

DERLEME MAKALE

Atıksu Arıtma ve Derin Deniz Deşarj Tesislerinin Maliyet Analizi

Büşra ÇİÇEKALAN¹, Yasemin AKDAĞ², Hale ÖZGÜN³, İsmail KOYUNCU⁴, İzzet ÖZTÜRK⁵

Yazışma yazarı:
Büşra ÇİÇEKALAN,
cicekalan@itu.edu.tr

Referans:
Çiçekalan, B., Akdağ, Y., Özgün, H.,
Koyuncu, İ. ve Öztürk İ., (2022), Makale
Başlığı, Çevre, İklim ve Sürdürülebilirlik,
23(1) 1-8.

Makale Gönderimi : 19 KASIM 2021
Online Kabul : 08 ŞUBAT 2022
Online Basım : 30 MAYIS 2022

¹ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0002-1806-9917

² İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0002-9608-3511

³ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
MEM-TEK Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi, İstanbul Teknik
Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0001-8784-8351

⁴ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
MEM-TEK Prof. Dr. Dincer Topacık Ulusal Membran Teknolojileri UYG-AR Merkezi, İstanbul Teknik
Üniversitesi, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0001-8354-1889

⁵ İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Maslak, İstanbul, Türkiye.
ORCID:0000-0002-8274-5326

Özet

Günümüzde, atıksuların arıtılması ve deşarj standartlarına uygun hale getirilmesi ile alıcı ortamların su kalitesinin korunması büyük önem taşımaktadır. Bu bağlamda, çevresel kirliliğin önlenmesi açısından önemli bir role sahip olan mevcut atıksu arıtma tesisleri (AAT)'ne ait maliyetlerin analiz edilmesi ileride inşa edilmesi planlanan arıtma tesislerinin maliyet tahminleri açısından oldukça önemli bir konudur. Bu çalışmada, Türkiye'de ve dünyadaki AAT'nin yatırım ile işletme ve bakım maliyetleri mukayeseli olarak incelenmiştir. Bu kapsamda, atıksu ön arıtma ve derin deniz deşarj sistemlerinin maliyetleri ile ileri biyolojik atıksu arıtma tesisleri (İBAAT)'nin maliyetleri detaylı olarak araştırılmıştır. Yapılan incelemeler sonucunda; derin deniz deşarj sistemlerinin maliyetinin deşarj hattı uzunluğu, deşarj borusu çapı, zemin durumu ve boru tipine bağlı olarak değişim gösterdiği tespit edilmiştir. Ön arıtma tesislerinde ilk yatırım maliyetleri için en önemli maliyet bileşenini ekipman maliyeti oluştururken, İBAAT'lerin yatırım maliyetleri içerisinde en önemli maliyet bileşeni ise inşaat maliyetidir. Ön arıtma tesisleri ve İBATT'lerdeki en önemli işletme ve bakım maliyeti enerji maliyetidir. Özellikle gelişmiş ülkelerde sürdürülebilir atıksu arıtımı hedefi olan sistemlerin kullanılması klasik atıksu arıtma sistemlerine kıyasla ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım maliyeti açısından daha düşük maliyetlidir. Yapılan literatür araştırmaları sonucunda; arıtma türüne bağlı olarak ilk yatırım maliyeti ile işletme ve bakım maliyeti için maliyet fonksiyonları ortaya konulmuştur. Çalışmada yer alan maliyet fonksiyonları; planlanan derin deniz deşarj sistemleri, ön arıtma tesisleri ve İBAAT'lerin finansal açıdan değerlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atıksu arıtma tesisi; derin deniz deşarj sistemleri; sürdürülebilir atıksu arıtımı; yatırım maliyeti; işletme ve bakım maliyeti

Cost Analysis of Wastewater Treatment Plants and Marine Disposal Systems

Abstract Nowadays, it is of great importance to treat wastewater, bring it into compliance with discharge standards, and protect the water quality of receiving environments. Cost analysis of existing wastewater treatment plants (WWTP), that has an important role in preventing environmental pollution, is a very critical issue in terms of cost estimation of the WWTPs planned to be built in the future. In this study, not only capital cost but also operating and maintenance costs of wastewater treatment plants (WWTP) in Turkey and in the world were evaluated comparatively. In this context, the costs of preliminary WWTPs and marine disposal systems were analyzed in detail as well as the costs of advanced biological WWTPs. The findings obtained from this study indicate that the cost of marine disposal systems varies depending on the line length, pipe diameter, ground condition and pipe type. While the most important cost item for the capital costs in preliminary WWTPs is the equipment cost, the most important cost item among the capital costs of advanced biological WWTPs is the construction cost. The most important operating and maintenance cost in of preliminary WWTPs and

advanced biological WWTPs is the energy cost. Especially in developed countries, the use of sustainable wastewater treatment systems has lower costs in terms of capital, operation and maintenance costs than conventional wastewater treatment systems. As a result of the literature survey; depending on the treatment type, cost functions for the capital cost and operating and maintenance cost were presented. Cost functions obtained in the study are of utmost significance to be used in economic evaluation of planned marine disposal systems, of preliminary WWTPs and advanced biological WWTPs.

Keywords: Wastewater treatment plants; marine disposal systems; sustainable wastewater treatment; capital cost; operation and maintenance cost

1. Giriş

Evsel atıksu kaynaklı kirlilik; doğrudan insan sağlığını etkilemesi ve alıcı ortam ile içme suyu kaynakları için büyük risk oluşturması açısından oldukça önemlidir. Evsel atıksu arıtma tesisleri (AAT)'nde enerji kullanımını dünyadaki elektrik enerjisi kullanımının yaklaşık %3'üne denk gelmektedir (Li ve diğ., 2015). Artan enerji maliyetlerinden dolayı AAT'lerde enerji verimliliğinin artırılması ve enerji maliyetlerinin azaltılması yönünde uygulamalar önem kazanmıştır. Bu yüzden son yıllarda evsel atıksu arıtımında yüksek enerji tüketimi olan konvansiyonel sistemler yerine enerji açısından verimli ve kaynak geri kazanımına elverişli teknolojiler tercih edilmeye başlanmıştır. AAT'lere gelen ham evsel atıksuyun, arıtma için gerekli olan enerjinin yaklaşık 10 katı fazla (13-15 kJ/g KOİ) enerji ihtiva ettiği bilinmektedir (Olsson, 2012). Atıksudan geri kazanılan enerji ile AAT'lerin enerji nötr ve hatta enerji pozitif işletilmesi mümkün hale gelmektedir. Ayrıca, günümüzde artan enerji fiyatları ve yeni yasal düzenlemelerle getirilen sıkı deşarj standartları, AAT'lerin işletme maliyetlerini arttırmaktadır. Enerji maliyetinin artışı ve sürdürülebilirlik çalışmalarının sıklıkla gündeme gelmesi sonucunda enerji optimizasyonu, ekonomik ve çevresel açıdan daha da önemli hale gelmiştir. Bu kapsamda, AAT'lerde işletme maliyetinin optimizasyonu için enerji tüketiminin ve arıtma kapasitelerinin tesis girişinden çıkışına kadar ünite bazında izlenmesi önem arz etmektedir (Erşahin ve diğ., 2017). AAT'lerin finansal açıdan sürdürülebilirliği için en az işletme maliyetleri kadar yatırım maliyeti de oldukça önemli olup, maliyet optimizasyonu her iki maliyet bileşeni dikkate alınarak yapılmalıdır.

