

Atık Su Yönetimi için Bütünleşik Bulanık Çok Ölçütlü Karar Verme Yöntemi

Mehtap DURSUN

Galatasaray Üniversitesi, Mühendislik ve Teknoloji Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ortaköy,
İstanbul
mdursun@gsu.edu.tr

(Geliş/Received: 15.09.2017; Kabul/Accepted: 30.01.2018)

Özet

Bu çalışmada, ikili sözel gösterim, sözel hiyerarşiler, DEMATEL ve VIKOR metotlarını kullanarak yeni bir bulanık çok ölçütlü karar verme algoritması önerilmektedir. Karar vericilerden farklı belirsizlik derecesinde elde edilen (homojen olmayan) veriler sözel hiyerarşiler ve ikili sözel gösterim yöntemleri kullanılarak birleştirilmektedir. Ölçüt ağırlıkları, ölçütler arasındaki bağımlılığı göz önüne alan DEMATEL metodu kullanılarak hesaplanmakta ve VIKOR metodu ile alternatifler sıralanmaktadır. Geliştirilen karar verme metodu, birden fazla karar vericiden elde edilen homojen olmayan verilerin veri kaybı olmadan karar verme sürecine dahil edilmesini sağlamaktadır. Önerilmiş olan karar verme metodu, İstanbul için en uygun atık su artıma alternatifinin belirlenmesinde kullanılmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atık su yönetimi, DEMATEL, İkili sözel gösterim, Sözel hiyerarşiler, VIKOR.

Integrated Fuzzy Multi-criteria Decision Making Approach for Wastewater Management

Abstract

This paper develops a fuzzy multi-criteria decision making methodology that combines 2-tuple linguistic representation model, linguistic hierarchies, Decision Making Trial and Evaluation Laboratory (DEMATEL) method and VlseKriterijumska Optimizacija I Komprominso Resenje (VIKOR) method. The multigranular linguistic information obtained from decision-makers are unified and aggregated employing linguistic hierarchies and 2-tuple fuzzy linguistic representation model. The weights of the criteria are calculated employing DEMATEL method, which enables to consider inner dependencies among criteria. Then, fuzzy VIKOR method is utilized to obtain the rankings of the alternatives. The developed methodology is able to handle information in a decision-making problem with multiple information sources. Furthermore, it enables managers to deal with heterogeneous information without loss of information. The developed methodology is used to determine the most suitable wastewater treatment alternative for Istanbul, the largest city of Turkey that is also listed among the world's most crowded cities.

Keywords: Wastewater management, DEMATEL, 2-tuple fuzzy linguistic representation, Linguistic hierarchies, VIKOR

1. Giriş

Günümüzde, birçok ülke çevresel problemler yaşamakta ve gelecekte de yeni sorunlarla karşılaşmayı beklemektedir. Artılmamış atık su, kamu sağlığı ve çevre üzerinde ciddi etkilere sahiptir. Bu nedenle, atık su yönetimi, gelişmekte olan ülkelerin en önemli çevresel sorunlarından biri olarak kabul edilmektedir.

Bu çalışmanın amacı, ikili sözel gösterim, sözel hiyerarşiler, DEMATEL ve VIKOR metotlarını birleştiren yeni bir bulanık çok

ölçütlü grup karar verme (ÇÖGKV) yöntemi geliştirmektir. Gerçek hayatta karşılaşılan karar verme problemleri nicel ve nitel değerlendirmeler içermektedir. Nitel verilerin değerlendirme sürecine dahil edilmesinde bulanık küme teorisinden yararlanılabilir. Sözel değişkenleri karar verme sürecine dahil etmede karşılaşılan en önemli sorun belirsizlik derecesinin belirlenmesidir. Karar vericinin kişisel deneyimlerine göre belirsizlik derecesi değişmektedir. Bu nedenle, karar verici bir düşüncüyü ifade etmede daha az veya daha çok terim kullanabilir (homojen olmayan veriler).

Karar vericilerden elde edilen farklı belirsizlik derecelerine sahip homojen olmayan verilerin işlenebilmesi ve bu verilerden anlamlı bir sonuç çıkarılabilmesi için öncelikle bu verilerin aynı belirsizlik derecesine indirgenmesi gerekmektedir. Bu süreçte karşılaşılan en önemli problem veri kaybıdır. Veri kaybı elde edilen sonuçların tutarlılığını ve anlamlılığını değiştirmektedir. Önerilen yöntem, veri kaybını en aza indirgeyerek farklı belirsizlik derecelerine sahip verilerin birleştirilmesi ve işlenmesi için ikili sözel gösterim ve dilsel hiyerarşileri kullanmaktadır. Ölçütlerin önem dereceleri DEMATEL yöntemi ile hesaplanmakta ve daha sonra alternatiflerin sıralanması için bulanık VIKOR yöntemi kullanılmaktadır. Önerilen metodolojinin uygulanması, atık su arıtma alternatiflerini değerlendirebilmek için İstanbul'da yapılan bir vaka çalışmasıyla gösterilmiştir.

Bu çalışmanın katkıları şu şekilde özetlenebilir.

