

## İyon Değiştirme Prosesi Kullanan Su Yumuşatma Sistemlerinde TOPSIS Karar Verme Modeliyle Mevcut En İyi Tekniklerin Seçimi

Alperen KIR\*<sup>1</sup>, Elif ŞİMŞEK<sup>2</sup>, Emrah ÖZTÜRK<sup>3</sup>, Mehmet KİTİŞ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Artvin Çoruh Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 08000, Artvin, Türkiye

<sup>2</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

<sup>3</sup>Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Çevre Koruma Teknolojileri Bölümü, 32500, Isparta, Türkiye

<sup>4</sup>Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, 32200, Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 08.09.2021, Kabul / Accepted: 11.03.2022, Online Yayınlanma / Published Online: 20.04.2022)

### Anahtar Kelimeler

İyon değiştirme,  
Mevcut en iyi teknikler  
(MET),  
Reçine,  
Su yumuşatma,  
TOPSIS

**Özet:** İmalat sanayinde kullanım amacına, prosese ve ürün üzerindeki etkilerine bağlı olarak farklı kalitelerde proses suyu gereksinimi bulunmaktadır. En yaygın kullanılan proses suyu hazırlama sistemi sertlik giderimi amacıyla katyonik iyon değiştirme reçineleri kullanan kolon sistemlerdir. İyon değiştiricilerde, proses suyu üretim maliyetlerini ve çevresel etkileri azaltmak amacıyla çeşitli mevcut en iyi teknikler (MET) uygulanabilmektedir. Bu çalışmada, katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerin çevresel performanslarını arttırabilmek amacıyla sunulan MET'lerin değerlendirilmesi ve çok ölçütlü karar verme metodu (ÇÖKVM) kullanılarak en uygun tekniklerin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda MET'ler, İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Sıralama Tercihi Tekniği (TOPSIS) kullanılarak 11 farklı değerlendirme kriterine göre önceliklendirilmiştir. Sonuç olarak eş-zamanlı sertlik sensörleri kullanımıyla rejenerasyon süreleri ve sıklıklarının optimize edilmesi katyonik iyon değiştirme reçine sistemleri için en öncelikli MET olarak belirlenmiştir.

## Selection of Best Available Techniques for Water Softening/Ion Exchange Processes Employing TOPSIS Decision Making Model

### Keywords

Best available techniques  
(BAT),  
Ion exchange,  
Resin,  
TOPSIS,  
Water softening

**Abstract:** There is a need for different qualities of process water in the manufacturing industry, depending on the purpose of use, the process and its effects on the product. The most widely used process water preparation system is column systems using cationic ion exchange resins for hardness removal. Various best available techniques (BAT) can be applied to ion exchangers to reduce process water production costs and environmental impacts. In this study, it was aimed to evaluate the BATs presented in order to increase the environmental performance of cationic ion exchange resin systems and to determine the most appropriate techniques using the multi-criteria decision making method (MCDM). In this context, BATs were prioritized according to 11 different evaluation criteria using the Ranking Preference Technique by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS). As a result, optimizing regeneration durations and frequencies using online hardness sensors was identified as the top priority BAT for cationic ion exchange resin systems.

### 1. Giriş

Su, imalat sanayinin neredeyse tamamında önemli proses girdilerinden birini oluşturmaktadır. Türkiye'de, Türkiye İstatistik Kurumu'nun (TÜİK) son verilerine göre 2018 yılı için imalat sanayinde toplam 2,9 milyar m<sup>3</sup> su tüketimi gerçekleşmiş ve bunun yaklaşık %17'si proses suyu olarak tüketilmiştir [1].

İmalat sanayide üretim ve proses özelliklerine bağlı olarak farklı miktarlarda ve kalitede su gereksinimleri bulunmaktadır. Endüstriyel tesislerde kireçle yumuşatma [2], selatlaştırma maddeleri ile yumuşatma [3], soda ile yıkama [4], aktif karbonla adsorpsiyon [4], distilasyon [4] ve ters osmoz yöntemi [5] gibi çok çeşitli proses suyu hazırlama sistemleri kullanılmaktadır. En yaygın kullanılan sertlik

\*İlgili yazar: alperenkir@artvin.edu.tr

giderimi/su yumuşatma yöntemlerinin başında katyonik iyon değiştirme reçine sistemleri gelmektedir [6]. İyon değiştirme işlemi ile birlikte ham sudan kalsiyum, magnezyum, arsenik, baryum, nitrat ve radyum gibi kirleticiler uzaklaştırılmaktadır. Su yumuşatma sistemlerinin, özellikle katyonik iyon değiştirme reçinelerin kullanıldığı sistemlerin teknik açıdan verimli bir şekilde çalıştırılmaması durumunda bazı problemler ortaya çıkmaktadır. Bunlar genel olarak; rejenerasyon sonrası oluşan yüksek tuz konsantrasyonuna sahip atıksuların deşarj ortamındaki tuzluluk yükünü arttırması, kullanılan ham suyun kimyasal özelliklerine göre kolon işletim optimizasyonunun yeterli duyarlılıkta yapılamaması, rejenerasyon sürelerinin ve sıklığının optimize edilememesi, yıkama ve durulama sularının geri kullanımının dikkate alınmaması, manuel katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerine sahip olan tesislerde fazla miktarda reçine ve tuzun kullanılması olarak sıralanabilir. Bu problemlerin sonucunda tesislerde su, elektrik ve kimyasal tüketimlerinde artışlar meydana gelmekte ve üretim maliyetlerine yansımaktadır.

Tatlı su kaynakları, endüstriyel faaliyetler sonucu kirlenmekte ve hızla tükenmektedir [7]. Bu nedenle su kaynaklarının sürdürülebilirliğinin sağlanması ve sınırlı kaynaklardan olan suyun verimli kullanımı büyük önem arz etmektedir [8]. Endüstrilerin çevresel performanslarının arttırılması, üretim maliyetlerinde tasarruf ve kaynak kullanımının azaltımı temiz üretim teknikleri ile sağlanabilir. Temiz üretim kaynak kullanımları ve kirlenmenin kaynakta önlenmesini amaçlayan proaktif bir çevre stratejisini ifade etmektedir. İmalat sanayide temiz üretim yapılandırmak ve sektörlerin temiz üretime geçişini kolaylaştırmak üzere Avrupa Birliği (AB) Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü (IPPC) bürosu tarafından 'Mevcut En İyi Teknikler (MET/BAT) Sektörel Referans Dokümanları (BREF)' hazırlanmıştır. Ancak proses suyu hazırlama sistemlerine özgü bir BREF dokümanı bulunmamaktadır. Sektörel BREF'lerin içerisinde proses suyu hazırlama sistemlerine dair MET'ler yer almaktadır. Ayrıca literatürde ve sahada su yumuşatma sistemlerine dair iyi uygulama örnekleri bulunmaktadır. Katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerinde uygun tekniklerin/MET'lerin uygulanmasıyla su, kimyasal ve enerji tasarrufu sağlanabilmekte ve alıcı su ortamlarında tuzlanma ve proses suyu üretim maliyetleri azaltımı sağlanabilmektedir [9].

