



Atıksu Arıtma Tesislerinde Sürdürülebilir Enerji Üretimi için Mikro Hidroelektrik Teknolojisi Kullanımı: İstanbul Örneği^[*]

Zafer KAYIKÇI, Ceyhun AKARSU* V. Zülal SÖNMEZ Nüket SİVRİ
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34315, İstanbul, Türkiye

Geliş Tarihi: 25.01.2023

Kabul Tarihi: 08.05.2023

Basım Tarihi: 30.06.2023

Atıf yapmak için: Kayıkçı, Z., Akarsu C., Sönmez, V.Z. & Sivri N. (2023). Atıksu Arıtma Tesislerinde Sürdürülebilir Enerji Üretimi için Mikro Hidroelektrik Teknolojisi Kullanımı: İstanbul Örneği. *Anadolu Çev. ve Hay. Dergisi*, 8(2), 162-168. <https://doi.org/10.35229/jaes.1241476>

How to cite: Kayıkçı, Z., Akarsu C., Sönmez, V.Z. & Sivri N. (2023). Micro-hydropower technology for sustainable energy generation in wastewater treatment plants: A case study from Istanbul. *J. Anatolian Env. and Anim. Sciences*, 8(2), 162-168. <https://doi.org/10.35229/jaes.1241476>

*ID: <https://orcid.org/0000-0002-0168-9941>
ID: <https://orcid.org/0000-0003-4160-2975>
ID: <https://orcid.org/0000-0002-7488-2996>
ID: <https://orcid.org/0000-0002-4269-5950>

***Sorumlu yazarın:**

Ceyhun AKARSU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Çevre Mühendisliği Bölümü, 34315, İstanbul, Türkiye
✉: ceyhunakarsu@iuc.edu.tr

Öz: Artan nüfus ve teknolojik gelişmeler, her geçen gün enerji kaynaklarına duyulan yoğun ihtiyaca sürdürülebilir çözümlerle yanıt bulma gerekliliğini ortaya koymaktadır. Sürdürülebilirliğin sağlanması adına bilim temelli, doğa dostu, temiz enerji kaynaklarına hızlı ulaşım, en etkili çözümdür. Bu senaryoda da ele alınan, elektrik üretimi için mevcut doğal kaynakların en verimli kullanım potansiyelinin değerlendirilmesidir. Mikro hidroelektrik santraller hem yüksek verim hem de sürdürülebilir özelliklerinden dolayı oldukça umut verici bir seçenek olarak görülmektedir. Bu çalışmada, İstanbul'da bulunan 3 farklı atıksu arıtma tesisinde birbirini takip eden ünitelerin, çıkış ve giriş noktaları arasındaki düşü yüksekliğine bağlı olarak mikro hidroelektrik santral ile enerji kazanım potansiyelleri araştırılmıştır. Sonuçlar potansiyel türbin güçlerinin sırasıyla 93,34 kw/saat, 90,21 kw/saat ve 36,85 kw/saat olduğunu göstermektedir. Uygun uygulama noktalarına kurulabilecek türbin sistemlerinin ilk yatırım maliyeti ile sağlayacağı işletme tasarrufu üzerinden hesaplanan amortisman süreleri sırasıyla 0,5 yıl, 0,5 yıl ve 0,9 yıl olduğu tespit edilmiştir. Küresel enerji talebi ve iklim değişikliğinin hız kazandığı günümüz şartlarında elde edilen bu veriler, mikro hidroelektrik santrallerin alternatif bir çözüm sunduğunu göstermektedir

Anahtar kelimeler: Atıksu arıtma tesisi, enerji verimliliği, mikro hidroelektrik santrali, türbin, yenilenebilir enerji.

Micro-hydropower technology for sustainable energy generation in wastewater treatment plants: A case study from Istanbul^[*]

***Corresponding author:**

Ceyhun AKARSU
Istanbul University-Cerrahpaşa, Department of Environmental Engineering, 34315, Istanbul, Türkiye
✉: ceyhunakarsu@iuc.edu.tr

Abstract: Increasing population and technological developments reveal the necessity of finding sustainable solutions for the intense need for energy resources. Rapid access to science-based, nature-friendly, clean energy sources is the most effective solution for sustainability. Also addressed in this scenario is the evaluation of the most efficient use potential of existing natural resources for electricity generation. Micro-hydropower plants are considered a promising option due to their high efficiency and sustainable characteristics. This study proposes and investigates a method to quantify the hydropower potential based on the surplus energy in three different wastewater treatment plants in Istanbul. Accordingly, the potential turbine outputs for each WWTP were found to be 93.34 kW/hr, 90.21 kW/hr and 36.85 kW/hr, respectively. It was found that the payback periods of the turbine systems that can be installed at the application points are 0.5 years, 0.5 years, and 0.9 years, respectively. Under today's conditions of accelerating global energy demand and climate change, these data show that micro-hydro power plants offer an alternative solution.

Keywords: Energy efficiency, micro hydroelectric technology, renewable energy, turbine, wastewater treatment plant.

[*] Bu makale, Zafer KAYIKÇI'nın yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

This manuscript was produced from Zafer KAYIKÇI's master thesis..

