

KOCAELİ'DE FAALİYET GÖSTEREN ATIK SU TESİSLERİNİN ETKİNLİK ANALİZİ (2020-2023)

Figen BÜYÜKAKIN* 

Zehra YALNIZ† 

Özet

Günümüzde, sanayinin gelişmesi, çevre kirliliği, iklim değişikliği, kaynak dağılımının etkisizliği, nüfusun hızlı artışı gibi sebeplerden dolayı dünya geneli için yaşamın sürdürülebilirliği konusunda ciddi tehlikeler ortaya çıkmıştır. Tehlikenin azaltılması ve kaynakların yeniden kazanılarak üretime katkı sağlaması için de arıtma tesislerinin önemi her geçen gün artmaktadır. Biyolojik arıtma ve ileri biyolojik arıtma tesisleri sayesinde gelecek nesillere karşı olan sorumluluğun yerine getirilme fırsatı yakalanabilmektedir. Söz konusu tesisler, atık suyun içerisinde bulunan organik maddeler ve zararlı mikroorganizmalar gibi maddelerin giderilmesini ve atık suyun etkin bir şekilde temizlenmesini sağlayan kuruluşlardır. Bu tesisler, çevresel kirliliğin azaltılmasına katkıda bulunurken temiz su üretimini ve suyun yeniden kullanımını sağlamaktadırlar. Son yıllarda tüm dünyada ve Türkiye’de atık suyun temizlenmesi sorunu için atık su tesislerinin oluşturulması hız kazanmıştır. 2022 yılında Türkiye’de 1315 tane atık su arıtma tesisi bulunmaktadır ve bu tesislerin %51’i ileri biyolojik arıtma tesisi olarak çalışmaya devam etmektedir. Ele alınan çalışmada Kocaeli ilinde faaliyet gösteren 12 adet ileri biyolojik arıtma tesisinin etkinlik ve verimlilik değerlendirmesinin yapılması amaçlanmaktadır. Söz konusu amaç bağlamında, veri zarflama analizi (VZA) ile Malmquist Toplam Faktör Verimliliği Endeksinin kullanımı tercih edilmiştir. Çalışmada gerçekleştirilen Banker-Charnes-Cooper (BCC) çıktı yönlü VZA analizinde, 2 girdi (yatırım maliyeti ve tesiste kullanılan elektrik miktarı) ile 3 çıktı (personel sayısı, nüfus ve debi) kullanılmış ve tesislerin 2020, 2021, 2022, 2023 yıllarına ait etkinlik değerlendirilmesi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, 12 tesisten 2020, 2021 ve 2022 yıllarında 9 tanesi etkin olurken, 2023 yılında ise 7 tanesinin etkin olduğu belirlenmiştir. Ardından gerçekleştirilen Malmquist Toplam Faktör Endeksi ile de ele alınan 4 yıllık dönem içerisinde, 12 tesisten 11 tanesinin etkinlik bulguları 1 değerinin üzerinde olduğu tespit edilmiştir. Çalışmada, özellikle son yıllarda Kocaeli özelinde ileri biyolojik arıtma tesislerinin sürdürülebilir çevre için önemine değinilmiş ve söz konusu ilin diğer illere de örnek teşkil etmesi dikkate alınarak çeşitli politika önerilerinde bulunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Atık su, Veri Zarflama Analizi (VZA), Malmquist Endeksi, Kocaeli.

EFFECTIVENESS ANALYSIS OF WASTEWATER FACILITIES OPERATING IN KOCAELİ (2020-2023)

Abstract

Today, serious threats to the sustainability of life have emerged worldwide due to reasons such as industrial development, environmental pollution, climate change, ineffective resource distribution, and rapid population growth. The importance of treatment facilities is increasing day by day in order to reduce the danger and contribute to production by recovering resources. Thanks to biological treatment and advanced biological treatment facilities, the opportunity to fulfill the responsibility towards future generations can be achieved. These facilities are institutions that ensure the removal of substances such as organic substances and harmful microorganisms in wastewater and the effective cleaning of wastewater. While contributing to the reduction of environmental pollution, these facilities provide clean water production and water reuse. In recent years, the establishment of wastewater facilities has gained momentum all over the world and in Turkey for the problem of cleaning wastewater. In 2022, there are 1315 wastewater treatment facilities in Turkey and 51% of these facilities continue to operate as advanced biological treatment facilities. The aim of the study under consideration is to evaluate the effectiveness and efficiency of 12 advanced biological treatment facilities operating in Kocaeli province. In the context of the mentioned purpose, the use of data envelopment analysis (DEA) and Malmquist Total Factor Productivity Index was preferred. In the Banker-Charnes-Cooper (BCC) output-oriented DEA analysis carried out in the study, 2 inputs (investment cost and amount of electricity used in the facility) and 3 outputs (number of personnel, population and flow rate) were used and the efficiency of the facilities for the years 2020, 2021, 2022 and 2023 was evaluated. According to the analysis results, 9 out of 12 facilities were effective in 2020, 2021 and 2022, while 7 were determined to be effective in 2023. Then, with the Malmquist Total Factor Index carried out,

* Prof.Dr., Kocaeli Üniversitesi, İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi, bfigen@kocaeli.edu.tr

† Kocaeli Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, talha.yalniz@yandex.com

it was determined that 11 out of 12 facilities had efficiency findings above the value of 1 in the 4-year period addressed. In the study, the importance of advanced biological treatment facilities for sustainable environment, especially in Kocaeli in recent years, was mentioned and various policy recommendations were made considering that the province in question sets an example for other provinces.

Keywords: Wastewater, Data Envelopment Analysis (DEA), Malmquist Index, Kocaeli.

Giriş

Su, canlılar için hayati önem taşıyan kimyasal bir bileşiktir. Sınırlı kaynaklara sahip ve insanlık için vazgeçilmez olan suyun, doğru kullanılmaması halinde çeşitli ekonomik ve çevresel zararlar ortaya çıkmaktadır. Bu bağlamda, evlerden ve sanayi tesisleri ile kurumlardan kullanım sonrası boşaltılan kirli sulara, atık su adı verilmektedir. Birleşmiş Milletler Çevre Programına (2013) göre atık su, hemen hemen havacılık endüstrisinin yaptığı kadar gezegenin ısınma emisyonuna hız kazandırmakta ve aynı zamanda da insan sağlığı ve çevre için giderek büyüyen bir tehdit unsuru olarak görülmektedir (www.unep.org, 03.12.2024). Ancak doğru politikalarla atık su, yarım milyara yaklaşan dünya nüfusuna alternatif enerji sağlayan, deniz suyu arıtma faaliyetlerinden sağlanan sudan 10 kat daha fazlasını temin eden ve aynı zamanda küresel gübre tüketiminin %10'undan fazlasını karşılayan oldukça değerli bir kaynak da olabilmektedir (www.unep.org, 03.12.2024).

Bilindiği üzere, son yıllarda iklim değişikliği ve sera gazı etkisi nedeniyle meydana gelen doğal felaketler, sürdürülebilir çevreye olan duyarlılığın artmasını hızlandırmıştır. Bu nedenle atık suyun değerlendirilmesi (arıtılması ve yeniden kullanıma dönüştürülmesi) ve çevreye yönelik olası zararının en aza indirgenmesi için hazırlanan projeler, her geçen gün tüm dünyada daha fazla dikkat çekmeye başlamıştır. Atık sular arıtılmadığı takdirde insan sağlığına, sosyo-ekonomik kalkınmaya ve ekosistemlere zarar veren sonuçlara yol açmaktadırlar. Ancak, atık suyun yönetimi doğru bir şekilde yapıldığında, iklim değişikliği, biyogaz üretimi ve yeşil çevrenin tahsisi gibi zorlukların üstesinden gelmek kolaylaşmakta ve aynı zamanda bu gelişmelere kısa sürede ulaşmak mümkün hale gelmektedir.

Küresel ısınma sonucunda deniz suyu sıcaklıklarının artmasına paralel olarak atık suyun arıtılmadan veya sadece ön arıtmadan geçirilerek denize boşaltılması sonucunda çevresel felaketler oluşabilmektedir. Bu felaketlerin en bilineni son dönemde ülkemizde de yaşanan müsilaj felaketidir. Müsilaj, denizlerdeki yaşamın sona ermesini hızlandıran bir etkiye sahiptir. Ülkemizde yaklaşık 2010 yılından bu yana Marmara Denizi'nin maruz kaldığı müsilaj sorunu, yetkililerin özellikle son yıllarda titizlikle uygulamaya çalıştığı Marmara Denizi'ni Koruma Eylem Planı adı altındaki önlem girişimleri ile büyük ölçüde çözüme kavuşmuş durumdadır. Söz konusu plan ile Marmara Denizi'nde ekolojik dengenin korunması ve sürdürülebilir temiz çevrenin sağlanması hedeflenmektedir. Bu hedef kapsamında Marmara Denizi'ne kıyısı olan tüm illerin deniz kirliliğini önleyecek şekilde uygulamalarda bulunmaları büyük önem taşımaktadır. Kuşkusuz söz konusu uygulamaların başında da arıtma tesislerinin kurulması ve işlevselliklerinin artırılması gerekmektedir.

Arıtma tesislerinde, atık suyun arıtılması için fiziksel, kimyasal, biyolojik, ileri ve doğal arıtma gibi çeşitli yöntemler kullanılmaktadır (www.csb.gov.tr, 26.05.2014). Uygulamada en fazla çevresel duyarlılığa sahip olan yöntem, ileri biyolojik arıtma işlemidir. Atık suyun biyolojik olarak arıtılması, suyun kimyasallardan ziyade mikroorganizmalarla arıtılmasını ve kimyasal kullanılarak yapılan arıtımından kaynaklanan kimyasal birikimi veya alg çoğalması gibi olumsuz etkilerin önlenmesini mümkün kılmaktadır (www.csb.gov.tr, 26.05.2014). Başlıca biyolojik arıtma üniteleri olarak; aktif çamur, damlatmalı filtre ve stabilizasyon (oksidasyon) havuzu **öne çıkmaktadır** (www.csb.gov.tr, 26.05.2014). İleri arıtma ise hem biyolojik hem de fiziksel arıtma yöntemleriyle yeterince arıtılmayan; diğer bir deyişle arıtılması çok zor olan,

ağır metaller, azot, toksik organik maddeler, fosfor gibi kirletici maddelerin giderilmesini gerektirmektedir. Bu tür arıtmalar oldukça maliyetli işlemlerdir. Bu nedenle atık su tesislerinin kurulmasına daha çok belediyeler öncülük etmektedir (www.cevreselgostergeler.csb.gov.tr, 26.05.2014).

Dünyada ve Türkiye’de önem kazanan atık suyun temizlenmesi sorunu için hızla tesisler oluşturulmaya devam edilmektedir. TÜİK istatistiklerine göre; 2002 yılında toplam atık su arıtma tesisinin sayısı 145 iken, 2022 yılı itibariyle 1315’e ulaşmıştır. Ülkemizdeki atık su tesislerinin dağılımına bakıldığında, söz konusu tesislerin %20’sinin gelişmiş, %51’inin biyolojik, %5’inin fiziksel ve %24’ünün de doğal arıtma işleminde bulunan tesislerden oluştuğu anlaşılmaktadır (www.data.tuik.gov.tr/, 20.05.2024).

