



Bulanık TOPSIS Yöntemiyle Rüzgar Türbin Kanat Atıkları İçin En Uygun Bertaraf Yönteminin Belirlenmesi: Bandırma Örneği

Determination of the Most Appropriate Disposal Method for Wind Turbine Blade Waste by Fuzzy TOPSIS Method: Bandırma Case

¹Samet ÖZTÜRK  ²Kübra ATALAY 

^{1,2} Bursa Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 16310, Bursa

¹samet.ozturk@btu.edu.tr, ²kubraatalay71@gmail.com

Araştırma Makalesi/Research Article

ARTICLE INFO

Article history

Received : 31 May 2023

Accepted : 7 August 2023

Keywords:

Bandırma, Wind Turbine
Blade Waste, Fuzzy
TOPSIS

ABSTRACT

In this study, it is aimed to determine the most appropriate method of disposal of blade waste, which is prominent in the literature, with a Multi-Criteria Decision Making method selected for wind turbines that will expire in the near future. For this purpose, the Fuzzy TOPSIS method was applied. In order to implement Fuzzy TOPSIS in the study, a questionnaire study was conducted with 5 experts in solid waste management to evaluate the relevant criteria. For the study, a wind power plant in Bandırma region, which is close to the end of its life, is taken as an example. As a result of the study, the suitability of the disposal methods of wind turbine blade wastes are as follows, reuse in art and buildings, use as aggregate in concrete, energy production in cement factories and disposal in landfills, respectively. It is thought that this study will be beneficial to wind farm operators, municipalities and turbine blade manufacturers.

© 2023 Bandırma Onyediy Eylül University, Faculty of Engineering and Natural Science. Published by Dergi Park. All rights reserved.

MAKALE BİLGİSİ

Makale Tarihleri

Gönderim : 31 Mayıs 2023

Kabul : 7 Ağustos 2023

Anahtar Kelimeler:

Bandırma, Rüzgar Türbin
Kanat Atıkları, Bulanık
TOPSIS

ÖZET

Bu çalışmada, yakın gelecekte ömrünü dolduracak rüzgar türbinleri için seçilen Çok Kriterli Karar Verme yöntemi ile literatürde öne çıkan kanat atıklarının en uygun bertaraf yönteminin belirlenmesi amaçlanmaktadır. Bu amaçla Bulanık TOPSIS yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada Bulanık TOPSIS'in uygulanabilmesi için katı atık yönetimi konusunda uzman 5 kişi ile ilgili kriterlerin değerlendirilmesi için anket çalışması yapılmıştır. Çalışma için Bandırma bölgesinde ömrünün sonuna yaklaşan bir rüzgar santrali örnek alınmıştır. Çalışma sonucunda, rüzgar türbini kanat atıklarının bertaraf yöntemlerinin uygunlukları sırasıyla sanat ve binalarda yeniden kullanım, betonda agrega olarak kullanım, çimento fabrikalarında enerji üretimi ve düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmesi şeklindedir. Bu çalışmanın rüzgar santral işletmecilerine, belediyelere ve türbin kanat üreticilerine faydalı olacağı düşünülmektedir.

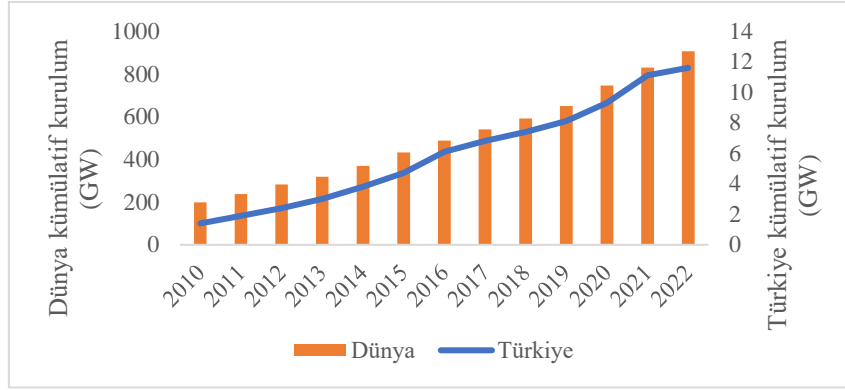
© 2023 Bandırma Onyediy Eylül Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi. Dergi Park tarafından yayınlanmaktadır. Tüm Hakları Saklıdır.

1. GİRİŞ

Günümüzde enerjiye olan talep her geçen gün artış göstermektedir. Enerji ihtiyacının büyük bir kısmı fosil yakıtların yakılmasıyla karşılanmaktadır. Fosil yakıt yüksek oranlarda karbon ve hidrokarbon içeriğine sahip olan kömür, doğalgaz ve petrol gibi doğal enerji kaynaklarına verilen isimdir. Ayrıca fosil yakıtların tüketimi nüfus ve ekonomik büyümeye bağlı olarak hızlı şekilde artmaya devam etmektedir. Fosil yakıtların yanması ekosistemde olumsuz etkilere neden olmaktadır. Sera gazı emisyonları, hava kirliliği, fosil yakıt kaynaklarının tükenmesi ve yüksek enerji talebi ile enerji sorunlarının üstesinden gelmek için sürdürülebilir ve temiz enerji sistemleri ile yenilenebilir ve alternatif yakıtların geliştirilmesi gereklidir.

Yenilenebilir enerji; sürdürülebilirliği olan doğal kaynaklardan elde edilen enerjiler olarak tanımlanmaktadır. Yenilenebilir enerjiler; güneş, biyokütle, rüzgar, dalga ve jeotermal enerjisi gibi doğada kendiliğinden var olan kaynaklardan elde edilmektedir. Bu kaynaklar, fosil enerji kaynaklarının tersine zamanla tükenmez ve kömür, benzin, doğalgaz gibi yenilenemeyen enerjilere alternatiftirler. Farklı alanlarda kullanımları mümkündür.

Rüzgar enerjisi, sera etkisi yaratan emisyonların azaltılmasını sağlayan en yaygın yenilenebilir enerji kaynaklarından birini temsil etmektedir. Fosil yakıtların çevreye olan etkileri nedeniyle son yirmi yılda rüzgar enerjisine talep oldukça artmıştır. 2001 yılında küresel rüzgar enerjisi kurulumu 24 GW iken, 2022 yılı itibarıyla 906 GW kurulum ile küresel olarak neredeyse 45 kat olmuştur [1]. Türkiye’de ise 2022 yılı sonu itibarıyla 11 GW’I aşan rüzgar enerjisi kurulu gücün yaklaşık %11’lik kısmını oluşturmaktadır [2, 3]. Şekil 1 dünyada ve Türkiye’de rüzgar enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimini göstermektedir.



Şekil 1. Türkiye’de ve dünyada rüzgar enerjisi kurulu gücünün yıllara göre değişimi [1, 2].

Türkiye’de ve dünyada enerji ihtiyaçlarının artmasıyla birlikte binlerce rüzgar türbini santralinin faaliyette olduğu ve gün geçtikçe faaliyette olan türbin sayısının artacağı ön görülmektedir. Diğer bir yandan, rüzgar türbinleri ortalama 20 yıllık bir ömre sahiptir ve kullanım ömürleri bittikten sonra sökülüp çoğunlukla katı atık depolama sahalarında bertaraf edilmektedir. Bu da yaşam döngülerinin sonunda rüzgar türbini kanat atıklarının çevresel bir yük oluşturduğunu göstermektedir. Rüzgar türbin kanatları cam veya karbon elyafların termoset reçinelerle takviye edilmiş dayanıklı kompozit malzemelerden üretilmektedir [4]. Bu da rüzgar türbin kanatlarının kolaylıkla geri dönüşümünü zorlaştırmaktadır. Aynı zamanda hacimsel olarak çok geniş alanlar kaplamaları rüzgar türbin kanat atıklarının depolama sahalarında bertarafı konusunda da olumsuz bir durum oluşturmuştur. Bu soruna bir çözüm sağlamak için ülkeler çeşitli uygulamalar başlatmıştır. Örneğin, Avusturya, Finlandiya, Almanya ve Hollanda’da rüzgar türbin kanat atıklarının katı atık depolama sahalarında bertarafı yasaklanmıştır [5]. Bunun yanında rüzgar türbin kanatlarının geri dönüştürülebilir malzemelerden yapılması için birçok çalışma başlatılmış ve devam etmektedir [6].

