

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ATIK SU ARITMA TESİSLERİNDE KULLANILAN TERFİ
POMPALARI VE YENİ NESİL POMPA MOTORLARI İLE
ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Şahin DURMAZ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

**EYLÜL 2025
İSTANBUL**

T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



**ATIK SU ARITMA TESİSLERİNDE KULLANILAN TERFİ
POMPALARI VE YENİ NESİL POMPA MOTORLARI İLE
ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Şahin DURMAZ
(231280003)**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU

İstanbul 2025



T.C.
İSTANBUL GEDİK ÜNİVERSİTESİ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürlüğü

Jüri Tez Onay Formu

26.09.2025

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ MÜDÜRLÜĞÜ

Bu çalışma 29.09.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği (Tezli Yüksek Lisans) Programı Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

TEZ JÜRİSİ

Prof. Dr. Feriha ERFAN KUYUMCU

Danışman

İstanbul Gedik Üniversitesi

Prof. Dr. Nuran YÖRÜKEREN

Üye (İmza)

Kocaeli Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Aytaç Uğur YERDEN

Üye (İmza)

İstanbul Gedik Üniversitesi

YEMİN METNİ

Yüksek Lisans tezi olarak sunduğum “Atık Su Arıtma Tesislerinde Kullanılan Terfi Pompaları ve Yeni Nesil Pompa Motorları ile Enerji Verimliliğinin İncelenmesi” adlı çalışmanın, tezin proje safhasından sonuçlanmasına kadarki bütün süreçlerde bilimsel ahlak ve geleneklere aykırı düşecek bir yardıma başvurulmaksızın yazıldığını ve yararlandığım eserlerin Bibliyografya’da gösterilenlerden oluştuğunu, bunlara atıf yapılarak yararlanılmış olduğunu belirtir ve onurumla beyan ederim (26/09/2025).

Şahin DURMAZ

ÖNSÖZ

Tez çalışmam süresince; değerli fikirleri ile yol gösteren, bilgi ve birikimleriyle desteğini esirgemeyen, bilime olan inancını her fırsatta öğrencisine aşıl原因an çok değerli hocam, Prof. Dr. Feriha Erfan KUYUMCU'ya teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Tezimin her aşamasında beni yalnız bırakmayan, manevi desteklerini hissettiren aileme sevgi ve saygılarımı sunarım.

Eylül 2025

Şahin DURMAZ

Elektrik-Elektronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

	Sayfa No.
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
SEMBOLLER	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	x
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Literatür Taraması	1
2. ATIK SU ARITMA TESİSİNİN ÖNEMİ	7
2.1 Atık Su Arıtma Tesisleri ve Süreçleri	17
2.1.1 Atık su sistemlerinde enerji tüketimi ve enerji yönetmeliği.....	18
3. TERFİ POMPALARI	19
3.1 Atık Su Arıtma Tesislerinde Tercih Edilen Pompa Türleri.....	20
3.1.1 Dalgıç ıslak tip terfi pompaları	20
3.1.2 Dalgıç kuru tip terfi pompa	22
3.1.3 Dikey milli santrifüj pompa.....	23
3.2 Pompa Sistemlerinde Koruma yöntemleri	24
3.2.1 Elektriksel koruma yöntemleri	24
3.2.2 Mekaniksel koruma yöntemleri	25
3.2.3 Pompa sızdırmazlık elemanları	26
3.2.4 Katodik koruma	32
3.3 Pompalarda Yol Verme Yöntemleri.....	38
3.4 Pompalarda Yol Verme Sıklığı	42
4. POMPA SEÇİMİNDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN UNSURLAR ve MEVCUT POMPA SİSTEMLERİNİN ANALİZİ	43
4.1 Basınç Etkisi.....	43

4.2 Basma Yüksekliği (Total Dynamic Head, TDH).....	44
4.3 Sıvı Yoğunluğu (ρ).....	47
4.4 Basınç, Basma Yüksekliği ve Sıvı Yoğunluk İlişkisi	47
4.5 Pompa Performans Grafiği.....	47
4.6 Mevcut Pompa Sistemlerinin Analizi	50
4.6.1 Yüksek Verimli Motorlar	50
4.6.2 Terfi pompa sistemlerinde yeni nesil pompa motorları ile enerji verimliliği	51
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	56
KAYNAKÇA	61
ÖZGEÇMİŞ.....	63



KISALTMALAR

AC, DC	: Alternatif akım, doğru akım
AKM	: Askıda katı madde
AÖAT	: Atık su ön arıtma tesisi
ARGE	: Araştırma geliştirme
ATV-131E	: Almanya kökenli tasarım standardı
BAAT	: Biyolojik atık su arıtma tesisi
BEP	: En iyi verimlilik noktası
BLDC	: Fırçasız doğru akım motoru
BOİ	: Biyolojik oksijen ihtiyacı
BOİ5	: 5 günlük biyokimyasal oksijen ihtiyacı
ÇHİ	: Çamur hacim indeksi
DO	: Çözünmüş oksijen
F	: Frekans
g	: Yerçekimi kuvveti
HDPE	: Yüksek yoğunluklu polietilen malzeme
Hm, mSS	: Suyun yüksekliği, metre su sütunu
IBGYSA	: İleri beslemeli geri yayımlı yapay sinir ağı
IEA	: Uluslararası enerji ajansı
İBAAT	: İleri biyolojik atık su arıtma tesisi
İSG	: İş sağlığı güvenliği
KOİ	: Kimyasal oksijen ihtiyacı
MSE	: Ortalama karesel hata
OSB	: Organize sanayi bölgesi
P	: Basınç
pH	: Potansiyel hidrojen
PLC	: Programmable Logic Controller
PTFE	: Teflon bant
PV	: Fotovoltaik
RPM	: Motorun dakikadaki devir sayısı

SCADA	: Supervisory Control and Data Acquisition
SKKY	: Su kirliliği kontrolü yönetmeliği
TDH	: Toplam dinamik basınç
TM	: Terfi merkezi
TN	: Toplam azot
TP	: Toplam fosfor
TÜİK	: Türkiye istatistik kurumu
VFD	: Frekans konvertörü
WEO	: Dünya enerji görünümü
YG, AG	: Yüksek gerilim, alçak gerilim
YSA	: Yapay sinir ağları



SEMBOLLER

Cl⁻	: Klorür iyonları
D	: Boru iç çapı
e^-	: Elektron
g	: Yerçekimi kuvveti
H₂O	: Su molekülü
H_f	: Sürtünme kayıpları
H_s	: Statik yükseklik
KWh	: Kilo watt saat
L	: Boru uzunluğu
M_e²⁺	: +2 değerlikli bir metal iyonunu
MPPT	: Maksimum güç noktası
mSS	: Metre su sütunu
OH⁻	: Hidroksil
PR	: Oransal rezonans
Q	: Debi
R²	: Determinasyon katsayısı
THD	: Toplam harmonik bozulma
TWh	: Tera watt saat
η	: Verim
O₂	: Oksijen
V	: Hacim
f	: Sürtünme katsayısı
m	: Kütle
ρ	: Sıvı yoğunluğu

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa No.
Çizelge 2.1: Örnek Çalışmadaki Parametrelerin İstatistiksel Değerleri.....	14
Çizelge 2.2: YSA Eğitim Sonuç Tablosu.....	14
Çizelge 2.3: Performans Sonuç Tablosu	16
Çizelge 3.1: 20 C'deki Deniz Suyu Sıcaklığındaki İletkenlik Verileri.....	36
Çizelge 3.2: Gerekli Akım Yoğunluğu Tablosu (mA/m ²)	36
Çizelge 3.3: Anot Malzeme Kapasitesi.....	37
Çizelge 3.4: Pompa Yol Verme Sistemlerinin Kıyaslanması	42
Çizelge 3.5: Motor Gücüne Göre Saatteki Maksimum Kalkış Sayıları.....	42
Çizelge 4.1: Uluslararası Verimlilik Sınıfları (IEC 60034-30 Standardına Göre).....	51
Çizelge 4.2: Atık Su Arıtma Terfi Merkezi Kot Ölçümleri	52
Çizelge 4.3: Eski ve Yeni Pompa Teknik Bilgileri	53
Çizelge 4.4: Örnek Verilen Terfi Merkezi 2023 ve 2024 Yıllarına Ait Debi Ve Elektrik Tüketim Verileri	54

ŞEKİL LİSTESİ

	Sayfa No.
Şekil 2.1: Kaynağına Göre Çekilen Su Miktarının Dağılımı	7
Şekil 2.2: Alıcı Ortamına Göre Deşarj Edilen Atık Suyun Dağılımı	8
Şekil 2.3: Kaynaklarına Göre Belediye İçme Ve Kullanma Suyu Şebekesine Çekilen Su Miktarları	9
Şekil 2.4: Belediyeler Tarafından Arıtılan Atık Su Miktarının Tesis Tipine Göre Dağılımı	9
Şekil 2.5: Atık Su Arıtma Tesisi İle Hizmet Verilen Belediye Nüfusunun Toplam Belediye Nüfusuna Oranı	10
Şekil 2.6: Dört Katmanlı İBGYYSA Mimarisi	12
Şekil 2.7: Doğrulama Performans Diyagramı	15
Şekil 2.8: Hata Histogramı	15
Şekil 2.9: Gözlemlenen ve Tahmin Edilen Veri Karşılaştırması	16
Şekil 3.1: Dalgıç Islak Tip Terfi Pompası	21
Şekil 3.2: Dalgıç Kuru Tip Terfi Pompa ve Fan Salyangoz Yapısı	22
Şekil 3.3: Dikey Milli Tip Santrifüj Pompa Motoru ve Dikey Mil Yapısı	23
Şekil 3.4: Yumuşak Salmastra ve Montaj Yuvası	27
Şekil 3.5: Mekanik Salmastra ve Elemanları	28
Şekil 3.6: Mekanik Salmastra İç Yapısı	29
Şekil 3.7: Motor Rulmanı	29
Şekil 3.8: Pompa Mili ve Yeni, Eski Mil Koruma Burçları	30
Şekil 3.9: Yeni ve Arıza Sebebiyle Demontajı Yapılan Aşınma Halkaları	31
Şekil 3.10: Oksijenin Metal ile Reaksiyonu	32
Şekil 3.11: Metalin Elektron Akımı ile Katodik Korunması	33
Şekil 3.12: Eriyen Galvanik Anot	34
Şekil 3.13: Eriyen Galvanik Anot Ölçüm ve Kontrolleri	35
Şekil 3.14: Frekans Konvertörü ve Touch Panel Kontrol Ekranı	40
Şekil 3.15: 6.3 kV Beslemeli Oto Transformatör ve Besleme Panosu	41

