

Vaks İçeren Kompozit Atıklar için En Uygun Değerlendirme Yönteminin Seçiminde Farklı Karar Verme Tekniklerinin Kullanılması

Araştırma Makalesi/Research Article

 Ece YILMAZBİLEK,  Zerrin GÜNKAYA,  Aysun ÖZKAN,  Müfide BANAR

Çevre Mühendisliği Bölümü, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye
ecyilmazbilek@eskisehir.edu.tr, zcokaygil@eskisehir.edu.tr, aysunozkan@eskisehir.edu.tr, mbaranar@eskisehir.edu.tr

(Geliş/Received:24.06.2021; Kabul/Accepted:09.03.2022)

DOI: 10.17671/gazibtd.954173

Özet— Vaks içeren kompozit atıklar (faz değiştirme malzemeleri, işlenmiş hazır gıda ambalajları vb.), karmaşık yapıları nedeniyle sürdürülebilir bir şekilde yönetilmeleri zor olan atık türlerindedir. En uygun değerlendirme yönteminin belirlenmesi aşamasında çevresel, ekonomik, teknik açıdan bütünsel bir yaklaşım sergilenmesi önemlidir. Bu noktada, birçok alandaki problemin çözümünde farklı kriterlerin yardımıyla en uygun alternatif seçiminin yapılabilirdiği Çok Kriterli Karar Verme Teknikleri (MCDM)'nin kullanımı mümkündür. Bu nedenle bu çalışmada, iki farklı MCDM yöntemi ile vaks içeren kompozit atıkların değerlendirilme yöntemi (kimyasal geri dönüşüm, mekanik geri dönüşüm, insinerasyon, piroliz ve depolama) bütünsel bir yaklaşım ile değerlendirilmiştir. Öncelikle, belirlenen kriterler (küresel ısınma potansiyeli, enerji kullanımı, sağlık etkisi, kimyasal kullanımı, işletme maliyeti, yatırım maliyeti, geri dönüştürülmüş malzeme kalitesi, teknolojik uygunluk, çevre politikalarına ve yasaya uygunluk, kaynakların korunumu) Entropi, CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) ve SWARA (Step-wise weight assessment ratio analysis) metotları ile ağırlıklandırılmıştır. Her bir ağırlıklandırma metodundan elde edilen sonuçlar, MCDM yöntemleri olan ANP ve TOPSIS ile ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Kullanılan tüm ağırlıklandırma yöntemleri ile yapılan ANP ve TOPSIS sonuçlarında piroliz alternatifinin en uygun seçenek olduğu belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler— ANP, CRITIC, entropi, kompozit atık yönetimi, MCDM, SWARA, TOPSIS, vaks

Using Different Decision Making Techniques in Selecting the Most Appropriate Evaluation Method for Composite Wastes Containing Wax

Abstract— Composite wastes containing wax (phase change materials, processed food packaging, etc.) are among the types of waste that are difficult to manage in sustainable waste management systems due to their complex structure. It is important to demonstrate a holistic approach in terms of environmental, economic and technical aspects during the determination of the most appropriate evaluation method. At this point, it is possible to use Multi-Criteria Decision Making Techniques (MCDM), where the most suitable alternative (chemical recycling, mechanical recycling, incineration, pyrolysis and landfill) can be selected with the help of different criteria in solving problems in many fields. The criteria determined ((global warming potential, energy use, health impact, chemical use, operating cost, investment cost, recycled material quality, technological compliance, compliance with environmental policies and laws, conservation of resources) are weighted by Entropy, CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) and SWARA (Step-wise weight assessment ratio analysis) methods. With the results obtained from each weighting method, evaluations were made with ANP (Analytic Network Process) and TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution), separately. In the ANP and TOPSIS results made with all the weighting methods used, it was determined that the pyrolysis alternative was the most appropriate option.

Keywords— ANP, CRITIC, Composite Waste Management, Entropy, MCDM, SWARA, TOPSIS, Wax

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda yeni ve farklı ambalaj türlerinin üretilmesiyle birlikte atık türleri de farklılaşmış, bu tür atıkların sürdürülebilir ve etkin bir şekilde değerlendirilmesi gündeme gelmiştir. Bu kapsamda değerlendirilebilecek kompozit malzemeler; belirli bir hedef için iki ya da daha fazla sayıdaki, aynı veya farklı malzemelerin özelliklerini, yeni ve tek bir malzemede birleştirmek için, bileşenlerin kendi kalıplarını koruyacak şekilde makro düzeyde bir araya getirilmesi ile oluşturulan yeni malzemeler olarak tanımlanabilir. Vakslar ve özellikle de parafin vaks, ambalaj paketi, mum, cila, tekstil, kauçuk gibi pek çok alanda kullanılan ve bu kompozit yapılara eşsiz özellikler sağlayan malzemelerdir [1-2]. Parafin vaks ile kaplanan kağıtlar ve kutular, ekmek, tahıl gibi ürünlerin ambalajlarında uzun yıllardır kullanılmaktadır. Vaks içeren bu tarz kaplamalar, vaks filmlerinin su buharı iletimine yüksek mukavemeti sebebiyle gıdaların tazeliliğinin uzun süre korunmasını sağlarlar [3-4].

Öte yandan vaksların karmaşık içerikleri nedeniyle, kullandıkları kompozit malzeme atık haline geldiğinde çevresel açıdan yönetimi güç bir durum ortaya çıkmaktadır. Kompozit atıkların yönetimi, havacılık, otomotiv ve inşaat gibi çalışma alanlarının geleceği için önemli bir ihtiyaçtır [5]. Bu noktada en çok tercih edilen yöntemler; mekanik, termal ve kimyasal geri dönüşüm yöntemleri olup, literatürde kompozit atıkların yönetimi ile ilgili öne çıkan bazı çalışmalar Tablo 1'de verilmiştir.

Vaks içeren kompozit atıkların değerlendirilmesi sürecindeki zorluklardan dolayı, uygun seçeneğin belirlenmesini kolaylaştırmak için çok kriterli karar verme

yöntemlerine (Multiple criteria decision making, MCDM) başvurulabilir. Literatürde, MCDM yöntemlerinin kentsel ve endüstriyel atık yönetim sistemlerinin belirlenmesinde kullanıldığı görülmüş (Tablo 2) ancak vaks içeren kompozit atıkların değerlendirilmesinde MCDM metodolojisinin kullanıldığı çalışmalara rastlanmamıştır. Bu makaledeki çalışmaya benzer bir araştırmaya rastlanmamış olmakla beraber, kompozit malzemeler ve MCDM ile ilgili çalışmalar şu şekilde özetlenebilir: Mansor vd. [6] tarafından yapılan çalışmada, otomotiv sektöründe ürün geliştirme çalışmalarında en uygun hibrit biyo-kompozitler için termoset matrisinin değerlendirilmesinde TOPSIS yöntemine başvurulmuştur. Polyester, vinil ester ve epoksi matrisler performans kriterleri açısından analiz edilmişlerdir. TOPSIS sonuçlarına göre polyester matrisin diğer termoset matrislerine göre en uygun olduğu belirlenmiştir. Al-Oqla vd. [7], otomotiv endüstrisinde kullanılacak doğal fiber kompozitler için en uygun polimer matrisinin belirlenmesi amacıyla Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemini kullanmışlardır. Araştırma sonuçlarına göre 20 farklı kriter göz önüne alındığında, epoksi ve polipropilenin otomotiv endüstrisi için doğal fiber kompozit seçiminde en uygun polimer matrisi olduğu sonucuna varılmıştır. Singh vd. [8] yaptıkları çalışmada metal matrisli kompozitlerin mühendislik uygulama alanlarındaki kullanımlarını araştırmışlardır. En uygun metal kompozit matrisin seçilmesi için gerilme direnci, sertlik, yoğunluk, maliyet gibi kriterlerin değerlendirilmesi AHP-TOPSIS karar verme teknikleriyle yapılmıştır. Değerlendirme sonucunda hibrit matris malzemesi olan alüminyum alaşımının en uygun metal matris kompozit özelliklerine sahip olduğu anlaşılmıştır.