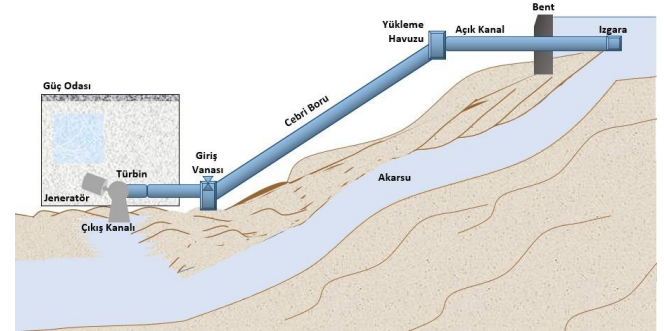
GİRİŞ

Günümüzde kalkınma anlayışı, yerini enerji bolluğu ve tüketimi yerine daha verimli ve ekonomik kaynak kullanımı anlayışına bırakmıştır. Bu yeni bakış açısı “sağlıklı çevre”, “enerji güvenliği” ve “enerji çeşitliliği” politikalarını da beraberinde getirmiştir. Küresel ısınma ve iklim değişikliğinin etkilerinin azaltılması bu yeni politikaların temelini oluşturmaktadır (Güner & Turan, 2017). Yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımının yaygınlaşması ile küresel enerji kullanımından kaynaklanan karbon ayak izi azaltılması planlanmaktadır (Olabi & Abdelkareem, 2022). Bu sayede, küresel sıcaklıktaki ortalama artışın arzu edildiği gibi 2°C'nin altında tutulabilmesi ve iklim değişikliğinin küresel bir felakete dönüşmesinin önüne geçilmesi hedeflenmektedir (Gernaat vd., 2021). Bu doğrultuda, 22 Nisan 2016'da Paris Anlaşması imzalanarak iklim değişikliğinin olumsuz etkilerine karşı uyum ve iklim direncinin artırılması, düşük sera gazı emisyonları ile kalkınmanın sağlanması ve gıda üretiminin zarar görmemesi hedeflerine yönelik bir dizi eylem planları belirlenmiştir (Kuriakose vd., 2022; Birpınar, 2022).

Türkiye, kalkınma hedefleri doğrultusunda iklim değişikliğine neden olan fosil yakıtlara olan bağımlılığını azaltmak için alternatif ve yenilenebilir enerji potansiyelinin belirlenmesine yönelik Ar-Ge çalışmalarını sürdürmektedir (Doğan, 2014). Bu doğrultuda erimiş karbonat yakıt hücreleri, yakıt hazırlama, hidrojen üretimi, güneş enerjisi ısıtma sistemleri, fotovoltaik piller, yakma ve gazlaştırma sistemleri, elektrikli ve hibrit araç teknolojileri, enerji depolama ve yönetim sistemleri, alternatif yakıtlı araçlar gibi birçok sektörde faaliyetlere devam edilmektedir (Ürün ve Soyu, 2016; Yıldız vd., 2020; Birpınar, 2022). Ancak günümüz koşullarında bu sistemler henüz enerji ihtiyacını karşılamaya yetecek kapasiteye ulaşmaktan uzaktır. Dolayısıyla konvansiyonel enerji kaynaklarından hidroelektrik santralin bir versiyonu olan mikro hidroelektrik santraller gelecek vaat eden yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak görülmektedir (Dalcalı vd., 2012; Llácer-Iglesias vd., 2021).

Hidroelektrik sistemlerde elektrik enerjisi, suyun akışı ile dönen türbinler yardımıyla elde edilmektedir. Bir ev veya küçük bir köye elektrik sağlamak amacıyla maksimum 500 kW kurulum gücüne sahip olan hidroelektrik sistemlere ise, mikro hidroelektrik santrali (M-HES) denilmektedir (Chae vd., 2015). Elektrik üretimi için yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kullanılması hedeflenen M-HES'lerin en büyük avantajı, büyük barajların ve rezervuarların inşası için herhangi bir gereklilik olmamasıdır. M-HES'ler için şematik çalışma diyagramı Şekil 1'de görülmektedir. M-HES'lerin temel bileşenlerinin baraj, cebri boru, türbin, kuyruk, jeneratör ve yardımcı ekipmandan oluştuğu görülmektedir (Kayıkcı, 2022). Mevcut su kaynaklarının basma yüksekliği

ve akış hızı, M-HES'lerin tasarlanmasından önce dikkat edilmesi gereken iki ana M-HES bileşenidir. Kafa (hidrolik yük), suyun düştüğü dikey mesafedir, akış hızı ise suyun birim zamandaki hacmidir. M-HES'lerden elektrik üretimi, verimli ve iyi kurulmuş ekipman kullanılarak uygun basma yüksekliği ve akış hızlarının kombinasyonuna bağlıdır (Raju & Jain, 2019).



Şekil 1. M-HES'lerde üretimin şematik çalışma diyagramı (Sarip vd. (2016)'dan uyarlanmıştır.)

Figure 1. Operational schematic diagram of production in M-HPPs (Adapted from Sarip et al. (2016))

M-HES aracılığıyla elektrik üretim potansiyelini araştırmak üzere çeşitli araştırmalar yapılmıştır (Nasir, 2014; Comino vd., 2020; Özçiloğlu & Durmuş, 2021). Örneğin, Michael & Jawahar tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada, Kerala eyaleti kırsalında 15 kW'lık bir M-HES tasarımı çalışması gerçekleştirilmiş ve günlük enerji tüketiminin 90,78 kWh ve düşü yüksekliği 80 metre olarak alındığı şartlarda 15 kW'lık M-HES'nin teknik ve ekonomik olarak uygun olduğu ve bölgedeki yaşayan 120 ailesinin elektrik enerji talebini karşılayabileceği sonucuna ulaşılmıştır (Michael & Jawahar, 2017). Aynı zamanda M-HES'ler, ihtiyaç duyduğu alanın oldukça az olması ve rezervuara ihtiyaç duymaması gibi sebeplerden dolayı çevre dostu sistemler olarak kabul edilmektedir (Beltran vd., 2014; Ciric, 2019). Bu özelliklerinden dolayı M-HES'ler atıksu arıtma tesislerinde de kolayca uygulanabilmektedir.