Dünyada rüzgar türbin katı atıklarının birikim tahminiyle alakalı çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Buna göre dünyada 2050 yılında yıllık 2,9 milyon ton ve kümülatif olarak 2050 yılına kadar 43 milyon ton rüzgar türbin kanat atıklarının birikeceği belirtilmiştir [7]. Türkiye’de ise 2020-2039 yılları arasında birikecek rüzgar türbin kanat atığı 80.500 ton olarak belirlenmiştir [8]. Ortaya çıkacak bu kanat atıklarının ekonomiye katkı sağlayabilmesi ve çevresel olumsuz etkilerinin minimum indirgenebilmesi için de literatürde birçok çalışma bulunmaktadır. Jensen ve Skelton (2018) rüzgar türbin kanat atıkları için geri kazanım ve geri dönüşüm metodlarını araştırmış ve mekanik ve termo-kimyasal yöntemler önermiştir [9]. Beton içerisinde değerlendirme, enerji geri kazanımı, yeniden sanat ve bina yapılarında kullanım gibi yöntemler literatürde sıkça araştırılmıştır. Bu çalışmada, rüzgar türbin kanat atıklarının en uygun şekilde bertarafını araştırmak için çok kriterli karar verme yöntemlerinden biri uygulanmıştır. Örnek bir çalışma için de Balıkesir ili Bandırma ilçesinde bulunan bir rüzgar türbin santralinde yakın gelecekte ömrünü tamamlayacak olan rüzgar türbini kanat atıkları temel alınmıştır. Çok kriterli karar verme metodu uygulanırken beş katı atık yönetimi uzmanına kriterlerin ağırlıkları ve alternatiflerin ağırlıkları ile karşılaştırmalı anket çalışması uygulanmıştır. Alternatiflerin verilerle desteklenebilecek karşılaştırmaları bu şekilde elde edilmiştir. Son olarak alternatifler öncelik sırasına göre Çok Kriterli Karar Verme yöntemlerinden biri olan Bulanık TOPSIS yöntemi uygulanarak belirlenmiştir.

Bu çalışmanın amacı, Türkiye'de yakın gelecekte kullanımdan kaldırılacak olan kanat atıklarının en uygun bertaraf yöntemini belirlemektir. Bu çalışmanın yenilikçilik özelliği ise Türkiye'de ilk kez bir santral üzerinde en uygun rüzgar türbin kanat atık bertaraf metodunun belirlenmiş olmasıdır.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

Literatürde rüzgar türbin kanat atıklarının geri dönüşüm yöntemleriyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Ramirez-Tejeda vd. (2017), ABD'de rüzgar türbini kanatlarının imhasının mevcut durumunu araştırmış ve depolama sahalarında bertaraf yönetiminin maliyet açısından en uygun olduğunu, malzeme ve enerji geri kazanımı için termal mekanik ve kimyasal süreçlerde olumsuzluklar taşıdığını belirtmiştir [10]. Atık maddeler enerji üretmek için bir kaynak olarak değerlendirilebilir. Özellikle çimento fabrikalarında alternatif yakıtların ikamesi olarak, doğalgaz ve kömür gibi birincil yakıtlar yerine atıktan türetilmiş yakıtlar, plastik, tekstil vb. malzemelerin enerji eldesinde kullanılması tasarruf sağlamaktadır. Türbin kanat atıkları enerji üretmek için veya atığın hacmini azaltmak için yüksek sıcaklıkta yakılabilir. Kanat atıklarının mekanik geri dönüşümü sırasında düşük enerji ihtiyacı gerektirdiğinden ve kimyasal işlemler içermediğinden dolayı tercih sebebidir. Piroliz, enerji geri kazanımı ve akışkan yatak işlemi gibi termal işlemlerle geri dönüşüm sağlayan yöntemleri inceleyen çalışmalar da vardır. Nagle et al. (2020) çimento üretiminde yakıtın yerini almak için türbin kanat atığının kullanılması, depolama işleminden 6 kat daha faydalı olduğunu ileri sürmektedir [11]. Fonte ve Xydis (2021) ilk olarak çeşitli rüzgar türbin kanatları üreticisi olan firmaların kanat üretiminde kullandıkları materyallere değinmiştir [12]. Daha sonrasında mekanik öğütme ile geri kazanılmış ürünler, piroliz ve solvoliz ile geri kazanılmış ürünler ve geri kazanılan malzemelerin uygulamalarından bahsedilmiştir [12].

Rüzgar türbini kanat atıklarının kimyasal veya termal işlemlerle küçük parçacıklara öğütülmesi, parçalanmasıyla ya da toz haline getirilmesiyle yeni malzemelerin üretiminde dolgu maddesi olarak kullanılmak üzere geri dönüştürülmesine yönelik birçok yöntem geliştirilmiştir [13]. Yağlakçı ve Çeliktaş (2018) rüzgâr türbin kanatlarının bünyesinde bulunan kompozit malzemelerin dayanım özelliklerin artırılması için çalışmalar yapmışlardır [14]. Mevcutta bulunan ve sonradan eklenen malzemelerin oluşturdukları numunelerin test edilmesiyle karşılaştırma gerçekleştirmişlerdir [14]. Sonuçlar olarak mevcutta bulunan cam-karbon hibrit malzemenin cam elyaf takviyeli malzemelere göre dayanımının daha yüksek durumda olduğu saptanmıştır [14]. Cousins ve diğ. (2019), cam elyaf takviyeli termoplastik reçine ile üretilen kompozit rüzgar türbini kanat bileşenlerinin geri dönüşümünün fizibilitesi araştırılmıştır. Rüzgar türbin kanat atıklarının öğütülmüş hali çekme deneyine tabi tutulmuştur [15]. Çözünme ile ayrılmış bir kompozit parçadan geri kazanılan cam elyaf fitillerinin, aynı materyalin işlenmemiş numunelerinden alınan fitillere kıyasla eşit gerilme mukavemetine ve sadece %12 azaltılmış sertliğe sahip olduğu gösterilmiştir [15]. Mamanpush vd. (2018), geri dönüştürülmüş rüzgar türbini malzemesi ve bir poliüretan yapıstırıcı kullanılarak üretilen bir dizi ikinci nesil kompoziti araştırmıştır [16]. Geri dönüştürülmüş malzeme ilk önce bir çekiçli değirmende çeşitli elek boyutlarında ufalanmış, reçineleştirilmiş ve nihai kalınlığa kadar sıkıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir [16]. Daha sonrasında parçacık boyutu, nem içeriği ve reçine içeriği, geri dönüştürülmüş kompozitlerin özellikleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiş. Elde edilen sonuçlarda, katma değerli yüksek performanslı kompozit üretmek için rüzgar türbini kanadının geri dönüştürülmesinin mümkün olduğunu göstermiştir [16]. Böylelikle atıkların kullanım ömrünün tamamlanmasından sonra yeniden değerlendirilerek mimari dekorasyon, oyun alanları, köprüler, yürüyüş yollarında kullanılabilir olduğu belirtilmiştir [16].

Bazı araştırmacılar da, betonda ve beton-polimer kompozitte dolgu maddesi olarak mekanik olarak işlenmiş türbin kanat atıklarının kullanımını incelemiştir [17]. Mekanik işleme (toz haline getirme veya parçalama) ile ilgili sorun, türbin kanat atıklarının büyük bir kısmının termoset plastiklerden oluşmasıdır. Türbin kanatlarının öğütülmüş hali betonda kullanıldığında, betonun yüksek alkalinite özelliği nedeniyle zarar görür [17]. Dayanımı ve sertliği düşük olan reçine parçacıkları betonun basınç dayanımı önemli oranda azaltır [17]. Türbin kanat atıklarının daha büyük parçalara ayrılarak beton içerisinde kullanılması, küçük yüzey alanı ve daha az enerji gerektirdiğinden avantaj sebebidir. Bu çalışmalara örnek olarak cam elyaf takviyeli polimer (GFRP) kompozit malzemelerden yapılmış bir rüzgar türbini kanat kabuğu, mekanik olarak küçük parçalara ayrıldıktan sonra beton karışımlarındaki kaba agreganın hacimce %5 ve %10'unu değiştirmek için kullanılmış [13]. İğnelerin (ince çubuk şeklindeki türbin kanat atıkları) taze betonun stabilitesini ve işlenebilirliğini olumsuz yönde etkilemediği tespit edilmiştir. İğnelerin eklenmesi betonun basınç, çekme ve eğilme dayanımı üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olmamasına rağmen, enerji emme kapasitesinde (tokluk) kontrol numunelerinde 1,2 J'den %10 artışa sebep olduğu sonucuna varılmıştır [13]. Baturkin vd. (2021) yaptıkları çalışmada, rüzgar türbin kanatlarını toz, agrega ve lif olarak üç farklı şekilde betona ilave ettikten sonra etkileri çeşitli analiz yöntemleri ile incelemiştir [18]. Yapılan araştırmanın sonucunda saf türbin kanat atığı tozunun dahil edilmesi, esas olarak yüksek organik içeriğin, özellikle de çimento hidratasyon kinetiğini engelleyen polisakkarit içeren ahşaptan dolayı betonun basınç ve eğilme kapasitesinde önemli bir azalmaya neden olduğu, türbin kanat atığının elyaf takviyesi olarak betona dahil edildiğinde, basınç dayanımında gözle görülür bir düşüş olmaksızın eğilme kapasitesinde %15'e varan bir artış sağlandığı, agrega şeklinde eklenmesinin, pürüzsüz yüzeyi nedeniyle daha düşük basınç ve eğilme mukavemetleri ile sonuçlanmış ve bu da matris ile daha düşük yapışmaya ve düşük mukavemetli ara yüzey geçiş bölgesi yaratılmasına yol açtığı gözlenmiştir [18].