Tablo 1. Kompozit atıkların yönetimi ile ilgili literatürdeki farklı çalışmalar
(Studies related to composite waste management)

Referans	Kompozit Atık İçeriği	Kullanılan Yöntem	Açıklama
Cunliffe vd. (2003), [9]	Karbon fiber kompozit	Termal geri dönüşüm	Kompozit atığın pirolizi ile ısı değeri fuel oil'e yakın bir sıvı ürün elde edilmiştir.
Bartholomew, (2004), [10]	Karbon fiber kompozit	Mekanik geri dönüşüm	Kompozit atığın mekanik olarak parçalanıp öğütülmesi ile yeni bir toz malzeme elde edilmiştir.
Hendlund-Astrom, (2005), [11]	Polimer matrisli kompozit	Mekanik geri dönüşüm	Mekanik geri dönüşüm ile kompozit atıktan elde edilen polimerce zengin malzeme, takviye ve dolgu maddesi olarak kullanılmıştır.
Larsen, (2009), [12]	Cam elyaf kompozit	Kimyasal geri dönüşüm	Kimyasal geri dönüşüm ile kompozit atığın içerisindeki cam elyaf malzemenin gerilme gücünün devamlılığı sağlanmıştır.
Aynur (2011), [13]	Polimer matrisli kompozit	Termal geri dönüşüm	Kompozit atığın insinerasyonu sonrası oluşan inorganik atıklar çimento işletmelerinde kullanılmıştır.
Yanga vd. (2012), [14]	Polimer matrisli kompozit	Kimyasal geri dönüşüm	Kimyasal geri dönüşüm ile kompozit atıktan elyaf ve dolgu maddesi elde edilmiştir.
Vijay vd. (2016), [15]	Cam/Karbon fiber takviyeli kompozit	Termal-Mekanik geri dönüşüm	Mekanik geri dönüşümün, atığın sürekli olduğu durumlarda elverişli olduğu, termal geri dönüşümde ise Ar-ge çalışmalarının gerekli olduğu belirlenmiştir.
Delve vd. (2019), [16]	Polimer matrisli kompozit	Termal geri dönüşüm	Kompozit atıktan piroliz işlemi sonucunda karbonlu malzeme ve sentez gazı elde edilmiştir.

Tablo 2. Literatürde kentsel ve endüstriyel atıklarla ilgili MCDM çalışmaları
(MCDM studies related to the municipal and industrial wastes in the literature)

Referans	MCDM Yöntemi*	Atık Türü	Referans	MCDM Yöntemi*	Atık Türü
Alao vd. (2022), [17]	MULTIMOORA	Kentsel katı atık	Soni vd. (2021), [24]	AHP-MOORA	Plastik atık
Torkayes vd. (2022), [18]	BWM, CoCoSo, WASPAS	Tıbbi plastik atık	Saravani vd. (2021), [25]	AHP-ANP	Kentsel katı atık
Gaur vd. (2022), [19]	AHP-TOPSIS	Kentsel katı atık	Chauhan ve Singh (2021) [26]	ANP-DEMATEL	Tıbbi atık
Huang vd. (2022), [20]	AHP	Atıktan türetilmiş yakıt	Fetanat vd. (2021), [27]	ANP-DEMATEL-MULTIMOORA	Elektronik atık
Alblooshi vd. (2022), [21]	AHP	Elektronik atık	Zhang vd. (2021), [28]	ANP-MABAC	Hafriyat atığı
Wailoni vd. (2022), [22]	TOPSIS	Tıbbi atık	Mojaver vd. (2022), [29]	AHP-TOPSIS	Plastik atık ve biyokütle atığı
Manupati vd. (2021), [23]	VIKOR-TOPSIS	Tıbbi atık	Sokolovic vd. (2021), [30]	TOPSIS-WASPAS	Kablo atığı

* AHP: Analytical Hierarchy Process; ANP: Analytical Network Process; BWM: Best Worst Method; CoCoSo: Combined Compromise Solution; DEMATEL: DEcision-MAking TRail and Evaluation Laboratory; MABAC: Multi-attributive border approximation area comparison; MULTIMOORA: The Multi-Objective Optimization; TOPSIS: The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution; VIKOR: Vlse Kriterijumsa Optimizacija I Kompromisno Resenje; WASPAS: Weighted Aggregated Sum Product Assessment

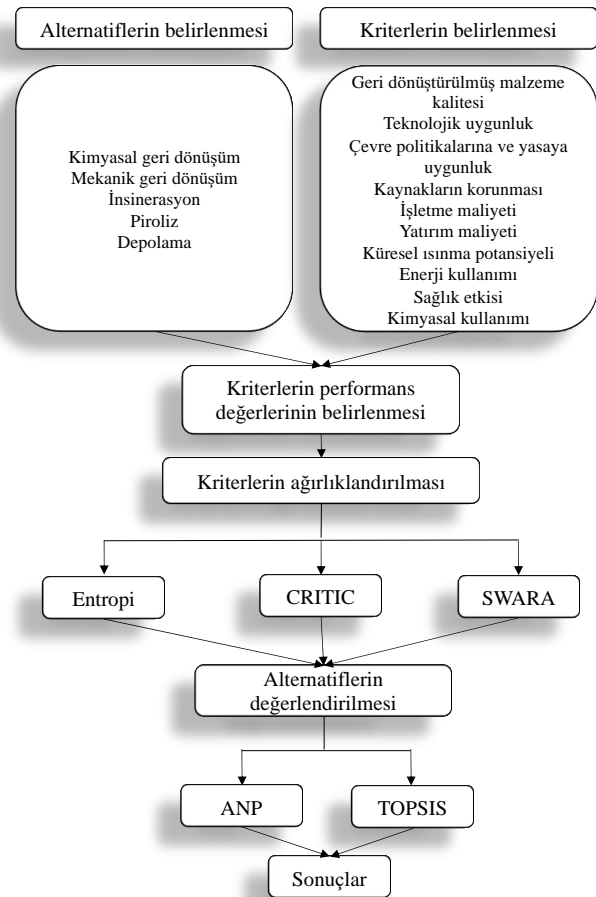
Delver vd. [16], polimer matris kompozit malzemelerin alternatif geri dönüşüm yöntemlerini AHP ve TOPSIS kullanarak ekonomik, ekolojik, teknolojik ve sosyal açıdan değerlendirmişlerdir. Çalışmanın sonuçlarına göre mekanik geri dönüşüm ve piroliz seçeneğinin polimer kompozitlerin geri dönüşümü için en uygun alternatif olduğu anlaşılmıştır. Patnaik vd. [31] tarafından yapılan çalışmada yapı uygulama alanları için en uygun kompozit malzeme seçimi AHP-TOPSIS yöntemi ile değerlendirilmiştir. Kompozitler partikül dolgu poliyester ve yüzde içeriği farklı oranlarda olan epoksi matrisler ile hazırlanmıştır. Seçilecek kompozit malzemenin sıralaması yoğunluk, sertlik, korozyon direnci, çekme-eğilme dayanımlarına göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, VSF4 (viscose fabric mat) kompoziti (%15 BFS (blast furnace slag) partikül dolgu dokunmamış viskon kumaş takviyeli kompozit) en iyi alternatif olmuştur.

Bu çalışmada ise yukarıdaki araştırmalardan farklı olarak, vaks içeren kompozit atıkların değerlendirme yöntemleri MCDM tekniklerinden ANP ve TOPSIS ile belirlenmiş ve bu alternatiflerin değerlendirilmesi için; Entropi, CRITIC (Criteria Importance Through Intercriteria Correlation) ve SWARA (Step-wise weight assessment ratio analysis) olmak üzere 3 farklı metod ile ağırlıklandırma yapılmıştır.

2. METODOLOJİ (METHODOLOGY)

Çok kriterli karar verme, çok sayıda kritere göre alternatiflerin olumlu ve olumsuz yönlerini eş zamanlı değerlendirme imkanı sağlayan analitik bir metodolojidir. Karar verme aşamasında MCDM yöntemlerinin uygulanması, alternatifleri değerlendirmede karar vericilere seçenek sağlayarak kaynakların daha verimli kullanılmasına da yardım etmektedir [32]. Çalışmada kullanılan metodoloji Şekil 1'de verilmiştir. Bu çalışmada Entropi, CRITIC ve SWARA olmak üzere üç farklı ağırlıklandırma metodu kullanılmıştır. Elde edilen kriter

ağırlıklandırma yöntemleri kullanılarak, alternatifler iki farklı MCDM tekniği ile (ANP ve TOPSIS) değerlendirilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın akış diyagramı
(Flow diagram of the study)

2.1. Alternatiflerin Belirlenmesi (Identifying Alternatives)

Çalışmada kompozit atıkların değerlendirilmesi için 5 alternatif belirlenmiş olup, alternatifler ve açıklamaları Tablo 3'te verilmiştir.

2.2. Kriterler (Criteria)

Yapılan literatür araştırmaları sonucunda fayda, maliyet ve risk kümeleri altında 10 kriter tanımlanmış ve belirlenen kriterler ve açıklamaları Tablo 4'te verilmiştir. Öncelikle,

Tablo 3'te verilen açıklamalar doğrultusunda kriterlerin performans değerlerini içeren karar matrisi oluşturulmuştur (Tablo 5). Matris oluşturulurken kullanılan referanslar kriter bazında tablonun altında verilmiştir. Sayısal değerler referanslardan direkt doğrudan alınırken, 1-9 arasında puan olarak belirtilen kriter değerleri ilgili referanslardaki bulgular irdelenerek yazarlar tarafından belirlenmiştir. Söz konusu matris, ağırlıklandırma ve değerlendirme yöntemlerinde kullanılmıştır.