1. Karar vericilerin değerlendirmelerinin farklılıklarının ve benzerliklerinin ortaya koyulmasını sağlayan bir grup karar verme yaklaşımı geliştirilmiştir.
2. Bulanık küme teorisini kullanarak belirsiz verilerin sürece dahil edilmesi sağlanmıştır.
3. Ölçüt ağırlıklarını hesaplamak için ölçütler arasındaki bağımlılıkları dikkate alan DEMATEL yöntemi kullanılmıştır.
4. Literatürde var olan, bulanık sözel yaklaşımların kullanılmasıyla ortaya çıkan veri kaybı sorununu en aza indirmek için sözel hiyerarşiler ve ikili sözel gösterim yöntemleri kullanılmıştır.
5. Farklı belirsizlik derecesinde elde edilen verilerin ele alınmasına olanak verdiği için karar vericiler tarafından homojen olmayan verilerin kullanılmasına olanak sağlanmıştır.

Atık su arıtma işleminin temel amacı, insan ve endüstriyel atığın halk sağlığına ve çevreye zarar vermeden uzaklaştırılmasıdır. Sürdürülebilir kalkınmayı mümkün kılan uygun atık su arıtma tekniğinin seçilmesi, ulusal, bölgesel ve yerel politikalar açısından önem arz etmektedir [1]. Son teknolojik gelişmeler birçok atık su arıtma teknolojisinin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Atık su arıtma teknolojisi seçim problemi, birbiriyle çelişen farklı ölçütler içeren yapısıyla çok ölçütlü karar verme yöntemlerinin uygulanmasına gereksinim

göstermektedir. Atık su arıtma teknolojisi seçim sürecinde belirsizlik önemli rol oynamaktadır. Belirsiz yargıları karar verme sürecine dahil etmede bulanık küme teorisinden yararlanılabilir. Bununla birlikte, karar vericilerin, değerlendirmeleri arasındaki benzerlikleri ve farklılıkları daha açık bir şekilde ortaya koymalarına imkan sağlaması nedeniyle grup karar verme yöntemleri sıklıkla tercih edilen yöntemler arasındadır. Literatürde, atık su arıtma alternatiflerini değerlendirmek için farklı çok ölçütlü karar verme (ÇÖKV) yaklaşımları kullanan çalışmalar bulunmaktadır. Aragonés-Beltrán ve diğerleri [2] atık su arıtma alternatifinin seçimi için analitik hiyerarşi süreci (AHS) ve PROMETHEE yöntemlerini kullanmıştır. Sala-Garrido ve diğerleri [3] farklı atık su arıtma teknolojilerinin etkinliğini karşılaştırmak için veri zarflama analizi (VZA) uygulamıştır. Kalbar ve diğerleri [1] TOPSIS yöntemini uygulayarak Hindistan'daki belediye atık suyunun arıtımında kullanılan atık su arıtma teknolojilerini sıralamıştır. Srdjevic ve diğerleri [4] AHS kullanarak Sırbistan'daki metal endüstrisi için atık su arıtma yöntemlerini değerlendirmiştir. Kalbar ve diğerleri [5] atık su arıtma teknolojilerini sıralamak için niteliksel ve niceliksel ölçütleri de dikkate alan bir ÇÖKV yaklaşımı geliştirmiştir. Kalbar ve diğerleri [6] farklı atık su arıtma seçeneklerini sıralamak için kullanılan farklı ÇÖKV metodolojilerinin sonuçlarını karşılaştırmıştır. Molinos-senante ve diğerleri [7] küçük toplumlarda atık su arıtma teknolojisi alternatiflerini sıralamak için AAS'yi kullanmıştır. Son zamanlarda, Castillo ve diğerleri [8] gıda, içecek ve süt sektöründe endüstriyel atık su arıtımında en uygun alternatifi belirlemek için bir çevresel karar destek sistemi geliştirmiştir.

Bölüm 2'de sırasıyla DEMATEL yöntemi, ikili sözel gösterim modeli, sözel hiyerarşiler ve önerilen karar verme yaklaşımının aşamaları hakkında bilgi verildikten sonra, Bölüm 3'te önerilen yöntemin atık su arıtma alternatif seçim problemine uygulanması gerçekleştirilmiştir. Sonuç bölümünde ise elde edilen sonuçlar ve gelecekte yapılması öngörülen çalışmalar belirtilmiştir.

2. Materyal ve Metod

2.1 DEMATEL metodu

DEMATEL yöntemi, karmaşık ve iç içe geçmiş problemleri, faktör etkilerini de göz önüne alarak analiz etmek amacı ile geliştirilmiştir. Metot, karmaşık problemlerin yapısal ilişkilerini ortaya koymakta ve çeşitli alanlarda uygulanmaktadır. DEMATEL yöntemi ölçütler arasında karşılıklı bağımlılıkları göz önüne almaktadır. DEMATEL yönteminin adımları aşağıdaki gibi özetlenebilir [9].

Adım 1. Başlangıç ortalama matrisini oluşturma. Karar vericiler, a_{ij} ile gösterilen, faktör i ve j arasındaki doğrudan etkileri değerlendirir. Ardından başlangıç ortalama matrisi A oluşturulur. Ortalama matrisin köşegen elemanları sıfır olarak belirlenir.

Adım 2. Başlangıç etki matrisini hesaplama. Başlangıç etki matrisi, D , ortalama matrisi normalize ederek, $D = \xi \cdot A$, formülasyonu ile elde edilir; bu gösterimde

$$\xi = \min \left[\frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n |a_{ij}|}, \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{i=1}^n |a_{ij}|} \right] \quad (1)$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Adım 3. Toplam etki matrisini oluşturma.