Temiz üretim uygulamalarının tümünde olduğu gibi katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerinde istenen tasarruflara, teknik ve çevresel faydalara erişebilmek için hangi MET'lerin öncelikli olarak uygulanacağına ya da teknoloji-ekonomik açıdan en uygun MET'e karar vermek de oldukça önemlidir. Bu noktada çok ölçütlü karar verme metodları (ÇÖKVM) MET'lere karar vermede belirlenen kriterlere göre teknik bir sıralama sunabilmektedir. ÇÖKVM farklı alt kriterler göz önüne

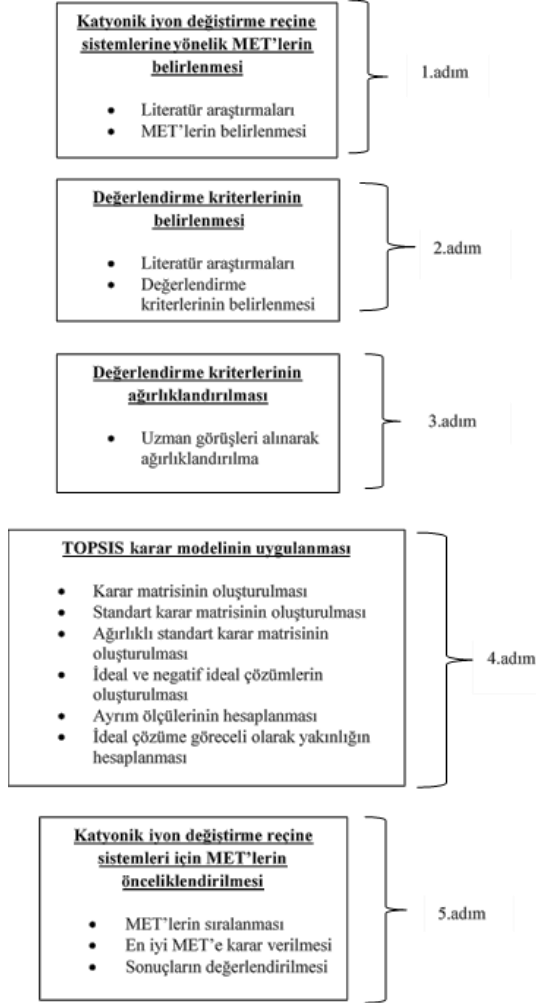
alınarak en iyi alternatiflerin belirlenmesinde kullanılan genel bir yöntemdir. Tercih Sıralaması Organizasyon Yöntemi (PROMETHEE), İdeal Çözüme Benzerlik Yoluyla Tercih Sıralama Tekniği (TOPSIS), Çok Ölçütlü Optimizasyon ve Uzlaşık Çözüm Tekniği (VIKOR), Karmaşık Oransal Değerlendirme (COPRAS) gibi birçok model bulunmaktadır [10,11]. TOPSIS modeli dünyadaki en önemli karar verme yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir [12]. Örneğin maden yataklarının araştırılmasında kullanılan maden potansiyelinin haritalanmasında [13], şehirlerin tahliyesinde sabit deprem sığınakları yeri belirlemede [14], su yönetiminde [15] ve ürün tasarımı [16] gibi çok ölçütlü karar verme problemlerinin çözümünde ve endüstride birçok alanda başarıyla uygulanmıştır [17]. Bu bağlamda TOPSIS modeli ile birlikte diğer modeller birçok disiplinde karar verme süreçlerinde kullanılmaktadır [10,11].

Bu çalışmada ise katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerine dair MET'ler/uygulamalar araştırılmış ve TOPSIS modeli kullanılarak en öncelikli MET'lere karar verilmesi amaçlanmıştır. ÇÖKVM'leri arasında TOPSIS modelinin seçiminde (i) kolay uygulanabilir ve kullanışlı olması, (ii) elde edilen sonuçların yorumlanabilir olması, (iii) yaygın kullanıma sahip olması, (iv) sonuçların ağırlık skorlarına göre sıralanmasına olanak sağlaması ve (v) puanlama ölçeği kullanıyor olması kriterleri göz önünde bulundurulmuştur. Literatür araştırmalarına göre bu çalışma katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerinde temiz üretim ve verimlilik uygulamalarına dair nadir çalışmalardan biridir. Dolayısıyla geliştirilen değerlendirme kriterleri, uygulanan MET'ler ve elde edilen sonuçlar katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerinde kaynak kullanımı ve çevresel performanslarının geliştirilmesi adına literatürdeki bir eksikliği giderecektir. Ayrıca bu çalışmada sunulan uygulama metodolojisi ve elde edilen sonuçlar bakımından araştırmacılara, operatörlere ve diğer paydaşlara bir yol haritası oluşturacaktır.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışma 5 temel aşamadan oluşmaktadır (Şekil 1). İlk aşamada katyonik iyon değiştirme reçine sistemler için literatürdeki temiz üretim uygulama örnekleri, temiz üretim kılavuz dokümanları ve IPPC BREF dokümanlarındaki MET'ler araştırılmıştır. İyon değiştirme reçine sistemlerine uygulanabilecek nitelikte olan 7 farklı MET belirlenmiştir. Bu teknikler, teknik uygulanabilirlik, maliyet, çevresel fayda, ekonomik tasarruf ve yan etkileşimler açısından incelenmiştir. İkinci aşamada, IPPC BREF dokümanlarında ve literatürde MET'lerin önceliklendirilmesinde kullanılan kriterler esas alınarak değerlendirme kriterleri belirlenmiştir. Üçüncü aşamada, uzman görüşleri alınarak belirlenen değerlendirme kriterlerinin ağırlıkları belirlenmiş ve değerlendirme kriterleri ayrı ayrı ağırlıklandırılmıştır.

Katılımcıların görüşlerinden yararlanılarak her bir değerlendirme kriterine göre belirlenen MET alternatiflerinin ağırlık puanları belirlenmiştir. Dördüncü aşamada TOPSIS karar modeli uygulanmıştır. Beşinci aşamada ise katyonik iyon değiştirme reçine sistemleri için MET'ler önceliklendirilmiştir.



Şekil 1. Çalışmanın uygulama metodolojisi

### 2.1. MET'lerin belirlenmesi

İyon değiştirme prosesi için temiz üretim etüt-analiz çalışmaları kapsamında tespit edilen verimsizliklerin giderimine yönelik MET listesi hazırlanmıştır. Bu MET listesinin hazırlanmasında büyük ölçüde IPPC BREF dokümanı, temiz üretim kılavuz dokümanları ve literatürdeki temiz üretim uygulamalarından yararlanılmıştır. MET listesi genel olarak; iyi yönetim uygulamaları, su atıksu yönetimi, enerji yönetimi, kimyasal minimizasyonu ve değişimi, emisyonların azaltılması ve katı atıklar çerçevesinde belirlenmiştir.

### 2.2. Değerlendirme kriterlerinin belirlenmesi

Değerlendirme kriterleri literatürde ve temiz üretim dokümanlarında MET'lerin değerlendirilmesinde kullanılan faktörler (maliyet, uygulanabilirlik, potansiyel tasarruf, çevresel fayda, yan etkileşim ve

referans işletmeler gibi) dikkate alınarak belirlenmiştir. Bu faktörler, literatür araştırmaları ve bu alanda çalışmalarını bulunan akademisyenlerin ve sektör uzmanlarının görüşleri alınarak detaylandırılmıştır. Sonuç olarak MET değerlendirmede toplam 11 kriterin uygulanmasına karar verilmiştir. Bu kriterler; uygulanabilirlik (K1), çevresel faydalar (K2), ekonomik tasarruf (K3), ilk yatırım maliyeti (K4), işletme ve bakım-onarım maliyeti (K5), yan etkileşimler (K6), etkili kullanım ömrü (K7), uzmanlık gereksinimi (K8), kolay işletme ve bakım (K9), personel gereksinimi (K10) ve geri ödeme süresinden (K11) oluşmaktadır.

### 2.3. Değerlendirme kriterlerinin ve MET'lerin ağırlıklandırılması

Karar verme çalışmalarında kullanılmak üzere her bir değerlendirme kriterinin ağırlık puanları (önem-öncelik değerlendirmesi) katılımcı görüşleri alınarak yüz yüze görüşme ve anket uygulamasıyla belirlenmiştir. Katılımcıya uygulanan anket formu (Ek A'da) sunulmuştur. Katılımcılar tarafından verilen ağırlık puanlarının ağırlıklı ortalaması alınarak her bir değerlendirme kriterinin nihai ağırlık puanı hesaplanmıştır. Uzmanların katılımıyla MET listesinde yer alan her bir MET belirlenen 11 değerlendirme faktörüne göre ağırlıklandırılmıştır. Katılımcılar tarafından verilen tüm ağırlık puanlarının ağırlıklı ortalamaları alınarak her bir MET'in değerlendirme kriterlerine göre ağırlık puanları belirlenmiştir.