Türkiye’de rüzgar türbin kanat atıklarının yönetimiyle alakalı yapılmış çalışmalar oldukça az sayıdadır. İzmir şehrindeki tüm santrallerde açığa çıkacak rüzgar türbin kanat atıklarını kapsayan çalışma beton içerisinde agrega olarak değerlendirme yönteminin İzmir şehri için uygun olduğunu belirlemiştir [8]. İzmir Kalkınma Ajansı (2021) rüzgar türbin kanadı geri kazanım tesisi fizibilitesi çalışması yapmıştır. Yapılan çalışmada türbin kanat atıkları çimento üretim tesisleri için yakıtlara dönüştürülerek ekonomik kazanımın mümkün olduğu belirtilmiştir [4]. Rüzgar türbin kanat atıkları yukarıda da bahsedildiği üzere birçok farklı yöntemle bertaraf edilebilmektedir. Bu durumda her bir yerel koşul için en uygun yöntemin belirlenmesi gereksinimi doğmaktadır. Literatürde çok alternatifli ve birden çok kriterin etkili olduğu karar verme durumunda Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) metodlarının kullanıldığı görülmektedir. Korkmazer (2015) tehlikeli atık oluşumu söz konusu olan tesislerde atığın bertarafını sağlayan yükleniciler arasında ekonomik ve çevreye zararı en az olan bertaraf firmasının seçilmesi konusunda çalışma yapmıştır [19]. Çalışmada ÇKKV yöntemlerinden Analitik Serim Süreci kullanılmıştır. İlk olarak yüklenici firma ağırlıkları hesaplanmış ve kurulan matematiksel model kullanılarak tehlikeli atık türlerinden hangisinin hangi atık bertaraf firmasına verileceği belirlenmiştir [19]. Hanan vd. (2012), İngiltere’de bulunan Isle of Wight adasında atık kağıt yönetimi için ÇKKV yöntemini kullanmıştır [20]. Bu çalışmada bir panel düzenlenmiş olup, yedi adet geri kazanım, geri dönüşüm ve bertaraf alternatifi sunulmuştur [20]. Ayrıca yedi adet ekonomik, çevresel ve sosyal kriter ışığında değerlendirmeler yapılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda geri kazanım ve gazifikasyon yüksek puanlar almıştır. ÇKKV yönteminin atık yönetimi kararında etkili bir yöntem olduğu sonucuna varılmıştır [20]. Ekmekçioğlu vd. (2010) ÇKKV yöntemlerinden Bulanık AHS ve Bulanık TOPSİS kullanarak kentsel katı atıkların bertaraf yöntemleri ve yer seçimi belirlenmiştir [21]. Bertaraf yöntemi için 10 kriter ve 4 alternatif, yer seçimi için 8 kriter ve 4 alternatif kullanılmıştır [21]. Eskandari vd. (2012) İran’da Marydasht bölgesinin katı atıkları için en iyi bertaraf yeri seçimi çalışmaları yapmıştır [22]. Entegre ÇKKV yöntemiyle katı atık bertaraf yeri ekonomik, kültürel ve çevresel yönünden değerlendirilmiştir [22]. Günümüzde meydana gelen hızlı değişimlerden dolayı karar verme süreçlerinde belirsizlikler oluşmaktadır. Bu belirsizlikler karar vermeyi zorlaştırmaktadır. Karar verme sürecinde gerekli olan verilerin toplanması için doğru ve yeterli zaman olmadığından dolayı bilimsel yöntemlerden yararlanılarak analizlerin yapılması gerekmektedir [23]. Bu çalışmada literatürde bulunan rüzgar türbin kanat atıkları için en uygun bertaraf yönteminin tespiti eksikliği metodolojik yeni bir yaklaşımla giderilmeye çalışılmış ve rüzgar santrallerinin yoğun olarak bulunduğu Bandırma bölgesinde ilk defa uygulaması gerçekleştirilmiştir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu kısımda uygulanan yöntem ve örnekleme alanı açıklanmıştır. İlk olarak ÇKKV yöntemlerinden seçilen yöntem açıklanacaktır, daha sonrasında örnekleme alanı detaylarıyla anlatılacaktır.

3.1. Bulanık TOPSİS Yöntemi

Karar verme süreci genel olarak üç aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada karar verici, var olan problemin detaylarını, karar değişkenlerini, alternatifleri ve problemi çözmek için gereken parametreleri belirlemelidir. İkinci aşamada, ilk aşamada toplanan bilgilere göre seçenekler belirlenir. Son aşama ise, kararın istenen sonuçla tutarlı olup olmadığını görmektir [24].

ÇKKV yöntemiyle iki veya daha fazla kriterlerin birbirleriyle karşılaştırılması sağlanmaktadır. Seçim sırasında birden fazla kriterin değerlendirilmesi sonucu kriterli karar verme olarak adlandırılmaktadır. Literatüre bakıldığında birden fazla ÇKKV yöntemi mevcuttur. Ancak bu yöntemlerde problemlerin taşıdığı özellikler hemen ortaktır [25].

Çok kriterli karar verme yöntemleri arasında AHP, SAW, TOPSİS, ELECTRE, PROMETHEE, MAUT, ANP, VIKOR, MOORA MACBETH literatürde sıkça kullanılanlar olarak sayılabilir. Bu çalışmada Bulanık TOPSİS yöntemi ÇKKV metodu olarak kullanılmıştır. Bulanık TOPSİS yöntemi, bulanık ortamlarda çok sayıda kriter, alternatif grup ve az sayıda karar verici ile problem çözmeye uygun çok esnek bir yöntem olduğu için bu çalışmada tercih edilmiştir [26].

Bulanık TOPSİS yönteminde, problemlerin çözümü sırasına sözel değişkenlerinde kullanılabilmesi önemli bir alternatif oluşturmaktadır. Sözel veya dilsel değişkenler, günlük konuşmada kullanılan kelimelerden oluşur. Kelimeler genellikle sayısal ifadelerden daha belirsizdir. Sözel değişkenler bu nedenle nicel olarak tam olarak açıklanamayan ve net olmayan karmaşık sistemleri tanımlamak için kullanılır. Bazı durumlarda, gözlemlenen sorunları modellemek için kullanılan kesin veriler yeterli değildir. Bireysel tercihleri yansıtan kararlar ve yargılar belirsiz olma eğilimindedir ve kesin sayısal verilerden ziyade sözlü ifadeler daha açıklayıcı olmaktadır. Bu nedenle problemler içerisinde bulunan kriterlerin dereceleri ve ağırlıkları sözel ifadelerle açıklanmaktadır. Sözel değişkenler, bulanık bir ortamda kriterlerin ağırlıklarını belirlemek ve kriterlere göre alternatifleri belirlemek için kullanılır [27].

Bulanık TOPSİS yöntemi gerçekleştirilirken ilk olarak karar verici konumundaki kişiler, karar kriterlerinin önem derecelerini subjektif olarak değerlendirirler. Karar vericiler daha sonra alternatifleri karar kriterlerine göre değerlendirir. Karar vericiler, sözel değişkenleri kullanarak karar kriterlerini ve alternatifleri değerlendirir. Son olarak dilsel değişkenlerle yapılan tahminler üçgen veya yamuk bulanık sayılara dönüştürülerek gerekli hesaplamalar yapılır [28].