Atıksuların kontrolsüz deşarjı bir takım çevre sorunlarına yol açabilmektedir. Bu durumu kontrol edebilmek amacıyla, atıksuların arıtımında fiziksel, kimyasal ve biyolojik proseslerden oluşan bir dizi arıtma prosesinin bir veya birkaçı kullanılmaktadır (Akarsu vd., 2017; Preisner & Smol, 2022). Bu proseslerin işletilmesi ve yardımcı ekipmanların kullanımında ise, yüksek miktarda elektrik enerjisine ihtiyaç duyulmaktadır (Türkmenler, 2017). Atıksu arıtma tesislerinde M-HES'ler aracılığıyla elektrik üretim potansiyelinin belirlenmesi kapsamında, Erkan vd., (2018) yılında öncü bir çalışma gerçekleştirmiştir. Araştırmada Van-Edremit, Elazığ Sivrice ve Tunceli merkez atıksu arıtma tesisleri için mikro ölçekte hidroelektrik santrallerin uygulanabilirliği arıtma tesislerinin çıkış noktaları ile deşarj noktaları arasındaki düşü farkı baz

alınarak teorik hesaplamalar ile değerlendirilmiştir. Arıtma tesisi çıkışı ile deşarj noktaları arası en yüksek düşüye sahip olan Van-Edremit arıtma tesisinde, tesisin aylık elektrik kullanımı temel alındığında, %20 enerji geri kazanımının sağlanacağı belirlenmiştir. Bu oranlar Elâzığ-Sivrice arıtma tesisinde %9,5, Tunceli Merkez arıtma tesisinde %6,6 olarak tespit edilmiştir. Baran (2021) tarafından yapılan çalışmada ise, atıksu arıtma tesislerinden üretilebilecek en yüksek elektrik enerjisi üretiminin Marmara Bölgesi'nde, en düşük elektrik enerjisi üretiminin ise Doğu Anadolu Bölgesi'nde olduğu bulunmuştur. Ayrıca, 2018 yılından 2025 yılına kadar olan dönemde artan debiye bağlı olarak elektrik üretim oranlarının Marmara Bölgesi'nde %36,21, Ege Bölgesi'nde %28,39, Akdeniz Bölgesi'nde %42,37, İç Anadolu Bölgesi'nde %30,46, Karadeniz Bölgesi'nde %138,58 oranında artacağı öngörülmüştür. Farklı çalışmalarda, Türkiye'deki atıksu arıtma tesislerinin hidroelektrik üretim tahminleri ile her bölgedeki şehirlerin toplam aydınlatma enerjisi tüketim değerleri (Baran, 2021) ve M-HES'lerin temel bileşenleri ve içerdiği teknoloji özelinde gerçekleştirilebilecek iyileştirmeler (Anaza vd., 2017; Nasir, 2014) üzerine yoğunlaşmıştır.

Bu çalışmada, İstanbul'da bulunan kentsel atıksu arıtma tesislerinin üniteler arası atıksu transferi hatlarına, M-HES uygulanabilirliği ile enerji kazanım potansiyellerinin incelenmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda, enerji kazanımını sağlayacak olan mikro hidroelektrik sisteminin tasarım modellerinin elde edilen enerjinin miktarı, enerji verimliliği ve arıtma tesisinin yıllık enerji tüketimine etkisi ile mikro hidroelektrik sisteminin uygulama yeri ve şeklinin elde edilecek enerji miktarı ve ilk yatırım maliyetine etkisi araştırılmıştır. İncelenen tesislerin mevcut potansiyeline göre, elde edilecek enerjinin tesiste meydana getirdiği tasarrufun değerlendirilmesi yapılmıştır. Böylece, literatürde yer alan benzer çalışmaların sonuçları ve kapsamı, bu çalışmada yer alan veri analizi ve yorumlarla değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Hidroelektrik Üretimi: Teorik hesaplamalarda atıksu arıtma tesislerinde rezervuar ihtiyacı olmayan mikro hidroelektrik türbinlerinin üniteler arası geçiş noktalarında ve deşarj bacası ile deşarj noktası arasında konumlandırılacağı varsayılmıştır. Elde edilen enerji watt birimi olarak aşağıda verilen Eşitlik 1 ile hesaplanmıştır (Mishra vd., 2011).

$$P_{hyd} = \rho \cdot g \cdot H \cdot Q \quad \text{Eşitlik (1)}$$

Burada; P_{hyd} hidrolik enerji ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^3$)(watt), ρ suyun yoğunluğu (özgül kütle) (kg/m^3), g yerçekimi ivmesi ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$), H net su yüksekliği (m), Q atıksu debisi (m^3/s)'dir.

Net su yüksekliği suyun düşüşe başladığı nokta ile düşüşünü tamamladığı iki nokta arasındaki yükseklik farkını ifade etmektedir (Eşitlik 2).

$$H = h_1 - h_2 \quad \text{Eşitlik (2)}$$

Burada; h_1 suyun düşüşe başladığı nokta yüksekliği (m) ve h_2 suyun düşüşünü tamamladığı yüksekliği (m) ifade etmektedir.

Suyun potansiyel enerjisi türbin kanatlarına uyguladığı güç ile türbinlerde mekanik enerjiye dönüştürülmektedir. Mekanik enerji ile güç ilişkisi Eşitlik 3'te açıklanmıştır (Çelikdemir vd., 2017).

$$P_m = \eta h \cdot P_{hyd} \quad \text{Eşitlik (3)}$$

Burada; P_m üretilen mekanik enerjiyi (watt/saat) ve ηh hidrolik türbin verimliliğini ifade etmektedir.