Öte yandan, dünyada da bu konuya dikkat çekilmesi için Birleşmiş Milletlerin 2013 yılında kurmuş olduğu, Küresel Atık Su Girişimi (Global Waste Water Initiative (GWWI)) adı altında faaliyet gösteren, farklı Birleşmiş Milletler kuruluşlarını, sivil toplum kuruluşlarını, akademisyenleri, özel sektörü ve kalkınma bankalarını da içine alan çok paydaşlı bir platform bulunmaktadır (www.unep.org, 26.05.2014). GWWI, dünya çapındaki atık su kirliliğiyle mücadeleyle amaçlayan, uygulamaları gerçekleştiren Deniz Çevresinin Kara Kaynaklı Faaliyetlerden Korunmasına Yönelik Küresel Eylem Programına (GPA) bağlı olan bir kuruluş olarak öne çıkmaktadır (www.unep.org, 26.05.2024).

Özetle denilebilir ki, atık suyun yeniden kazanılması, sınırlı kaynakların etkin kullanımı ve dünyamızın gelecekte daha yaşanabilir olması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda arıtma tesislerinin çoğalması ve etkin çalışması gerekmektedir. Ele alınan çalışmada da Marmara Denizi’ne kıyısı olan, müsülaj probleminden en çok etkilenen ve İzmit Körfezi gibi önemli bir ticaret merkezine sahip olan Kocaeli ili özelinde atık su yönetimine dair aktif olarak faaliyet gösteren 12 adet biyolojik arıtma tesisinin etkinlik analizinin yapılması amaçlanmaktadır. Söz konusu analiz için veri zarflama analizi (VZA) yöntem olarak tercih edilmektedir. Analiz sonucunda ulaşılan bulgular ışığında, çalışmanın Marmara Denizi’ne kıyısı olan diğer illere de atık su yönetimi konusunda örnek teşkil etmesi açısından önemli bir boşluğu doldurması beklenmektedir.

I. Literatür İncelemesi

Karar verme birimlerinin etkinlik değerlendirmelerinin yapılmasında VZA, yaygın olarak kullanılan çok yönlü ve etkili bir araçtır. Atık su tesislerinin etkinlik analizini VZA kapsamında değerlendiren çalışmalar sayıca çok fazla olmamakla birlikte ilgili literatüre aşağıda yer verilmektedir.

Hernández-Sancho ve Sala-Garrido (2009) çalışmalarında, İspanya’daki 25 atık su arıtma tesisinin 2004 yılı verileri ile VZA yöntemini kullanarak teknik verimlilik ve maliyet analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada girdiler olarak, işlem kapasiteleri, enerji miktarı, personel sayısı ve arıtma performansı; çıktılar olarak ise, arıtılmış su miktarı, su kalitesi ve işlem verimliliği ele alınmıştır. Analiz sonucunda, büyük ve küçük atık su arıtma tesislerinin verimliliği karşılaştırılmış ve büyük tesislerin genellikle daha verimli olduğu tespit edilmiştir.

De Witte ve Marques (2010) çalışmalarında, 1997-2005 dönemi için Avustralya, Belçika, Hollanda, Portekiz, İngiltere ve Galler’deki içme suyu sektörünün verimliliği karşılaştırılmıştır. VZA’nın girdi yönlü BCC yaklaşımının kullanıldığı çalışmada, iki aşamalı bir analiz gerçekleştirilmiş ve kamu hizmetlerinin ortalama verimliliğinin teşvik düzenlemeleri ile arttığı bulgusu elde edilmiştir.

Sala-Garrido ve arkadaşları (2012) çalışmalarında ise İspanya’da faaliyet gösteren atık su firmalarının (45 firma) etkinlik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, 2003-2009 dönemi ele

alınmış ve değerlendirme için VZA yönteminden yararlanılmıştır. Söz konusu analizde girdi olarak askıda katı maddeler, kimyasal oksijen ihtiyacı olarak ölçülen organik madde ve nitrojen; çıktı olarak ise işletme ve bakım maliyetleri dikkate alınmıştır. Sonuç olarak da ortalama verimlilik düzeyi 0.588 olarak saptanmış ve firmalar genel olarak etkinsiz olmalarına rağmen geçmiş dönemlere kıyasla etkinliklerinin zamanla artış gösterdiği bulgusuna ulaşılmıştır.

Mahmoudi ve arkadaşlarının (2012) çalışmaları da İran'daki 17 belediyeye bağlı, su ve atık su şirketlerinin 2006 yılı verilerini kullanarak VZA ile teknik verimlilik ölçümlerini değerlendirmektedir. Çalışmada, girdi yönlü VZA dikkate alınmış ve çıktılar, toplam maliyet ve sermaye olarak; girdiler ise tüketim miktarı, tüketiciler ve gelir olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular ise belediyelerin genel olarak verimsiz olduğunu ve teknik açıdan tamamen verimli olanlarının ise %30'un altında kaldığını göstermektedir.

Karahan ve Akdağ ise (2014) çalışmalarında, Diyarbakır Su ve Kanalizasyon İdaresinin yıllara göre hizmet etkinliğini değerlendirmişlerdir. Çalışmada, VZA'nin BCC yöntemi kullanılmış ve girdi olarak, kente verilen su miktarı, atık su ile içme suyu şebeke uzunlukları ve toplam personel sayısı değişkenleri; çıktı olarak da faturalandırılan su ve atık su miktarı ile toplam abone sayısı değişkenleri dikkate alınmıştır. Elde edilen bulgulardan, 2003, 2005 ve 2008 yılları için Diyarbakır Su ve Kanalizasyon İdaresinin etkinlik düzeyinin oldukça yetersiz olduğu belirlenmiştir.

Bian ve arkadaşlarının (2014) çalışmasında, 2009 yılında Çin'in 26 bölgesindeki atık su tesislerinin etkinlikleri, üç aşamalı VZA yöntemi ile incelenmiştir. Çalışmada girdiler, tesislerin çalışan sayısı, temiz su miktarı ve sabit sermaye yatırımları olarak; çıktılar ise GSYİH ve atık su olarak belirlenmiştir. Analiz sonucunda, merkez bölgedeki tesislerin daha etkin, batı bölgelerindeki tesislerin ise etkinsiz olduğu bulgusuna ulaşılmıştır.

Guerrini ve arkadaşları (2015) çalışmalarında, Danimarka'daki atık su tesislerinin 2011 yılı etkinlik analizi, iki aşamalı VZA ile gerçekleştirilmiştir. Analizin girdileri taşıma, tedavi ve müşteri hizmetleri maliyeti olarak belirlenirken, çıktısı ise satılan su hacmi olarak dikkate alınmıştır. Analiz sonucunda, Danimarka'daki atık su tesislerinin hizmet verdikleri nüfusun artış hızına bağlı olarak etkinliklerinin de arttığı ve tesis büyüklüğünün küresel etkinlik üzerinde anlamlı bir etkisinin bulunmadığı anlaşılmıştır.

Gómez ve arkadaşları (2015) çalışmalarında, 2012 yılı verileri ile İspanya'daki 33 atık su arıtma tesisinin verimlilik analizlerini, VZA ve çift bootstrap analizi yöntemlerinden yararlanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada girdi olarak, enerji tüketimi, işlem kapasitesi, personel sayısı ve kimyasal kullanım; çıktı olarak ise arıtılmış su miktarı, su kalitesi ve verimlilik oranı dikkate alınmıştır. VZA sonucunda, bazı tesislerin yüksek verimlilik göstermelerine rağmen, çoğunun potansiyel verimliliklerini tam olarak kullanmadıkları; çift bootstrap analizi sonucunda da bazı tesislerin verimsiz olduğu ve girdilerin çıktılara oranla daha fazla kullanıldığı anlaşılmıştır.

Castellet ve Molinos-Senante (2016) ise çalışmalarında, İspanya'daki 49 atık su tesisinin 2012 yılı verileri ile Ağırlıklı Slack Tabanlı Ölçüm (WSBM) modelini kullanarak etkinlik değerlendirmesi yapmışlardır. 6 girdinin ve 4 çıktının ele alındığı çalışmada tüm tesisler için elde edilen ortalama verimlilik puanı "0,5660" olarak hesaplanmıştır. Sonuç itibarıyla İspanya'daki 49 tesisin 20 tanesi verimli, 29 tanesi ise verimsiz olduğu tespit edilmiştir.

Lorenzo-Toja ve arkadaşlarının (2018) çalışmasında ise 2009-2012 döneminde, İspanya'da faaliyet gösteren 47 farklı atık su tesisinin etkinlik analizi VZA yönteminden yararlanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada girdi olarak elektrik kullanımı, kimyasal tüketimi ve çamur

üretimi; çıktı olarak da Ötrofikasyon Net Çevresel Göstergesi[†] dikkate alınmıştır. Çalışmada tesisler alt, orta ve üst olmak üzere bir ayrıma tabi tutulmuş ve bir yıl etkin çalışan tesisin genel olarak diğer yıllarda da etkinliğini koruduğu bulgusuna ulaşılmıştır.

Koç ve Acar'ın (2018) çalışmasında ise 2011-2017 döneminde Türkiye'deki büyükşehir belediyelerine bağlı su ve atık su idarelerinin etkinlik analizi gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, girdi ve çıktı odaklı VZA ile Malmquist endeks analizinin kullanımı tercih edilmiştir. Analiz için girdiler, sermayeye, faize ve personele ilişkin giderler olarak; çıktılar ise abone sayıları, teşebbüs ve mülkiyet gelirleri ile faaliyet karları olarak belirlenmiştir. Analiz sonucunda, Diyarbakır (DİSKİ), Gaziantep (GASKİ), Ankara (ASKİ), Kocaeli (İSU) ve İstanbul (İSKİ) önceki yıllara kıyasla daha verimli tesisler olarak tespit edilmişlerdir.

Villegas ve arkadaşları (2019) çalışmalarında, 2001-2016 dönemi için İngiltere ve Galler'deki 18 su şirketinin faaliyetlerinde çevresel değişkenlerin etkisini değerlendirmişlerdir. İki aşamalı VZA'nin uygulandığı çalışmada kullanılan girdiler, işletme maliyeti, işgücü, ağ uzunluğu, toplam sermaye harcaması olurken; çıktılar ise içme suyunun hacmi ve suya bağlı özellikler olarak belirlenmiştir. Analiz sonucunda, 18 şirketin ortalama verimlilik puanının 0.801 olarak tespit edildiği, ortalama bir su şirketinin çıktısını sabit tuttuğu ve girdilerini %19,9 oranında azaltabildiği anlaşılmıştır.

Saghafi ve arkadaşları (2020) çalışmalarında, İran'daki Endüstriyel Atık su Arıtma Tesislerinin (IWTP) 2018 yılı enerji verimliliğini, VZA ile değerlendirmişlerdir. Çalışmada enerji tüketimi ve CO₂ emisyonları ölçülmüş ve IWTP'lerin %73,4'ünün zayıf enerji verimliliğine, %2,6'sının da yüksek enerji verimliliğine sahip olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Ayrıca, IWTP'lerin enerji verimliliğinin iyileştirilmesi halinde enerji maliyetlerinde %72,9 oranında tasarruf edebileceği ve yaklaşık 52,8 t daha az emisyon olacağı da öngörülmektedir.

Ayyıldız ve arkadaşlarının (2021) çalışmalarında ise 2012, 2014 ve 2016 yılları ele alınmış ve Türkiye'nin 30 büyükşehir belediyesinin atık su arıtma tesisleri, VZA ve SWARA yöntemleri kullanılarak etkinlik açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada etkinlik analizleri CCR ve BCC çıktı yönlü olarak gerçekleştirilmiştir. Analiz için girdiler, günlük atık su miktarı, tesis kapasitesi ve tesis sayısı olarak; çıktıları ise tesislerde arıtılan atık su miktarı ve tesislerin hizmet verdiği nüfus olarak belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, 14 büyükşehir belediyesinin toplam etkinliğe, 19 büyükşehir belediyesinin teknik etkinliğe ve 21 büyükşehir belediyesinin de ölçek etkinliğine sahip olduğunu göstermektedir.