Şekil 4.1: Terfi Pompası Emiş Basma Hattı Teknik Resim Çizimi	45
Şekil 4.2: Pompa İçin Çalışma Noktası (BEP)	48
Şekil 4.3: ABS FR 800/800 110 Modeli Pompa Performans Grafiği	49
Şekil 4.4: Atık Su Arıtma Terfi Merkezi Kesit Ölçüleri	52
Şekil 4.5: Motor Sınıfı IE3 Olan Yüksek Verimli Pompa [25].....	53
Şekil 4.6: Eski/Yeni Pompaların Bir Yıllık Debi Ve Elektrik Tüketim Grafiği	54
Şekil 4.7: Eski/Yeni Pompaların Aylık Bazda Debi ve Elektrik Tüketim Grafiği	55



ATIK SU ARITMA TESİSLERİNDE KULLANILAN TERFİ POMPALARI VE YENİ NESİL POMPA MOTORLARI İLE ENERJİ VERİMLİLİĞİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Günümüzde atık su arıtma tesislerinin varoluşu önemli hale gelmiştir. Doğayı korumak adına yerleşim yerlerinden tesislere gelen atık sular arıtıldıktan sonra alıcı ortama verilmektedir. Arıtma tesislerinin aktif olarak işletilmesi ve prosesin yürütülmesi için tesisin genel yapısının bilinmesi, tesis ekipmanlarının verimli bir şekilde çalıştırılması gerekmektedir. Arıtma tesislerinin elektrik enerji sarfiyatı da azımsanmayacak kadar yüksektir. Enerjide dışa bağımlı olduğumuz düşünüldüğünde tesisin kurulumundan işletilmesine kadar olan her uygulama çok önemlidir. Arıtma tesislerinde elektrik enerji tüketiminin büyük bir kısmı; terfi pompaları, havalandırma fanları, blower sistemleri, kompresör gibi yüksek güçlerdeki cihazlar çekmektedir. Arıtma tesislerinde kullanılan terfi pompalarının günümüzdeki kullanım iyileştirmeleri, yeni nesil pompa motoruyla verimlilik analizleri yapılacaktır.

Anahtar Kelimeler: *Terfi pompaları, Enerji verimliliği, Atık su arıtma tesisleri*

EXAMINATION OF ENERGY EFFICIENCY WITH LIFT PUMPS AND NEW GENERATION PUMP MOTORS USED IN WASTEWATER TREATMENT PLANTS

ABSTRACT

Nowadays, the existence of wastewater treatment plants has become increasingly important. In order to protect nature, wastewater coming from residential areas is treated in these facilities before being discharged into receiving environments. For the effective operation of treatment plants and the proper execution of processes, it is essential to understand the general structure of the plant and to operate the equipment efficiently. The electricity consumption of treatment plants is also considerably high. Considering the country's dependency on foreign energy sources, every step from the installation to the operation of the plant is of great importance. A significant portion of electricity consumption in wastewater treatment plants comes from high power devices such as lift pumps, aeration fans, blower systems, and compressors. This study will analyze the current usage improvements of lift pumps used in treatment plants, as well as the efficiency of new generation pump motors.

Keywords: *Lift pumps, Energy efficiency, Wastewater treatment plants*

1. GİRİŞ

Evlerde, endüstriyel ve tarımsal faaliyetlerde suya ihtiyaç her geçen gün artmaktadır. Suya karşı bu ihtiyaçların karşılanması hem temiz su hem de atık su yönetiminin çok iyi planlanmasından geçmektedir. Atık su üretimi doğrudan temiz suyun tüketimi ile bağıntılıdır. Temiz su tüketiminin yaklaşık %85'i atık su olarak arıtma tesislerine gönderilmektedir. Bu oran ne kadar yüksek olursa bireylerin doğaya verdiği zarar o kadar azalmış olacaktır. Evsel ve endüstriyel atık sular alt yapı kanalizasyon sistemi vasıtasıyla atık su arıtma tesislerinde toplanmaktadır. Arıtma tesisi tasarımında; tesisin kurulacağı yer, atık suyun toplanacağı havza ve bu alandaki nüfus sayısı çok önemlidir. Kişi başına temiz su tüketimi kırsal yerleşkelerde düşük iken, büyük şehirlerde bu oran 2 katına kadar çıkmaktadır. Tüketilen su miktarının bilinmesi ile atık su miktarının tahmin edilmesi tesis tasarımı için en önemli faktördür.

Türkiye'de 2022 yılına ait TÜİK verilerine göre kişi başına günlük su tüketimi ortalama 229 litre olarak hesaplanmıştır. Üç büyük şehir için veriler şu şekildedir.

Ankara 242 litre/gün

İstanbul 190 litre/gün

İzmir 210 litre/gün

Yine aynı yıl verilerine göre kullanılan içme ve kullanma suyunun atık su olarak arıtma tesislerinde toplanması kişi başına ortalama 197 litre olarak hesaplanmıştır [18]. Arıtma tesis tasarımında güncel verilerin yanı sıra gelecekte artacak nüfus ve su miktarındaki değişim de göz önünde tutulmalıdır.

1.1 Literatür Taraması

Yapılan çalışmada, atıksu arıtma tesisleri için bir simülatör geliştirilmiş ve havalandırma ile çökeltim süreçlerini tek bir yapıda birleştiren yenilikçi birleştirilmiş tank hacmi tasarımı önerilmiştir. Bu tasarım, geleneksel iki ayrı tank yerine Arşimet spirali formunda entegre edilmiş tek bir tank yapısı sunulmuş ve WOA (Whale

Optimization Algorithm) ile optimize edilmiştir. Yapılan bilgisayar simülasyonları, bu tasarımın sistem performansını önemli ölçüde iyileştirdiği gösterilmiştir. Gaziantep Oğuzeli Atıksu Arıtma Tesisi üzerinde gerçekleştirilen bir yıllık gerçek veri temelli vaka çalışmasıyla, önerilen yöntemlerin pratikte de başarılı sonuçlar verdiği doğrulanmıştır. Sonuç olarak, önerilen simülatör ve optimum tank tasarımı; modelleme, kontrol, tasarım ve uygulama açısından etkili, yenilikçi ve uygulanabilir bir alternatif olarak değerlendirilebilir. Ayrıca; simülatör, işletme, planlama, AR-GE ve performans değerlendirme süreçlerini kullanıcı dostu bir ara yüz ile desteklemektedir. Simülatörün geliştirilmesine yönelik olarak, farklı optimizasyon algoritmaları ve programlama dilleri kullanılabilir. Zaman içeren performans kriterleri temelinde, PID veya gelişmiş kontrol yöntemleri tasarlanabilir ve sistem kapalı çevrim kontrol yaklaşımıyla test edilebilir [1].

Atık su arıtma tesisleri, sürdürülebilirlik açısından enerji tasarrufu ve kaynak geri kazanımı sağlayarak çevresel etkileri azaltmada önemli rol oynamaktadır. Bu çalışmada, Almanya kökenli ATV-131E tasarım standardının yerel koşullarda etkinliği değerlendirilmiş, gerçek tesis verileri ile karşılaştırılmıştır. Sonuçta, İstanbul'daki atık su arıtma tesislerinde nitrifikasyon bakterilerinin büyüme hızının Almanya'dakine göre önemli ölçüde düşük olduğu ($0,5 \text{ gün}^{-1}$ vs. $1-1,6 \text{ gün}^{-1}$) ve bunun havzadaki endüstriyel deşarjlarla ilişkili olabileceği belirlenmiştir. Bu durum, tasarımda yerel koşulların dikkate alınmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Hibrit sistem, değişken atıksu özelliklerine uyum sağlayabilmekte ve konvansiyonel sistemlere kıyasla %40 daha az reaktör hacmi gerektirmektedir. Enerji tüketimi ve işletme maliyetleri hibrit sistemde belirgin şekilde düşmekte; oksijen ihtiyacı %19-23, elektrik tüketimi %35, karıştırma enerjisi ise %55 oranında azalmaktadır. Ayrıca, %12 daha az çamur üretilmekte ve biyogaz üretimi konvansiyonel sisteme göre %65 daha fazla olmaktadır. Bu biyogaz, tesisin yenilenebilir enerji ihtiyacını karşılayarak ekonomik avantaj sağlamaktadır. Hibrit sistem, çeşitli atıksu türleri için uygun, çevre dostu ve ekonomik bir alternatif olarak hem yeni tesislerde hem de mevcut tesislerin iyileştirilmesinde kullanılabilir [2].