Çalışma kapsamında ilk yatırım maliyeti (C_{PR}) önce ampirik yaklaşımı ile Eşitlik 4 sayesinde daha sonra ise 3 farklı türbin tipi için detaylı olarak Eşitlik 5, 6 ve 7 ile hesaplanmıştır (Power vd., 2017; AlZohbi, 2018).

$$C_{PR} = 25000 \times \left(\frac{P_m}{H^{0,35}}\right)^{0,65} \quad \text{Eşitlik (4)}$$

$$\text{Kaplan Türbinleri: } C_{PR} = 31196 \times \left(\frac{P_m^{0,42}}{H^{0,11}}\right) \quad \text{Eşitlik (5)}$$

$$\text{Francis Türbinleri: } C_{PR} = 25698 \times \left(\frac{P_m^{0,44}}{H^{0,18}}\right) \quad \text{Eşitlik (6)}$$

$$\text{Pelton Türbinleri: } C_{PR} = 19498 \times \left(\frac{P_m^{0,42}}{H^{0,11}}\right) \quad \text{Eşitlik (7)}$$

Teorik hesaplamaları yapılan mikro hidroelektrik sistemlerinin amortisman süresi (δ) ise birim elektrik maliyeti (f) kullanılarak Eşitlik 8 ile belirlenmiştir. Birim elektrik maliyeti güncel arıtma tesisleri için 4,63 ₺/kWsa olarak baz alınmıştır.

$$\delta = \frac{C_{PR}}{P_m \times f} \quad \text{Eşitlik (8)}$$

Arıtma Tesisi Verileri: Çalışma kapsamında İstanbul'da bulunan 3 farklı atıksu arıtma tesisi verileri kullanılmıştır. Tesislere ait veriler Tablo 1'de sunulmuştur. Tesis isimleri sunulmamış olup kodlanmıştır. Bu atıksu arıtma tesisleri aynı arıtma prosesini uygulamakta olup, aynı ünitelere sahiptirler. Aralarındaki fark topografik etkenlere bağlı olarak görülen düşü yüksekliğidir.

Tablo 1. Atıksu arıtma tesislerine ait veriler.

Table 1. Information of the wastewater treatment plants.

Tesis Kodu	Proses Türü	Debi ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$)	Yaklaşık Aylık Enerji Gideri (₺)
AAT-1	Uzun Havalandırmalı	1,06	775.000
AAT-2	Aktif Çamur Sistemi	0,94	700.000
AAT-3		0,48	350.000

Literatürde yer alan tahmini düşü yüksekliğine göre gerçekleştirilmiş çalışmaların aksine, bu çalışmada tesis arıtım basamakları arasındaki net yükseklik verilerinden faydalanılmıştır.

BULGULAR

Tesis Düşü Değerlendirmeleri: Tesislerdeki düşülerin belirlenmesinde Eşitlik 2'den yararlanılmış olup, uygulama noktalarının düşü sonuçları elde edilmiştir.

Tesislere ait teorik hesaplamaların yapıldığı üniteler arası geçiş noktaları ve deşarj bacası ile deşarj noktası arası su yükseklikleri Tablo 2’de verilmiştir. Buna göre, AAT-1, AAT-2 ve AAT-3 numaralı tesis üzerinde yapılan incelemelerde düşü yükseklik farkının en yüksek olduğu nokta 5 numaralı uygulama noktaları (tesis deşarj noktaları) olarak bulunmuştur.

M-HES Potansiyelleri ve Uygulanabilecek Türbin Seçimi

Uygulama noktalarından elde edilecek enerji miktarının belirlenmesi için Eşitlik 3 ve 4’ten

yararlanılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan debiler ortalama debiler olup, elde edilen sonuçlar Tablo 2’te verilmiştir. Elde edilen sonuçlarda, saatlik debi salınımlarından kaynaklı değişikliklerin önüne geçmek adına, arıtma tesislerinde meydana gelen saatlik debi salınımları ihmal edilmiştir. Veriler irdelendiğinde, debi miktarları aynı olmasına rağmen düşü miktarına bağlı olarak türbin gücü potansiyelleri farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Türbin tipi elde edilecek enerji miktarında bir değişikliğe neden olmadığından, türbin tipini belirleyen faktörlerin ise, ilk yatırım maliyeti ve amortisman süresi olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. Üniteler arasındaki net su seviyesi farkı ile türbin güç çıkışı arasındaki ilişki.

Table 2. The relationship between the net water level difference between units and turbine power output.

