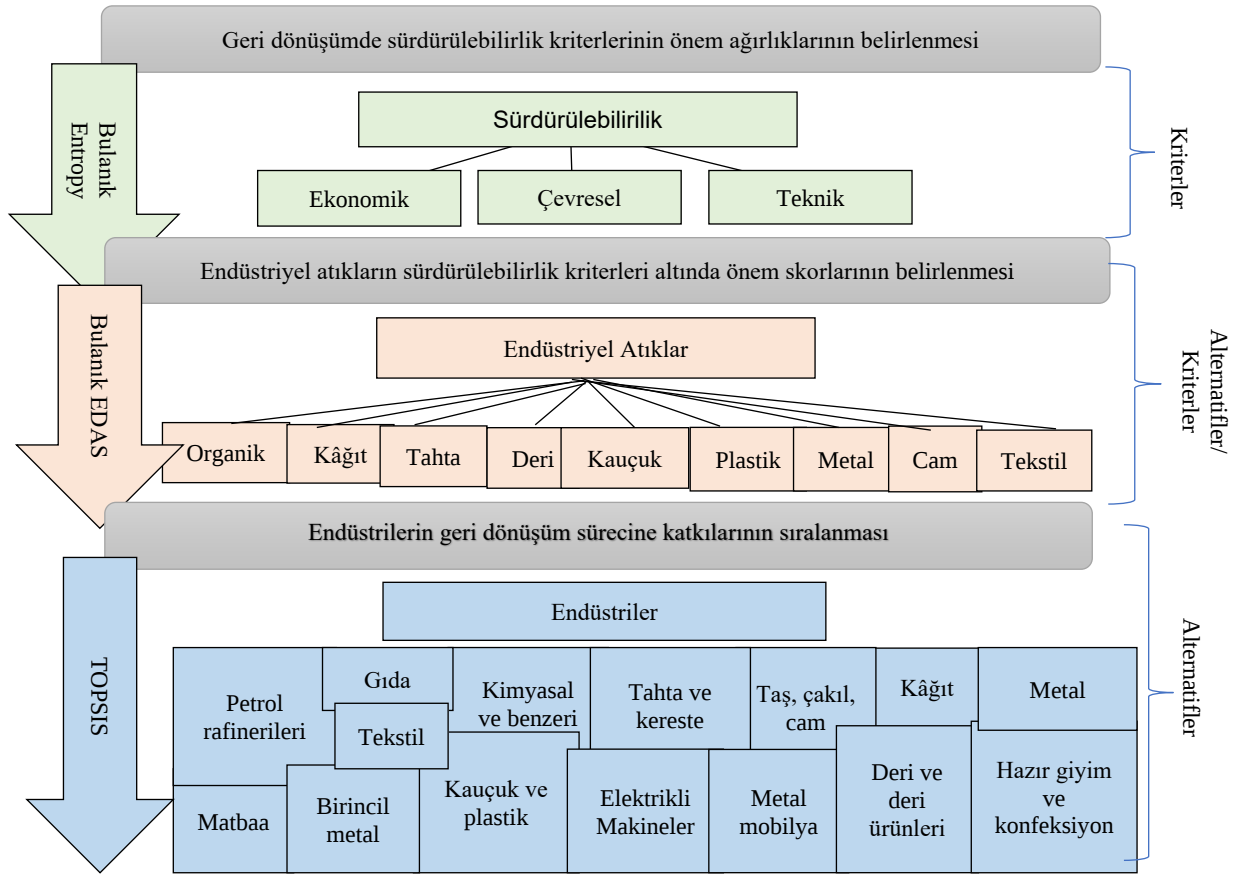
Adım 5.3. Göreceli yakınlık katsayısı

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-} \quad (12)$$

2.3. Uygulama Çerçevesi (Application Framework)

Çalışmada uzman görüşünü esas alan Bulanık ÇKKV yöntemleri kullanılmış olup, görüşleri alınacak uzman grubu geri dönüşüm firmalarında çalışan üç çevre mühendisi ve atık konusunda uzman iki akademisyenden oluşmaktadır. Kriterlerin çok olması durumunda karar vermede belirsizlik ortaya çıkabileceği için [17] kriter ve alternatiflerin kapsamını netleştirmek amacıyla ön görüşmeler yapılmıştır. Kapsamlı literatür araştırması ve uzman görüşleri ile endüstriyel atık türlerinin sürdürülebilirliğini temsil eden ekonomik, çevresel ve teknik ana kriterler altında on altı kriter belirlenmiş, geri dönüşüm sürecinin teknolojiler ve atık karakteristiği gibi teknik unsurlarına odaklanıldığı için sürdürülebilirliğin sosyal boyutu kapsam dışında bırakılmıştır. Taşıma (K11), işlem (K12) ve depolama maliyetleri (K13), atık yönetimi alternatiflerinin toplam maliyetinde belirleyici unsurlardır [58]. Ürün kârı (K14), özellikle kâğıt, plastik ve metal gibi geri kazanım akışlarının ekonomik uygulanabilirliğini belirler [59]. Enerji ve su tüketimi ile hava ve zararlı madde emisyonları, literatürde, LCA'nın en sık kullanılan ve karar süreçlerinde öncelikli olarak dikkate alınan temel etki kategorileri olarak değerlendirilmiştir [60,61]. Örneğin bir çalışmada enerji ve su girdileri, hava emisyonları ve toksik madde salınımları, karakterizasyon faktörleriyle çevresel etki skorlarına dönüştürülmüştür [60]. Geri dönüşüm oranı, malzeme döngüsünün ne kadar etkin olduğunu ve kaynakların ne ölçüde yeniden kullanıldığını gösterir [62,63]. Yüksek geri dönüşüm oranları, doğal kaynak kullanımının ve atık miktarının azaltılmasına, enerji tasarrufuna ve sera gazı emisyonlarının düşürülmesine katkı sağlar [64]. Geri dönüşümde sürdürülebilir tedarik, atıkların etkin toplanması, izlenebilirlik, ikincil hammadde kullanımının artırılması ve yeşil lojistik gibi unsurları içerir [65]. Endüstriyel atık alternatifleri ise Khoshsepehr ve arkadaşları tarafından kategorileştirilen farklı endüstrilerdeki atık çeşitleri temel alınarak değerlendirilmiştir [66].

Bu makalede, sürdürülebilirliğin çevresel, ekonomik ve teknik boyutları ele alınarak endüstrilerin geri dönüşüm sürecine katkılarının sıralanması amaçlanmıştır. Bu doğrultuda, endüstriyel atıklar için üç katmanlı bir sürdürülebilir geri dönüşüm yapısı oluşturulmuş ve analiz için entegre bir Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) çerçevesi önerilmiştir. Uygulama için Python programı kullanılmış yöntemlerin kodları Ekler bölümünde sunulmuştur. İlk katmanda, sürdürülebilirlik kriterleri, farklı sektörlerden uzman görüşlerine göre Bulanık Entropy yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır (Ek 2). Bu ağırlıklar kullanılarak ikinci katmanda, endüstriyel atıkların önem skorları ağırlıklı sürdürülebilirlik kriterleri altında Bulanık EDAS ile belirlenmiştir (Ek 3). Son olarak, endüstrilerin oluşturduğu farklı türden atık yüzdeleri ve ikinci aşamadan elde edilen EDAS skorları kullanılarak TOPSIS yöntemi ile endüstri sektörleri,



Şekil 1. Entegre çok boyutlu analiz için akış şeması (Flowchart for integrated multidimensional analysis)

sürdürülebilir geri dönüşümdeki önemlerine göre sıralanmıştır (Ek 4) (Şekil 1).