Tablo 3. Çalışmada kullanılan alternatifler
(Alternatives used in this study)

Alternatif Adı	Kimyasal Geri Dönüşüm (A1)	Mekanik Geri Dönüşüm (A2)	İnsinerasyon (A3)	Piroliz (A4)	Depolama (A5)
Açıklama	Parafin vaks, termal enerji depolama (TED) sistemlerinde kullanılan değerli bir malzeme olduğundan, tüketim sonucu oluşan kompozit atıkların ısı iletkenliğini artırmak için SiO ₂ nanotozlarının ilave edilmesi ile geri dönüşümünün yapılması, son zamanlarda vaks içeren kompozit atıkların değerlendirilmesi için tercih edilen bir seçenektir [33].	Lityum iyon bataryalar, sağladıkları yüksek enerji nedeniyle elektrikli araçlarda kullanılırlar. Lityum iyon bataryaların kolay alev alabilirliği sonucunda, güvenliği sağlamak amacıyla bu malzemeler parafin ile harmanlanarak faz değiştirme malzemesi elde edilir [34]. Ekipmana bağlı olarak mekanik geri dönüşüm süreci (kıma, parçalama, öğütme ve manyetik ayırma gibi) ön işlemler olarak uygulanabilir [35].	Kompozit atıkların insinerasyonu ile ısı ve enerji geri kazanımı mümkündür. Kazanılan enerjinin içeriği kompozit atıkların türüne göre değişmektedir. Parafin vaks ile harmanlanan atıkların insinerasyonu, cıva, kadmıyum, kurşun ve dioksitlerinin çevreye yayılmasına sebep olabilir. Bu nedenle, insineratörlerde hava kirliliği kontrol donanımlarının kullanımı önemlidir [36].	Polimer matrisin molekül ağırlığına göre işlemin çalışma sıcaklığı 450-700 °C arasında değişmektedir. Vaks içeren kompozit atıkların (güneş enerjisi depolama sistemlerinde kullanılan HDPE top/panel ve işlenmiş hazır gıda ambalajları) pirolizi ile yoğunlaştırılabilir ve çeşitli alanlarda kullanılabilir oldukça verimli ürünler elde edilir [37].	Atık yönetim sistemleri arasında en geleneksel yöntemlerden birisidir. Parafin vaks ile harmanlanan atıkları araziye depolama uzun vadede uygun bir çözüm değildir, çünkü özellikle metaller depolama alanından salınabilmektedir [36]. Düzenli depolama sistemlerinden atıklara uygulanabilecek geri dönüşüm teknikleri yetersiz kaldığı zaman yararlanılmaktadır [38].

Tablo 4. Kriterler ve tanımları
(Criteria and definitions)

No	Kriter kümesi	Kriter Adı	Birim	Tercih Yönü	Açıklama
c1	FAYDA	Küresel Isınma Potansiyeli	Puan (1-9)	Azalan	Atıkların geri dönüşüm ve depolama süreçleri sonucu oluşacak CO ₂ ve CH ₄ gibi sera gazı emisyonları
c2		Enerji Kullanımı	kWh/kg	Azalan	Atık yönetim modelinde uygulanan yöntemde harcanan enerji
c3		Sağlık Etkisi	Puan (1-9)	Azalan	Vaksin, kanserojen olan benzen ve toluen gibi içerdiği bileşenler nedeniyle oluşacak riskler
c4		Kimyasal Kullanımı	Puan (1-9)	Azalan	Atık yönetimi sürecinde kimyasal madde kullanımı
c5	MALİYET	İşletme Maliyeti	\$/ton	Azalan	Atık yönetimi sürecindeki bakım/onarım, personel vb. kalemleri içeren işletme maliyetleri
c6		Yatırım Maliyeti	\$/ton	Azalan	Kurulacak sistemin arazi hariç ekipman vb. maliyetleri
c7	RİSK	Geri Dönüştürülmüş Malzeme Kalitesi	Puan (1-9)	Artan	Geri dönüştürülen malzemenin kalitesi veya kullanım amacı doğrultusunda sürdürülebilir olması
c8		Teknolojik Uygunluk	Puan (1-9)	Artan	Teknolojik değişikliklerden kaynaklanan gereksinimlere uyum
c9		Çevre Politikalarına ve Yasaya Uygunluk	Puan (1-9)	Artan	Alternatiflerin ulusal ve uluslararası kanunlar ve düzenlemeler açısından uygulanabilirliği
c10		Kaynakların Korunumu	Puan (1-9)	Artan	Geri kazanılan malzeme sayesinde doğal kaynaklarda sağlanan tasarruf

Tablo 5. Kriterlerin performans değerleri
(Performance values of the criteria)

	c1	c2	c3	c4	c5	c6	c7	c8	c9
A1	6	1,80	6	6	112,27	180	8	8	8
A2	4	0,56	4	4	140,33	324,28	4	4	4
A3	5	0,96	6	5	112,27	180	6	6	6
A4	5	0,83	5	5	112,27	180	9	9	8
A5	3	0,27	3	4	92,78	176,82	2	2	3

Puan olan değerler 1'den 9'a ölçeklendirilmiştir. artan yönlü kriterler için; mükemmel=9; çok iyi=8; iyi=7; az ya da çok iyi=6; kayıtsız=5; biraz kötü=4; kötü=3; çok kötü=2; berbat=1 ve azalan yönlü kriterler için; mükemmel=1; çok iyi=2; iyi=3; az ya da çok iyi=4; kayıtsız=5; biraz kötü=6; kötü=7; çok kötü=8; kötü=9.

Kriterlerin performans değerleri için yararlanılan kaynaklar: c1 [36-39-40], c2 [40-41-42-43], c3 [13-36-44-45], c4 [46-47-48-49], c5 [46-48], c6 [13-50-51], c7 [11-52], c8 [8-11-13], c9 [11-53], c10 [54-55].

2.3. Ağırlıklandırma Yöntemleri (Weighting Methods)

MCDM metodolojisinde, kriter ağırlıklandırma işleminin amacı, kriterleri bir değer ile ilişkilendirerek bu kriterlerin karar problemindeki önceliğini belirleyebilmektir. Böylece elde edilen ağırlıklandırılmış sonuçlar kullanılmaya karar verilen yöntemde alternatiflerin değerlendirilmesi ve sıralanması için kullanılır. Ağırlıklandırma yöntemleri objektif ve subjektif olarak ikiye ayrılmaktadır. Bu çalışmada hem objektif (entropi, CRITIC) hem de subjektif (SWARA) ağırlıklandırma yöntemleri kullanılmıştır. Bu ağırlıklandırma yöntemlerinin kullanılma nedeni, subjektif ağırlıklandırmada karar vericinin değerlendirmesi esas alınırken, objektif ağırlıklandırmada karar matrisinin skorlarının bilinmesi halinde, kişisel yargı ve düşüncelere gerek kalmadan kriterlerin önem ağırlıklarının belirlenmesine olanak sağlamasıdır.

2.3.1. Entropi Yöntemi (Entropy Method)

Shannon Entropisi olarak da adlandırılan bu kavram aslında termodinamiğin ikinci yasası olan entropiyi yani bilgiyle birlikte kullanıldığında belirsizliğin sırasını belirlemektedir. MCDM yöntemlerinde entropi yöntemi ağırlıkların tarafsız olarak hesaplanması için kullanılan bir metottur [56].

Entropi yöntemi aşağıdaki aşamalardan oluşmaktadır.

Adım 1- Karar matrisinin oluşturulması: Entropi yönteminde öncelikle Denklem 1'deki karar matrisi oluşturulmaktadır (Tablo 5). Burada m, alternatif sayısını ve n ise kriter sayısını göstermektedir.

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2- Normalize edilmiş karar matrisinin elde edilmesi: Kriter sonuçlarının ortak birimlere çevrilmesi amacıyla kriterlerin özelliklerine göre normalizasyon yapılır.

Bu adımda Denklem 2'deki formülden faydalanılır:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{j=1}^n x_{ij}} \quad (2)$$

Burada;

i = Alternatifler

j = Kriterler

r_{ij} = Normalize edilmiş değerler

x_{ij} = i. alternatifin j. kriter için değeri

Adım 3- Kriterlere ilişkin entropi değerlerinin bulunması: Kriterlerin Entropi değerleri Denklem 3 ile bulunur:

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m r_{ij} \ln(r_{ij}) \quad (j=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

Burada;

k = Entropi sayısı = $1/\ln(m)$

m = Karar alternatif sayısı

r_{ij} = Normalize edilmiş değerler

e_j = Entropi değeri

Adım 4- Bilginin farklılaşma derecesinin (d_j) hesaplanması: Denklem 4 ile elde edilen d_j değerlerinin yüksek olması kriterlere ilişkin alternatif skorlar arasındaki farklılaşmanın fazla olduğunu göstermektedir.

$$d_j = 1 - e_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

Adım 5- Entropi kriter ağırlıklarının hesaplanması: Entropi kriter değerleri Denklem 5'te verilen formül ile elde edilir.

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (5)$$

Denklem 5'te yer alan d_j değeri, kriterlere ait farklılaşma değerlerini gösterirken, w_j değeri kriterlerin önem düzeylerinin göstergesi olan ağırlık değerlerini ifade etmektedir. Entropi değerlerinin toplamı daima 1'e eşittir.