### 2.4. TOPSIS karar modelinin uygulanması

TOPSIS modeli ÇÖKVM olması nedeniyle ve ölçütler arasında fayda-maliyet analizinin çok iyi bir şekilde yapılabilmesine olanak tanıdığı için bu çalışmada tercih edilmiştir. Bu bağlamda ilk adımda veri matrisi oluşturulmuştur. Böylece değerlendirme kriterleri ve alternatifleri ile bunların ağırlıkları belirlenmiştir. İkinci adımda, tercih değerlendirme kriterlerinin yapısını ve iç ilişkilerini gösteren kriterler için fonksiyonlar belirlenmiştir. Üçüncü ve dördüncü adımda, ortak tercih fonksiyonları ve tercih indeksleri belirlenmiş olup ideal ve ideal olmayan negatif ayrım ölçütleri hesaplanmıştır. Beşinci adımda ideal ve negatif ideal ayrım hesaplamaları yapılarak, altıncı adımda ideal ölçüme en yakın göreceli MET'ler belirlenmiştir. TOPSIS modelinin son aşamasında, karar seçeneklerinin tüm öncelikleri belirlenmiştir. Eşitlik 11 kullanılarak MET'ler öncelik sırasına göre büyükten küçüğe doğru sıralanmaktadır. Uygulama adımları, TOPSIS karar modeli ve her adımda kullanılan eşitlikler aşağıda alt başlıklar halinde sunulmuştur.

### 2.5. Katyonik iyon değiştirme reçine sistemleri için MET'lerin önceliklendirilmesi

Çalışmanın son aşaması olan bu bölümde; başlangıç MET listesinde yer alan MET'lerin ağırlık puanları ve

belirlenen her bir değerlendirme kriteri için verilen ağırlık puanlarından yararlanılarak TOPSIS modeli kullanılmıştır. TOPSIS modeli için yapılan hesaplamalar Microsoft Office Excel programında modelin işlem adımları dikkate alınarak yapılmıştır. Aşağıdaki başlıklar altında bu çalışmada kullanılan TOPSIS modeli ve kullanılan eşitlikler sunulmuştur.

## 2.6 Kriter ağırlıklandırma

ÇÖKVM, birden çok alternatifin diğer kriterlerle ve/veya birbirinden bağımsız değerlendirme kriterlerine göre analiz edilmesini sağlar. Bu sayede, en iyi alternatife karar verilebilmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli nokta ise, alternatiflerin ve değerlendirme kriterlerinin seçimi ve kriterlerin ağırlıklandırılmasıdır. Kriter ağırlıkları, katılımcılar tarafından 1-5, 1-9 arası puanlanmaktadır. Puanlama ölçeği kullanılarak ölçütlerin ağırlıkları belirlenebilmektedir. Böylelikle, kriterlerin ağırlıklarının hesaba katılması ve güvenilir olması mümkün olmaktadır. Kriterlerin sentezlenme aralığı Eşitlik 1'de sunulmuştur.

$$w_j = \frac{a_j \times \beta_j}{\sum_{j=1}^n a_j \times \beta_j} \quad j = 1, \dots, n \quad (1)$$

Yukarıda sunulmuş olan Eşitlik 1'de;  $\alpha_j$ , Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) modeli ile elde edilen j. kriterin ağırlığı ve  $\beta_j$ , entropi yöntemi ile elde edilen j. kriterin ağırlığıdır. 1-5, 5-9 arası puanlama çalışması ile kriterler ağırlıklandırılmıştır.

## 2.7. TOPSIS modeli

TOPSIS modeli pozitif ideal çözüme en yakın veya negatif ideal çözüme en uzak mesafedeki seçeneği belirleyerek en iyi alternatifi sunma yöntemidir. Karar vericilerin, çözülecek sorunları organize etmelerine ve alternatiflerin analizlerini, karşılaştırmalarını ve sıralamalarını gerçekleştirmelerine yardımcı olmaktadır [18]. TOPSIS modeli dünyadaki en önemli karar verme yöntemlerinden biri olarak kabul edilmektedir [12].

TOPSIS modeli, en uygun tekniğin en uygun seçimini alternatif olarak kabul ettiğinden, tüm karar seçeneklerini sıralamaktadır. TOPSIS modeli, karmaşık algoritmalar ve matematiksel modeller içermeyen, pratik anlaşılması kolay ve yorumlanabilir bir yöntemdir [12]. TOPSIS modeli, bazı araştırmacılar tarafından arıtma tesislerinin verimli işletilebilmesine yönelik en iyi alternatiflerin belirlenmesinde kullanılmıştır [12].

TOPSIS modelinin uygulanabilmesi için en az iki karar seçeneğinin olması gerekmektedir. Bu bağlamda ilk olarak karar ölçütlerinin araştırılıp belirlenmesi gerekmektedir. Genel olarak TOPSIS uygulamasında ölçütler arasında fayda ya da maliyet ayrımı

yapılmaktadır [19]. TOPSIS modeli aşağıdaki basit 6 adımdan oluşmaktadır.

1. adımda karar seçenekleri ve değerlendirme ölçütleri belirlendikten sonra n adet ölçüt  $K = (k_1, k_2, k_3, \dots, k_n)$  ve m adet karar seçeneğinden  $(A = a_1, a_2, a_3, \dots, a_m)$  oluşan karar matrisi oluşturulur. Karar matrisinin oluşturulması, Eşitlik 2 kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

$$D_{ij} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & d_{22} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \ddots & \dots & \vdots \\ d_{i1} & d_{i2} & \dots & d_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{m1} & d_{m2} & \dots & d_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

2. adımda karar matrisi oluşturulduktan sonra 3 ve 4 numaralı Eşitlikler kullanılarak standart karar matrisi oluşturulmaktadır.

$$\forall d_{ij} \neq 0: r_{ij} = \frac{d_{ij}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m d_{kj}^2}} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$\forall d_{ij} = 0: r_{ij} = 0; \quad \forall i = 1, \dots, m \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (4)$$

Normalizasyon işlemleri neticesinde standart karar matrisi R Eşitlik 5'te gösterildiği gibi olmaktadır.

$$R_{ij} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1n} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2n} \\ \vdots & \ddots & \dots & \vdots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{in} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{m1} & r_{m2} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

3. adımda ağırlıklı standart karar matrisinin oluşturulması aşamasında, önceden belirlenen ölçütlerin ağırlıkları  $w_j$ , Eşitlik 6'da gösterildiği gibi R elemanları ile çarpılarak ağırlıklı standart karar matrisi (V) elde edilmektedir. Değerlendirme ölçütlerinin ağırlık değerleri toplamı 1 olmalıdır.

$$V_{ij} = \begin{bmatrix} w_1 r_{11} & w_2 r_{12} & \dots & w_n r_{1n} \\ w_2 r_{21} & w_2 r_{22} & \dots & w_n r_{2n} \\ \vdots & \ddots & \dots & \vdots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ w_1 r_{m1} & w_2 r_{m2} & \dots & w_n r_{mn} \end{bmatrix} \quad (6)$$

4. adım olan İdeal ve İdeal Olmayan (negatif) Çözümlerin Oluşturulmasında, değerlendirme ölçütleri fayda cinsinden  $A^*$ ,  $V^*$ 'nin en iyi değerlerinden oluşurken;  $A^-$  en kötü değerlerinden oluşmaktadır. Değerlendirme ölçütleri maliyet cinsinden ise bu durumda  $A^*$ ,  $V^*$ 'nin ölçüt değerlerinin en küçüklerinden oluşurken,  $A^-$  en büyük değerlerinden oluşmaktadır. İdeal çözümler 7 ve 8 numaralı Eşitliklerde sunulmaktadır.