3. BULGULAR ve TARTIŞMA (FINDINGS and DISCUSSION)

Atıktan ham maddeye dönüşümün güvenilir ve etkili bir kaynağı olarak kabul edilen endüstriyel atıkların sürdürülebilirlik incelemeleri çok boyutlu karmaşık bir problem olarak değerlendirilir. Sürdürülebilirliğin kendisi ekonomik, teknik ve çevre yönleriyle çok boyutlu bir sistemken, bunun başka çok boyutlu bir yapıyı değerlendirmede kullanılması aynı zamanda zor bir problemdir. Bu çalışmada, farklı endüstrilerin ürettikleri atık çeşitliliğini ve oranlarını sürdürülebilirliğin ekonomik, teknik ve çevre boyutları altında incelemek, entegre bir analiz sistemi geliştirilmesiyle mümkün olmuştur. Analizin temel amaçları, endüstriyel atıklar için sürdürülebilirliğin temel çevresel, ekonomik ve teknik göstergelerinin önemini belirlemek, bu göstergelerin önem ağırlıklarına göre endüstrilerin ürettiği atıkların değer skorlarını vurgulamak ve son olarak endüstrileri performanslarına göre sıralamaktır.

3.1. Sürdürülebilirlik Kriterlerinin

Ağırlıklandırılması (Weighting of Sustainability Criteria)

Karar vericilerin her bir alternatif için kriterlere verdikleri puanlar dikkate alınarak Eşitlik 1 yardımıyla bütünleştirilmiş değerlendirme matrisi oluşturulmuş ve Bulanık ENTROPY metodu ile kriter ağırlıkları hesaplanmıştır (Ek 2). Çizelge 1’de alt kriter ağırlıkları ve sıraları ile ana kriterlerin ortalama ağırlıkları sunulmuştur.

Doğu koordinatlarında olan Akhisar/Manisa’da gerçekleştirilmiştir. Güneş enerjisinin daha verimli kullanımı için güneş ışığının deney sezonu dikkate alınarak kollektör eğimi yaz koşulları için “Enlem-15” prensibince 23° olarak ayarlanmıştır. Deney düzeneğinin kurulumundan sonra sistem açık hava koşulları altında çalıştırılarak gerekli ölçümler yapılmıştır. Deney setindeki ölçüm noktaları Şekil 7.’de verilmiştir. Bu amaçla kollektör girişinden, çıkışından, absorber plaka yüzeyinden, cam örtüden ve kollektör kasasının arka yüzeyinden sıcaklık ölçümü yapılmıştır. Kollektör çıkışında hava hızı ölçümü yapılmıştır. Güneş ışınım değeri kollektör üst bölümünden ölçülmüştür. Veri kaydetme aralığı beş dakika olarak ayarlanmıştır.

Çizelge 1. Sürdürülebilirlik kriterlerinin ağırlık değerleri ve sıralamaları (Weight Values and Rankings of Sustainability Criteria)

Ana kriterler	Ana kriter Ağırlık	Kriterler	Alt Kriter Ağırlık	Sıra
Ekonomik K1	0.302	Taşıma maliyeti	K11	5
		İşlem maliyeti	K12	4
		Depolama maliyeti	K13	3
		Ürün karı	K14	9
		Enerji tüketimi	K21	7
Çevresel K2	0.335	Su tüketimi	K22	6
		Hava kirleticisi salınımı	K23	2
		Zararlı madde kullanımı	K24	8
Teknik K3	0.362	Geri Dönüşüm Oranı	K31	1
		Sürdürülebilir Tedarik	K32	10

Endüstriyel atıkların geri dönüşümünde sürdürülebilirliğin Ekonomik, Çevresel ve Teknik boyutlarının ortalama ağırlıkları ilgili alt kriterlerinin ortalamaları alınmak suretiyle hesaplanmıştır. Ana kriterler bağlamında en yüksek ağırlığın Teknik (0.362) kriter olduğu görülmüştür. İkinci ve üçüncü önemli ana kriterler sırasıyla sürdürülebilirliğin çevresel ve ekonomik boyutlarıdır. Literatürde farklı kapsamlarda yapılmış çalışmalarda sıralamalar değişmektedir. Plastik, cam ve metal endüstrileri kapsamında yapılmış bir çalışmada işletmelerin geri dönüşüm kararı vermelerini etkileyen en önemli ana sürdürülebilirlik kriterlerinin sırasıyla ekonomik, sosyal ve çevresel sürdürülebilirlik olduğu tespit edilmiştir [67]. Shahnazari ve arkadaşları, atıkların bertarafı için önemli ana faktörleri çevresel, ekonomik ve teknik kriterler olarak sıralamışlardır [68]. Vučija ve arkadaşları, belediye katı atık yönetim senaryosu seçmede en önemli boyutun ekonomik kriter olduğunu raporlamıştır [69]. Çevik Aka, cam sektöründe geri dönüşümü etkileyen en önemli alt kriterleri sırasıyla maliyet, enerji tüketimi, sera gazı ve su tüketimi olarak raporlamıştır [67]. Verilerin uzman görüşlerine dayanması kriterlerin sıralamasındaki farklılığın en önemli nedenidir. Bu tür çalışmalarda, ele alınan atık türleri ve bölgesel ihtiyaçlar gibi standart olmayan faktörler bulguları şekillendirmektedir.

Bu araştırma ile elde edilen en önemli ilk beş kriter geri dönüşüm sürecinin verimliliğini ve başarısını etkileyen kriterlerdir. Teknik bir kriter olan Geri Dönüşüm Oranı (K31), en yüksek ağırlığa (0.184) sahip, en önemli kriter olarak öne çıkmıştır. Bu, sürdürülebilir atık yönetiminde atıkların geri kazanım potansiyelinin kritik öneme sahip olduğunu göstermiştir. Çevresel kriterler arasında, hava kirleticisi salınımı (K23) 0.152 ağırlıkla ikinci sırada yer almıştır. Geri dönüşüm sürecinde küresel ısınma potansiyeli yüksek sera gazlarının salınımının minimize edilmesi, karbon ayak izinin azaltılması bakımından önemli bir göstergedir. Özellikle organik atıkların çürütülmesi sürecinde ortaya çıkan metan gazı küresel

ısınma potansiyeli en yüksek kirleticidir (UNEP, 2021). Ekonomik bir kriter olan Depolama Maliyeti (K13) 0.117 ağırlıkla üçüncü sırada yer almıştır. Bu, özellikle kısıtlı alana sahip şehirlerde ekonomik verimlilik ihtiyacının önemini vurgulamaktadır. Dolayısıyla atık yönetim süreçlerinde, depolama alanları maliyet ve çevresel etki açısından optimize edilmelidir [70]. Taşıma Maliyeti (K11) ve İşlem Maliyeti (K12) kriterleri sırasıyla dördüncü ve beşinci sırada önemli ekonomik kriterlerdir. Atık yönetim süreçlerinin sürdürülebilirliğinin sağlanmasında ekonomik faktörler orta düzeyde öne çıkmıştır. Karar vericiler maliyetleri, teknik ve çevresel kaygılardan sonra dikkate almışlardır. Sürdürülebilir Tedarik (K32) kriteri, karar vericilerin en az önemseydiği kriter olarak tespit edilmiştir. Gonçalves ve arkadaşları, literatürde sürdürülebilir tedarik uygulamalarının genellikle daha az önceliklendirildiğini raporlamıştır [71]. Ürün Karı (K14) kriteri ise dokuzuncu sırada önemli kriter olarak bulundu. Karar vericiler, sürdürülebilirlik kapsamında ekonomik bir kriter olan ürün karının teknik ve çevresel kriterlerden daha düşük önem düzeyine sahip olduğunu belirtmişlerdir.

Bu bölümde elde edilen Sürdürülebilirlik kriterlerinin ağırlıkları kullanılarak bir sonraki bölümde endüstriyel atıklar için bir sıralama skoru oluşturulacaktır.