AAT'lerde arıtma prosesi ve tasarım kriterlerinin doğru seçilmesi, ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetlerinin azaltılması açısından önem arz etmektedir. AAT planlama aşamasında yapılan yaklaşık maliyet tahmini ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetlerini kapsar. AAT'lerin maliyet bileşenlerini etkileyen en önemli unsurlar; arıtma tesisinin hizmet edeceği nüfus, gelir ve gelişmişlik seviyesi, ham atıksuyun karakteristiği ve deşarj standartlarıdır. İnşası planlanan AAT'nin hizmet edeceği nüfus tesise gelecek olan atıksu miktarını doğrudan etkileyecek olup, ünitelerin boyutlandırılmasında oldukça önemli bir etkiye sahiptir. Atıksuyun karakteristiği, hane halkı gelir seviyesi ve deşarj standartları arıtma prosesinin seçiminde kritik hale gelmektedir.

İlk yatırım maliyeti genel olarak inşaat, mekanik ve elektrik ekipman maliyetleri ile arıtma tesisi arsasının temini, zemin araştırma, mühendislik ve müşavirlik bedellerini kapsamaktadır. İlk yatırım maliyeti inşa edilmesi planlanan tesisin hizmet edeceği nüfus, seçilen arıtma derecesi (ön arıtma, ileri arıtma vb.) ve tesisin inşa edileceği alanın zemin özellikleri gibi etkenlere bağlı olarak değişim gösterir. AAT'lerin inşaat maliyeti olası zemin iyileştirme faaliyetleri için gerekli işleri, arıtma yapılarının inşasını, tesis borulama giderlerini ve tesis içi yol ve peyzaj düzenleme bedellerini

içerir. AAT'lerin mekanik işler maliyeti arıtma ünitelerinin mekanik ekipmanlarının temin ve montajını kapsar. Elektrik işleri maliyeti ise elektrik tesisatı için gerekli kabloları, tesis içi aydınlatma ile kontrol ve otomasyon sistemi bedellerini içermektedir.

İşletme ve bakım maliyeti genel olarak tesisin işletilmesi için gerekli tüm harcamaları kapsamakta olup, enerji ve bakım-onarım giderleri ile kimyasal madde ve çamur uzaklaştırma bedelleri, personel maaşları ve diğer giderlerden oluşmaktadır. İşletme maliyeti, tesisin büyüklüğü, tesis gelen atıksu debisi ve kirlilik yükleri, deşarj standartları, arıtma tesisinin yaşı ve proses tipi gibi unsurlara bağlı olarak değişmektedir. Enerji maliyeti AAT'lerin işletme ve bakım maliyetinin büyük bir kısmını oluşturmaktadır. Bakım-onarım maliyetleri tesiste bulunan elektrik ve mekanik ekipmanların periyodik bakım ve parça maliyetlerini kapsamaktadır. Arıtma tesislerinde arıtma performansının artırılması ve arıtma çamurlarının bertaraf için uygun hale getirilmesinde kimyasal madde kullanımı gerekebilir. Kimyasal madde maliyeti atıksu ve çamur miktarına göre değişmektedir. Çamur uzaklaştırma maliyeti atıksu arıtma faaliyetleri sonucunda oluşan arıtma çamurlarının miktarına, çamur karakteristiğine ve çamur bertaraf yöntemine göre değişiklik göstermektedir.

Bu çalışmada, Türkiye'de ve dünyada AAT'lerin maliyet analizi ile ilgili çalışmalar derlenmiştir. Farklı çalışmalarda AAT'ler için önerilen (ilk) yatırım ve işletme maliyeti fonksiyonları ortaya konmuştur. Bu kapsamda, atıksu ön arıtma ve derin deniz deşarj sistemlerinin maliyetleri ile ileri biyolojik arıtma tesislerinin (İBAAT) maliyetleri detaylı olarak incelenmiştir. Bu çalışma ile mevcut AAT'lerin yatırım ve işletme maliyetlerinden hareketle tasarımı planlanan benzer tesislerin yatırım ve işletme maliyetlerinin iyi bir yaklaşımla tahmini mümkün hale gelmektedir.

2. Atıksu Arıtma Tesislerinin Maliyet Analizi

2.1 Derin Deniz Deşarj Sistemleri

Derin deniz deşarjı, belirli düzeyde ön arıtmadan geçirilmiş atıksuların alıcı ortam su kalitesini bozmayacak şekilde sahilden belirli bir uzaklıkta (genellikle >20 m derinlikten) deniz dibine boru ve difüzörlerle deşarj edilmesi işlemidir. Deşarjın yapılacağı alıcı ortamın özelliğine (hassas, az hassas, hassas olmayan) bağlı olarak ön arıtmanın seviyesi belirlenir. Alıcı ortam su kalite standardı ön arıtmanın derecesine bağlı olarak, deşarj derinliği veya deşarj hattı difüzör boyu gibi unsurlar değiştirilerek sağlanabilir. Atıksuyun yeterince derin ve akıntılı bir bölgeye deşarj edilmesi durumunda seyrelme dolayısıyla karbonlu organik madde (KOİ, BOİ₅) önemli bir parametre olmaktan çıkar, fakat sıç ve akıntının yetersiz olduğu bir bölgeye deşarj edilmesi durumunda atıksudaki organik madde ve besi maddesi (N, P) konsantrasyonları önemli hale gelir. Atıksuyun deşarj noktasından sahildeki koruma (yüzme) bölgesine taşınma süresi, bakterilerin yok olması açısından önem arz etmektedir. Deşarj hattı uzunluğu ile taşınma süresi doğru orantılıdır. Deşarj hattı uzunluğu, atıksu içerisindeki mikroorganizmaların yok

olması için gerekli taşınma süresini mümkün kılacak şekilde hesaplanmalıdır. Deşarj hattı uzunluğunun yetersiz olduğu durumlarda deşarj öncesi tercihen UV veya ozon ile dezenfeksiyon uygulanması sahil suyu kalite standartlarının sağlanması gerekebilir (Öztürk, 2011).

