

# ATIKSU ARITMA TESİSLERİNİN ENERJİ VERİMLİ İŞLETİLMESİ

Tarihi : 08.06.2020

## İÇİNDEKİLER

<b>1 GİRİŞ</b> .....	<b>4</b>
<b>2 ÇEŞİTLİ ÜLKELERDE AAT’SİNDE ENERJİ TÜKETİMİ</b> .....	<b>9</b>
<b>3 ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE SPESİFİK ENERJİ TÜKETİMİ</b> .....	<b>12</b>
<b>4 ARITMA TESİSİ KADEMERİNDE ENERJİ TÜKETİMİ</b> .....	<b>16</b>
<b>5 AAT’LERİNDE ENERJİ NÖTR ÇALIŞMASI</b> .....	<b>24</b>
<b>6 AAT’LERİNDE “ENERJİ NÖTRLÜĞÜ”</b> .....	<b>29</b>
<b>6.1 Pompalama</b> .....	<b>30</b>
<b>6.2 Havalandırma</b> .....	<b>34</b>
<b>6.2.1 İleri Havalandırma Kontrol Sistemi</b> .....	<b>41</b>
<b>6.2.2 Aralıklı Havalandırma</b> .....	<b>42</b>
<b>6.2.3 Amonyum Bazlı Havalandırma</b> .....	<b>42</b>
<b>6.3 Aydınlatma</b> .....	<b>43</b>
<b>6.4 Motorlar</b> .....	<b>44</b>
<b>6.5 Scada</b> .....	<b>45</b>
<b>6.6 Yeşil Enerji</b> .....	<b>45</b>
<b>6.7. Çıkış Suyunun Geri Kullanımı ile Temiz Su Kullanımı Azaltma</b> .....	<b>46</b>
<b>6.8. Enerji Geri Kazanımı</b> .....	<b>46</b>
<b>7 KAYNAKLAR</b> .....	<b>48</b>
<b>Şekil 1. AAT’i İçin Enerji Verimliliği Belgesi</b> .....	<b>8</b>
<b>Şekil 2. AAT’lerinde Enerji Tüketim Oranları</b> .....	<b>11</b>
<b>Şekil 3. AAT’de Enerji Tüketimi, Yıllık Günlük Ortalama Atıksu Debisine, Giderilmiş KOI Yüküne ve Hizmet Verilen Nüfusa Bağlı Olarak Değişir</b> .....	<b>13</b>
<b>Şekil 4. Temsili Atıksu Arıtma Prosesleri için Birim Elektrik Tüketimindeki Boyutlar ile Değişimler (Not: mgd günde milyon galon anlamına gelir).</b> .....	<b>17</b>
<b>Şekil 5 (a) Yakma İşlemi Olmadan OD Yönteminin Ve CAS Yönteminin Enerji Tüketim Dağılımı, (b) Japonya Yakma İşlemi Ve Gelişmiş Atık Su Arıtma Yöntemiyle CAS Yönteminin Enerji Tüketimi Dağılımı</b> .....	<b>18</b>
<b>Şekil 6. Farklı İleri Atıksu Arıtma Tekniklerine Göre Enerji Tüketimleri</b> .....	<b>18</b>
<b>Şekil 7. Atıksu Debisine Bağlı Olarak Enerji Tüketimi</b> .....	<b>19</b>
<b>Şekil 8. Atıksu Debisine Bağlı Olarak SET’i</b> .....	<b>20</b>
<b>Şekil 9. Nüfusa Bağlı Olarak Spesifik Enerji Tüketimi</b> .....	<b>20</b>
<b>Şekil 10. Çin’de AAT kapasitesine Bağlı Olarak Enerji Tüketimi</b> .....	<b>21</b>

<b>Şekil 11.</b> Nüfusa, Normal ve İdeal Şartlara Bağlı Olarak Enerji Tüketim Değişimleri ..	22
<b>Şekil 12.</b> Tahrip Olmuş Havalandırıcı .....	22
<b>Şekil 13.</b> Farklı Teknolojilerle AAT'lerinde Enerji Tüketimleri .....	23
<b>Şekil 14.</b> Havalandırma Kontrolü: Biyolojik Yükteki Dalgalanmalar .....	28
<b>Şekil 15.</b> Farklı Zamanlarda Gerçek Debi Hızına Göre Zamana Bağlı Olarak Atıksu Pompası Akışı.....	33
<b>Şekil 16.</b> Atıksu Arıtma Tesisi Havalandırma Ünitesinde Çeşitli Havalandırma Teknolojileri .....	36
<b>Şekil 17.</b> Hava Yataklı Yüksek Hızlı Turbo Blower .....	39
<b>Şekil 18.</b> Manyetik Yataklı Yüksek Hızlı Bir Turbo Fan .....	39
<b>Şekil 19</b> Tipik Havalandırma Sistemi.....	43
<b>Şekil 20.</b> AAT'de Enerji Geri Kazanımı .....	46
<b>Şekil 21.</b> Aktf Çamur Sisteminde Enerji Balansı .....	47
<b>Tablo 1.</b> Ülkelerde ATT'lerinde Enerji Tüketimi.....	9
<b>Tablo 2.</b> AAT'de Spesifik Enerji Tüketimi .....	12
<b>Tablo 3.</b> Spesifik Enerji Tüketim Değerleri .....	13
<b>Tablo 4.</b> Çeşitli Ülkelerde AAT'lerinde Enerji Tüketimi .....	16
<b>Tablo 5.</b> Geleceğe Yönelik Hedefler İçin AAT'lerinde Enerji Tüketimi .....	24
<b>Tablo 6.</b> İdeal Bir Eysel AAT Ünitelerinde Tüketilen Elektrik Enerjisi Miktarı .....	25
<b>Tablo 7.</b> Elektrik Tüketiminin Ekipmana Göre Dağılımı ve Sahada Kurulu Bulunan Küme Elektrik Veri Kaydedicilerinden Toplanan Karşılaştırılması .....	27
<b>Tablo 8.</b> Almanya'da Yapılan Bir Çalışmada AAT'lerinde Enerji Tüketim Kademeleri .....	29
<b>Tablo 9</b> Mekanik Cihazların Enerji Koruma Önlemleri.....	37
<b>Tablo 10.</b> Çeşitli Atıksu Arıtma Tesislerinde Çamurdan Biyogazdan Enerji Üretimi ...	47

## 1 GİRİŞ

İklim değişikliği ve enerji verimliliği gelecekte tüm sektörleri etkileyecektir.

Dünyada üretilen toplam elektrik enerjisinin yaklaşık %2'sinden fazlası, içme suyu temini, arıtılması, hizmete sunulması, atıksuların uzaklaştırılması ve arıtılması için tüketildiği tahmin edilmektedir.

Evsel atıksu arıtma tesislerinin (AAT) işletilmesi enerji yoğun bir sektördür.

AAT'lerinde, enerji girdileri, en önemli işletme maliyeti bileşenlerinin başında gelmektedir. Enerji verimliliği, günümüzde hızla tükenen enerji kaynakları ve sera gazı salımları sebebiyle birçok alanda gündeme gelmektedir. AAT'lerinde yer alan arıtma proseslerinde ve atıksuyun toplanması ve taşınması sırasında önemli miktarda enerji kullanımı söz konusudur. Günümüzde artan enerji fiyatları ve yeni yasal düzenlemelerle getirilen sıkı deşarj standartları, AAT'lerin işletme maliyetlerini arttırmaktadır.

Klasik evsel AAT'lerinde işletme maliyetinin yaklaşık %25-40'ni enerji giderleri oluşturmaktadır ve arıtılmış atıksu başına enerji tüketim değeri 0,3-2.1kWh/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir. AAT'lerinde enerji girdilerini azaltmak veya iyileştirmek gereklidir.

Günümüzde AAT'de enerji verimliliği optimizasyonu bilim camiasında oldukça popüler bir konudur. Atıksu arıtımı için net enerji tüketimini azaltmak, suyun yeniden kullanımı için alternatif bir amaç değil, tamamlayıcıdır. Son on yılda, atık sudan enerji hasadında önemli bir artış olmuştur. Yeni AAT'leri, işletme maliyetlerini ve enerji tüketimini azaltmak ve karbon nötrlüğünü sağlamak için inşa edilmiştir ve edilmektedir.

AAT'lerde çamurun işlenmesinden çıkan azot ve fosfor bakımından zengin sular arıtma tesisine ilave yükler getirmektedir. Örneğin, tesis başına toplam azot yükü, tesisin günlük tasarım azot yükünün %10-30'u oranında ilave bir yük getirmektedir. Bu ilave azot yükünün, havalandırma enerjisini arttıracak şekilde işletme maliyetlerini olumsuz yönde etkilemesi sonucu, son yıllarda yan akımlardan gelen azot yükünün azaltılmasına yönelik olarak yeni biyolojik prosesler geliştirilmiştir.

ABD'de yapılan bir araştırmada, atıksu arıtma sektöründe her yıl yaklaşık 21-22 milyar kWh elektrik enerjisi tüketildiği (21 milyon metrik ton sera gazı emisyonu eşdeğer) ve bunun 1,8 milyon hanenin enerji tüketimine eşdeğer olduğu tespit edilmiştir. Atıksuların

terfi merkezleri yardımı ile atıksu arıtma tesisine taşınması ve arıtılması işlemlerinde ABD'de üretilen toplam elektrik enerjisinin yaklaşık %4'ü tüketilmektedir.

Eurostat verilerine göre AB'de 2009 yılında atık su yönetimi ve arıtma harcamalarının GSYİH'nin %0,60'ı oluşturduğunu açıkladı ve bir ülkenin elektrik tüketiminin yaklaşık %1'inin AAT'lerde tüketildiğini belirtti.

Almanya ve İtalya'dan elde edilen veriler, atık su arıtımına yönelik elektrik talebinin ülkelerdeki toplam elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık %1'ini oluşturduğunu göstermektedir. Almanya'da 600 TWh/yıl toplam enerjinin 4,4 TWh/yıl atıksu arıtma tesislerinde tüketilmektedir. Toplam enerjinin arıtma tesislerinde tüketilen oranı %0,7'dir. Bu değer yıllık 3 milyon ton karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) salımına eşdeğerdir.

İspanya'da, bazı araştırmalar evsel ve endüstriyel AAT'lerinde toplam elektrik enerjisi tüketiminin %2-3'ünü oluşturduğunu göstermektedir. Su yönetimi ve tarımsal talep göz önüne alındığında, bu oran %4-5'e ulaşabilmektedir.

İngiltere'de atıksu arıtma endüstrisinde tahminen 7703 GWh/yıl enerji tüketildiği, enerji yoğun sektör olduğu, yılda 5 milyon ton sera gazı CO<sub>2</sub> salımladığı ve bu miktarın ülkedeki toplam sera gazı (GHG) salımının yaklaşık %1'ine tekabül ettiği tespit edilmiştir.

İtalya'da, belediyelere ait AAT'lerindeki elektrik tüketimi yaklaşık 3,250 GWh/yıl'dır ve bu da yılda yaklaşık 0,5 milyar Euro eder. Benzer çalışma, Türkiye'de belediyelere ait AAT'lerinde elektrik enerji tüketimi için yapılmalıdır.

Gelecekte atıksuların arıtılmasında gelişmeler ve deşarj sınır değerlerinde iyileşmeler ve gelişmiş ülkelerde önümüzdeki 15 yıl içinde %20 oranında enerji tüketimi ve sera gazı salımında artışlara neden olacağı tahmin edilmektedir.

Günümüzde artan enerji maliyetleri ve üretilen elektrik enerjisindeki yüksek miktarda fosil yakıt kullanılması nedeniyle AAT'lerinde elektrik tüketiminin hem parasal hem de çevresel maliyeti çok yüksektir.

AAT'lerinde enerji verimliliğini arttırmak; AAT'lerinin maliyetlerini yönetmek ve uzun vadeli operasyonel sürdürülebilirliği sağlamak için en etkili yollarından biridir.

Atıksu arıtma tesisleri yüksek miktarda enerji tüketen işletmeler olduğu gibi, büyük bir enerji potansiyelini de bünyesinde barındırmaktadırlar.

AAT'lerinde yapılacak iyileştirmeler ve yeni yatırımlarla enerji nötrlüğünü yakalamak mümkündür.

AAT'lerinde elle veya tekniğine uygun olmayan havalandırma kontrolü sistemi %50-65 oranında aşırı enerji tüketimine neden olabilir.

AAT'lerinde enerji maliyetini doğru yönetmek için planlama, yapma, kontrol etme ve uygulama koyma kademeleri detayları aşağıda verilmiştir.

### **1. Planlama;**

- ✓ Aylık ve yıllık elektrik enerjisi faturalarını temin ediniz.
- ✓ Aylık ve yıllık elektrik enerji maliyetlerini tespit ediniz.
- ✓ Elektrik faturalarını ve tüketimini belirleyiniz. AAT'de elektrik giderlerini belirlemek için ihtiyaç olan üç yol var:
  - a. Aylık ve yıllık ne kadar enerji faturası ödendiği tespit edilmeli,
  - b. Aylık ve yıllık ne kadar enerji tüketildiği belirlenmeli (kWh ve kVA).
  - c. Ve elektrik enerjisinin nerelerde ne zaman kullanıldığı tespit edilmeli.
- ✓ Yukarıda verilen veriler ışığında tesisin enerji politikasını ve genel olarak enerji geliştirme hedefleri belirlenmeli,
- ✓ En fazla enerji tüketen faaliyetleri ve işlemleri belirlenmeli,
- ✓ Potansiyel enerji iyileştirme projeleri ve faaliyetleri tanımlanmalı, değerlendirilmeli ve önceliklendirilmeli,
- ✓ Performans göstergeleri tanımlanmalı.

### **2. Yapma;**

- ✓ Enerji iyileştirmelerini uygulamak için eylem planları geliştirilmeli
- ✓ Üst yönetimin taahhüdü ve onayı alınmalı
- ✓ Onaylar alındıktan sonra uygulamaya başlanmalı

### **3. Kontrol Etme;**

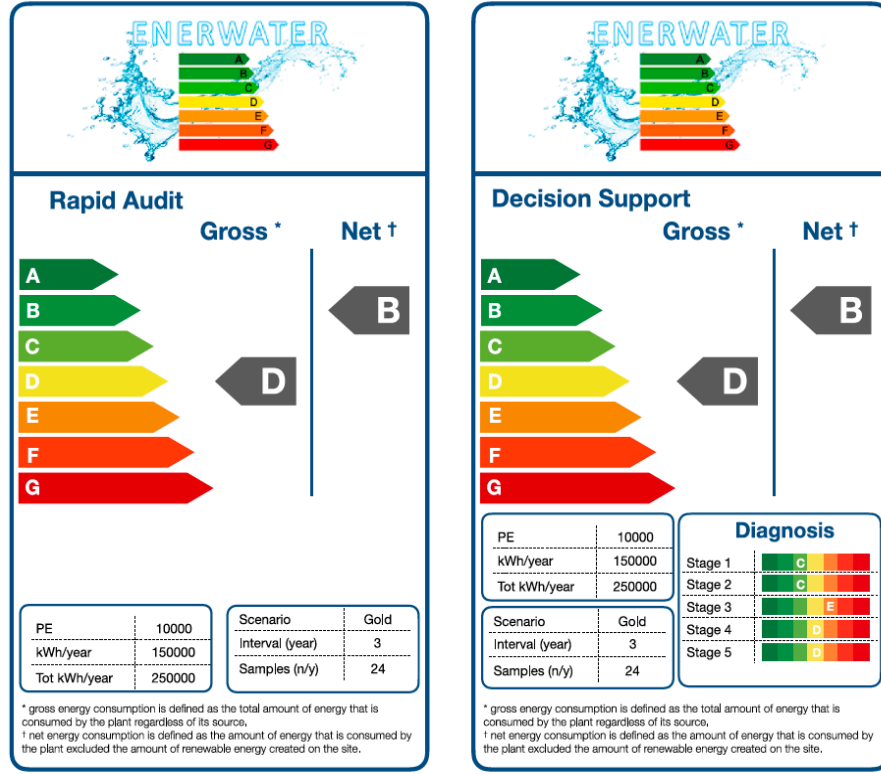
- ✓ Enerji iyileştirmelerini uygulamak için eylem planları geliştirilmeli
- ✓ Üst yönetimin taahhüdü ve onayı alınmalı
- ✓ Onaylar alındıktan sonra uygulamaya başlanmalı

### **4. Önlem Alma;**

- ✓ Enerji hedeflerini iş/işletme hedefleriyle sürekli olarak uyumlu hale getirilmeli.
- ✓ Genel maliyet performansı, fırsatlar, sorumluluklar ve yaklaşımlar gözden geçirilmeli.
- ✓ Pompalamada; değişken hız kontrollü (FK) ve çok aşamalı pompalama stratejilerinin uygulanmasına geçilmeli.
- ✓ Havalandırma ünitesinde ÇO ve ORP ölçülmeli. ÇO ve ORP göre havalandırma ünitesi optimize edilmeli.
- ✓ Pompalama çalışması optimize edilmeli. Pompa tipi ve boyutu (hp) doğru seçilmeli. Kapasitenin üzerinde ve altında pompa seçilmemeli.
- ✓ AAT'de sistemler akıllı scada sistemi ile uyumlu çalıştırılmalı.
- ✓ Kot farkı akışından maksimum yararlanmak için basma yüksekliği ve atıksuyun girişi (boru sisteminin uygun tasarımı) ve depolamanın stratejik yerleşimini azaltabilirsiniz.