Bulanık ortamlarda grup kararı verilirken bulanık TOPSİS yöntemi kullanılmaktadır. Bu yöntem ÇKKV problemlerinde nitel ve nicel verilere uygulanabilir ve anlaşılabilir. Bulanık TOPSİS yöntemi, bulanık ortamlarda çok sayıda kriter, alternatif grup ve az sayıda karar verici ile problem çözmeye uygun çok esnek bir yöntem olarak tanımlanmaktadır [26]. Bulanık TOPSİS yöntemi sayesinde alternatiflerin değerlendirilmesi yapılırken doğru bir biçimde kararların alınmasına olanak sağlamaktadır [29]. Bulanık TOPSİS yönteminin adımları aşağıdaki gibidir [30].

1. Aşama: Karar verici gruplar oluşturularak kriterler belirlenir. Karar vericilerden bir komite oluşturulur ve değerlendirme kriterleri belirlenir.

$\tilde{a}_{ij}^T = i$. alternatifin kriter değerini ifade etmektedir. T tane karar vericiden meydana gelmiş olan grupta, alternatiflerin kriter değerleri;

$$\tilde{a}_{ij} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \tilde{a}_{ij}^T \tag{1}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır.

2. Aşama: Karar kriterlerinin ağırlıkları için uygun olan dilsel değişkenler belirlenerek alternatiflerin değerlendirilmesi yapılır.

$\tilde{n}_j^T = j$. karar kriterinin önem ağırlığını belirtmek üzere, T tane karar vericiden meydana gelen grupta, karar kriterlerinin önem ağırlıkları

$$\tilde{n}_j = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \tilde{n}_j^T \tag{2}$$

eşitliği kullanılarak hesaplanır.

Bulanık TOPSİS yönteminin matris olarak gösterimi ise aşağıdaki gibidir. İlk önce m*n boyutlarında Denklem 3'tekine benzer bir karar matrisi oluşturulmalıdır.

$$\tilde{O} = \begin{matrix} & T_1 & T_2 & \dots & T_p \\ \begin{matrix} A_1 \\ A_2 \\ \dots \\ A_m \end{matrix} & \begin{bmatrix} \tilde{a}_{11} & \tilde{a}_{12} & \dots & \tilde{a}_{1p} \\ \tilde{a}_{21} & \tilde{a}_{22} & \dots & \tilde{a}_{2p} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \tilde{a}_{m1} & \tilde{a}_{m2} & \dots & \tilde{a}_{mp} \end{bmatrix} & & & \end{matrix} \tag{3}$$

$$\tilde{N} = [\tilde{n}_1, \tilde{n}_2, \dots, \tilde{n}_p]$$

Burada \tilde{a}_{ij} ve \tilde{n}_j dilsel değişkenlerini, T_1, T_2, \dots, T_p karar kriterlerini, A_1, A_2, \dots, A_m alternatiflerini, $\tilde{a}_{ij} = T_j$ kriterine göre A_i alternatifinin bulanık kriter değerini ve $\tilde{n}_j = T_j$ kriterinin bulanık önem ağırlığını ifade etmektedir. Dilsel değişkenler,

$\tilde{a}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$ ve $\tilde{n}_j = (a_{j1}, b_{j2}, c_{j3})$ şeklinde ifade edilmektedir. \tilde{O} matrisi bulanık karar matrisi ve \tilde{N} matrisi ise bulanık ağırlıklar matrisi olarak ifade edilmektedir.

Tablo 1. Kriterlerin değerlendirilmesinde kullanılan dilsel ifadeler ve bulanık sayı değer karşılıkları [26].

Dilsel İfadeler	Bulanık Sayı Değer Karşılıkları
Oldukça Önemsiz	0.0, 0.1, 0.3
Önemsiz	0.1, 0.3, 0.5
Orta	0.3, 0.5, 0.7
Önemli	0.5, 0.7, 0.9
Oldukça Önemli	0.7, 0.9, 1.0

Tablo 2. Alternatif değerlendirilmesinde kullanılan dilsel ifadeler ve bulanık sayı değer karşılıkları [26].

Dilsel İfadeler	Bulanık Sayı Değer Karşılıkları
Çok Düşük	0,1,3
Düşük	1,3,5
Yeterli	3,5,7
Yüksek	5,7,9
Çok Yüksek	7,9,10

3. Aşama: Karar vericilerin belirlediği sözel değişkenler üçgen veya yamuk bulanık sayılara dönüştürülür.

$\tilde{U} = [\tilde{u}_{ij}]_{m \times n}$ normalize edilmiş bulanık karar matrisinin matematiksel ifadesi.

\tilde{u}_{ij} aşağıda gösterilmiş olan iki yöntemle hesaplanmaktadır.

$$\tilde{u}_{ij} = \left(\frac{a_{ij}}{c_j^*}, \frac{b_{ij}}{c_j^*}, \frac{c_{ij}}{c_j^*} \right), j \in B, c_j^* = \max_i c_{ij} \tag{4}$$

$$\tilde{u}_{ij} = \left(\frac{a_j^-}{c_{ij}}, \frac{a_j^-}{b_{ij}}, \frac{a_j^-}{a_{ij}} \right), j \in B, a_j^- = \min_i a_{ij} \tag{5}$$

B fayda kriteri kümesini ifade ederken, C maliyet kriterini ifade etmektedir. Normalize olmuş bulanık karar matrisinin hesaplanmasında, karar kriteri fayda kriteri tüm sütunda bulunan elemanların, bu sütunda bulunan en büyük değere oranlanması yapılır. Karar kriteri maliyet kriteri hesaplanmasında ise her sütundaki ilk elemanların minimum değeri alınır. Normalizasyon işleminde üçgen bulanık sayıların $[0,1]$ aralığında olması gerekmektedir [31].

4. Aşama: Bulanık karar matrisinden normalize edilmiş bulanık karar matrisi elde edilir.

$\tilde{I} = [\tilde{i}_{ij}]_{m \times n}$, $i = 1, 2, \dots, m, j = 1, 2, \dots, n$ normalize olmuş bulanık karar matrisini hesaplanması.

$\tilde{i}_{ij} = \tilde{u}_{ij} \times \tilde{n}_j$ bulanık ağırlık matrisi ile bulanık karar matrisinin çarpımı, ağırlıklı normalize bulanık karar matrisi olarak ifade edilmektedir.

5. Aşama: Pozitif ve negatif ideal çözümlerin ifade edilmesi

$A^* = (\tilde{i}_1^*, \tilde{i}_2^*, \dots, \tilde{i}_n^*)$ pozitif ideal çözümün ifade edilmesi.

$A^- = (\tilde{i}_1^-, \tilde{i}_2^-, \dots, \tilde{i}_n^-)$ negatif ideal çözümün ifade edilmesi.

$\tilde{i}_j^* = (1, 1, 1)$ ve $\tilde{i}_j^- = (0, 0, 0)$ olarak kabul edilmektedir.

6. Aşama: Alternatiflerin bulanık negatif ve pozitif uzaklıklarının hesaplanması.

$$d_i^* = \sum_{j=1}^n d(\tilde{i}_{ij}, \tilde{i}_j^*) \quad i = 1, 2, 3 \dots, m; j = 1, 2, 3 \dots, n \quad (6)$$

$$d_i^- = \sum_{j=1}^n d(\tilde{i}_{ij}, \tilde{i}_j^-) \quad i = 1, 2, 3 \dots, m; j = 1, 2, 3 \dots, n \quad (7)$$

7. Aşama: Yakınlık katsayılarının hesap edilmesi.

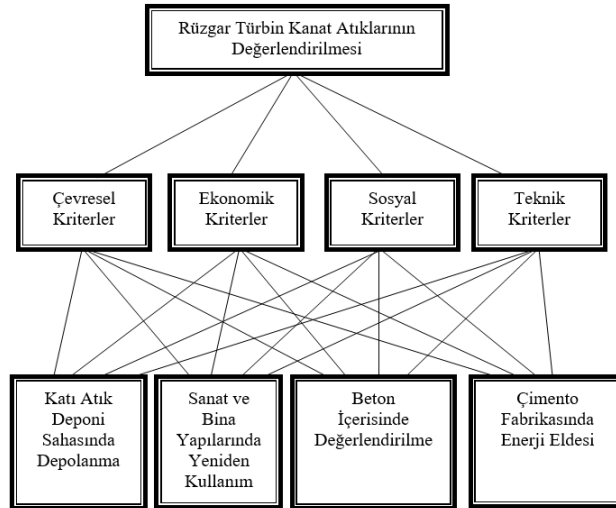
$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^* + d_i^-}$ $i = 1, 2, 3 \dots, m$ yakınlık katsayısı $[0, 1]$ arası değer almaktadır. Bu katsayılar kullanılarak alternatiflerin sıralamaları yapılır.