Toplam etki matrisi T , $T = D(I - D)^{-1}$ olarak tanımlanır. Bu gösterimde I birim matristir. f ve c , sırasıyla, toplam etki matrisi T 'nin, satır ve sütun toplamlarını belirten $n \times 1$ ve $1 \times n$ vektörleri olsun. f_i , T matrisindeki i satır toplamı olsun. Bu durumda, f_i , faktör i 'nin diğer faktörler üzerinde doğrudan ve dolaylı etkilerini (toplam etki) gösterir. c_j , T matrisindeki j sütunun toplamını temsil ediyorsa, c_j faktör j 'nin diğer faktörlerden aldığı doğrudan ve dolaylı etkilerin toplamını ifade eder.

Adım 4. Digraf elde etmek için eşik değeri tanımlama.

İlişkileri açıklamak için bir eşik değeri belirlemek gerekmektedir. Sadece etki seviyesi eşik değerinden yüksek olan faktörler daha ileri değerlendirmelerde göz önüne alınır.

2.2. İkili sözel gösterim

Birden çok karar vericinin dahil olduğu karar verme süreçlerinde homojen olmayan verilerin kullanılması olağan bir durum olarak karşımıza çıkmaktadır. Bununla birlikte literatürde var olan karar verme yöntemlerinin çoğu bütün karar vericilerin görüşlerini aynı tip veriler kullanarak açıkladıkları varsayımına dayanmaktadır. Herrera ve Martinez [10] tarafından geliştirilmiş olan ikili sözel gösterim yaklaşımı sembolik dönüşüm olgusuna dayanmaktadır. Bu yaklaşım sözel olarak ifade edilmiş bir verinin sözel bir terim ve bir sayıdan oluşan ikili gösterim ile ifade edilmesine olanak sağlamaktadır ve (s_i, α) şeklinde gösterilmektedir. Gösterimde s_i tanımlanmış temel sözel terim kümesinin, S_T , sözel etiketini ve α sembolik dönüşümü belirten sayısal değeri ifade etmektedir. Bulanık kümelerle hesaplama yapmanın en büyük dezavantajı bilgi kaybının meydana gelmesidir. Yöntem bulanık verilerle işlem yaparken oluşabilecek veri kaybını en aza indirmektedir.

İkili gösterimlerle veri kaybı olmadan işlem yapmak için gerekli önemli tanımlar aşağıda verilmektedir.

$L = (\gamma_0, \gamma_1, \dots, \gamma_g)$, S_T 'de tanımlı bir bulanık küme olsun. L 'yi $[0, g]$ aralığında sayısal bir değere dönüştürecek olan dönüşüm fonksiyonu aşağıdaki şekilde tanımlanır [10]:

$$\chi : F(S_T) \rightarrow [0, g],$$

$$\chi(F(S_T)) = \chi(\{(s_j, \gamma_j), j = 0, 1, \dots, g\}) = \frac{\sum_{j=0}^g j\gamma_j}{\sum_{j=0}^g \gamma_j} = \beta. \quad (2)$$

Gösterimde, $F(S_T)$ S_T 'de tanımlı bir bulanık kümedir.

$S = \{s_0, s_1, \dots, s_g\}$ bir sözel terim kümesi ve $\beta \in [0, g]$ sembolik birleştirme işleminin sonucunu gösteren bir değer olsun. β 'nın ikili sözel gösterimi aşağıdaki şekilde hesaplanır [11]:

$$\Delta : [0, g] \rightarrow S \times [-0.5, 0.5],$$

$$\Delta(\beta) = \begin{cases} s_i, & i = \text{round}(\beta) \\ \alpha = \beta - i, & \alpha \in [-0.5, 0.5), \end{cases} \quad (3)$$

$S = \{s_0, s_1, \dots, s_g\}$ bir sözel terim kümesi ve (s_i, α) ikili gösterim olsun. İkili gösterimden eşdeğeri sayısal $\beta \in [0, g] \subset \mathfrak{R}$ değerine dönmek için Δ^{-1} fonksiyonu bulunmaktadır. Bu fonksiyon

$$\Delta^{-1} : S \times [-0.5, 0.5] \rightarrow [0, g],$$

$$\Delta^{-1}(s_i, \alpha) = i + \alpha = \beta. \quad (4)$$

şeklinde ifade edilir [11].

2.3. Sözel hiyerarşiler

Sözel hiyerarşiler kavramı Cordon ve diğerleri [12] tarafından sözel kuralların hiyerarşik sistemini tasarlamak için önerilmiş ve farklı belirsizlik derecesinde elde edilen sözel verilerle hesaplama hassasiyetini arttırmak için kullanılmıştır [13].

Sözel hiyerarşiler, her seviyede farklı belirsizlik derecesinde sözel değişkenlerin olduğu bir seviyeler kümesidir. Sözel hiyerarşilerin her seviyesi $l(t, n(t))$ ile gösterilmektedir. Bu gösterimde t hiyerarşinin seviyesini, $n(t)$ ise sözel değişken kümesinin belirsizlik derecesini göstermektedir [12]. Sözel hiyerarşiler, LH , tüm seviyelerin birleşimi olarak $LH = \bigcup_t l(t, n(t))$ şeklinde ifade edilmektedir.