Bu çalışmada, demir çelik tesisindeki sürekli döküm merkezleri soğutma sistemlerinde yer alan pompa ve pompaj sistemlerinde yapılan iyileştirmelerle enerji tasarrufu ve sistemlerin enerji verimliliği hedeflenmiştir. Pompa emiş hatlarında filtre, kollektör ve ek boru sistemlerinde iyileştirmeler yapılmıştır. Eski aşınmış

pompa fanlarına seramik kaplama uygulanmıştır. Sık sık arıza veren motorlar yeni nesil elektrik motorları ile değişimi yapılmıştır. Yüksek kapasiteli eşanjör kullanımına geçilmiştir. Pompaların çalışması referans sıcaklığa göre optimize edilmiştir. Bu çalışmaların sonucunda; yıllık enerji tüketimi %59 oranında azaldığı; elektrik enerji tüketimi kış mevsiminde 240 kWh'den 109 kWh'e, yaz mevsiminde 347 kWh'den 125 kWh'e düştüğü gözlemlenmiştir. Yatırımın geri ödemesi yaklaşık 11 ay olarak hesaplanmıştır. Karbon emisyonu 1143,5 ton/yıl azaldığı görülmüştür [3].

Bu çalışmanın amacı, sanayideki pompa ve fan sistemlerinde enerji verimliliğini artırmak için uygulanan enerji yönetimi yöntemlerini göstermek ve analiz etmektir. Sanayide enerji yönetiminin önemi ve pompa, fan sistemlerinde enerji verimliliğini artırmaya yönelik uygulamalar ele alınmıştır. Deneyler sırasında farklı çalışma koşulları deneyerek, pompa ve fanların en verimli nasıl çalıştırılabileceği araştırılmıştır. Pompa debisini büyük seçip düşük debide çalıştırmak ya da çıkış vanasını kısmanın enerji tasarrufu sağlamadığı, frekans konvertörü sayesinde değişken debili sistemlerde yaklaşık %60 oranında enerji tasarrufu sağlandığı ve en etkili yöntemin pompa ve fanlarda frekans konvertörü kullanılmasının doğru seçim olduğu görülmüştür. Yapılan çalışmanın literatüre katkısı, frekans konvertörü kullanımı ile enerji kayıplarının ve verimsizliklerin azaltılabileceğini ortaya koymasındadır [4].

Bu çalışmada, santrifüj pompaların tasarımında hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizlerinin kullanımının önemi vurgulanmaktadır. Santrifüj pompalar farklı kullanım alanlarına göre çeşitli debi ve basma yüksekliği parametreleri gerektirdiğinden, tasarım süreci karmaşık olabilmektedir. Bu çalışmada, örnek bir santrifüj pompa üzerinden sayısal analiz adımları ve kullanılan yöntemler açıklanmıştır. Bilgisayar destekli tasarım ve analiz programları sayesinde zaman ve maliyet tasarrufu sağlanır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği analizleri ile pompa içindeki akış davranışları sayısal olarak incelenebilir. En büyük avantaj, parametrelerin sınırsız şekilde değiştirilebilmesi ve tasarımın buna göre optimize edilebilmesidir. Katı model oluşturulduktan sonra analizler yapılarak uygun değerlere ulaşılan kadar süreç sürdürülebilir. Hesaplamalı akışkanlar dinamiği yönteminin, deneysel düzenek kurmaya gerek kalmadan süreklilik, momentum ve enerji denklemlerini çözerek akış analizi yapmaya olanak sağladığı

vurgulanmaktadır. Bu sayede tasarımcı, farklı akış koşullarını önceden analiz ederek zaman ve maliyetten tasarruf edebilir. Sonuç olarak, CFD kullanımı tasarım sürecini hızlandırmakta ve daha verimli ürünlerin geliştirilmesini sağlamaktadır [5].

Bu çalışmada, Ataköy İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi (AİBAAT) üzerinden atıksu arıtma tesislerinde enerji yönetimi önemini ve ekonomik analiz ele alınmıştır. Tesisin enerji üretimi, tüketimi ve verimliliği detaylı şekilde analiz edilmiştir. Arıtma tesisleri, proses ve ekipmanlara bağlı olarak yüksek oranda enerji tüketmekte olup, enerji maliyeti işletme bütçesinin en büyük kalemlerinden biridir. Enerji yönetimi, artan enerji maliyetleri nedeniyle atıksu arıtma tesislerinde kritik öneme sahiptir. 2012 Ocak/Eylül dönemi incelenen bulgular; kişi başı aylık su tüketimi 5007 lt, enerji tüketimi ise 1652 Wh/kişi olarak hesaplanmıştır. Atık su arıtma tesisinin incelenen başlıca parametreleri; arıtılan atık su miktarı, üretilen biyogaz, türbin elektrik üretimi, toplam elektrik tüketimi, enerji geri kazanım oranı ve özgül enerji tüketim değerleri ele alınmıştır. Sonuç olarak incelenen parametreler neticesinde; öncelikle enerji verimliliği için tesislerin hidrolik açıdan doğru planlanması, enerji tasarruflu proses ve ekipmanların doğru seçilmesi gerekmektedir. Prosesler sürekli izlenmeli ve özgül enerji tüketimleri kabul edilebilir düzeyde tutulmalıdır. Enerji tasarrufu; pompaların, havalandırma fanlarının, karıştırma ve çamur arıtma ekipmanlarının tasarım ve yerleşiminin optimize edilmesiyle sağlanabilir. İşletme eğitimi ve mühendislik firmalarının bilgilendirilmesi, gelecekteki projeler için sürdürülebilir enerji kullanımına katkı sağlayacaktır. Ataköy İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi sayesinde yılda yaklaşık 200.000 ton atığın denize dökülmesi önlenmekte ve arıtılan su farklı alanlarda yeniden kullanılmaktadır. Tesis, biyogaz üretimi, elektrik üretimi ve çimento sanayine katı yakıt temini gibi ileri teknoloji uygulamalarıyla ülkemizdeki örnek atıksu arıtma tesislerinden biridir [6].

Bu çalışmada, atıksu arıtma tesislerinde çamur hacim indeksi (ÇHİ) değerinin otomatik, deney gerektirmeyen bir YSA sistemiyle tahmin edilmesi amaçlanmıştır. ÇHİ değeri, çamur çökelme kalitesini gösteren önemli bir parametredir. Özellikle ÇHİ >150 ml/g olduğunda çamur kabarması ve çökelme problemleri görülmektedir. Ancak yalnızca ÇHİ değeri yeterli olmayıp, çökelmeme nedenlerinin belirlenmesi için flok ve filament yapılarının mikroskopik incelenmesi gerekmektedir. Yaklaşım olarak mikroskop kameralı ve motorlu XY platformlu bir sistem ile aktif çamur

numunelerinden otomatik görüntü alınmıştır. 1 yıl boyunca (Eylül 2011 – Ağustos 2012) toplam 120 numuneden 5880 görüntü alınmış ve her görüntüden 33 parametre çıkarılarak 194.040 veri oluşturulmuştur. Görüntülerden flok ve filament yapıların morfolojik, istatistiksel ve dokusal özellikleri belirlenmiştir. Görüntü netliğini ölçmek için dalgacık dönüşüm yöntemi kullanılmış ve yeni bir segmentasyon yöntemi olan HSA (Harmony Search Algorithm) ile görüntüler bölümlenmiştir. Elde edilen parametreler, 33:10:1 mimarisi Yapay Sinir Ağı (YSA) modeline giriş olarak verilmiştir. YSA'nın eğitimi için Levenberg-Marquardt, genetik algoritma ve arı algoritması kullanılmıştır. 5 kat çapraz doğrulama ile modelin geçerliliği test edilmiş ve en iyi korelasyon değeri 0,915 olarak elde edilmiştir. Protozoalar filament yapılarla karışık görüldüğünden, ayırıştırma için aktif kontur yöntemine başvurulmuştur. Protozoaların sınırlarını belirlemede, konveks alan ve otomatik maskeyle aktif kontur uygulanmıştır. Tüm süreç otomatikleştirilmiş, kullanıcı müdahalesi gerektirmeden çalışan bir sistem geliştirilmiştir. Sonuç olarak atık su arıtma tesislerinde; görüntü işleme ve yapay zekâ ile proses izleme ve kontrolünün mümkün olduğunu, deneysel ihtiyaçların ve işletme maliyetlerinin azaltılabileceğini, otomatik karar destek sistemlerinin tesis işletmelerine entegre edilebileceğini göstermektedir. Bu yöntem, ileride çevre mühendisliğinde proses izleme için yenilikçi ve uygulanabilir bir araç olarak değerlendirilebilir [7].

Bu tez çalışmasında, fırçasız doğru akım (BLDC) motor ve pompayı beslemek amacıyla tasarlanan iki kademeli bağımsız bir fotovoltaik (PV) sistemin tasarımı ve analizi yapılmıştır. Önerilen sistem; birinci kademe olarak PV panel dizisi ile maksimum güç noktası takibi (MPP) amacıyla kullanılan Buck Boost tipi bir DC/DC dönüştürücüden ve ikinci kademe olarak BLDC sürücüsüne uygun gerilim sağlamak üzere tek fazlı tam köprü gerilim kaynaklı bir inverterden oluşmaktadır. Çalışmada öncelikle sistemin temel prensipleri ve tasarım kriterleri incelenmiş, bu doğrultuda sistem modellenmiş ve benzetimi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları, doğrudan görev döngüsü pertürbasyonu temelli MPP algoritmasıyla çalışan Buck Boost dönüştürücünün kararlı bir şekilde çalışabildiğini ve PV panelinden elde edilen gücün, farklı ışınım ve sıcaklık koşullarında üretici tarafından verilen maksimum güç noktası (MPP) değerleriyle uyumlu olduğunu göstermektedir. DC aşamasının genel verimi yaklaşık %88 olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, Buck Boost dönüştürücünün MPPT uygulamaları için uygun ve kararlı bir