8. Aşama: Yakınlık katsayıları azdan çoğa doğru sıralama yapılır. Alternatiflerin tercihleri de buna göre belirlenir.

$$CC_n > CC_m > CC_k > \dots > CC_x$$

3.2. Karar Verme Sürecini Oluşturan Faktörler

Bu çalışmada rüzgar türbin santrallerinde kullanım ömrünü tamamlamış olan kanatların değerlendirilmesi amacıyla, beş uzman karar verici tarafından, 14 kriter baz alınarak 4 farklı alternatif arasından anket yöntemiyle en uygun olanının seçimi yapılmıştır. Karar verme sürecinde uzman karar vericilerin genel bilgi edinmesi için aşağıdaki şekil oluşturulmuştur.



Şekil 2. Bu çalışma için uygulanan karar ağacı.

Karar verme sürecinde beş uzman karar verici tarafından anket sorularına göre değerlendirmeler yapılmıştır. Karar vericilerin Tablo 3'te özellikleri belirtilmiştir.

Yapılan bu çalışma kapsamında türbin kanat atıklarının yeniden değerlendirilme alternatiflerinin kıyaslanması için karar verme kriterleri literatürde bahsedilen kriterlerden faydalanılarak belirlenmiştir [8, 20-21]. Bu kriterler; çevresel kriterler, ekonomik kriterler ve sosyal kriterler ve teknik kriterlerden oluşmaktadır. Bu kriterlerin altında toplamda on dört alt-kriter bulunmaktadır.

Çevresel Kriterler

Çevresel Sürdürülebilirlik ($Ç_{kl}$): Doğal kaynakları tüketmeden, verimlilik ve sürekliliğin çevre ile uyumlu bir şekilde günümüz ihtiyaçlarının karşılanmasıdır.

Tablo 3. Uzmanların özellikleri.

Uzman Karar Vericiler	Uzmanlık alanı	Tecrübe
Uzman Karar Verici 1	İnşaat Mühendisi - Doktora	Katı atık yönetim uzmanı, 5 yıl
Uzman Karar Verici 2	Çevre Mühendisi	Atık yönetimi, 10 yıl
Uzman Karar Verici 3	Çevre Mühendisi	Biyogaz-Katı atık entegre tesislerinin işletilmesi, bakım-onarım, projelendirme ve kurulum, 9 yıl
Uzman Karar Verici 4	Çevre Yüksek Mühendisi	Katı atık yönetimi, 4 yıl
Uzman Karar Verici 5	Çevre Yüksek Mühendisi	Çevre danışmanlık, 3 yıl

Hava Kirliliği, Su, Toprak Kirliliğine Etki (Ç_{k2}): Alternatiflerin faaliyeti sırasında hava, su ve toprağa kirleticilerin salınımı ile ekosisteme ve yaşayan canlılara zarar vermesidir.

Biyçeşitliliğe etki (Ç_{k3}): İnsanların yaşamını devam ettirebilmesi için yaşanan çevrede temiz su kaynakları, temiz hava, elverişli toprak ve besinlerin bulunması gerekmektedir. Kirlilik, iklim değişikliği ve doğal kaynakların düşünülmenden tüketilmesi biyçeşitliliği azaltmaktadır.

Arazi Alan Kullanımı (Ç_{k4}): Alternatiflerin kurulacağı alan ve faaliyetin içeriğine bağlı olarak gerekli olabilecek arazi alanını ifade etmektedir.

Ekonomik Kriterler

İlk Yatırım Maliyeti (E_{k1}): Tesiste kullanılacak olan makine ve ekipmanların maliyeti, tesisin kurulacağı alanın maliyeti, eğer kurulu bir tesis ise işletme faaliyete başlamadan önce yapılacak olan onarım maliyetleri vb. ilk yatırım maliyetlerini kapsamaktadır.

İşletme ve Bakım Maliyeti (E_{k2}): Tesiste çalışacak olan işçi sayısı, rüzgar türbin kanat atıklarının işletmeye taşınması, yakıt ihtiyacı, kat edilen mesafe, çalıştırılacak işçilerin ücretleri, işletme sırasında kullanılan malzemelerin bakım ve onarımı, işletme masraflarını kapsamaktadır.

Karlılık Oranı (E_{k3}): Alternatifler arasında işletmenin faaliyeti sonucunda elde edilen ürünün piyasaya sürülmesiyle elde edilen kar.

Sosyal Kriterler

Mevzuata Uygunluk (S_{k1}): İşletme faaliyetlerinin yasalar, normlar, kanunlar, yönetmelikler, genelgeler, tebliğ ve tüzükler vb. açısından uygunluğunu ifade etmektedir.

İstihdam (S_{k2}): Alternatiflerin uygulanması halinde oluşturulacak iş gücü miktarını ifade etmektedir.

Kamuoyu Tepkisi (S_{k3}): Uygulanacak olan alternatiflerde halkın olumlu ya da olumsuz tepkisini ifade etmektedir.

Teknik Kriterler

Uygulama Kolaylığı (T_{k1}): Alternatiflerin hayata geçirilmesi sırasında karşılaşılan zorluk derecesini ifade etmektedir.

Ulaştırılmaya (Ulaşım) Yakınlık (T_{k2}): Alternatifin faaliyeti sonucunda oluşturduğu ürün, malzeme, enerji vb. alıcıya transferi sırasında kat edilen mesafedir.

Süreklilik (T_{k3}): İşletmenin faaliyet ömrünün devamlılığını belirtmektedir.

Kullanım Yaygınlığı (T_{k4}): Gerçekleşecek olan faaliyetten elde edilen ürünün kullanım yaygınlığını ifade etmektedir.

3.3. Alternatifler ve Çalışma Alanı

Bu çalışma kapsamında literatürde en çok belirtilen ve sahada uygulanan alternatiflerin temel alındığı örnek bir çalışma yapılmıştır. Çalışma alanı olarak yıllık ortalama rüzgar hızı 10 m/s civarında olan Balıkesir ilinin Bandırma ilçesinde bulunan bir rüzgar santrali temel alınmıştır [32]. Rüzgar türbinlerinin faydalı ömürleri ortalama 20 yıl olarak bilinmektedir. Bu çalışma için ömrünü tamamlamaya en yakın olan bir santral seçilmiştir. Bahse konu rüzgar santrali 2006 yılında üretimi geçmiş olduğundan 2026 yılında ömrünü tamamlaması öngörülmektedir. Rüzgar türbin kanatları da rüzgar türbininin bir parçası olarak ömrünü tamamladığında türbinden ayrıştırılarak atık hale dönüşmektedir. Bahse konu rüzgar santrali yaklaşık (40.36, 28.05) koordinatları dolaylarında bulunmaktadır. Bu santralde 20 adet 1,5 MW kapasiteli rüzgar türbini ve toplamda 60 adet rüzgar türbin kanadı bulunmaktadır. Her bir türbin kanadının yaklaşık 5 ton ağırlığında olduğu düşünülmektedir. Yakın gelecekte bu santralden yaklaşık olarak toplamda 300 ton rüzgar türbin kanat atığı çıkması beklenmektedir. Bu atığın büyük bir bölümünü cam fiber, geri kalan kısımlarını termosetplastik atık oluşturacaktır.

Rüzgar türbin kanatlarının kullanım ömrü sonunda bertaraf edilmesi için belirlenen kriterlerin de dikkate alınmasıyla birlikte dört farklı alternatif belirlenmiştir. Bunlar; katı atık deponi sahasında depolama, sanat ve bina yapılarında yeniden kullanım, beton içerisinde değerlendirilme ve çimento fabrikasında enerji eldesidir.

Katı Atık Deponi Sahasında Depolama (A₁): Rüzgar türbini kanadının atık bir malzeme olduğu düşünüldüğünde, bunların bertarafı için ilk alternatif düzenli depolamadır. Rüzgar türbini kanat atığını bertaraf etmek için düzenli depolama alanı kullanmak, arazi edinimi, atık malzemenin sınıflandırılması, çevre yasaları, izin süreci, vergiler ve hibeler vb. gibi çeşitli değerlendirmelerin yapılması gerekmektedir.

Rüzgar türbin kanat atıklarının katı atık deponi sahalarında depolanması için geniş bir alana ihtiyaç vardır. Ayrıca kanat atıkları termoplastik malzemeden yapıldığından dolayı yıllarca deforme olmadan kalabilmektedir. Bu da katı

atık deponi sahalarının kısa sürede dolmasına ve yeni alan ihtiyacının oluşmasına neden olacaktır. Bandırma'da bulunan rüzgar santralinden çıkabilecek rüzgar türbin kanat atıkları için iki adet depolama sahası alternatifi bulunmaktadır. Bunlar Balıkesir ilinde bulunan Balıkesir katı atık deponi sahası ve Bursa ilinde bulunan Hamitler katı atık deponi sahalarıdır. Her iki depolama sahası da Bandırma'daki örnek rüzgar santraline yaklaşık 110 km civarında bir mesafede bulunmaktadır.