$t+1$ seviyesindeki sözel terimler kümesi öncülünden aşağıdaki şekilde elde edilmektedir.

$$L(t, n(t)) \rightarrow L(t+1, 2.n(t)-1) \quad (5)$$

Sözel hiyerarşiler, farklı belirsizlik derecelerine sahip verilerin birleştirilmesi işleminde oluşan bilgi kaybı problemini önlemek için kullanılmaktadır. Hiyerarşinin herhangi bir seviyesinde sözel terimler arasındaki dönüşüm şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$TF_i^t : l(t, n(t)) \rightarrow l(t', n(t')) \quad (6)$$

$$TF_i^t(s_i^{n(t)}, \alpha^{n(t)}) = \Delta \left(\frac{\Delta^{-1}(s_i^{n(t)}, \alpha^{n(t)}) (n(t)-1)}{n(t)-1} \right)$$

Dönüşüm fonksiyonu, bilgi kaybı olmaksızın dönüşümlerin yapılmasını garanti eden bijektif olma özelliğine sahiptir [12].

2.4. Bulanık karar verme metodolojisi

Bulanık çok ölçütlü grup karar verme problemlerinde, karar vericiler önceden belirlenmiş bir sözel değişken kümesini kullanarak tercihlerini ifade ederler. Karar vericiler, problemle ilgili farklı bilgilere sahip olmaları nedeniyle, tercihlerini farklı belirsizlik derecesine sahip sözel değişkenler kullanarak belirtebilirler. Bu durum, elde edilen verilerin aynı temel sözel terim kümesinde ifade edilmesi gerektirmektedir. Bu problemi çözmek için çok terimli sözel yaklaşımlar kullanılabilir. Önerilen metodoloji, karar vericilerden alınan farklı belirsizlik derecesine sahip verileri bilgi kaybı olmaksızın birleştirmede sözel hiyerarşileri ve ikili sözel gösterim yöntemini kullanmaktadır. Ayrıca, ölçütlerin ağırlıklarını hesaplamak için DEMATEL metodu kullanılmaktadır. DEMATEL yöntemi, ölçütler arasındaki bağımlılıkları göz önüne alır. Önerilen yöntem Şekil 1'de gösterilmekte ve aşağıda özetlenmektedir.

Adım 1. Z ($z=1,2,\dots,Z$) karar vericiden oluşan bir komite oluşturulur ve alternatifler ($i=1,2,\dots,m$) ve seçim ölçütlerini ($j=1,2,\dots,n$) belirlenir.

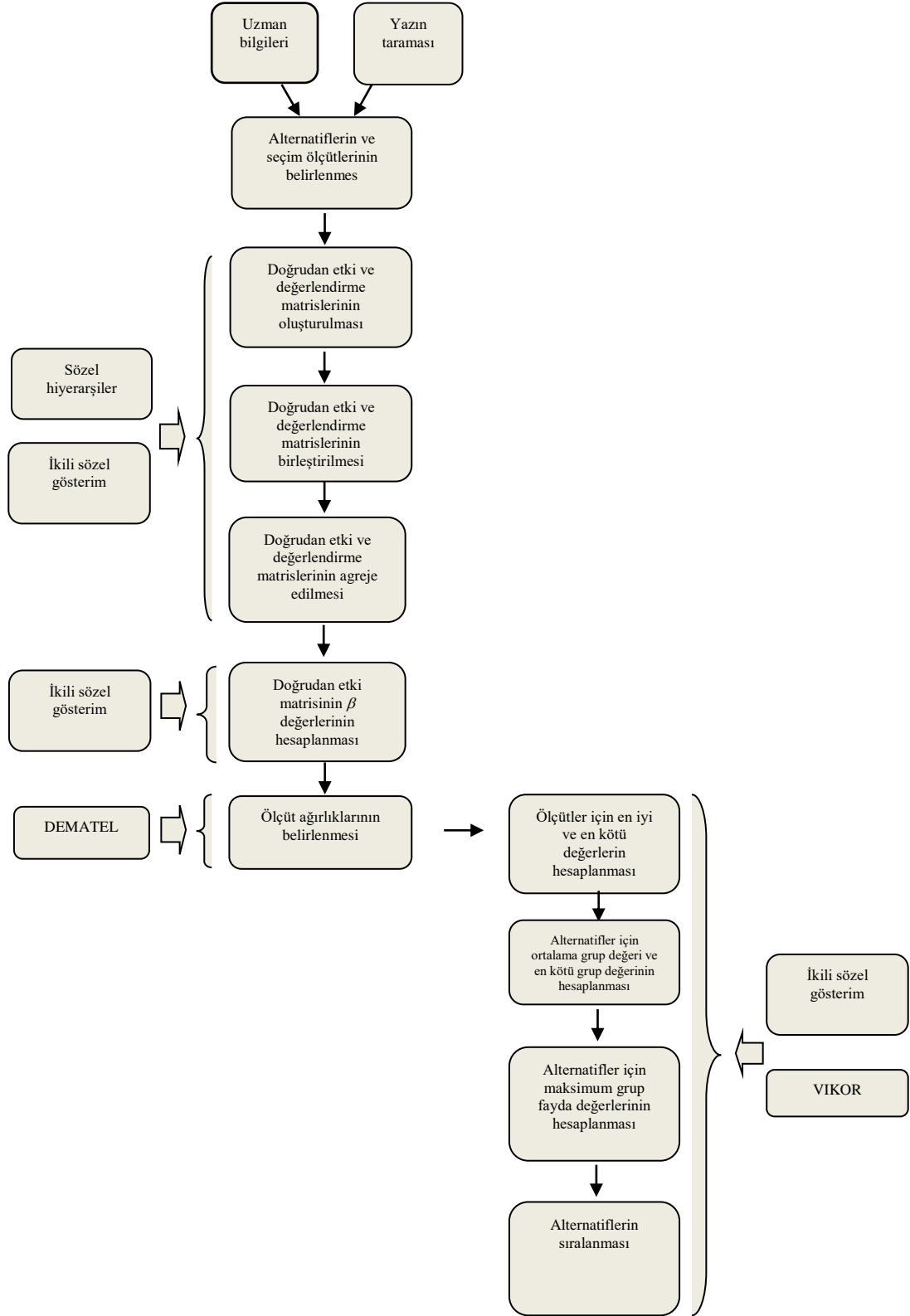
Adım 2. Her karar verici için, ölçütler arasındaki doğrudan etkileri ve alternatiflerin ölçütlere göre değerlendirmesini içeren karar matrislerini oluşturulur.