Tesis Kodu	Ünite Çıkış (h ₁)	Ünite Giriş (h ₂)	Uygulama Noktası (UN)	Çıkış Kotu (m)	Giriş Kotu (m)	Net Düşü Yüksekliği (m)	Türbin Gücü (kW/saat)	Türbin Gücü (kW/ay)
AAT-1	Kum Tutucu Çıkış Savağı	Kum Tutucu Çıkış Havuzu	UN-1.1	15,03	14,43	0,6	4,98	3587,32
	Denitrifikasyon Giriş Yapısı	Denitrifikasyon Havuzu	UN-1.2	14,13	13,86	0,27	2,24	1614,30
	Havalandırma Havuzu Çıkış	Çöktürme Dağıtım Yapısı	UN-1.3	13,23	13,02	0,21	1,74	1255,56
	Son Çöktürme Çıkış Kanalı	Deşarj Rögarı	UN-1.4	11,81	11,24	0,57	4,73	3407,96
	Deşarj Rögarı	Deşarj Noktası	UN-1.5	11,24	0,00	11,24	93,34	67202,52
AAT-2	Kum Tutucu Çıkış Savağı	Kum Tutucu Çıkış Havuzu	UN-2.1	15,40	14,80	0,6	4,42	3181,21
	Denitrifikasyon Giriş Yapısı	Denitrifikasyon Havuzu	UN-2.2	14,50	14,20	0,3	2,21	1590,61
	Havalandırma Havuzu Çıkış	Çöktürme Dağıtım Yapısı	UN-2.3	13,95	13,67	0,28	2,06	1484,57
	Son Çöktürme Çıkış Kanalı	Deşarj Rögarı	UN-2.4	13,00	12,25	0,75	5,52	3976,51
	Deşarj Rögarı	Deşarj Noktası	UN-2.5	12,25	0,00	12,25	90,21	64949,73
AAT-3	Kum Tutucu Çıkış Savağı	Kum Tutucu Çıkış Havuzu	UN-3.1	12,55	11,85	0,7	2,63	1895,19
	Denitrifikasyon Giriş Yapısı	Denitrifikasyon Havuzu	UN-3.2	11,40	11,00	0,4	1,50	1082,97
	Havalandırma Havuzu Çıkış	Çöktürme Dağıtım Yapısı	UN-3.3	10,86	10,42	0,44	1,65	1191,26
	Son Çöktürme Çıkış Kanalı	Deşarj Rögarı	UN-3.4	10,20	9,80	0,4	1,50	1082,97
	Deşarj Rögarı	Deşarj Noktası	UN-3.5	9,80	0,00	9,8	36,85	26532,66

İlk Yatırım Maliyeti, Amortisman Süresi ve Enerji Geri Kazanım Oranları: Uygulama noktalarından kurulacak M-HES’in ilk yatırım maliyetleri, 5, 6 ve 7 numaralı eşitlikler ve Tablo 2’de yer alan veriler kullanılarak hesaplanmış olup, elde edilen sonuçlar Tablo 3’te sunulmuştur. Aynı uygulama noktalarında şartlar altında Pelton türbini, tüm uygulama noktaları için diğer türbin tiplerine kıyasla en yüksek ilk yatırım maliyetine sahip türbin tipi olarak belirlenmiştir. En düşük ilk yatırım maliyeti ise, Francis türbininin kullanıldığı şartlarda tespit edilmiştir.

Yüksek enerji verimi tespit edilen 5 numaralı uygulama noktasının yatırım maliyeti de diğer uygulama noktalarına göre daha yüksek hesaplanmıştır. Dolayısıyla, türbin gücü potansiyeli yüksek olan noktaların ilk yatırım maliyeti de doğru orantılı olarak artış göstermektedir. Amortisman süreleri ise belirleyici bir faktör olarak ortaya çıkmaktadır. Bilindiği üzere M-HES’ler sürekli olarak çalışan sistemlerdir ve periyodik bakımı yapıldığı müddetçe ömrü en az 20 yılı geçmektedir (DAKA, 2012). Genel olarak amortisman süresinin 10 yıldan daha kısa olması beklenmekle birlikte amortisman süreleri 0-3 yıl “kesin uygulanabilir”, 3-5 yıl “uygulanabilir” ve <5 yıl “uygulanamaz” şeklinde değerlendirilmektedir.

Pelton türbinlerinin ilk yatırım maliyetine göre hesaplanan amortisman süreleri ise, en düşük 1,4 yıl, en yüksek ise 14,1 yıl olarak bulunmuştur. Pelton türbinleri uygunluk açısından değerlendirildiğinde ise 3 uygulama

noktası için “kesin uygulanabilir”, diğer noktalar için ise “uygulanamaz” olduğu görülmektedir. Kaplan türbinlerinin ilk yatırım maliyetine göre hesaplanan amortisman süreleri incelendiğinde, en düşük 0,7 yıl en yüksek ise 11,1 yıl olarak tespit edilmiştir. Kaplan türbini uygunluk açısından değerlendirildiğinde, 3 uygulama noktasının “kesin uygulanabilir”, 1 uygulama noktasının ise “uygulanabilir” olduğu bulunmuştur. Diğer noktaların ise, “uygulanamaz” olarak tespit edilmiştir. Francis türbinlerinin ilk yatırım maliyetine göre, hesaplanan amortisman süreleri incelendiğinde en düşük 0,5 yıl en yüksek ise 10,2 yıl olarak hesaplanmıştır. Francis türbini uygunluk açısından değerlendirildiğinde, 3 uygulama noktasının “kesin uygulanabilir” ve 4 uygulama noktasının ise “uygulanabilir” olduğu bulunmuştur. Diğer uygulama noktalarının da ise, Francis türbini “uygulanamaz” olarak tespit edilmiştir. Genel olarak değerlendirildiğinde ise, Francis türbini diğer türbinlere kıyasla düşük yatırım maliyetine bağlı olarak daha düşük amortisman süresine sahip olduğu görülmektedir (Şekil 2).