$$A^* = \{ (max_i v_{ij} | j \in J), \{ (min_i v_{ij} | j \in J') \} i = 1, \dots, m \}$$

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_j^*, \dots, v_n^*\} \quad (7)$$

$$A^- = \{ (min_i v_{ij} | j \in J), \{ (max_i v_{ij} | j \in J') \} i = 1, \dots, m \}$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_j^-, \dots, v_n^-\} \quad (8)$$

$$J = \{j = 1, \dots, n | \text{ölçütler fayda türünden}\}$$

$$J' = \{j = 1, \dots, n | \text{ölçütler maliyet türünden}\}$$

$$J \cap J' = \emptyset \wedge J \cup J' = \{1, \dots, n\}$$

5. adım olan Ayrım Ölçülerinin Hesaplanmasında pozitif ideal ve negatif ideal çözüm değerlerine olan uzaklık değerleri elde edilmektedir.  $A_i$  için ideal ayırım  $S_i^*$  ve negatif ideal ayırım  $S_i^-$  olarak adlandırılan iki ayırım ölçüsü ortaya çıkmaktadır.  $J$  seçeneğinin ideal ölçüm noktasına olan uzaklığı  $S_i^*$  9 numaralı Eşitlikte ve negatif ideal çözüme uzaklık  $S_i^-$  ise 10 numaralı Eşitlikte sunulmaktadır. Bu hesaplamalarda Öklid uzaklık yaklaşımından yararlanılmaktadır.

$$S_i^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_j^*)^2} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2} \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (10)$$

6. adımda, İdeal Çözüme Göreceli Olarak Yakınlığın Hesaplanması işlemi gerçekleştirilerek ideal çözüme göre yakınlığı  $C_i^*$ , 11 numaralı Eşitliğe göre hesaplanmaktadır.

$$C_i^* = \frac{S_i^-}{S_i^- + S_i^*} \quad 0 \leq C_i^* \leq 1 \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (11)$$

$C_i^*$ ,  $0 \leq C_i^* \leq 1$  aralığında bir değer alır ve  $C_i^* = 1$ ,  $i$ . karar seçeneğinin ideal çözüm noktasında,  $C_i^* = 0$  ise karar seçeneğinin negatif ideal çözüm noktasında bulunduğu anlamına gelmektedir.

### 3. Araştırma Bulguları

Bu bölümde IPPC Tekstil BREF Dokümanı verilerinden ve literatür çalışmalarından faydalanılarak, endüstrilerde katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerine yönelik MET'ler incelenmiştir. Bu kapsamda katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerine ilişkin toplam 7 MET alternatifi belirlenmiştir. Bunlara ilişkin bilgiler ve teknik detaylar aşağıda alt başlıklar altında sunulmuştur.

#### MET 1: Su yumuşatma öncesindeki kum filtresi geri yıkama sularının yeniden kullanılması

Kuyu suyu ve yüzeysel su kütlelerinden su temini yapıldığında mevsimsel şartlara, su kalitesine vb. bağlı olarak temin edilen su içerisinde katı maddeler (silt, kil vb.) olabilmektedir. Bu maddeler, su yumuşatma sisteminde tıkanma ve kirlenme risklerini önlemek amacıyla yumuşatma işlemi öncesinde kum filtresinde filtrelenmektedir. Filtre yatağındaki gözenekler dolduğunda geri yıkama suları genellikle atıksu

kanalına ya da alıcı su ortamlarına verilerek uzaklaştırılmaktadır. Böylelikle filtre geri yıkamasında kullanılan sularda kaybedilmektedir. Bu suların biriktirilip çöktürme sonrasında proses dışı alanlarda (yeşil alan sulama, toz kontrolü, açık alan zemin yıkaması vb.) geri kullanılması mümkün olabilir. Bu sayede %2-3 arasında su tasarrufu ve atıksu miktarlarında azalma sağlanabilir [20]. Tekniğin uygulanması ile elde edilebilecek çevresel faydalara bakıldığında, atıksu kanalizasyon sisteminin yükünün azaltılması, mevcut su kaynaklarının korunması ve atıksu arıtma maliyetlerinde azalma sağlanmasıdır. Uygulama için gerekli olan ilk yatırım maliyeti tesis bazlı olarak farklılık göstermektedir. Genel olarak geri ödeme süresinin şartlara bağlı olarak 1-3 yıl arasında olabileceği tahmin edilmektedir [9].

#### MET 2: İyon değiştirme reçine sistemi çıkış suyunda (proses suyu-yumuşatılmış su) eş-zamanlı sertlik izleme sensörleri kullanılması

Reçine kolon sistemlerinde, belirli bir süre işletimden sonra reçineler satüre olunca rejenerasyon yapılmaktadır. Rejenerasyonun amacı reçinelerde tutulan hedef iyonları sıyırmak ve reçineleri tekrar hedef iyonları tutacak hale getirmektir. Rejenerasyon sıklığı giriş su kalitesine ve su sertliğine bağlıdır. Katyonik iyon değiştirme reçine sistemi çıkış suyunda (proses suyu-yumuşatılmış su) eş-zamanlı sertlik izleme sensörlerinin kullanılmasıyla, çıkış suyunda istenilen sertlik değerinin (önceden set edilen) üstüne çıktığı an eş-zamanlı olarak yakalanabilir ve SCADA ("Supervisory Control and Data Acquisition" "Denetimli Kontrol ve Veri Toplama")'ya bağlı otomatik rejenerasyon başlatılabilir. Böylece rejenerasyon sıklığı optimize edilir su ve tuz tasarrufu sağlanır [21]. Proses suyu hazırlamada katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerinin kullanıldığı tesislerde reçinelerin rejenerasyon sıklıkları; (i) reçine tedarikçisinin önerdiği süreler göre, (ii) operatörler veya reçine tedarikçisinin önerdiği debilere göre, (iii) belirli periyotlarda manuel olarak yumuşatılmış su çıkışından numune alarak sertlik analizi yapılarak belirlenmektedir. Bu yöntemler yaygın olarak kullanılsa da teknik, ekonomik ve çevresel açıdan yeterli olmamaktadır. Yumuşatılmış su çıkışına sertlik sensörü kurulmasıyla katyonik iyon değiştirme reçine sisteminden çıkan yumuşatılmış suda sertlik artmaya başladığından sistem otomatik olarak rejenerasyon yapmaktadır. Böylelikle tam zamanında bir rejenerasyon sıklığı en iyi şekilde optimize edilmiş olacaktır. Bu uygulamadan sonra diğer tüm olumsuzluklar ortadan kalkacaktır. Örnek olarak otomatik eş-zamanlı rejenerasyon sistemi kullanan bir tekstil tesisinde rejenerasyon sonrası deşarj edilen atıksuyun miktarı azalmıştır. Uygulanabilecek nitelikte olan otomatik rejenerasyon sisteminin uygulanması veya yenilenmesi ile bir tesisinin rejenerasyon atıksuyu oluşumu ve katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerin rejenerasyonu için

tüketilen tuz (NaCl) miktarı %46 oranında azalmıştır [21]. İlk yatırım maliyeti olarak eş-zamanlı sertlik izleme sensörlerinin her birisi için birim maliyetleri 5.000-7.500 Euro arasında değişmektedir (diğer SCADA bağlantıları hariç). Sonuç olarak, katyonik iyon değişirme reçine sistemlerinin rejenerasyonu eş-zamanlı sertlik izleme sensörleri kullanılarak yapıldığı takdirde tesis açısından; su kaynaklarında, zamanda, enerjide, kimyasal kullanımında ve maliyette tasarruf sağlanabilecektir [22].