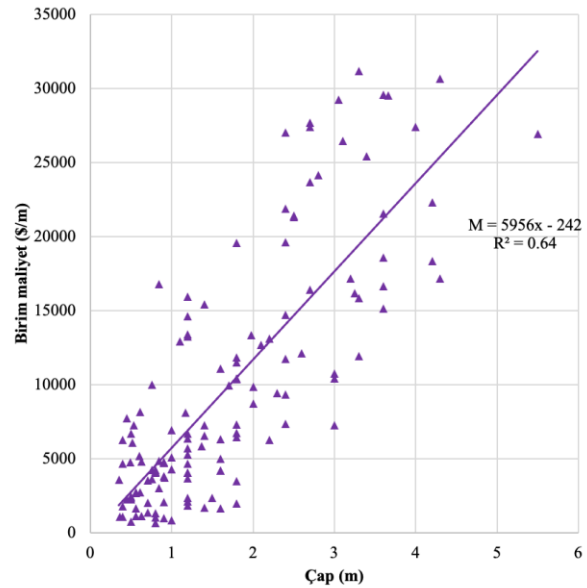
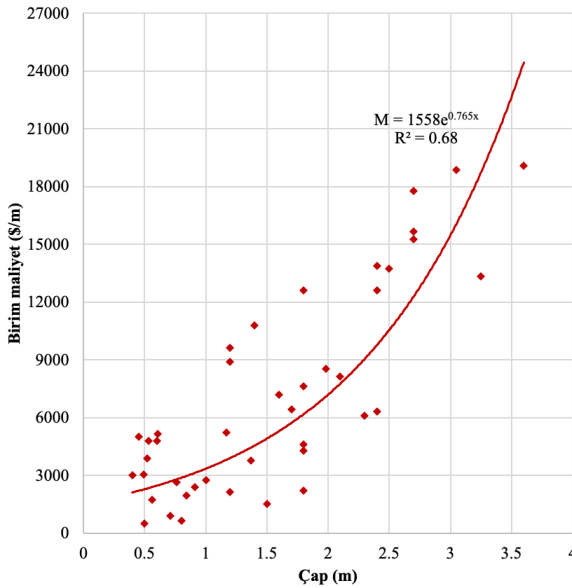
Şahinoğlu ve Öztürk (1991) tarafından yapılan bir çalışmada; İstanbul'da bulunan Yenikapı, Ahırkapı, Üsküdar, Baltalimanı ve Kadıköy Derin Deniz Deşarj Sistemleri'ne ait ihale öncesi beton kaplı çelik boru hattı (BKÇ) maliyetleri ile çeşitli boru cinsleri (cam takviyeli plastik (CTP), yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), beton kaplı çelik (BKÇ)), 1300 m'lik tipik boru hattı uzunluğu zemin yapısı ve boruların deniz tabanına döşeme şekline göre incelenmiştir. Anılan çalışma kapsamında incelenen tesislere ait maliyetler, Gunnerson (1988) tarafından verilen 27 deniz deşarj sistemine ait maliyet verileriyle birlikte değerlendirilmiştir. Roberts ve diğ. (2010) tarafından 145 derin deniz deşarj sistemine ait verinin toplandığı diğer bir çalışmada, derin deniz deşarj sistemlerinin metre başına birim inşaat maliyeti boru çapının bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. Anılan çalışma kapsamında; Türkiye, Amerika Birleşik Devletleri ve Şili gibi birçok ülkeye ait derin deniz deşarj sistemlerine ait maliyet verileri incelenmiştir. Gunnerson (1988) ve Roberts ve diğ. (2010)'nin çalışmalarında derin deniz deşarj sistemlerine ait veriler adapte edilerek birim boy maliyetleri için grafikler çıkarılmış ve Şekil 1'de verilmiştir. Bahse konu derin deniz deşarj sistemlerine ait yatırım maliyet fonksiyonları Tablo 1'de topluca verilmiştir.

Tablo 1. Derin deniz deşarj sistemleri için yatırım maliyet fonksiyonları

Yatırım maliyeti	Açıklama	Kaynak
$M = 120 \times Q^{0,38}$	CTP boru, kumlu zemin, tam gömülü, L=1300 m	
$M = 487 \times e^{1,17 D}$, $R^2 = 0,988$	CTP boru, kumlu zemin, tam gömülü, L=1300 m	
$M = 344 \times e^{1,46 D}$, $R^2 = 0,988$	CTP boru, kumlu zemin, %30 gömülü, $D \leq 2m$	
$M = 91 \times Q^{0,42}$	YYPE boru, kumlu zemin, tam gömülü, $D \leq 1400m$	Şahinoğlu ve Öztürk (1991)
$M = 101 \times Q^{0,41}$	YYPE boru, %30'u kaya zemin, tam gömülü, $Q(L/s)$, $D \leq 1400m$	
$My = 9949 \times Q^{0,47}$	CTP boru, tamamen gömülü halde, $Q(L/s)$	Roberts ve diğ. (2010)
$My = 36 \times Q^{1,12}$, $R^2 = 0,984$	BKÇ boru, tamamen gömülü halde, $Q(L/s)$	
$C = 6140 \times D$		
$M = 1558e^{0,765x}$, $R^2 = 0,68$	Gunnerson (1988) adapte edilmiş birim boy maliyetleri	Bu çalışma
$M = 5956x - 242$, $R^2 = 0,64$	Roberts ve diğ. (2010) adapte edilmiş birim boy maliyetleri*	Bu çalışma

M = Birim boy maliyeti (\$/m)
 My =Yıllık yatırım maliyeti (\$/yıl)
 D = Boru çapı (m)
 Q = Debi (L/s)
 C =Maliyet (\$/m)
 D =Boru çapı (m)

*Tünel inşaatı için belirtilen veriler çıkarılarak adapte edilmiştir.



Şekil 1. Derin deniz deşarj sistemleri için adapte edilmiş birim boy maliyetleri: (a) Gunnerson (1988)'dan uyarlanmış birim boy maliyetleri; (b) Roberts ve diğ. (2010)'den uyarlanmış birim boy maliyetleri

2.2 Mekanik (Ön) Arıtma Tesisleri

Evsel atıksulardaki kâğıt, plastik ve metal gibi iri katı maddeler ile cam kum ve yağ-gres gibi maddeler arıtma tesislerinde mekanik ekipmanların bozulmasına ve işletme aşamasında büyük sorunlara neden olmaktadır. Ön arıtma ile atıksuda bulunan bu tür maddelerin giderilmesi amaçlanmaktadır. Atıksu ön (mekanik) arıtma sistemleri en basit haliyle terfi merkezi,

izgara ve elek yapıları ile kum/yağ tutucu birimlerinden oluşur (Öztürk, 2011). Izgaralar, AAT'lerdeki ilk üniteler olup kâğıt, plastik ve metal gibi katı maddelerin tutunmasını sağlayarak arıtma tesisinde mevcut mekanik ekipmanların zarar görmesini ve boru hatlarının tıkanmasını engeller. Izgaralar çubuk aralıklarına göre kaba ve ince izgara olmak üzere sınıflandırılır. Kaba izgaralar atıksudaki iri katıların tutulması amacıyla ilk ünite olarak genellikle terfi merkezi önünde kullanılır. Kaba izgaralar