Yadav ve arkadaşları (2022) çalışmalarında, Hindistan Yeni Delhi'deki 30 atık su arıtma tesisinin 01:2009-12:2013 dönemi etkinlik analizini, VZA yönteminden yararlanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada girdi olarak, işletme bakım maliyetleri; çıktı olarak ise kirleticilerin giderim oranı (arıtılmış suyun g/m³'ündeki kirletici giderim oranı) ele alınmıştır. Analiz sonucunda, 30 tesisten 6'sının iyi performans gösterdiği (%20) ve girdilerde meydana gelen bir değişikliğin verimlilik sonuçlarında istikrarsızlığa yol açtığı gözlemlenmiştir.

Molinos-Senante ve Maziotis (2022) ise çalışmalarında, Şili'deki 203 atık su arıtma tesisinin 2017 yılı enerji verimliliğini belirlemek için Stokastik Parametrik Olmayan Veri Zarflama (STONED) yöntemini kullanmışlardır. Sonuçlar, Şili'deki atık su tesislerinin verimsiz olduğunu (ortalama puan 0,433) ve enerji tasarrufu için önemli fırsatlar sunduğunu (ortalama tasarruf 203.413 MWh/yıl) göstermiştir.

[†] Ötrofikasyon Net Çevresel Göstergesi; bir su kütesinin veya ekosistemin, potansiyel olarak zararlı sonuçları olan yüksek yoğunlukta organik maddeye sahip olduğu süreci ifade etmektedir (www.green-glossary.com/tr, 13.12.2024).

Zhu ve arkadaşları (2024) çalışmalarında, Çin'nin 30 eyaletindeki 3776 atık su arıtma tesisinin 2017 yılı enerji verimliliklerini, VZA ile değerlendirmişlerdir. 3 girdi ve 6 çıktının kullanıldığı çalışmada, atık su arıtma tesislerinin sadece 24'ünün yüksek etkinliğe sahip olduğu, tesislerin ortalama kılığa dayalı enerji verimliliği seviyesinin düşük olduğu ve kuzey eyaletlerindeki tesislerin güneydoğu eyaletlerine kıyasla daha yüksek verimliliğe sahip olduğu bulgularına ulaşılmıştır.

Şahin ve Kutbay (2024) çalışmalarında, Mersin Su ve Kanalizasyon İdaresinin (MESKİ) 2015-2021 dönemi verileri ile etkinlik değerlendirmesini, VZA'ndan yararlanarak gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada girdi olarak, kamusal gelirler; çıktı olarak da yeni içme suyu hattı ile yeni atık su hattı değişkenleri ele alınmıştır. Çıktı odaklı BCC analizinden, sadece etkinlik katsayısı %100 eşit olan 2015 ve 2017 yıllarının etkin olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Bu iki yılın dışında kalan yılların ise etkin olmadığı anlaşılmıştır. Öte yandan girdi olarak yine kamusal gelirlerin, çıktı olarak ise arıtılan içme suyu ile arıtılan atık su miktarlarının dikkate alındığı diğer bir analizden elde edilen bulgular da 2016, 2017 ve 2019 yıllarında MESKİ'nin etkin olmayıp, 2015, 2018, 2020 ve 2021 yıllarında ise etkin olduğunu göstermiştir.

II. Araştırmanın Yöntemi

Ele alınan çalışmada, Kocaeli'de faaliyet gösteren ileri biyolojik arıtma tesislerinin etkinlik ve verimliliklerinin VZA ve Malmquist Toplam Faktör Verimliliği Endeksi yardımıyla değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bu bağlamda, ilk olarak Farrel (1957) tarafından geliştirilen VZA yönteminden yararlanılmaktadır. VZA, daha önceden belirlenmiş olan karar verme birimlerinin (KVB) girdi ve çıktılarının gözlemlenmesi ile etkin bir üretim fonksiyonun tahmin edilebilmesini ve aynı zamanda da bu fonksiyonun varsayımsal bir KVB ile karşılaştırılabilmesini mümkün kılmaktadır (Farrel, 1957: 255-256). Diğer yandan verimlilik endekslerinde bulunan eksiklikleri de düzeltmeyi amaçlayan Farrell'in çalışması, aslında verimlilik kavramının yerine daha genel bir kavram olan "görelî verimlilik" kavramını ikame etmektedir. Ardından, A.Charnes, W.W.Cooper ve E. Rhodes'un (1978) yazdığı "Measuring The Efficiency of Decision Making Units" isimli çalışmaları ile VZA terimi kullanılmaya başlanmıştır. Daha çok kamu kurumlarının teknik verimliliğinin değerlendirilmesini ön plana çıkaran çalışma, bunun için özel referans aralığının belirlendiği 'karar verme verimliliği' ölçümlerinin geliştirilmesine ağırlık vermiştir (Charnes vd., 1978: 429). Yazar (Charnes, Cooper ve Rhodos; CCR) isimlerinin baş harflerinden esinlenerek ifade edilen CCR yöntemi, VZA'nın ilk versiyonudur. CCR yöntemi, ölçüğe göre sabit getiri varsayımına dayanmakta ve aynı zamanda teknik etkinliğin ölçümünü mümkün kılmaktadır. Daha sonra Banker, Charnes ve Cooper (BCC) (1984) tarafından CCR'in lineer yani doğrusal programlama formülasyonunda bir değişiklik öngörülerek söz konusu model, bir adım daha ileriye taşınmıştır. Böylece yeni versiyon olarak oluşturulan BCC yönteminde, ölçüğe göre değişken getiri dikkate alınarak verimli ölçek kavramı geliştirilmiştir.

Öte yandan girdi yönelimli CCR modelinde çıktılarının belirli bir seviyede sabit olarak tutulması ve girdilerin belirli ölçüde azaltılması gerekmektedir. Çıktı odaklı CCR modeli ise belirli bir miktarda girdiyi koruyarak çıktılarının artırılması gerektiğini öngörmektedir. VZA'nın bir üçüncü versiyonu olarak geliştirilen "toplamsal modelde" ise girdilerin aynı anda azaltılması ve çıktılarının da aynı anda artırılması mümkün olmaktadır.

Girdi yönlü CCR modelinde minimum girdi ile gerçekleşmiş olan çıktıya ulaşılması hedeflenirken, çıktı yönlü CCR modelinde ise hali hazırda kullanılan girdi ile maksimum çıktıya ulaşılması hedeflenmektedir. CCR modelinde firma, kurum, kuruluş ve tesis gibi karar verme birimlerinin verimliliği ölçülürken, söz konusu KVB'lerinin her biri için verimlilik göstergesi, ağırlıklı olarak hesaplanan çıktılarının ağırlıklı olarak hesaplanan girdilere oranının maksimumu olarak dikkate alınmaktadır (Charnes vd., 1978: 430). Fakat burada verimliliğin

1'e eşit veya 1'den küçük olması gerekmektedir. CCR modelinden sonra Banker, Charnes ve Cooper'ın (1984) geliştirdiği BCC modelinde önceki modelin varsayımları değiştirilerek tanımlamalar yapılmıştır. CCR modeli ölçüğe göre sabit getiri koşullarını benimsemekteyken, BCC modeli ölçüğe göre değişken getiri koşullarını benimsemektedir. Bu nedenle BCC sınırı, CCR sınırının altında yer almakta ve BCC etkinlik sınırı CCR etkinlik sınırına eşit veya ondan büyük olmaktadır (Dinçer, 2008: 834).

BCC modelinin temel formülü (Banker vd.,1984: 1090);

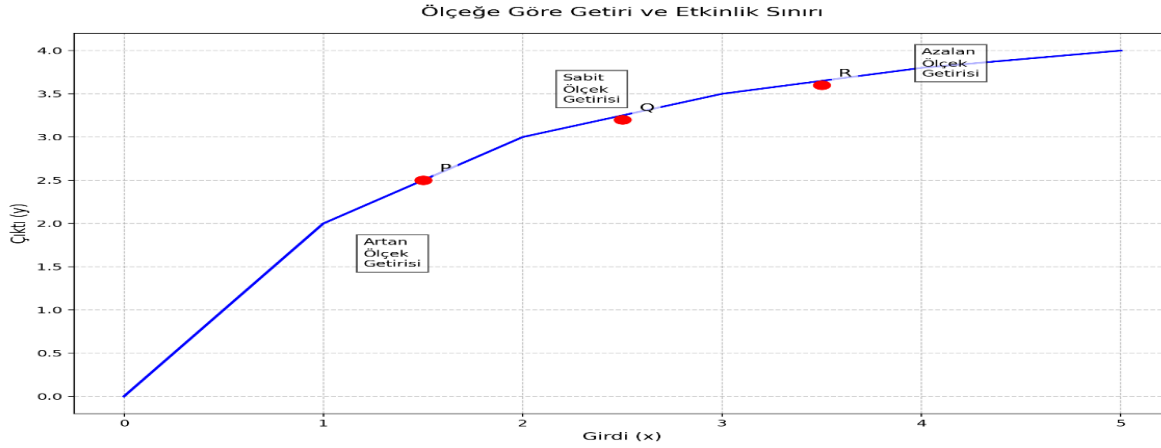
$$I = (\sum_{i=1}^n u_i y_i - v_0) / \sum_{i=1}^n (v_i x_i)$$

Burada;

- i. Pay : $\sum_{i=1}^n u_i y_i - v_0$,
- ii. Payda : $\sum_{i=1}^n v_i x_i$ şeklindedir.

Bu formül, BCC modelinin temel formülasyonlarından biri olmakta ve v_0 terimi, ölçüğe göre değişken getiriyi (VRS) temsil etmektedir. Aşağıda yer alan şekilde de etkinlik sınırı gösterilmektedir (Banker vd.,1984: 1089):

Şekil 1. BCC Modelinde Etkinlik Sınırı



Şekil 1'de yukarıya doğru ivmelenen eğri etkinlik sınırını (üretim imkanları eğrisi), eğri üzerinde yer alan noktalar ise KVB'leri temsil etmektedir. Şekilde Q noktası etkinlik sınırına çok yakın durumdadır. Bu noktanın altında kalan P noktası etkinlik sınırının altında olduğu için etkinliğe uzak olmakta ve artan ölçek getirisi bölgesinde olduğu için etkinlik için iyileştirmeler yapılabileceğini göstermektedir. R noktasında ise azalan ölçek getirisini ifade etmekte ve bazı değişikliklerle üretimde etkinliğe ulaşılabilceğini yansıtmaktadır.

VZA'da incelenen KVB'lerinin etkinlik ve verimliliği, doğrusal programlama tabanlı bir teknik olan en iyileme yöntemi ile değerlendirilmektedir. Verimlilik ölçümü gerçekleştirildikten sonra verimliliği düşük olan birimlerin verimliliklerinin artırılması için verimli KVB'lerden oluşan referans birimleri belirlenmektedir (İllez ve Güner, 2018: 72). Bu sayede de çeşitli birimlerin verimliliği, verimlilik sınırı ile karşılaştırılabilmektedir. Böylece etkinlik, ağırlıklı olarak hesaplanan çıktıların toplamının ağırlıklı olarak hesaplanan girdilerin toplamına oranı olarak tanımlanmakta ve bu analiz ile her birimin ayrı ayrı ağırlıklı değerleri tahmin edilerek maksimum etkinliğe ulaşması hedeflenmektedir (İllez ve Güner: 74). Yapılan değerlendirme sonucunda da etkinlik ölçütü olarak tüm KVB'leri için hesaplanan değerler ya 1'e eşit ya da 1'den küçük olmakta ve etkinlik değeri 1 çıkan KVB'leri etkin iken 0 ile 1 arasındaki değer alan KVB'lerinin ise yetersiz olduğu saptanmaktadır (Farrel, 1957: 254).