3.2. Endüstrilerin Ürettiği Atıkların Sürdürülebilirlik Skorları (Sustainability Scores of Industrial Waste)

Atık hiyerarşisi, atığın çevresel kriterler dikkate alınarak hazırlanmış aşamalardan oluşur. Ancak ekonomik ve teknik kriterler sisteme dahil edildiğinde bu hiyerarşi çalışmayabilir. Örneğin çevre açısından geri dönüşümü avantajlı olan tahta, cam ve kâğıt, atıkları yüksek hacimlerde düşük maliyetlerle işlenirken, cam veya karışık malzemeli bazı ürünlerin geri dönüşümü ekonomik olmayabilir. Bu örneği tüm atıklarda daha detaylı görebilmek için boyutlar ayrı ayrı analiz edildi. Önceki bölümde Bulanık ENTROPY ile elde edilen sürdürülebilirlik kriterleri ağırlıkları da kullanılarak,

endüstri atıkları için bir değerlendirme skoru ve önem sıralaması Ağırlıklandırılmış Bulanık EDAS yöntemi ile elde edilmiştir (Çizelge 2). Analizler için Python Programlama dilinde pyMCDM kütüphane kullanılmıştır. Bu kütüphane birçok klasik ve modern çok kriterli karar verme (MCDM) problemleri için kapsamlı bir kütüphanedir. Bu çalışmada endüstriyel atıkların önceliklendirilmesi için F-EDAS paketi tercih edilmiştir (kodlar için bkz. Ek 2). Analiz, endüstriyel atıkların performanslarını sürdürülebilirliğin tüm boyutlarıyla ve ayrı ayrı ekonomik, çevresel ve teknik boyutlarıyla sıralamaktadır. Bulgular, atık türlerinin her bir boyut için performanslarını sıralayarak sürdürülebilirlik için geliştirilebilir yönlerini ortaya koymaktadır. Sürdürülebilirliğin ağırlıklandırılmış tüm boyutları

dikkate alındığında, plastik, kâğıt ve metal atıklar dönüşümü en avantajlı ilk üç atık olarak değerlendirilmiştir. Organik atıklar, deri ve kauçuk atıklarının dönüşümü sürdürülebilirliğin tüm boyutlarıyla düşünüldüğünde en az avantajlı atıklardır. Ekonomik olarak dönüşümü en avantajlı atıklar; plastik, tekstil ve kâğıt atıklardır. Plastik atıkların dönüşümündeki en büyük etkinin ekonomik sürdürülebilirlik kriterleri olduğu başka bir çalışmada da vurgulanmıştır [67]. Çevresel sürdürülebilirlik açısından geri dönüşümü avantajlı atıklar tahta, cam, kâğıt iken deri, kauçuk ve plastikler en az avantajlı atıklardır. Teknik açıdan metal, plastik, kâğıt atıkları en avantajlı üç atık olarak sıralanmıştır

Çizelge 2. Endüstriyel atıklarının sürdürülebilirlik boyutlarıyla F-EDAS skorları ve önem sıraları (F-EDAS Scores and Importance Rankings of Industrial Wastes Based on Sustainability Dimension)

Endüstriyel Atıklar	Tüm Boyutlar		Ekonomik Sürdürülebilirlik		Çevresel Sürdürülebilirlik		Teknik Sürdürülebilirlik	
	Ağırlık	Sıra	Ağırlık	Sıra	Ağırlık	Sıra	Ağırlık	Sıra
Organik atıklar	0.084	9	0.238	8	0.227	6	0.009	9
Kâğıt atıklar	0.839	2	0.709	3	0.688	3	0.763	3
Tahta atıklar	0.553	4	0.522	5	0.999	1	0.142	6
Deri atıklar	0.191	8	0.482	6	0.044	9	0.065	7
Kauçuk atıklar	0.512	6	0.604	4	0.102	8	0.562	4
Plastik atıklar	0.935	1	0.999	1	0.224	7	0.974	2
Metal atıklar	0.590	3	0.340	7	0.620	4	0.999	1
Cam atıklar	0.195	7	0.009	9	0.708	2	0.460	5
Tekstil atıklar	0.542	5	0.742	2	0.554	5	0.054	8

Plastik atıkların geri dönüşümü sürdürülebilirliğin tüm boyutları dikkate alındığında ilk sırada yer almıştır. Plastik atıklar özellikle ekonomik ve teknik yönleriyle ön plana çıkmaktadır. Diğer taraftan bu atıkların çevresel yönüyle son sıralarda yer alması dikkat çekmiştir. İnsan Hakları İzleme Örgütü tarafından 2022’de yayınlanan raporda geri dönüşüm sürecinde özellikle plastik atıklardan kaynaklı hava kirleticilerin ve toksinlerin insan sağlığına ve çevreye zarar verdiği vurgulanmıştır. Kâğıt atıklarının geri dönüşümü, sürdürülebilirliğin tüm boyutları dikkate alındığında ikinci sırada yer almıştır. Kâğıt atıklarının geri kazanım oranları yaklaşık %80-90 arasındadır ve sürdürülebilir tedarik açısından avantajlıdır. Metal atıkların geri dönüşümü teknik ve çevresel yönüyle avantajlı iken ekonomik yönüyle avantajlı değildir. Genel olarak metaller, geri dönüşüm sürecinde sadece %2’sini kaybeder. Teknik ve çevre açısından avantajlı olsa da ekonomik olarak son sıralarda yer almıştır. Tahta atıklarının geri dönüşümü çevresel

açıdan avantajlı iken teknik açıdan avantajlı olmadığı görülmüştür. Cam atıkların geri dönüşümü çevresel açıdan avantajlı iken teknik açıdan avantajlı bulunmamıştır. Cam ve tahta minimum çevresel zararlar tamamı geri dönüştürülebilir atıklardır. Tekstil atıklarının geri dönüşümü sürdürülebilirliğin ekonomik boyutuyla avantajlı iken teknik boyutuyla avantajlı olmadığı dikkat çekmiştir.

Bu bölümde elde edilen bulgular, endüstriyel atıkların sürdürülebilirlik açısından güçlü ve zayıf yönlerini ortaya koymaktadır. Plastik atıklar için geri dönüşüm sürecinde çevresel hassasiyeti artırıcı önlemlerin alınması ve metal atıklar için ekonomik verimliliği artırıcı uygulamaların geliştirilmesi önerilmektedir. Çevresel açıdan geri dönüşümü avantajlı olan cam atıkların, ekonomik ve teknik yönlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Deri ve organik atıkların geri dönüşüm süreçleri tüm yönleriyle geliştirilmelidir.

Sürdürülebilirliğin tüm boyutları için elde edilen endüstriyel atıkların performans skor değerleri bir sonraki bölümde kriter ağırlıkları olarak kullanılmıştır. Farklı sektörlerden endüstriler, bu atık türlerinden farklı oranlarda ve çeşitlilikte atık üretirler. Endüstrilerin bu atık türlerine ait yüzdesel verileri Çizelge 3'te

sunulmuştur [72]. Endüstriyel sektörlerin ürettiği çeşitli atık kombinasyonlarının yüzdeleri ve atıkların önem ağırlıkları birlikte düşünülerek sürdürülebilir geri dönüşüm açısından en önemli endüstriler TOPSIS yöntemi ile sıralanmıştır.