elle temizlemeli veya mekanik temizlemeli olabilirler ve tipik çubuk aralıkları 25-50 mm'dir. İnce ızgaralar, kaba ızgaralardan sonra kum tutuculardan önce konumlandırılırlar. Bu tip ızgaralar mekanik temizleme mekanizmalarına sahip olup, tipik çubuk aralıkları 15-25 mm'dir (Öztürk ve diğ., 2017). Döner ince elekler, elek gözenek açıklığı 0,2-2 mm, tambur çapı 0,6-3,0 m aralığında değişen, ince ızgaradan sonra kum tutucu girişi veya çıkışında konumlandırılabilen ekipmanlardır. Döner ince elek sistemi eklendiğinde mekanik (ön) arıtma sistemi verimi partiküler KOİ'de %50, toplam KOİ'de ise yaklaşık %30'lara yükseltilebilmektedir (Libhaber, 2007). Kum tutucular, atıksulara bulunan ve yoğunluğu atıksudan daha fazla olan inert maddeler (kum, taş, cam, cüruf vb.) ile yağ-gres giderimi amacıyla genellikle ızgaralardan sonra kullanılırlar. Birçok farklı türde kum tutucu mevcut olup, yaygın olarak kullanılan türleri yatay akışlı kum tutucular, havalandırılmalı kum tutucular ve vorteks akımlı kum tutuculardır (Öztürk, 2017). Terfi merkezinde, pompalar ve atıksu terfisi için gerekli mekanik ekipmanlar yer almaktadır. Ön arıtma sistemi maliyetleri; terfi merkezi, ızgara yapıları, kum tutucu, beğçi kulübesi, atölye ve işletme, saha düzenlemesi ve altyapı sistemlerinin maliyetlerini içermektedir (Öztürk, 2011). Ön (mekanik) arıtma sistemlerinin maliyeti; atıksu debisi, kullanılan teknoloji türü ve yardımcı ekipman ihtiyacına bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu çalışmada ön arıtma sistemi maliyetleri; ilk yatırım ve işletme ve bakım maliyetleri olarak iki ana başlık altında incelenecektir.

İstanbul'da bulunan 8 adet tam ölçekli büyük kapasiteli ön arıtma tesisine ait ilk yatırım maliyetlerinin incelendiği bir çalışmada, ilk yatırım maliyeti inşaat ve ekipman maliyetleri olmak üzere iki alt kategori altında incelenmiş ve ilk yatırım maliyetinin %29'unu inşaat maliyetinin %71'ini ise ekipman maliyetinin oluşturduğu belirlenmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). Aynı çalışma kapsamında elde edilen bulgulara göre debiye bağlı ortalama birim ilk yatırım maliyeti $0,013 \pm 0,004$ €/m³ olarak tespit edilmiştir. Anılan çalışmada, ön arıtma tesislerine ait işletme ve bakım maliyetlerine ait maliyet bileşenlerinin yüzdeleri dağılımı da incelenmiştir. Bu tesislerde, enerji maliyetinin %44'lük bir oran ile en yüksek maliyet bileşenini oluşturduğu, bakım ve onarım ile personel maliyetlerinin ise sırasıyla %25 ve %24'lük paylar ile enerji maliyetini takip ettiği görülmüştür. Diğer maliyetlerin payı ise %7 olarak tespit edilmiştir. Ön arıtma tesisleri için debiye bağlı ortalama birim işletme ve bakım maliyeti $0,011 \pm 0,007$ €/m³ olarak rapor edilmiştir. Ön arıtma tesislerinde toplam birim maliyet ise $0,024 \pm 0,009$ €/m³ olarak belirlenmiştir, toplam maliyetin %58'inin ilk yatırım maliyeti, %42'sinin ise işletme ve bakım maliyetinin oluşturduğu ortaya konmuştur (Ozgun ve diğ., 2021).

Maliyet fonksiyonları gelecekte inşa edilmesi planlanan arıtma tesisleri için maliyet tahmini yapılmaya aşamasında oldukça fayda sağlamaktadır. Ön arıtma tesisleri için ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetlerinin detaylı olarak irdelendiği çalışmada; iki temel maliyet bileşeni için debiye bağlı maliyet fonksiyonları çıkarılmış, sonuç olarak yatırım ile işletme ve bakım maliyetlerini 2018 yılı bazında ABD doları cinsinden ifade eden maliyet fonksiyonları elde edilmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). Türkiye'deki ön arıtma sistemlerinin detaylı maliyet analizlerinin yapıldığı Şahinoğlu ve Öztürk (1991) tarafından gerçekleştirilen bir diğer çalışmada ön arıtma sistemleri ızgara, kum tutucu ve terfi merkezinden oluşan modüler bir sistem olarak ele alınmıştır. Anılan çalışmada; ön arıtma sistemleri için İSKİ'nin 1990 yılı birim fiyatları kullanılarak toplam yatırım maliyetleri elde edilmiş, tesis ömrü 30 yıl, faiz ve amortisman oranı %10 alınarak yıllık maliyetlere dönüştürülmüştür. Pompaların tükettiği enerji miktarı ve elektrik enerjisi bedeli dikkate alınarak yaklaşık enerji maliyetleri hesaplanmıştır. Yıllık işletme ve bakım giderlerinin

hesaplanmasında yeterli veri bulunmamasından dolayı, yıllık işletme ve bakım maliyeti enerji maliyetinin ortalama 1,35 katı alınarak hesaplanmıştır. Ön arıtma sistemlerinde yaygın olarak kullanılan döner ince tambur elek, mikron derecesinde ince gözeneklere sahiptir ve eleğin dönme hareketi vasıtasıyla içerisindeki sıvıyı yüksek kapasitede ayırma imkânı sağlar. Bu tip elekler için, gözenek açıklıkları 0,2 ile 2 mm (maksimum 6 mm) arasında, döner tambur çapı ise 600 ile 3000 mm arasında değişkenlik göstermektedir. Döner ince tambur elekler için literatürde debiye bağlı birim yatırım maliyet $0,03$ \$/m³, kişi başı yatırım maliyeti ise 5-20 \$/EN olarak verilmiştir (Roberts ve diğ., 2010). Söz konusu çalışmalar kapsamında elde edilen ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetleri için maliyet fonksiyonları Tablo 2'de verilmektedir.