Enerji Kazanımı (A_2): Rüzgar türbin kanatlarını bertaraf yöntemlerinden bir diğeri de yakmadır. Özellikle, çimento fabrikalarında çimento üretimi sırasında yüksek oranda enerji tüketimi mevcuttur. Bu yüzden çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak rüzgar türbin kanatlarının kullanılması dikkate alınacak bir husustur. Rüzgar türbin kanat atıklarının çimento fabrikalarında alternatif yakıt olarak kullanılması fosil yakıtların tüketimini azaltmakla birlikte atığın değerlendirilmesini ve çevrenin korunmasına katkı sağlamaktadır. Rüzgar türbin kanat atıklarının materyal olarak kalori değerinin yüksek olması (11-14 kJ/kg) avantaj sağlamaktadır [33]. Ancak, kanat atıklarının yakılması sonrasında oluşan suyla hemen reaksiyona girebilen içerisinde kalsiyum oksit bulunan küller çevresel risk oluşturmaktadır. Oluşan külün içerisinde bulunan tehlikeli maddelerin buharı çalışanların sağlığı açısından tehlike oluşturmaktadır [34]. Bandırma'da bulunan örnek rüzgar santralinden çıkacak kanat atıklarının değerlendirilebileceği bir adet çimento üretim tesisi bulunmakta olup santrale olan mesafesi 108 km civarındadır (Tablo 4).

Sanat ve Bina Yapılarında Yeniden Kullanım (A_3): Rüzgar türbin kanat atıklarının yeniden kullanımı atık hiyerarşisindeki adımlardan birisidir. Rüzgar türbin kanat atığının oyun alanlarında, mobilyalarda, bisiklet koyma alanları oluşturmada, yürüyüş yollarında, köprü vb. alanlarda kullanımı söz konusudur [16]. Bu uygulamada maliyet açısından büyük bir ihtiyaç söz konusu olmayıp rüzgar türbin kanat atığı yeniden değer kazandırılarak ekonomiye katma değer sağlayacaktır. Bandırma'da bulunan rüzgar santrali için yeniden kullanımı gerçekleştirebilecek bir firma bulunmaktadır ve santrale olan mesafesi 11,6 km'dir (Tablo 4).

Beton İçerisinde Değerlendirilme (A_4): Rüzgar türbin kanat atıklarının bir diğeri değerlendirme yöntemi de beton içerisinde katkı maddesi olarak kullanılmasıdır. Rüzgar türbin kanat atıklarının betonda kullanılacak büyük parçalar halinde kesilmesi, kanat atığını öğütmek ve toz haline getirmekten daha az enerjiye ihtiyaç duymaktadır. Kanat atıklarının yapılan bazı çalışmalarda 6 mm çapında ve 100 mm uzunluğunda betona ilave edilmesi ile betonun çekme mukavemetinde % 22 ile % 33 civarında artışa neden olmuştur [18]. Ayrıca rüzgar türbin kanat atıklarının betonda toz, agrega ve lif halinde kullanıldığında eğilme kapasitesinde, mukavemetinde ve basınç dayanımında artışlara neden olmaktadır [18]. Rüzgar türbin kanat atıklarının beton içerisinde kullanımı hem atığın tamamen geri kazanılmasına hem de betona katı sağladığından önemli bir bertaraf alternatiftir. Bandırma'da örnek olarak alınan rüzgar santraline yakın mesafede altı adet beton üretim tesisi bulunmakta olup ortalama mesafeleri 20 km civarındadır (Tablo 4).

Tablo 4'te Bandırma'daki örnek rüzgar santralinde kanat atıklarının değerlendirilebileceği alternatifler ve alternatiflerin santrale olan mesafeleri gösterilmiştir.

Tablo 4. Örnek santralden çıkacak türbin kanat atıkları için alternatifler ve örnek santrale olan mesafeleri.

Alternatifler	Firmalar	Mesafe (km)
Katı Atık Deponi Sahasında Depolanma	Hamitler Kent Çöplüğü	113 km
	Balıkesir Katı Atık Deponi Sahası	111 km
Çimento Fabrikasında Enerji Eldesi	Çimento Fabrikası	108 km
Sanat ve Bina Yapılarında Yeniden Kullanım	Bandırma Yapı Üretim Tesisi	11,3 km
Beton İçerisinde Değerlendirme	Beton Üretim Tesisi 1	22,5 km
	Beton Üretim Tesisi 2	17,9 km
	Beton Üretim Tesisi 3	23,9 km
	Beton Üretim Tesisi 4	15,2 km
	Beton Üretim Tesisi 5	14,8 km
	Beton Üretim Tesisi 6	20,2 km

4. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışma ile rüzgar türbin kanat atıklarının en uygun şekilde bertaraf edilmesinin Bulanık TOPSİS yöntemiyle gerçekleştirilmesi konu edilmiştir. Örnek bir çalışma olarak da ömrünü tamamlamaya yakın olan Bandırma'daki bir rüzgar santrali temel alınmıştır. Bulanık TOPSİS uygulanarak elde edilen kriter ağırlıkları, beş uzmanın değerlendirmeleri sonucu ortaya konulmuştur. Tablo 5 kriterlerin uzmanlar tarafından belirlenen ortalama ağırlıklarını göstermektedir. Buna göre en yüksek etkiye sahip olan kriterlerin çevresel sürdürülebilirlik, hava, su ve toprak kirliliğine etki ve biyoçeşitliliğe etki kriterleri olduğu görülmektedir. Mevzuata uygunluk, uygulama kolaylığı ve ulaştırmaya yakınlık kriterleri ise orta yüksek ağırlığa sahip olarak bulunmuştur. Geriye kalan kriterlerin tümü olan arazi alan kullanımı, ilk yatırım maliyeti, işletme ve bakım maliyeti, karlılık oranı, istihdam, kamuoyu tepkisi ve süreklilik gibi kriterler ise orta önemli olarak bulunmuştur. Belirlenen kriterlerinin hiçbirinin düşük önem değerini almaması dikkat edilen bir husus olmuştur. Ayrıca, çevresel kriterlerin ağırlıklarının ekonomik, sosyal ve teknik kriterlere göre daha yüksek bulunması önemli bir diğeri bulgudur. Bandırma'daki santral için alternatiflerin kriterlere göre uzmanlar tarafından değerlendirilmesinin sonucundaki bulanık sayı

Tablo 5. Kriter ağırlıkları.

Kriterler	Dilsel İfadeler	Bulanık Sayı Değerleri
Çevresel Sürdürülebilirlik (K1)	Yüksek	(0,7, 0,9, 1,0)
Hava, Su ve Toprak Kirliliğine Etki (K2)	Yüksek	(0,7, 0,9, 1,0)
Biyçeşitliliğe Etki (K3)	Yüksek	(0,7, 0,9, 1,0)
Arazi Alan Kullanımı (K4)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
İlk Yatırım Maliyeti (K5)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
İşletme ve Bakım Maliyeti (K6)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
Karlılık Oranı (K7)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
Mevzuata Uygunluk (K8)	Orta Yüksek	(0,5, 0,7, 0,9)
İstihdam (K9)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
Kamuoyu Tepkisi (K10)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
Uygulama Kolaylığı (K11)	Orta Yüksek	(0,5, 0,7, 0,9)
Ulaştırılmaya Yakınlık (K12)	Orta Yüksek	(0,5, 0,7, 0,9)
Süreklilik (K13)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)
Kullanım Yaygınlığı (K14)	Orta	(0,3, 0,5, 0,7)

değerleri Tablo 6'da gösterilmiştir. Buna göre katı atık deponi sahalarında depolanma hiçbir kriter bazında en yüksek değere sahip olamamış iken, işletme ve bakım maliyeti kriterine göre yüksek bir bulanık değer elde ettiği görülmüştür. Çimento fabrikasında enerji üretimi ise arazi alan kullanımı, ilk yatırım maliyeti, istihdam, süreklilik ve kullanım yaygınlığı kriterlerinde en yüksek değerlere sahip iken hava, usu ve toprak kirliliğine etki ve ulaştırmaya yakınlık anlamında düşük değerler almıştır. Sanat ve bina yapılarında yeniden kullanım alternatifi ise hava, su ve toprak kirliliğine etki, biyçeşitliliğe etki, işletme ve bakım maliyeti, mevzuata uygunluk, kamuoyu tepkisi ve ulaştırmaya yakınlık kriterlerinde en yüksek değerlere sahip iken istihdam, süreklilik ve kullanım yaygınlığı kriterlerinde düşük değerler almıştır. Son olarak beton içerisinde değerlendirme alternatifi çevresel sürdürülebilirlik, karlılık oranı, uygulama kolaylığı ve ulaştırmaya yakınlık kriterlerinde en yüksek değerleri elde ederken süreklilik ve kullanım yaygınlığı kriterlerinden düşük değerler almıştır.