2.3.2. CRITIC Yöntemi (Critic Method)

Kriterler arası korelasyon yoluyla kriter önemi yöntemi, birlikte ele alınan kriterlerin kendi içlerinde öncelikli önemlerinin objektif olarak hesaplandığı bir ağırlıklandırma şeklidir [57]. Sırasıyla aşağıda belirtilen adımlar takip edilir.

Adım 1: Denklem 1'de kullanılan karar matrisi oluşturulur.

Adım 2: Normalizasyon işleminin yapıldığı adımdır. Denklem 6 fayda (kazanç) yönlü kriterler için, Denklem 7 ise, maliyet yönlü kriterlerin hesaplanması için kullanılmaktadır. Minimum ve maksimum değerler Tablo 5'te her bir kriter için belirlenen değerlerden elde edilmektedir.

$$x_{ij}^* = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (6)$$

$$x_{ij}^* = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (7)$$

Burada; i = (1..., m) ve j = (1..., n) ve x_{ij}^* normalize edilmiş kriter değeridir.

Adım 3: Kriterler arasındaki ilişkinin önemini belirlemek için kriterler arasındaki korelasyon katsayıları bu adımda hesaplanmaktadır. Bu aşamada Denklem 8 kullanılarak herhangi bir j kriteri ile k kriteri arasındaki Pearson korelasyon katsayısı hesaplanır. \bar{x}_j ve \bar{x}_k kriterlerin ortalamalarını ifade etmektedir.

$$\rho_{jk} = \frac{\sum_{i=1}^m (x_{ij}^* - \bar{x}_j)(x_{ik} - \bar{x}_k)}{\sqrt{\sum_{i=1}^m (x_{ij}^* - \bar{x}_j)^2 \sum_{i=1}^m (x_{ik} - \bar{x}_k)^2}} \quad (8)$$

Adım 4: Her kriterde bulunan toplam bilgi Denklem 9 ile hesaplanmaktadır. C_j bilgi miktarı, normalize edilmiş karar matrisinin sütun değerlerinin standart sapması (σ_j) kullanılarak hesaplanmaktadır.

$$C_j = \sigma_j \sum_{k=1}^n 1 - \rho_{jk} \quad (9)$$

Adım 5: Kriterlere ait nesnel ağırlıklar (w_j) Denklem 10 ile hesaplanmaktadır.

$$w_j = \frac{c_j}{\sum_{k=1}^n c_k} \quad (10)$$

2.3.3. SWARA Yöntemi (Svara Method)

SWARA yöntemi, MCDM problemlerinde kriter ağırlıklarının belirlenebilmesi için kullanılan bir tekniktir. Uzman odaklı yöntem olarak da adlandırıldığından, başlıca özelliği, kriter ağırlıkları belirlenirken kriterlerin önem derecelerinin, alanında uzman olanların fikirlerini tahmin edebilmesidir. Öncelikle kriterler, en iyiden en kötüye doğru bağıl olarak sıralanır. Burada ikinci sıradaki kriterden başlayarak kriterlerin karşılaştırmalı ağırlıkları belirlenir. En önemli kriter 1,00 puanını verilirken, diğer kriterlere atanan puanlar, en önemli kriter göre yapılmaktadır. Tüm puanlar, 0 ile 1 arasında 5'in katları olacak şekilde atanmaktadır. Karar Verici (KV) bazında yapılan karşılaştırmalı ağırlıkların ortalamalarının alınması ile her kriter için karşılaştırmalı ağırlıkların ortalamaları (s_j) hesaplanmaktadır. Örneğin s_1 , 1. önemli kriter ile 2. önemli kriter arasındaki karşılaştırmalı ağırlığın ortalama değerini göstermektedir [58-59].

Adım 1: Kriterler en önemli olandan başlanarak sıralanır. İkinci kriterden başlayarak, her bir kriter için göreceli önem düzeyleri belirlenir. Bunun için, j kriteri ile bir önceki kriter (j-1) karşılaştırılır.

Adım 2: k_j katsayısı aşağıda yer alan Denklem 11 ile belirlenir.

$$k_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ s_j + 1 & j > 1 \end{cases} \quad (11)$$

Adım 3: Önem vektörü (w_j), Denklem 12 ile hesaplanır.

$$w_j = \begin{cases} 1 & j = 1 \\ \frac{w_{j-1}}{k_j} & j > 1 \end{cases} \quad (12)$$

Adım 4: Kriterlere ait ağırlıklar (q_j) Denklem 13 ile hesaplanır.

$$q_j = \frac{w_j}{\sum_{k=1}^n w_k} \quad (13)$$

2.4. Değerlendirme Yöntemleri (Evaluation Methods)

Bu çalışmada ANP ve TOPSIS değerlendirme yöntemleri tercih edilmiştir. MCDM ile ölçülebilen veya ölçülemeyen pek çok kriteri bir arada değerlendirirken aynı zamanda da karar verme sürecinde birden fazla yargıya eş zamanlı başvurmak mümkündür. Çalışmada kullanılan ANP yönteminde, karmaşık karar verme süreçlerine gerçekçi çözümler sunulurken, aynı zamanda da kriterler ve alt kriterler arasındaki ilişkiler dikkate alınarak tek bir yöne bağlı kalmadan daha tutarlı ve hassas sonuçlar elde edilebilmektedir. TOPSIS yöntemi ise uygulama elverişliliği ile etkin sonuçlar verirken, aynı zamanda ideal çözüme yakınlık prensibini de ele almaktadır. ANP yöntemi ikili karşılaştırma temeline dayalı olduğundan, matris temelli çözümler içermektedir. TOPSIS'de ise karar matrisi oluşturularak, tüm hesaplamalar bu matris üzerinden devam etmektedir. Dolayısıyla, iki yöntem hem matematiksel yaklaşım hem de probleme uygulanan adımlar açısından önemli farklılıklar içermektedir. Böylelikle, tek bir yöntem veya benzer yaklaşıma sahip yöntemlere bağlı kalmaksızın sonuçların gürbüzlüğü/farklılığı test edilmiştir.

2.4.1. Analitik Serim Süreci (ANP) (Analytical Network Process)

Thomas L. Saaty tarafından geliştirilen bu yöntem, sorunların gruplar arası ve grup içi tüm karar yapısında bağımlılık ve geri bildirim ile bireysel ve grup kararlarını içerirken kriterler arasındaki geri besleme özelliği sayesinde birbirleriyle olan etkileşimlerini ve yönlerini belirleyerek bunların serim şeklinde modellenmesini sağlar [32-60].

ANP'nin aşamaları aşağıda özetlenmiştir [61]:

Adım 1- Modelin oluşturulması ve ağ yapısına dönüştürülmesi: Beyin fırtınası, Delphi veya nominal grup gibi yöntemlerle ağ yapısı elde edilebilir. Bu noktada problem, tüm elemanların birbiriyle haberleşebildiği bir ağ yapısına dönüştürülür.

Adım 2- İkili karşılaştırma matrisinin oluşturulması ve öncelik vektörünün belirlenmesi: Her kümedeki karar öğeleri ikili olarak karşılaştırılır. Kümelerin kendileri de rollerine ve hedeflere ulaşmadaki etkilerine ve ayrıca her kümenin kriterleri arasındaki karşılıklı bağımlılıklara göre karşılaştırılır. Kriterlerin birbirleri üzerindeki etkisi özvektör aracılığıyla sağlanabilir. Öğelerin göreceli önemi, Saaty'nin dokuz noktalı skalasına göre belirlenir (1 "eşit derecede önemli" ve 9 "son derece daha önemli"). Bu aşamada iç önem vektörleri hesaplanır.

Adım 3- Süpermatrisin oluşturulması ve bunun ağırlıklandırılmış süper matrise dönüştürülmesi: Etkileşimli bir sistemde genel öncelikleri elde etmek için, iç önem vektörlerinin süper matris adı verilen bir matrisin

belirli sütunlarına girmesi gerekir. Süper matris aslında bir sistemdeki iki küme arasındaki ilişkiyi gösteren bir bölüm matrisidir. Süpermatris aşağıdaki şekilde ifade edilebilir:

$$W_h = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ w_{21} & 0 & 0 \\ 0 & w_{32} & I \end{bmatrix} \quad (14)$$

Bu süper matriste w_{21} , hedefin kriterler üzerindeki etkilerini gösteren bir vektör, w_{32} kriterlerin alternatifler üzerindeki etkilerini gösteren bir vektör ve I birim matristir. Kriterlerin etkileşimleri, w_{22} 'nin w_n matrisi olarak w_h süper matrisine eklenmesi yoluyla. Denklem 15'teki matris ise birincil süpermatris olarak adlandırılır. Birincil süper matristeki iç önceliklerin vektörleri, elemanlar ve matrisler değiştirilerek, ağırlıklandırılmış bir süper matris olarak elde edilir. Ağırlıklı süper matris, küme matrisindeki ağırlıklı olmayan süper matris değerlerinin çarpılmasıyla hesaplanır.

$$W_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ w_{21} & w_{22} & 0 \\ 0 & w_{32} & I \end{bmatrix} \quad (15)$$

Bu adımda son olarak, Denklem 16 kullanılarak limit süpermatrisi hesaplanır.

$$\lim_{k \rightarrow \infty} W^k \quad (16)$$

Adım 4-En uygun alternatifin seçimi: İncelenen alternatiflerin nihai ağırlığına, sınırlı süper matristeki alternatiflerin sütunundan erişilebilir. Bu matriste en yüksek ağırlığa sahip bir alternatif en iyi seçenek olarak kabul edilir.