Adım 3. Karar vericilerden elde edilen homojen olmayan verileri Denklem (6)'yı kullanarak temel sözel terim kümesine indirgenir.

Adım 4. Doğrudan etki ve değerlendirme matrislerini ikili ağırlıklı ortalama operatörünü kullanarak agreje edilir.

$$\bar{x} = \Delta \left(\frac{\sum_{i=1}^n \Delta^{-1}(s_i, \alpha)}{n} \right) \quad (7)$$

Adım 5. Doğrudan etki matrisi için β değerlerini hesapla ve DEMATEL metodunu kullanarak ölçütlerin önem derecelerini, ψ_j , hesaplanır.



Şekil 1. Önerilen bulanık karar verme algoritması akış şeması

Adım 6. Her ölçüt için en iyi (r_j^*) ve en kötü (r_j^-) değerler aşağıdaki şekilde belirlenir.

$$r_j^* = \max_i r_{ij} \text{ ve } r_j^- = \min_i r_{ij} \quad (8)$$

bu gösterimde r_{ij} alternatiflerin birleştirilmiş değerlendirmelerinin β değerini göstermektedir.

Adım 7. Alternatifler için ortalama grup değeri (S_i) ve en kötü grup değeri (R_i) hesaplanır.

$$S_i = \sum_{j=1}^n \frac{\psi_j (r_j^* - r_{ij})}{r_j^* - r_j^-} \quad (9)$$

$$R_i = \max \frac{\psi_j (r_j^* - r_{ij})}{r_j^* - r_j^-} \quad (10)$$

Adım 8. Alternatifler için maksimum grup faydası (r_{ij}) aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$Q_i = \frac{\nu(S_i - S^*)}{S^- - S^*} + \frac{(1-\nu)(R_i - R^*)}{R^- - R^*} \quad (11)$$

Bu hesaplamada, S^* ve R^* en küçük, S^- ve R^- ise en büyük S_i ve R_i değerlerini göstermektedir. Formüldeki ν değeri en yüksek grup faydasını yaratacak strateji için ağırlık değerini ifade etmektedir ve bu çalışmada 0.5 olarak alınmıştır.

Adım 9. Her alternatif için S_i , R_i ve Q_i değerleri küçükten büyüğe sıralanır.

Adım 10. S_i , R_i ve Q_i değerlerinin sıralamasına göre karar vericiler için kabul edilebilir avantaj (C_1) ve kabul edilebilir istikrar (C_2) kümeleri belirlenir. Bir alternatifin C_1 kümesinde yer alabilmesi için (12) numaralı formülde gösterilen koşulu sağlaması gerekmektedir. Bu gösterimde $DQ = \frac{1}{1-m}$ olarak hesaplanmaktadır.

$$Q(A_2) - Q(A_1) \geq DQ \quad (12)$$

Q_i sıralamasına göre A_2 alternatifi A_1 alternatifinden sonraki sırada yer alıyor ve (12) numaralı formülde gösterilen koşulu sağlıyorsa A_1 , C_1 kümesinde yer alır. C_2 kümesini ise S_i , R_i ve Q_i sıralamalarının tamamında aynı sırada yer alan alternatifler oluşturur.

3. Bulanık Grup Karar Verme Algoritması ile Atık Su Arıtma Alternatiflerinin Değerlendirilmesi

Önerilen karar verme yönteminin atık su arıtma alternatif seçim problemine uygulanmasını göstermek için İstanbul'da yürütülmüş olan bir vaka çalışması sunulmuştur. Uzmanlarla yapılan görüşmeler sonucunda, dört atık su arıtma alternatifi aşağıdaki gibi belirlenmiştir.

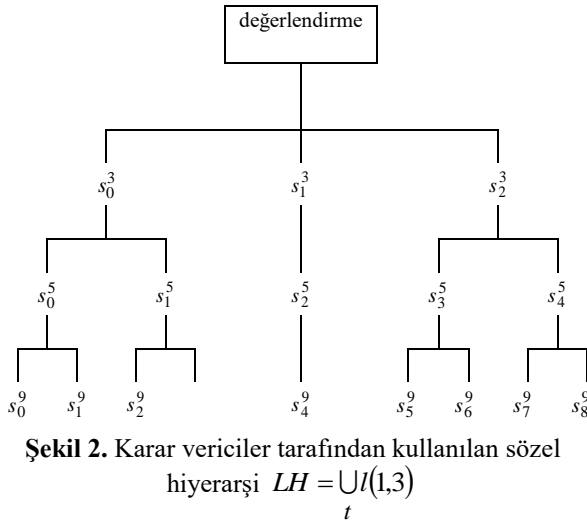
- A_1 : Aktif çamur,
- A_2 : Havalandırmalı lagünler,
- A_3 : Ardışık kesikli reaktör,
- A_4 : Yapay sulak alanlar.