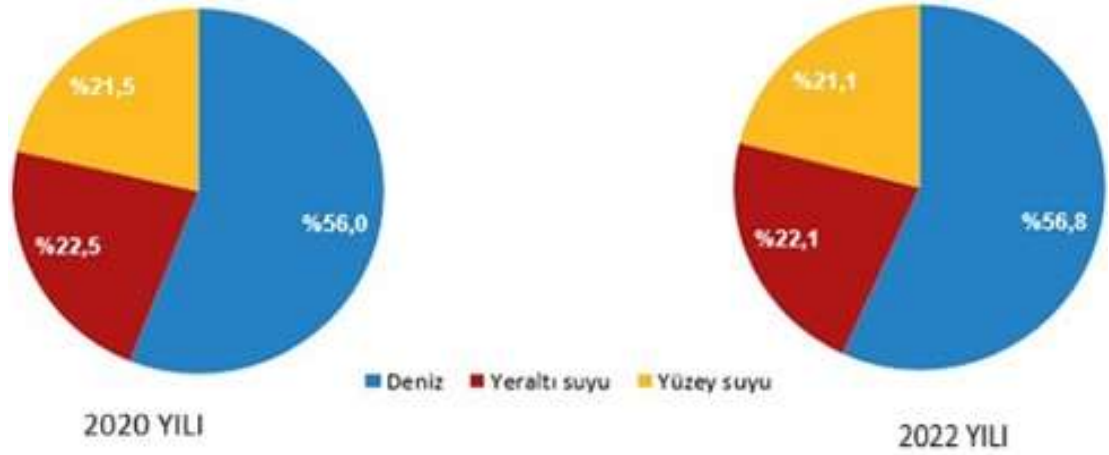
topoloji olduğunu ortaya koymaktadır. İnverter aşamasında gerilim kontrolü için oransal rezonans (PR) kontrolörü ve klasik PID kontrolörü karşılaştırılmıştır. RL yük ile yapılan simülasyonlarda, PID kontrolörünün kararlı durumda daha düşük harmonik bozulma (%0,5) sağladığı gözlemlenmiştir. Ancak sistem devreye alındığında, PID kontrolörünün başlangıç aşamasında yüksek bir aşım gösterdiği belirlenmiştir. Buna karşılık PR kontrolörü, referans gerilimini geçici rejim hatası oluşturmadan takip edebilmiştir. Sistem, BLDC motor sürücüsünü de içerecek şekilde simüle edildiğinde ise PR kontrolörünün daha sağlam bir performans sergilediği tespit edilmiştir. Bu durumda inverter çıkışındaki toplam harmonik bozulma (THD), PR kontrolörü için %8,5 iken PID kontrolörü için %11,8 olarak ölçülmüştür. Elde edilen bulgular doğrultusunda, her iki kontrolör de gerilim regülasyonu sağlamak için yeterli performans sergilemekle birlikte, PR kontrolörünün daha sağlam ve geçici rejim açısından daha uygun bir seçenek olduğu sonucuna varılmıştır. Sonuç olarak, önerilen iki kademeli sistem; birinci aşamada maksimum güç elde edilmesi ve ikinci aşamada gerilim regülasyonu sağlanarak, BLDC motor pompa sürücüsünün başarıyla çalıştırılmasını mümkün kılmış ve çalışmanın iki temel amacına ulaşılmıştır [8].

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) enerji analisti Molly Walton, 19 Kasım 2018 tarihinde yayınladığı makalede enerji ve su tüketimi arasındaki ilişkiye değinmiştir. Dünya enerji görünümü (WEO) analizinde; atık suyun toplanması ve arıtılması sektörün küresel elektrik tüketiminin %4'ünü oluşturduğu, su sektöründe tüketilen enerjinin %25'ini atık suyun arıtımında kullanıldığı vurgulanmıştır. Arıtma tesislerinde enerji tüketimi üzerine iyileştirmelerin olmaması ve aynı düzen ile işletilmeleri ile elektrik tüketiminin 2030 yılına kadar 680 TWh 'den fazla artabileceği ön görülmektedir [9].

2.ATIK SU ARITMA TESİSİNİN ÖNEMİ

Su hayattır. Canlıların birinci dereceden temel ihtiyacı ve hayatta kalabilmesi için en temel maddedir. Dünyada nüfusun artması ve sınırlı temiz su kaynakları sebebiyle su sıkıntısının yaşanması kaçınılmazdır. Öyleyse bireysel ve toplumsal olarak ihtiyaç dışı aşırı su tüketiminin önüne geçilmelidir.

Temiz su kaynaklarının ve çevrenin korunumunun bir bölümü de atık su arıtma tesislerinin verimliliği ve sürdürülebiliridir. Doğal su kaynaklarının korunması için atık suların kontrollü bir şekilde deşarjının veya geri kazanımının önemi büyüktür. Özellikle gelişmekte olan ülkelerde hızla büyüyen şehir yapıları sebebiyle su kaynaklarına risk teşkil etmektedir. Sınırlı olan su kaynaklarının etkin bir şekilde koruma altına alınması gerekmektedir. Arıtma tesislerini verimli bir şekilde çalıştırarak atık suyun temiz su kaynaklarına zarar vermeden geri kazanımı sağlanmalıdır.



Şekil 2.1: Kaynağına Göre Çekilen Su Miktarının Dağılımı

TÜİK verilerine göre 2022 yılında su kaynaklarından 19,2 milyar m³ su çekildiği ve bu değer 2020 yılı verilerine göre 1 milyar m³ arttığı hesaplanmıştır. Çekilen suyun %56,8'i denizden, %22,1'i yeraltı kaynaklarından ve %21,1'i yüzey sularından temin edilmiştir (Şekil 2.1). Denizden çekilen suyun soğutma suyu olarak kullanılması ve geriye kalan kısmın içme ve kullanım suyu olarak yeraltı ve yüzey

sulardan temin edildiğini görmekteyiz. Bu sebeple yeraltı ve yüzey su kaynaklarının kirletilmemesi için atık su arıtma tesislerinin ne denli önemli olduğu görünmektedir [18].

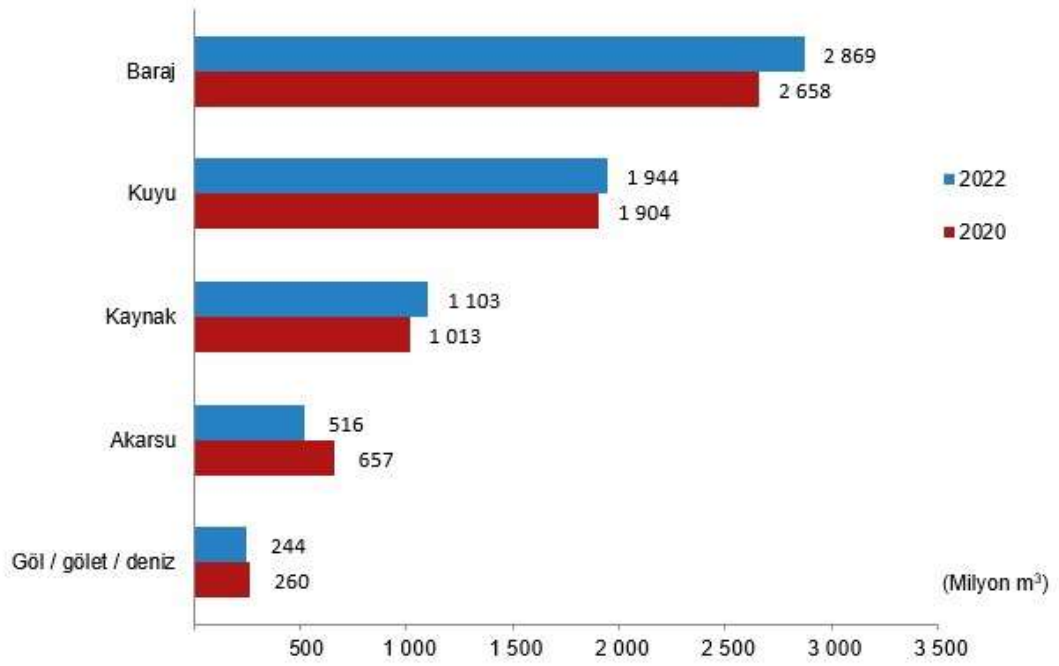
Yeraltı ve yüzey su kaynaklarından çekilen suyun %80,3'ü belediyeler, %8,6'sı endüstriyel işletmeler, %4,7'si köyler, %4,9'u maden işletmeleri ve OSB'ler ise %1,5'i termik santraller tarafından kullanılmıştır. Toplam 1,391 belediyenin 1,390'unda içme ve kullanma suyu şebekesi ile hizmet verildi. İçme ve kullanma suyu şebekesi ile hizmet verilen belediye nüfusunun toplam belediye nüfusuna oranı %98,8 olarak belirlenmiştir [18].

Kullanılan temiz su kaynaklarından alıcı ortamlara 16,4 milyar m³ atık suyun deşarj edildiği görülmüştür. Şekil 2.2 de doğrudan alıcı ortamlara deşarj edilen atık suyun %76,5'i denizlere, %19,5'i akarsulara, %1'i barajlara, %0,8'i fosseptiklere, %0,7'si göl/göletlere, %0,2'si araziye, %1,4'ü ise diğer alıcı ortamlara deşarj edilmiştir [18].