VZA, Deap, Windeap, Frontier gibi paket programlar ile hesaplamalar yapılan bir analizdir. Analiz gerçekleştirilirken öncelikle işletme, kurum, hastane vs. KVB'ler seçilmekte, daha sonra girdiler ve çıktılar belirlenmektedir. Analizlerde seçilen KVB'lerin aynı yapıda olmaları gerekmektedir. Öte yandan girdi ve çıktılarının her KVB için kullanılması önemli bir faktördür. VZA'da diğer önemli konu ise, seçilen girdi sayısı (m) ve çıktı sayısı (p) olduğu zaman en az (m+p+1) adet KVB olmasına dikkat edilmesidir (Dinçer, 2008: 829). En yalın haliyle VZA'nda belirli girdilerle maksimum çıktıya sahip olabilen firmalar etkin, diğerleri ise etkinsiz olarak ifade edilmektedir.

Malmquist Toplam Faktör Verimliliği Endeksi ise 1953 yılında Sten Malmquist tarafından geliştirilmiş bir endekstir. VZA'nin uzaklık fonksiyonlarına dayalı olarak geliştirilen endeks ile, KVB'lere ait verilerin ortak teknolojiye olan görece mesafe aralığına ilişkin oranları hesaplanmakta ve iki değer arasındaki toplam faktör verimliliği ölçümü gerçekleştirilmektedir (Deliktaş, 2002: 252). Malmquist Endeksinde öncelikle verilere ait noktalar farksızlık eğrileri üzerinde gösterilmektedir. Ardından farksızlık eğrilerinin üzerinde ve arasında olan bu noktalarla zincir endeksi oluşturulmakta ve böylece uzaklık fonksiyonuna ulaşılmaktadır (Malmquist, 1953: 209-242).

Malmquist endeksinde 1982 yılında Caves ve arkadaşlarının yaptıkları çalışma ile girdiler ve çıktılar dikkate alınarak gerçekleştirilen maliyet minimasyonu veya kar maksimizasyonu analizleri de dahil edilmiştir (Akhisar ve Tezergil, 2014: 5). Caves ve arkadaşlarının çalışmasında, çift taraflı olan girdiler ve çıktılar arasındaki karşılaştırmalar, çok taraflı karşılaştırmalar haline getirilmiş ve firmaların girdi ve çıktı seviyelerine göre maliyetlerini minimize ettikleri takdirde girdi seviyelerine ve çıktı fiyatlarına bağlı olarak gelirlerinin en üst seviyeye çıkabileceği belirtilmiştir (Caves vd.,1982: 1406-1408). Ardından Fare ve arkadaşlarının 1994 yılında yaptıkları çalışmada da endeks, aşağıdaki formülasyona evrilmiştir (Fare vd., 1994: 71):

$$m_0(x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}) / D_0^t(x^t, y^t) \quad (1)$$

Fare ve arkadaşlarının geliştirdikleri endeks, iki farklı Caves-Christensen-Diewert (CCD) tipi Malmquist verimlilik endeksinin geometrik ortalaması olarak hesaplanmıştır (Fare vd., 1994:70). (1) nolu eşitlikte yer alan terimler şu şekilde ifade edilmektedir:

x^t = t döneminin girdi vektörünü,

x^{t+1} = t+1 döneminin girdi vektörünü,

y^t = t döneminin çıktı vektörünü,

y^{t+1} = t+1 döneminin çıktı vektörünü göstermektedir.

Denklemdaki $D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$ ifadesi ile t+1 dönemindeki gözlemin, t dönemi teknolojisine olan uzaklığı ifade edilmektedir. Toplam Faktör Verimliliği (TFV)'nin t döneminden t+1 dönemine artması için yukarıda gösterilen m fonksiyonunun değerinin 1'den büyük olması, TFV'nin azalması için de 1'den küçük olması gerekmektedir (Atukalp, 2018: 27). Söz konusu denklem son aşamada aşağıdaki gibi yazılabilmektedir (Fare vd., 1994:71):

$$\text{Etkinlik Değişimi} = D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}) / D_0^t(x^t, y^t) \quad (2)$$

$$\text{Teknik Değişim} = D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}) / D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1}) \times ((D_0^t(x^t, y^t) / (D_0^{t+1}(x^t, y^t))^{1/2}) \quad (3)$$

(2) numaralı eşitlikte $D_0^{t+1}(x^{t+1}, y^{t+1})$, $(x^{t+1}$ ve $y^{t+1})$ ile ifade edilen üretim noktasının (x, y) olarak gösterilen üretim noktasına olan uzaklığı temsil etmektedir. 1'den büyük olarak

hesaplanan endeks değeri, t döneminden t+1 dönemine kadar olan dönemdeki pozitif “toplam faktör verimliliğinin” (TFP) büyümesini göstermektedir. Öte yandan;

$$M_0 (x^{t+1}, y^{t+1}, x^t, y^t) = \text{TECHCH} \times \text{PEFFCH} \times \text{SCH} \text{ olarak tanımlanmaktadır.}$$

Burada TECHCH teknik etkinliği, PEFFCH saf teknik etkinliği ve SCH ölçek etkinliğini ifade etmektedir. Bu noktada EFFCH olarak ifade edilen toplam etkinlik ise, PEFFCH \times SCH’ye eşit olmaktadır (Fare vd., 1994: 75).

III. Araştırmanın Veri Seti

Çalışmada ilk olarak, 2020-2023 yılları arasında Kocaeli Su ve Kanalizasyon İdaresine (İSU) bağlı olarak faaliyet gösteren 12 adet İleri Biyolojik Arıtma Tesisinin VZA’sı yapılmaktadır. Söz konusu tesislerin etkinlik seviyelerinin ölçülmesi amacıyla BCC çıktı yönlü model kullanılmaktadır. Ardından da söz konusu tesislerin Malmquist Endeksi aracılığı ile tesis etkinliklerinin araştırma dönemi içindeki değişimleri değerlendirilmeye çalışılmaktadır.

Çalışmanın verileri, İSU’dan derlenmiştir. Bu bağlamda araştırmaya konu olan tesislerin gerçekleşen ve hedef girdileri ile gerçekleşen ve hedef çıktılarına ilişkin değerleri, ayrı ayrı tablolarda (EK I; Tablo 8, Tablo 9, 10, 11, 12 ve Tablo 13) gösterilmiştir. VZA kullanılan girdi ve çıktı değişkenleri, çalışmanın konusuna uygun bir biçimde ve literatürdeki diğer çalışmalardan esinlenerek belirlenmiştir. Buna göre ilgili değişkenler, Tablo 1’de açıklanmaktadır.

Tablo 1. VZA’da Kullanılan Değişkenler

| Türü | Değişken | Açıklama |
|-------|-----------------------|--|
| Girdi | Yatırım Maliyeti(USD) | Tesisin Yatırım Maliyeti |
| Girdi | Enerji (kwh) | Tesiste Kullanılan Elektrik Miktarı |
| Girdi | Personel Sayısı | Tesiste Çalışan Sayısı |
| Çıktı | Nüfus | Tesisten Hizmet Alan Nüfus Miktarı |
| Çıktı | Debi | Ev, Sanayi ve Sızıntı Olarak Kullanılan Su Miktarı |

Gerçekleştirilen VZA’da seçilmiş olan girdi ve çıktılarının tümü her KVB için kullanılmıştır. Bilindiği üzere, VZA modelinde KVB’lerin sayısı girdi ve çıktılarının toplamından 1 fazla olmak zorundadır. Ele alınan çalışmada bu durum dikkate alınarak oluşturulan model aşağıdaki gibidir: KVB’lerin Sayısı; 12 adet Biyolojik Arıtma Tesisi, girdiler; 3 adet, çıktılar; 2 adet, VZA’nın Tipi; Temel Radyal Modeli, kullanılan model: BCC Modeli; araştırma dönemi: 4 yıl. Çalışmada kullanılan girdiler, tesislerin personel sayısı, tesislerin kurulmasında belirlenmiş olan yatırım maliyetleri ve tesislerin çalışmasında yararlanılan enerji miktarı olarak belirlenmiştir. Araştırmada belirlenen çıktılar ise tesislerin tasfiye birimlerine gelen debi miktarı ile tesislere bağlı olan nüfus miktarı olarak ele alınmıştır. Söz konusu değişkenler, 2020-2023 dönemindeki her bir yıl için ayrı ayrı değerlendirilmiş ve mevcut girdi ile en çok çıktıya ulaşılması hedefi kapsamında VZA’nın çıktı yönlü ölçeğe göre değişken getiriye dikkate alan BCC modeli uygulanmıştır.

IV. Bulgular

VZA ile gerçekleştirilen analiz sonucunda ulaşılan değerler 0 ile 1 arasında bulunmakta ve “1 değeri” etkin olma, “0 değeri” etkin olmama durumunu göstermektedir. Çalışmada kullanılan veriler “Deap 2.1” programı ile analize tabi tutulmuştur. Tablo 2’de VZA modeli ile etkinlikleri araştırılan İleri Biyolojik Arıtma Tesislerinin etkinlik değerleri ve sonuçları gösterilmektedir:

Tablo 2. VZA Etkinlik Tablosu

| Tesisler | 2020 | | 2021 | | 2022 | | 2023 | |
|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | Etkinlik Değeri | Etkinlik Durumu | Etkinlik Değeri | Etkinlik Durumu | Etkinlik Değeri | Etkinlik Durumu | Etkinlik Değeri | Etkinlik Durumu |
| Kullar | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin |
| Plajyolu | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin |
| Gebze | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin |
| Dilovası | 0.888 | Etkin Değil | 0.991 | Etkin Değil | 0.830 | Etkin Değil | 0.814 | Etkin Değil |
| 42Evler | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin |
| Karamürsel | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 0.887 | Etkin Değil |
| Kandıra | 0.560 | Etkin Değil | 0.558 | Etkin Değil | 0.607 | Etkin Değil | 0.616 | Etkin Değil |
| Cebeci | 0.890 | Etkin Değil | 1000 | Etkin | 0.856 | Etkin | 0.970 | Etkin Değil |
| Cumaköy | 1000 | Etkin | 0.662 | Etkin Değil | 0.583 | Etkin Değil | 0.901 | Etkin Değil |
| Tavşancıl | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin |
| Umuttepe | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin |
| Köseler | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin | 1000 | Etkin |
| Toplam | 0.945 | | 0.934 | | 0.906 | | 0.932 | |

Etkinlik tablosuna göre (Tablo 2); 12 tesisin 2020 yılında 9'u *etkin* olarak nitelendirilirken, 3'ünün ise *etkin olmadığı* anlaşılmaktadır. Etkin olan tesisler Kullar, Plajyolu, Gebze, 42Evler, Karamürsel, Cumaköy, Tavşancıl, Umuttepe ve Köşeler İleri Biyolojik Arıtma Tesisleri olarak sıralanmaktadır. 2020 yılında etkin olmayan tesisler ise Dilovası, Kandıra ve Cebeci tesisleridir.