Uygulama noktalarından kurulması düşünülen mikro hidroelektrik sistemleri ile elde edilecek enerji miktarları ile tesiste kullanılan enerji miktarına kıyasla geri kazanım oranları hesaplanmıştır. Bununla birlikte tüm tesisler için M-HES kurulumu için en uygun nokta 5 numaralı kısım olarak belirlenmiştir. Enerji geri kazanım yüzdeleri değerlendirildiğinde UN-1.5, UN-2.5, UN-3.5 noktalarında sırasıyla 8,7%, 9,5%, 7,6% olarak

bulunmuştur. M-HES'lerin tüm uygulama noktalarına kurulması durumunda, 1 numaralı tesis için yıllık %10 enerji ve 4.281.879 ₺ işletme maliyeti tasarrufu sağlanabilmektedir. Aynı senaryoda 2 ve 3 numaralı tesis için yıllık enerji tasarrufu %10,9 ve %9,1 ve işletme tasarrufu 4.177.147 ve 1.765.977 ₺'dir. Amortisman süreleri, ilk yatırım maliyeti ve işletme maliyet tasarrufu düşünüldüğünde, M-HES'lerin uygulanabilir bir enerji kazanım sistemi olduğu sonucuna varılmaktadır. Kazanımı sağlanan güç, ilk yatırım maliyeti ve amortisman süreleri göz önünde bulundurulduğunda ise, elde edilen veriler literatür araştırmaları ile uyumlu olduğu görülmüştür. Örneğin, McNabola vd., (2014) tarafından İrlanda'da yapılan bir çalışmada Kilcullen için 27 kW/saat, Cookstown için 73 kW/saat, Saggart için 115 kW/saat güç verileri ile bu çalışmadan elde edilen sonuçların kıyaslanabilir seviyede olduğu görülmektedir. Bununla birlikte veriler, bu çalışmaya kıyasla yüksek ilk yatırım

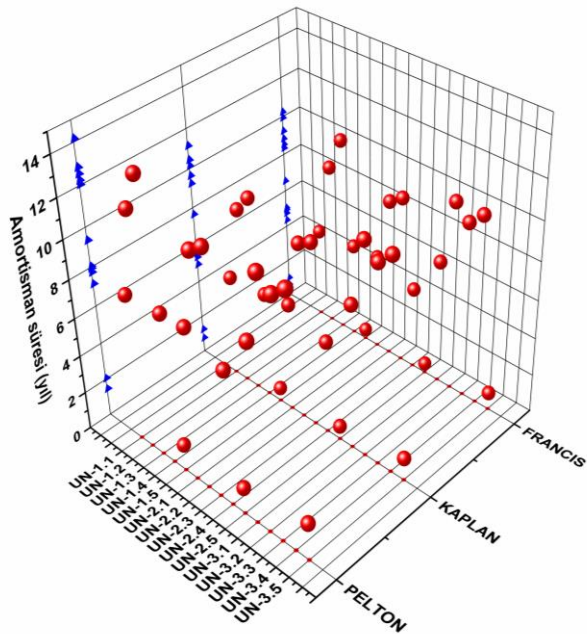
maliyeti sebebi ile daha uzun amortisman süresini işaret etmektedir Gallagher vd., (2015) tarafından yapılan bir başka çalışmada ise, atıksu arıtma tesislerinde kurulması planlanan M-HES ile saatlik 3,6 ve 18,2 kW potansiyel güç elde edilebileceği belirtilmiştir. Düşük güç eldesine bağlı olarak amortisman süresi daha uzun olmaktadır.

Yüksek enerji eldesi yüksek ilk yatırım maliyetini de beraberinde getirmektedir. Ak vd., (2017) tarafından Ankara Tatlar AAT çıkış noktası üzerinde yapılan benzer bir çalışmada iki farklı türbin için 965 kW/saat ve 1160 kW/saat türbin gücü verilerine ulaşılmıştır. Bu değerler İstanbul İl'i için yapılan hesaplamalara kıyasla oldukça yüksek olup aradaki farkın debi, düşü yüksekliği, türbin tipi gibi parametrelerin değişkenliğinden kaynaklanmaktadır. Dolayısıyla Ankara Tatlar için yapılan çalışmanın ilk yatırım maliyeti ve amortisman süresi nispeten daha uzun çıkmaktadır.

Tablo 3. Türbin Çeşitlerine Göre Amortisman Süreleri.

Table 3. Depreciation periods by turbine type.

UYGULAMA NOKTASI	P_m (kw/yıl)	f	PELTON		KAPLAN		FRANCIS	
			YATIRIM MALİYETİ (₺)	AMORTİSMAN SÜRESİ (YIL)	YATIRIM MALİYETİ (₺)	AMORTİSMAN SÜRESİ (YIL)	YATIRIM MALİYETİ (₺)	AMORTİSMAN SÜRESİ (YIL)
UN-1.1	43.047,88	4,63	1.535.239,20	7,7	1.059.117,15	5,3	933.732,74	4,7
UN-1.2	19.371,55		1.095.615,93	12,2	826.875,04	9,2	758.678,61	8,5
UN-1.3	15.066,76		985.246,27	14,1	764.900,77	10,1	710.690,12	10,2
UN-1.4	40.895,49		1.502.326,31	7,9	1.042.409,40	5,5	921.362,91	4,9
UN-1.5	806.430,29		5.294.877,46	1,4	2.626.967,33	0,7	2.000.333,94	0,5
TÜM UYGULAMA NOKTALARI	924.811,96		10.413.305,16	2,4	6.320.269,69	1,5	5.324.798,33	1,2
UN-2.1	38.174,54		1.419.908,45	8,0	1.006.999,46	5,7	885.654,36	5,0
UN-2.2	19.087,27		1.059.437,08	12,0	812.287,82	9,2	739.599,25	8,3
UN-2.3	17.814,78		1.029.000,79	12,5	795.099,24	9,6	726.450,50	8,8
UN-2.4	47.718,17		1.560.288,20	7,1	1.079.123,97	4,9	938.557,46	4,3
UN-2.5	779.396,76		5.078.423,76	1,4	2.565.219,53	0,7	1.940.261,75	0,5
TÜM UYGULAMA NOKTALARI	902.191,51		10.147.058,27	2,4	6.258.730,02	1,5	5.230.523,32	1,3
UN-3.1	22.742,28		979.081,99	9,3	796.508,41	7,6	685.867,65	6,5
UN-3.2	12.995,59		772.921,67	12,8	669.651,07	11,1	592.994,17	9,9
UN-3.3	14.295,15		804.681,27	12,2	689.731,88	10,4	607.872,54	9,2
UN-3.4	12.995,59	772.921,67	12,8	669.651,07	11,1	592.994,17	9,9	
UN-3.5	318.391,87	2.985.782,41	2,0	1.805.053,40	1,2	1.362.177,20	0,9	
TÜM UYGULAMA NOKTALARI	381.420,46	6.315.389,02	3,6	4.630.595,83	2,6	7.710.251,84	1,7	