İATT'lerinde; akıllı sistemlerin kurulması, havalandırma sistemlerinin ve atıksu pompalarının optimum çalışması için kontrol sistemleri geliştirilmesidir. AAT'lerinde, sürecin daha iyi kontrolü ve optimizasyonu ile %10-20 oranında enerji tasarrufu sağlanabileceğini tahmin edilmektedir.

İAAT'leri için enerji kimlik belgesi (EKB) oluşturulmalı. Hazırlanan EKB esasına göre her bir AAT'i için uzmanlar tarafından EKB'i hazırlanmalı, Çevre ve Şehircilik Bakanlığı İl Müdürlüğünün uzmanları belgeyi inceledikten sonra ilgili kurma AAT'i için enerji teşviki verilmelidir.



Şekil 1. AAT’i İçin Enerji Verimliliği Belgesi



## 2 ÇEŞİTLİ ÜLKELERDE AAT'SİNDE ENERJİ TÜKETİMİ

İsveç'te AAT'lerinde kişi başına yıllık enerji tüketimi yaklaşık 33-42 kWh/yıldır. İsviçre, Danimarka, Norveç, Almanya ve Finlandiya gibi ülkelerde ise İAAT'lerinde kişi başına enerji tüketimi 23-36 kWh/yıl arasında değişmektedir.

Klasik AAT'lerinde atıksuların toplanması ve pompalanması gibi enerji yoğun ön işlem ünitelerinde enerji tüketimi Kanada'da 0,02-0,1 kWh/m<sup>3</sup>, Macaristan'da 0,045-0,14 kWh/m<sup>3</sup>, Yeni Zelanda'da 0,04-0,19 kWh/m<sup>3</sup> ve Avusturalya'da 0,1-0,37 kWh/m<sup>3</sup> arasında değiştiği rapor edilmiştir.

Klasik AAT'leri işletilmesinde enerji tüketiminin Avusturalya'da 0,46 kWh/m<sup>3</sup>, Çin'de 0,269 kWh/m<sup>3</sup>, ABD'de 0,33-0,60 kWh/m<sup>3</sup> ve Japon'da 0,30-1,89 kWh/m<sup>3</sup> arasında değiştiği tespit edilmiştir.

Klasik AAT'lerinde enerjinin %50-60'ı havalandırma ünitesinde tüketilmektedir.

İleri kademe arıtma tesislerinde (İAAT) enerji tüketimi seçilen teknolojiye bağlı olarak değişmektedir.

Farklı ülkelerde AAT'lerinde enerji tüketimi ve ülkedeki toplam enerji tüketimine oranı **Tablo 1**'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Ülkelerde AAT'lerinde Enerji Tüketimi

Ülkeler	Enerji Tüketimi (kWh/m <sup>3</sup> )	Ülke seviyesinde enerji tüketimine oranı (%)
ABD	0,52	0,6
Çin	0,31	0,25
Almanya	0,40-0,43	0,7
Güney Afrika	0,079-0,41	-
Japonya	0,304 <sup>a</sup>	-
Güney Kore	0,243	1
İsrail	-	10
Avustralya	0,5-1,0	

<sup>a</sup>: Arıtılmış suyun dezenfeksiyonu ve çamur çürütme dahil

AAT'lerinde ülkelerde arası enerji tüketiminde farklar, arıtma seviyesine, deşarj sınır değerlerine ve ülke nüfusuna bağlı olarak değişmektedir. İsrail'de enerji tüketiminin

yüksek olması su kıtlığından, ileri kademe arıtmadan ve arıtılmış suyun yeniden kullanılması ile alakalıdır.

ABD'de Su Sektöründe enerji kullanımı üzerine odaklanan Energy-Water Nexus raporu, yüksek kalitede su üretimi ve arıtmada enerji tüketiminden bahsediyor. ABD elektrik üretiminin yaklaşık %4-13'ü suyla ilgili enerji kullanımı ile bağlantılıdır ve Kaliforniya'da %19'luk artışlar söz konusudur.

Su Çevresi ve Yeniden Kullanım Vakfı (WERF) raporunda; ABD'de üretilen toplam enerjinin %1-4'ünün kamuya ait (belediyeler dahil) 16.000 AAT'nin tükettiği belirtilmiştir.

Çin'de 1856 AAT'de yapılan bir çalışmada birim m<sup>3</sup> atıksu arıtımı için 0.29 kWh elektrik enerjisi tüketildiği tespit edilirken bu değer Japonya'da 0.26 kWh/m<sup>3</sup> atıksu ve ABD'de ise 0.20 kWh/m<sup>3</sup> atıksu olduğu ifade edilmiştir.

Kanada ve Singapur'da atıksu arıtma tesislerinde genel spesifik elektrik enerjisi tüketimi sırasıyla 0.3 kWh/m<sup>3</sup> ve 0.45 kWh/m<sup>3</sup>'dir.

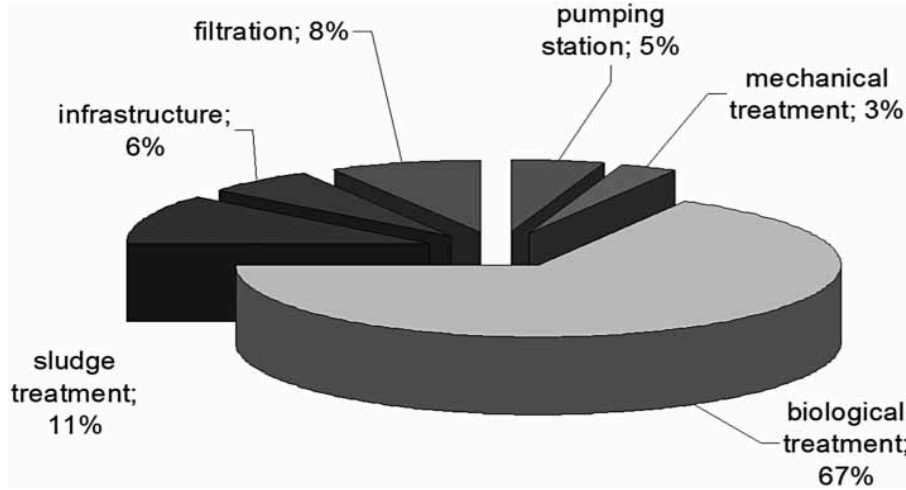
Almanya'daki 10.200 AAT'inde yılda enerji tüketimi, 35 kWh/kişidizayn kritesi.yıl) veya 0.4 kWh/m<sup>3</sup> arıtılmış atıksudur. Almanya'da belediyelerin %20 oranında en büyük enerji tüketimi, AAT'leridir.

İAAT'lerinde azot ve fosfor giderimi de yapıldığı için Japonya'da enerji tüketimi 0,39-3,74 kWh/m<sup>3</sup> arasında değişirken ABD'de 0,43 kWh/m<sup>3</sup>, Tayvan'da 0,41 kWh/m<sup>3</sup> ve Yeni Zelanda'da 0,49 kWh/m<sup>3</sup> ve Macaristan'da 0,45-0,75 kWh/m<sup>3</sup> olarak değişmektedir.

Ters osmos (RO) gibi İAA'ların yapıldığı İspanya ve Arabistan'da sırasıyla 0,8 ila 1,6 kWh/m<sup>3</sup> enerji tüketilmektedir.

Japonya'da 985 atıksu arıtma tesisinde yapılan bir çalışmada, giriş atıksu debisi 600 ila 283,000 m<sup>3</sup>/gün arasında değişen ve yakma ünitesi olmayan klasik AAT'sinde spesifik enerji tüketimi 0,30 ila 1,89 kWh/m<sup>3</sup> atıksu arasında değişmektedir. Yapılan çalışmada, atıksu debisi artıkça spesifik enerji tüketiminin azaldığını göstermektedir.

Almanya'da yapılan bir çalışmada Almanya'daki AAT'lerinde enerji tüketiminin dağılımı **Şekil 2**'de verilmiştir.



**Şekil 2.** AAT'lerinde Enerji Tüketim Oranları

*Şekil 2* incelendiği zaman en büyük enerji tüketiminin biyolojik arıtma tesisi olduğu görülmektedir.

Türkiye'de yapılan bir çalışmada AAT'lerin spesifik enerji kullanımları 28,6-54,3 kW-saat/kışı\*yıl aralığında değişmektedir. AAT'lerinde birim arıtılan atıksu başına enerji tüketiminin 0,24-0,42 kW-saat/m<sup>3</sup> aralığında değiştiği belirlenmiştir. Türkiye'de Gebze AAT'de yapılan çalışmada ise enerji tüketimi 0,41 kWh/m<sup>3</sup> olarak tespit edilmiştir.

ABD ve Japonya'da AAT'i oluşturan çamurların bertarafı için çamur yakma tesislerinde toplam enerjinin %25 ile %50'si tüketilmektedir. Fransa, Danimarka, Almanya ve Belçika'da çamur yakma tesisinde toplam enerjinin %14'ü tüketilmektedir.

### 3 ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE SPESİFİK ENERJİ TÜKETİMİ

AAT’i yönetim sistemi ile arıtma tesisinin performansı düzenli olarak analiz etmeli ve sistemlerin en verimli ekipman ve teknoloji ile çalışması sağlamalıdır.

AAT’leri verimli bir şekilde çalışmadığında zaman maliyet son derece yüksek olabilir. Verimsiz ve eski pompalama ve proses ekipmanı kombinasyonu, eski su yönetimi uygulamaları ile birlikte, daha yüksek işletme maliyetleri ve daha düşük arıtılmış su kalitesi sonuçlanabilir. Bu da arıtma tesisinin kârlılığını olumsuz etkileyebilir.

AAT’lerinde spesifik enerji tüketimi (SET) Tablo *Tablo 2*’da verilmiştir.

**Tablo 2.** AAT’de Spesifik Enerji Tüketimi

Değer	Değerlendirme
0,28 kWh/m <sup>3</sup> atıksu ila 0.61 kWh/m <sup>3</sup> atıksu	kWh/m <sup>3</sup> sadece dikkate alındığında anlamsız hale gelebilir. Arıtma tesislerinde kirlilik yükleri çok değişkendir.
27.4-47.9 kWh/kişi*yıl	Bu değer yaygın olarak kabul edilmektedir ve kolayca belirlenebilir.
0,49-1,88 kWh/ kg arıtılmış KOİ	Bu değer belirlenmesi kolaydır ve en azından KOİ giderim değerini hesaba katar.
0,75 kWh/kg arıtılmış BOİ	Bu yeni uygulanan değer birkaç parametre içerir ve sadece KOİ değil aynı zamanda azotu da hesaba katar. Sadece değer belirlenmesi daha çok zaman almaktadır.

AAT’lerinde ideal toplam enerji tüketimi 16,6 kWh/kişi\*yıl’dır.

1. AAT’de arıtılmış atıksu debisine göre spesifik enerji tüketimi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir.

$$\text{Spesifik enerji tüketimi (kWh/m}^3\text{)} = \frac{\text{(Enerji tüketimi (kWh/gün))}}{\text{(arıtılmış atıksu (m}^3\text{/gün))}}$$

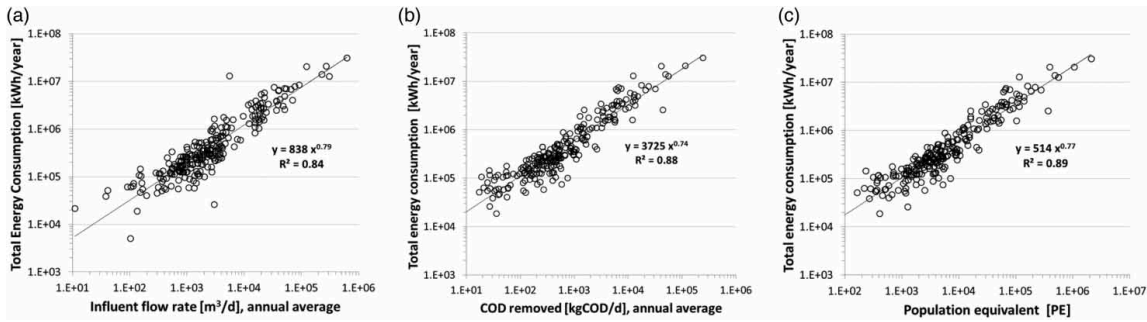
2.  $ECI_{KOI}$ ; AAT’de günlük olarak tüketilen enerjinin günlük olarak giderilen KOI kütlesi arasındaki oran olarak tanımlanır (yıllık ortalama olarak kabul edilir).

$$\text{Spesifik Enerji tüketimi (kWh/kgKOIbertaraf edilen)} = \frac{(\text{Enerji tüketimi (kWh/gün)})}{(\text{kg KOI giderilen/gün})}$$

3.  $ECI_{PE}$ , arıtma tesisinde yıllık enerji tüketiminin hizmet sunulan PE (nüfus) arasındaki oran olarak tanımlanır.

$$\text{Spesifik Enerji tüketimi} \left( \frac{\text{kWh}}{\text{kişi yıl}} \right) = \frac{(\text{enerji tüketimi (kWh/yıl)})}{(\text{nüfus (PE)})}$$

AAT’lerinin kapasiteleri (m<sup>3</sup>/gün) düştükçe enerji tüketimleri artar. AAT’nin kapasitesi (m<sup>3</sup>/gün) arttıkça enerji tüketimi azalır (*Şekil 3*).



**Şekil 3.** AAT’de Enerji Tüketimi, Yıllık Günlük Ortalama Atıksu Debisine, Giderilmiş KOI Yüküne ve Hizmet Verilen Nüfusa Bağlı Olarak Değişir

Kısaca düşük kapasiteli tesislerin enerji tüketimleri yüksektir.

AAT’lerinde ülkelerde arası enerji tüketiminde farklar, arıtma seviyesine, deşarj sınır değerlerine ve ülke nüfusuna bağlı olarak değişmektedir. Aşağıdaki Tablo **Tablo 3**’de bazı ülkelerdeki spesifik enerji tüketim değerleri özetlenmiştir.

**Tablo 3.** Spesifik Enerji Tüketim Değerleri

Anahtar Performans Göstergesi	Tesis	Spesifik Enerji Tüketimi	Notlar	Referanslar
kWh/kişi.yıl	Rzeszow (Polonya)	48.2	400 k kişi ileri WWTP	<a href="#">Mastoń (2017)</a>
	Kronso (Polonya)	59.1	117 k kişi ileri WWTP	<a href="#">Trojanowicz (2016)</a>
	Slupsk (Polonya)	16	250 k kişi BNR WWTP	<a href="#">Zaborowska et al. (2017)</a>

Anahtar Performans Göstergesi	Tesis	Spesifik Enerji Tüketimi	Notlar	Referanslar
	Bochum-Ölbachtal (Almanya)	23	213 k kişi WWTP before modifications	<a href="#">Marner et al. (2016)</a>
	Bochum-Ölbachtal (Almanya)	12	213 k kişi WWTP after modifications	<a href="#">Marner et al. (2016)</a>
	16 Avusturya WWTPs	28.4	16 Avusturya WWTPs, PE > 100 k	<a href="#">Haslinger et al. (2016)</a>
	7 Avusturya WWTPs	33.6	7 Avusturya WWTPs, 50–100 bin kişi	<a href="#">Haslinger et al. (2016)</a>
	55 Avusturya WWTPs	36.8	55 Avusturya WWTPs, 20–50 bin kişi	<a href="#">Haslinger et al. (2016)</a>
	24 Avusturya WWTPs	48.2	24 Avusturya WWTPs, 10–50 bin kişi	<a href="#">Haslinger et al. (2016)</a>
	Burg (Almanya)	15.3	120 bin PE, Konvensiyonel WWTP	<a href="#">Torregrossa et al. (2018)</a>
	Stuttgart-Mühlhausen (Almanya)	41.5	1.200. bin kişi ileri WWTP	<a href="#">Zettl (2015)</a>
kWh/kg KOİ <sub>giderilen</sub>	Rzeszow (Polonya)	0.49–0.68	400 bin kişi ileri WWTP	<a href="#">Mastoń (2017)</a>
	43 WWTPs Gelişmiş Ülkelerde	0.69	43 WWTPs, > 100 bin kişi	<a href="#">Longo et al. (2016)</a>
	35 WWTPs Gelişmiş Ülkelerde	0.82	35 WWTPs, 50–100 bin kişi	<a href="#">Longo et al. (2016)</a>
	89 WWTPs Gelişmiş Ülkelerde	1.02	89 WWTPs, 10–50 bin kişi	<a href="#">Longo et al. (2016)</a>
	Changi WRP (Singapur)	1.88	800 km <sup>3</sup> /gün BNR WWTP	<a href="#">Yeshi (2015)</a>
	177 WWTPs in Valencia region (İspanya)	1.68	400 km <sup>3</sup> /gün	<a href="#">Hernández-Sancho et al. (2011)</a>
	Jurong (Singapur)	0.58	990 bin PE ileri WWTP	<a href="#">NEWRI (2009)</a>
	Beijing Gaobeidian (China)	0.75	2,4 milyon kişi ileri WWTP	<a href="#">Gans et al. (2007)</a>
kWh/kg BOİ <sub>giderilen</sub>	Rzeszow (Polonya)	1.03–1.57	400 bin kişi ileri WWTP	<a href="#">Mastoń (2017)</a>
	Slupsk (Polonya)	0.75	250 bin kişi BNR WWTP	<a href="#">Zaborowska et al. (2017)</a>

**Tablo 3'**de görüldüğü gibi nüfusa bağlı olarak küçük kapasiteli AAT'lerinde kişi başına enerji tüketiminin 100 bin nüfuslu AAT'sine göre oldukça yüksek olduğu görülmektedir.