#### MET 3: Katyonik iyon değişirme reçine sistemlerinde rejenerasyon süresinin optimize edilmesi

Endüstriyel su yumuşatma sistemlerinde rejenerasyon sıklığı; giriş suyundaki sertlik değerlerine, reçine tür ve miktarına, istenilen çıkış suyu sertlik değerine göre değişmektedir. Bu nedenle rejenerasyon sıklığının eş-zamanlı sertlik ölçümü yapılarak optimize edilmesi çok faydalı olmaktadır. Diğer taraftan rejenerasyon süresinin de tespit edilmesinde eş-zamanlı sertlik sensörleri kullanılabilir. Bu durumda gereğinden fazla yıkama-durulama ya da tuzlu suyla rejenerasyon yapılmamış olur. Dolayısıyla su kullanımı ve atıksu miktarlarında %5'e varan oranlarda tasarruf sağlanabilir. Ayrıca ön yıkama ve son durulama sularının geri kullanımıyla ise %2-6 oranında su tasarrufu sağlanabilir [9]. Rejenerasyon proseslerinde sürelerin optimize edilmesiyle yaklaşık olarak 19-21 dakika zaman tasarrufu ile 6 m<sup>3</sup>/gün su tasarrufunun sağlanacağı bir tesis için belirtilmiştir [23]. Bir başka çalışmada ise rejenerasyon sürelerinin optimize edilmesiyle 16-20 dakika tasarruf ve toplam su tüketiminde yaklaşık olarak %2-3 oranında bir azalma elde edilebileceği rapor edilmiştir [20]. Uygulamanın geri ödeme süresinin kısa olacağı tahmin edilmektedir.

#### MET 4: Manuel işletim uygulanan tesislerde katyonik iyon değişirme reçine sistemlerinde rejenerasyon sıklığının ham su kalitesine göre optimize edilmesi

Katyonik iyon değişirme reçine sistemleri işletiminde yaygın olarak tedarikçi tarafından sisteme giren su miktarına göre verilen işletme programı uygulanmaktadır. Ancak ham su kalitesi ve sistemin performansı zamana bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Bu durumda istenilen kalitede proses suyu elde edilememekte ya da gereksiz rejenerasyon yapılmaktadır. Dolayısıyla ekstra su tüketimi, tuz tüketimi, enerji tüketimi, rejenerasyon atıksuyu oluşumu ve zaman kayıpları meydana gelebilmektedir. Operatörün rejenerasyon sıklığını belirlemesi amacıyla, yumuşatılmış sudan numune alınarak yumuşatılmış suda sertlik artmaya başladığında manuel kontrolle rejenerasyon yapmasıyla rejenerasyon sıklıkları optimize edilebilir. Bu uygulama ile rejenerasyon işleminde %30'a varan su ve tuz tasarrufu sağlanabileceği görülmektedir [23]. Bu uygulama için ilk yatırım maliyeti bulunmamakta ancak sertlik analizleri için analiz sarf giderleri olabilmektedir [22].

#### MET 5: Rejenerasyon sularının yüksek su kalitesi gerektirmeyen alanlarda ve/veya tesis içi temizlik işlemlerinde geri kullanılması

Yüksek iletkenliğe sahip rejenerasyon suları yüksek su kalitesi gerektirmeyen alanlarda geri kullanılabilir. Rejenerasyon suları tesis içi ve dışı alan temizliği, makine ve ekipman temizliği gibi farklı alanlarda kullanılabilir. Rejenerasyon sularının yüksek su kalitesi gerektirmeyen alanlarda geri kullanımıyla su tasarrufu ve enerji tasarrufu sağlanabileceği gibi bunların yanı sıra atıksu miktarlarında ve atıksuların taşıdıkları tuz yüklerinde önemli azalmalar sağlanabilmektedir. Literatürdeki bazı çalışmalarda rejenerasyon sularının geri kullanımıyla su tüketiminde ve atıksu miktarlarında %5-10 arasında azalmalar sağlanabileceği rapor edilmiştir [24].

#### MET 6: Katyonik iyon değişirme reçine sisteminde ön yıkama ve rejenerasyon sonrası yıkama/durulama sularının geri kullanımı

Ön yıkama, reçine kolonlarının bulunduğu sistemin alt tarafından su beslemesi yapılması sonucu gerçekleşmektedir. Sistemin çalışması ile birlikte küçük reçine tanecikleri kolonun üst tarafına taşınmakta ve sistem içerisinde birikmiş olan askıda katılar uzaklaştırılmaktadır. Durulama, rejenerasyon hızıyla aynı değerlerde beslenmekte olup yavaş durulama suyu ile reçine yatağındaki rejenerasyon kimyasal ortamdan uzaklaştırılmaktadır. Reçine ön yıkama ve son durulamaları için genellikle ham su kullanılmaktadır. Ön yıkama ve durulama suları ham suya göre nispeten biraz daha kirlidir çünkü içinde ön yıkamadan gelen askıda katı maddeler/kolloitler ve rejenerasyon sonrası son durulamadan gelen tuzlar bulunmaktadır. Son durulama rejenerasyon sonrası kolonda kalan tuzları sıyırmaktadır. Dolayısıyla, ön yıkama ve durulama suları içerdikleri su kalitesine göre yüksek su kalitesi gerektirmeyen alanlarda (bahçe sulaması, çevre temizliği vb.) yeniden kullanılabilir. Hatta bu suların kalitesi bazı tesislerde neredeyse ham su kalitesine çok yakın olmaktadır ve bu durumda bu sular direkt olarak ham su deposuna geri gönderilip paçallama yapılabilir.

Ön yıkama ve rejenerasyon sonrası yıkama/durulama sularının geri kullanılması ile birlikte toplam ham sudan yaklaşık olarak %10 civarında bir tasarruf elde edilebilmektedir [23]. Uygulamanın ilk yatırım maliyeti, tesisin proses suyu tüketim miktarına ve mevcut tesisat durumuna göre değişmektedir. Geri ödeme süresinin ise rejenerasyon ve ön yıkama sularının yeniden proses suyu olarak kullanılması ile bir yıldan daha kısa olacağı tahmin edilmektedir [9]. Dolayısıyla katyonik iyon değişirme reçine sisteminde ön yıkama ve rejenerasyon sonrası yıkama/durulama sularının geri kullanımı ile hem maliyet tasarrufu hem de su kaynaklarının korunumu kazanımları elde edilebilmektedir [9].

### MET 7: Rejenerasyon sularının yüksek tuz gereksinimi olan uygun proseslerde geri kullanımı

Rejenerasyon işlemi sonrasında oluşan rejenerasyon atıksuları yüksek tuz içeriğine sahip olan sert sulardır. Bu sular, gıda ve tekstil endüstrisi gibi yüksek miktarda proses suyu kullanan sektörlerde toplam su tüketiminin yaklaşık %5-10'unu oluşturmaktadır. Bu su tüketimini azaltmak için rejenerasyon atıksuları ayrı bir tankta biriktirilerek yüksek tuz gereksinimi duyulan proseslerde proses suyu olarak değerlendirilebilir [20]. Bazı araştırmacılar sertliğin sorun oluşturmadığı durumlarda pamuklu kumaşların belirli koyu renklere boyanmasında geri kullanılabilirliğini belirtmişlerdir. Ayrıca maya endüstrisinde kalsiyum ve tuz kullanımının olduğu susuzlaştırma işlemlerinde dezenfeksiyon sağlandıktan sonra rejenerasyon atıksuları geri kullanılabilir [9]. Rejenerasyon atıksularının yeniden kullanılmasıyla su tüketiminde, enerji tüketiminde, atıksu miktarlarında ve atıksuların tuz içeriğinde yaklaşık %5-10 oranında azalmalar sağlanabilir. Diğer taraftan bu uygulamada suyla birlikte tuz geri kazanımı da olacağından tuz maliyetlerinde de önemli azalmalar sağlanabilir [24]. Bu uygulama için gerekli ilk yatırım maliyetlerini tesisat, pompa vb. mekanik ekipmanlar ve depolama tankları oluşturacağından geri ödeme süresinin bir yıldan kısa olacağı tahmin edilmektedir [9].