Şekil 2. Türbin tiplerine bağlı amortisman süreleri dağılımı.

Figure 2. Distribution of amortization periods depending on turbine types.

Geniş kapsamlı yapılan çalışmalardan biri 2021 yılında Kudoro tarafından Missouri/ABD eyaletinde bulunan 127 adet atıksu arıtma tesisinde mikro hidroelektrik sistemi ile enerji geri kazanım potansiyellerinin belirlenmesi üzerine gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda 21 adet tesis için M-HES'in kurulmasının uygunluğu tespit edilmiştir. 21 adet tesis içerisinde ilk yatırım maliyetleri bu çalışmadaki ilk yatırım maliyetleri ile benzer hesaplamaları işaret etmekte en kısa amortisman süresi ise 1,44 yıl olarak tespit edilmiştir.

SONUÇ

Bu çalışma ile İstanbul'da bulunan 3 farklı atıksu arıtma tesisinde kurulabilecek olan M-HES'lerin sağlayacağı fırsatlar ele alınmıştır. M-HES'lerin kurulması yenilikçi ve çok işlevli bir altyapı imkânı sağlamaktadır. Bu kapsamda gerçekleştirilen hesaplamalar santrallerin tesis enerji ihtiyaçlarının teorik olarak %10'dan fazlasını sağlayabileceği yönündedir. Ayrıca, tüm tesis haricinde belirli ünite çıkışlarına kurulacak santrallerin amortisman

süreleri bir yılın altında olarak hesaplanmıştır. Bu değer, literatürde yer alan çalışmaların sonuçlarına kıyasla oldukça kısadır.

Sistem gereği mevcut yapılara uyarlanan mikro hidroelektrik santraller, su yolunun doğal akışına bağlanıyor olması, görece düşük maliyetli olması ve daha az çevresel etkiye sahip olması gibi avantajlara sahiptir. M-HES'ler İstanbul'da uygulandığı takdirde, geleneksel mühendislik paradigmasından bütünlük bir yaklaşıma geçiş sağlayarak sürdürülebilir şehircilik konsepti için uygun bir altlık sağlayacaktır. Dolayısıyla bu santraller hem kentsel hem de kırsal alanlarda giderek artan enerji talebini karşılamaya yönelik ideal bir çözüm olarak sunulmaktadır.

Sonuç olarak; M-HES çalışmaları planlama, mühendislik, yerel politika ve ekosistem ihtiyaçlarını bütünlükten bir bakış açısının ele alınmasını sağlayarak farklı yaklaşımla ile çıktılarının eldesine aracı olacaktır.