Çizelge 3. Endüstri atıklarının önem ağırlıkları ve geri dönüşüm oranları (%) (Importance Weights and Recycling Rates (%) of Industrial Wastes) (Pehlivan, Yazıcı ve Güner, 2014)

Endüstriler	Endüstriyel Atıklar								
	Organik	Kâğıt	Tahta	Deri	Kauçuk	Plastik	Metal	Cam	Tekstil
Ağırlıklar	0.084	0.839	0.553	0.191	0.512	0.935	0.59	0.195	0.542
Gıda	20	60	10	2	2	5	10	10	2
Tekstil	2	50	2	2	2	10	0	2	40
Giyim ve kon.	2	60	2	2	2	2	2	2	50
Tahta ve kereste	2	20	80	2	2	2	2	2	2
Ağaç mobilya	2	30	50	2	2	2	2	2	5
Metal mobilya	2	40	20	2	2	2	40	2	2
Kâğıt	2	60	15	2	2	2	15	2	2
Matbaa	2	90	10	2	2	2	2	2	2
Kimyasal vb.	2	60	10	2	2	15	10	2	2
Petrol rafinerileri	2	80	15	2	2	20	10	2	2
Kauçuk ve plastik	2	60	10	2	20	20	2	2	2
Deri ve deri ürünleri	2	10	10	60	2	2	20	2	2
Taş, çakıl, cam	2	40	10	2	2	2	10	20	2
Birincil metal	2	50	15	2	2	10	10	5	2
Metal	2	50	15	2	2	2	30	2	2
Elektrikli Makineler	2	50	15	2	2	5	30	2	2
Elektrikli aletler	2	50	15	2	2	5	5	2	2

3.3. Endüstriyel Sektörlerin TOPSIS Yöntemi ile Sıralanması (Ranking of Industrial Sectors Using the TOPSIS Method)

Bu bölümde sürdürülebilir atık yönetimi için endüstriyel sektörlerin önemi TOPSIS yöntemi ile sıralanmıştır. Python programının pymcdm 1.2.1 kütüphanesi içinden TOPSIS paketi Endüstriyel sektörlerin sürdürülebilir atık yönetimindeki önemine göre sıralanması için tercih edilmiştir (Ek 4). Endüstri sektörlerinin ürettikleri farklı atık yüzdeleri ve bu atıkların sürdürülebilirlikteki önem ağırlıkları (F-EDAS skorları) birlikte dikkate alınarak endüstriyel sektörlerin geri dönüşümdeki önemleri sıralanmıştır.

Buna göre sürdürülebilirlik kriterlerine göre geri dönüşümde öne çıkan endüstri sektörleri sırasıyla; petrol rafinerileri, kauçuk ve plastik sektörü, kimyasal ve benzeri endüstriyel sektörler, tekstil, matbaa, hazır giyim-konfeksiyon, metal ve elektrikli makine endüstri

atıklarıdır (Çizelge 4). Endüstriyel gelişmelerle birlikte artan endüstriyel atıkların geri dönüştürülmesi sürecinde ortaya çıkan kirleticiler ekosistemi önemli düzeyde etkiler. Özellikle yakma işlemleri ciddi hava kirliliği problemleri yaratmaktadır [73]. Enerji ve suyu yoğun olarak kullanan bu sektörlerde bütünsel kirlilik önleme ve geri dönüşüm çok daha önem kazanmaktadır [74]

Çizelge 4. Geri dönüşüm için endüstriyel sektörlerin öncelik sıralaması ve ağırlığı (Priority Ranking and Weights of Industrial Sectors for Recycling)

Endüstriyel Sektörler	Sıra	TOPSIS Skor
Petrol rafinerileri	1	0.541
Kauçuk ve plastik	2	0.540
Kimyasal ve benzeri	3	0.439
Tekstil	4	0.377

Çizelge 4. (Devam). Geri dönüşüm için endüstriyel sektörlerin öncelik sıralaması ve ağırlığı (Priority Ranking and Weights of Industrial Sectors for Recycling)

Endüstriyel Sektörler	Sıra	TOPSIS Skor
Matbaa	5	0.369
Hazır giyim ve konfeksiyon	6	0.351
Birincil metal	7	0.337
Elektrikli Makineler	8	0.331
Metal mobilya	9	0.327
Metal	10	0.308
Gıda	11	0.306
Kâğıt	12	0.292
Tahta ve kereste	13	0.267
Elektrikli aletler	14	0.252
Taş, çakıl, cam	15	0.214
Ağaç mobilya	16	0.211
Deri ve deri ürünleri	17	0.183

4. SONUÇ (CONCLUSION)

Atıkların geri dönüşüm firmaları aracılığıyla yeniden üretim sürecine dâhil edilmesi, sürdürülebilirliğin çeşitli boyutlarına katkı sağlayan önemli bir araştırma alanı olarak literatürde yer bulmuştur. Araştırmalar geri dönüşüm sürecini ilk olarak çevresel yönüyle ele almıştır. Daha sonra döngüsel ekonomi kavramının ortaya çıkmasıyla ekonomik olarak da önem kazanmaya başlamıştır. Atık çeşitlerinin farklı geri dönüşüm oranları ve tedarik miktarları da onların teknik boyutuyla değerli olduğunu göstermiştir.

Bu çalışmanın nihai amacı, atık yönetiminde sürdürülebilirliğin hangi boyutlarının ön plana çıktığı, hangi atıkların geri dönüşümlerin daha avantajlı olduğu ve bu atıkları farklı oranlarda oluşturan endüstri sektörlerinden hangilerinin geri dönüşüm sistemine katkılarının daha fazla olduğu sorularını cevaplamak üzere kapsamlı bir araştırma yapmaktır. Bu doğrultuda literatürde ilk kez bu makale ile endüstriyel sektörler için üç katmanlı sürdürülebilir bir geri dönüşüm çerçevesi oluşturulmuştur. Sürdürülebilir geri dönüşüm sistemine katkı sağlayacak endüstriyel sektörler, ilk kez bu çalışmada, önemine göre sıralanmıştır. Böylece çevresel politikalara, yeşil finans uygulamalarına ve geri dönüşüm yatırımcılarına kendi hedefleri doğrultusunda öncelik verecekleri atıkları veya sektörleri belirlemelerinde ve etkili yatırımlar yapmalarında yol gösterici olacaktır.

Geri dönüşüm sürecinde en önemli sürdürülebilirlik boyutu teknik yeterliliklerdir. Bu kapsamda belirlenmiş geri dönüşüm oranı kriteri, geri dönüşüm sürecinin verimliliğini ve başarısını etkileyen en önemli kriterdir. Özellikle Hava kirletici salınımı ve su tüketiminin azaltılarak Çevresel etkilerin minimize edilmesi gerektiği tespit edilmiştir. Geri dönüşüm sürecindeki maliyetler (Depolama, işlem ve taşıma) diğer önemli sürdürülebilirlik kriterleri olarak sıralanmıştır. Sürdürülebilir Tedarik ve Ürün karı diğer kriterlere göre

daha az önemsenen kriterler olarak raporlanmıştır. Bu kriterlerin dikkate alındığı çok boyutlu analizler daha dengeli politikalar ve sürdürülebilir stratejiler üretmeyi sağlar. Sürdürülebilirliğin ağırlıklandırılmış tüm boyutları dikkate alındığında geri dönüşümü en avantajlı endüstriyel atıklar sırasıyla; plastik, kâğıt, metal, tahta, tekstil, kauçuk, cam, deri ve organik atıklar olarak raporlanmıştır. İlk sırada önemli bulunan plastik atıkların geri dönüşümü, sürdürülebilirliğin teknik ve ekonomik yönleriyle avantajlı bulunmasına rağmen çevresel açıdan avantajlı bulunmamıştır. Plastik atıklar için geliştirilecek politikaların sadece geri dönüşüm oranlarını artırmaya değil, aynı zamanda çevresel etkileri azaltmaya yönelik olması önemlidir. Kâğıt atıklarının geri dönüşümü, sürdürülebilirliğin tüm boyutlarıyla avantajlı olduğu görülmüştür. Bu durum, hem geri dönüşüm sürecindeki düşük çevresel zarar hem de ekonomik getiriler bakımından kâğıt atıklarının öncelikli bir kaynak olduğunu göstermektedir. Bu kapsamda politikacılara kâğıt geri dönüşüm sistemlerinde alt yapı iyileştirilmesi, toplama süreçlerinin teşvik edilmesi ve toplulukların bu konuda bilinçlendirilmesi ve geri dönüştürülmüş kağıtlarının kullanımını destekleyecek kamu alım garantilerinin verilmesi önerilebilir. Metal atıkların geri dönüşümü teknik ve çevresel yönüyle avantajlı iken ekonomik yönüyle avantajlı bulunmamıştır. Bu durum metallerin geri dönüşüm sürecinin maliyetli veya düşük kar marjlı olduğunu göstermektedir. Bunu dengelemek için, metal geri dönüşüm firmalarına yönelik enerji destekleri, yerli geri dönüşüm sistemlerinin desteklenmesi gibi politikalar devreye alınabilir. Cam atıkların geri dönüşümü çevresel açıdan avantajlı iken teknik açıdan avantajlı bulunmamıştır. Tekstil atıklarının geri dönüşümü sürdürülebilirliğin ekonomik boyutuyla avantajlı iken teknik boyutuyla avantajlı olmadığı dikkat çekmiştir. Bu durum, tekstil ürünlerinin geri dönüşümünde teknolojik yetersizlikler, malzeme çeşitliliği ve işleme zorluklarıyla açıklanabilir. Bu nedenle, tekstil atıkları için özel tasarlanmış ayrıştırma teknolojilerine yönelik Ar-Ge teşvikleri ve yenilikçi geri dönüşüm yöntemlerinin desteklenmesi, sektörün sürdürülebilirlik kapasitesini artıracaktır.