Atık su arıtma alternatif seçimiyle ilgili sekiz ölçüt şu şekilde tanımlanmıştır:

- C_1 : Maliyet,
- C_2 : Küresel ısınma,
- C_3 : Ötrofikasyon,
- C_4 : Arazi şartları,
- C_5 : İşgücü gereksinimi,
- C_6 : Güvenilirlik,
- C_7 : Sürdürülebilirlik,
- C_8 : Esneklik.

Değerlendirme süreci dört karar verici (DM_1 , DM_2 , DM_3 , DM_4) tarafından gerçekleştirilmiştir. Şekil 2'de gösterilen $LH = \bigcup_t l(1,3)$ sözel hiyerarşisi, karar verme

problemlerinde sıklıkla kullanıldığı için değerlendirilmede tercih edilmiştir.



Şekil 2. Karar vericiler tarafından kullanılan sözel hiyerarşi $LH = \bigcup_l(1,3)$

DM_1 $l(1,3)$ 'ü, DM_2 ve DM_3 $l(2,5)$ 'i ve DM_4 $l(3,9)$ 'u kullanmayı tercih etmiştir. Dört karar vericinin değerlendirmeleri Tablo 1 ve 2'de verilmektedir.

Karar vericilerin çoğu tercihlerini $l(2,5)$ sözel terim kümesini kullanarak belirttiği için homojen olmayan verileri birleştirmek için $l(2,5)$ temel sözel terim kümesi olarak belirlenmiştir. Karar vericilerin önem ağırlıkları eşit kabul edilmiş ve değerlendirmeleri agreje etmek için ikili ağırlıklı ortalama operatörü kullanılmıştır.

Tablo 1. Ölçütler (C_j) arasındaki doğrudan etki matrisi için karar vericilerden elde edilen veriler

C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8
C_1	$(s_1^3, s_1^5, s_2^5, s_2^9)$	$(s_0^3, s_1^5, s_2^5, s_2^9)$	$(s_2^3, s_2^5, s_4^5, s_4^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_4^5, s_5^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_2^5, s_4^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_2^5, s_4^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_1^5, s_3^9)$
C_2	$(s_1^3, s_1^5, s_1^5, s_2^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_2^5, s_4^9)$	$(s_0^3, s_1^5, s_1^5, s_1^9)$	$(s_0^3, s_0^5, s_1^5, s_0^9)$	$(s_2^3, s_2^5, s_4^5, s_5^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_4^5, s_6^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_3^5, s_4^9)$
C_3	$(s_1^3, s_2^5, s_2^5, s_5^9)$	$(s_0^3, s_2^5, s_1^5, s_5^9)$	$(s_0^3, s_0^5, s_0^5, s_0^9)$	$(s_0^3, s_1^5, s_0^5, s_1^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_4^5, s_8^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_4^5, s_8^9)$	$(s_2^3, s_2^5, s_2^5, s_6^9)$
C_4	$(s_2^3, s_3^5, s_3^5, s_7^9)$	$(s_0^3, s_2^5, s_0^5, s_6^9)$	$(s_0^3, s_2^5, s_0^5, s_5^9)$	$(s_0^3, s_0^5, s_2^5, s_2^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_3^5, s_5^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_3^5, s_4^9)$	$(s_1^3, s_1^5, s_3^5, s_3^9)$
C_5	$(s_2^3, s_3^5, s_3^5, s_6^9)$	$(s_2^3, s_1^5, s_1^5, s_2^9)$	$(s_0^3, s_2^5, s_1^5, s_1^9)$	$(s_0^3, s_0^5, s_2^5, s_0^9)$	$(s_1^3, s_1^5, s_3^5, s_2^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_3^5, s_5^9)$	$(s_1^3, s_1^5, s_2^5, s_4^9)$
C_6	$(s_2^3, s_3^5, s_4^5, s_8^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_4^5, s_8^9)$	$(s_1^3, s_3^5, s_3^5, s_7^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_3^5, s_6^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_3^5, s_7^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_4^5, s_8^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_4^5, s_7^9)$
C_7	$(s_1^3, s_3^5, s_3^5, s_7^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_4^5, s_7^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_3^5, s_7^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_4^5, s_8^9)$	$(s_1^3, s_4^5, s_3^5, s_8^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_4^5, s_8^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_4^5, s_8^9)$
C_8	$(s_1^3, s_3^5, s_2^5, s_7^9)$	$(s_2^3, s_2^5, s_3^5, s_5^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_3^5, s_7^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_2^5, s_6^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_2^5, s_6^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_4^5, s_6^9)$	$(s_2^3, s_2^5, s_4^5, s_6^9)$

Tablo 2. Alternatiflerin (A_i) ölçütlere (C_j) göre değerlendirmesi için karar vericilerden elde edilen veriler