2021 ve 2022 yılı verilerine göre, incelenen tesislerin yine 9'u *etkin*; 3'ü ise *etkin değildir*. 2021 ve 2022 yıllarında etkin olan tesislerin Kullar, Plajyolu, Gebze, 42Evler, Karamürsel, Cebeci, Tavşancıl, Umuttepe ve Köşeler olduğu anlaşılmıştır. 2023 yılı analiz sonuçlarına göre ise 7 tesisin *etkin*, 5 tesisin de *etkin olmadığı* saptanmıştır. Bu yıla ait verilere dayanarak etkin olan tesisler; Kullar, Plajyolu, Gebze, 42Evler, Tavşancıl, Umuttepe ve Köşeler'dir.

VZA'nın ikinci aşaması, etkin olmayan KVB'lerin etkin tesislere dönüştürülebilmesi için hangi KVB'lerin çalışmasının örnek alınabileceği konusudur. Bunun için araştırmada KVB olarak belirlenmiş olan tesisler için belirlenen referans kümesine denk olan tesislerin belirlenmesi gerekmektedir. Böylece etkin olmayan her tesis için eş düzey durumdaki tesis veya tesisler belirlenmekte ve söz konusu tesislerin etkin birimlerden referans olan bu tesislere benzer çalışmalar sergilemesi önerilmektedir. VZA'ya göre eş düzey durumunda olan tesisler aynı miktar girdiyle aynı miktar çıktı yapabilen KVB'lerdir.

Aşağıda yer alan Tablo 3'te eş düzey (denk) tesisler gösterilmektedir. Tablo 3'e göre bazı tesislerin kendilerinin referansı olduğu bazılarının ise farklı tesisleri referans aldıkları görülmektedir. Özellikle araştırma dönemindeki tüm yıllarda etkin olarak belirlenen 7 tesisin kendilerinin referansı olduğu anlaşılmaktadır. Tabloda belirtilmiş olan bu tesisler Kullar, Plajyolu, Gebze, 42Evler, Tavşancıl, Umuttepe ve Köşeler'dir. Karamürsel tesisi 2023 yılında Plajyolu'nu referans alırken daha önceki yıllarda kendisinin referansı olmuştur. Kandıra

tesisinin denk tesisleri 2020 yılında Cumaköy, 2021 ve 2022 yılında Plajyolu ve 2023 yılında da Tavşancıl olmuştur. Gebze tesisinin denk tesisleri de 2020 yılında Kullar, 2021 yılında kendisi, 2022 yılında Köşeler ve 2023 yılında da Plajyolu olarak belirlenmiştir. Cumaköy tesisinin referansları ise 2020 yılında kendisi, 2021 ve 2022’de Umuttepe ve 2023’te da Kullar tesisi olarak tespit edilmiştir.

Tablo 3. Denk Tesisler

| Tesisler | 2020 | 2021 | 2022 | 2023 |
|-------------------|------------|------------|------------|-----------|
| | Denklik | Denklik | Denklik | Denklik |
| Kullar | Kullar | Kullar | Kullar | Kullar |
| Plajyolu | Plajyolu | Plajyolu | Plajyolu | Plajyolu |
| Gebze | Gebze | Gebze | Gebze | Gebze |
| Dilovası | Umuttepe | Gebze | Köşeler | Kullar |
| 42Evler | 42Evler | 42Evler | 42Evler | 42Evler |
| Karamürsel | Karamürsel | Karamürsel | Karamürsel | Plajyolu |
| Kandıra | Cumaköy | Plajyolu | Plajyolu | Tavşancıl |
| Gebze | Kullar | Gebze | Köşeler | Plajyolu |
| Cumaköy | Cumaköy | Umuttepe | Umuttepe | Kullar |
| Tavşancıl | Tavşancıl | Tavşancıl | Tavşancıl | Tavşancıl |
| Umuttepe | Umuttepe | Umuttepe | Umuttepe | Umuttepe |
| Köşeler | Köşeler | Köşeler | Köşeler | Köşeler |

Öte yandan VZA’nde, araştırılan dönemlere ilişkin olarak eş birimlerin ağırlıkları (λ) da hesaplanmaktadır. Buna göre her bir girdi ve çıktının miktarı, söz konusu birimin etkinlik sınırına yerleştirilebileceği şekilde değiştirildiğinde (yani verimliliği 1'e eşit olduğunda), etkinlik sınırında bulunan varsayımsal birim, (sanal birim λ), her bir sanal birimi oluşturmak için kullanılan eş birimlerin birleşimini temsil etmektedir. Sanal birime ait değerler karar verme birimlerinin etkinlik durumlarının belirlenmesinde de kullanılmaktadır

Öte yandan çalışmada gerçekleştirilen BCC çıktı yönlü model tarafından belirlenmiş olan girdi ve çıktı boşlukları Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6’da gösterilmektedir. Boş (slack) değişkenler, üretim sırasında gerekenden fazla girdi kullanıldığını veya gerçekleşmesi gerekenden az olan çıktıyı ifade etmektedir. Girdi ve çıktı boşlukları olarak adlandırılan bu boşluklar etkin olarak bulunmayan tesisin etkinliğinin artırılması için yapılması gereken düzeltmeleri yansıtmaktadırlar.

Söz konusu tablolarda (Tablo 4, Tablo 5 ve Tablo 6) daha az gerçekleşen üretim çıktısını ya da gereğinden fazla girdi kullanılmasını tespit etmek amacıyla tesis girdilerinin atıl olarak tutulan miktarları gösterilmektedir. Tesislerin girdi boşluklarının en fazladan en aza doğru sıralanması; 2020 yılında Dilovası ve Gebze tesisleri, 2021 yılında Dilovası, Gebze ve Cumaköy tesisleri, 2022 yılında Dilovası, Gebze, Kandıra ve Cumaköy tesisleri ve son olarak da 2023 yılında Dilovası, Gebze ve Kandıra tesisleri şeklindedir. Enerji girdisinde etkinlik sağlayamayan tek tesisin 2023 yılında Kandıra olduğu görülmektedir. Personel girdisinde ise etkinliğin sağlandığı anlaşılmaktadır.

Tablo 4. Girdi Boşlukları (Slacks) (2020 ve 2021 Yılı)

| | 2020 | | | 2021 | | |
|------------|-----------------------|--------------|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| Girdiler | Yatırım Maliyeti(usd) | Enerji (kwh) | Personel Sayısı | Yatırım Maliyeti(usd) | Enerji (kwh) | Personel Sayısı |
| Kullar | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Plajyolu | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gebze | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dilovası | 40.441.437 | 0 | 0 | 39.000.447 | 0 | 0 |
| 42Evler | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karamürsel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kandıra | 0 | 0 | 0 | 3.227.454 | 0 | 0 |
| Gebze | 3.705.379 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Cumaköy | 0 | 0 | 0 | 1.773.730 | 0 | 0 |
| Tavşancıl | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Umuttepe | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Köseler | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tablo 5. Girdi Boşlukları (Slacks) (2022 ve 2023 Yılı)

| | 2022 | | | 2023 | | |
|------------|-----------------------|--------------|-----------------|-----------------------|--------------|-----------------|
| Girdiler | Yatırım Maliyeti(usd) | Enerji (kwh) | Personel Sayısı | Yatırım Maliyeti(usd) | Enerji (kwh) | Personel Sayısı |
| Kullar | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Plajyolu | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gebze | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dilovası | 39.677.140 | 0 | 0 | 39.602.278 | 0 | 0 |
| 42Evler | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Karamürsel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Kandıra | 3.496.351 | 0 | 0 | 3.362.637 | 6425 | 0 |
| Gebze | 3.636.964 | 0 | 0 | 3.601.805 | 0 | 0 |
| Cumaköy | 214.326 | 0 | 0 | 0202 | 0 | 0 |
| Tavşancıl | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Umuttepe | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Köseler | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Tablo 6. Çıktı Boşlukları (Slacks) (2020, 2021, 2022 ve 2023 Yılı)

| | 2020 | | 2021 | | 2022 | | 2023 | |
|------------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| Çıktılar | Nüfus | Debi | Nüfus | Debi | Nüfus | Debi | Nüfus | Debi |
| Kullar | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Plajyolu | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Gebze | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Dilovası | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 2891 | 0 |
| 42Evler | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | | 0 |
| Karamürsel | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 24155 | 0 |
| Kandıra | 6312 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 7207 | 0 |
| Gebze | 13916 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 14321 | 0 |
| Cumaköy | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 764 | 0 |
| Tavşancıl | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Umuttepe | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Köseler | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

Model sonucunda ortaya çıkan çıktı boşlukları değerlendirildiğinde ise, sadece nüfus çıktısına ait etkin olmayan sonuçlara ulaşılmıştır. Buna göre; 2020 yılında Gebze ve Kandıra, 2023 yılında da Karamürsel, Gebze, Kandıra, Dilovası ve Cumaköy tesisleri Tablo 6’da belirtilen miktarlarda nüfusu etkin biçimde değerlendirememişlerdir.

V. Malmquist Toplam Faktör Verimliliği Ölçümü

Çalışmanın bu bölümünde Kocaeli’de faaliyet gösteren, 12 adet biyolojik arıtma tesisinin 2020’den 2023’e kadar olan dönemde gerçekleştirdikleri teknik değişimler ile etkin olup olmadıkları değerlendirilmektedir. Söz konusu değerlendirme için Malmquist toplam faktör verimliliği analizinden yararlanılmaktadır. Aşağıda yer alan Tablo 7’de Deap 2.1 paket programından yararlanılarak gerçekleştirilen Malmquist Endeksinin bulguları gösterilmektedir.

Tablo 7. Malmquist Endeksi Sonuçları

| TESİSLER | EFFCH | TECHC | PECH | SECH | TFPCH |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Kullar | 1.000 | 1.587 | 1.000 | 1.000 | 1.587 |
| Plajyolu | 1.000 | 1.587 | 1.000 | 1.000 | 1.587 |
| Gebze | 1.000 | 1.587 | 1.000 | 1.000 | 1.587 |
| Dilovası | 1.000 | 1.556 | 1.000 | 1.000 | 1.556 |
| 42Evler | 1.000 | 1.556 | 1.000 | 1.000 | 1.556 |
| Karamürsel | 1.000 | 1.540 | 1.000 | 1.000 | 1.540 |
| Kandıra | 1.000 | 1.489 | 1.000 | 1.000 | 1.489 |
| Cebeci | 1.000 | 1.392 | 1.000 | 1.000 | 1.392 |
| Cumaköy | 1.000 | 1.305 | 1.000 | 1.000 | 1.305 |
| Tavşancıl | 1.000 | 1.218 | 1.000 | 1.000 | 1.218 |
| Umuttepe | 0.873 | 1.218 | 1.000 | 0.873 | 1.063 |
| Köseler | 1.000 | 1.136 | 1.000 | 1.000 | 1.136 |
| Ortalama Değer | 0.989 | 1.421 | 1.000 | 0.989 | 1.405 |

Tablo 7’de yer alan Malmquist endeksi kullanılarak elde edilen analiz sonuçları kapsamında gösterilen ifadelerin açıklamaları şöyledir: Effch ifadesi, etkinlik değişimini; Techch ifadesi teknolojide meydana gelen değişimi; Pech ifadesi saf etkinlik değişimini; Sech ifadesi ölçek etkinliğinde meydana gelen değişimi ve Tfpch ifadesi de toplam faktör verimliliği değişimini göstermektedir. Bilindiği üzere, Malmquist Endeksinin 1’e eşit ve 1’den büyük olması, incelenen tesislerin etkin ya da verimli olduğu anlamına gelmektedir.