Kompleks yapıdaki ANP problemlerinde, bütün alternatiflerin neden olabileceği maliyet ve faydalarla birlikte fırsat ve riskler de birlikte değerlendirilir [62]. Fayda, fırsat, maliyet ve risk önceliklerinin sıralanması işlemi Fayda-Fırsat-Maliyet-Risk (BOCR) analizi olarak tanımlanmaktadır [63]. ANP'nin genel teorisi, bir kararın faydaları, fırsatları, maliyetleri ve riskleri ile, maliyet ve risk için olumsuz önceliklerin derecelendirmesini sunarak ele alınmasını sağlar [64].

2.4.2. TOPSIS (Topsis)

TOPSIS yöntemi, ideal ve ideal olmayan bir çözüm bulmaya ve alternatiflerin her birinin bunlara olan mesafesini karşılaştırmaya dayanır [65]. En iyi alternatif, negatif ideal çözümden en uzun geometrik mesafeye ve pozitif ideal çözümden en kısa geometrik mesafeye sahiptir [66]. TOPSIS yöntemi basitliği, uygulanabilirliği ve farklı kriterlerin olduğu durumlarda yüksek hassasiyeti nedeniyle sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. [67]. Sırasıyla aşağıdaki adımlar takip edilir.

Adım 1- Denklem 1'de kullanılan karar matrisi oluşturulur.

Adım 2- Normalize edilmiş karar matrisinin oluşturulması: Karar matrisindeki değerlerin normalizasyon işlemi

gerçekleştirilir. Normalizasyon formülü Denklem 17'de verilmiştir.

$$X_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}} \quad (17)$$

Adım 3- Normalize karar matrisinin ağırlıklandırılması: Normalize edilen karar matrisi karar verici tarafından belirlenen ağırlık değerleri (W_j) ile çarpılır (Denklem 18).

$$V_{ij} = X_{ij} \times W_j \quad (18)$$

Adım 4- Pozitif ve negatif ideal çözümlerin belirlenmesi: Pozitif ideal çözüm kümesi $A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$ şeklinde gösterilirse, bu çözümdeki her bir v_j^+ elemanı Denklem 19 ile belirlenir.

$$v_j^+ = \begin{cases} \max_i \{v_{ij}\}, & \text{Kriter } j \text{ fayda kriteri ise} \\ \min_i \{v_{ij}\}, & \text{Kriter } j \text{ maliyet kriteri ise} \end{cases} \quad (19)$$

Negatif ideal çözüm kümesi $A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$ şeklinde gösterilirse, bu çözümdeki her bir v_j^- elemanı Denklem 20 ile belirlenir.

$$v_j^- = \begin{cases} \min_i \{v_{ij}\}, & \text{Kriter } j \text{ fayda kriteri ise} \\ \max_i \{v_{ij}\}, & \text{Kriter } j \text{ maliyet kriteri ise} \end{cases} \quad (20)$$

Adım 5- Pozitif ve negatif ideal ayırım ölçülerinin hesaplanması: Alternatifler için pozitif ve negatif ideal çözümden uzaklık Denklem 21-22 ile belirlenir.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (21)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

Adım 6- İdeal çözüme göre bağıl yakınlığın hesaplanması: İdeal çözüme göreceli yakınlık Denklem 23 ile hesaplanır. Hesaplanan değerlerin sıralaması yapılır.

$$P_i = \frac{s_i^-}{s_i^- + s_i^+} \quad (23)$$

2.5. Değerlendirme Yönteminin Uygulanması (Application of the Evaluation Method)

Tablo 5'teki matris kullanılarak objektif kriter ağırlıkları belirlendikten sonra, ANP ve TOPSIS yöntemleri uygulanmıştır. ANP yönteminde BOCR (Fayda Fırsat Maliyet Risk) yaklaşımı esas alınmış, Fayda ve Fırsat kümeleri birlikte ele alınarak BCR modeli şeklinde kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan BCR formülü Denklem 24'de verilmiştir.

$$\text{BCR Formül: Fayda} + \frac{1}{\text{Maliyet}} + \frac{1}{\text{Risk}} \quad (24)$$

BCR çalışmasında öncelikle, her kümede ayrı ayrı karşılaştırmalar yapılır. Daha sonra, her bir kümeden elde edilen sonuçlar Denklem 24 ve küme ağırlıklandırma ları kullanılarak birleştirilir. BCR Modelinde formüle ait ağırlık değerleri; fayda kümesi için 1/6, maliyet kümesi için 1/3 ve risk kümesi için 1/2 olarak kullanılmıştır. Söz konusu değerler, bağıl olarak düşünülmüş olup, toplamları 1 olacak şekilde risk, maliyet ve fayda kümeleri sıralamasına göre belirlenmiştir. Son olarak, birleştirilen ham sonuçlar normalleştirilmiş ve sonuçlar alternatiflerin değerlendirilmesi için yüzde olarak kullanılmıştır [68].

Kullanılan ağırlıklandırma yöntemleri olan Entropi, CRITIC, SWARA'dan gelen kriter ağırlıkları normalize edilerek BCR modeline aktarılmıştır.

3. BULGULAR (RESULTS)

3.1. Kriterlerin Ağırlıklandırma Sonuçları (Weighting Results of Criteria)

Kriterlerin ağırlıklandırılması sırasıyla Entropi, CRITIC ve SWARA teknikleri kullanılarak yapılmıştır. Burada, objektif yöntemler olan Entropi ve CRITIC için Tablo 5 karar matrisi olarak kullanılmıştır. Entropi, CRITIC ve SWARA ile hesaplanan ağırlıklar Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Kriterlerin ağırlıkları
(The weights of criteria)

No	Entropi		CRITIC		SWARA	
	(wj)	Sıra	(wj)	Sıra	(qj)	Sıra
c1	0,0359	8	0,0976	6	0,0438	8
c2	0,2329	1	0,0932	8	0,2467	1
c3	0,0436	7	0,1115	2	0,0530	6
c4	0,0169	9	0,1122	1	0,0399	9
c5	0,0124	10	0,0731	10	0,0379	10
c6	0,0488	6	0,0885	9	0,0461	7
c7	0,1511	3	0,0968	7	0,1432	3
c8	0,2297	2	0,1078	5	0,2146	2
c9	0,0914	5	0,1079	4	0,0794	5
c10	0,1373	4	0,1114	3	0,0954	4

Entropi yöntemi sonucu elde edilen ağırlık değerleri incelendiğinde, en yüksek değer **“enerji kullanımı”** (0,2329) kriterine ait olması, bu kriterde veriler arasında daha büyük farklılıkların olduğunu göstermektedir. Entropi yöntemi sonucu en düşük ağırlık değerinin **“işletme maliyeti”** (0,0124) kriterinde olması, çalışma kapsamında ele alınan kompozit atık yönetim sistemlerinin işletme maliyetlerinin birbirine yakın olmasındandır.

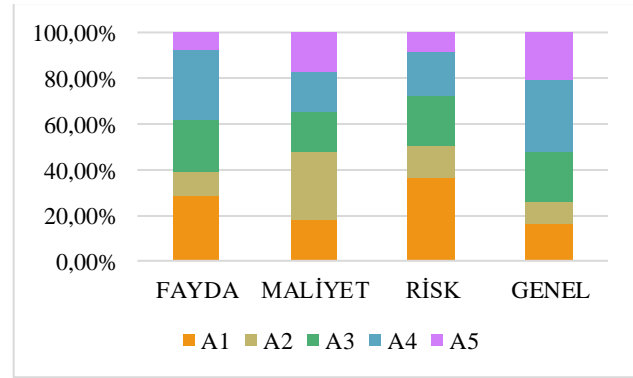
CRITIC yöntemi sonucu elde edilen ağırlık değerleri incelendiğinde, en yüksek değer **“kimyasal kullanımı”** (0,1122) kriterinde olduğu görülmüştür. Bu kriteri sırasıyla **“sağlık etkisi”** (0,1115), **“kaynakların korunumu”** (0,1114), **“çevre politikalarına ve yasaya uygunluk”** (0,1079), **“teknolojik uygunluk”** (0,1078), **“küresel ısınma potansiyeli”** (0,0976), **“malzeme kalitesi”** ((0,0968), **“enerji kullanımı”** (0,0932), **“yatırım maliyeti”** (0,0885) ve **“işletme maliyeti”** (0,0731) takip etmektedir.

SWARA yönteminde ise entropi yöntemine benzer şekilde en önemli kriter **“enerji kullanımı”** (0,2467) olarak belirlenmiştir. Enerji kullanımı kriterini sırasıyla **“teknolojik uygunluk”** (0,2146), **“malzeme kalitesi”** (0,1432), **“kaynakların korunumu”** (0,0954), **“çevre politikalarına ve yasaya uygunluk”** (0,0794), **“sağlık etkisi”** (0,0530), **“yatırım maliyeti”** (0,0461), **“küresel ısınma potansiyeli”** (0,0438), **“kimyasal kullanımı”** (0,0399) ve **“işletme maliyeti”** (0,0379) takip etmektedir.