### 3.1. Kriter ağırlıklandırma

Kriter ağırlıklandırma adımı, TOPSIS modelinde bahsedildiği şekilde katılımcılar tarafından yapılmıştır. Kriterler arasında yer alan maliyet bölümü TOPSIS modelinde bahsedildiği gibi negatif ideal çözüm, geri kalan kriterler ise pozitif ideal çözüm olarak alınmıştır. Ölçüt ağırlıkları aşağıda Tablo 1'de sunulmuştur.

### 3.2. TOPSIS modeli

TOPSIS modeli pozitif ve negatif ideal çözüm olmak üzere iki temel noktaya dayanmaktadır. Yöntem pozitif ideal çözüme en yakın ve negatif ideal çözüme en uzak mesafedeki seçeneğin belirlenmesini amaçlamaktadır. Pozitif ideal çözüme en yakın olan ve negatif ideal çözüme en uzak olan alternatifleri sıralamaktadır [25]. TOPSIS modeli karmaşık algoritmalar ve matematiksel modeller içermeyen basit bir tekniktir. TOPSIS modeli temelde 6 uygulama adımından oluşmaktadır. Bu çalışmada bu adımlar sırasıyla uygulanmaktadır. Birinci adımda karar matrisi oluşturulmuştur (Tablo 2). İkinci adımda standart karar matrisi oluşturulmuştur. Üçüncü

adımda ağırlıklı standart karar matrisi oluşturulmuştur. Bu kapsamda dikkat edilmesi gereken en önemli nokta değerlendirme ölçütlerinin ağırlık değerleri toplamının 1 olmasıdır. Dördüncü adımda pozitif ve negatif ideal çözümlerin oluşturulması yapılmıştır. Beşinci adımda ayırım ölçütleri hesaplanmıştır. Altıncı ve son adımda ise ideal çözüme göreceli olarak yakınlıklar hesaplanmıştır. Böylelikle başlangıç MET listesindeki MET'ler önceliklerine göre sıralanabilmektedir.

TOPSIS analiz sonucuna göre, MET alternatiflerinin öncelik sıralaması sırasıyla MET 2, MET 7, MET 6, MET 3, MET 5, MET 4 ve MET 1 olmuştur (Tablo 3). Eş-zamanlı sertlik sensörlerinin kullanımı (MET 2) ile elde edilecek başlıca avantajlar, su kaynaklarının kullanımında azalma, zamanın verimli ve efektif kullanılması, enerji tasarrufu, kimyasal kullanımının azalması ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi şeklinde olmaktadır. Rejenerasyon sularının yüksek tuz gereksinimi olan uygun proseslerde geri kullanımının (MET 7) uygulanması sonucu ham madde kullanımında ve üretim maliyetlerinde tasarruflar sağlanabilmektedir. Buna ek olarak çevresel fayda sağlanabilmekte ve uygulanabilirlik açısından iyi performans göstermektedir. Su yumuşatma öncesindeki kum filtresi geri yıkama sularının yeniden kullanılması (MET 1) ekonomik tasarruf, yan etkileşim, çevresel fayda, ilk yatırım maliyeti, işletme ve bakım-onarım maliyeti, uzmanlık gereksinimi, kolay işletme ve bakım, personel gereksinimi ve geri ödeme süresi açısından düşük önceliğe sahip olmaktadır. Uygulanabilirlik ve etkili kullanım ömrü açısından da yüksek önceliğe/avantaja sahip olmaktadır. Bu nedenle uygulanabilir ancak düşük öncelikli MET olarak belirlenmiştir.

### 4. Tartışma ve Sonuç

İyon değiştiricilerde, proses suyu üretim maliyetlerini ve çevresel etkileri azaltmak gerekmektedir. Çeşitli MET'ler kullanılarak azaltımlar sağlanabilir. Bu çalışmada, katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerinin çevresel performanslarını arttırabilmek amacıyla uygulanabilecek nitelikte olan MET'lerin TOPSIS modeli kullanarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda 11 farklı değerlendirme kriteri kullanılarak literatüre katkı sağlanmıştır. Bu değerlendirme kriterleri, MET'lerin karar verme sürecinde önemli ölçüde çok yönlülük kazandırmıştır. Ayrıca karar vermenin farklı açılardan değerlendirilmesi sağlanmış ve daha fazla veri elde ederek karar verme daha hassas hale getirilmiştir. Bu değerlendirme kriterlerini farklı sektörler için geliştirmek veya değiştirmek mümkündür. Bu çalışma

**Tablo 1.** Ölçüt ağırlıkları

	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>	K <sub>7</sub>	K <sub>8</sub>	K <sub>9</sub>	K <sub>10</sub>	K <sub>11</sub>
<b>Puan</b>	9	7	8	7	7	6	7	6	6	6	7
<b>W<sub>i</sub></b>	0,118	0,114	0,128	0,104	0,107	0,101	0,114	0,090	0,101	0,087	0,111
	0,118	0,096	0,108	0,087	0,090	0,085	0,096	0,075	0,085	0,073	0,093
<b>Yön</b>	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+

**Tablo 2.** Başlangıç karar matrisi

	K <sub>1</sub>	K <sub>2</sub>	K <sub>3</sub>	K <sub>4</sub>	K <sub>5</sub>	K <sub>6</sub>	K <sub>7</sub>	K <sub>8</sub>	K <sub>9</sub>	K <sub>10</sub>	K <sub>11</sub>
<b>MET 1</b>	8	7	6	7	7	6	8	7	7	7	7
<b>MET 2</b>	8	7	7	7	6	6	6	5	7	7	7
<b>MET 3</b>	8	7	8	8	7	7	7	6	7	7	7
<b>MET 4</b>	8	8	7	8	7	7	7	6	7	6	7
<b>MET 5</b>	7	8	7	7	7	6	7	5	7	7	7
<b>MET 6</b>	7	8	7	7	7	6	7	6	7	7	6
<b>MET 7</b>	8	8	7	7	7	6	7	5	7	7	7
<b>Karesi</b>	398	406	362	352	330	280	364	231	348	339	343
<b>Karekök</b>	20	20,2	19	18,8	18,2	16,8	19,1	15,2	18,7	18,4	18,5

**Tablo 3.** Ayrım ölçüleri ve sıralama

	Si <sup>+</sup>		Si <sup>-</sup>		Ci <sup>+</sup>		Sıralama
<b>S1<sup>+</sup></b>	0,1870	<b>S1<sup>-</sup></b>	0,0665	<b>C1<sup>+</sup></b>	0,2625	<b>MET 1</b>	7
<b>S2<sup>+</sup></b>	0,0558	<b>S2<sup>-</sup></b>	0,1893	<b>C2<sup>+</sup></b>	0,7724	<b>MET 2</b>	1
<b>S3<sup>+</sup></b>	0,1177	<b>S3<sup>-</sup></b>	0,1581	<b>C3<sup>+</sup></b>	0,5733	<b>MET 3</b>	4
<b>S4<sup>+</sup></b>	0,1350	<b>S4<sup>-</sup></b>	0,1064	<b>C4<sup>+</sup></b>	0,4407	<b>MET 4</b>	6
<b>S5<sup>+</sup></b>	0,1167	<b>S5<sup>-</sup></b>	0,1478	<b>C5<sup>+</sup></b>	0,5589	<b>MET 5</b>	5
<b>S6<sup>+</sup></b>	0,1077	<b>S6<sup>-</sup></b>	0,1598	<b>C6<sup>+</sup></b>	0,5974	<b>MET 6</b>	3
<b>S7<sup>+</sup></b>	0,1013	<b>S7<sup>-</sup></b>	0,1596	<b>C7<sup>+</sup></b>	0,6118	<b>MET 7</b>	2

kapsamında TOPSIS modelinin kullanımı etkili sonuçlar vermiştir. Ancak farklı model kombinasyonları kullanılarak da daha etkili sonuçlar elde edilebilir. Bu çalışmada belirlenen değerlendirme kriterleri ve TOPSIS modeli kullanılarak katyonik iyon değiştirme reçine sistemi için önerilen 7 MET'in öncelik sıralaması yapılmıştır. Elde edilen önceliklendirme sonuçlarına dayalı olarak "İyon değiştirici reçine sistemi çıkış suyunda (proses suyu yumuşatılmış) eş-zamanlı sertlik izleme sensörleri kullanılması (MET 2)" en öncelikli MET olarak belirlenmiştir. İlk sırada yer almasının sebebi uygulanabilirlik, çevresel fayda ve ekonomik tasarruf gibi değerlendirme kriterleri açısından iyi performans göstermesidir. Böylelikle su kaynaklarının kullanımında azalma, enerji tasarrufu, kimyasal kullanımının azalması ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi gibi avantajları bulunmaktadır. Önerilen tekniklerin birçok avantajı bulunmakta olup çevresel performansı arttırmaktadır.