Şekil 2.2: Alıcı Ortamına Göre Deşarj Edilen Atık Suyun Dağılımı

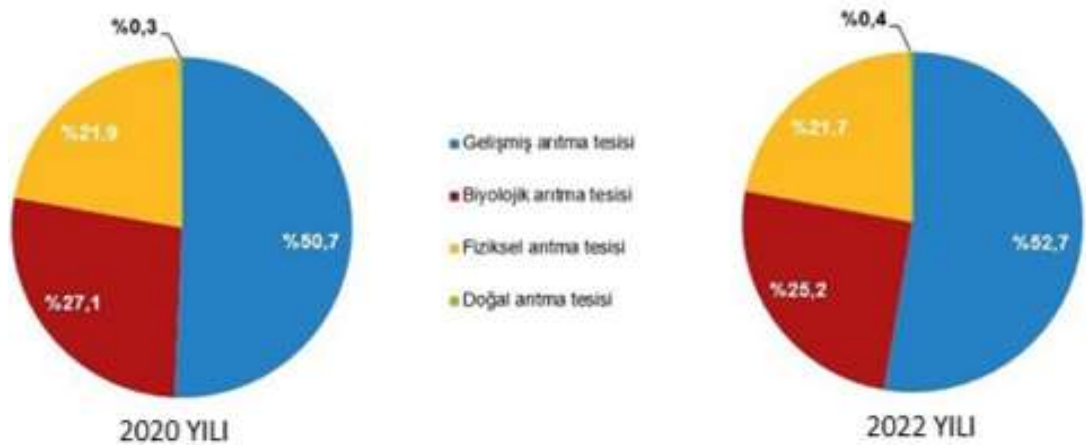
2022 yılında toplam atık suyun %52,4'ü termik santraller, %31,2'si belediyeler, %12,9'u imalat sanayi işyerleri, %1,7'si OSB'ler, %1'i maden işletmeleri, %0,7'si ise köyler tarafından doğrudan alıcı ortamlara deşarj edilmiştir [18]. Belediyeler tarafından su kaynaklarından 6,7 milyar m³ su çekildi. Çekilen suyun %43'ü barajlardan, %29,1'i kuyulardan, %16,5'i kaynaklardan, %7,7'si akarsulardan ve %3,7'si göl, gölet veya denizlerden sağlandı.



Şekil 2.3: Kaynaklarına Göre Belediye İçme Ve Kullanma Suyu Şebekesine Çekilen Su Miktarları

Kaynaklardan çekilen toplam 6,7 milyar m³ suyun 4,1 milyar m³'ü içme ve kullanma suyu arıtma tesislerinde arıtıldı. Arıtılan suyun %90,4'üne konvansiyonel, %9,6'sına gelişmiş, %0,03'üne ise fiziksel arıtma uygulandı.

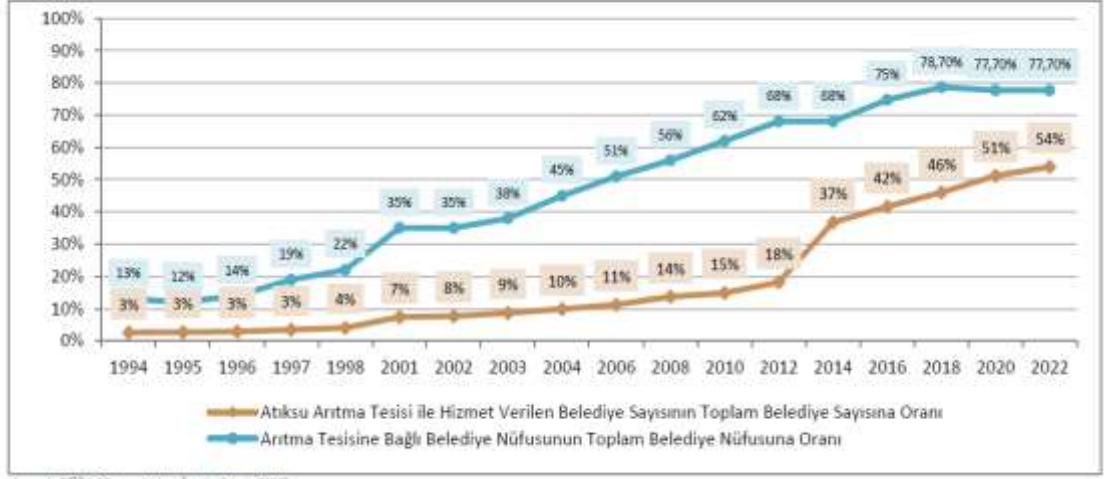
Belediyeler tarafından kanalizasyon şebekesinden deşarj edilen 5,4 milyar m³ atık suyun 4,6 milyar m³'ü atık su arıtma tesislerinde arıtıldı.



Şekil 2.4: Belediyeler Tarafından Arıtılan Atık Su Miktarının Tesis Tipine Göre Dağılımı

Arıtılan atık suyun %52,7'sine ileri biyolojik, %25,2'si biyolojik, %21,7'sine fiziksel ve %0,4'üne doğal arıtma uygulandı (Şekil 2.4). Arıtılan atık suyun %1,5'i

sanayi, tarımsal sulama vb. alanlarda yeniden kullanılmıştır. Şekil 2.5 'de atık su arıtma tesisi ile hizmet verilen belediye nüfusunun toplam belediye nüfusuna oranı %77,7 olarak belirlendi [18].



Kaynak: TÜİK, 'Su ve Atıksu İstatistikleri, 2022'

Şekil 2.5: Atık Su Arıtma Tesisi İle Hizmet Verilen Belediye Nüfusunun Toplam Belediye Nüfusuna Oranı

Atık suyun özellikleri

Arıtma yönteminin belirlenebilmesi için alıcı ortama gelen suyun özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir. Atık sular kirleticilere göre fiziksel, kimyasal veya biyolojik olarak farklılıklar göstermektedir. Evsel atık su kirleticileri; KOİ, BOİ, AKM, azot, fosfor, virüsler, bakteriler olarak sıralanabilir.

Endüstriyel atık sular evsel atık sulara göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir. Bu atık sularda; ağır metaller, kimyasallar, organik bileşikler olabilir. Atık sular değişken bir yapıya sahip olmasından dolayı yapılacak analizlere göre proses seçimi ve parametre tanımlaması yapılmaktadır.

Su kirliliği kontrolü yönetmeliğine (SKKY) göre analiz parametreleri;

BOİ5 (5 günlük Biyokimyasal Oksijen İhtiyacı), 20°C'de, 5 gün boyunca yapılan ölçümdür. Bu süreçte mikroorganizmalar oksijeni tüketir, kalan oksijen miktarından ihtiyaç hesaplanır.

KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı), Kimyasal oksitleyicilerle oksitlenen tüm organik maddeler için gereken oksijen miktarı olarak tanımlanır.

Toplam Azot (TN), atık suda bulunan tüm azot formlarının toplamı olarak tanımlanır. **Toplam Fosfor** (TP), atık suda bulunan tüm fosfor bileşiklerinin

toplamını ifade eder. Hem organik hem de inorganik hem çözülmüş hem de parçacık haldeki fosforları kapsar.

pH, bir çözeltinin asitlik veya bazlık derecesini gösteren ölçüdür.

Çözülmüş Oksijen (DO), su içerisinde çözülmüş halde bulunan serbest oksijen gazı miktarını ifade eder.

İletkenlik, suyun tuzluluk yükünü ölçen pratik bir göstergedir.

Atık su arıtma tesislerinde yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak BOİ5 hesaplanması

Yapay Sinir Ağları (YSA), kavramı yapay zekâ uygulamalarında, problemleri çözme, sonuçları tahmin etmede kullanılmak üzere, insan beynindeki sinir hücrelerinin (nöronların) çalışma biçiminden esinlenerek geliştirilen bir hesaplama yöntemidir. Amaç, karmaşık problemleri çözmek ve sonuçları tahmin etmektir.

YSA yapıları, birbirine bağlı katmanlardan oluşmaktadır;

Giriş katmanı: Veri setinin sisteme girildiği katmandır.

Ara (gizli) katmanlar: Verilerin işlendiği katmanlardır.

Çıkış katmanı: İşlenmiş verilerin sonucunun elde edildiği bölümdür.

Bilgiler bu katmanlar arasında tek yönlü olarak aktarılırsa, bu yapı ileri beslemeli YSA olarak adlandırılır. YSA, klasik yöntemlerin yetersiz kaldığı karmaşık ve doğrusal olmayan problemleri çözmede etkilidir.

IBGYSA Modelinin Aşamaları;

İleri Yayılım (Forward Propagation)

Veri, giriş katmanından başlayarak gizli katmanlar aracılığıyla ağırlıklar yardımıyla işlenir ve çıktı katmanına iletilir. Burada ilk tahmin yapılır.

Hata Hesaplama; modelin tahmin ettiği sonuç ile gerçek sonuç karşılaştırılır. Oluşan fark “hata” olarak adlandırılır. Genellikle Ortalama Karesel Hata (MSE) kullanılır:

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (BOİ_{si(ölçülen)} - BOİ_{si(tahmin edilen)})^2 \quad (2.1)$$

Geri Yayılım (Backpropagation); çıkış katmanında hesaplanan hata, önceki katmanlara doğru geri yayılır. Bu sayede hangi bağlantıların hataya sebep olduğu belirlenir.

Ağırlıkların Güncellenmesi

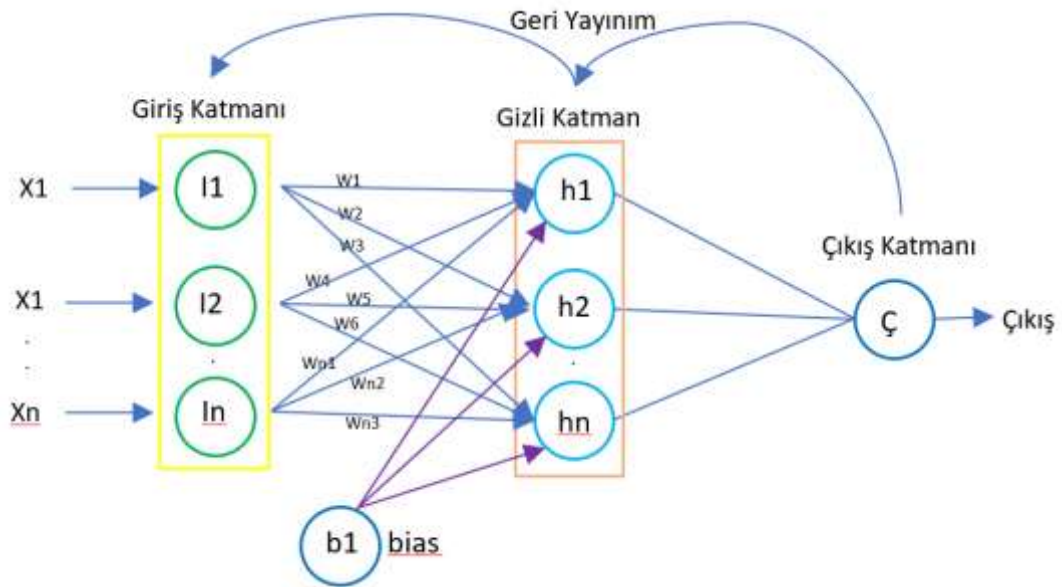
Her bağlantının ağırlığı, hatayı azaltacak şekilde güncellenir. Bu işlem, Gradient Descent (Kademeli Azalma) yöntemiyle gerçekleştirilir.