CRITIC yöntemi sonuçlarının Entropi ve SWARA'dan farklı çıkmasının nedeninin; CRITIC yönteminde, kriterlerin standart sapmalarının ve kriterler arası korelasyonun birlikte kullanılması ve kriterlerin minimum ve maksimum yapılarına göre normalizasyon yapılmasının olduğu düşünülmektedir.

3.2. ANP Sentez Sonuçları (Anp Synthesis Results)

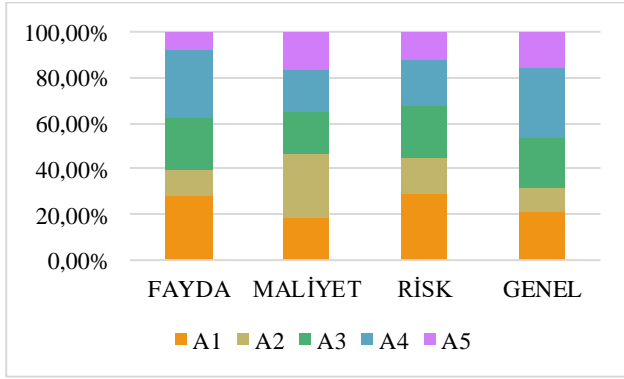
Vaks içeren kompozit atıkların yönetim sistemleri için 5 farklı alternatif belirlenmiştir. Bu alternatifler, fayda, maliyet ve risk kümelerinde; çevresel, ekonomik, teknolojik ve sosyal ölçütler esas alınarak Entropi, CRITIC ve SWARA yöntemlerine göre ağırlıklandırılarak karşılaştırılmıştır. Her bir ağırlıklandırma yöntemi ile ANP sentez sonuçlarının grafikleri Şekil 2-4'te verilmiştir.



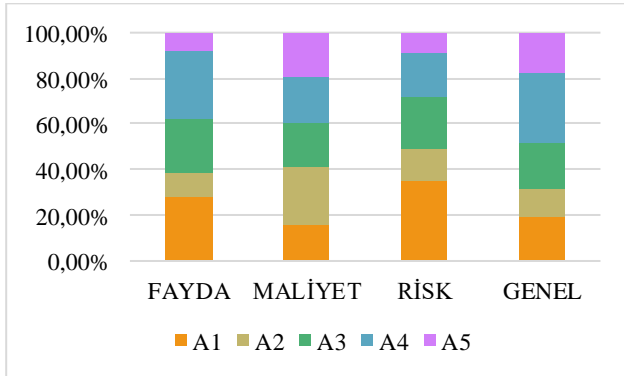
Şekil 2. ANP-Entropi sonucu
(ANP-Entropy result)

Entropi ağırlıklandırma yöntemi esas alınarak gerçekleştirilen sonuçlara göre, fayda kümesinde atık yönetimi için en ideal alternatifin Piroiliz (%30,23) yöntemi olduğu belirlenmiştir. Bunu sırasıyla; kimyasal geri dönüşüm (%28,05), insinerasyon (%23,05), mekanik geri dönüşüm (%10,90) ve depolama (%7,77) takip etmektedir. Maliyet kümesinde en maliyetli olan alternatif, mekanik geri dönüşüm yöntemidir. Mekanik geri dönüşüm (%29,83) yöntemini sırasıyla; kimyasal geri dönüşüm (%17,78), piroliz (%17,78), insinerasyon (%17,77) ve depolama (%16,84) takip etmektedir. Risk kümesinde en riskli alternatif, kimyasal geri dönüşüm (%36,24) yöntemidir. Bu yöntemi sırasıyla; insinerasyon (%22,13), piroliz (%19,47), mekanik geri dönüşüm (%13,91) ve depolama (%8,25) takip etmektedir. Genel sonuçlarda ise atık yönetimi için en ideal alternatifin, piroliz yöntemi olduğu belirlenmiştir. Piroiliz (%32,15) yöntemini sırasıyla; insinerasyon (%21,58), depolama (%20,59), kimyasal geri dönüşümü yöntemi (%16,02), ve mekanik geri dönüşüm (%9,66) takip etmektedir.

CRITIC ağırlıklandırma yöntemi esas alınarak gerçekleştirilen sonuçlara göre, fayda kümesinde, atık yönetimi için en ideal alternatifin piroliz yöntemi (%29,64) olduğu belirlenmiştir. Bu yöntemi sırasıyla; kimyasal geri dönüşüm (%27,94), insinerasyon (%22,65), mekanik geri dönüşüm (%11,65) ve depolama (%8,12) takip etmektedir. Maliyet kümesinde en fazla maliyetli olan alternatif, mekanik geri dönüşüm yöntemidir. Mekanik geri dönüşüm (%28,19) yöntemini sırasıyla; insinerasyon (%18,37), piroliz (%18,37), kimyasal geri dönüşüm (%18,37) ve depolama (%16,70) takip etmektedir. Risk kümesinde ise, en riskli alternatif kimyasal ilavesi ile geri dönüşüm yöntemidir. Kimyasal geri dönüşüm (%28,79) yöntemini sırasıyla; insinerasyon (%22,36), piroliz (%20,58), mekanik geri dönüşüm (%15,96) ve depolama (%12,31) takip etmektedir. Genel sonuçlarda ise atık yönetimi için en ideal alternatifin piroliz yöntemi olduğu belirlenmiştir. Piroliz (%31,15) yöntemini sırasıyla; insinerasyon (%21,89), kimyasal geri dönüşüm yöntemi (%20,97), depolama (%15,72) ve mekanik geri dönüşüm (%10,27) takip etmektedir.



Şekil 3. ANP-CRITIC sonucu
(ANP-CRITIC result)



Şekil 4. ANP-SWARA sonucu
(ANP-SWARA result)

SWARA ağırlıklandırma yöntemi esas alınarak gerçekleştirilen sonuçlara göre, fayda kümesinde, atık yönetimi için en ideal alternatifin, Piroliz yöntemi olduğu belirlenmiştir. Piroliz (%30,44) yöntemini sırasıyla; kimyasal geri dönüşüm (%28,05), insinerasyon (%23,02), mekanik geri dönüşüm (%10,79) ve depolama (%7,70) takip etmektedir. Maliyet kümesinde en fazla maliyetli olan alternatif, mekanik geri dönüşüm yöntemidir. Mekanik geri dönüşüm (%25,10) yöntemini sırasıyla;

insinerasyon (%19,77), piroliz (%19,77) depolama (%19,36) ve kimyasal geri dönüşüm (%15,90) takip etmektedir. Risk kümesinde ise, en riskli alternatif, kimyasal geri dönüşüm yöntemidir. Kimyasal geri dönüşüm (%35,24) yöntemini sırasıyla; insinerasyon (%22,08), piroliz (%19,63), mekanik geri dönüşüm (%14,17) ve depolama (%8,88) takip etmektedir. Genel sonuçlarda ise atık yönetimi için en ideal alternatifin piroliz yöntemi olduğu belirlenmiştir. Piroliz (%30,64) yöntemini sırasıyla; insinerasyon (%20,57), kimyasal geri dönüşüm yöntemi (%19,53), depolama (%17,43) ve mekanik geri dönüşüm (%11,83) takip etmektedir.

Özet olarak; Entropi, CRITIC ve SWARA ile ağırlıklandırılan ANP-BCR sonuçlarına göre en iyi alternatifin Piroliz (A4) olduğu görülmektedir. Piroliz yöntemi ile kompozit atıkların yönetim sisteminin bütüncül bir yaklaşım ile ele alınarak çevresel, ekonomik teknolojik ve sosyal açıdan en fazla faydayı sağladığı anlaşılmıştır.

3.3. TOPSIS Sonuçları (Topsis Results)

Ağırlıklandırması yapılan kriterlere Microsoft Office Excel programı kullanılarak TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. TOPSIS sonuçları Tablo 7'de gösterilmiştir.

Tablo 7. Entropi, CRITIC, SWARA ile ağırlıklandırılan TOPSIS sonuçları

(TOPSIS results weighted with Entropy, CRITIC, SWARA)

Alternatif	Pi	Entropi- Sıralama
A1	0,4597	5
A2	0,4802	4
A3	0,6099	2
A4	0,7571	1
A5	0,5107	3
Alternatif	Pi	CRITIC-Sıralama
A1	0,5846	3
A2	0,5253	4
A3	0,6611	2
A4	0,7972	1
A5	0,3009	5
Alternatif	Pi	SWARA-Sıralama
A1	0,4583	5
A2	0,5290	4
A3	0,6156	2
A4	0,6245	1
A5	0,5430	3

A1; Kimyasal geri dönüşüm, A2; Mekanik geri dönüşüm, A3; İnsinerasyon, A4; Piroliz, A5; Depolama

Entropi, CRITIC ve SWARA ile ağırlıklandırılan TOPSIS sonuçlarına göre en iyi alternatifin ANP-BCR yönteminde olduğu gibi Piroliz (A4) olduğu görülmektedir. Bu nedenle vaks içeren kompozit atıkların yönetiminde döngüsel ekonomi yaklaşımı açısından teknik anlamda gelişmiş ve verimli bir sisteme ihtiyaç duyulmaktadır. Kompozit atıkların pirolizinde, sistemden elde edilen tüm ürünlerin katma değeri yüksektir. Ayrıca, fazladan atık üretilmediği için de ekstra bir atık bertaraf maliyeti gerekmez. Bu sebeple karlılık oranı diğer alternatiflerle karşılaştırıldığında daha fazladır.