Yüksek kapasiteli AAT'lerine giren kirlilik yükleri arttıkça birim enerji tüketimleri azalmaktadır.

Enerji verimliliği açısından; AAT'lerinin yatırım maliyeti, işletme maliyeti ve ekonomik faydası esas alınarak hesaplanmalıdır. Temel olarak, gelişmiş kontrol sistemleri ile işletme maliyetlerini azaltmak ve enerji geri kazanımını artırarak ekonomik faydayı arttırmak enerji yönetimi açısından oldukça önemlidir.

Karbon ayak izi analizi; Karbon ayak izi, AAT'lerinde kullanılan enerji miktarına ve AAT'lerinden sera gazı salımlarının toplam miktarlarına göre hesaplanır. Havalandırma ve pompalama verimliliğini artırmak ve yerinde enerji geri kazanımı ile enerji tüketimini azaltmak, AAT'lerinde karbon ayak izinin azaltılmasına yardımcı olacaktır.

Enerji verimliliğinin artırılması, AAT'lerinin maliyetlerini yönetmek ve uzun vadeli operasyonel sürdürülebilirliği sağlamak için en etkili yollarından biridir.

## 4 ARITMA TESİSİ KADEMERİNDE ENERJİ TÜKETİMİ

Çeşitli ülkelerde, AAT'leri havalandırma, çamur susuzlaştırma, pompalama ve diğer ünitelerinde tüketilen toplam elektrik enerjisi tüketimi dağılımı **Tablo 4**'de verilmiştir.

**Tablo 4.** Çeşitli Ülkelerde AAT'lerinde Enerji Tüketimi

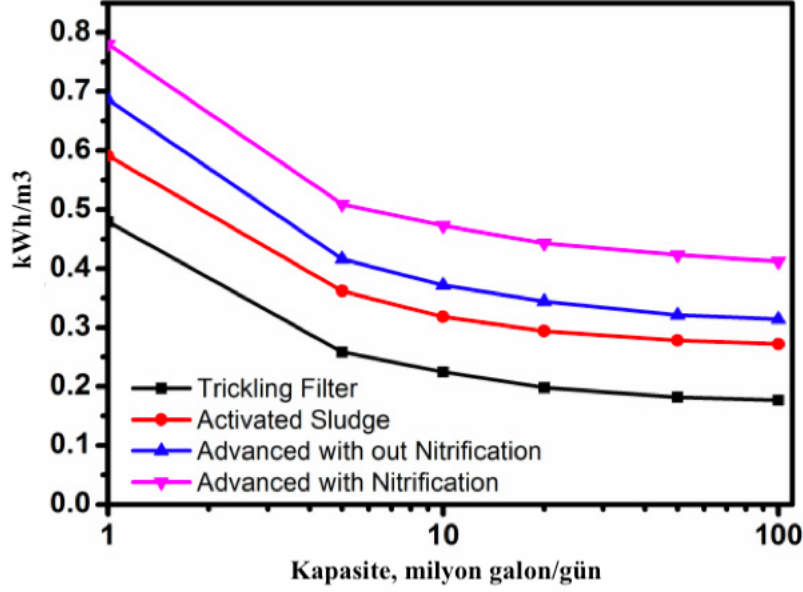
Kaynaklar	Spesifik Enerji Tüketimi (kWh/m <sup>3</sup> )	Havalandırma (%)	Çamur arıtma (%)	Pompalama (%)	Diğerleri (%)
Çin'de 2,4 milyon nüfus kapasiteli ileri atıksu arıtma tesisi	0.26	57	5	-	38
İtalya'da 2,7 milyon nüfus kapasiteli ileri atıksu arıtma tesisi	0.3	51	29	-	20
Avusturya'da 250 bin nüfus kapasiteli modern atıksu arıtma tesisi	0.32	57	13	9	21
Singapur'da ileri atıksu arıtma tesisi (MBR tekniği dahil)	0.37-1.6	60	12	12	16
İsveç'te 500 bin nüfus kapasiteli modern atıksu arıtma tesisi	0.48	48	14	9	29
Polonya'da 250 bin nüfus kapasiteli ileri atıksu arıtma	0.48	53	-	30	17

**Tablo 4** incelendiği zaman AAT'lerinde en yüksek spesifik enerji tüketiminin havalandırma ünitesinde olduğu görülmektedir. **Tablo 4**'de verilen veriler incelendiği zaman AAT'lerinde arıtılmış atıksu başına enerji tüketimini  $0,2 \pm 0,06$  kWh/m<sup>3</sup>'e kadar düşürmek mümkündür.

Klasik AAT'lerinde toplam enerjinin yaklaşık %50-60'ı havalandırma ünitesinde, %15-25 çamur bertarafında ve %15 ise resirkülasyon pompalama dahil ikincil çöktürmede tüketilmektedir.

AAT'i kapasitesi, boyutu (nüfus, eşdeğer, organik yük veya hidrolik yük) enerji tüketiminde önemli etkiye sahiptir. Çeşitli AAT'i tekniğine ve kapasitesine bağlı olarak birim m<sup>3</sup> atık su debisine enerji tüketimi (kWh) **Şekil 4**'de verilmiştir. Beklendiği gibi, bu dört arıtma sürecin tümünün birim elektrik tüketimi, tesisin büyüklüğü arttıkça azalmaktadır.

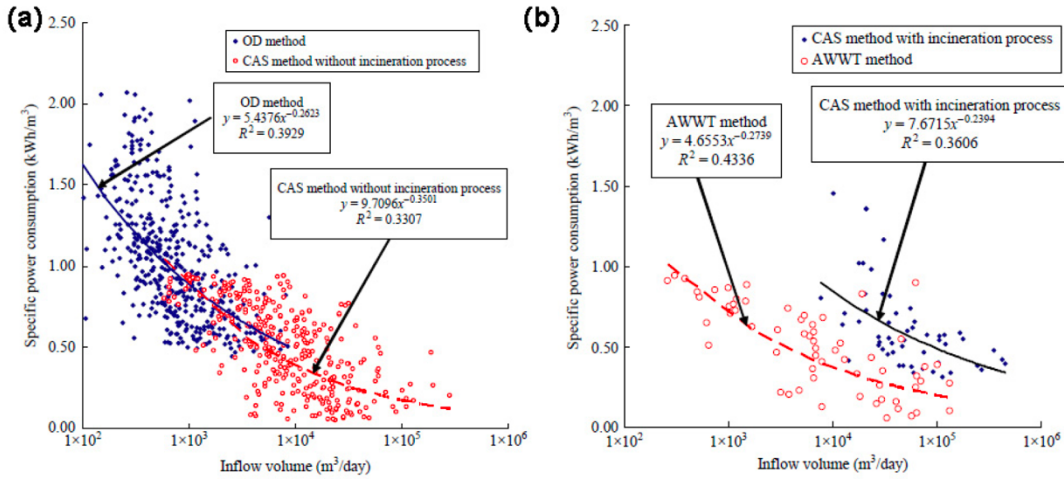




**Şekil 4.** Temsili Atıksu Arıtma Prosesleri için Birim Elektrik Tüketimindeki Boyutlar ile Değişimler (Not: mgd günde milyon galon anlamına gelir).

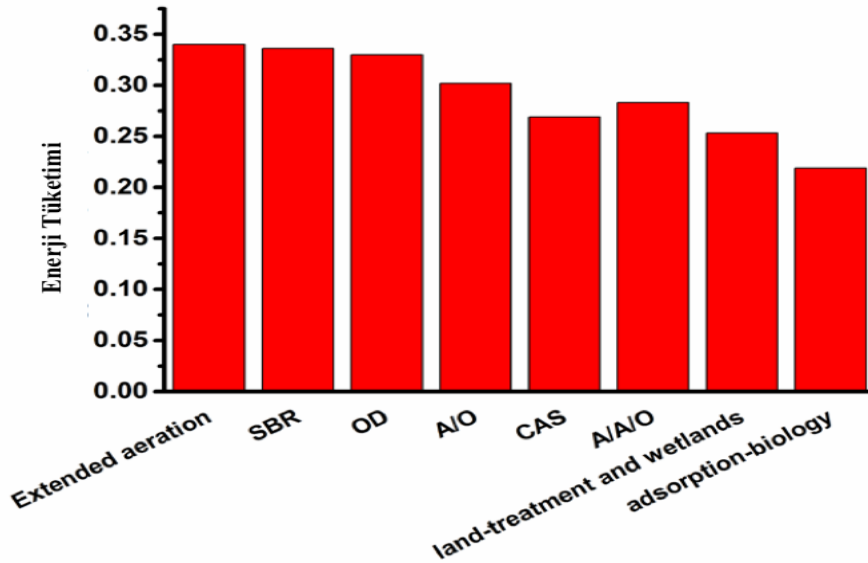
ABD'deki 1500 AAT'i verileri kullanılarak tespit edilen *Şekil 4* incelendiği zaman AAT'si kapasitesi düştükçe atıksu yüküne bağlı olarak enerji tüketimi ciddi oranda artmaktadır. Ayrıca, arıtma tekniğine bağlı olarak enerji tüketiminde önemli farklılıkların olduğu görülmektedir.

*Şekil 5*, Japonya'da ÇO yöntemi ve klasik aktif çamur (CAS) yöntemi için enerji girişinin dağılımını göstermektedir. *Şekil 5*'a gösterildiği gibi, ÇO yöntemi için, akış miktarı 100-8.500 m<sup>3</sup>/gün ve enerji tüketimi 0.44-2.07 kWh/m<sup>3</sup> idi. Yakma olmadan CAS yöntemi için, giriş miktarı 600-283.000 m<sup>3</sup>/gün ve enerji tüketimi 0.30-1.89 kWh/m<sup>3</sup> olmuştur. Şekil 3 5b'deki enerji tüketimi, gelişmiş atık su arıtma sisteminde benzer bir değişim eğilimi göstermektedir. Bu sonuçlar artan enerji girişiyle birlikte birim enerji tüketiminin azaldığını göstermektedir. Buna ek olarak, 2011 yılında Slovakya'da 68 AAT'den elde edilen enerji yoğunluğuna ilişkin istatistiksel verilere dayanarak, daha büyük AAT'ler, daha küçük olanlardan çok daha yüksek enerji verimliliği göstermektedir. Günlük girişi 5.000 m<sup>3</sup>/günün üzerinde olan atık su arıtma tesislerinin 0.331-0.414 kWh/m<sup>3</sup>'lük nispeten istikrarlı bir enerji talebi vardır.



**Şekil 5 (a)** Yakma İşlemi Olmadan OD Yönteminin Ve CAS Yönteminin Enerji Tüketim Dağılımı, **(b)** Japonya Yakma İşlemi Ve Gelişmiş Atık Su Arıtma Yöntemiyle CAS Yönteminin Enerji Tüketimi Dağılımı

Fiziksel arıtma gibi ön arıtma işlemi sonrası ve çamur bertaraf kısmı dışında evsel atıksuların farklı arıtma teknolojilerine göre enerji tüketimleri **Şekil 6**'de verilmiştir.

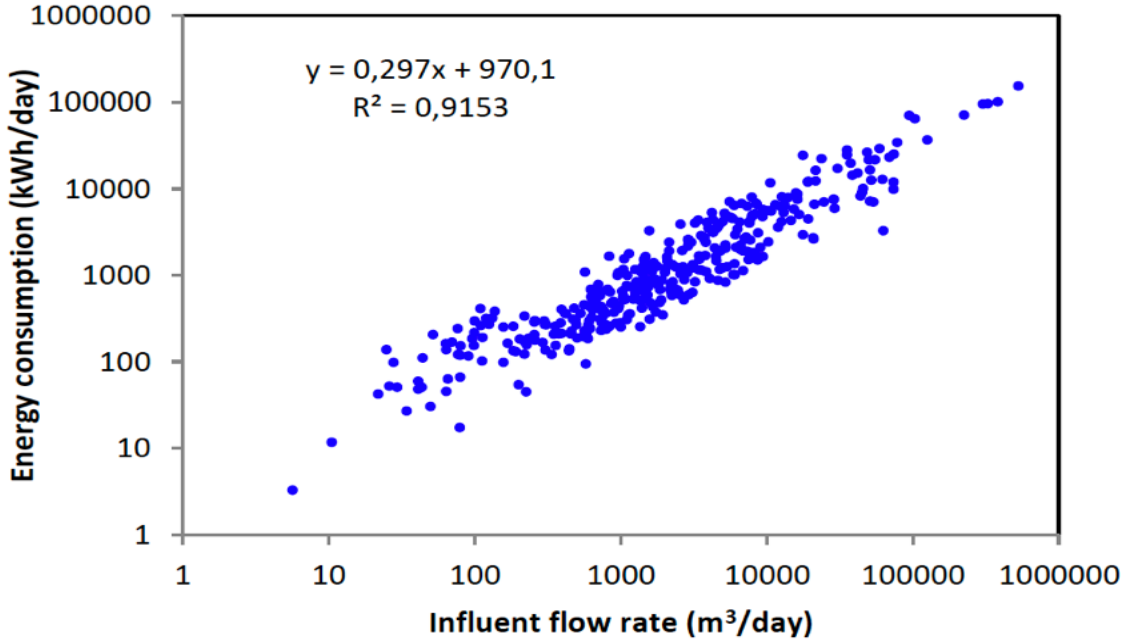


**Şekil 6.** Farklı İleri Atıksu Arıtma Tekniklerine Göre Enerji Tüketimleri

**Şekil 6** **Şekil 6**'de verilen evsel atıksuların farklı arıtma teknikleri için projelendirme çalışması yapmak doğru değildir.

Karbon yanında azot ve fosfor gibi besi maddelerinin ileri kademe arıtmanın yapıldığı AAT'lerinde enerji tüketimi yükseltebilir.

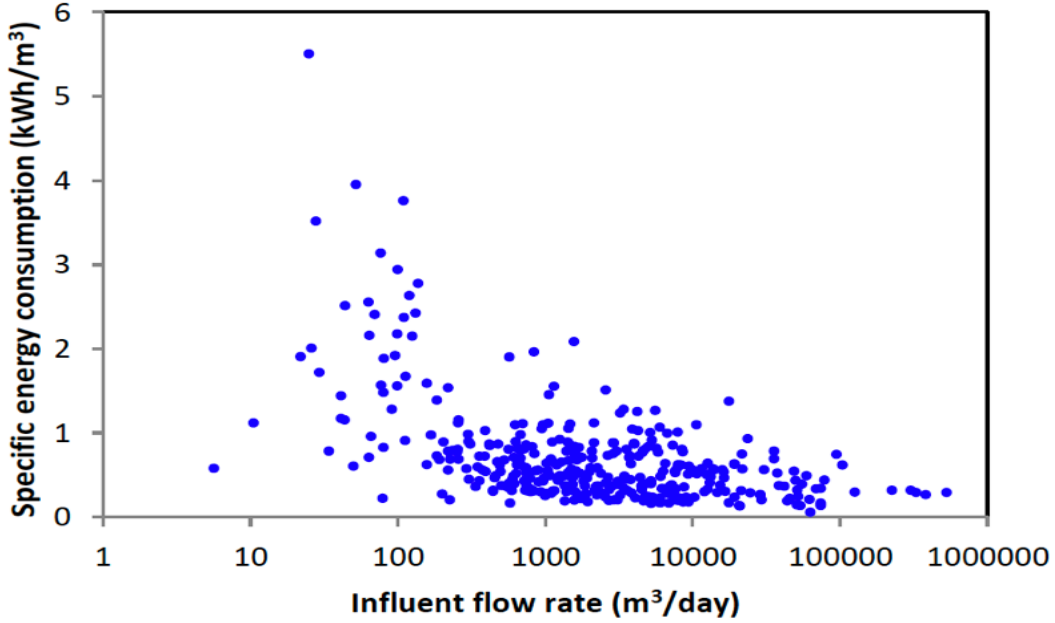
Enerji tüketimi ile AAT'ı hizmeti verilen nüfus eşdeğeri arasında bir korelasyon vardır (*Şekil 7*). Arıtılmış atık su debisi başına enerji tüketimi, tesisin boyutuna göre değişir ve daha büyük kapasiteli tesisler için daha düşüktür. PE başına enerji tüketimi analiz edilen numunelerde önemli ölçüde değişir. Daha küçük tesisler için 2000 kWh/PE\*yıl'ye kadar değerler bulunurken, daha büyük tesisler 20-60 kWh/PE \*yıl arasındaki enerji tüketimi ile karakterize edilir.