Öğrenme Döngüsü

Yukarıdaki işlemler, belirli sayıda tekrar edilerek modelin doğruluğu artırılır ve hata minimize edilir. Bu döngüsel yapı modelin öğrenmesini sağlar.

Modelin Uygulama Alanları

- Atık su arıtma sistemlerinde BOİ (Biyolojik Oksijen İhtiyacı) tahmini
- Endüstriyel süreç kontrolü
- Finansal veri analizi
- Sağlık alanında teşhis destek sistemleri



Şekil 2.6: Dört Katmanlı İBGYYSA Mimarisi

İBGYYSA modeli, klasik yöntemlerin yetersiz kaldığı durumlarda yüksek doğrulukla tahminler yapabilen güçlü bir yapay zekâ aracıdır. Veriye dayalı bu model, ağırlıkları optimize ederek öğrenme sürecini sürdürür ve uygulama alanlarında güvenilir sonuçlar sunar.

BOİ, ilk kez 1800'lü yıllarda nehirlerin organik kirliliğini ölçmek amacıyla kullanılmaya başlanmıştır. Başlangıçta test koşulları 18,3 °C ve 5 gün olarak belirlenmiştir; çünkü o dönemde nehir akış süresi 5 günü geçmiyor ve yaz sıcaklık ortalaması bu değerdedir. Günümüzde ise testler genellikle 20 °C'de ve 5 günlük inkübasyon süresiyle yapılmaktadır. Organik maddelerin biyolojik olarak tamamen oksitlenmesi teorik olarak çok uzun zaman alırken, pratikte bu sürenin 20 gün olduğu kabul edilir. Ancak uygulamada zaman kısıtı nedeniyle 5 günlük süre kullanılır. Bu süre, gerçek BOİ'nin yalnızca %70–80'ini yansıtsa da yeterli görülmektedir. Ancak, BOİ ölçüm süresinin uzunluğu ve doğruluğun düşüklüğü, özellikle suyun tekrar kullanım veya doğaya deşarj edildiği durumlarda sorun teşkil eder. Bu nedenle BOİ'nin hızlı ve doğru bir şekilde tahmin edilmesi kritik hale gelmiştir.

Bu noktada Yapay Sinir Ağları (YSA) devreye girmektedir. YSA, istenen çıktıları yüksek doğrulukla tahmin etme yeteneğine sahip bir yöntemdir. Çalışmada, örnek bir atıksu arıtma tesisine ait 164 veri seti olarak kullanılmıştır. Bu verilerin %80'i eğitim, %10'u test ve %10'u doğrulama amacıyla kullanılarak YSA modeli oluşturulmuş; gerçek ve tahmini BOİ değerleri karşılaştırılmıştır.

Verilerin Toplanması

Bu çalışmada, BOİ (Biyolojik Oksijen İhtiyacı) tahmini amacıyla İleri Beslemeli Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağı (IBGYSA) modeli kullanılmıştır. Bu uygulama 6 adet girdi vektörü ve 1 adet çıktı vektörü kullanılarak yapay sinir ağı modeli oluşturulmuştur. Data seti toplam 164 veriden oluşmaktadır.

Analizlerde kullanılan temel parametreler şunlardır:

- Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ)
- Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİ)
- Toplam Azot (T-N)
- Toplam Fosfor (T-P)
- Askıda Katı Madde (AKM)
- İletkenlik (I)
- Çözünmüş Oksijen (ÇOI)

Yapay Sinir Ağı (YSA) modelinin giriş katmanında kullanılmak üzere hazırlanan 164 adet veri setine ait istatistiksel özet bilgiler çalışmada Çizelge 2.1'de sunulmaktadır.

Çizelge 2.1: Örnek Çalışmadaki Parametrelerin İstatistiksel Değerleri

	KOİ	BOİ ₅	T-N	T-P	AKM	İletkenlik (İ)	Çözünmüş Oksijen (ÇOİ)
	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(µS/cm)	(mg/L)
Maksimum Değer	793,61	395,9	81,14	7,63	504	14980	7,52
Minimum Değer	100,37	47,41	17	0,4	57	1028	1,5
Ortalama Değer	366,19	205,28	42,78	4,7	222,43	8812,67	3,87
Standart Sapma	82,05	57,9	11,77	1,18	75,61	2990,79	1,23

Data setindeki veriler 0-1 arasında X_i eşitliği kullanılarak normalize edilmiştir.

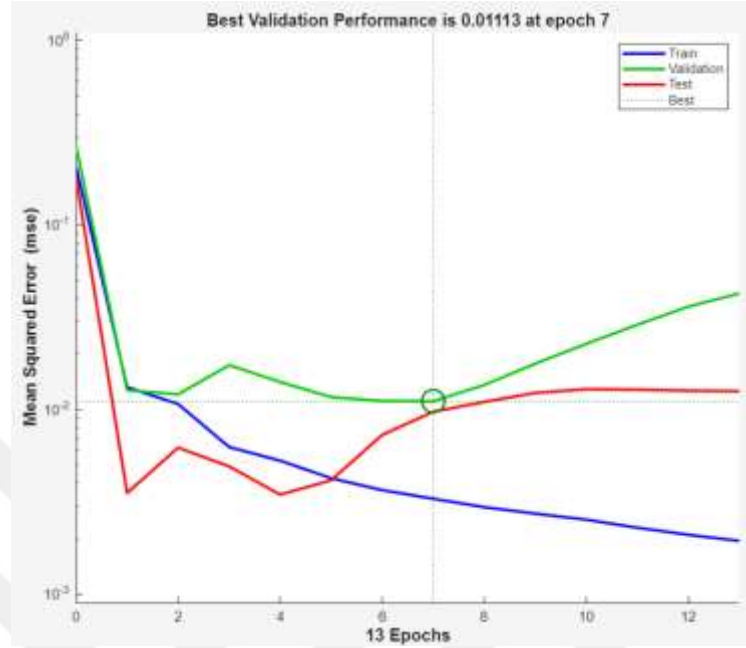
$$X_i = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (2.2)$$

İBGYYSA modeli ile yapılan duyarlılık analizinde, KOİ, T-N, T-P, AKM, İ ve ÇOİ giriş parametrelerinin, BOİ çıkış parametresi üzerindeki etkileri incelenmiştir. Modelde, 5x164 giriş verisi ve 1x164 çıkış verisi kullanılmıştır. Veriler %80 eğitim (132 adet), %10 test (16 adet) ve %10 doğrulama (16 adet) olarak ayrılmıştır. En iyi sonuçlar için 6:15:1 katman yapısı tercih edilmiştir. Aktivasyon fonksiyonu olarak Levenberg-Marquardt, hedef epoch değeri olarak 1000 seçilmiştir. Model yaklaşık 4 saniyede çalışarak tahmin sonuçlarını üretmektedir.

Çizelge 2.2: YSA Eğitim Sonuç Tablosu

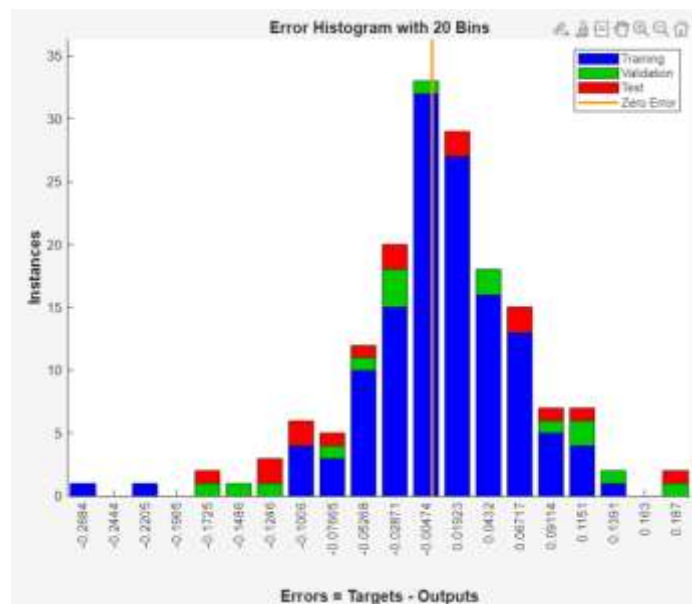
Training Progress			
Unit	Initial Value	Stopped Value	Target Value
Epoch	0	13	1000
Elapsed Time	-	00:00:00	-
Performance	0.208	0.00195	0
Gradient	0.83	0.0115	1e-07
Mu	0.001	1e-05	1e+10
Validation Checks	0	6	6

Modelin en iyi performansı 7. epoch adımında elde edilmiş, toplamda 13 epoch süresince çalıştırılmıştır. Modelin yapısı ve işleyişi, aşağıda bir diyagram ile görsel olarak sunulmuştur.