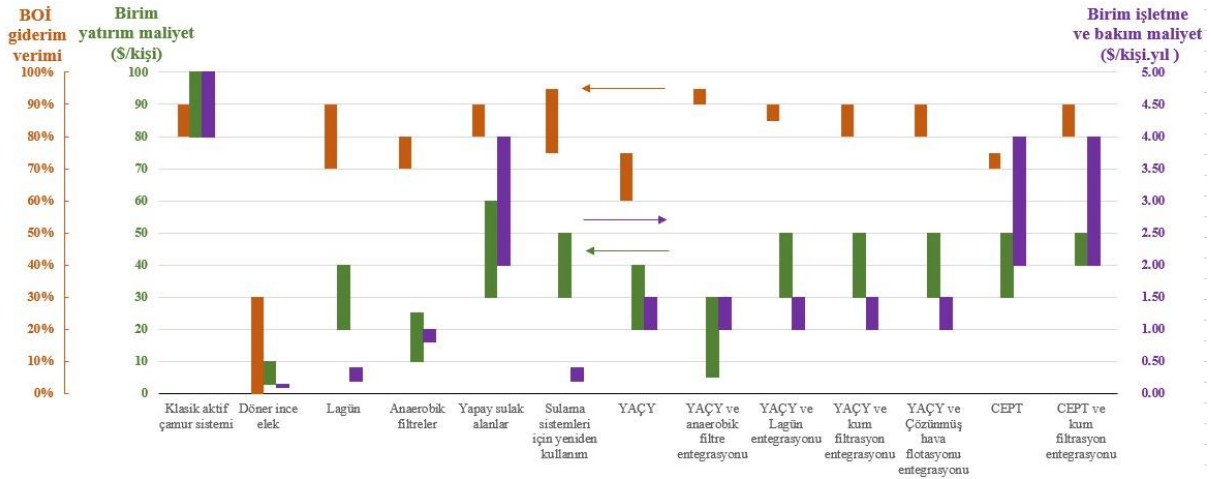
Tablo 2. Mekanik (ön) arıtma tesisleri için belirlenmiş yatırım ile işletme ve bakım maliyet fonksiyonları

Arıtma türü	Maliyet fonksiyonu	Kaynak
Mekanik (ön) arıtma	Yıllık yatırım maliyeti $=640 \times Q^{0,84}$, $R^2=0,996$	Şahinoğlu ve Öztürk (1991)
Mekanik (ön) arıtma	Yatırım maliyeti $=0,53 \times Q^{1,08}$, $R^2=0,93$	Ozgun ve diğ. (2021)
Mekanik (ön) arıtma	Yıllık işletme ve bakım maliyeti $=344 \times Q^{0,89}$, $R^2=0,977$	Şahinoğlu ve Öztürk (1991)
Mekanik (ön) arıtma	Yıllık işletme ve bakım maliyeti $=1,14 \times Q^{1,07}$, $R^2=0,83$	Ozgun ve diğ. (2021)

2.2 Basit (Sürdürülebilir) Arıtma Sistemleri

Gelişmekte olan ülkelerde su sektöründeki yatırım öncelikleri, su temini, atıksu toplama ve sonrasında atıksu arıtma şeklinde sıralanabilir. Su sektöründeki kumsal sorunlar ve finansal kısıtlar, çoğu gelişmekte olan ülkede arıtma tesisine bağlı nüfus oranının genellikle <%10 düzeyinde kalmasına yol açmaktadır. Dünya nüfus artışı ile ilgili tahminlere göre; (i) dünya nüfusu 2050'de 9 milyara ulaşacaktır, (ii) nüfus artışının tamamı yakını gelişmekte olan ülkelerde vuku bulacaktır, (iii) kırsal kesimden kentlere göç giderek hızlanacaktır. Kırsaldan kentlere göç; kentsel su ihtiyacı ile kentsel atıksu oluşumunun artmasına ve artan nüfusun ihtiyacını karşılamak için daha fazla tarım arazisi ve sulama suyuna ihtiyaç duyulmasına yol açacaktır (Libhaber, 2007).

Gelişmekte olan ülkelerdeki büyük nüfus artışı, kanalizasyona ve arıtmaya bağlı nüfus oranı üzerinde ilave olumsuz baskıya yol açacaktır. Bu yüzden gelişmekte olan ülkelerde, sanayileşmiş zengin ülkelerden daha farklı (uygun ya da sürdürülebilir) atıksu yönetim (toplama ve arıtma) stratejilerine ihtiyaç vardır (Libhaber ve Orozco-Jaramillo, 2012). Libhaber (2007) söz konusu sürdürülebilir atıksu arıtma teknolojilerini; küçük şehirler (<20.000 kişi), orta büyüklükte şehirler (20.000-300.000 kişi) ve büyükşehirler (>300.000 kişi) olmak üzere nüfusa bağlı olarak üç kategoriye ayırarak, sürdürülebilir atıksu arıtma teknolojilerini yatırım ile işletme ve bakım maliyetleri; biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) giderim verimleri, klasik aktif çamur sistemiyle kıyaslanarak değerlendirmiştir. Sürdürülebilir atıksu arıtma sistemlerinin yatırım ile işletme ve bakım maliyetleri; biyokimyasal oksijen ihtiyacı (BOİ) giderim verimleri ile birlikte Şekil 2'de verilmiştir (Libhaber, 2007). Sürdürülebilir atıksu arıtma sistemlerinin yatırım maliyeti klasik aktif çamur sisteminin genellikle %50'sinden daha azdır. İşletme ve bakım maliyeti de çoğu durumda klasik aktif çamur sisteminin ancak %3-30'u mertebesindedir.



Şekil 2. Sürdürülebilir atıksu arıtma teknolojilerinin giderim verimleri ile maliyetleri (Libhaber, 2007)

2.4 İleri Biyolojik Arıtma Tesisleri

Atıksu arıtımında oldukça yaygın kullanılan biyolojik prosesler birçok mikroorganizma grubunun faaliyetleri sonucu gerçekleşmekte olup, oldukça karmaşık süreçler içermektedir. İleri biyolojik atıksu arıtma tesisleri (İBAAT) prensip olarak karbon, azot ve fosfor giderimi sağlayan bir prosese sahiptir. Bu prosesler arasında A2O, Bardenpho ve UCT yer almaktadır. Bu prosesler, azot ve fosfor giderimi için aerobik, anaerobik ve anoksik bölümlerin bileşiminden oluşmuş aktif çamur prosesi formundadır (Öztürk, 2017). Bu proseslerin verimliliğini etkileyen faktörler; çevresel, yapısal, işletme ve bakımla ilgili faktörler olarak sınıflandırılabilir. Çevresel faktörler; atıksu özellikleri, sistemin çözünmüş oksijen konsantrasyonu, sıcaklık ve pH'dır. Yapısal faktörler ise; reaktör hacmi, çökeltim tanklarının boyutları, tesis içi pompalama kapasiteleri, tesis hidrolik tasarımıdır. Ekipman bakım, kalite kontrol laboratuvarlarının iyi işletimi, standart metotlara uygun numune alımı ve tesis operatörlerinin eğitimi ise işletme ve bakım ile ilgili faktörlerdir (Koyuncu ve diğ., 2016).

İBAAT'lerdeki ilk yatırım maliyetlerinin büyük bir kısmını inşaat maliyeti oluşturmaktadır. Avusturya'da tipik bir AAT'de inşaat maliyetleri, arıtma tesisinin toplam yatırım maliyetinin %60-70'ini oluşturmaktadır (Zessner ve diğ., 2010). Türkiye'deki 8 adet İBAAT'nin ilk yatırım maliyetlerinin incelendiği bir çalışmada; ortalama birim ilk yatırım maliyeti $0,054 \pm 0,009 \text{ €/m}^3$ olarak tespit edilmiş olup, inşaat ve ekipman maliyetlerinin ilk yatırım maliyeti içerisindeki oranları sırasıyla %59 ve %41 olarak belirlenmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). İlk yatırım maliyeti içerisinde inşaat, elektromekanik, elektrik ve kontrol/otomasyon sistemlerinin dağılımı, tesisin hizmet ettiği nüfus ve debiye bağlı olarak değişmektedir. İsrail'de yapılan bir çalışmada (Friedler ve Pisanty, 2006); inşaat, elektromekanik, elektrik ve kontrol/otomasyon sistemlerinin ilk yatırım maliyeti içerisindeki değişimi debiye bağlı olarak modellenmiş olup, debi arttıkça inşaat maliyeti oranının azaldığı, elektromekanik maliyet oranının ise arttığı belirlenmiştir.