Buna göre Tablo 7’deki sonuçlar değerlendirildiğinde, 12 tesisten 11 tanesinin verimlilik değerinin 1’e eşit olduğu anlaşılmaktadır. Söz konusu endeks değerinin 1’den küçük olduğu tek tesis ise Umuttepe olmuştur. Endeks değerleri teknik etkinlik bağlamında değerlendirildiğinde, tüm tesislerin teknik etkinliğe sahip olduğu bulgusuna ulaşılmıştır. Yine aynı şekilde saf etkinlik değişimi göstergesinde de tüm tesisler etkindir. Öte yandan ölçek etkinliği göstergesinde etkin olamayan tek tesis, verimlilik skoru da 1’den küçük olan Umuttepe’dir. Böylece Kocaeli’de faaliyet gösteren arıtma tesislerinin tümünde belirtilen yıllarda toplam faktör verimliliği değerlerinin oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

VI. Tartışma

İlgili yazında genellikle ülke çapında (Çin, Danimarka, İspanya, İran, İngiltere ve Galler’deki atık su tesisleri gibi) yapılan analizler dikkati çekmektedir. Ancak son yıllarda Türkiye’deki büyükşehirlerin atık su tesislerinin etkinlik analizleri de incelenmeye başlanmıştır. Örneğin Karahan ve Akdağ (2014) Diyarbakır Büyükşehir Belediyesi atık su tesislerini (DİSKİ) ve Şahin ve Kutbay (2024) da Mersin Büyükşehir Belediyesi atık su tesislerini (MESKİ) çalışmalarına konu edinmişlerdir. Her iki çalışmada da VZA yöntemi ele alınmıştır. Ayrıca, Koç ve Acar (2018) 5 büyükşehir belediyesi için, Ayyıldız ve arkadaşları (2021) ise 30 büyükşehir belediyesi için VZA ve başka bir analiz de eklemek suretiyle çalışmalarını gerçekleştirmişlerdir. Yapılan çalışmalarda VZA yönteminin yanında ikinci bir verimlilik analizi olarak Malmquist Endeksinin kullanımı, Koç ve Acar’ın çalışmasında bulunmaktadır. Bu bağlamda ele alınan çalışma, Koç ve Acar’ın çalışmasında olduğu gibi VZA ile Malmquist Endeksinin birlikte ele almakta ve en güncel verilerle 3 yıllık bir dönem için Kocaeli ilindeki arıtma tesislerinin etkinliklerini değerlendirmektedir. Değerlendirme sonucunda elde edilen bulgular Koç ve Acar’ın bulguları ile örtüşmekte ve atık su tesislerinin zaman içinde genel olarak etkinliklerinin ve verimliliklerinin arttığı gözlemlenmektedir.

Çalışma, “çevre kirliliği ve iklim değişikliği gibi nedenlerle eko-sistemi her geçen gün hızla bozulan Marmara Denizi’ne kıyısı olan, son yıllarda aşırı kirliliğin neden olduğu müsülaj sorunuyla mücadele kapsamında yürütülen “İzmit Körfezi Doğu Baseni Dip Çamurunun Temizlenmesi, Susuzlaştırılması ve Bertaraf Hizmeti Projesi⁵” ile dikkatleri üzerine çeken ve Türkiye’nin sanayi şehri olarak nitelenen Kocaeli’yi ele alması bakımından özgündür. Çalışmanın, Marmara Denizi’ne kıyısı olan diğer illerdeki tesisler için de yapılmasını teşvik etmesi beklenmektedir.

Sonuç

Bilindiği üzere, atık suyun arıtılması için çevresel duyarlılığa en çok özen gösteren yöntem, ileri biyolojik arıtma yöntemidir. Ancak ileri biyolojik su arıtımı, oldukça maliyetli bir işlemdir ve kurulum için önemli teşviklere ihtiyaç duyulmaktadır. Bu nedenle tesislerin kurulumu aşamasında ağırlıklı olarak belediyeler öncülük rolünü üstlenmektedirler. Bu bağlamda, önemli bir yatırım harcamasının yapılmasını gerektiren tesislerin etkin çalışması ve verimliliğinin yüksek olması bir zorunluluk olarak ortaya çıkmaktadır.

⁵ www.istanbul.edu.tr, Erişim Tarihi: 07.12.2024.

Ele alınan çalışmada, Kocaeli’de faaliyet gösteren 12 ileri biyolojik arıtma tesisinin etkinliğinin ve verimliliğinin saptanması amaçlanmış ve bu amaç doğrultusunda, 2020-2023 dönemine ait veriler dikkate alınarak her yıl için ayrı değerlendirme yapılmıştır. Çalışmada VZA’nın çıktı yönlü BCC modeli kullanılmış olup tesislerin teknolojik değişimleri de Malmquist Endeksi ile değerlendirilmiştir.

Literatürde atık su ile ilgili yapılmış az sayıda çalışma bulunmaktadır. Ele alınan çalışma ise atık suyun değerlendirilmesinin çevresel etkilerine dikkat çekmek, bu alanda faaliyet gösteren tesislerin gelecek için ne kadar önemli olduğunu belirterek söz konusu tesislerin etkin olup olmadığını tespit etmek açısından özgün olmakta ve diğer çalışmalardan farklılaşmaktadır.

Kocaeli’de faaliyette bulunan 12 ileri biyolojik arıtma tesisinin etkinlik analizi sonuçlarına göre, söz konusu tesislerin genel olarak etkin çalıştıkları bulgusuna ulaşılmıştır. Yıllara göre bir değerlendirme yapıldığında ise;

i. 2020, 2021 ve 2022 yıllarında tesislerden 9 tanesinin etkin, 3 tanesinin ise yetersiz olduğu tespit edilmiştir. Analiz sonucunda 2020 yılında etkin bulunan 9 tesis; Kullar, Plajyolu, Gebze, 42Evler, Karamürsel, Cumaköy, Tavşancıl, Umuttepe ve Köşeler olarak saptanmıştır. 2021 ve 2022 yıllarında ise 2020 yılında etkin olan Cumaköy arıtma tesisinin yerini Cebeci Arıtma tesisinin aldığı gözlemlenmiştir.

ii. 2023 yılı itibarıyla ise etkin olan 7 tesis bulunmakta ve bunlar; Kullar, Plajyolu, Gebze, 42Evler, Tavşancıl, Umuttepe ve Köşeler olarak sıralanmaktadır. Buna göre, 2023 yılında diğer yıllara oranla etkin tesis sayısının azaldığı görülmektedir. Ancak, Kandıra tesisi dışındaki tesislerin etkinlik katsayılarının 1’e oldukça yakın olmaları sebebiyle etkinliğe de yakın oldukları söylenebilir.

iii. Malmquist toplam faktör verimliliği endeksine göre ise tesislerin, 2020, 2021, 2022 ve 2023 yıllarındaki etkinlik değişimleri değerlendirildiğinde, 12 tane ileri biyolojik arıtma tesisinden 11 tanesinin verimlilik skorunun 1’e eşit olduğu gözlenirken 1’den küçük olan tek tesisin Umuttepe olduğu anlaşılmaktadır. Endeks değerleri teknik etkinlik ve saf etkinlik değişimi göstergeleri açısından tüm tesislerin etkin olduğu, ölçek etkinliği göstergesinde etkin olmayan tek tesisin de yine Umuttepe arıtma tesisinin olduğu bulgusu elde edilmiştir.

iv. Ayrıca ele alınan dönemde toplam faktör verimliliği değerlerinin de tüm tesislerde yüksek olduğu anlaşılmaktadır.

Dünyada ve Türkiye’de atık suyun değerlendirilmesi ve dönüştürülmesi bağlamında önemli rol oynayan ileri biyolojik arıtma tesislerinin sayısının artırılması ve etkin faaliyet göstermelerinin sağlanması çevresel açıdan önem arz etmektedir. VZA’nın çıktı yönlü BCC modeline göre, etkinliğin sağlanması tesislerin mevcut girdileri ile en çok çıktıya ulaşmalarına bağlıdır. Bu nedenle çalışmada, daha az gerçekleşen üretim çıktısı ya da gereğinden fazla girdi kullanılması tespit edilmiş ve tek tek her tesis için tesis girdilerinin atıl olarak tutulan miktarları saptanmıştır. Söz konusu tesislerin belirtilen miktarlardaki atıl kaynaklarının etkinliği sağlandığı takdirde bugünkünden daha etkin olarak çalışabilmeleri mümkün olmaktadır. Özellikle nüfus girdisinin etkinliğinin sağlanması için yeni tesislerin faaliyete geçirilmesi ile çevresel zararın en aza indirilerek atık suyun değerlendirilmesi beklenmektedir.

Analiz bulgularından hareketle söz konusu tesislerin, özellikle organik madde ve azot giderimi açısından çevresel sürdürülebilirlik bağlamında önemli bir rol oynadığı çok açık bir şekilde ortaya çıkmıştır. İleri biyolojik arıtma tesislerinin performanslarına yönelik yapılan etkinlik analizleri; atık geri dönüşümü, enerji üretimi ve çevresel yönetim açısından önemli katkılar sağlamaktadırlar. Gelecek çalışmalarda ise VZA ve diğer etkinlik analizleri ile daha geniş veri setleri ve farklı coğrafi bölgelerdeki tesislerin karşılaştırmalarının yapılması beklenmektedir.