Son olarak geri dönüşüm için öncelik verilecek endüstriyel sektörler TOPSIS ile sıralanmıştır. TOPSIS analizine göre petrol rafinerileri, kauçuk ve plastik sektörü ile kimyasal ve benzeri sektörler, geri dönüşüm sürecine sağladıkları katkılar bakımından en yüksek öncelikli sektörler olarak belirlenmiştir. Petrol rafinerileri, ağırlıklı atık dağılımına bakıldığında özellikle yüksek ağırlığa sahip kâğıt (0.80), plastik (0.20) ve metal (0.10) atık üretimiyle öne çıkmaktadır. Bu durum yüksek geri dönüşüm potansiyeline sahip olduğunu göstermektedir. Kauçuk ve plastik sektörü, plastik ve kauçuk atıkları ağırlıklı olarak üretirken, kimyasal ve benzeri sektör özellikle plastik ve metal atıklarla geri dönüşüm sürecine katkı sağlamaktadır. Bu yüksek katkılı sektörlerde yatırımların yönlendirilmesi, geri dönüşüm sisteminin etkinliğini artıracaktır. Özellikle bu sektörlerde geri dönüşüm tesislerinin

kapasitesinin artırılması, atık ayrıştırma ve işleme teknolojilerinin iyileştirilmesi kritik öneme sahiptir. AR-GE faaliyetlerine öncelik verilerek temiz üretim ve enerji verimli teknolojilerin geliştirilmesi desteklenmeli, geri kazanım oranları artırılmalıdır. Kauçuk ve plastik ile kimyasal sektörlerinde ise yenilikçi geri dönüşüm yöntemlerinin uygulanması ve sürdürülebilir üretim teşvikleri yatırım önceliği olarak ele alınmalıdır. Böylece, sıralamada üstte yer alan bu sektörlerle yapılacak stratejik yatırımlar hem kısa vadeli verimlilik hem de uzun vadeli sürdürülebilirlik hedefleri açısından maksimum katkıyı sağlayacaktır.

ETİK STANDARTLARIN BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

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

YAZARLARIN KATKILARI (AUTHORS' CONTRIBUTIONS)

Bu makale bütünüyle yazar tarafından oluşturulmuştur.

ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Makale üzerinde herhangi bir çıkar çatışması yoktur.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Mandpe A., Paliya S., Gedam V., Patel S., Tyagi L. and Kumar S., "Circular economy approach for sustainable solid waste management: A developing economy perspective", *Waste Management & Research*, 41: 499–511, (2023).
- [2] Ragasri S. and Sabumon P. C., "A critical review on slaughterhouse waste management and framing sustainable practices in managing slaughterhouse waste in India", *Journal of Environmental Management*, 327: 116823, (2023).
- [3] Turcott Cervantes D. E., López Martínez A., Cuartas Hernández M. and Lobo García de Cortázar A., "Using indicators as a tool to evaluate municipal solid waste management: A critical review", *Waste Management*, 80: 51–63, (2018).
- [4] Sohail S. S., Javed Z., Nadeem M., Anwer F., Farhat F., Hussain A., et al., "Multi-criteria decision making-based waste management: A bibliometric analysis", *Heliyon*, 9: e21261, (2023).
- [5] Sarkkinen M., Kujala K. and Gehör S., "Decision support framework for solid waste management based on sustainability criteria: A case study of tailings pond cover systems", *Journal of Cleaner Production*, 236: 117583, (2019).
- [6] Zurbrugg C., Caniato M. and Vaccari M., "How assessment methods can support solid waste management in developing countries—A critical review", *Sustainability*, 6: 545–570, (2014).
- [7] Marshall R. E. and Farahbakhsh K., "Systems approaches to integrated solid waste management in developing countries", *Waste Management*, 33: 988–1003, (2013).
- [8] Ayaz Arda Ö. and Aslan T., "Çevre Yönetimi Uygulamalarının Örgütsel Performansla İlişkisi Üzerine Bir Araştırma: Çevresel Proaktifliğin Aracılık Etkisi", *Business & Management Studies: An International Journal*, 3: 3582–3614, (2020).
- [9] Torkayesh A. E., Rajaeifar M. A., Rostom M., Malmir B., Yazdani M., Suh S., et al., "Integrating life cycle assessment and multi criteria decision making for sustainable waste management: Key issues and recommendations for future studies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 168: 112819, (2022).
- [10] Zhang Z., Malik M. Z., Khan A., Ali N., Malik S. and Bilal M., "Environmental impacts of hazardous waste, and management strategies to reconcile circular economy and eco-sustainability", *Science of The Total Environment*, 807: 150856, (2022).
- [11] Gutierrez-Lopez J., McGarvey R. G., Costello C. and Hall D. M., "Decision support frameworks in solid waste management: A systematic review of multi-criteria decision-making with sustainability and social indicators", *Sustainability*, 15: 13316, (2023).
- [12] Zaman A. U., "Identification of key assessment indicators of the zero waste management systems", *Ecological Indicators*, 36: 682–693, (2014).
- [13] Achillas C., Moussiopoulos N., Karagiannidis A., Banias G. and Perkoulidis G., "The use of multi-criteria decision analysis to tackle waste management problems: A literature review", *Waste Management & Research*, 31: 115–129, (2013).
- [14] Desmond M., "Municipal solid waste management in Ireland: Assessing for sustainability", *Irish Geography*, 39: 22–33, (2006).
- [15] Marinello S. and Gamberini R., "Multi-criteria decision making approaches applied to waste electrical and electronic equipment (WEEE): A comprehensive literature review", *Toxics*, 9: 13, (2021).
- [16] Sudibyo H., Majid A. I., Pradana Y. S., Budhijanto W., Deendarlianto and Budiman A., "Technological evaluation of municipal solid waste management system in Indonesia", *Energy Procedia*, 105: 263–269, (2017).
- [17] Khoshand A., Rahimi K., Ehteshami M. and Gharaei S., "Fuzzy AHP approach for prioritizing electronic waste management options: A case study of Tehran, Iran", *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 9649–9660, (2019).
- [18] Sanjeevi V. and Shahabudeen P., "Development of performance indicators for municipal solid waste management (PIMS): A review", *Waste Management & Research*, 33: 1052–1065, (2015).
- [19] Stefanović G., Milutinović B., Vučićević B., Denčić-Mihajlov K. and Turanjanin V., "A comparison of the Analytic Hierarchy Process and the Analysis and Synthesis of Parameters under Information Deficiency method for assessing the sustainability of waste management scenarios", *Journal of Cleaner Production*, 130: 155–165, (2016).
- [20] Şenol M. B., Adem A. and Dağdeviren M., "A fuzzy MCDM approach to determine the most influential logistic factors", *Politeknik Dergisi*, 22: 793–800, (2019).
- [21] Makan A. and Fadili A., "Sustainability assessment of healthcare waste treatment systems using surrogate