Şekil 2.7: Doğrulama Performans Diyagramı

Şekil 2.7’de, -0,0474 ile 0,01923 arasındaki hata aralığında yer alan bölmenin yüksekliği, eğitim verisi için 35’in altındadır. X eksenini, hata değerlerini; sıfır hata çizgisi ise bu eksen üzerinde dik olarak gösterilmiştir. Şekil 2.8’deki hata histogramında, sıfır hata noktası, -0,00474 merkezli bölmenin altına denk gelmektedir.



Şekil 2.8: Hata Histogramı

Hata histogramı, model eğitildikten sonra tahmin edilen değerlerle hedef değerler arasındaki farkları gösterir. Hatalar pozitif veya negatif olabilir. Grafik, toplam hata aralığını 20 bölmeye ayırır ve Y eksenini, her bir bölmedeki örnek sayısını gösterir. Bu sayede tahminlerin doğruluğu görsel olarak değerlendirilir.

Model test edildiğinde, test verilerindeki tahmin sonuçları ile gerçek ölçüm değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmüştür (Çizelge 2.3). Eğitim, doğrulama ve test sonuçları birlikte değerlendirildiğinde;

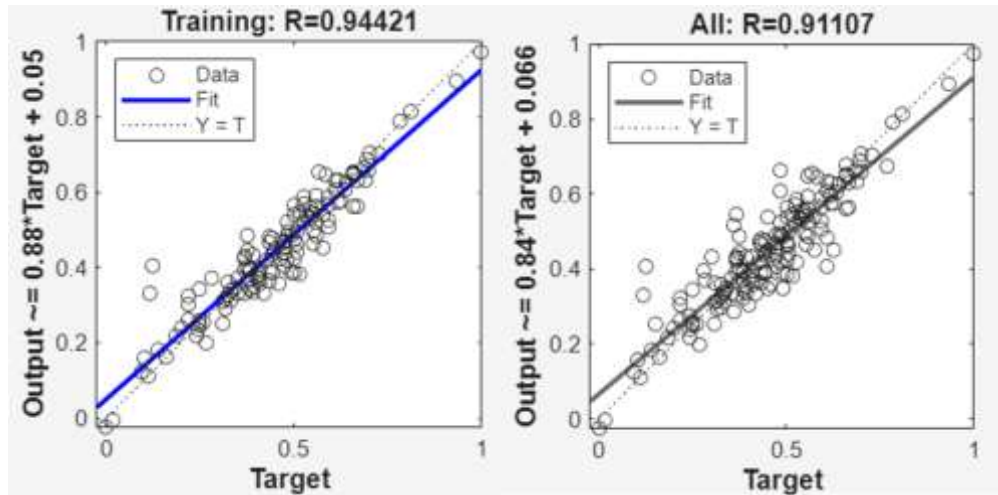
Determinasyon katsayısı (R^2) değeri 1'e çok yakındır,

Ortalama karesel hata (MSE) ise sıfıra çok yakındır (Şekil 2.8).

Bu sonuçlar, modelin bir atıksu arıtma tesisinde BOİ değerini %70 doğrulukla, 5 gün beklemeden, kısa sürede tahmin edebileceğini göstermektedir.

Çizelge 2.3: Performans Sonuç Tablosu

	Observations	MSE	R
Training	132	0.0033	0.9442
Validation	16	0.0111	0.5593
Test	16	0.0098	0.7148



Şekil 2.9: Gözlemlenen ve Tahmin Edilen Veri Karşılaştırması

Çalışmada, atıksu arıtma tesisinin performansını değerlendirmek amacıyla ileri beslemeli ve geri yayımlı yapay sinir ağı (İBGYYSA) modeli kullanılarak BOİ değeri tahmin edilmiştir. Girdi olarak KOİ, TN, TP, AKM, İ ve BOİ parametreleri kullanılmıştır. Model, BOİ değerini 5 gün beklemeden, kısa sürede ve yüksek

doğruluk oranıyla tahmin edebilmektedir. Bu sayede, atıksu yönetiminde etkinlik sağlanabileceği ve modelin bu alanda kullanıma uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

2.1 Atık Su Arıtma Tesisleri ve Süreçleri

Atık su arıtma tesisleri uygulanan prosese göre aşağıdaki gibi adlandırılmaktadır;

- Atık su ön arıtma tesisi (AÖAT)
- Biyolojik atık su arıtma tesisi (BAAT)
- İleri Biyolojik atık su arıtma tesisi (İBAAT)

Atık su Ön Arıtma Tesisi; atık suyun içerisinde bulunan yüzer maddelerin, katı parçacıkların, kumun ve yağın arındırılması için işletilen tesis tipidir. Kaba ve ince ızgaralar vasıtasıyla yüzer ve katı parçalar, havalandırma havuzlarında da kum tutulur, yağ tutucular ile de yağ ve gres gibi maddelerin yüzeyden alınması işlemleri yapılmaktadır. Ön arıtma tesisi, arıtma sisteminin ilk ve en önemli aşamalarındadır. Ön arıtma tesisinde yapılan iyi arıtma sayesinde biyolojik ve ileri biyolojik prosesler o denli verimli ve sorunsuz çalışır. Ayrıca tesis envanterinde bulunan ekipmanlarında korunumu sağlanmış olacaktır.

Biyolojik Atık su Arıtma Tesisi; atık sudaki fiziksel ve kimyasal yöntemlerle giderilemeyen organik maddelerin, mikroorganizmalar tarafından besin ve enerji kaynağı olarak kullanılarak sudan uzaklaştırılmasını sağlayan sistemdir. Aerobik veya anaerobik reaktörlerde mikroorganizmalar yardımıyla organik maddeler parçalanır. Çökeltim havuzlarında biyolojik arıtma sonrası oluşan çamur ve mikroorganizmalar çökeltilir.

İleri Biyolojik Arıtma Tesisi; biyolojik arıtma tesislerine ek olarak azot ve fosfor gibi besin maddelerinin giderilmesi, mikro kirleticilerin uzaklaştırılması ve yeniden kullanım kalitesinde su elde edilmesi gibi gelişmiş proses aşamalarından oluşmaktadır. Bu tesislerin kurulumu ile duyarlı alıcı ortamlara (göller, içme suyu havzaları) deşarj yapılması ya da su geri kazanım hedeflenmektedir. Ülkemizde İBAAT deşarj suyu ile peyzaj sulama ve endüstride kullanım gerçekleştirilmektedir.

2.1.1 Atık su sistemlerinde enerji tüketimi ve enerji yönetmeliği

Atık su arıtma tesislerinde elektrik enerji tüketimi tesisin en büyük işletme maliyetlerinden biridir. Bu tüketim hem fiziksel hem biyolojik hem de kimyasal arıtma işlemlerinde kullanılan ekipmanlardan kaynaklanmaktadır. Arıtma tesislerinde elektrik enerjisinin büyük bölümünü; terfi pompaları, blower sistemleri ve koku giderim ünitelerinde bulunan havalandırma fanları tüketmektedir.

Terfi pompaları ile atık suyun tesise alınması, ara terfi işlemleri, çamurun taşınması gibi birçok süreçte rol oynar ve önemli derecede elektrik tüketmektedirler. Blower sistemleri havalandırma havuzlarında bulunan difüzör sistemleri ile işletilen proseste mikro organizmaların organik maddeyi parçalaması için oksijen üretimi ve havalandırmayı sağlamaktadır, bu süreçte ciddi derecede elektrik tüketimi olmaktadır. Koku giderim ünitelerinde bulunan kirli hava emiş fanları, tesis genelinde atık sudan kaynaklı kirli havanın emişi ve bertarafı sırasında kullanılmaktadır. Bu ekipmanların da elektrik tüketimleri yüksektir.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı tarafından 32366 sayılı resmi gazetede yayımlanan Atık su Arıtma Tesisi Enerji Teşviki Yönetmeliği'nde; alıcı ortamın su kalitesinin yükseltilmesi ve doğal kaynakların korunması için atık su arıtma tesisi kuran, işleten tesislerden arıtılmış atık suyunu alıcı ortama deşarj eden ve/veya yeniden kullananlardan mevzuatta belirtilen yükümlülüklerini yerine getirenlerin, atıksu arıtma tesislerinde kullandıkları elektrik enerjisi giderlerinin bir kısmının veya tamamının Bakanlıkça geri ödenmesine ilişkin usul ve esaslar belirtilmektedir [17].

Türkiye'de de atık su arıtma tesislerinin verimliliğini değerlendiren çeşitli çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalar, genellikle enerji verimliliği, arıtma verimliliği ve çevresel etkiler gibi konuları ele almaktadır. Örneğin; Malatya İleri Biyolojik Atıksu Arıtma Tesisi üzerinde yapılan bir çalışmada, tesisin enerji tüketimi detaylı bir şekilde incelenmiş ve enerji verimliliğini artırmaya yönelik çeşitli öneriler sunulmuştur. Bu öneriler arasında, eski tip pompaların enerji verimliliği yüksek yeni nesil pompalarla değiştirilmesi gibi önlemler yer almaktadır.

3. TERFİ POMPALARI

Terfi pompaları, atık suyu düşük kot seviyesinden yüksek kot seviyesine çıkartmak için kullanılmaktadır. Arıtma tesislerinde giriş terfi haznesinde toplanan atık sular belirli proses aşamalarından sonra terfi pompaları vasıtasıyla ön arıtma ünitesine, oradan da çıkış terfi merkezine yönlendirilmektedir. Tesis giriş terfi merkezinde ve çıkış terfi merkezinde bulunan pompalar sürekli (7/24) çalışma esasına göre seçilmelidir. Sürekli çalışma esasından dolayı tesis elektrik enerji tüketimine etkisi yüksektir. Bu sebeple çalışma şartlarına uygun, verimli pompa seçimi çok önemlidir. Tesis hidrolik yapısına uygun, gerekli hesaplamaların titizlikle yapılarak seçilen pompa çalışması hem ekipmanın korunumu hem de tesisin işleyişi bakımından göz ardı edilmemelidir. Atık su arıtma tesislerinde pompa seçimi, sistemin verimli, güvenli ve uzun ömürlü çalışması açısından kritik öneme sahiptir. Yanlış seçilen bir pompa, yüksek enerji tüketimi, arızalar ve bakım maliyetlerine yol açacaktır.