İşletme ve bakım maliyetleri arasında en yüksek paya sahip maliyet bileşeni enerji maliyetidir. Türkiye'deki 8 İBAAT'nin incelendiği bir çalışmada bu değerlerin ortalama %39 civarında olduğu tespit edilmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). AAT'lerde kullanılan enerjinin %60'ından fazlası havalandırma ekipmanları tarafından tüketilir. Aerobik çamur çürütme olması durumunda

bu oran >%70'lere ulaşabilir. Anaerobik çamur çürütmeli ve çürütmesiz merkezi kentsel AAT'lerdeki medyan enerji kullanımları sırasıyla 22 ve 29 kWh/EN.KOİ110 olarak verilmektedir (Öztürk, 2011). İşletme ve bakım maliyetleri arasında önemli bir paya sahip olan bir diğer maliyet bileşeni ise personel maliyetidir. Tesiste bulunan personel etkinliğinin, tesis performansı üzerinde büyük bir etkisi vardır ve personel maliyeti ülkeden ülkeye değişmektedir. Personel maliyetinin işletme ve bakım maliyeti içerisindeki payı İspanya ve Fransa gibi sanayileşmiş ülkelerde sırasıyla %28 ve %24 iken, gelişmekte olan ülkelerde bu değer %52 ile %68 aralığında değişiklik göstermektedir (Abu-Madi ve Al-Sa'ed, 2005). Bu fark büyük oranda, tesisteki otomasyon seviyesi ile ilgilidir. Otomasyon seviyesi arttıkça mekanik ekipman ihtiyacı da artmakta ve enerji maliyetinin işletme ve bakım maliyeti içerisindeki payı yükselmektedir. Avusturya'daki bir İBAAT için yapılan çalışmada enerji maliyetinin işletme ve bakım maliyeti içerisindeki payı %34 olup (Haslinger ve diğ., 2016), Türkiye'deki 8 adet İBAAT incelendiği bir çalışmada ise bu değer ortalama %31 bulunmuştur (Ozgun ve diğ., 2021). Kimyasal madde maliyeti, arıtma tesisinde kullanılan polimerler, alum, kireç ve klor gibi kimyasal madde giderlerini içerir. Kimyasal madde giderlerinin toplam işletme maliyeti içerisindeki payı genellikle %5 ile %8 aralığında değişmektedir (Öztürk, 2011). Türkiye'deki küçük (>100.000 m³/gün), orta (100.000-400.000 m³/gün) ve büyük (>400.000 m³/gün) kapasiteli toplam 8 adet İBAAT'nin incelendiği çalışmada ortalama birim işletme ve bakım maliyetleri sırasıyla $0,090 \pm 0,026 \text{ €/m}^3$, $0,075 \pm 0,005 \text{ €/m}^3$ ve $0,047 \text{ €/m}^3$ olarak belirlenmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). Bu bulgu doğrultusunda, İBAAT'lerdeki işletme ve bakım maliyetlerinin büyük ölçüde tesis kapasitesine bağlı olarak değiştiği söylenebilir.

2014 yılında İspanya'da 22 adet İBAAT için ortalama birim işletme ve bakım maliyeti $0,272 \text{ €/m}^3$ olarak rapor edilmiştir (Gallego-Valero ve diğ., 2018). İspanya'da 2017 yılı değerleriyle yapılan bir diğer çalışmada İBAAT için birim işletme ve bakım maliyetinin $0,14 \text{ €/m}^3$ ile $0,27 \text{ €/m}^3$ arasında değiştiği belirtilmiştir (Moral Pajares ve diğ., 2019). Türkiye'deki 8 adet İBAAT'nin incelendiği çalışmada ise artılan m³ atıksu başına ortalama birim işletme ve bakım maliyeti $0,077 \pm 0,021 \text{ €/m}^3$ olarak bulunmuştur (Ozgun ve diğ., 2021). Türkiye ve dünyada İBAAT'lerin ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetleri için elde edilen maliyet fonksiyonları Tablo 3'te sunulmuştur. Nas ve Turgut (2019) tarafından yapılan bir çalışmada; Türkiye'deki 71 adet biyolojik fosfor giderimli eş zamanlı

nitrifikasyon/denitrifikasyon prosesine (Bio-P+SNDP) sahip ve 16 adet 5 kademeli Bardenpho prosesine sahip İBAAT'ının ortalama birim yatırım maliyeti sırasıyla 60 €/kişi ve 27 €/kişi olarak tespit edilmiştir. Aynı çalışmada, yatırım maliyeti açısından, eşdeğer nüfusu 205.000 kişiden büyük İBAAT'lerde Bio-P+SNDP prosesinin, eş değer nüfusu 205.000 kişiden küçük İBAAT'lerinde ise 5 kademeli Bardenpho prosesinin daha avantajlı olduğu belirtilmiştir.

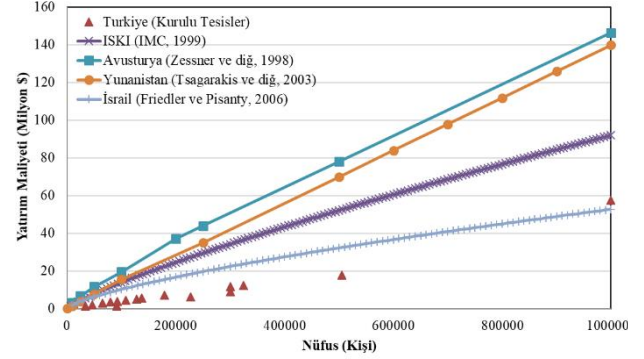
Tablo 3. İBAAT'ler için yatırım ile işletme ve bakım maliyet fonksiyonları.