Tablo 7'de Bandırma'da bulunan örnek santraldeki rüzgar türbin kanat atıkları için en uygun bertaraf alternatiflerinin ağırlık değerleri ve sıralamaları verilmiştir. Bu değerler alternatiflerin Bulanık TOPSIS yöntemi sonucunda sıralanmasını temsil etmektedir. Buna göre sanat ve bina yapılarında yeniden kullanım 0,766 ile en yüksek değeri olarak ilk alternatif olarak belirlenmiştir. Bu yüksek değerin elde edilmesinin sebebi çevresel kriterlerin ağırlıklarının yüksek olmasıyla beraber sanat ve bina yapılarında yeniden kullanım alternatifinin çevresel kriterlere göre en yüksek ağırlık değerlerine sahip olmasından ileri gelmektedir. Beton içerisinde değerlendirme sanat ve bina yapılarında yeniden kullanımı az bir farkla 0,757 değeri ile takip etmekte olduğu saptanmıştır. Bu alternatif için de yüksek değer elde edilemesinin sebebi il yatırım maliyeti, karlılık oranı ve ulaştırmaya yakınlık gibi kriterlerin değerlerinin yüksek olmasından dolayıdır. Çimento fabrikasında rüzgar türbin kanat atıklarından enerji eldesi alternatifi 0,551 ağırlık değeri ile üçüncü alternatif olarak belirlenmiştir. Katı atık sahalarında depolama ise 0,051 değeri ile açık bir farkla sonuncu alternatif olarak belirlenmiştir.

Tablo 6. Alternatiflerin kriterlere göre aldığı bulanık sayı değerleri.

Alternatifler	Katı Atık Deponi Sahasında Depolanma	Çimento Fabrikasında Enerji Eldesi	Sanat ve Bina Yapılarında Yeniden Kullanım	Beton İçerisinde Değerlendirme
Çevresel Sürdürülebilirlik (K1)	(0, 2, 7)	(3, 7, 6, 10)	(5, 8, 6, 10)	(5, 9, 10)
HavaSu ve Toprak Kirliliğine Etki (K2)	(0, 3, 10)	(0, 5, 8, 10)	(5, 8, 4, 10)	(3, 8, 2, 10)
Biyçeşitliliğe Etki (K3)	(0, 5, 4, 10)	(1, 6, 2, 10)	(5, 9, 10)	(3, 8, 6, 10)
Arazi Alan Kullanımı (K4)	(0, 0, 4, 3)	(7, 9, 6, 10)	(3, 8, 8, 10)	(5, 9, 10)
İlk Yatırım Maliyeti (K5)	(0, 6, 6, 10)	(7, 9, 6, 10)	(7, 9, 4, 10)	(7, 9, 2, 10)
İşletme ve Bakım Maliyeti (K6)	(1, 7, 5, 10)	(7, 9, 2, 10)	(7, 9, 6, 10)	(5, 8, 6, 10)
Karlılık Oranı (K7)	(0, 3, 2, 10)	(3, 7, 10)	(1, 8, 4, 10)	(7, 9, 6, 10)
Mevzuata Uygunluk (K8)	(0, 4, 2, 10)	(0, 7, 10)	(7, 9, 4, 10)	(1, 7, 4, 10)
İstihdam (K9)	(0, 1, 4, 7)	(3, 7, 4, 10)	(0, 5, 10)	(3, 6, 2, 10)
Kamuoyu Tepkisi (K10)	(0, 2, 4, 10)	(1, 5, 10)	(5, 8, 8, 10)	(1, 8, 2, 10)
Uygulama Kolaylığı (K11)	(0,7,10)	(1, 8, 10)	(3, 6, 8, 10)	(3, 7, 4, 10)
Ulaştırılmaya Yakınlık (K12)	(0, 3, 9)	(0, 5, 6, 10)	(7, 9, 2, 10)	(7, 9, 2, 10)
Süreklilik (K13)	(0, 2, 2, 10)	(0, 7, 25, 10)	(0, 5, 8, 10)	(0, 6, 4, 10)
Kullanım Yaygınlığı (K14)	(0, 4, 2, 10)	(0, 6, 6, 10)	(0, 4, 2, 10)	(1, 4, 6, 10)

Bu çalışmada Bulanık TOPSIS yöntemiyle elde edilen bulgular literatürde yapılan benzer çalışmalarla kıyaslanmıştır. Yapılan bir başka çalışma sonucunda rüzgar türbin kanat atıklarının en uygun bertaraf alternatifi olarak beton içerisinde değerlendirme bulunmuşken onu deponi sahalarında bertaraf, geri dönüşüm/kazanım ve çimento fabrikasında enerji eldesi alternatifleri sırasıyla takip ettiği görülmüştür [8]. Fayyaz vd. (2023) ÇKKV yönteminin rüzgar türbin kanat atıkları için en uygun bertaraf yöntemini belirlemek için uygulanması gerektiğini belirtirken buna dair bir sıralama ortaya koymamıştır [35]. İzmir Kalkınma Ajansı (2021) rüzgar türbin kanat atıklarının bertarafı için potansiyel bertaraf yöntemlerini incelemiş ve İzmir için atıkların çimento üretim tesislerinde yakıt olarak kullanılmasının ekonomik olarak avantajlı olduğu belirtilmiştir [4]. Deeney vd. (2021)

rüzgar türbin kanat atıkları alternatiflerinin kıyaslanmasını sürdürülebilirlik indeksi kullanarak gerçekleştirmiş olup sonuç olarak sanat ve bina yapılarında yeniden kullanım en iyi alternatif olarak ve depolama sahalarında değerlendirme ise en kötü alternatif olarak bulunmuştur [36]. Bu çalışmadaki sonuçların Deeney vd. çalışması ile örtüşmekte olduğu belirlenmiştir.

Tablo 7. Bandırma’da ömrünü tamamlayacak örnek santral için rüzgar türbin kanat atığı bertaraf alternatif sıralamaları.

Alternatifler	CC _i	Sıralama
Katı Atık Sahasında Depolama-A1	0,051139	4
Çimento Fabrikasında Enerji Eldesi-A2	0,5511623	3
Sanat ve Bina Yapılarında Yeniden Kullanım-A3	0,7658335	1
Beton İçerisinde Değerlendirme-A4	0,7565195	2

5. SONUÇ

Rüzgar türbin kanat atıklarının rüzgar santrallerinin ömrünü tamamlamaya başlaması nedeniyle çevresel bir sorun teşkil etmeye başlaması katı atık depolama sahalarına alternatif bertaraf yöntemlerinin araştırılmasına yol açmıştır. Bu çalışmada rüzgar türbin kanat atıklarının bertarafı için dört alternatif bertaraf yöntemi on dört ilgili kritere göre değerlendirilmiş olup, Balıkesir ili Bandırma ilçesinde ömrünü tamamlamaya yakın bir rüzgar santrali için uygulama yapılmıştır. Çalışma sonucunda, rüzgar türbin kanat atıklarının bertaraf yöntemlerinin uygunlukları sırasıyla, sanat ve binalarda yeniden kullanım, betonda agrega olarak kullanım, çimento fabrikalarında enerji üretimi ve düzenli depolama alanlarında bertaraf edilmesi olarak tespit edilmiştir. Bu çalışma ile depolama sahalarında bertaraf metodunun uzmanlar tarafından en düşük değer verilmesi oldukça önemlidir. Çünkü mevcut durumda Türkiye’de kanat atıklarının bertarafıyla ilgili herhangi bir yönetmelik bulunmamakla beraber, en yüksek orandaki katı atık bertarafı depolama sahalarında gerçekleşmektedir. Sonuçlara göre rüzgar türbin kanat atıklarının depolama sahalarında bertarafı çevresel açıdan uygun görülmediği düşünülmektedir. Ayrıca bu atıkların ekonomiye tekrardan kazanılması mümkün olduğundan ekonomik potansiyelinden de faydalanılmamasının büyük bir hata olacağı not edilmiştir. Geri kazanımı ve yeniden kullanımı mümkün bir atık malzemesi olan rüzgar türbin kanatlarının beton içerisinde değerlendirilmesi, sanat ve bina yapılarında kullanım ve enerji geri kazanımı için kullanım gibi yöntemlerle değerlendirilmesi hem ekonomik hem de çevresel açıdan önemli olacağı kanaati oluşmuştur. Bu çalışma sonucunda elde edilen bir başka çıkarım ise literatürde farklı bölgeler için yapılan çalışmalarda farklı bertaraf alternatiflerinin ön plana çıkıyor oluşudur. Bu da bölgesel bazda kanat atıklarının sanat ve bina yapılarında geri kazanım, beton içerisinde değerlendirme veya enerji geri kazanımı alternatifleri için detaylı analiz yapıldıktan sonra uygulamaya geçilmesi gerektiğini göstermektedir. Bu çalışmanın rüzgar santral işletmecilerine, belediyelere ve türbin kanat üreticilerine faydalı olacağı düşünülmektedir.