Kaynakça

- Akhisar, İ. & Tezergil, S. (2014). Malmquist Toplam Faktör Verimlilik Endeksi: Türk Sigorta Sektörü Uygulaması. *Finansal Araştırmalar ve Çalışmalar Dergisi*, 5(10): 1-14.
- Atukalp, M. E. (2018). Malmquist Toplam Faktör Verimliliği Endeksi İle Türk Bankacılık Sisteminde Bölgesel Performans Ölçümü. *Finans Politik ve Ekonomik Yorumlar*, (638): 17-34.
- Ayyıldız, E., Yıldız, A., Taskın Gumus, A. & Ozkan, C. (2021). An İntegrated Methodology Using Extended Swara And Dea For the Performance Analysis of Wastewater Treatment Plants: Turkey Case. *Environmental Management*, 67(3): 449-467.
- Banker, R. D., Charnes, A. & Cooper, W. W. (1984). Some Models for Estimating Technical And Scale İnefficiencies İn Data Envelopment Analysis. *Management Science*, 30(9): 1078-1092.
- Bian, Y., Yan, S. & Xu, H. (2014). Efficiency Evaluation for Regional Urban Water Use And Wastewater Decontamination Systems İn China: A DEA Approach. *Resources, Conservation and Recycling*, 83: 15-23.
- Castellet, L. & Molinos-Senante, M. (2016). Efficiency Assessment of Wastewater Treatment Plants: A data Envelopment Analysis Approach İntegrating Technical, Economic, And Environmental İssues. *Journal of environmental management*, 167(6), 160-166.
- Caves, D. W., Christensen, L. R., & Diewert, W. E. (1982). The Economic Theory Of İndex Numbers And The Measurement Of İntput, Output, And Productivity. *Econometrica: Journal of the Econometric Society*, 1393-1414.
- Charnes, A., Cooper, W. W., & Rhodes, E. (1978). Measuring The Efficiency Of Decision Making Units. *European Journal Of Operational Research*, 2(6): 429-444.
- De Witte, K., & Marques, R. C. (2010). Designing Performance İncentives, An İnternational Benchmark Study İn The Water Sector. *Central European Journal of Operations Research*, 18: 189-220.
- Deliktas, E. (2002). Türkiye Özel Sektör İmalat Sanayiinde Etkinlik ve Toplam Faktör Verimliliği Analizi. *Middle East Technical University (METU) Studies İn Development*, 29(2): 247-284.
- Dinçer, E. (2008). Veri Zarflama Analizinde Malmquist Endeksiyle Toplam Faktör Verimliliği Değişiminin İncelenmesi ve İMKB Üzerine Bir Uygulama. *Marmara Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Dergisi*, 25(2): 825-846.
- Environmental Protection Agency. (2018). Guidelines for the Application of Small-Scale, Decentralized Wastewater Treatment Systems, www.unep.org/resources/publication/guidelines-application-small-scale-decentralized-wastewater-treatment-systems, Erişim Tarihi: 26.05.2024.
- Fare, R., Grosskopf, S., Norris, M., & Zhang, Z. (1994). Productivity Growth, Technical Progress, And Efficiency Change İn İndustrialized Countries. *American Economic Review*, 84(1): 66-83.
- Farrel, M. J. (1957). The Measure of Productive Efficiency. *Journal of The Royal Statistical Society*, 253, 281.
- Gómez, T., Gémar, G., Molinos-Senante, M., Sala-Garrido, R. & Caballero, R. (2017). Assessing the Efficiency of Wastewater Treatment Plants: A Double-Bootstrap Approach. *Journal of Cleaner Production*, 164, 315-324.
- Guerrini, A., Romano, G., Leardini, C., & Martini, M. (2015). Measuring The Efficiency Of Wastewater Services Through Data Envelopment Analysis. *Water Science and Technology*, 71(12): 1845-1851.
- Hernández-Sancho, F. & Sala-Garrido, R. (2009). Technical Efficiency And Cost Analysis in Wastewater Treatment Processes: A DEA Approach. *Desalination*, 249(1), 230-234.
- <https://cevreselgostergeler.csb.gov.tr/atiksu-aritma-tesisi-ile-hizmet-verilen-belediyeler-i-85746>, Erişim Tarihi: 26.05.2014.
- <https://csb.gov.tr/>, Erişim Tarihi: 26.05.2014.
- <https://green-glossary.com/tr>, Erişim Tarihi: 13.12.2024.
- <https://www.unep.org/resources/publication/guidelines-application-small-scale-decentralized-wastewater-treatment-systems>, Erişim Tarihi: 26.05.2024.
- <https://www.unep.org/resources/report/wastewater-turning-problem-solution>, Erişim Tarihi: 03.12.2024.
- <https://www.unep.org/topics/ocean-seas-and-coasts/ecosystem-degradation-pollution/wastewater/global-wastewater>: Erişim Tarihi: 26.05.2024.
- <https://www.istanbul.edu.tr/tr/haber/istanbul-universitesi-izmit-korfezinde-calismalara-basladi-43006B0047007A004100780033005300450079004C0039007900700046006200610041004F003200370077003200>, Erişim Tarihi: 07.12.2014.
- İlleez, A. A., & Güner, M. (2018). Applications of Data Envelopment Analysis in Textile Sector. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, 2(2): 72-75.
- İSU Faaliyet Raporu 2022, <https://www.isu.gov.tr/icerik/detay.aspx?Id=782>, Erişim Tarihi: 26.05.2024.
- Karahan, M., & Akdağ, R. (2014). Veri Zarflama Analiziyle Hizmet Etkinliği Ölçümü: Diyarbakır DİSKİ Örneği. *Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (31.1): 179-187.

- Koç, G., & Acar, D. (2018). Büyükşehir Su ve Atıksu İdarelerinin Verimliliklerinin Veri Zarflama Analizi İle Ölçümü. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi, 10(25): 566-590.
- Lorenzo-Toja, Y., Vázquez-Rowe, I., Marín-Navarro, D., Crujeiras, R. M., Moreira, M. T., & Feijoo, G. (2018). Dynamic Environmental Efficiency Assessment For Wastewater Treatment Plants. The International Journal of Life Cycle Assessment, 23: 357-367.
- Mahmoudi, M. J., Fathi, B., Sajadifar, H., & Shahsavari, A. (2012). Measuring Efficiency of Water And Wastewater Company: A DEA Approach. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 4(12): 1642-1648.
- Malmquist, S. (1953). Index Numbers And İndifference Surfaces. Trabajos De Estadística, 4(2): 209-242.
- Molinos-Senante, M. & Maziotis, A. (2022). Evaluation of Energy Efficiency of Wastewater Treatment Plants: The Influence of The Technology And Aging Factors. *Applied Energy*, 310, 118535, 1-8.
- Saghafi, S., Ebrahimi, A., Mehrdadi, N. & Nabi Bidhendi, G. (2020). Energy-Efficiency Index in Industrial Wastewater Treatment Plants Using Data-Envelopment Analysis. *Journal of Environmental Engineering*, 146(2), 04019112, 1-7.
- Sala-Garrido, R., Hernández-Sancho, F., & Molinos-Senante, M. (2012). Assessing The Efficiency Of Wastewater Treatment Plants İn An Uncertain Context: A DEA With Tolerances Approach. *Environmental Science & Policy*, 18: 34-44.
- Şahin, H. O., & Kutbay, H. (2024). Veri Zarflama Analizi ile Kamusal Gelirlerin İçme Suyu ve Atık Su Toplama Merkezlerinde Dağıtım Etkisinin İncelenmesi: MESKİ Örneği. *MANAS Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 13(1): 150-169.
- TÜÇA Faaliyet Raporu, 2023, https://webdosya.csb.gov.tr/db/tuca/duyurular/2023-yili-tu-c-a-faali-yet-raporu_20240708025949.pdf, Erişim Tarihi: 26.05.2024.
- TÜİK, "Su ve Atıksu İstatistikleri, 2022", <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Su-ve-Atıksu-Istatistikleri-2022-49607>. Erişim Tarihi: 20.05.2024.
- Villegas, A., Molinos-Senante, M., & Maziotis, A. (2019). Impact of Environmental Variables On The Efficiency Of Water Companies İn England And Wales: A Double-Bootstrap Approach. *Environmental Science and Pollution Research*, 26: 31014-31025.
- Yadav, D. V., Parmar, D., Ganguly, R. & Shukla, S. (2022). Efficiency Evaluation of Sewage Treatment Plants in Delhi, India, Using Tolerance-Based Data Envelope Analysis. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(12), 867, 1-13.
- Zhu, W., Duan, C. & Chen, B. (2024). Energy Efficiency Assessment of Wastewater Treatment Plants in China Based on Multiregional Input-Output Analysis And Data Envelopment Analysis. *Applied Energy*, 356, 122462, 1-13.

EK I.**Tablo 8.** Etkin Olmayan Tesislerde Gerçekleşen/Hedef Girdiler ve Etkinlik için Azaltılan Girdi Miktarı-2020 Yılı

| TESİSLER | Girdiler | Gerçekleşen | Hedef | Etkinlik için Azaltılan Girdi |
|-------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| Kullar | Yatırım Maliyeti | 11452235 | 11452235 | 0 |
| | Enerji | 13862835 | 13862835 | 0 |
| | Personel | 27 | 27 | 0 |
| Plajyolu | Yatırım Maliyeti | 10030397,24 | 10030397,24 | 0 |
| | Enerji | 4427006 | 4427006 | 0 |
| | Personel | 18 | 24 | -6 |
| Gebze | Yatırım Maliyeti | 67329414,15 | 67329414,15 | 0 |
| | Enerji | 12312841 | 12312841 | 0 |
| | Personel | 30 | 15 | 15 |
| Dilovası | Yatırım Maliyeti | 44800000 | 43585630 | 1214370 |
| | Enerji | 3730209 | 3730209 | 0 |
| | Personel | 19 | 19 | 0 |
| 42Evler | Yatırım Maliyeti | 34457441,9 | 34457441 | 0,899999999 |
| | Enerji | 996724 | 996724 | 0 |
| | Personel | 9 | 9 | 0 |
| Karamürsel | Yatırım Maliyeti | 3933973,52 | 3933973 | 0,52 |
| | Enerji | 1655000 | 1655000 | 0 |
| | Personel | 10 | 10 | 0 |
| Kandıra | Yatırım Maliyeti | 5585695 | 5585695 | 0 |
| | Enerji | 704160 | 704160 | 0 |
| | Personel | 11 | 11 | 0 |
| Cebeci | Yatırım Maliyeti | 6423796 | 2718417 | 3705379 |
| | Enerji | 722649 | 722649 | 0 |
| | Personel | 10 | 10 | 0 |
| Cumaköy | Yatırım Maliyeti | 2337886 | 2337886 | 0 |
| | Enerji | 150437 | 150437 | 0 |
| | Personel | 3 | 3 | 0 |
| Tavşanlı | Yatırım Maliyeti | 1014932,55 | 1014932,55 | 0 |
| | Enerji | 92141 | 55000 | 37141 |
| | Personel | 2 | 1 | 1 |
| Umuttepe | Yatırım Maliyeti | 1747934 | 1747934 | 0 |
| | Enerji | 151982 | 151982 | 0 |
| | Personel | 2 | 2 | 0 |
| Köseler | Yatırım Maliyeti | 2415000 | 2415000 | 0 |
| | Enerji | 176006 | 176006 | 0 |
| | Personel | 2 | 2 | 0 |

Tablo 9. Etkin Olmayan Tesislerde Gerçekleşen/Hedef Girdiler ve Etkinlik için Azaltılan Girdi Miktarı-2021 Yılı

| TESİSLER | Girdiler | Gerçekleşen | Hedef | Etkinlik için Azaltılan Girdi |
|-------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| | | 2021 | 2021 | 2021 |
| Kullar | Yatırım Maliyeti | 11452235 | 11452235 | 0 |
| | Enerji | 15131827 | 15131827 | 0 |
| | Personel | 24 | 24 | 0 |
| Plajyolu | Yatırım Maliyeti | 10030397,24 | 10030397,24 | 0 |
| | Enerji | 4547962 | 4547962 | 0 |
| | Personel | 15 | 24 | -9 |
| Gebze | Yatırım Maliyeti | 67329414,15 | 67329414,15 | 0 |
| | Enerji | 12650683 | 12650683 | 0 |
| | Personel | 30 | 15 | 15 |
| Dilovası | Yatırım Maliyeti | 44800000 | 5799553 | 39000447 |
| | Enerji | 3958340 | 3958340 | 0 |
| | Personel | 19 | 19 | 0 |
| 42Evler | Yatırım Maliyeti | 34457441,9 | 34457441,9 | 0 |
| | Enerji | 1774031 | 1774031 | 0 |
| | Personel | 12 | 9 | 3 |
| Karamürsel | Yatırım Maliyeti | 3933973,52 | 3933973,52 | 0 |
| | Enerji | 1177288 | 1177288 | 0 |
| | Personel | 11 | 11 | 0 |
| Kandra | Yatırım Maliyeti | 5585695,62 | 2358241 | 3227454,62 |
| | Enerji | 657084 | 657084 | 0 |
| | Personel | 11 | 11 | 0 |
| Cebeci | Yatırım Maliyeti | 6423796 | 6423796 | 0 |
| | Enerji | 793066 | 793066 | 0 |
| | Personel | 10 | 10 | 0 |
| Cumaköy | Yatırım Maliyeti | 2337886 | 2160513 | 177373 |
| | Enerji | 225391 | 225391 | 0 |
| | Personel | 3 | 3 | 0 |
| Tavşanlı | Yatırım Maliyeti | 1014932,55 | 1014932,55 | 0 |
| | Enerji | 79600 | 79600 | 0 |
| | Personel | 2 | 2 | 0 |
| Umuttepe | Yatırım Maliyeti | 1747934 | 1747934 | 0 |
| | Enerji | 153850 | 153850 | 0 |
| | Personel | 2 | 2 | 0 |
| Köseler | Yatırım Maliyeti | 2415000 | 2415000 | 0 |
| | Enerji | 118995 | 118995 | 0 |
| | Personel | 2 | 2 | 0 |