Literatürde katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerinin verimli çalışmasına yönelik kılavuzlar bulunmamaktadır. İmalat sanayinde proses suyu hazırlama sistemlerinin seçimi ve verimli işletimine yönelik önemli bilgi eksiklikleri mevcut olup eksikliklerin giderilmesi gerekmektedir.

### Teşekkür

Bu çalışmaya katılımları, görüşleri ve paylaşımlarından dolayı değerli sektör uzmanlarına ve katılımcılara teşekkürlerimizi sunarız. Yazar Elif ŞİMŞEK, Yükseköğretim Kurulu (YÖK) 100/2000 doktora programı kapsamında "Sürdürülebilir Su Kaynakları" tematik alanında doktora bursiyeridir.

### Etik Beyanı

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında

uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

### Kaynakça

- [1] Türkiye İstatistik Enstitüsü (TÜİK), 2018. Çevre Enerji İstatistikleri. <http://www.tuik.gov.tr> (Erişim Tarihi: 17.04.21).
- [2] Dabska, A. 2019. Hydraulic Conductivity of Compacted Lime-Softening Sludge Used as Landfill Liners. *Water Air Soil Pollution*, 230: 280.
- [3] Gitisa, V., Hankinsb, N. 2018. Water Treatment Chemicals: Trends and Challenges. *Journal of Water Process Engineering*, 25, 34–38.
- [4] Shahmirzadi, M.A.A., Hosseini, S.S., Luo, J., Ortiz, I. 2018. Significance, Evolution and Recent Advances in Adsorption Technology, Materials and Processes for Desalination, Water Softening and Salt Removal. *Journal of Environmental Management*, 215, 324-344.
- [5] Micari, M., Moser, M., Cipollina, A., Tamburini, A., Micale, G., Bertsch, V. 2020. Towards the Implementation of Circular Economy in The Water Softening Industry: A Technical, Economic and Environmental Analysis. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120291.
- [6] Aragaw, T.A., Ayalew, A.A. 2019. Removal of Water Hardness Using Zeolite Synthesized from Ethiopian Kaolin by Hydrothermal Method. *Water Practice a Technology*, 14 (1), 145-159.
- [7] Vajnhandl, S., Valh, J.V. 2014. The Status of Water Reuse in European Textile Sector. *Journal of Environment Management*, 141, 29-35.
- [8] Mughees, W., Al-Ahmad, M. 2015. Application of Water Pinch Technology in Minimization of



- Water Consumption at a Refinery. *Computers & Chemical Engineering*, 73, 34-42.
- [9] Türkiye Bilimsel Ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK), 2016. Sanayide Temiz Üretim Olanaklarının ve Uygulanabilirliğinin Belirlenmesi Projesi. Maya Sektöründe Temiz Üretim El Kitabı, Kocaeli.
- [10] Dursun, M. 2015. An Integrated Approach for the Evaluation of Wastewater Treatment Alternatives. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science (WCECS)*, October 21-23.
- [11] Simsek, E., Demirel, Y. E., Ozturk, E., Kitis, M. 2021. Use of Multi-Criteria Decision Models for Optimization of Selecting The Most Appropriate Best Available Techniques in Cleaner Production Applications: A Case Study in A Textile Industry. *Journal of Cleaner Production*, 130311.
- [12] Ozturk, E. 2018. Applying Analytical Decision Methods for Determination of The Best Treatment Alternative to Remove Emerging Micropollutants from Drinking Water and Wastewater: Triclosan Example. *Environmental Science and Pollution Research*, 25, 30517-30546.
- [13] Pazand, K., Hezarkhani, A., and Ataei, M. 2012. Using TOPSIS Approaches for Predictive Porphyry Cu Potential Mapping: A Case Study in Ahar-Arasbaran Area (NW, Iran). *Computers & Geosciences*, 49, 62-71.
- [14] Chu, J., and Su, Y. 2012. The Application of TOPSIS Method in Selecting Fixed Seismic Shelter for Evacuation in Cities. *Systems Engineering Procedia*, 3, 391-397.
- [15] Srdjevic, B., Medeiros, Y.D.P., Faria, A.S. 2004. An Objective Multi-Criteria Evaluation of Water Management Scenarios. *Water Resources Management*, 18, 35-54.
- [16] Kwong, C.K., Tam, S.M. 2002. Case-Based Reasoning Approach to Concurrent Design of Lowpower Transformers. *Journal of Materials Processing Technology*, 128, 136-141.
- [17] Peters, M.L., and Zelewski, S. 2007. TOPSIS als Technik zur Effizienzanalyse. *Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt*, 1-9.
- [18] Yue, Z. 2011. A Method for Group Decision-Making Based on Determining Weights of Decision Makers Using TOPSIS. *Applied Mathematical Modelling*, 35-4, 1926-1936.
- [19] Janic, M. 2003. Multicriteria Evaluation of High Speed Rail, Transrapid Maglev and Air Passenger Transport in Europa. *Transportation Planning & Technology*, 26(6), 491-512.
- [20] Ozturk, E., Karaboyacı, M., Yetis, U., Yigit, N.O., Kitis, M. 2016. Minimization of Water and Chemical Use in a Cotton/Polyester Fabric Dyeing Textile Mill. *Journal of Cleaner Production*, 130, 92-102.
- [21] Alkaya, E., Demirer G. N. 2014. Sustainable Textile Production: a Case Study From a Woven Fabric Manufacturing Mill in Turkey. *Journal of Cleaner Production*, 65, 595-603.
- [22] European Commission (EC), 2009. Reference Document on The Best Available Techniques in Energy Efficiency, Spain.
- [23] Öztürk, E. 2014. Tekstil Sektöründe Entegre Kirlilik Önleme ve Kontrolü ve Temiz Üretim Uygulamaları. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, Isparta.
- [24] Kiran, C.N. 2003. Reduction in Resource Consumption by Process Modifications in Cotton Wet Process. *Journal of Cleaner Production*, 11, 481-486.
- [25] Cheng, S., Chan, C.W., Huang, G. H. 2002. Using Multiple Criteria Decision Analysis for Supporting Decisions of Solid Waste Management. *Journal of Environmental Science Health, Part A*, 37(6), 975-990.

## Ekler

**Ek A.** Proses suyu hazırlama sistemlerine yönelik belirlenen MET alternatiflerinin değerlendirilmesi için uzman görüşü formu

### Ek A.

Bu çalışmada IPPC Tekstil ve Enerji Verimliliği BREF Dokümanları ile literatür araştırmaları sonucu, tesislerde uygulanabilecek olan Mevcut En İyi Tekniklerin (MET) çok ölçütlü karar verme yöntemi (ÇÖKVM) olan TOPSIS modeli ile belirlenmesi amaçlanmıştır. Aşağıda sorulara verilen yanıtlar, değerlendirme kriterlerinin ağırlık puanlarını ve her MET alternatifinin değerlendirme kriterlerine göre ağırlıklarını belirlemek için kullanılacaktır. Bu kapsamda tesislerdeki su, enerji ve kimyasal tüketiminin azaltılması konusunda uzman görüşlerinin işe yansıtılması hedeflenmektedir. Aşağıdaki sorulara verilen yanıtlar, değerlendirme kriterlerinin ağırlık puanlarını ve her MET alternatifinin değerlendirme kriterlerine göre ağırlıklarını belirlemek için kullanılacaktır.