- weights and PROMETHEE method”, *Waste Management & Research*, 39: 73–82, (2021).
- [22] Garcia-Garcia G., “Using multi-criteria decision-making to optimise solid waste management”, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 37: 100650, (2022).
- [23] Palafox-Alcantar P. G., Hunt D. V. L. and Rogers C. D. F., “The complementary use of game theory for the circular economy: A review of waste management decision-making methods in civil engineering”, *Waste Management*, 102: 598–612, (2020).
- [24] Soltani A., Hewage K., Reza B. and Sadiq R., “Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of municipal solid waste management: A review”, *Waste Management*, 35: 318–328, (2015).
- [25] Kahraman C., Keshavarz Ghorabae M., Zavadskas E. K., Cevik Onar S., Yazdani M. and Oztaysi B., “Intuitionistic fuzzy EDAS method: an application to solid waste disposal site selection”, *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 25: 1–12, (2017).
- [26] Paul T. K., Jana C. and Pal M., “Multi-criteria group decision-making method in disposal of municipal solid waste based on cubic Pythagorean fuzzy EDAS approach with incomplete weight information”, *Applied Soft Computing*, 144: 110515, (2023).
- [27] Behzad M., Hashemkhani Zolfani S., Pamucar D. and Behzad M., “A comparative assessment of solid waste management performance in the Nordic countries based on BWM-EDAS”, *Journal of Cleaner Production*, 266: 122008, (2020).
- [28] Aghajani Mir M., Taherei Ghazvinei P., Sulaiman N. M. N., Basri N. E. A., Saheri S., Mahmood N. Z., et al., “Application of TOPSIS and VIKOR improved versions in a multi criteria decision analysis to develop an optimized municipal solid waste management model”, *Journal of Environmental Management*, 166: 109–115, (2016).
- [29] Coban A., Ertis I. F. and Cavdaroglu N. A., “Municipal solid waste management via multi-criteria decision making methods: A case study in Istanbul, Turkey”, *Journal of Cleaner Production*, 180: 159–167, (2018).
- [30] Chen Z., Wang X., Peng J., Zhang H., Wang J. and Wang X., “An integrated probabilistic linguistic projection method for MCGDM based on ELECTRE III and the weighted convex median voting rule”, *Expert Systems*, 37: e12593, (2020).
- [31] Luo C., Ju Y., Santibanez Gonzalez E. D. R., Dong P. and Wang A., “The waste-to-energy incineration plant site selection based on hesitant fuzzy linguistic Best-Worst method ANP and double parameters TOPSIS approach: A case study in China”, *Energy*, 211: 118564, (2020).
- [32] Sagnak M., Berberoglu Y., Memis İ. and Yazgan O., “Sustainable collection center location selection in emerging economy for electronic waste with fuzzy Best-Worst and fuzzy TOPSIS”, *Waste Management*, 127: 37–47, (2021).
- [33] Bafail O. A. and Abdulaal R. M. S., “New approach for selecting a suitable recycling collection program for recovered paper and pulp recyclables using AHP-TOPSIS techniques”, *Waste Management & Research*, 39: 1406–1413, (2021).
- [34] Dündar S., “TR83 bölgesinde K-Means ve ARAS yöntemiyle kompost tesisi kuruluş yeri seçimi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38: 2607–2624, (2023).
- [35] Wang Z., Baydaş M., Stević Ž., Özçil A., Irfan S. A., Wu Z., et al., “Comparison of fuzzy and crisp decision matrices: An evaluation on PROBID and sPROBID multi-criteria decision-making methods”, *Demonstratio Mathematica*, 56: (no pages given), (2023).
- [36] Kokkinos K., Lakioti E., Moustakas K., Tsanaktisid C. and Karayannis V., “Sustainable medical waste management using an intuitionistic fuzzy-based decision support system”, *Sustainability*, 16: 298, (2023).
- [37] Rehman A. U., Shekhovtsov A., Rehman N., Faizi S. and Salabun W., “On the analytic hierarchy process structure in group decision-making using incomplete fuzzy information with applications”, *Symmetry*, 13: 609, (2021).
- [38] Seker S., “IoT based sustainable smart waste management system evaluation using MCDM model under interval-valued q-rung orthopair fuzzy environment”, *Technology in Society*, 71: 102100, (2022).
- [39] Gao F., Han M., Wang S. and Gao J., “A novel Fermatean fuzzy BWM-VIKOR based multi-criteria decision-making approach for selecting health care waste treatment technology”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 127: 107451, (2024).
- [40] Chakraborty S. and Saha A. K., “Novel Fermatean fuzzy Bonferroni mean aggregation operators for selecting optimal health care waste treatment technology”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 119: 105752, (2023).
- [41] Eghbali-Zarch M., Tavakkoli-Moghaddam R., Dehghan-Sanej K. and Kaboli A., “Prioritizing the effective strategies for construction and demolition waste management using fuzzy IDOCRIW and WASPAS methods”, *Engineering, Construction and Architectural Management*, 29: 1109–1138, (2022).
- [42] Demircan B. G. and Yetilmezsoy K., “A hybrid fuzzy AHP-TOPSIS approach for implementation of smart sustainable waste management strategies”, *Sustainability*, 15: 6526, (2023).
- [43] Abdullah L., Zulkifli N., Liao H., Herrera-Viedma E. and Al-Barakati A., “An interval-valued intuitionistic fuzzy DEMATEL method combined with Choquet integral for sustainable solid waste management”, *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 82: 207–215, (2019).
- [44] Van Thanh N., “Optimal waste-to-energy strategy assisted by fuzzy MCDM model for sustainable solid waste management”, *Sustainability*, 14: 6565, (2022).
- [45] Suvitha K., Narayanamoorthy S., Pamucar D. and Kang D., “An ideal plastic waste management system based on an enhanced MCDM technique”, *Artificial Intelligence Review*, 57: 1–24, (2024).
- [46] Rani P., Mishra A. R., Krishankumar R., Ravichandran K. S. and Gandomi A. H., “A new Pythagorean fuzzy based decision framework for assessing healthcare waste treatment”, *IEEE Transactions on Engineering Management*, 69: 2915–2929, (2022).