*Şekil 7.* Atıksu Debisine Bağlı Olarak Enerji Tüketimi

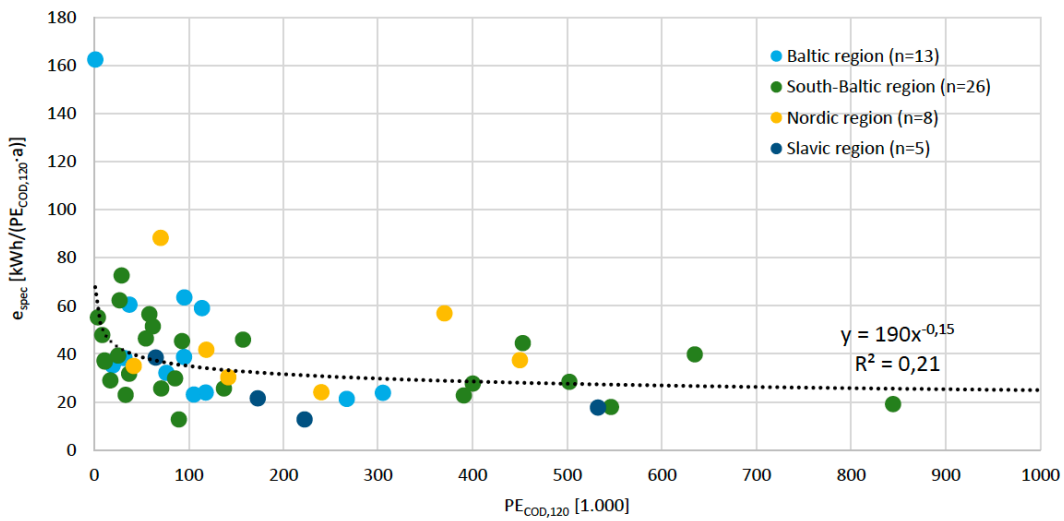
*Şekil 7* incelendiği zaman atıksu debisine bağlı olarak enerji tüketiminin değiştiği görülmektedir.

*Şekil 8*'de arıtılmış organik yük ile enerji tüketimi arasında güçlü korelasyon vardır. Giderilmiş bir KOİ kg başına özgül enerji tüketimi açısından, bu endeksin daha küçük arıtma tesisi için normalde daha yüksek olduğu ve orta ila büyük arıtma tesisleri için çok büyük bir değişkenlik sağladığı görülebilir.



Şekil 8. Atıksu Debisine Bağlı Olarak SET’i

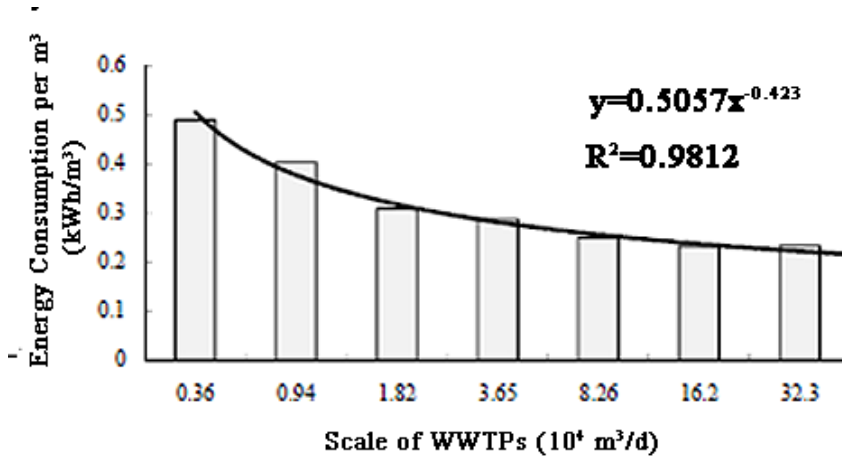
Diğer yandan nüfusa bağlı olarak enerji tüketimi  $\text{kWh}/(\text{Nüfus}_{\text{COD},120} \cdot \text{yıl})$  Şekil 9’de verilmiştir. Büyük kapasiteli AAT’lerinin küçük kapasiteli AAT’lerinden daha fazla enerjiye bağımlıdır ve enerji verimli çalıştırılması gerektiği belirtilmiştir, ancak takılan bir güç fonksiyonu yalnızca düşük bir korelasyon katsayısını ortaya koymaktadır. Ayrıca, daha büyük AAT’leri, büyük ve genel olarak daha verimli ekipman, özellikle daha büyük pompalar ve jeneratörler kullandıklarından, ölçek ekonomilerinden faydalanabilirler.



Şekil 9. Nüfusa Bağlı Olarak Spesifik Enerji Tüketimi

Büyük kapasiteli AAT'lerinde enerji tüketimi 0,13 kWh/m<sup>3</sup> veya 20 ila 60 kWh/kişi\*yıl iken küçük tesislerde bu miktar 5.5 kWh/m<sup>3</sup> veya 2000 kWh/kişi\*yıl'a kadar çıkmaktadır. Küçük kapasiteli AAT'leri aşırı enerji tüketmektedirler ve işletme maliyetleri oldukça artmaktadır.

AAT'leri kapasitelerine bağlı olarak birim m<sup>3</sup> başına enerji tüketimi **Şekil 10'**de verilmiştir.

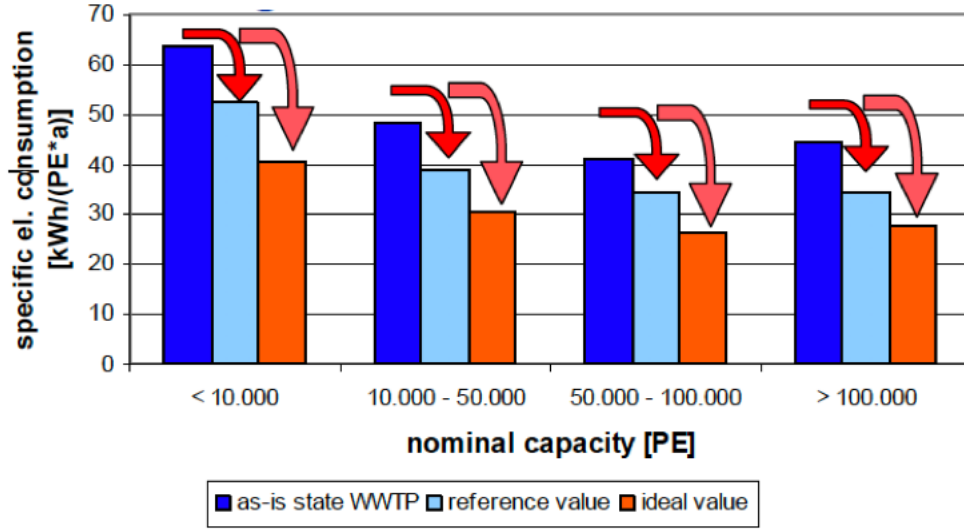


**Şekil 10.** Çın'de AAT kapasitesine Bağlı Olarak Enerji Tüketimi

AAT'lerinin kapasitesi arttıkça elektrik tüketimi azalır. 3600 m<sup>3</sup>/gün kapasiteli bir AAT işleminde 0.5 kWh/m<sup>3</sup> arıtılmış atıksu, elektrik enerjisi tüketilirken 323.000 m<sup>3</sup>/gün kapasiteli AAT'i işleminde yalnızca 0.22 kWh/m<sup>3</sup> elektrik enerjisi tüketilmektedir. Büyük kapasiteli AAT'de enerji tüketimi en az %50 daha azdır. Tabii ki diğer işlemlerde o oranda daha ekonomik olmaktadır.

AAT'lerinde enerji tüketimleri arıtılan atıksu debilerine ve eşdeğer nüfuslara göre değişmektedir. AAT'lerinin özgül enerji tüketimleri giriş atıksu debisinin ve eşdeğer nüfusun artmasıyla azalmaktadır.

AAT'lerini enerji verimli hale getirirken deşarj sınır değerlerini sağlayacak şekilde tesisin üniteleri projelendirilmeli, uygulamaya konmalı ve tekniğine uygun işletilmelidir. Nüfusa, normal ve ideal arıtma şartlarına bağlı olarak AAT'leri çalışmalarının sonuçları **Şekil 11'**de verilmiştir.



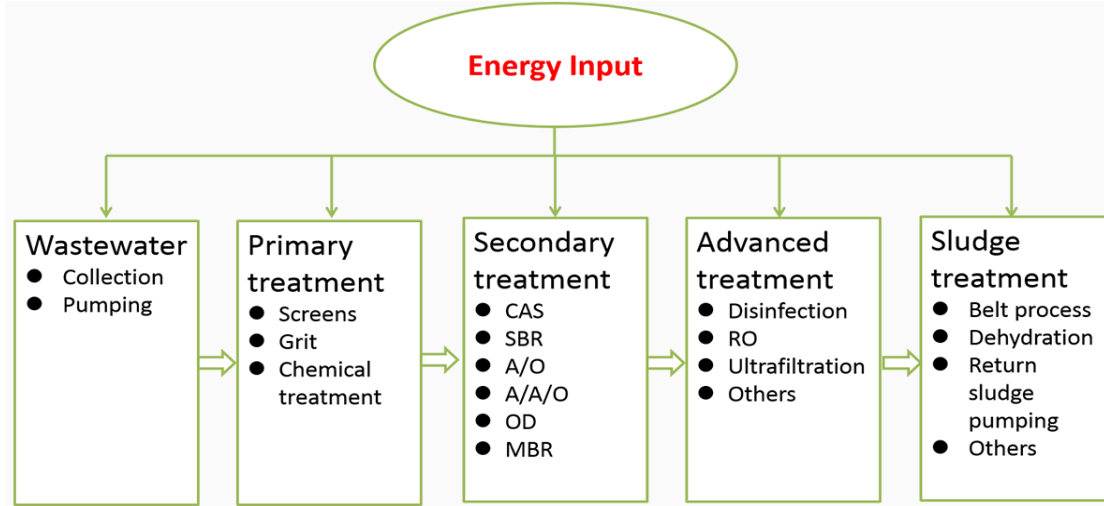
**Şekil 11.** Nüfusa, Normal ve İdeal Şartlara Bağlı Olarak Enerji Tüketim Değişimleri  
100.000 nüfuslu bir atıksu arıtma tesisinde, 10.000 nüfuslu atıksu arıtmaya göre yaklaşık %50 daha az enerji tüketilmektedir.

AAT'de tahrip olmuş veya zarar görmüş havalandırıcılarla enerji verimli havalandırma yapmak mümkün değildir. **Şekil 12'**de tahrip olmuş havalandırıcı örneği görülmektedir. Bu tür havalandırıcılar derhal değiştirilmelidir.



**Şekil 12.** Tahrip Olmuş Havalandırıcı

AAT ile ilgili tüm teknolojik prosedürler ve çamur bertaraf teknolojilerindeki pompalama, karıştırma, havalandırma, çöktürme, çamur susuzlaştırma ve diğer işlemler için enerji tüketir. Farklı AAT'lerinde tesis kapasitesine, arıtma verimliliğine, arıtılmış atıksuyun geri kazanılmasına, arıtma tekniğine ve arıtma yerinin özelliğine bağlı olarak çeşitli tekniklerde enerji girdileri *Şekil 13*'da verilmiştir.



**Şekil 13.** Farklı Teknolojilerle AAT'lerinde Enerji Tüketimleri

*Şekil 13*'da verilen kademelerin bazıları AAT'lerinde uygulanmayabilir.

Atıksu arıtma tesislerine en önemli enerji giderlerinden birisi arıtma çamuru bertarafıdır. AAT'deki toplam enerjinin ortalama %8'i tüketilir.



## 5 AAT'LERİNDE ENERJİ NÖTR ÇALIŞMASI

Türkiye'deki belediyeler, mevcut AAT'leri için enerji verimliliği çalışmasını başlatılmalıdır. Enerji verimli işletme şartlarını sağlayacak firmanın maliyeti, tasarruf edilen enerji giderlerinden kısa süre içinde amorti edilebilir.

AAT'lerinde kişi başına mevcut, hedef ideal ve toplam enerji tüketimi ve hedef değeri farkı **Tablo 5'**de verilmiştir.

**Tablo 5.** Geleceğe Yönelik Hedefler İçin AAT'lerinde Enerji Tüketimi

Enerji	Mevcut durum. (kWh/kişi-yıl)	Hedef Değer. (kWh/kişi-yıl)	İdeal Değer (kWh/kişi-yıl)	Hedef Değer Farkı (kWh/kişi- yıl)
Kişi başına toplam spesifik enerji tüketimi	51	36	28	-15
Kişi başına havalandırma ünitesinde toplam spesifik enerji tüketimi	33	23	18	-10

Hedef değer: Temsil edilen AAT'leri çeşitli anketlerinde belirlenmiştir. İdeal değer: İdeal bir AAT modelinde geliştirilmiştir

Aylık enerji faturaları ve arıtılan su miktarlarına göre AAT'lerinde birim arıtılan su başına enerji tüketimleri, kWh/m<sup>3</sup> cinsinden hesaplanabilir. Bu bir genel tespittir. Bu verilerle AAT'lerinde iyileştirme ve enerji verimliliği artırma çalışması yapılamaz.

AAT'leri, enerji nötr çalışmasına altlık oluşturmak ve sera gazı salımlarını azaltmak için toplamda ve her bir ünite de tüketilen enerji miktarlarının tespit edilebilir. Her bir ünite de ve toplamda enerji tüketim verileri tespit edilirse işletme bazında enerji tüketiminin azaltılması ile ilgili strateji ortaya konabilir.

Hesaplama sonucu elde edilen spesifik enerji tüketim verileri, normal ve ideal şartlarda enerji tüketimi ile karşılaştırılması yapılabilir. Elde edilen verilere göre her işletmenin her bir ünitesinde enerji tüketimini azaltmak için çözüm yolları geliştirilir.

İdeal şartlarda her birimde tüketilen enerji miktarı, (kWh/(kişi\*yıl)) cinsinden **Tablo 6'**de verilmiştir.



**Tablo 6.** İdeal Bir Evsel AAT Ünitelerinde Tüketilen Elektrik Enerjisi Miktarı

Üniteler	İdeal Spesifik Tüketim (kWh/(kişi*yıl))
Havalandırma ünitesi	13,72
Resirkülasyon pompaları	0,51
Karıştırma ünitesi	1,75
Aktif çamur geri devri pompaları	0,62
<b>Toplam</b>	<b>16,6</b>

*Tablo 6* incelendiği zaman en büyük enerji tüketiminin havalandırma ünitesinde olduğu görülmektedir.

Burada en önemli esas AAT'lerinde normal şartlarda arıtılmış atıksuyun deşarj standartlarını sağlamasıdır. AAT'lerinde arıtılmış su deşarj standartlarını sağlaması şartı ile her bir üniteye enerji tüketimleri esas alınarak tesiste yapılması gereken strateji ortaya konarak hem enerji bağımlılığı ve işletme maliyeti minimize edilebilir hem de sera gazı CO<sub>2</sub> salımı azaltılabilir. Böylece artan enerji maliyetleri, AAT'nin her bir ünitesinde minimize edilerek kontrol altına alınabilir.

AAT'lerinin fiili toplam enerji tüketim verileri aylık ve yıllık olarak temin edilebilir. Ancak, arıtma tesislerinde ünite bazında fiili enerji tüketim değerleri çoğu tesislerde mevcut değildir. Bu nedenle tesiste bulunan her bir ünite ayrı ayrı incelenmeli, ünitelerin sayıları, kurulu güçleri ve günlük çalışma süreleri dikkate alınarak enerji tüketim miktarları hesaplanmalıdır.

Atıksuların deşarj standartlarını sağlayacak şekilde arıtılmasında spesifik enerji tüketimi optimizasyonu ve verimli kullanımı için her bir üniteye spesifik enerji tüketiminin (kWh/m<sup>3</sup>) tespit edilmesi ve verilerin değerlendirilmesi enerji verimli yönetim için oldukça önemlidir.