	A_1	A_2	A_3	A_4
C_1	$(s_1^3, s_2^5, s_2^5, s_4^9)$	$(s_0^3, s_2^5, s_1^5, s_2^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_2^5, s_3^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_3^5, s_6^9)$
C_2	$(s_1^3, s_2^5, s_2^5, s_3^9)$	$(s_1^3, s_1^5, s_1^5, s_2^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_4^5, s_7^9)$	$(s_0^3, s_0^5, s_0^5, s_0^9)$
C_3	$(s_1^3, s_2^5, s_2^5, s_5^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_4^5, s_7^9)$	$(s_0^3, s_1^5, s_0^5, s_2^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_2^5, s_5^9)$
C_4	$(s_1^3, s_2^5, s_1^5, s_2^9)$	$(s_1^3, s_1^5, s_1^5, s_2^9)$	$(s_0^3, s_1^5, s_0^5, s_0^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_4^5, s_8^9)$
C_5	$(s_2^3, s_3^5, s_3^5, s_6^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_3^5, s_7^9)$	$(s_1^3, s_1^5, s_1^5, s_3^9)$	$(s_1^3, s_0^5, s_1^5, s_2^9)$
C_6	$(s_2^3, s_4^5, s_4^5, s_8^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_4^5, s_8^9)$	$(s_2^3, s_4^5, s_4^5, s_8^9)$	$(s_1^3, s_1^5, s_2^5, s_5^9)$
C_7	$(s_1^3, s_1^5, s_1^5, s_1^9)$	$(s_1^3, s_2^5, s_2^5, s_3^9)$	$(s_1^3, s_1^5, s_1^5, s_2^9)$	$(s_2^3, s_3^5, s_3^5, s_7^9)$
C_8	$(s_2^3, s_4^5, s_3^5, s_6^9)$	$(s_1^3, s_1^5, s_1^5, s_3^9)$	$(s_2^3, s_2^5, s_2^5, s_4^9)$	$(s_1^3, s_0^5, s_1^5, s_3^9)$

ağırlıkları sırasıyla 0.1183, 0.1110, 0.1129, 0.1027, 0.1004, 0.1557, 0.1609 ve 0.1380 olarak belirlenmiştir. C_1, C_2, C_4 ve C_5 azalan ölçüt olarak düşünülürken, C_3, C_6, C_7 ve C_8 artan ölçüt olarak kabul edilmiştir. Artan ölçütlerle ilgili değerlerin en büyüklenmesi amaçlanırken, azalan ölçütlerle ilgili değerlerin en küçüklenmesi hedeflenmektedir. C_1, C_2, C_4 ve C_5 ölçütleri için düşük değerlere sahip alternatifler tercih edilirken, diğer ölçütler için yüksek değerlere sahip alternatifler tercih edilmektedir.

Her ölçüt için en iyi (r_j^*) ve en kötü (r_j^-) değerler ve S_i, R_i ve Q_i değerleri Denklem (8-11) kullanılarak hesaplanmıştır. Tablo 3, önerilen metodoloji kullanılarak elde edilen sonuçları özetlemektedir.

Analiz sonuçlarına göre havalandırmalı lagün en uygun atık su arıtma alternatifi olarak belirlenmiştir. İkinci sırada aktif çamur yöntemi bulunmaktadır. Yapay sulak alanlar, yüksek maliyet ve düşük sürdürülebilirlik nedeniyle en geride yer almıştır.

Alternatif	S_i	R_i	Q_i	Sıralama
A_1	0.4865	0.1479	0.5446	2
A_2	0.4154	0.1235	0.2100	1
A_3	0.5593	0.1557	0.8266	3
A_4	0.5846	0.1609	0.8557	4

4. Sonuçlar

Arıtılmamış atık su hem çevre hem de insan sağlığı için önemli bir tehlikedir. Bu nedenle, atık su mümkün olduğunca hızlı bir şekilde kaynağından uzaklaştırılmalı ve nihai bertarafı önce uygun bir şekilde işleminden geçirilmelidir. Atık su arıtma teknolojisi seçim problemi, belirsiz ve kesin olmayan farklı ölçütler içeren yapıyla son derece önemli bir çok ölçütlü grup karar verme problemidir. Deterministik ÇÖKV yöntemleri, belirsiz ve sözel veriler içeren karar verme problemlerini etkin bir şekilde ele alamamaktadır. Bu çalışmada, klasik karar verme yöntemi kullanıldığında karşılaşılan problemleri çözmek için ikili sözel gösterim, sözel hiyerarşiler, DEMATEL yöntemi ve VIKOR metodunu birleştiren bir bulanık çok ölçütlü karar verme algoritması geliştirilmiştir.

Bulanık grup karar verme yaklaşımlarında, karar vericilerden tercihlerini daha önce belirlenmiş bir sözel değişken kümesi kullanarak ifade etmeleri beklenmektedir. Karar vericilerin problemle ilgili farklı kültürel birikimlere ve bilgi düzeyine sahip olmaları nedeniyle, tercihlerini farklı belirsizlik derecelerine sahip homojen olmayan sözel terimler kullanarak belirtmektedirler. Karar vericilerden elde edilen homojen olmayan verilerin işlenebilmesi için öncelikle bu verilerin aynı belirsizlik derecesine indirgenmesi gerekmektedir. Bu süreçte karşılaşılan asıl sorun veri kaybıdır. Geliştirilen yaklaşım, bu sorunun çözmek için ikili sözel gösterim yöntemini kullanmaktadır. Herrera ve Martinez [10] tarafından geliştirilen bu yaklaşım, bulanıklık içeren veya rastgele değişkenlerden türetilmiş olan verilerle işlem yaparken ortaya çıkan veri kaybını, verileri “bulanık terim” ve “bulanık terime olan yakınlıkları” olmak üzere ikili sözel gösterim şeklinde ifade etmektedir. Böylelikle, veriler belirlenmiş bir ölçekte değil aynı zamanda bu ölçekteki sözel değişkenlere yakınlıklarıyla da gösterilmekte ve veri kümesi genişletilmektedir.