KAYNAKLAR

- Ak, M., Kentel, E. & Kucukali, S. (2017).** A fuzzy logic tool to evaluate low-head hydropower technologies at the outlet of wastewater treatment plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **68**, 727-737.
- Akarsu, C., Ayol, A. & Taner, F. (2017).** Treatment of Domestic Wastewater by Using Electrochemical Process Using Different Metal Electrodes. *JSM Environmental Science and Ecology*, **5**, 1-6.
- AlZohbi, G. (2018).** The cost of electromechanical equipment in a small hydro power storage plant. *Journal of Energy Systems*, **2**(4), 238-259.
- Anaza, S.O., Abdulazeez, M.S., Yisah, Y.A., Yusuf, Y.O., Salawu, B.U. & Momoh, S.U. (2017).** Micro Hydro-Electric Energy Generation- An Overview. *American Journal of Engineering Research*, **6**(2), 5-12.
- Baran, B. (2021).** Usage of Waste Water Treatment Plants Hydroelectric Energy for Urban Lighting Energy: The Case of Turkey. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, **13**(2), 750-762.
- Beltran, H., Vidal, R., Besiero, L., Santos, J.M., Basiero, J.A. & Belenguer, E. (2014).** Micro hydro installation analysis in a wastewater treatment plant. *Renewable energy and power quality journal*, **1**(12), 15-20.
- Birpınar, M.E. (2022).** İklim Krizi ve Türkiye. Yeni İnsan Yayınevi-392, Ekoloji Serisi-71, 280 s. ISBN: 978-625-7537-79-7.
- Chae, K.J., Kim, I.S., Ren, X. & Cheon, K.H. (2015).** Reliable energy recovery in an existing municipal wastewater treatment plant with a flow-variable micro-hydropower system. *Energy Conversion and Management*, **101**, 681-688.
- Ciric, R.M. (2019).** Review of techno-economic and environmental aspects of building small hydro electric plants - A case study in Serbia. *Renewable energy*, **140**, 715-721.
- Comino, E., Dominici, L., Ambrogio, F. & Rosso, M. (2020).** Mini-hydro power plant for the improvement of urban water-energy nexus toward sustainability - A case study. *Journal of Cleaner Production*, **249**, 119416.
- Çelikdemir, S., Yıldırım, B. & Özdemir, M.T. (2017).** Cost analysis of mini hydro power plant using bacterial swarm optimization. *International Journal of Energy and Smart Grid*, **2**(2), 2017.
- DAKA. (2012).** Sektörel Analiz Raporu. *Doğu Anadolu Kalkınma Ajansı*, 32.
- Dalcalı, A., Çelik, E. & Arslan, S. (2012).** Mikro ve mini hidroelektrik santralleri için mikrodenetleyici tabanlı governor sisteminin tasarımı. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, **28**(2), 130-135.
- Doğan, N. (2014).** The role of renewable energy resources in fighting against global climate change: an assessment for Turkey. *IIB International Refereed Academic Social Sciences Journal*, **5**(15), 265-276.
- Erkan, D., Yılmaz, T., Yücel, A., Yılmaz, A., Tel, A. & Uçar, D. (2018).** Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Kazanımı için Mikro Ölçekte Hidroelektrik Santrallerin Uygulanabilirliği. *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, **1**, 1-6.
- Gallagher, J., Harris, I.M., Packwood, A.J., McNabola, A. & Williams, A.P. (2015).** A strategic assessment of micro-hydropower in the UK and Irish water industry: Identifying technical and economic constraints. *Renewable Energy*, **81**, 808-815.
- Gernaat, D.E.H.J., de Boer, H.S., Daioglou, V., Yalew, S.G., Müller, C. & van Vuuren, D.P. (2021).** Climate change impacts on renewable energy supply. *Nature climate change*, **11**, 119-125.
- Güner, E.D. & Turan E.S. (2017).** Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Küresel İklim Değişikliği Üzerine Etkisi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, **3**(1), 48-55.
- Kayıkçı, Z. (2022).** Atıksu arıtma sistemlerinde mikro hidroelektrik sistemleri kullanarak enerji geri kazanımı potansiyelinin belirlenmesi. Yüksek Lisans, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Fen Bilimleri Enstitüsü. Avcılar-İstanbul, Türkiye, 79.
- Kudoro, T.A. (2022).** Application of Microturbines in Improving the Energy Efficiency of Municipal

- Wastewater Treatment Plants in Missouri. Doktora Tezi, Missouri-Columbia Üniversitesi.
- Kuriakose, J., Jones, C., Anderson, K., Mclachlan, C. & Broderick, J. (2022).** What does the Paris climate change agreement mean for local policy? Downscaling the remaining global carbon budget to sub-national areas. *Renewable and Sustainable Energy Transition*, 2, 100030.
- Llácer-Iglesias, R.M., López-Jiménez, P.A. & Pérez-Sánchez, M. (2021).** hydropower technology for sustainable energy generation in wastewater systems: learning from the experience. *Water*, 13(22), 3259.
- McNabola, A., Coughlan, P. & Williams, A.P. (2014).** Energy recovery in the water industry: an assessment of the potential of micro-hydropower. *Water and Environment Journal*, 28(2), 294-304.
- Michael, P.A. & Jawahar, C.P. (2017).** Design of 15 kW Micro Hydro Power Plant for Rural Electrification at Valara. *Energy Procedia*, 117, 163-171.
- Mishra, S., Singal, S. & Khatod, D. (2011).** Approach for Cost Determination of Electro-Mechanical Equipment in Ror Shp Projects. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2(2), 63-67.
- Nasir, B.A. (2014).** Design Considerations of Micro-hydro-electric Power Plant. *Energy procedia*, 50, 19-29.
- Olabi, A.G. & Abdelkareem, M.A. (2022).** Renewable energy and climate change. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112111.
- Özçiloğlu, M.M. & Durmuş, B. (2021).** İleri biyolojik atıksu arıtma tesisleri için mikro hidroelektrik santrali ve LED aydınlatma uygulanabilirliği ile enerji verimliliği: Gaziantep örneği. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 21, 555-560.
- Power, C., Coughlan, P. & McNabola, A. (2017).** Microhydropower Energy Recovery at Wastewater-Treatment Plants: Turbine Selection and Optimization. *Journal of Energy Engineering*, 143(1), 04016036.
- Preisner, M. & Smol, M. (2022).** Investigating phosphorus loads removed by chemical and biological methods in municipal wastewater treatment plants in Poland. *Journal of Environmental Management*, 322, 116058.
- Raju, P.E.S.N. & Jain, T. (2019).** *Distributed energy resources and control: Distributed Energy Resources in Microgrids*, 33-56. Academic Press. DOI: [10.1016/B978-0-12-817774-7.00002-8](https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817774-7.00002-8)
- Sarip, S., Kamarudin, K., Razak, K., Hasan, R., Hassan, M., Suhot, M., Yakub F. & Daud, M. (2016).** The potential of micro-hydropower plant for Orang Asli Community in Royal Belum State Park, Perak, Malaysia. In Proceedings of symposium on the 4th Royal Belum Scientific Expedition, 1-5.
- Türkmenler, H. (2017).** Atık Su Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliği. *Politeknik Dergisi*, 20(2), 495-502.
- Ürün, E. & Soyu, E. (2016).** Türkiye'nin enerji üretiminde yenilenebilir enerji kaynakları üzerine bir değerlendirme. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi, ICEBSS, Özel Sayı*, 31-45.
- Yıldız, A., Özgener, Ö. & Özgener, L. (2020).** Türkiye'de yenilenebilir enerji uygulamaları, mevcut durum ve gelecek öngörülere. *EMO Bilimsel Dergi*, 10(1), 8-19.