Aritma türü	Proses	Maliyet fonksiyonu	Kaynak
İleri biyolojik arıtma	A ² O	Yatırım maliyeti= 741xEN ^{0,8313}	Öztürk ve diğ. (2011)
İleri biyolojik arıtma	A ² O+ Aerobik çamur stabilizasyonu	Yatırım maliyeti= 630xEN ^{0,8313}	Öztürk ve diğ. (2011)
İleri biyolojik arıtma	A ² O	Yatırım maliyeti =0,116xEN ^{0,95} , R ² =0,94	UNEP (2015)
İleri biyolojik arıtma	Bio-P+SNDP	Yatırım maliyeti=47,69xEN +976.109,24 , R ² =0,76	Nas ve Turgut (2019)
İleri biyolojik arıtma	5 Kademeli Bardenpho	Yatırım maliyeti=31,14xEN +4.343.367,96 , R ² =0,76	Nas ve Turgut (2019)
İleri biyolojik arıtma	A ² O+ Anaerobik çürütücü	Yatırım maliyeti =9701*Q ^{0,76} , R ² = 0,98	Ozgun ve diğ. (2021)
İleri biyolojik arıtma	A ² O	Yatırım maliyeti =2577*Q ^{0,83} , R ² = 0,91	Ozgun ve diğ. (2021)
İleri biyolojik arıtma	A ² O	Yıllık işletme ve bakım maliyeti =0,022xEN ^{0,67} , R ² = 0,840	UNEP (2015)
İleri biyolojik arıtma	A ² O+ Anaerobik çürütücü	Yıllık işletme ve bakım maliyeti =14025*Q ^{0,50} , R ² = 0,86	Ozgun ve diğ. (2021)
İleri biyolojik arıtma	A ² O	Yıllık işletme ve bakım maliyeti =294*Q ^{0,80} , R ² = 0,88	Ozgun ve diğ. (2021)

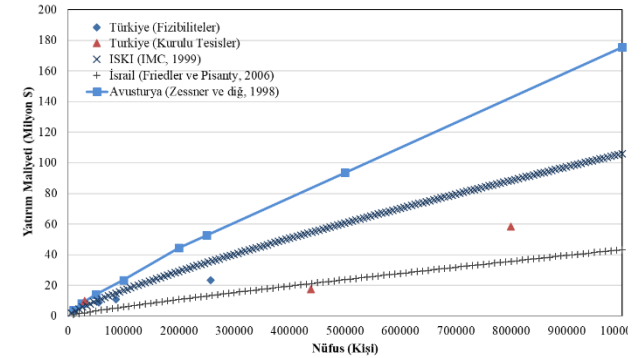
EN: Eşdeğer nüfus (kişi); Q: Atıksu debisi (m³/gün)

Türkiye ve değişik ülkelerdeki atıksu arıtma tesisi ilk yatırım maliyetleri ile karşılaştırma grafiği Şekil 3'te verilmiş olup, Avusturya ve Yunanistan'daki atıksu arıtma tesislerinin yatırım maliyetlerinin Türkiye'deki atıksu arıtma tesislerinin yatırım

maliyetlerine göre daha yüksek olduğu görülmüştür. İsrail ve Türkiye'deki atıksu arıtma tesislerinin maliyetleri ise birbirleri ile paralellik arz etmektedir. Şekil 3(b)'de yer alan Türkiye'deki kurulu İBATT'lerinin kapasiteleri 30.500-800.000 kişi aralığında iken, fizibilite çalışması yapılmış İBATT'lerin kapasiteleri 55.500-1.540.000 kişi aralığında değişmektedir. Türkiye'deki 8 adet İBAAT'nin maliyetlerinin değerlendirildiği çalışmada (Ozgun ve diğ., 2021); toplam maliyetin %42'sini ilk yatırım maliyeti oluştururken, işletme ve bakım maliyetinin oranı %58 olarak belirlenmiştir. Aynı çalışmada ortalama birim toplam maliyet 0,132 €/m³ olarak tespit edilmiştir (Ozgun ve diğ., 2021). Bu değer diğer ülkelerdeki İBAAT'lerin birim toplam maliyeti ile karşılaştırıldığında; Türkiye'deki İBAAT'lerin birim toplam maliyetinin İspanya, Çin, Senegal ve Kuveyt'teki İBAAT'lerin birim toplam maliyetlerine göre daha düşük olduğu görülmüştür (Tablo 4). İspanya'daki 18 adet İBAAT'ye ait ortalama birim toplam maliyet 0,31 €/m³tür (Moral Pajares ve diğ., 2019).



(a)



(b)

Şekil 3. Yatırım maliyetinin nüfusa göre değişimi: (a) klasik aktif çamur sistemi, (b) biyolojik azot ve fosfor giderimli aktif çamur sistemi.

Tablo 4. Farklı ülkelerde gerçekleştirilen çalışmalarda İBAAT'ler için belirlenen birim toplam maliyet değerleri

Aritma türü	Proses	Kapasite (m ³ /gün)	Ülke	Birim toplam maliyet (€/m ³)	Baz yılı	Kaynak
İleri biyolojik arıtma	Aktif çamur prosesi	1.704.784	Kuveyt	109,5 ¹	2004	Alhumoud ve diğ. (2010)
İleri biyolojik arıtma	Aktif çamur prosesi	230.000 ²	Senegal	54,64 ¹	2012	Dodane ve diğ. (2012)
İleri biyolojik arıtma	Cape Town üniversitesi tarafından geliştirilen UCT prosesi	560.000 ³	Çin	0,708 ⁴	2012	Li ve diğ. (2017)
İleri biyolojik arıtma	Uzun havalandırmalı aktif çamur sistemi	<50.000 ²	İspanya	0,31	2027	Moral Pajares ve diğ. (2019)
İleri biyolojik arıtma	A ² O	36.500-600.000	Türkiye	0,132	2018	Ozgun ve diğ. (2021)

¹\$/kişi, ²kişi, ³ton/gün, ⁴yuan/ton

3. Genel Değerlendirme

Atıksuların arıtılması ve deşarj standartlarına uygun hale getirilmesi ülkemizde ve dünyada alıcı ortamların su kalitesinin korunmasında önem arz etmektedir. Çevresel kirliliğin önlenmesinde önemli rol oynayan mevcut AAT'lere ait maliyetlerin analizi gelecekte inşa edilmesi planlanan arıtma tesislerinin maliyet tahminleri açısından büyük fayda sağlamaktadır.

Bu çalışmada, Türkiye ve dünyadaki kurulu AAT ve derin deniz deşarj sistemlerinin maliyet bileşenleri mukayese edilmiştir. Bu kapsamda, literatürdeki çalışmalarda yer alan AAT'lere ait ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyet fonksiyonlarına yer verilmiş olup, deniz deşarjı sistemleri maliyetleri ile atıksu ön arıtma tesisleri, sürdürülebilir atıksu arıtma sistemleri ve İBAAT'lerin maliyetleri de detaylı olarak incelenmiştir. Maliyet fonksiyonları incelendiğinde; derin deniz deşarj sistemlerinin maliyeti deşarj hattı uzunluğu, deşarj borusu çapı, zemin durumu ve boru tipine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Deniz deşarjı sistemlerinin maliyet tahmini için önerilen maliyet fonksiyonlarından faydalanılabilir. Ön arıtma tesislerinde ilk yatırım maliyeti için en önemli maliyet bileşenini ekipman maliyeti oluştururken, işletme ve bakım maliyetinin en önemli maliyet bileşeni enerji maliyetidir. İleri biyolojik arıtma tesislerinde ilk yatırım maliyetleri için en önemli maliyet bileşenini inşaat maliyeti oluştururken, işletme ve bakım maliyetinin en önemli maliyet bileşenini yine enerji maliyeti oluşturmaktadır. Basit sürdürülebilir atıksu arıtma sistemlerinin yerinde ve doğru kullanımı ile özellikle gelişmekte olan ülkeler için klasik enerji ve ekipman yoğun proseslere kıyasla oldukça düşük maliyetli çözümler sunulabilmektedir. Önerilen AAT ve derin deniz deşarj maliyet fonksiyonlarıyla, özellikle Master Plan ve Fizibilite çalışmalarında, $\pm\%20$ hata ile ilk yatırım ve işletme maliyeti tahminleri yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında yapılan literatür incelemesi sonucunda elde edilen maliyet fonksiyonları, atıksu arıtma tesisi inşa etmeyi planlayan yerel yönetimlerce, çevre mühendislerinin denetimiyle planlanan tesislerin ilk yatırım ile işletme ve bakım maliyetlerinin karşılaştırılması olarak değerlendirilmesi amacıyla kullanılabilir.