Yazar Katkıları

Samet Öztürk: Makale konu fikri, analitik işlemler, yazımı; Kübra Atalay: Veri toplama, analitik işlemler ve yazımı.

Çıkar Çatışması

Makale yazarları aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler. Bu çalışma Kübra Atalay’ın Yüksek Lisans tez çalışmasından türetilmiştir.

KAYNAKÇA

- [1] GWEC. Global Wind Report 2023.
- [2] TÜREB. Türkiye Rüzgar Enerjisi İstatistik Raporu. 2023.
- [3] TEİAŞ. Kurulu Güç Raporları. 2022.
- [4] İzmir Kalkınma Ajansı “İzmir İli Rüzgâr Türbini Kanadı Geri Dönüşüm Tesisi Ön Fizibilite Raporu”. 2021.
- [5] Wind Europe
<https://windeurope.org/newsroom/press-releases/wind-industry-calls-for-europe-wide-ban-on-landfilling-turbine-blades/>. [Accessed: May 1 2023]
- [6] Psomopoulos, Constantinos S., et al "A review of the potential for the recovery of wind turbine blade waste materials", Recycling vol. 4, no. 1. 2019.
- [7] L. Pu, and C.Y. Barlow, "Wind turbine blade waste in 2050", Waste Management vol. 62, pp. 229-240, 2017.
- [8] S. Ozturk, F. Karipoglu "Investigation of the best possible methods for wind turbine blade waste management by using GIS and FAHP: Turkey case", Environ Sci Pollut Res vol. 30, pp. 15020–15033, 2023.
- [9] J.P. Jensen, and K. Skelton "Wind turbine blade recycling: Experiences, challenges and possibilities in a circular economy", Renewable and Sustainable Energy Reviews vol. 97, pp. 165-176, 2018.

- [10] K. Ramirez-Tejeda, D.A. Turcotte, and S. Pike "Unsustainable wind turbine blade disposal practices in the United States: A case for policy intervention and technological innovation", *New Solutions: A Journal of Environmental and Occupational Health Policy* vol. 26, no. 4, pp. 581-598, 2017.
- [11] Nagle, J. Angela et al. "A Comparative Life Cycle Assessment between landfilling and Co-Processing of waste from decommissioned Irish wind turbine blades", *Journal of Cleaner Production* vol. 277 p. 123321, 2020.
- [12] R. Fonte, and G. Xydis "Wind turbine blade recycling: An evaluation of the European market potential for recycled composite materials," *Journal of environmental management* vol. 287, p. 112269, 2021.
- [13] A. Yazdanbakhsh "Concrete with discrete slender elements from mechanically recycled wind turbine blades." *Resources, Conservation and Recycling* vol. 128, pp. 11-21, 2018.
- [14] M. Yağlıkçı, and M.S. Çeliktaş "Kompozit Rüzgâr Türbin Kanatlarının Yorulma Ömrüne ve Dayanımına Bağlı Olarak Malzeme Seçimi ve Gelecek Projeksiyonu." *Mühendis ve Makina* vol. 59, no. 690, pp. 27-44, 2018.
- [15] D.S. Cousins, et al. "Recycling glass fiber thermoplastic composites from wind turbine blades." *Journal of cleaner production* vol. 209, pp. 1252-1263, 2019.
- [16] S.H. Mamanpush, H. Li, K. Englund, and A.T. Tabatabaei "Recycled wind turbine blades as a feedstock for second generation composites". *Waste Management*, vol. 76, pp. 708-714, 2018.
- [17] M.C.S. Ribeiro, et al. "Re-use assessment of thermoset composite wastes as aggregate and filler replacement for concrete-polymer composite materials: A case study regarding GFRP pultrusion wastes." *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 104, pp. 417-426, 2015.
- [18] D. Baturkin, O.A. Hisseine, R. Masmoudi, A. Tagnit-Hamou, and L. Massicotte "Valorization of recycled FRP materials from wind turbine blades in concrete". *Resources, Conservation and Recycling*, vol. 174, p. 105807. 2021.
- [19] C. Korkmaz "Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemleri İle Atık Bertaraf Firması Seçimi", *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir*, 2015.
- [20] D. Hanan, S. Burnley, and D. Cooke "A Multi-Criteria Decision Analysis Assessment Of Waste Paper Management Options", *Waste Management*, pp. 1-8, 2012.
- [21] M. Ekmekçioğlu, T. Kaya, ve C. Kahraman "Fuzzy Multicriteria Disposal Method And Site Selection For Municipal Solid Waste", *Waste Management*, vol. 30, pp. 1729-1736, 2010.
- [22] M. Eskandari, M. Homae, and S. Mahmodi "An Integrated Multi Criteria Approach For Landfill Siting In A Conflicting Environmental, Economical And Socio-Cultural Area", *Waste Management*, vol. 32, pp. 1528-1538, 2012.
- [23] B. Doğan "Anaytic Hierarchy Process as a Multi Criteria Approach Model in Decision Making and Application of AHP Method For Selection of Mine Hunting Ship", *Naval Academy Command Naval Sciences And Engineering Institute*, 2004.
- [24] H. Güner "Fuzzy AHP and the Application for A Company's Supplier Selection Problem". *Denizli: Pamukkale University Institute of Science and Technology*, 2005.
- [25] A. Öztel "Çok kriterli karar verme sürecinde yeni bir yaklaşım". *Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi*, 156 sayfa, Ankara, 2016.
- [26] Y. Wang, and T.M.S. Elhag "Fuzzy TOPSIS method based on alpha level sets with an application to bridge risk assessment." *Expert systems with applications* vol. 31, no. 2, pp. 309-319. 2006.
- [27] Z. Başkaya, ve B. Öztürk "Bulanık TOPSIS Algoritması ile Yamuk Bulanık Sayıların Satış Elemanı Seçiminde Kullanılması", *Business and Economics Research Journal*, vol. 2, no. 2, pp. 84-85, 2011.
- [28] F. Ecer "Bulanık Ortamlarda Grup Kararı Vermeye Yardımcı Bir Yöntem: Fuzzy Topsis ve Bir Uygulama", *Dokuz Eylül Üniversitesi İşletme Fakültesi Dergisi*, vol. 7, no. 2, p. 78, 2006.
- [29] C. Chen "Extensions of the TOPSIS for Group Decision-Making under Fuzzy Environment", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 114, no. 2, p. 10447997, 2000.
- [30] H. Yılmaz "Bulanık TOPSIS ve bulanık veri zarflama analizi yöntemleri ile performans ve etkinlik değerlemesi: BISTte faaliyet gösteren işletmeler üzerine bir uygulama". *Doktora Tezi. Atatürk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, 2020.
- [31] T. Paksoy, N. Yapıcı Pehlivan, ve E. Özceylan "Bulanık Küme Teorisi", (1. Baskı), *Nobel Yayınevi, Ankara*, pp. 157-158, 2013.
- [32] *Global Wind Atlas*. <https://globalwindatlas.info/en> [Accessed July 31 2023]
- [33] *The Engineering Toolbox*. Tools and Basic Information for Design, Engineering and Construction of Technical Application. http://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html. [Accessed May 1 2023].
- [34] Sponberg, E. "Recycling Dead Boats". *Professional Boat Builder Magazine*. 1999.
- [35] Fayyaz, Samaneh, et al. "Sustainable end-of-life value chain scenarios for wind turbine blades." *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2507, no. 1. IOP Publishing, 2023.
- [36] Deeney, Peter, et al. "End-of-Life alternatives for wind turbine blades: Sustainability Indices based on the UN sustainable development goals." *Resources, Conservation and Recycling* vol. 171, p. 105642, 2021.