- [47] Kumar S., Priyanka, Shard, Chandra A., Kumar A. and Kalia S., "A MULTIMOORA-based MCDM model under picture fuzzy environment for converting municipal solid waste to energy in Himalayan Region: A sustainable technology assessment", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 59: 103399, (2023).
- [48] Öztürk M. and Paksoy T., "Tedarikçi seçimi için yeni bir aralık tip-2 hibrit bulanık kural tabanlı AHP sistemi", *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35: 1519–1536, (2020).
- [49] Keshavarz Ghorabae M., Zavadskas E. K., Olfat L. and Turskis Z., "Multi-criteria inventory classification using a new method of evaluation based on distance from average solution (EDAS)", *Informatica*, 26: 435–451, (2015).
- [50] Olson D. L., "Comparison of weights in TOPSIS models", *Mathematical and Computer Modelling*, 40: 721–727, (2004).
- [51] Chang D. Y., "Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP", *European Journal of Operational Research*, 95: 649–655, (1996).
- [52] Ma Q., Sun H., Chen Z. and Tan Y., "A novel MCDM approach for design concept evaluation based on interval-valued picture fuzzy sets", *PLOS One*, 18: e0294596, (2023).
- [53] Alao M., Ayodele T. and Ogunjuyigbe A., "Multi-criteria decision based waste to energy technology selection using entropy-weighted TOPSIS technique: The case study of Lagos, Nigeria", *Energy*, (2020).
- [54] Kara A. M., "Bulanık EDAS yöntemi ile Doğu Karadeniz bölgesi illerinin yaşanabilirlik düzeylerinin değerlendirilmesi", *Afyon Kocatepe Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, (2024).
- [55] Kabadayı N. and Dağ S., "Bulanık CRITIC ve Bulanık EDAS yöntemleri ile 3 boyutlu yazıcı seçimi", *Journal of Transportation and Logistics*, 2024: 121–138, (2024).
- [56] Koç Ustalı N., Tekin M., Toraman Y., Tekin M. F., Toraman M. and Merdivenci Y., "Küresel risk yönetimi indeksi değerlendirmesi: Gri tabanlı TOPSIS yöntemi uygulaması", *Politeknik Dergisi*, 27: 1875–1888, (2024).
- [57] Yegen N. and Gül S., "Çevik proje yönetiminde Scrum takımlarının başarı sınıflandırmasına yönelik bir ÇKKV modeli: AHS bütünlük TOPSIS-Sort-B", *Politeknik Dergisi*, 27: 731–748, (2024).
- [58] Colvero D. A., Ramalho J., Gomes A. P. D., Matos M. A. A. de and Tarelho L. A. da C., "Economic analysis of a shared municipal solid waste management facility in a metropolitan region", *Waste Management*, 102: 823–837, (2020).
- [59] Iqbal A., Yasar A., Nizami A. S., Haider R., Sultan I. A., Kedwani A. A., et al., "Empirical analysis of cost-effective and equitable solid waste management systems: Environmental and economic perspectives", *Environmental Research*, 244: 117858, (2024).
- [60] Huijbregts M. A. J., Steinmann Z. J. N., Elshout P. M. F., Stam G., Veronesi F., Vieira M., et al., "ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level", *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22: 138–147, (2017).
- [61] Bulle C., Margni M., Patouillard L., Boulay A. M., Bourgault G., De Bruille V., et al., "IMPACT World+: A globally regionalized life cycle impact assessment method", *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24: 1653–1674, (2019).
- [62] Haupt M., Vadenbo C. and Hellweg S., "Do we have the right performance indicators for the circular economy? Insight into the Swiss waste management system", *Journal of Industrial Ecology*, 21: 615–627, (2017).
- [63] Hondroyannis G., Sardianou E., Nikou V., Evangelinos K. and Nikolaou I., "Recycling rate performance and socioeconomic determinants: Evidence from aggregate and regional data across European Union countries", *Journal of Cleaner Production*, 434: 139877, (2024).
- [64] Antonopoulos I., Faraca G. and Tonini D., "Recycling of post-consumer plastic packaging waste in the EU: Recovery rates, material flows, and barriers", *Waste Management*, (2021).
- [65] Blengini G. A. and Garbarino E., "Resources and waste management in Turin (Italy): The role of recycled aggregates in the sustainable supply mix", *Journal of Cleaner Production*, 18: 1021–1030, (2010).
- [66] Khoshsepehr Z., Alinejad S. and Alimohammadlou M., "Exploring industrial waste management challenges and smart solutions: An integrated hesitant fuzzy multi-criteria decision-making approach", *Journal of Cleaner Production*, 420: 138327, (2023).
- [67] Çevik Aka D., "Endüstriyel atık geri dönüşümünde etkili olan karar kriterlerinin BWM ile değerlendirilmesi: Plastik, cam ve çelik endüstrisinde uygulama", *European Journal of Science and Technology*, 2021: 390–398, (2021).
- [68] Shahnazari A., Rafiee M., Rohani A., Nagar B. B., Ebrahimi M. A. and Aghkhani M. H., "Identification of effective factors to select energy recovery technologies from municipal solid waste using multi-criteria decision making (MCDM): A review of thermochemical technologies", *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 40: 100737, (2020).
- [69] Vučić B., Kurtagić S. M. and Silajdžić I., "Multicriteria decision making in selecting best solid waste management scenario: A municipal case study from Bosnia and Herzegovina", *Journal of Cleaner Production*, 130: 166–174, (2016).
- [70] Roy M. and Sarker J., "Integration of circular economy principles within information logistics: Case study of Australia", *IGI Global Scientific Publishing*, (2025).
- [71] Gonçalves H., Magalhães V. S. M., Ferreira L. M. D. F. and Arantes A., "Overcoming barriers to sustainable supply chain management in small and medium-sized enterprises: A multi-criteria decision-making approach", *Sustainability*, 16: 506, (2024).
- [72] Pehlivan E., Yazıcı M. and Güner G., "Endüstriyel katı atıklar ve geri kazanım", *ISEM 2014 Kongresi Bildirisi*, (2014).
- [73] İçgen B., "Hidrokarbon kirliliği gösteren yüzey sularından hidrokarbon degradasyonunda etkin bakterilerin izole edilmesi ve degradasyon yeteneklerinin belirlenmesi", Yüksek Lisans/Doktora Tezi, *OpenMETU*, (2015).
- [74] Oğuz H., "Entegre endüstriyel kirliliği önleme ve kontrol çalışmaları", *Lefke Avrupa Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, (2010).

EKLER (APPENDİCES)

Ek 1: Atıkların Sürdürülebilirlik kriterleri bütünleştirilmiş bulanık değerlendirme matrisi (Integrated Fuzzy Evaluation Matrix of Waste Sustainability Criteria")

Alternatifler /Kriterler	Taşıma maliyeti	İşlem maliyeti	Depolama maliyeti	Ürün karı	Enerji Tüketimi	Su Tüketimi	Hava Kirlenici Salınımı	Zararlı Madde Kullanımı	Geri Dönüşüm	Sürdürülebilir Tedarik
Yiyecek	(2.47, 4.72, 6.80)	(6.26, 8.28, 9.00)	(5.28, 7.40, 8.28)	(2.47, 4.72, 5.74)	(5.28, 7.40, 8.28)	(3.27, 5.74, 7.40)	(7.00, 9.00, 9.00)	(1.00, 3.00, 3.56)	(1.00, 3.00, 3.00)	(3.66, 6.24, 7.40)
Kâğıt	(2.08, 4.22, 5.28)	(2.92, 5.28, 7.40)	(1.44, 3.56, 4.72)	(2.76, 5.13, 6.80)	(3.27, 5.74, 7.40)	(3.27, 5.74, 7.40)	(1.71, 3.98, 5.13)	(1.44, 3.56, 4.72)	(3.66, 6.24, 7.40)	(5.28, 7.40, 8.28)
Tahta	(3.00, 5.00, 7.00)	(1.44, 3.56, 4.72)	(1.71, 3.98, 5.13)	(2.47, 4.72, 5.74)	(1.71, 3.98, 5.13)	(1.71, 3.98, 4.33)	(1.44, 3.56, 3.98)	(1.44, 3.56, 4.72)	(1.71, 3.98, 6.08)	(4.22, 6.26, 8.28)
Deri	(2.92, 5.28, 6.24)	(6.26, 8.28, 9.00)	(5.59, 7.61, 9.00)	(4.22, 6.26, 8.28)	(6.26, 8.28, 9.00)	(7.00, 9.00, 9.00)	(1.91, 4.33, 6.08)	(2.92, 5.28, 7.40)	(2.47, 4.72, 6.80)	(2.47, 4.72, 6.80)
Kauçuk	(3.56, 5.59, 7.61)	(3.98, 6.08, 7.61)	(2.08, 4.22, 5.28)	(4.72, 6.80, 8.28)	(6.26, 8.28, 9.00)	(3.98, 6.08, 7.61)	(3.98, 6.08, 7.61)	(2.76, 5.13, 6.80)	(4.22, 6.26, 8.28)	(4.22, 6.26, 8.28)
Plastik	(2.08, 4.22, 5.28)	(3.27, 5.74, 7.40)	(1.91, 4.33, 5.13)	(6.26, 8.28, 9.00)	(6.26, 8.28, 9.00)	(3.98, 6.08, 7.61)	(2.76, 5.13, 6.80)	(1.91, 4.33, 6.08)	(6.26, 8.28, 9.00)	(6.26, 8.28, 9.00)
Metal	(4.72, 6.80, 8.28)	(6.26, 8.28, 9.00)	(2.47, 4.72, 5.74)	(6.26, 8.28, 9.00)	(5.28, 7.40, 8.28)	(1.71, 3.98, 5.13)	(2.76, 5.13, 5.74)	(1.44, 3.56, 3.98)	(7.00, 9.00, 9.00)	(6.26, 8.28, 9.00)
Cam	(5.28, 7.40, 8.28)	(6.26, 8.28, 9.00)	(3.27, 5.74, 6.24)	(2.92, 5.28, 6.24)	(4.72, 6.80, 8.28)	(2.76, 5.13, 5.74)	(1.71, 3.98, 5.13)	(1.44, 3.56, 3.98)	(2.76, 5.13, 5.74)	(5.28, 7.40, 8.28)
Tekstil	(1.00, 3.00, 5.00)	(3.56, 5.59, 7.61)	(2.47, 4.72, 5.74)	(3.27, 5.74, 7.40)	(2.76, 5.13, 5.74)	(3.27, 5.13, 6.80)	(1.71, 3.98, 5.13)	(3.27, 5.74, 7.40)	(1.44, 3.56, 5.59)	(3.56, 5.59, 7.61)