Makale araştırma ve yayın etiğine uygun olarak hazırlanmıştır. Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

4. Kaynaklar

- Alhumoud, J.M., Al-Humaidi, H., Al-Ghusain, I.N. and A.M. Alhumoud (2010), Cost/Benefit Evaluation of Sulaiybiya Wastewater Treatment Plant in Kuwait. *Journal of International Business & Economics Research*. 9, 23-32. <https://doi.org/10.19030/iber.v9i2.518>.
- Abu-Madi, M., and R. Al-Sa'ed (2005), Comparative Analysis of Wastewater Treatment Costs in Jordan and Tunisia. *Proc. International Conference on "Water: Values and Rights"*, May 2-4, 2005, Ramallah, Palestine.
- Dodane, P.H., Mbequefe, M., Sow, O., and L. Strande, (2012), Capital and Operating Costs of Full-Scale Fecal Sludge Management and Wastewater Treatment Systems in Dakar, Senegal. *Environmental Science and Technology*, 46, 3705-3711. <https://doi.org/10.1021/es2045234>.
- Erşahin, M.E. Dereli, R.K. Özgün, H. Akırza, Z., ve İ. Öztürk (2017), Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliğinin

İncelenmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 21(2): 380-387.

- Friedler, E. and E. Pisanty (2006), Effects of Design Flow and Treatment Level on Construction and Operation Costs of Municipal Wastewater Treatment Plants and Their Implications on Policy Making, *Water Research*, 40, 3751-3758. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.08.015>.
- Gallego-Valero, L., Moral-Pajares, E., Román-Sánchez, I. M., and J.A. Sánchez-Pérez (2018), Analysis of Environmental Taxes to Finance Wastewater Treatment in Spain: An Opportunity for Regeneration? *Water*, 10, 226. <https://doi.org/10.3390/w10020226>.
- Gunnerson, C. G. (1988), *Wastewater Management for Coastal Cities*, World Bank Technical Report No:77.
- Haslinger, J., Lindtner, S., and J. Krampe (2016), Operating Costs and Energy Demand of Wastewater Treatment Plants in Austria: Benchmarking Results of the Last 10 Years. *Water Science Technology*. 74, 2620-2626. <https://doi.org/10.2166/wst.2016.390>.
- İMC (1999), İSKİ Su Temini, Atıksu Toplama ve Arıtma, Yeraltısuyu Toplama ve Dere Islahları Master Planı. İstanbul Master Plan Konsorsiyumu, İstanbul.
- Koyuncu, İ., Öztürk, İ., Köse Mutlu, B. ve O. Yıldız (2016), *Atıksu Arıtma Tesisleri İşletimi El Kitabı* (2. Baskı), Türkiye Belediyeler Birliği, Ankara, Türkiye.
- Li, W.W., Yu, H.Q. and B.E. Rittmann (2015), Chemistry: Reuse water pollutants. *Nature*, 528, 29-31.
- Li, W., Li, L., and G. Qiu (2017), Energy Consumption and Economic Cost of Typical Wastewater Treatment Systems in Shenzhen, China. *Journal of Cleaner Production* 163, S374-S378. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.12.109>.
- Libhaber, M. (2007), *Appropriate Technology for Wastewater Treatment and Reuse in Developing Countries*, Paper presented in the Conference "Water Supply and Sanitation for All" Huber Technology, Berching, Germany, September 27-28, 2007.
- Libhaber, M., and A. Orozco-Jaramillo (2012), Sustainable Treatment and Reuse of Municipal Wastewater: For decision makers and practising engineers. IWA publishing, London, UK.
- Moral Pajares, E., Gallego Valero, L., and I.M. Román Sánchez (2019), Cost of urban wastewater treatment and ecotaxes: Evidence from municipalities in Southern Europe, *Water*, 11, 423. <https://doi.org/10.3390/w11030423>.
- Nas, B., Turgut, S., (2019), İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesislerinin İlk Yatırım Maliyetlerinin Değerlendirilmesi, *Su ve Çevre Teknolojileri Dergisi*, Sayı 132.
- Olsson, G. (2012), *Water and Energy Threats and Opportunities*. IWA Publishing, Londra, İngiltere.
- Ozgun, H., Cicekalan, B., Akdag, Y., Koyuncu, I. and I. Ozturk (2021), Comparative Evaluation of Cost for Preliminary and

- Tertiary Municipal Wastewater Treatment Plants in Istanbul. *Science of the Total Environment*, 778 (2021), 146258, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146258>.
- Öztürk, İ. (2011), *Deniz Deşarjı Tesisleri Tasarımı*, Su Vakfı Yayınları, İstanbul, Türkiye.
- Öztürk, İ. (2017), *Atıksu Mühendisliği*, İSKİ Teknik Kitaplar Serisi, ISBN: 0000511-3, İstanbul, Türkiye.
- Roberts, P. J. W., Salas, H. J., Reiff, F. M., Libhaber, M., Labbe, A., and J.C. Thomson (2010), *Marine Wastewater Outfalls and Treatment Systems*. SBN13: 9781843391890.
- Şahinoğlu, A. ve İ. Öztürk (1991), *Atıksu Ön Arıtma ve Deniz Deşarjı Tesislerinin Maliyeti Üzerine Bir Araştırma*, Türk İnş.Müh. XI. Teknik Kongresi, 8-11 Ekim, İstanbul.
- Tsagarakis, K.P., Mara, D.D. and A.N. Angelakis (2003), *Application of Cost Criteria for Selection of Municipal Wastewater Treatment Systems*. *Water, Air, and Soil Pollution* 142, 187–210. <https://doi.org/10.1023/A%3A1022032232487>.
- UNEP (2015), *Economic Valuation of Wastewater - The Cost of Action and The Cost of No Action*, United Nations Environment Programme, ISBN: 978-92-807-3474-4
- Zessner, M., Lampert, C., Kroiss, H. and S. Lindtner (2010), *Cost Comparison of Wastewater Treatment in Danubian Countries*. *Water Science and Technology* 62, 223-230. <https://doi.org/10.2166/wst.2010.271>.