#### 1. Kriter ağırlıklandırma

Tablo A'da sunulan kriterleri önem derecesine göre 1-9 puan arasında puanlayınız.

- 1-2 puan: çok düşük öncelikli
- 3-4 puan: düşük öncelikli
- 5-6 puan: orta seviyede öncelikli
- 7-8 puan: öncelikli
- 9 puan: Yüksek öncelikli

**Tablo A.** Değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılması

No	Kriterler	Puanlar
1	Uygulanabilirlik	
2	Çevresel fayda	
3	Ekonomik tasarruf	
4	İlk yatırım maliyeti	
5	İşletme ve bakım-onarım maliyeti	
6	Yan etkileşimler	
7	Etkili kullanım ömrü	
8	Uzmanlık gereksinimi	
9	Kolay işletme ve bakım	
10	Personel gereksinimi	
11	Geri ödeme süresi	

#### 2. Alternatiflerin kriterlere göre ağırlıklandırılması

Aşağıda verilen Tablo B'de her bir değerlendirme kriterini esas alarak ilgili MET'leri (alternatifleri) ağırlıklandırınız. Ağırlıklandırmada, aşağıdaki Tablo C'de sunulan kılavuz tablodan yararlanınız.

**Tablo B.** Alternatiflerin (MET'lerin) değerlendirme kriterlerine göre ağırlıklandırılması

Alternatifler (MET'ler)	Değerlendirme Kriterleri										
	Geri Ödeme Süresi	Personel Gereksinimi	Kolay İşletme ve Bakım	Uzmanlık Gereksinimi	Etkili kullanım ömrü	Yan etkileşimler	İşletme ve bakım-onarım maliyeti	İlk yatırım maliyeti	Ekonomik tasarruf	Çevresel Fayda	Uygulanabilirlik
Su yumuşatma öncesindeki kum filtresi geri yıkama sularının yeniden kullanılması											
İyon değiştirme reçine sistemi çıkış suyunda (proses suyu-yumuşatılmış su) eş-zamanlı sertlik izleme sensörleri kullanılması											
Katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerinde rejenerasyon süresinin optimize edilmesi											
Manuel işletim uygulanan tesislerde katyonik iyon değiştirme reçine sistemlerinde rejenerasyon sıklığının ham su kalitesine göre optimize edilmesi											
Rejenerasyon sularının yüksek su kalitesi gerektirmeyen alanlarda ve/veya tesis içi temizlik işlemlerinde geri kullanılması											
Katyonik iyon değiştirme reçine sisteminde ön yıkama ve rejenerasyon sonrası yıkama/durulama sularının geri kullanımı											
Rejenerasyon sularının yüksek tuz gereksinimi olan uygun proseslerde geri kullanımı											

**Tablo C. Ağırlık kılavuz tablosu**

<b>Uygulanabilirlik</b>	<b>Değerlendirme Puanı</b>	<b>Çevresel Fayda<sup>a</sup></b>	<b>Değerlendirme Puanı</b>
Uygulanabilir	6-9	>20	8-9
Kısmen uygulanabilir	3-6	15-20	6-7
		10-15	4-5
Uygulanamaz	1-3	5-10	2-3
		<5	1
<b>Ekonomik Tasarruf<sup>b</sup></b>	<b>Değerlendirme Puanı</b>	<b>İlk Yatırım Maliyeti</b>	<b>Değerlendirme Puanı</b>
>40	8-9	<1000\$	8-9
30-40	6-7	1000-3000\$	6-7
20-30	4-5	3000-5000\$	4-5
10-20	2-3	5000-10000\$	2-3
<10	1	>10000\$	1
<b>İşletme, bakım ve onarım maliyeti<sup>c</sup></b>	<b>Değerlendirme Puanı</b>	<b>Yan Etkileşimler<sup>d</sup></b>	<b>Değerlendirme Puanı</b>
<1000\$/yıl	8-9	Yüksek pozitif etki	8-9
1000-3000\$/yıl	6-7	Düşük pozitif etki	6-7
3000-5000\$/yıl	4-5	Düşük negatif etki	4-5
5000-10000\$/yıl	2-3	Yüksek negatif etki	2-3
>10000\$/yıl	1	Çok yüksek negatif etki	1
<b>Etkili Kullanım Ömrü<sup>e</sup></b>	<b>Değerlendirme Puanı</b>	<b>Uzmanlık Gereksinimi<sup>f</sup></b>	<b>Değerlendirme Puanı</b>
>10	8-9	Uzmanlık gerektirmez	6-9
5-10 yıl	6-7	Orta seviyede uzmanlık gerektiriyor	3-6
3-5 yıl	4-5		
2-3 yıl	2-3		
<2 yıl	1	Yüksek uzmanlık gerektiriyor	1-3
<b>Kolay İşletme ve Bakım<sup>g</sup></b>	<b>Değerlendirme Puanı</b>	<b>Personel Gereksinimi<sup>h</sup></b>	<b>Değerlendirme Puanı</b>
Kolay işletme ve bakım	6-9	Personel gerektirmez	8-9
Orta seviyede işletme ve bakım	3-6	Az sayıda personel gerektirir (1 ek personel)	6-7
		Orta seviyede personel gerektirir (2-3 ek personel)	4-5
Zor işletim ve bakım gereksinimi	1-3	Yüksek sayıda personel gerektirir (4-10 ek personel)	2-3
		Çok yüksek sayıda personel gerektirir (>10 ek personel)	1
<b>Geri Ödeme Süresi<sup>i</sup></b>	<b>Değerlendirme Puanı</b>		
<1	8-9		
1-3	6-7		
3-5	4-5		
5-10	2-3		
>10	1		

<sup>a</sup>Çevresel fayda; rejenerasyon atıksuyunda ve atıksuların tuz yükündeki azalmayı ifade etmektedir. <sup>b</sup>Ekonomik tasarruf; su, kimyasal, enerji ve atık bertaraf maliyetlerindeki azalmaların toplamını ifade etmektedir. <sup>c</sup>İşletme, bakım ve onarım maliyeti; personel, su, enerji, kimyasal, bakım-onarım (yedek parça, reçine değişimi vb.), atık bertaraf birim maliyetlerinin toplamını ifade etmektedir. <sup>d</sup>Yan etkileşimler; bir alternatifin uygulanmasının neden olduğu pozitif ya da negatif etkileri ifade etmektedir. (örneğin; enerji tüketiminde artış-negatif etki, tuz tüketimindeki azalmaya bağlı olarak atık bertaraf maliyetlerinde azalma-pozitif etki) <sup>e</sup>Etkili kullanım ömrü; uygulanacak sistem ya da teknolojinin istenilen faydayı sağlayabildiği maksimum süreyi ifade etmektedir. <sup>f</sup>Uzmanlık gereksinimi; uygulanacak tekniği veya sistemi işletmek üzere kalifiye personel gereksinimini ifade etmektedir. <sup>g</sup>Kolay işletme, bakım ve onarım; Tekniğin uygulanmasından sonra işletiminin kolaylığını, bakım ve onarımın ek insan gücüne ihtiyaç duyulmadan rahat bir şekilde yapılmasını ifade etmektedir. <sup>h</sup>Personel gereksinimi; Tekniğin uygulanması için ihtiyaç duyulan personel sayısını ifade etmektedir. <sup>i</sup>Geri ödeme süresi; ilk yatırım için harcanan toplam sermayenin ne kadar sürede geri alınabileceğini ifade etmektedir.