4. SONUÇLAR (RESULTS)

Bu çalışmada, öncelikle kriterler hem objektif hem subjektif ağırlıklandırma yöntemleriyle ağırlıklandırılmış, Entropi ve SWARA’da enerji kullanımı en yüksek ağırlığa sahipken, CRITIC’te kimyasal kullanımının öncelikli olduğu görülmüştür.

Tüm sonuçlardan ortak bir sıralama elde etmek için, ortalama sıra yöntemi kullanılarak [69] alternatifler önceliklendirilmiştir. Burada her bir alternatif için sıralamaların ortalaması alındığında, düşük değere sahip olan alternatifler öncelikli olmaktadır. Buna göre piroliz ilk sırada yer almış olup, pirolizin tercih edilebilirliği en fazla olan seçenek olmasında, hem atık özelliklerinde meydana gelebilecek değişikliklere uyum sağlayabilmesi, hem de teknolojik ve ekonomik değer oluşturabilen gelişmeye açık bir kompozit atık değerlendirme yöntemi olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Pirolizi; insinerasyon, depolama, kimyasal dönüşüm ve mekanik dönüşüm takip etmektedir. Tüm yöntemlere bakıldığında ilk 2 sıranın hep aynı olduğu ve kompozit atıklar için özellikle ısıl proseslerin ön plana çıktığı dikkat çekmektedir. Bu durum, elde edilen ilk 2 alternatif için sonuçların gürbüzlüğünü göstermektedir. Sonraki 3 alternatifin sıralaması ise yöntemlerde farklılıklar göstermiştir.

Sonuç olarak bu çalışma ile vaks içeren kompozit atıkların yönetim süreci bütünsel bir yaklaşım ile ele alınarak, çevresel, ekonomik, teknolojik ve sosyal açıdan önemli olabilecek kriterler ekseninde karşılaştırma yapılmış ve alternatiflerin sıralanarak yapılarak en uygun yönetim sistemi belirlenmeye çalışılmıştır. İleride yapılacak çalışmalarla, buradaki yaklaşımın Yaşam Döngüsü Değerlendirmesi ve Yaşam Döngüsü Maliyet Analizi gibi farklı yöntemlerle de geliştirilmesi söz konusu olacaktır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] W. Urbaniak, W. Wasiak, J. Fall, “Waxes products of thermal degradation of waste plastics—obtaining, capabilities, and application”, *Archives of Waste Management and Environmental Protection*, 6, 71-78, 2007.
- [2] G. V. Webber, **Wax characterization by instrumental analysis**, Master Thesis, University of Stellenbosch, Institute for Polymer Science Department of Chemistry, 2000.
- [3] W. R. Turner, D. S. Brown, D. V. Harrison, “Properties of paraffin waxes”, *Industrial & Engineering Chemistry*, 47(6), 1219-1226, 1955.
- [4] F. H. MacLaren, “Evaluation of quality of paraffin wax”, *Industrial & Engineering Chemistry*, 42(10), 2134–2141, 1950.
- [5] J. Rybicka, A. Tiwari, G. Leeke, “Technology Readiness Level Assessment of Composites Recycling Technologies”, *Journal of Cleaner Production*, 112, 1001-1012, 2016.
- [6] M. R. Mansor, S. M. Sapuan, A. Hambali, E. S. Zainudin, A. A. Nuraini, “Materials selection of hybrid bio-composites thermoset matrix for automotive bumper beam application using topsis method”, *Advances in Environmental Biology*, 3138-3442, 2014.
- [7] F. M. Al-Oqla, S. M. Sapuan, M. R. Ishak, A. A. Nuraini, “A Model for Evaluating and Determining the Most Appropriate Polymer Matrix Type for Natural Fiber Composites”, *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*, 20(3), 191–205, 2015.
- [8] A. Singh S. Avikal, A. Sharma, R. Verma, “Selection of suitable metal matrix composite for design application using MCDM approach”, *Materials Today: Proceedings*, in press, 2021.
- [9] A. M. Cunliffe, P. T. Williams, “Characterisation of products from the recycling of glass fibre reinforced polyester waste by pyrolysis”, *Fuel*, 82(18), 2223-2230, 2003.
- [10] K. Bartholomew, **Fiberglass Reinforced Plastics Recycling Report**, 12-04, 2004.
- [11] A. Hedlund-Astrom, **Model for End of Life Treatment of Polymer Composite Materials**, Doctoral Thesis, KTH Royal Institute of Technology, Department of Machine Design, 2005.
- [12] K. Larsen, “Recycling wind turbine blades, renewable energy focus”, *Renewable Energy Focus*, 9(7), 70-73, 2009.
- [13] E. Aynur, **İstanbul’da Oluşan Kentsel Katı Atıklar için Yakma ve Gazlaştırma Sistemlerinin Karşılaştırmalı Analizi**, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2011.
- [14] Y. Yanga, R. Booma, B. Irionb, D. V. Heerdenb, P. Kuiper, H. D. Wita, “Recycling of composite materials”, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 53-68, 2012.
- [15] N. Vijay, V. Rajkumara, P. Bhattacharjee, “Assessment of Composite Waste Disposal in Aerospace Industries”, *Procedia Environmental Sciences*, 35, 563–570, 2016.
- [16] I. Delvere, M. Iltiņa, M. Shanbayev, A. Abildayeva, S. Kuzhambardieva, D. Blumberga, “Evaluation of polymer matrix composite waste recycling methods”, *Environmental and Climate Technologies*, 23, 168 – 187, 2019.
- [17] M.A. Alao, O.M. Popoola, T.R. Ayodele, “A novel fuzzy integrated MCDM model for optimal selection of waste-to-energy-based-distributed generation under uncertainty: A case of the City of Cape Town, South Africa”, *Journal of Cleaner Production*, in press, 2022.
- [18] A.E. Torkayesh, V. Simic, “Stratified hybrid decision model with constrained attributes: Recycling facility location for urban healthcare plastic waste”, *Sustainable Cities and Society*, 77, 103543.
- [19] A. Gaur, H. Prakash, K. Anand, G. Kumar, A. Hussain, “Evaluation of Municipal Solid Waste Management Scenarios using Multi-Criteria Decision Making under Fuzzy Environment”, *Process Integration and Optimization for Sustainability*, in press, 2022.
- [20] T. Huang, Y. Tang, Y. Sun, C. Zhang, X. Ma, “Life cycle environmental and economic comparison of thermal utilization of refuse derived fuel manufactured from landfilled waste or fresh waste”, *Journal of Environmental Management*, 304, 114156, 2022.
- [21] B.G.K.M. Alblooshi, S.Z. Ahmad, M. Hussain, “Sustainable management of electronic waste: Empirical evidences from a stakeholders’ perspective”, *Business Strategy and the Environment*, in press, 2022.