Bu çalışmada geliştirilen yaklaşım olmaksızın, karar vericiler tarafından farklı sözel değişkenlerle ifade edilen verilerin birleştirilmesi ve karar verme sürecine dahil edilmesi mümkün olmamaktadır. Bu nedenle de karar vericilerden düşüncelerini aynı sözel değişken kümesini kullanarak belirtmeleri istenecek ve bu durumda, karar vericilerin kişisel deneyimlerine ve problem hakkındaki bilgi düzeylerine göre değişiklik gösterebilecek düşünceleri tam olarak karar verme sürecine dahil edilemeyecektir. Ayrıca, önerilen yaklaşım, ölçüt ağırlıklarını belirlemek için ölçütler arasındaki bağımlılığı göz önüne alan DEMATEL metodunu kullanmaktadır. DEMATEL metodu olmaksızın yapılacak çalışmada ölçüt ağırlıklarını belirlemek için ya karar vericilerden kişisel görüşleri istenecek ya da ölçüt ağırlıkları eşit kabul edilecektir. Bu durumda ölçütler arasındaki etkileşimler göz ardı edilecek ve dolayısıyla problem gerçekçilikten uzaklaşacaktır.

Önerilen yöntem kullanılarak elde edilen sonuçlar uzmanlarla paylaşılmış ve sonuçların ileride yapılacak değerlendirmelerde göz önüne alınacağı ve gerekli birimlerle paylaşılacağı öğrenilmiştir. Ayrıca gelecekte yapılması öngörülen çalışmalarda geliştirilen karar verme yönteminin tıp (tespit, teşhis, tedavi), dijital pazarlama (dijital pazarlama araçları değerlendirilmesi) ve enerji (sürdürülebilir enerji alternatifleri değerlendirilmesi) sektörlerinde farklı deneyimlere sahip karar vericilerin görüşlerine başvurulması gereken grup karar verme problemlerinin çözümünde uygulanması planlanmaktadır.

6. Kaynakça

1. Kalbar, P.P., Karmakan, S. and Asolekar, S.R. (2012). Selection of an appropriate wastewater treatment technology: A scenario-based multiple-attribute decision-making approach. *J. Environ. Manage.*, **113**: 158-169.
2. Aragonés-Beltrán, P., Mendoza-Roca, J.A., Bes-Piá, A., García-Melón, M. and Parra-Ruiz, E. (2009). Application of multicriteria decision analysis to jar-test results for chemicals selection in the physical-chemical treatment of textile wastewater. *J. Hazard. Mater.*, **164**: 288-29.
3. Sala-Garridoa, R., Molinos-Senante, M. and Hernández-Sancho, F. (2011). Comparing the efficiency of wastewater treatment technologies

- through a DEA metafrontier model. *Chem. Eng. J.*, **173**: 766–772.
4. Srdjevic, Z., Samardzic, M. and Srdjevic, B. (2012). Robustness of AHP in selecting wastewater treatment method for the coloured metal industry: Serbian case study. *Civ. Eng. Environ. Syst.*, **29(2)**: 147-161.
5. Kalbar, P.P., Karmakan, S. and Asolekar, S.R. (2013). The influence of expert opinions on the selection of wastewater treatment alternatives: A group decision-making approach. *J. Environ. Manage.*, **128**: 844-851.
6. Kalbar, P.P., Karmakan, S. and Asolekar, S.R. (2015). Selection of wastewater treatment alternative: Significance of choosing MADM method. *Environ. Eng. Manag. J.*, **14(5)**: 1011-1020.
7. Molinos-Senante, M., Hernandez-Sancho, F. and Sala-Garrido, R. (2015). Comparing the dynamic performance of wastewater treatment systems: A metafrontier malmquist productivity index approach. *J. Environ. Manage.*, **161**: 309-316.
8. Castillo, A., Vall, P., Garrido-Baserba, M., Comas, J. and Poch, M. (2017). Selection of industrial (food, drink and milk sector) wastewater treatment technologies: A multi-criteria assessment. *Journal of Cleaner Production*, **143**: 180-190.
9. Li, Y., Hub, Y., Zhanga, X., Denga, Y. and Mahadevanc, S. (2014). An evidential DEMATEL method to identify critical success factors in emergency management. *Applied Soft Computing*, **22**: 504-510.
10. Herrera, F. and Martínez, L. (2000). An approach for combining linguistic and numerical information based on 2-tuple fuzzy representation model in decision-making. *Int. J. Uncertain. Fuzz.*, **8(5)**: 539-562.
11. Herrera, F. and Martínez, L. (2000). A 2-tuple fuzzy linguistic representation model for computing with words. *IEEE T. Fuzzy. Syst.*, **8(6)**, 746-752.
12. Cordon, O., Herrera, F. and Zwir, I. (2002). Linguistic modeling by hierarchical systems of linguistic rules. *IEEE T. Fuzzy. Syst.*, **10(1)**: 2-20.
13. Herrera F. and Martínez, L. (2001). A model based on linguistic 2-tuples for dealing with multigranular hierarchical linguistic contexts in multi-expert decision-making. *IEEE T. Syst. Man Cy. B.*, **31(2)**: 227-234.