Ek 2: Bulanık Entropy kodları (Fuzzy Entropy Codes" (Eşitlik (2-5))

```

7 # Alt kriter bazlı (l, m, u) üçlülerini hazırlama
8 fuzzy_data = {}
9 for alt_kriter in df['Alt Kriter'].unique():
10     grup = df[df['Alt Kriter'] == alt_kriter]
11     fuzzy_data[alt_kriter] = list(zip(grup['l'], grup['m'], grup['u']))
12
13 # Fuzzy normalizasyon fonksiyonu
14 def fuzzy_normalize(column):
15     l_vals = [x[0] for x in column]
16     m_vals = [x[1] for x in column]
17     u_vals = [x[2] for x in column]
18     max_u = max(u_vals)
19     return [(l/max_u, m/max_u, u/max_u) for l, m, u in column]
20
21 # Fuzzy entropy fonksiyonu
22 def fuzzy_entropy(column):
23     n = len(column)
24     entropy_vals = []
25     for i in range(3): # l, m, u
26         vals = np.array([x[i] for x in column])
27         pij = vals / (vals.sum() + 1e-10)
28         E = - (1/np.log(n)) * np.sum(pij * np.log(pij + 1e-10))
29         entropy_vals.append(E)
30     return np.mean(entropy_vals)
31
32 # Entropi ve ağırlık hesaplama
33 entropies = {}
34 for kriter, values in fuzzy_data.items():
35     norm = fuzzy_normalize(values)
36     ent = fuzzy_entropy(norm)
37     entropies[kriter] = ent
38
39 # Ağırlıkları normalize et
40 d = {k: 1 - v for k, v in entropies.items()}
41 toplam = sum(d.values())
42 weights = {k: v / toplam for k, v in d.items()}
43

```

Ek 3: Bulanık ENTROPY ile ağırlıklandırılmış olan Bulanık EDAS yöntemi python kodları (Fuzzy EDAS method weighted with Fuzzy ENTROPY python codes)

Bulanık EDAS yönteminde ise Eşitlik (6-9)'da tanımlanan denklemler Python paketinde otomatik olarak işlenmektedir. Dolayısıyla kodda bu ara adımlar ayrıntılı olarak gösterilmemiş, yalnızca girdi parametreleri ile nihai skorlar ve sıralamalar

```

15 import numpy as np
16 from pyfdm.methods import FEDAS
17 from pyfdm.helpers import rank
18 if __name__ == '__main__':
19     matrix= np.array ([
20         [[2.47, 4.72, 6.80],[6.26, 8.28, 9.00],[5.28, 7.40, 8.28],[2.47, 4.72, 5.74],[5.28, 7.40, 8.28],[3.27, 5.74,
21         [2.08, 4.22, 5.28],[2.92, 5.28, 7.40],[1.44, 3.56, 4.72],[2.76, 5.13, 6.80],[3.27, 5.74, 7.40],[3.27, 5.74,
22         [3.00, 5.00, 7.00],[1.44, 3.56, 4.72],[1.71, 3.98, 5.13],[2.47, 4.72, 5.74],[1.71, 3.98, 5.13],[1.71, 3.98,
23         [2.92, 5.28, 6.24],[6.26, 8.28, 9.00],[5.59, 7.61, 9.00],[4.22, 6.26, 8.28],[6.26, 8.28, 9.00],[7.00, 9.00,
24         [3.56, 5.59, 7.61],[3.98, 6.08, 7.61],[2.08, 4.22, 5.28],[4.72, 6.80, 8.28],[6.26, 8.28, 9.00],[3.98, 6.08,
25         [2.08, 4.22, 5.28],[3.27, 5.74, 7.40],[1.91, 4.33, 5.13],[6.26, 8.28, 9.00],[6.26, 8.28, 9.00],[3.98, 6.08,
26         [4.72, 6.80, 8.28],[6.26, 8.28, 9.00],[2.47, 4.72, 5.74],[6.26, 8.28, 9.00],[5.28, 7.40, 8.28],[1.71, 3.98,
27         [5.28, 7.40, 8.28],[6.26, 8.28, 9.00],[3.27, 5.74, 6.24],[2.92, 5.28, 6.24],[4.72, 6.80, 8.28],[2.76, 5.13,
28         [1.00, 3.00, 5.00],[3.56, 5.59, 7.61],[2.47, 4.72, 5.74],[3.27, 5.74, 7.40],[2.76, 5.13, 5.74],[3.27, 5.13,
29     ]])
30
31     weights=np.array([0.0943, 0.089, 0.1168,0.0693,0.073,0.0932,0.152,0.0912,0.0374,0.1838])
32
33     types=np.array([-1,-1,-1,1,-1,-1,-1,-1,1,1])
34     f_edas=FEDAS()
35     edass=f_edas(matrix,weights,types)
36     siraedas=rank(edass)
37     print(f'Fuzzy ARAS preferences: {edass}')
38     print(f'Fuzzy ARAS ranking: {rank(edass)}')

```

Ek 4: Bulanık Entropi-EDAS skorları altında TOPSIS sıralama yöntemi python kodları (TOPSIS ranking method python codes under Fuzzy Entropy-EDAS scores)

TOPSIS için kullanılan Python paketi, Eşitlik (10-12)'de tanımlanan normalizasyon ile ideal/anti-ideal uzaklık hesaplarını paket içinde otomatik olarak gerçekleştirmektedir. Bu nedenle kodda ara adımlar ayrıntılı olarak gösterilmemiştir.

```

7  pip install pymcdm
8  import numpy as np
9  from pymcdm.methods import TOPSIS
10 from pymcdm.helpers import rrankdata
11 alts=np.array([
12     [20, 60, 10, 2, 2, 5, 10, 10, 2],
13     [2, 50, 2, 2, 2, 10, 0, 2, 40],
14     [2, 60, 2, 2, 2, 2, 2, 2, 50],
15     [2, 20, 80, 2, 2, 2, 2, 2, 2],
16     [2, 30, 50, 2, 2, 2, 2, 2, 5],
17     [2, 40, 20, 2, 2, 2, 40, 2, 2],
18     [2, 60, 15, 2, 2, 2, 15, 2, 2],
19     [2, 90, 10, 2, 2, 2, 2, 2, 2],
20     [2, 60, 10, 2, 2, 15, 10, 2, 2],
21     [2, 80, 15, 2, 2, 20, 10, 2, 2],
22     [2, 60, 10, 2, 20, 20, 2, 2, 2],
23     [2, 10, 10, 60, 2, 2, 20, 2, 2],
24     [2, 40, 10, 2, 2, 2, 10, 20, 2],
25     [2, 50, 15, 2, 2, 10, 10, 5, 2],
26     [2, 50, 15, 2, 2, 2, 30, 2, 2],
27     [2, 50, 15, 2, 2, 5, 30, 2, 2],
28     [2, 50, 15, 2, 2, 5, 5, 2, 2],
29
30 ],dtype='float')
31 #ağırlıkları ve türleri tanımla belirle
32 weights=np.array([0.08,0.84,0.55,0.19,0.51,0.94,0.59,0.195,0.54])
33 types=np.array([1,1,1,1,1,1,1,1,1])
34 #metodun objesini oluştur
35 topsis=TOPSIS()
36 #alternatifler için sıralama ve önceliklerin belirenmesi
37 pref=topsis(alts, weights, types)
38 print(pref)
39 ranking=rrankdata(pref)

```