Havalandırma ünitesinde ÇO ölçülmesi ve ÇO 1-1,2 mg/l olmalı. Oksijen değeri 1,0'nin altına havalandırma hızı artırılmalı ve 1,2'den yüksek ise havalandırma hızı düşürülmelidir. Ayrıca, mikserlerin sadece havalandırıcı çalıştırılmadığı zaman çalışması ile enerji kullanımı daha da azalır.

Evsel AAT'lerinin genel olarak üniteleri;

1. Terfi merkezleri,
  2. Ön arıtma üniteleri (ızgaralar, konveyörler, kum tutucular),
  3. Biyolojik arıtma ünitesi (blowerlar (üfleyiciler) veya yüzey havalandırıcılar, karıştırıcılar, gezer köprüler, çamur geri devir pompaları ve pompalama),
  4. Çamur yoğunlaştırma,
  5. Çamur susuzlaştırma ve kurutma,
  6. Diğer üniteler,
- olarak sınıflandırılır.

AAT'lerindeki havalandırma, pompalama, çamur susuzlaştırma, motorlar, mekanik karıştırma, elekler, ızgaralar, son çöktürme tankları, sıyırıcılar gibi ünitelerde elektrik tüketimine ilişkin veriler, ortalama 4 hafta gibi süre boyunca her 15 dakikada bir enerji tüketimleri (kW) (Fluke 1735 ve Fluke 435 II) üç fazlı güç ve enerji kaydedicilerle tespit edilebilir. Böylece AAT'si çalışırken nerede ve ne kadar güç tüketildiği tespit edilebilir ve enerjinin verimli kullanılması için gereken önlemler alınabilir. Fluke kaydedicileri, enerji kullanımını devamlı olarak kaydederek tasarruf imkanlarını hızla ve kolayca tanımlamasında yardımcı olur ve hızlı bir yatırım getirisi sağlar. Fluke'un üç fazlı güç ve enerji kaydedicileri, enerji tasarrufları için delil niteliğinde kapsamlı bir veri ve rapor yelpazesi sunar.

Her bir üniteye elektrik enerjisi tüketimi;

$$Ep = \frac{P \times T}{Q}$$

denklemler ile hesaplanır. Burada Ep; spesifik enerji tüketimi, kWh/m<sup>3</sup>, Q; toplam atıksu debisi, m<sup>3</sup>/gün, P, elektrikli motorun kilovat cinsinden nominal gücü (kW) ve T, çalışma saati (saat/gün)'dir.

Havalandırma için gerekli oksijen ihtiyaçlarının hesaplanması, aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanabilir (kg O<sub>2</sub>/gün);

$$\text{kg O}_2/\text{day} = 1.6(\text{BOD}_{\text{giren yük}} - \text{BOD}_{\text{çıkan yük}}) + 3.5((\text{NH}_3_{\text{giren yük}} - \text{NH}_3_{\text{çıkan yük}}) + \text{NO}_3_{\text{çıkan yük}}).$$

Oksijen sağlamak için gereken elektrik tüketimi hesaplanabilir;

$kWh/gün = (Oksijen\ ihtiyacı)/((mekanik\ havalandırma\ verimliliği) * (Mekanik\ havalandırma\ kapasitesi))$

Atıksu arıtma tesislerinde elektrik enerjisi tüketen her bir güç cihazlarının (terfi merkezi; pompalar, ızgara, vanalar, kapaklar, AAT; pompalar, blowerlar, yüzeysel havalandırıcılar, ızgaralar, kum tutucu blowerlar, çamur pompaları, çamur geri devir pompaları, geri yıkama pompası, sıyırıcılı döner köprüler, dekantör (susuzlaştırma), süzüntü suyu terfi pompaları, köpük pompaları, mikserler, deşarj pompaları, konveyörler gibi) her birinin envanterleri çıkartılır. Her bir atıksu arıtma tesisi sahasında arıtma ünitelerinde ekipman tipleri, nominal güçleri (ölçülerek belirlenebilir), çalışma süreleri, çalışma esnasında atıksu debisi ve spesifik enerji tüketimleri her bir ünite için tek tek belirlenir (*Tablo 7*).

**Tablo 7.** Elektrik Tüketiminin Ekipmana Göre Dağılımı ve Sahada Kurulu Bulunan Küme Elektrik Veri Kaydedicilerinden Toplanan Karşılaştırılması

Ünite	Miktarı	Nominal güç (kW)	Ölçülen Güç (kW)	Çalışma süresi (saat/gün)	Atıksu debisi (m <sup>3</sup> /gün)	Spesifik enerji tüketimi (kWh/m <sup>3</sup> )
Atıksu Pompaları						
Blowerlar						
Mekanik karıştırıcılar						
Çamur pompaları						
Sıyırıcılı Döner köprüler						
Dekantörler						
Süzüntü suyu pompaları						
Geri devir pompaları						
Karıştırıcılar						
Izgaralar						
Elekler						
Çamur geri devir pompaları						
Motorlar						
Aydınlatma						

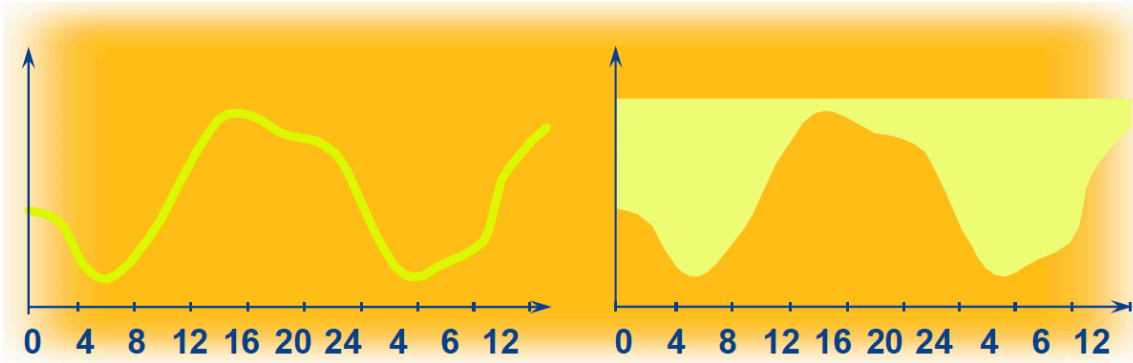
*Tablo 7*'de verilen her bir üniteye fiili olarak çalışan ekipmanların sayılarına, nominal güçlerine ve çalışma sürelerine göre veriler tespit edilebilir.

Fluke'un (Fluke 1735 and Fluke 435 II) üç fazlı güç ve enerji kaydedicileri ile AAT'deki her bir ünitenin ekipmanının enerji tüketimi (kW) birimi cinsinden 4 hafta boyunca her 15 dakika süreyle ölçülür ve debi metre ile atıksu debileri (m<sup>3</sup>/saat) tespit edilir. Bu veriler ışığında her bir ekipman tipinin spesifik enerji tüketimi (kWh/m<sup>3</sup> atıksu) cinsinden hesaplanır.

Diğer yandan, gece gündüz, hafta içi ve hafta sonu ve yağışlı-kuru havalarda her bir ünite ekipmanında enerji tüketim ve atıksu debisi ölçümleri yapılır.

Ayrıca AAT'deki binaların ısıtma ve soğutmasında ve arıtma tesisinin genel aydınlatılması için tüketilen enerji miktarları tespit edilmeli ve toplam enerjiden çıkartılarak işletmede kullanılan enerji miktarı hesaplanabilir. AAT'lerinde ısıtma, soğutma ve aydınlatma (elektrik şebekesi) için enerji kullanımı, toplamdaki enerji tüketiminin %6'sı olarak alınmaktadır.

Tipik bir AAT, atık su arıtma tesisi, 24 saatlik bir süre boyunca yük dalgalanmalarını 5 faktör kadar yaşayabilir (*Şekil 14*).



**Şekil 14.** Havalandırma Kontrolü: Biyolojik Yükteki Dalgalanmalar

Manuel veya zayıf havalandırma kontrolü aşırı veya %50-65'e varan fazla enerji tüketimi neden olabilir.

AAT'de kWh cinsinden enerji tüketimi karşılığı sera gazı CO<sub>2</sub> salımı;

$$\text{kg} \frac{\text{CO}_2 \text{ eşdeğeri}}{\text{gün}} = \frac{\text{kWh}}{\text{gün}} \times 0.44548$$

denklemleri ile hesaplanabilir.

## 6 AAT'LERİNDE “ENERJİ NÖTRLÜĞÜ”

AAT'lerinde cihazların gücünün doğru seçimi ve kullanım süresinin kontrol edilmesi enerji verimliliği açısından önemlidir. Havalandırma ve pompalama gibi ünitelerde gerektiğinden yüksek kapasitede ekipmanların seçilmesi enerji tüketimini artırır.

AAT'lerinde “enerji nötrlüğü” veya “sıfır enerji” tüketimine ulaşmak için, çeşitli önlemler alınabilir. Bunlar;

1. Atıksu arıtma işlemlerinde enerji tüketimini azaltmak,
2. İç kaynaklardan enerji geri kazanımını arttırmak,
3. Yeterli dış yenilenebilir enerji kaynakları eklemek.

Yukarıda üç şık olarak verilen önlemlerin uygulamaya konması için Türkiye’de her bir atıksu arıtma tesisinde tüketilen **Tablo 8**'de verilen benzer çalışmalar yapılmalı ve alınması gereken önlemler ortaya konmalıdır.

Atıksu arıtma tesislerini enerji verimli ve sıfır enerjili hale getirmek için;

1. Havalandırma, çamur susuzlaştırma, resirkülasyon pompaları, karıştırma ünitesi, aktif çamur geri devri pompaları gibi işletmelerde enerji verimliliği,
2. Biyogaz, gazlaştırma gibi enerji üretimi,
3. Güneş enerjisi, HES gibi yenilenebilir enerji üretimi,

gibi her bir konuda ayrı ayrı çalışmalar yapılmalıdır. 2 ve 3 başlıklı konular ayrı bir çalışmada detaylı olarak verilecektir.

Atıksu arıtma tesislerinde en büyük enerji giderleri, havalandırma, karıştırma, pompalama ve çamur susuzlaştırma üniteleridir.

**Tablo 8.** Almanya’da Yapılan Bir Çalışmada AAT’lerinde Enerji Tüketim Kademeleri

Tüketici	Tüketim (kWh/yıl)	Spesifik tüketim (kWh/kişi-yıl)	İdeal tüketim (kWh/kişi-yıl)
Havalandırma	2.172.000	10,2	13,7
Resirkülasyon	1.000.000	4,7	0,5
Karıştırma	1.128.000	5,3	1,8
RAS pompalama	600.000	2,8	0,6
Toplam	4.900.000	23,0	16,6

## 6.1 Pompalama

Pompalamada;

- Değişken hız kontrolü ve çok kademeli pompalama stratejileri doğru olarak uygulanmalı,
- Pompa çalışması optimize edilmeli, buna göre uygun pompa türü ve boyutu (hp) çalıştırılmalı,
- Akıllı pompa kontrolü ve stratejisi, SCADA sistemi, geri besleme döngüleri ve ERP sistemleri seçilmeli,
- (Sistem sorunları çözüldükten sonra) premium verimlilik ekipmanı çalıştırılmalı,
- Tıkanmasız pompalama teknolojileri/Blokaj giderme pratikleri uygulanmalı,
- Yerçekimi akışından maksimum fayda sağlamak için sistem giriş kısmı (boru sisteminin uygun tasarımı) ve depolamanın stratejik yerleşimi azaltılmalı.

Terfi merkezlerinde ve AAT'lerinde pompalama işlemleri, havalandırmadan sonra İAAT'nin önemli bir enerji tüketim kaynağıdır. Bazı bölgelerde pompalama en büyük enerji tüketim kaynağıdır.

Açma ve kapama modunda çalışan sabit hızlı pompalar, gerekenden daha fazla su pompalar ve bu da enerji tüketimine ve israfına yol açar.

Mevcut pompalama sistemlerinde düşük maliyetli yatırımlar ve düzenlemeler yapılarak enerji verimliliği artırabilir ve genellikle bir yıldan az basit bir geri ödeme sağlar.

Optimum enerji kullanımı için pompalama sistemi verimliliğini, pompalama gereksinimleri ve kademeli pompalama aralığı belirlenmelidir.

Pompalama, AAT'da önemli bir adımdır, enerji tüketimini yüksektir ve bu da tipik bir AAT'de işletilmesinde toplam enerjinin %15'inden fazlasının tüketimine neden olur. Terfi merkezinde (TM) statik kaldırma kuvveti genellikle bir AAT sisteminin önemli bir bileşeni olduğundan, enerji talebini azaltmak için statik kaldırma kuvvetini minimumda tutmak zorunludur. Statik kaldırma kuvveti, bir AAT çalışması sisteminin ana bileşeni olduğundan enerji talebini azaltmak için statik kaldırma yükünü minimumda tutulmalıdır. Statik kaldırma yükünü azaltmak için yapılacak başka bir şey, giriş terfi

merkezinde sabit veya sabite yakın bir su seviyesini korumak için değişken hızlı sürücüler (VSD) kullanılmalı veya terfi merkezinde su seviyesi kabul edilebilir en yüksek seviyede tutulmalıdır. VSD ve bir seviye sensörü kullanılarak, pompa hızı, kabul edilebilir en yüksek seviyeye yaklaşması gereken sabit bir su seviyesini korumak için kontrol edilir. Statik kaldırma kuvvetini 1 m ila 2 m aza indirerek, %10-20 oranında enerji tasarrufu oldukça önemli olacaktır, çünkü gelen atıksu için gerekli statik kaldırma kuvvetini genellikle sadece birkaç metredir.

Değişken Frekanslı Sürücüler (VFD'ler), pompanın hızını santrifüj pompaların akış koşullarına ve afinite kurallarına uygun olarak değiştirmek için kullanılabilir, motor hızındaki küçük bir azalmanın bile pompanın enerji tüketimini %50'ye kadar azaltabileceğini düşündürmektedir.

Pompalama ömrü çevrim maliyetlerine, inşaat aşamasına kıyasla enerji maliyetleri egemen olduğu için, bir enerji denetimi artan işletme maliyetlerini ortaya çıkardığında, pompalara her zaman dikkat etmek, bunları yenilemek veya bakım yapmak her zaman için önemlidir.

Değişken hızlı (FK) çalışma genellikle pompalama sistemleri için en fazla enerji verimli akış kontrol yöntemidir. Çünkü pompa performansı ek hidrolik kayıpları ayarlamak yerine proses talebini karşılamak üzere ayarlanabilir. Frekans konvertörler (FK) (değişken frekanslı tahrikler) 6 aydan 5 yıla kadar olan geri ödeme süreleri ile hızlı bir yatırım getirisi sağlar. USDOE, daha küçük kapasiteli AAT'lerinden daha büyük kapasiteli AAT'lere, FK kullanılması ile, 70.000 kWh/yıl'dan 2.800.000 kWh/yıl'a kadar değişen enerji tasarrufu başarılı uygulamaları elde edilmiştir. Teknoloji zaten gelişmiş olduğu için, son eğilim aygıtları tamamen akıllı yönetilen süreçlere doğru ilerletmek için daha iletişimsel hale getirmektedir. Bununla birlikte, eğer FK'ler doğru seçilmez ve uygulanmazsa, enerji israfı olabilir. Tam yükün %75'inin altında çalışan FK'ler çok düşük verime sahip olabilir. Genel olarak, bu tür sürücüler büyük bir statik düşü yüksekliği üstesinden gelinmesi gerektiğinde veya akış hızlarının yaklaşık olarak sabit olduğu yerlerde etkili olmayabilir.

Pompa basma yüksekliğini ve pompa yükünü azaltmak için havuzda atıksu seviyeleri ayarlanmalıdır. Pompa basma yüksekliğini azaltmak için pompa istasyonlarında ıslak kuyu seviyeleri yükseltilebilir.

Pompa verimliliğini azaltan zayıf kalibre edilmiş vanaları belirlenmeli ve ayarlanmalıdır.

Pompalama sistemlerindeki yatırım iyileştirmeleri ile enerji tasarrufu sağlanabilir. Pompalama, tipik bir belediye arıtma tesisini korumak için kullanılan enerjinin %67'sini oluşturabilir. Pompalama teknolojisindeki gelişmeler tesis enerjisini önemli ölçüde azaltma şansına sahiptir.

FK'leri, pompalama talebini gerçek zamanlı olarak karşılamak ve hızı ayarlamak için değişen miktarlarda atıksu taşıyan pompalar takılmalıdır. Daha az pompa akışı veya basıncı gerektiğinde, pompa hızı ve beraberindeki enerji kullanımı azalacaktır.

Aşınmış veya verimsiz pompaları, daha az enerji kullanan ve daha az bakım ve arıza süresi ile çalışan yeni, yüksek verimli pompalarla değiştirilmeli.