- [22] X. Wailoni, S.Swain, S.Lafanama, K.Muduli, "Analytical Approach for Prioritizing Waste Management Practices: Implications for Sustainable Development Exercises in Healthcare Sector", *International Journal of Social Ecology and Sustainable Development*, 13(1), 12, 2022.
- [23] V.K. Manupati, M.Ramkumar, V.Baba, A.Agarwal, "Selection of the best healthcare waste disposal techniques during and post COVID-19 pandemic era", *Journal of Cleaner Production*, 281, 125175, 2021.
- [24] A.Soni, P.K.Das, M.J.Sarma, "Application of MOORA Method for Parametric Optimization of Manufacturing Process of Floor Tiles Using Waste Plastics" *Process Integration and Optimization for Sustainability*, in press, 2021.
- [25] Z.O.Saravani, M.K.Kalashami, A.Bakhshipour, I.Bagheri, C.Psompoulos, "Critical analysis of rural waste management weaknesses" *International Journal of Humal Capital Urban Management*, 6(3), 263-276, 2021.
- [26] A.Chauhan, S.P.Singh, "Selection of healthcare waste disposal firms using a multi-method approach" *Journal of Environmental Management*, 295, 113117, 2021.
- [27] A.Fetanat, M.T.ayebi, G.Shafipour, "Management of waste electrical and electronic equipment based on circular economy strategies: navigating a sustainability transition toward waste management sector" *Clean Technologies and Environmental Policy*, 23, 343-369, 2021.
- [28] F.Zhang, Y.Ju, E.D.R.S. Gonzalez, A., Wang, P.Dong, M.Giannakis, "Evaluation of construction and demolition waste utilization schemes under uncertain environment: A fuzzy heterogeneous multi-criteria decision-making approach" *Journal of Cleaner Production*, 313, 127907, 2021.
- [29] M.Mojaver, R.Hasanzadeh, T.Azdest, C.B.Park, "Comparative study on air gasification of plastic waste and conventional biomass based on coupling of AHP/TOPSIS multi-criteria decision analysis", *Chemosphere*, 286(3), 131867, 2022.
- [30] J.Sokolovic, D.Stanujkic, Z.Stirbanovic, "Selection of process for aluminium separation from waste cables by TOPSIS and WASPAS methods", *Minerals Engineering*, 173, 107186, 2021.
- [31] P. K. Patnaik, P. T. R. Swain, A. Purohit, A. "Selection of composite materials for structural applications through MCDM approach", *Materials Today: Proceedings*, 18, 3454-3461, 2019.
- [32] N. Ömürbek A. Şimşek "Analitik hiyerarşi süreci ve analitik ağ süreci yöntemleri ile online alışveriş site seçimi", *Yönetim ve Ekonomi Araştırmaları Dergisi*, 22, 306-327, 2014.
- [33] A. B. Al-Zubaidi, "Recycling of waste paraffin wax by the addition of SiO₂ nano-powders to improve thermal conductivity: thermal conductivity; waste paraffin wax; SiO₂ nano powders", *Engineering and Technology Journal*, 37(9A), 369-373, 2019.
- [34] Z. Wang, X. Li, G. Zhang, Y. Lv, C. Wang, F. He, C. Yang C. "Thermal management investigation for lithium-ion battery module with different phase change materials", *RSC Advances*, 7(68), 42909-42918, 2017.
- [35] R. Sommerville, P. Zhu, M. A. Rajaeifar, O. Heidrich, V. Goodship, E. Kendrick, "A qualitative assessment of lithium ion battery recycling processes", *Resources, Conservation and Recycling*, 165, 105219, 2021.
- [36] T. Kükreer, **Taşınabilir elektronik aygıtların atık pillerinden lityum ve kobalt geri kazanımı**, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.
- [37] G. Oliveoux, L. Dandy, G.A. Leeke, "A step-change in the recycling of composite materials", **4th International Carbon Composites Conference**, Arcachon Fransa, May 2014.
- [38] H. I. Abdel-Shafy, M. Mansour, M. "Solid waste issue: Sources, composition, disposal, recycling, and valorization", *Egyptian Journal of Petroleum*, 27, 1275-1290, 2018.
- [39] S. Evangelisti, C. Tagliaferri, R. Clift, P. Lettieri, R. Taylor, C. R. Chapman, "Life cycle assessment of conventional and two-stage advanced energy-from-waste technologies for municipal solid waste treatment", *Journal of Cleaner Production*, 100, 212-223, 2015.
- [40] F. Meng, E. Olivetti, Y. Zhao, J. Chang, S. Pickering, J. McKechnie, Comparing life cycle energy and global warming potential of carbon fiber composite recycling technologies and waste management options", *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6, 9854-9865, 2018.
- [41] S. R. Chandrasekaran, B. K. Sharma, B.K. "From waste to resource", *Plastics to Energy*, 345-364, 2019.
- [42] N. A. Shuaib, P. T. Mativenga, "Energy demand in mechanical recycling of glass fibre reinforced thermoset plastic composites", *Journal of Cleaner Production*, 120, 198-206, 2016.
- [43] R. A. Witik, R. Teuscher, V. Michaud, C. Ludwig, J. A. E. Månson, "Carbon fibre reinforced composite waste: an environmental assessment of recycling, energy recovery and landfilling" *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 49, 89-99, 2013.
- [44] J. N. Hahladakis, C. A. Velis, R. Weber, E. Iacovidou, P. Purnell, "An overview of chemical additives presents in plastics: Migration, release, fate and environmental impact during their use, disposal, and recycling", *Journal of Hazardous Materials*, 344, 179-199, 2018.
- [45] L. Roes, M. K. Patel, E. Worrell, C. Ludwig, "Preliminary evaluation of risks related to waste incineration of polymer nanocomposites", *Science of the Total Environment*, 417-418, 76-86, 2012.
- [46] R. Miandad, M. Barakat, A. S. Aburiazza, M. Rehan, A. Nizami, "Catalytic pyrolysis of plastic waste: A review" *Process Safety and Environmental Protection*, 102, 822-838, 2016.
- [47] S. K. Gopalraj, T. Karki, "A review on the recycling of waste carbon fibre/glass fibre-reinforced composites: fibre recovery, properties, and life-cycle analysis", *SN Applied Sciences*, 2, 1-21, 2020.
- [48] P. A. Dong, C. Azzaro-Pantel, A. Cadène, "Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste management", *Resources Conservation and Recycling*, 133, 63-75, 2018.
- [49] N. A. Ross, L. Roberts, J. Leith, W. Woodland, **Lithium Recovery Process from Spent Batteries**, Chancellor's Honors Program Projects, 2020.
- [50] J. Tang, J., **A cost-benefit analysis of waste incineration with advanced bottom ash separation technology: from a system perspective for a Chinese municipality**, Master of Thesis, Guanghan. Weiterbildungszentrum der TU Wien, 2012.

- [51] P. McKendry, P. **Costs of incineration and non-incineration energy from waste Technologies**, Greater London Authority Technical Report, Energy from Wastes, 2008.
- [52] M. Solis, S. Silveira, “Technologies for chemical recycling of household plastics - A technical review and TRL assessment”, *Waste Management*, 105, 128-138, 2020.
- [53] G. Oliveux, L. Dandy, A. G. Leeke, “A step-change in the recycling of composite materials”, Delft University of Technology the Netherlands, Faculty of Industrial Design Engineering, 2014.
- [54] M. Stamenovic, D. Kovačević, V. Alivojvodić, S. Putić, “Thermal treatment of composite wastes for energy recovery”, *Zastita Materijala*, 61(1), 13-18, 2020.
- [55] T. Thiounn, R. C. Smith, “Advances and approaches for chemical recycling of plastic waste”, *Journal of Polymer Science*, 58, 1347-1364, 2020.
- [56] S. Vinodh, M. Prasanna, N. Hari Prakash, “Integrated Fuzzy AHP-TOPSIS for selecting the best plastic recycling method: A case study”, *Applied Mathematical Modelling*, 38(19-20), 4662-4672, 2014.
- [57] B. Bulğurcu, “Çok Nitelikli Fayda Teorisi ile Critic Yöntem Entegrasyonu: Akıllı Teknoloji Tercih Örneği”, *Uluslararası Toplum Araştırmaları Dergisi*, 13(19), 2019.
- [58] E. A. Adalı, A. Işık, “Bir tedarikçi seçim problemi için SWARA ve WASPAS yöntemlerine dayanan karar verme yaklaşımı”, *International Review of Economics and Management*, 5(4), 56-77, 2017.
- [59] V. Kersulienė, E. Kazimieras, Z. Turskis, “Selection of rational dispute resolution method by applying new step-wise weight assessment ratio analysis (Swara)”, *Journal of Business Economics and Management*, 11(2), 243-258, 2010.
- [60] T. L. Satty, “Decision making the Analytic Hierarchy and Network Processes (AHP/ANP)”, *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(1), 1-35.
- [61] S. Kheybari, F.M. Rezaie, H. Farazmand, “Analytic network process: An overview of applications”, *Applied Mathematics and Computation*, 367, 124780, 2020.
- [62] T. Saaty, M. S. Özdemir, “Negative Priorities In The Analytic Hierarchy Process”, *Mathematical and Computer Modelling*, 37, 1063-1075, 2003.
- [63] İ. Peker, B. Birdoğan, M. Tanyas M. Ar, “ANP/BOCR analizi ile lojistik merkez yer seçimi: Türkiye örneği”, *Journal of Intelligent Fuzzy Systems*, 30(4), 2383-2396, 2016.
- [64] T. L. Satty, “Fundamentals of the analytic network process — multiple networks with benefits, costs, opportunities and risks”, *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, 13(3), 348-379, 2004.
- [65] J. Papathanasiou, N. Ploskas, “TOPSIS. Springer Optimization and its Applications”, *Multiple Criteria Decision Aid*, 1-30, 2018.
- [66] M. Qaradaghi, J. P. Deason, “Analysis of MCDM methods output coherence in oil and gas portfolio prioritization”, *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 8, 617-640, 2108.
- [67] Z. Ceylan, S. Gürsev, “AHP ve TOPSIS Yöntemleri ile Bilgi Teknolojileri Projelerinde Scrum-Kanban-Şelale Uygulamaların Karşılaştırılması”, *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 13, 3, 2020.
- [68] A. Özkan, “Evaluation of healthcare waste treatment/disposal alternatives by using multi-criteria decision-making techniques”, *Waste Management and Research*, 31(2), 141-149, 2013.
- [69] J. Brodny, M. Tutak, “Assessing sustainable energy development in the central and eastern European countries and analyzing its diversity”, *Science of The Total Environment*, 801, 149745, 2021.