Tablo 10. Etkin Olmayan Tesislerde Gerçekleşen/Hedef Girdiler ve Etkinlik için Azaltılan Girdi Miktarı-2022 Yılı

| TESİSLER | Girdiler | Gerçekleşen | Hedef | Etkinlik için Azaltılan Girdi |
|-------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| | | 2022 | 2022 | 2022 |
| Kullar | Yatırım Maliyeti | 11452235 | 11452235 | 0 |
| | Enerji | 14250008 | 14250008 | 0 |
| | Personel | 24 | 24 | 0 |
| Plajyolu | Yatırım Maliyeti | 10030397,24 | 10030397,24 | 0 |
| | Enerji | 4797597 | 4797597 | 0 |
| | Personel | 15 | 24 | -9 |
| Gebze | Yatırım Maliyeti | 67329414,15 | 67329414,15 | 0 |
| | Enerji | 10820334 | 10820334 | 0 |
| | Personel | 30 | 15 | 15 |
| Dilovası | Yatırım Maliyeti | 44800000 | 5122860 | 39677140 |
| | Enerji | 4405900 | 4405900 | 0 |
| | Personel | 19 | 19 | 0 |
| 42Evler | Yatırım Maliyeti | 34457441,9 | 34457441,9 | 0 |
| | Enerji | 1873854 | 1420103 | 453751 |
| | Personel | 12 | 12 | 0 |
| Karamürsel | Yatırım Maliyeti | 3933973,52 | 3933973,52 | 0 |
| | Enerji | 1420103 | 1420103 | 0 |
| | Personel | 11 | 11 | 0 |
| Kandıra | Yatırım Maliyeti | 5585695,62 | 2089344 | 3496351,62 |
| | Enerji | 658960 | 658960 | 0 |
| | Personel | 11 | 11 | 0 |
| Cebeci | Yatırım Maliyeti | 6423796 | 2786832 | 3636964 |
| | Enerji | 772678 | 772678 | 0 |
| | Personel | 10 | 10 | 0 |
| Cumaköy | Yatırım Maliyeti | 2337886 | 2123560 | 214326 |
| | Enerji | 320657 | 320657 | 0 |
| | Personel | 3 | 3 | 0 |
| Tavşanlı | Yatırım Maliyeti | 1014932,55 | 1014932,55 | 0 |
| | Enerji | 121458 | 220903 | -99445 |
| | Personel | 2 | 2 | 0 |
| Umuttepe | Yatırım Maliyeti | 1747934 | 1747934 | 0 |
| | Enerji | 220903 | 220903 | 0 |
| | Personel | 2 | 2 | 0 |
| Köseler | Yatırım Maliyeti | 2415000 | 2415000 | 0 |
| | Enerji | 194379 | 194379 | 0 |
| | Personel | 2 | 2 | 0 |

Tablo 11. Etkin Olmayan Tesislerde Gerçekleşen/Hedef Girdiler ve Etkinlik için Azaltılan Girdi Miktarı-2023 Yılı

| TESİSLER | Girdiler | Gerçekleşen | Hedef | Etkinlik için Azaltılan Girdi |
|-------------------|------------------|-------------|-------------|-------------------------------|
| | | 2023 | 2023 | 2023 |
| Kullar | Yatırım Maliyeti | 11452235 | 11452235 | 0 |
| | Enerji | 14033617 | 14033617 | 0 |
| | Personel | 24 | 24 | 0 |
| Plajyolu | Yatırım Maliyeti | 10030397,24 | 10030397,24 | 0 |
| | Enerji | 4277636 | 4277636 | 0 |
| | Personel | 15 | 24 | -9 |
| Gebze | Yatırım Maliyeti | 67329414,15 | 67329414,15 | 0 |
| | Enerji | 8692499 | 8692499 | 0 |
| | Personel | 30 | 15 | 15 |
| Dilovası | Yatırım Maliyeti | 44800000 | 5197722 | 39602278 |
| | Enerji | 4474936 | 4474936 | 0 |
| | Personel | 19 | 19 | 0 |
| 42Evler | Yatırım Maliyeti | 34457441,9 | 34457441,9 | 0 |
| | Enerji | 2154421 | 2154421 | 0 |
| | Personel | 12 | 9 | 3 |
| Karamürsel | Yatırım Maliyeti | 3933973,52 | 3933973,52 | 0 |
| | Enerji | 1469706 | 1469706 | 0 |
| | Personel | 11 | 11 | 0 |
| Kandıra | Yatırım Maliyeti | 5585695,62 | 2223058 | 3362637,62 |
| | Enerji | 673418 | 673418 | 0 |
| | Personel | 11 | 11 | 0 |
| Cebeci | Yatırım Maliyeti | 6423796 | 2821990 | 3601806 |
| | Enerji | 844157 | 844157 | 0 |
| | Personel | 11 | 11 | 0 |
| Cumaköy | Yatırım Maliyeti | 2337886 | 2337886 | 0 |
| | Enerji | 311560 | 311560 | 0 |
| | Personel | 3 | 3 | 0 |
| Tavşanlı | Yatırım Maliyeti | 1014932,55 | 1014932,55 | 0 |
| | Enerji | 115737 | 115737 | 0 |
| | Personel | 2 | 2 | 0 |
| Umuttepe | Yatırım Maliyeti | 1747934 | 1747934 | 0 |
| | Enerji | 228787 | 228787 | 0 |
| | Personel | 2 | 2 | 0 |
| Köseler | Yatırım Maliyeti | 2415000 | 2415000 | 0 |
| | Enerji | 222183 | 222183 | 0 |
| | Personel | 2 | 2 | 0 |

Tablo 12. Gerçekleşen ve Hedef Çıktılar ile Fark (2020 ve 2021 Yılı)

| | 2020 | | | | 2021 | | | |
|-------------------|----------|-------------|----------|----------|----------|-------------|----------|---------|
| Tesisler | Çıktılar | Gerçekleşen | Hedef | Fark | Çıktılar | Gerçekleşen | Hedef | Fark |
| Kullar | Nüfus | 326629 | 326629 | 0 | Nüfus | 334113 | 334113 | 0 |
| | Debi | 34286330 | 34286330 | 0 | Debi | 37347518 | 37347518 | 0 |
| Plajyolu | Nüfus | 248671 | 248671 | 0 | Nüfus | 254369 | 254369 | 0 |
| | Debi | 20284931 | 20284931 | 0 | Debi | 23108700 | 23108700 | 0 |
| Gebze | Nüfus | 686782 | 686782 | 0 | Nüfus | 702518 | 702518 | 0 |
| | Debi | 37639028 | 37639028 | 0 | Debi | 38291853 | 38291853 | 0 |
| Dilovası | Nüfus | 81229 | 91472 | 10243 | Nüfus | 83090 | 83090 | 0 |
| | Debi | 8021033 | 9032503 | 1011470 | Debi | 9647013 | 9735978 | 88965 |
| 42Evler | Nüfus | 61218 | 61218 | 0 | Nüfus | 62621 | 62621 | 0 |
| | Debi | 7710545 | 7710545 | 0 | Debi | 7710545 | 7710545 | 0 |
| Karamürsel | Nüfus | 52938 | 52938 | 0 | Nüfus | 54151 | 54151 | 0 |
| | Debi | 7054474 | 7054474 | 0 | Debi | 7054474 | 7054474 | 0 |
| Kandıra | Nüfus | 17884 | 38910 | 21026 | Nüfus | 18294 | 32762 | 14468 |
| | Debi | 1838998 | 3286194 | 1447196 | Debi | 1890015 | 3384743 | 1494728 |
| Cebeci | Nüfus | 4247 | 5278 | 1031 | Nüfus | 4344 | 4344 | 0 |
| | Debi | 1476022 | 237730 | -1238292 | Debi | 2044412 | 2044412 | 0 |
| Cumaköy | Nüfus | 5278 | 5278 | 0 | Nüfus | 5399 | 8151 | 2752 |
| | Debi | 237730 | 237730 | 0 | Debi | 233602 | 352670 | 119068 |
| Tavşanlı | Nüfus | 2868 | 2868 | 0 | Nüfus | 2934 | 2934 | 0 |
| | Debi | 75808 | 75808 | 0 | Debi | 73248 | 73248 | 0 |
| Umuttepe | Nüfus | 9102 | 9102 | 0 | Nüfus | 9311 | 9311 | 0 |
| | Debi | 86736 | 86736 | 0 | Debi | 88949 | 88949 | 0 |
| Köseler | Nüfus | 3372 | 3372 | 0 | Nüfus | 3449 | 3449 | 0 |
| | Debi | 164339 | 164339 | 0 | Debi | 163729 | 163729 | 0 |

Tablo 13. Gerçekleşen ve Hedef Çıktılar ile Fark (2022 ve 2023 Yılı)

| | 2022 | | | | 2023 | | | |
|-------------------|----------|-------------|----------|---------|----------|-------------|----------|---------|
| Tesisler | Çıktılar | Gerçekleşen | Hedef | Fark | Çıktılar | Gerçekleşen | Hedef | Fark |
| Kullar | Nüfus | 340237 | 340237 | 0 | Nüfus | 345341 | 345341 | 0 |
| | Debi | 36897804 | 36897804 | 0 | Debi | 37066609 | 37066609 | 0 |
| Plajyolu | Nüfus | 260197 | 260197 | 0 | Nüfus | 264100 | 264100 | 0 |
| | Debi | 22197354 | 22197354 | 0 | Debi | 24818300 | 24818300 | 0 |
| Gebze | Nüfus | 718615 | 718615 | 0 | Nüfus | 729394 | 729394 | 0 |
| | Debi | 31177725 | 31177725 | 0 | Debi | 31512937 | 31512937 | 0 |
| Dilovası | Nüfus | 84994 | 104417 | 19423 | Nüfus | 86269 | 108815 | 22546 |
| | Debi | 9313600 | 11223231 | 1909631 | Debi | 9464516 | 11620815 | 2156299 |
| 42Evler | Nüfus | 64056 | 64056 | 0 | Nüfus | 65017 | 65017 | 0 |
| | Debi | 8503402 | 8503402 | 0 | Debi | 9119248 | 9119248 | 0 |
| Karamürsel | Nüfus | 55392 | 55392 | 0 | Nüfus | 56223 | 87570 | 31347 |
| | Debi | 6761898 | 6761898 | 0 | Debi | 7177618 | 8095782 | 918164 |
| Kandıra | Nüfus | 18713 | 30821 | 12108 | Nüfus | 18994 | 38027 | 19033 |
| | Debi | 1618299 | 2665419 | 1047120 | Debi | 2096969 | 3402547 | 1305578 |
| Cebeci | Nüfus | 4444 | 17382 | 12938 | Nüfus | 4511 | 18972 | 14461 |
| | Debi | 1495967 | 1747332 | 251365 | Debi | 1896430 | 1955424 | 58994 |
| Cumaköy | Nüfus | 5523 | 9473 | 3950 | Nüfus | 5606 | 6989 | 1383 |
| | Debi | 294897 | 505802 | 210905 | Debi | 458272 | 508839 | 50567 |
| Tavşanlı | Nüfus | 3001 | 3001 | 0 | Nüfus | 3046 | 3046 | 0 |
| | Debi | 72267 | 72267 | 0 | Debi | 88833 | 88833 | 0 |
| Ümuttepe | Nüfus | 9524 | 9524 | 0 | Nüfus | 9667 | 9667 | 0 |
| | Debi | 193323 | 193323 | 0 | Debi | 174948 | 174948 | 0 |
| Köseler | Nüfus | 3528 | 3528 | 0 | Nüfus | 3581 | 3581 | 0 |
| | Debi | 239023 | 239023 | 0 | Debi | 299640 | 299640 | 0 |