Sabit akışta çalışan büyük boyutlu pompalar, pervane trimleri için iyi örneklerdir. Çarkın kırılması genellikle pompalara, motorlara veya kontrol teknolojisine daha büyük yatırımları yapmak için daha düşük maliyetli bir alternatiftir.

Yeni tesislere veya tesislerin genişletilmesi sırasında farklı boyutlarda pompalar kurulmalıdır. Mevsimsel akışlar değiştikçe, kontrollü pompalama ihtiyacını karşılamak için farklı pompa kombinasyonları çevrimiçi hale getirebilir.

Sürtünme kayıplarını azaltmak için boru ve vanalar iyileştirilmelidir.

Atıksu debisi, gece ve gündüze, mevsimlere ve yağışlara göre değişmektedir. Pompalama sistemlerinde atıksu ve çamur debileri değişkense tüm pompalar frekans konvertörlü olmalıdır. Atıksu debisine göre pompalar çalıştırılmalıdır. Atıksu debisi düşük olduğu zaman frekans konvertörlü düşük hızda bir pompa çalıştırılabilir.

Atıksu arıtma tesislerinde pompaların yüksek enerji tüketiminin temel nedenleri yanlış pompa tasarımı veya seçimidir. Doğru pompalar doğru konumda tasarlanarak enerji tüketimi azaltılabilir.

Özellikle atık su debisinin, yüksek çalışma verimliliği aralığını ve yüksek su seviyesi koşullarını karşılamak için uygun pompalara ihtiyacı vardır.

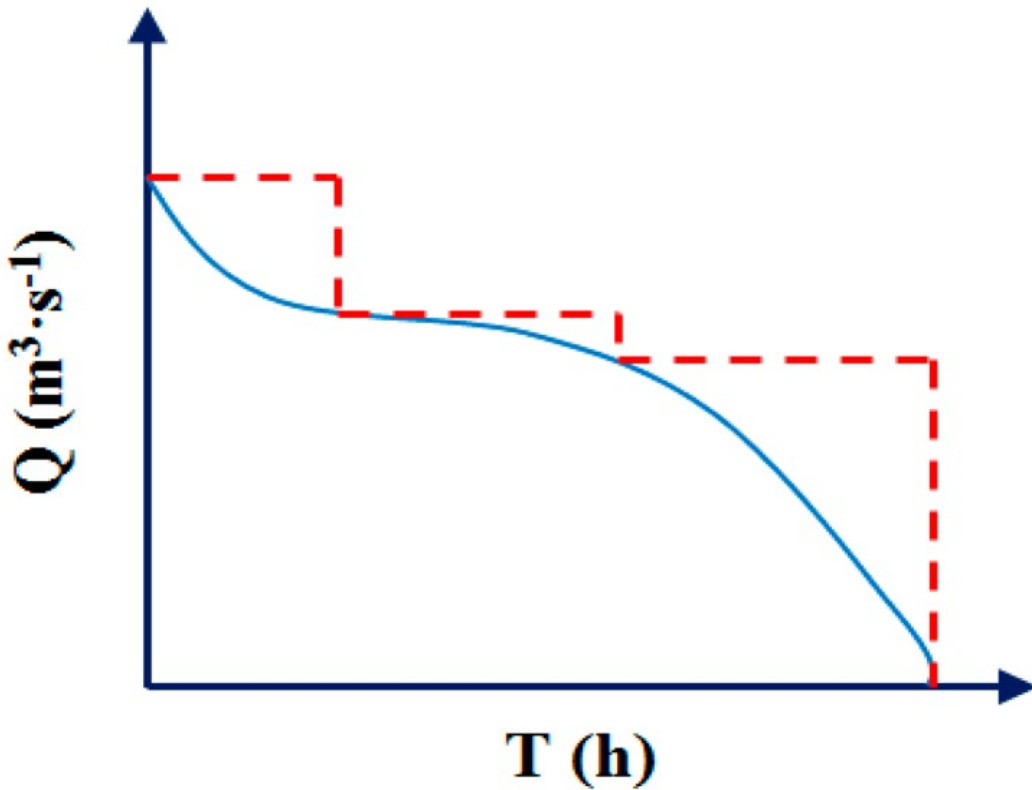
Kanalizasyon arıtma hacmine, basma yüksekliğine, basma kaybına ve pompa gücüne göre, uygun ve verimli pompa kombinasyonu seçilir. Bu, frekans dönüştürücü ile



değişken frekans pompası ve frekans dönüştürücü olmadan sabit güç pompası arasındaki oranın ve düzenlemenin ayarlanmasını içerir. Pompaların ayarlanmasının amacı, pompa milinin gücünü azaltmak ve pompaların servis ömrünü azaltacak olan pompanın sık sık açılmasını önlemektir.

Farklı AAT'lerinin tasarımında ve işletilmesinde statik kaldırma kuvveti, pompanın iyileştirilmesi, esas olarak değişken frekans kontrol (FK) teknolojisinin uygulanmasıyla sağlanır.

Kanalizasyon sisteminde atıksuyun yükseltme miktarı ve değişen debilerin kombinasyonuna göre uygun pompayı seçmek gerekir. Boru hattı sisteminin varyasyon eğrisine, özellikle kanalizasyon akış hızına (*Şekil 15*) göre, yüksek çalışma verimliliği aralığını ve yüksek su seviyesi koşullarını karşılamak için uygun pompalara ihtiyaç vardır. Kanalizasyon sistemi, basma yüksekliği, basınç kaybı ve pompa gücüne göre, uygun ve verimli pompa kombinasyonu seçilir. Bu, frekans dönüştürücü değişken frekanslı pompa ile frekans dönüştürücüsüz sabit güç pompası arasındaki oranın ve düzenlemenin ayarlanmasını içerir.



**Şekil 15.** Farklı Zamanlarda Gerçek Debi Hızına Göre Zamana Bağlı Olarak Atıksu Pompası Akısı

**Şekil 15'**de kırmızı ile verilen farklı debi değişikliklerinin uygun pompalama sistemi le düzleşmesi (mavi eğri) gerekir.

## **6.2 Havalandırma**

İAAT'i biyokimyasal süreçleri temel olarak Anaerobik-Anoksik-Oksik ve Anaerobik-anoksit-aerobik-anoksit-aerobik gibi kademelerden oluşmaktadır.

Havalandırma ünitesinde aşırı ÇO, çamur kalitesini bozar, denitrifikasyonu daha az verimli hale getirir ve enerji israfına yol açar.

Geribildirim kavramına dayalı kapalı döngü otomatik kontrol teknolojisi olan Oran Entegrasyonu Farklılaşma (PID) kontrolü, son on yılda ÇO için ana kontrol yöntemidir. Bununla birlikte, ÇO kontrolü doğrusal olmayan ve zaman gecikmesine sahiptir, bu da geleneksel PID kontrolünün giderek daha sıkı kontrol gereksinimlerini karşılama zorlaştırmaktadır.

Havalandırma, AAT'lerin çoğunda önemli bir süreçtir. AAT'de enerji harcamalarının %45 ila %75'i oranında değişen enerji maliyetlerinin en büyük kısmını oluşturmaktadır.

Havalandırma miktarı, çok düşükse, AAT'den çıkan atıksu kalitesi etkilenecektir; havalandırma kapasitesi çok büyükse, enerji israfına, çamur yumak yapısında değişime ve aktif çamurun askıda kalmasına neden olacaktır. Havalandırma enerjisinin korunmasının özü, biyokimyasal arıtma işleminde kirleticilerin etkin bir şekilde uzaklaştırılmasını sağlamak için talep üzerine oksijeni çözen gerekli elektron alıcısını, atık suyun kalitesini, arz-talep dengesini ve enerji verimliliğini sağlamaktır.

Havalandırma işlemi, enerji tüketiminin azaltılmasında temel olarak şunları içerir:

1. Aşırı havalandırmayı önlemek için aerobik bölgede ÇO konsantrasyonunun kontrol edilmesi,
2. İAAT'lerde aerobik işlemin kademeli olarak azaltılması,
3. Havalandırma miktarını azaltmak için gradyanı ayarlamak (örneğin %35, %30 ve %25 gibi),
4. Havalandırma miktarının amonyak azotu konsantrasyonuna göre ayarlanması.

Havalandırma çıkış basıncının kontrol edilmesi, dalgalanma olayını çözmek ve ÇO otomatik kontrolünü sağlamak için gerekli olan bir durumdur. Düşük ÇO ve amonyak

azotu konsantrasyonun kontrolü, sistemin etkin otomatik kontrolünü ve enerji tasarrufunu sağlayabilir. Bu arada, Oksidasyon Redüksiyon Potansiyeli (ORP) ve pH kontrollü atıksu arıtma prosesleriyle verimli havalandırma sağlanabilir.

Havalandırma ünitesinde blowerlar genellikle sürekli olarak 7/24 çalıştırılır ve tahliye vanaları hava gerekli olmadığında açılır. Blowerların kısmi ve aralıklı çalıştırılması, aynı etkiyi düşük enerji tüketimi ile garanti eder. Bu tür değişikliklerin iyileşme süreci, verimlilik ve maliyetler açısından yüksek bir etkisi yoktur.

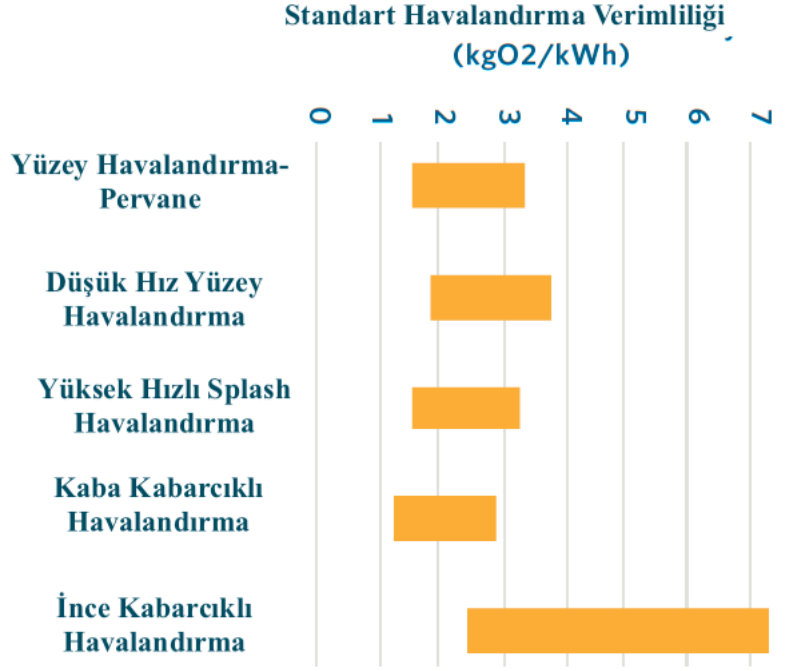
Özellikle havalandırıcılar, çalışırken karıştırıcıların kapatılmasıyla önemli oranda enerji tasarrufu sağlanabilir.

Mekanik yüzey havalandırıcılar, su-atmosfer ara yüzünü arttırarak atıksuyu kuvvetli bir şekilde harekete geçirir ve oksijeni havadan aktarır. Karıştırıcılar, tasarım kapasitesine bağlı olan bir AAT'nin toplam enerji tüketiminin yaklaşık %5-20 oranında katkıda bulunabilir. Güç yoğunluğundaki azalma ve günlük çalışma süresindeki azalma, karıştırıcı enerji tüketimini azaltmanın başlıca yöntemleridir.

Havalandırmaya yönelik enerji tüketimi açısından, mekanik yüzey havalandırıcılar dahil olmak üzere farklı tür havalandırmalar üzerinde deneysel bir araştırma yapılmıştır. 416 m<sup>3</sup> atıksu hacmindeki yüzey havalandırıcılarının havalandırması %2,3 oksijenlenme verimiyle 25 kW ve ince kabarcıklı havalandırıcılar ise %23 oksijenlenme verimiyle 8,2 kW tüketmiştir. Bu sonuçlar, mekanik havalandırıcıların daha düşük enerji verimliliğine sahip olduğunu doğrulamıştır. Bu nedenle, mekanik havalandırıcıların verimliliklerini arttırmak için ETÖ metodolojilerine tabi olmaları gereklidir. Bir çalışmada, tank hacmi, tank geometrisi, havalandırma ve karıştırıcı konumuna göre uygun koşullar altında, karışım enerjisinin 24 Wh/(m<sup>3</sup>-day) altına düşürülebileceği tahmin edilmektedir.

Havalandırma prosesi için enerji tüketimi genellikle 0.18 ila 0.8 kWh/m<sup>3</sup> arasında değişmektedir.

AAT'i havalandırma ünitesinde çeşitli havalandırma teknolojilerine bağlı olarak tüketilen kWh elektrik enerjisi başına suda çözülmüş bir metrik kilogram oksijen kullanma verimliliği **Şekil 16**'de verilmiştir. Oksijen transferinin verimliliğini en üst düzeye çıkaran teknolojiler, çözülen oksijen birimi başına enerji harcamasını ve işletme maliyetini azaltır.



**Şekil 16.** Atıksu Arıtma Tesisi Havalandırma Ünitesinde Çeşitli Havalandırma Teknolojileri

Havalandırma ünitesinde optimum havalandırma şartları sağlanırsa önemli miktarda enerji tasarruf edilir. Bu yüzden havalandırma ünitesinde optimum havalandırma şartları sağlanmalıdır. ÇO ölçülerek uygun valf sistemi ile ortam ÇO konsantrasyonu kontrol edilmelidir.

Kaba kabarcıklı havalandırma sisteminden ince kabarcıklı havalandırma sistemine geçilmelidir. Böylece ÇO difüzyonu ve verimlilik artar. ÇO kontrol edilebilir.

Havalandırma ünitesinde ÇO, manuel değil de otomatik olarak kontrol edilirse enerji tüketimi %40 azaltılabilir. Böylece blower yükleri azaltılır.

Mekanik havalandırıcılar, FK'lı olursa yatırım kendini 2 ila 7 yılda amorti eder.

Fan kademesini optimize etmek için kontroller ayarlanmalıdır.

Blower sistem akışının azaltılmasına izin vermek için ÇO ayar noktaları optimize edilmelidir.

Enerji tasarrufu ile birlikte blower sistemindeki basıncı azaltmak için blower hava akışındaki engeller azaltılmalıdır.

Radyal akışlı düşük hızlı mekanik havalandırma sistemleri, yüksek hızlı makinelerden daha yüksek havalandırma verimliliği sağlayabilir. Tesise verilen atıksu kirlilik yükleri geceleri azaldıkça, çözülmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonu artar, dolayısıyla gece saatlerinde havalandırıcıların düşük debide çalıştırılması havalandırma enerjisinin azaltılmasında etkili olabilir. Eğer AAT'ine verilen atıksuda ÇO tespit ediliyorsa havalandırmanın durdurulması ve çökmenin olmaması için gerekli önlemlerin alınmasında yarar var. Mekanik havalandırıcılardaki yeni bir gelişme, çoklu çarkların kullanılmasıdır. Tek pervaneli mekanik havalandırıcılar, biyoreaktörün içeriğinin çökmemesi gerektiğinden dolayı sıyrılmalarıyla sınırlıdır. Çift pervaneli havalandırıcı, yüzey pervanesini arttırmak için biyoreaktörün altına yakın bir alt pervane içerir. Bu, bir FK kullanıldığında daha fazla güç devri ve buna bağlı olarak enerji tasarrufu sağlayarak, biyoreaktör tabanının yakınında ilave karıştırma enerjisi sağlar. Mekanik cihazların enerji tasarrufu önlemleri (ETÖ) **Tablo 9'**da özetlenmiştir.

**Tablo 9** Mekanik Cihazların Enerji Koruma Önlemleri

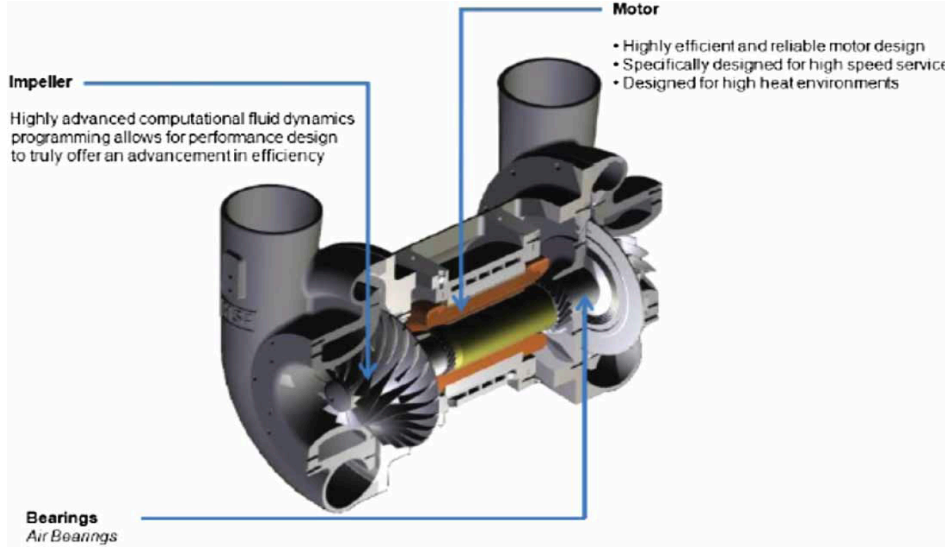
İşletme	Enerji Tasarrufu Önlemleri (ETÖ)	Uyarılar
<b>Motorlar/pompalama</b>	Uygun Boyutlama	FK iyi çalıştırılmıyorsa atık enerjiye sebep olur
	FK	Hızlı geri ödeme
<b>Mekanik Yüzey Havalandırıcılar</b>	Düşük-hız	İnce hava kabarcıklı sistemlere kıyasla daha düşük verimlilik
	Açma/kapama (on/off) modu	
	Çoklu kompresör çarkı	

Bir blower sistemin yaşam döngüsü maliyetinin %75'ine kadarı enerji kullanımına bağlanabilir. Mevcut bir blower sistemini değiştirirken, uygulamaya uygun bir blower seçilmelidir. Şimdi ve gelecek oluşacak ihtiyaçlara en uygun blower teknolojisini belirlemek için;

- Birden fazla blower bulunan sistemlerin evrelemesine izin veren kontroller kurulmalıdır. Kontrol sistemleri fan gereksinimlerini sistem gereksinimlerine göre optimize eder.

- Hava akışını verimli bir şekilde üretmek için çok yüksek hızlı motorlar ve hava taşıyan teknoloji kullanan yüksek verimli bir turbo fan sistemine geçilmelidir. Turbo blower sistemleri tipik olarak frekans konvertör (FK) donanımlıdır ve CO sensörü geri beslemesine dayalı bir dizi hava akışı sağlayabilir. Yatırım kendini 2,5 ila 7 yıl içinde amorti eder.
- Blowerın hızını sistem talebine göre ayarlamak ve böylece oksijen talebi daha düşük olduğunda enerji kullanımını azaltmak için mevcut santrifüjlü blower sistemlerine sensör kontrollü FK'ler eklenmelidir. 2 ila 6 yıllık tipik basit geri ödeme söz konusudur.
- Büyük boyutlu blowerlar tanımlanmalıdır.

Verimliliği artırmak amacıyla yeni havalandırıcı tasarımları geliştirilmiştir. Bazen "Turbo" olarak adlandırılan yüksek hızlı dişlisiz havalandırıcılar, çok kademeli ve pozitif deplasmanlı havalandırıcılara kıyasla daha az enerji girişi ile daha yüksek hızlarda çalışmak için gelişmiş bir yatak tasarımı, yani hava yatağı veya manyetik rulman kullanır. Bir hava turbo havalandırıcı **Şekil 17'de** gösterilmektedir. Mil yüksek hızda döndüğünde, pervane shaftı ile yatakları arasında, shaftın "sürtünmesiz" yüzmesini sağlamak için bir hava filmi oluşturulur. **Şekil 18**, pervane shaftının shaftın "sürtünmesiz" yüzmesi için manyetik olarak kaldırıldığı manyetik bir yatak tasarımını göstermektedir. "Sürtünmesiz" rulman tasarımı, yüksek verimli motorlarla birleştiğinde, geleneksel çok kademeli santrifüj veya pozitif yer değiştirme ekipmanından %10-20 daha yüksek enerji verimliliğine katkıda bulunur.



Şekil 17. Hava Yataklı Yüksek Hızlı Turbo Blower



Şekil 18. Manyetik Yataklı Yüksek Hızlı Bir Turbo Fan

Shek Wu Hui AAT işlerindeki gibi tek kademeli havalandırıcı, hava filmine veya manyetik rulman havalandırıcısına benzer verimliliğe sahiptir.

Bir havalandırma sisteminin enerji verimliliği ayrıca difüzör akı hızı, oksijen transfer oranı, oksijen transfer verimliliği (OTV) ve daha da önemlisi karışık sıvı çözülmüş oksijen (ÇO) konsantrasyonu gibi anahtar faktörlere bağlıdır. Sağlıklı, aktif bir çamur biyo reaktörü için normal ÇO konsantrasyonu genellikle 1,0 mg/L ila 1,5 mg/L arasında

değişir. ÇO'yu kontrol etmek, kritik öneme sahiptir. Çünkü hem az havalandırmanın hem de aşırı havalandırmanın sisteme zararlı etkileri vardır. Yetersiz havalandırma, aktif çamur işleminin düşük performans göstermesine ve kalitesiz atıkların üretilmesine neden olabilir. Öte yandan, aşırı havalandırma olduğunda, enerji israfına ek olarak, zayıf çamurun çökmesine ve anoksik bölge üzerindeki olumsuz etkiler gibi operasyonel sorunlar oluşturur. Bu nedenle, enerjiyi başarılı bir şekilde yönetmek için kilit nokta, havalandırma sistemlerinde gerekli olan ÇO seviyeleri için iyi bir kontrol sistemine sahip olmalıdır. Bunu yapmak için, ÇO kontrol stratejilerinde yeni gelişmeler vardır. Entegre Hava Akışı Kontrolü, aralıklı havalandırma ve OPTIMaster gibi bazı örnekler uygulanabilir.

Entegre Hava Akışı Kontrolü, birçok otomatik ÇO kontrol sisteminde yaygın olan basınç kontrol döngüsünü ortadan kaldıran tescilli bir havalandırma kontrol sistemidir. Özellikle daha küçük kapasiteli AAT'li sistemlerinde, basınç kontrol döngüsü, kontrol sistemi proses ve ortam hava koşullarındaki değişikliklere tepki olarak hava akışını ve basıncı ayarlamaya çalıştığında verimli havalandırmaya neden olabilir. Kontrol sisteminin 2005 yılında Narragansett Körfezi (Rhode Island) Komisyonu'nun Bucklin Noktası tesisinde uygulanması, tesisin Modifiye Edilmiş Ludzack Ettinger (MLE) sürecine ortalama %12 oranında elektrik tüketimi azaltılmış ve ortamda yeterli ÇO sağlamıştır. Enerji tasarrufu, tesisin iki havalandırıcısının ikincisini sürekli çalıştırma ihtiyacını ortadan kaldırmanın bir sonucudur.

Havalandırma işleminde ÇO'nun azaltılması enerji tasarruflarını etkilemesine rağmen (yani daha az ÇO demek blowerların elektrik tüketimini azaltır), işlem performansındaki bozulmayı telafi etmek için genellikle çamur yaşının artırılması gerekir. Bununla birlikte, aktif bir çamur işleminde çamur yaşının artırılması, çamurun çökme hacmi endeksinde (SVI) bir artışa yol açabilir, bu da tesisin atıksudaki toplam askıda katı madde (TSS) miktarlarını artırabilir. Bunu çözmek için, havalandırmayı optimize etmek için özel bir algoritma (OPTIMaster) geliştirilmiştir. ABD Kaliforniya'daki Oxnard, 2006 yılında OPTIMaster sistemini uyguladı ve elektrik tüketiminin %20 oranında azaltıldığını tespit etti.

Yukarıda belirtildiği gibi, bir havalandırma sisteminin verimliliği ayrıca difüzörlere, özellikle türlerine de bağlıdır. İnce bir kabarcıklı difüzör uzun bir süredir



uygulanmaktadır ve şimdi geleneksel bir tip olarak kabul edilmektedir. Membran malzemelerindeki son gelişmeler, ortalama çapı 0,2 mm ila 1,0 mm arasında olan kabarcıklar üreten ultra ince kabarcık difüzörlerine yol açmıştır. Ultra ince kabarcık difüzyonunun iddia edilen birincil avantajı AAT'de %10-20 oranında iyileşme sağlamasıdır. Ek olarak, ultra ince kabarcık difüzörlerin üretiminde kullanılan bazı kompozit malzemelerin kirlenmeye karşı daha dirençli olması ve temizleme sıklığı yüksek OTV'e korunur.

İnce gözenekli havalandırma sisteminin yatırım maliyeti muhtemelen daha yüksek olacaktır; ancak, sistemin toplam yıllık maliyeti kaba kabarcıklı havalandırıcıların yıllık maliyetinden daha az olacaktır. Gerçek maliyet tasarrufları sahaya özel olacaktır.

### **6.2.1 İleri Havalandırma Kontrol Sistemi**

Havalandırma işleminin otomatik kontrolü, reaktör içindeki dinamik koşullara hızı ayarlayarak önemli miktarda enerji tasarrufu sağlayabilen önemli bir ETÖ'dür. Havalandırma ünitesinde biyolojik prosesleri sürdürmek için gereken oksijen miktarı, etkili organik ve amonyak yükleriyle orantılıdır. Bu nedenle havalandırma için oksijen ihtiyacı, gece yarısına daldırma, sabah ve akşamları en üst seviyeye çıkmak üzere aynı günlük düzenini izler. Pik durumunun minimum oksijen talebine oranı, tipik olarak 2:1 olabilir. ÇO ayar noktalarındaki azalmanın, havalandırma için gerekli olan düşük miktarda enerji nedeniyle önemli miktarda enerji tasarrufu sağlayabileceği ve bunun da sera gazı salımlarının azalmasına yol açabileceği tahmin edilmektedir. Öte yandan, ÇO ayar noktalarının aşırı derecede düşürülmesi, enerjiyle ilgili herhangi bir sera gazı tasarrufunu geçersiz kılacak daha yüksek N<sub>2</sub>O salımına yol açabilir. Tesisteki mevcut havalandırma sistemleri için optimum ÇO kontrol stratejileri yeniden yapılandırılması, değiştirilmesi, uygulanması ve AAT'lerinde model tabanlı ÇO optimizasyonu, enerji verimliliğinin artması, sistemin tasarrufunun ve kararlılığının artmasına neden olabilir.

ÇO ölçüm esasına göre çalışan havalandırma kontrol sistemi, manuel olarak kontrol edilen sistemler tarafından kullanılan enerjinin %25-40 oranında tasarruf sağlayabilir. ÇO kontrolü, oksijen talebine dayanarak hava akışını modüle ederek havalandırma tasarrufu sağlamak için yaygın olarak kullanılır ve daha gelişmiş kontrol stratejileri için önkoşuldur. Güvenilir amonyak, nitrat ve nitrit sensörlerinin yakın zamanda

kullanılabilirliği, amonyak bazlı havalandırma kontrolü (ABAC) ve amonyak vs. nitrat (AVN) kontrolü dahil olmak üzere daha gelişmiş havalandırma kontrolü stratejilerine yol açmıştır.

### **6.2.2 Aralıklı Havalandırma**

Aralıklı havalandırma sisteminin açıldığı saat sayısı azaltılarak enerji tasarrufu sağlanabilir. Döngü uzunluğu ÇO konsantrasyonu ile birlikte kontrol edilebilir. Örneğin, modifiye Ludzack-Ettinger (MLE) proses konfigürasyonuna dayanan pilot ölçekli bir sistemde aralıklı havalandırma uygulaması, TN ve TP giderimini önemli ölçüde iyileştirdi ve ek olarak sürekli havalandırma moduna kıyasla %10 oranında havalandırma enerjisi tasarrufu sağlandı.

Aralıklı havalandırma sisteminin çalışma saatlerini azaltarak enerji tasarrufu sağlanır. Bir havalandırma bölgesine hava akışı veya bölgeler arasındaki çevrimsel hava akışı, ÇO konsantrasyonu veya zaman bazlı kontrol ile geçici olarak durdurulur. Hava akışı ayarlanmış bir yüksek seviyede açılır ve ayarlanmış bir düşük seviyede tekrar açılır. Bununla birlikte, tüm tesisler için, özellikle de kapasitede veya yakınında olanlar için uygun değildir ve atıksu arıtma sürecini olumsuz etkilememek için vaka bazında değerlendirilmelidir.

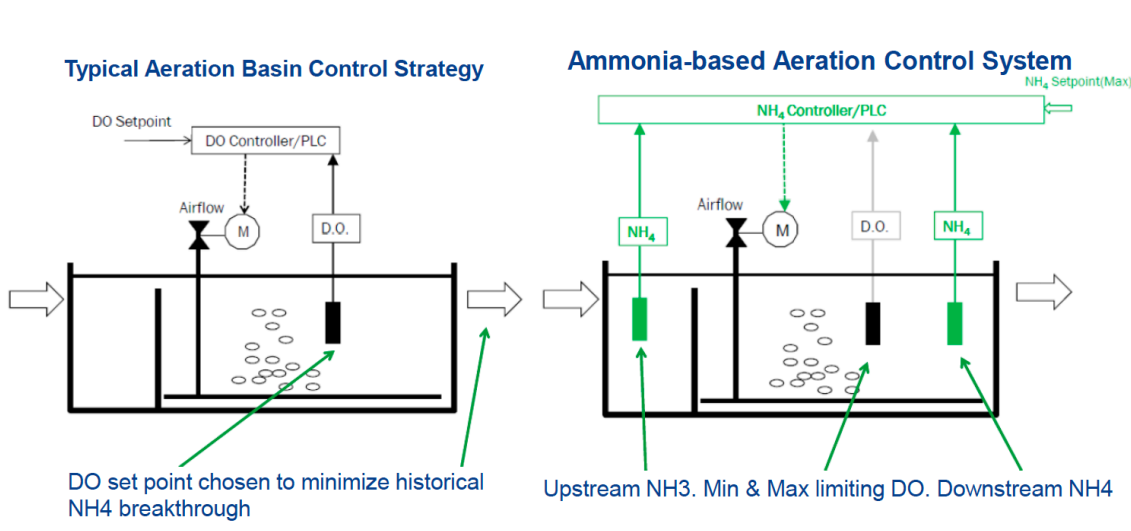
### **6.2.3 Amonyum Bazlı Havalandırma**

Amonyak bazlı havalandırma kontrol sistemi en yaygın havalandırma sistemleri ÇO ölçümlerine göre kontrol edilir. Ancak, ÇO seviyelerini, amonyum konsantrasyonu sıfıra yaklaştıkça sabit tutmak gereksiz havalandırmaya neden olabilir. Bu durum, atık amonyak konsantrasyonunda hem havalandırma maliyetlerini hem de tepe noktalarını azaltabilen ABAC kullanımıyla azaltılabilir.

Geri beslemesiz ve geri beslemeli olmak üzere iki tür ABAC yapısı vardır. İlk yaklaşım daha basittir ve aerobik bölgedeki amonyum ölçümünden geri beslemeye dayalı doğrudan havalandırma kontrolünü içerir. Bir saha çalışmasında, bir AAT (250.000 nüfus, 95.000 m<sup>3</sup>/gün atıksu), nitrifikasyonun tamamlandığından emin olmak için çevrimiçi amonyum iyon seçici elektrot (ISE) ile ölçüldü. Blowerlar, 0,7 mg/L ve 1,0 mgN/L ayar noktaları arasındaki amonyum-azot konsantrasyonunu korumak için açılıp kapanır yapıldı. Blowerlar, denitrifikasyon için anoksik koşullara izin veren ve enerji maliyetlerinde aylık yaklaşık 20.000 \$ tasarruf sağlayan bu strateji ile zamanın %25'ini

“kapalı” tuttu. Geri besleme kontrolü, işlemin ölçülen çıktısına dayanır ve bu nedenle olası bir eleştiri, bir kontrol işlemi yapılmadan önce bir hatanın bulunması gerektiğidir.

İleri besleme havalandırma kontrolü, yukarı akıştaki amonyum konsantrasyonuna ve problemlerin ölçülmesi esasına dayanır. Daha büyük bir karmaşıklık var ama düşük enerji maliyeti daha iyi çıkış suyu kalitesi elde etmek için bir potansiyele sahiptir. Bu strateji, ÇO geri besleme kontrolüne göre %11 daha düşük en düşük birim hava akımı talebine ulaştı. Öte yandan, Rieger, geri besleme havalandırma kontrolünün yararının, çoğu durumda geri besleme kontrolü üzerinde önemli bir fayda sağlamadığını ve dolayısıyla ek maliyet ve karmaşıklığın haklı olmadığını belirtti. İleri beslemeli kontrolün avantajı, sistemin kısa vadeli atık su piklerini ortadan kaldıran ve daha yumuşak bir kontrol sağlayan bir rahatsızlığa daha hızlı tepki vermesidir. Bununla birlikte, pratikte, tahminler yalnızca dayandıkları model kadar iyidir. Bu nedenle, modeldeki hataları düzeltmek için bir atık amonyum sensöründen geri besleme yapılması önerilir.



Şekil 19 Tipik Havalandırma Sistemi.

Amonyak Esaslı Havalandırma Kontrol Sistemi Detay çalışması ayrı olarak yapılacaktır.

### 6.3 Aydınlatma

Modern aydınlatma teknolojileri, eski teknolojilere kıyasla daha iyi performans ve verimlilik sunar. Aydınlatma sistemlerine yükseltmenin hızlı bir geri dönüş yapması ve aynı zamanda alanda çalışanların rahatlığını artırması muhtemeldir.

Boş alanlardaki lambaları kapatmak ve aydınlatma enerjisini önemli ölçüde azaltmak için doluluk sensörlerini kullanın. İşçiler nadiren kullanılan pompa istasyonlarından veya diğer yalıtılmış alanlardan ayrıldıktan sonra belirli bir süre sonra lambaları kapatmak için doluluk sensörlerini bir zaman geçilmesi ile donatın.

Mevcut Yüksek Yoğunluklu Deşarj aydınlatma sistemlerini daha yeni, daha enerji verimli teknolojilere yükseltin. Metal Halide veya Sodyum Buharından LED T5 veya LED T8 aydınlatmaya geçiş, aydınlatma enerjisini kullanımını %50'ye kadar azaltabilir.

Daha az verimli flüoresan lambaları yüksek verimli doğrusal LED flüoresan teknolojisiyle değiştirin. LED floresan lamba seçenekleri arasında enerji tasarruflu T8 görev aydınlatması ve T5 yüksek tavan aydınlatması bulunur.

İndüksiyon aydınlatmasını uzun lamba ömrü ve az bakım gerektiren yerlere kurun. İndüksiyon aydınlatması, bakım için erişilmesi zor alanlar için iyi bir seçimdir.

LED aydınlatmayı, diğer daha az verimli teknolojiler için enerji tasarruflu bir yedek olarak kurmayı düşünün. LED'ler, ultra yüksek verimliliği mükemmel performans ve uzun ömür ile giderek daha uygun fiyatlı bir pakette birleştirir.

Doğal ışık seviyeleri yeterli olduğunda lambaları kısmak veya kapatmak için iç ve dış aydınlatma sistemlerine fotoğraf sensörleri eklenmeli.

#### **6.4 Motorlar**

Gerektiğinden daha fazla enerji kullanan elektrikli motorlar yerine enerji tasarruflu olanlar uygulanabilir.

Yapılan bir çalışmada, elektrikli motorlar, AAT'deki mekanik cihazların elektrik enerji tüketiminin %90'ını oluşturduğu tespit edilmiştir.

Normal çalışma için kullanılan enerji miktarını en aza indirmek için mevcut motor kontrol sistemleri ayarlanmalıdır. Kontrol sistemlerinde yapılan küçük ayarlamalar önemli ölçüde enerji tasarrufu sağlayabilir.

İhtiyaçları gerçek zamanlı olarak hızlandırmak için motorlara VFD kontrol sistemi eklenmelidir. Azalan talep dönemlerinde, motor devri daha düşük enerji kullanımına düşürülebilir.

Sistem motor çalışması gerektirmediğinde motoru kapatmak için sensör geri beslemesine dayanan kontrol sistemleriyle sürekli çalışan güçlendirme motorları.

Büyük boyutlu motorları, yük için daha uygun büyüklükte yüksek verimli motorlarla değiştirin.

Değiştirilmeleri gerektiğinde, standart motorlar birinci sınıf verimli motorlarla değiştirilmelidir.

Aşınmış motorları, o motorun orijinal teknik özelliklerine benzer bir verimle olanlarla ile değiştiriniz. Yeşil geri sarma, enerji verimliliğini artırmanın uygun maliyetli bir yoludur.

### **6.5 Scada**

Supervisory Kontrol ve Veri Toplama sistemleri, tüm sistem performansını optimize ederek maliyetleri azaltabilir. SCADA sistemleri, arıtma tesislerinin dinamik koşullara cevap vermede daha pratik olmasına izin verir.

Tesis iyileştirme süreçlerinin koordinasyonunu ve optimizasyonunu için SCADA sistemi kurulması planlanmalıdır. Yatırım kendini 2 ila 5 yıllık tipik basit geri öder.

Gelişmiş sistem denetimi ve kontrolü ile enerji tasarrufu potansiyelini artırmak için mevcut bir SCADA sistemi geliştirilmelidir. Sistem veri kaydedicileri eklemek veya yazılımı yükseltmek, denetleyicilerin verimsiz işlemleri daha da azaltmalarını veya ortadan kaldırmalarını sağlar.

### **6.6 Yeşil Enerji**

Güney Kore'de 30.000 m<sup>3</sup>/gün kapasiteli bir atıksu arıtma tesisinde yeşil enerji teknolojisi uygulaması;

1. Güneş enerjisi,
2. Küçük kapasiteli HES,
3. Isı geri kazanımı

ile enerji üretimi yapılabilir. Bunların detayları başka bir çalışmada verilecektir.

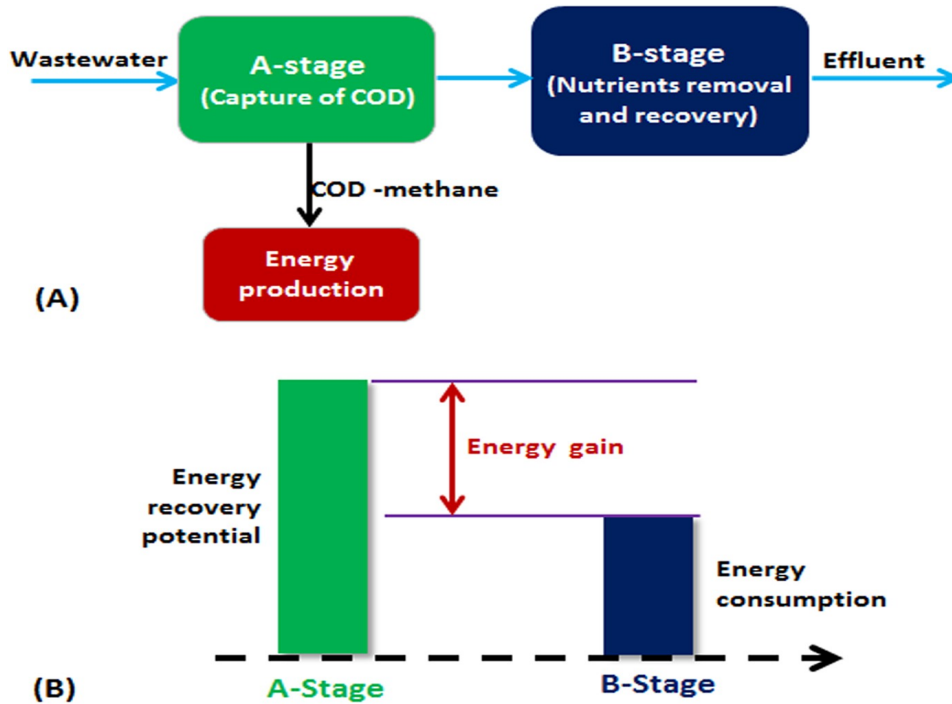
AAT'lerinde biyogaz, güneş enerjisi, çamur yakma, küçük kapasiteli HES, gibi başlıklara başka bir çalışmada detaylar olarak yer verilecektir.

### 6.7. Çıkış Suyunun Geri Kullanımı ile Temiz Su Kullanımı Azaltma

Arıtılmış atıksuyun proses uygulamalarında veya tankların yıkanması için kullanımı içme suyu kullanımını azaltır. İçme suyunun arıtılması ve pompalanması ihtiyacı azalarak enerji tasarrufu sağlanabilir. Arıtılmış atıksuyun geri kullanımı yüksek miktarda yıkama suyu ihtiyacı olan tesislerde avantaj sağlar.

### 6.8. Enerji Geri Kazanımı

Enerji geri kazanımının merkezi noktası, biyolojik oksidasyonundan önce atık sudaki KOİ'yi mümkün olduğunca yakalamaktır. Aktif çamur sistemi *Şekil 20*'de iki aşamalı A-B prosesi olarak gösterilmiştir. A-B işleminde, A-aşaması, biyolojik oksidasyondan önce doğrudan anaerobik çürüme için evsel atık sudan organik maddelerin yakalanmasını en üst düzeye çıkarmak için özel olarak tasarlanırken, B-aşaması esas olarak besin maddelerini işlemeye adanmıştır. Teorik olarak, evsel atık sudaki toplam KOİ'nin %65'i A aşamasında yakalanabiliyorsa ve anaerobik çürüme yoluyla metana dönüştürülüyorsa, üretilen elektrik enerjisi geleneksel AAT operasyonu için (bir gram KOİ'yi çıkarmak için 3.2 kJ gereklidir) yeterli olmaktadır.



A general configuration of A-B process.

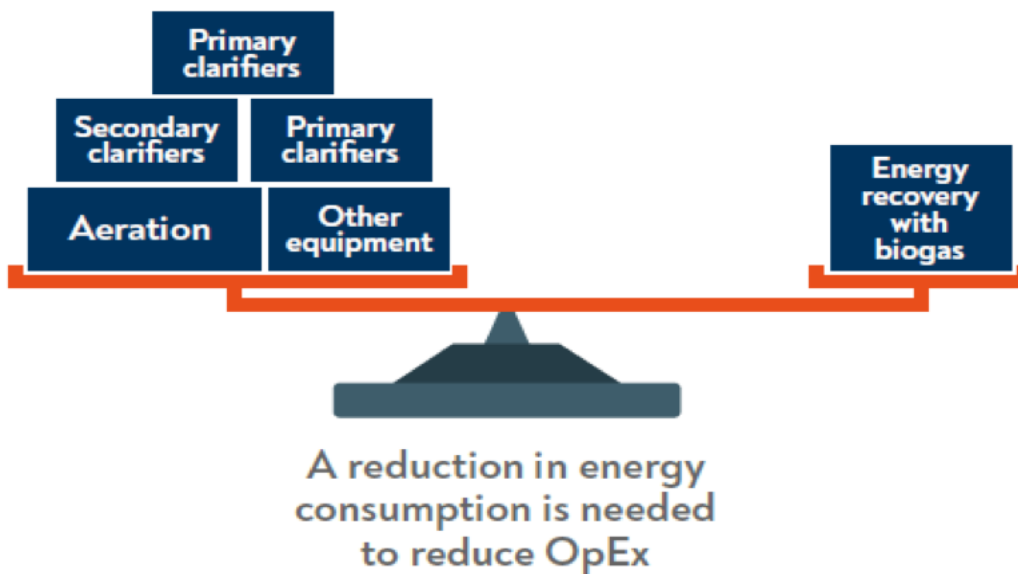
Şekil 20. AAT'de Enerji Geri Kazanımı

Atıksudan KOİ'nin yakalanma potansiyeline sahip üç işlem A aşaması olarak kullanılabilir, (i) kimyasal olarak geliştirilmiş birincil arıtma (CEPT) işlemi, (ii) yüksek oranda aktif çamur (HRAS) işlemi ve (iii) anaerobik işlem. Literatürden, bu üç sürecin evsel atık sudaki toplam KOİ'nin en az %60'ını yakalayabileceği görülmektedir.

**Tablo 10.** Çeşitli Atıksu Arıtma Tesislerinde Çamurdan Biyogazdan Enerji Üretimi

WWTP (Country)	Capacity in PE	Load in kg COD/d	Production of Biogas in Nm <sup>3</sup> /y	Biogas to Cogen-eration in Nm <sup>3</sup> /y	Produced Electricity in kWh/y	Efficiency kWh/Nm <sup>3</sup> of Biogas	Electricity Self-sufficiency in %	Remark
Görlitz (D)	140,000	8,923	949,858	940,086	1,536,586	1.63	72	M, co-dig
Schönebeck (D)	90,000	7,890	576,542	443,971	862,001	1.94	53	M
Gera (D)	200,000	15,099	1,099,716	903,761	1,705,205	1.89	68	M, co-dig
Den Hague—Houtrust (NL)	487,000	31,393	2,427,094	2,421,946	4,549,204	1.88	30	M
Den Hague—Harnaschpolder (NL)	1,473,000	95,096	4,976,878	4,967,487	12,612,500	2.54	43	M
Prague (CZ)	1,641,600	210,800	17,878,058	13,868,369	27,863,300	2.01	75	T, co-dig, MD
Pest-South (H)	293,300	77,484	6,824,005	4,526,581	9,037,587	2	70	T, co-dig
Pilsen (CZ)	380,000	54,508	4,170,116	3,989,299	7,020,512	1.76	75	T, co-dig
Braunschweig (D)	275,000	54,400	3,708,000	3,590,200	8,537,000	2.38	66	T, co-dig
Szeged (H)	230,000	23,919	1,371,657	1,247,007	3,026,556	2.43	49	M
Seafield (UK)	800,000	75,000	10,380,600	5,784,309	12,725,479	2.2	53	M
Olomouc (UK)	259,500	15,183	1,695,252	802,381	1,794,500	2.24	32	M, co-dig
Hrdec Kralove (CZ)	141,000	9,622	1,149,020	940,073	1,248,000	1.33	32	M, co-dig
Teplice (CZ)	130,000	7,086	620,999	575,010	1,083,051	1.88	49	M
Ústi (CZ)	180,000	16,875	1,077,299	854,462	1,375,299	1.61	32	M, co-dig
Liberec (CZ)	190,000	12,122	1,266,245	1,205,941	1,927,317	1.6	46	M
Berlin Wassmansdorf (D)	1,767,000	176,672	14,302,069	14,093,068	28,261,147	2.01	64	M, co-dig
Berlin Shonerlinde (D)	675,000	83,795	6,228,528	1,721,5485	3,579,170	2.08	15	M
Madrid Sur (Esp)	3,007,950	169,242	12,171,800	10,170,321	18,555,443	1.82	59	M

M: mesophilic; T: thermophilic; Co-dig: codigestion; MD: mechanical disintegration.  
*Chudoba et al, 2011, Journal of Residuals Science & Technology, Vol. 8, No. 2—April 2011*



**Şekil 21.** Aktif Çamur Sisteminde Enerji Balansı

## 7 KAYNAKLAR

1. Yifan Gu, Yue Li, Xuyao Li, Pengzhou Luo, Hongtao Wang, Xin Wang, Jiang Wu, Fengting Li “Energy self-sufficient wastewater treatment plants feasibilities and challenges”, Energy Procedia 105 ( 2017 ) 3741 – 3751.
2. Dr. Mark Husmann, “Improving energy efficiency in waste water treatment: What emerging countries can learn from experience gained in the developed World” Water Week 2009.
3. Yifan Gu, Yue Li, Xuyao Li, Pengzhou Luo, Hongtao Wang, Zoe P. Robinson, Xin Wang, Jiang Wu and Fengting Li, “The feasibility and challenges of energy self-sufficient wastewater treatment plants”, ICAE, 2016
4. Mustafa Evren ERŞAHİN, Recep Kaan DERELİ, Hale ÖZGÜN, Zehra (AYNUR) AKMIRZA, İzzet ÖZTÜRK, “Atıksu Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliğinin İncelenmesi”, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2016.
5. C. Belloir, C. Stanford & A. Soares, “Energy benchmarking in wastewater treatment plants: the importance of site operation and layout”, Environmental Technology, Vol. 36, No. 2, 260–269,2015.
6. Deliverable 2.1 Study of published energy data, Standard method and online tool for assessing and improving the energy efficiency of waste water treatment plants H<sub>2020</sub>-EE-2014-3-MarketUptake, ENERWATER, 2014.
7. Sze Wing Ho, Kin Kuen Cheung ve Wing Cheong Fung, “Sustainable wastewater treatment – ways to achieve energy neutrality”, HKIE Transactions, Vol. 21, No. 4, 240–252, 2014.
8. “Primer on Energy Efficiency for Water and Wastewater Treatment” Better Plants, U.S. Department of Energy, 2016.
9. Ziyang Guo, Yongjun Sun, Shu-Yuan Pan, and Pen-Chi Chiang, “Integration of Green Energy and Advanced Energy-Efficient Technologies for Municipal Wastewater Treatment Plants”, Int J Environ Res Public Health. 2019.



10. M. Vaccari, P. Foladori and F. Vitali, “Benchmarking of energy consumption in municipal wastewater treatment plants – a survey of over 200 plants in Italy”, Water Science & Technology, 2018.
11. “Energy Efficiency Opportunities in Wastewater Treatment Facilities”, environment.nsw.gov.au, 2019.
12. Troy Morgan; Western Regional Process Analytical Manager, “Use of Ammonia and Nitrate Sensors for Activated Sludge Aeration Control”, xylem, 2012.
13. Kentaro Mizuta and Masao Shimada, “Benchmarking energy consumption in municipal wastewater treatment plants in Japan”, Water Science & Technology, 2010.
14. H. Turkmenler, “Investigation of energy efficiency in Gebze Wastewater Treatment Plant”, International Journal of Environmental Science and Technology, 16:6557–6564, 2019.
15. “KEY FIGURE DATA FOR ENERGY EFFICIENCY”, Benchmarking the Baltic Sea Region in the project IWAMA – Interactive Water Management, European Union.