Pompa seçiminde dikkat edilmesi gereken unsurlar;

Debi (Q); tesisin kapasitesine ve proses ihtiyacına göre seçim yapılmalıdır. Birimi m³/saat veya lt/sn cinsinden ifade edilmektedir.

Basma yüksekliği (Hm); taşınacak sıvının kot mesafesinden elde edilen farktır. -10 m kottan +5 m kota su çıkartılacaksa burada Hm 15 m olacaktır. Metre su sütunu (mSS) olarak ifade edilmektedir.

Akışkanın özelliği, bilinmesi gereken diğer unsurlardandır. Atık suyun kendi korozyon etkisi ve su ile gelen malzeme yapısından dolayı kesinlikle korozyona ve aşınmaya karşı dirençli malzemeler seçilmelidir.

Enerji verimliliği (η); işletme şartlarına uygun pompa, katalogunda belirtilen pompa verimlilik eğrisi üzerinden seçilmelidir. Düşük verimli ya da yanlış seçilen pompanın enerji tüketimi tahmin edilenden çok yükseklere çıkacaktır.

Otomasyon sistemlerine uyumluluğu; özellikle değişken debiye sahip proses işletmelerinde değiştirilebilir frekans konvertörüne (VFD) uyumlu pompa

seçimi elektrik enerji tüketiminde ciddi tasarruf sağladığı gibi, proses de debi kontrolü sağlandığından işletme kolaylığı sağlayacaktır. Bakım kolaylığı, yedek parça bulunabilirliğinin ve temininin kolay olması işletme adına olumlu etkisi bulunmaktadır.

3.1 Atık Su Arıtma Tesislerinde Tercih Edilen Pompa Türleri

Arıtma tesislerinde santrifüjlü ve dalgıç pompalar, suyu verimli bir şekilde alıcı ortama taşımak için tercih edilen en yaygın pompa türlerindedir. Her ikisi de sıvıları hareket ettirirken, farklı çalışma fonksiyonlarına sahiptir ve değişken durumlarda daha iyi performans gösterirler. Dalgıç tip terfi pompalar, pompa kısmı ve hareketin sağlandığı motor yapısının yekpare olarak tasarlandığı pompalardır. Sıvı içinde çalıştırıldığından dolayı sızdırmazlık çok önemli faktördür. Bu pompa tipleri kullanım alanlarına göre opsiyonları bulunmaktadır. Direk atık su haznesinin içinde çalıştırıldığı gibi, giriş çıkış kollektör hatlarına montajlanarak hazne dışında da çalıştırılabilmektedir.

3.1.1 Dalgıç ıslak tip terfi pompaları

Ekipmanın tamamıyla hazne içerisinde çalıştırılması ile atık suyun terfi ettirildiği sistemdir. Motor miline bağlı fanın doğrudan hareketi ile atık suyu etkili bir şekilde terfi ettirmektedir (Şekil 3.1). Atık suyun doğrudan emiş yapılması pompa verimliliğini artırmaktadır. Su içerisinde elektrik enerjisinin mekanik enerjiye çevrildiği bu sistem için muhakkak ekipman korumasının yapılması gerekmektedir.

Motor sargılarının soğutulması, ekipmanın içerisinde bulunduğu suyun gövdeye teması ile sağlanmaktadır. Pompanın susuz çalıştırılma ihtimaline karşı haznenin doluluk oranı bilinmeli ve kontrollü olarak çalışma sağlanmalıdır. Aksi durumda motorun stator sargılarının ısınıp termal dayanım değerini geçmesiyle sargıların kavrulmasına hatta yanmasına sebep olabilmektedir. Bu sebeple seviye sensörü ile haznede bulunan sıvı yüksekliği ölçülmeli, Scada otomasyon sistemine aktarılan yükseklik verisi ile pompa çalışma set değerleri oluşturulmalıdır. Çalışma ve durma seviyeleri için belirlenen set değerlerine göre pompa çalışması kontrollü bir şekilde sağlanmalıdır. Ayrıca mekanik flatör ile de ekstra alt seviye koruma önlemi alınabilir. Pompada mekanik enerjinin oluşturulduğu motor sargısının sıvı temasından korunması gerekmektedir. Mekanik salmastrada meydana gelebilecek

arızalar, pompanın gövde izolasyonunda oluşacak deformasyon motor sargısına sıvı temasına sebep olmaktadır. Pompanın yağ haznesinde bulunan su kaçağı sensörü ile sızdırmazlıkta meydana gelebilecek olumsuzlukların motor sargısında oluşturacağı tahribatların önüne geçilebilmektedir.



Şekil 3.1: Dalgıç ıslak Tip Terfi Pompası

Avantajları; dalgıç ıslak tip pompalar, atık suyu etkili bir şekilde terfi ettirmektedir. Atık suyun doğrudan emiş yapılması sayesinde pompanın verimliliği artar, çünkü suyun emişinde ekstra bir enerji harcanmamaktadır. Kompakt bir tasarıma sahiptir, montajda yer tasarrufu sağlamaktadır. Haznede su içerisinde çalıştılarından ses minimal seviyededir, çevresel gürültü yok denecek kadar azdır. Dalgıç ıslak tip pompaların kurulumu genellikle kolaydır ve tesis içinde esnek bir şekilde konumlandırılabilirler.

Dezavantajları; dalgıç ıslak tip pompaların düzenli bakım gereksinimleri vardır. Hazne içerisinde çalıştıkları için atık suyun aşındırıcı ve korozyon etkisiyle pompanın ömrü kısalabilir ve daha sık bakım yapılması gerekmektedir.

Arıza, bakım durumlarında uygulanan işlemler sırasında İSG riski taşımaktadır. Özellikle pompanın hazneden çıkarılması durumunda pompaya erişim için personelin hazneye inme gereksinimi bulunmaktadır. Pompanın oturduğu kaide

veya flanşta meydana gelebilecek arıza durumlarında da aynı müdahale söz konusudur.

Özellikle büyük tesislerde, dalgıç ıslak tip pompaların yedek parçaları (fan, salmastra rulman) yurtdışı termininin uzun olması ve maliyetli olması sebebiyle onarımı zaman almaktadır.

3.1.2 Dalgıç kuru tip terfi pompa

Ekipmanın hazne içi veya hazne dışı çalıştırılması mümkündür (Şekil 3.2). Yani bu tip pompalar hem sıvı içerisinde hem de hazne dışarısında çalıştırarak kullanılabilir olması avantaj sunmaktadır. Bu pompalarda ceket olarak ifade ettiğimiz ve motor soğutma sıvısının kullanıldığı bir bölüm bulunmaktadır. Hazne içi çalışmada bu bölüm terfi ettiği atıksu vasıtasıyla yapılabildiği gibi, hazne dışı çalışmada ise antifriz gibi sıvıların soğutma işlemi yapılmaktadır. Ancak her iki çalışma durumunda da bu bölümde meydana gelebilecek tıkanma, soğutma sıvı kaybı gibi durumlar mutlaka kontrol edilmelidir. Aksi takdirde motor sargıları gereğinden fazla ısıya maruz kalabilir. Bu tip motorlarda da ıslak tip pompada olduğu gibi motor koruma önlemlerinin alınması gerekmektedir.



Şekil 3.2: Dalgıç Kuru Tip Terfi Pompa ve Fan Salyangoz Yapısı

Avantajları; dalgıç kuru tip pompalar, hazne dışı çalışmada pompa gövdesinin atık suya teması olmadığından korozyon oluşmaz. Bu sebeple daha uzun ömürlüdürler ve daha az bakım gerektirirler. Doğru seçildiğinde, dalgıç kuru tip pompalar yüksek verimlilik sağlayabilir, bu da enerji maliyetlerini düşürebilir. Atık

suya maruz kalmayan pompalar, daha güvenli bir çalışma ortamı sunmaktadır ve fiziki çalışma ortamından kaynaklı elektriksel tehlikeleri azaltmaktadır.

Dezavantajları; hazne içi dalgıç pompa olarak kullanımda soğutma ceketini içerisine kendi terfi ettirdiği atıksu ile soğutma işlemi yapıldığında pompa gövdesinde zamanla hasar oluşmaktadır. Dalgıç kuru tip pompalar, hazne dışında çalıştırıldığında çevresel gürültü oluşmaktadır. Pompa ceketinde bulunan gözetleme penceresinden soğutma sıvısı kontrol edilmelidir, aksi durumda motor yüksek ısıya maruz kalabilir. Dalgıç ıslak tip pompalarda olduğu gibi yurtdışı yedek parça terminli olması sebebiyle onarımı zaman almaktadır.

3.1.3 Dikey milli santrifüj pompa

Yapısındaki ana bileşenler; pompadaki mekanik gücü sağlayan YG veya AG motor, motor tarafında döndürülen mil, salyangoz aşınma halkası ve fandan oluşan pompa kısmı, atık suyu emme ve basma kısmında bulunan emniyet ve kontrol vanaları bulunmaktadır. Mil genellikle fiberden imal edilmektedir (Şekil 3.3). Fiber milin hafif olması sebebiyle motora ekstra bir yük oluşturmamaktadır. Ayrıca bu yapı ile pompa fanında ani duruşu yani mekaniksel bir darbeye ilk hasarı fiber yapı alacağından motorunda korunması planlanmaktadır [10].



Şekil 3.3: Dikey Milli Tip Santrifüj Pompa Motoru ve Dikey Mil Yapısı

Avantajları; dikey milli kuru tip santrifüj pompalar, motor ve mekanik parçalarını atık sudan izole oldukları için korozyona maruz kalma riski minimumdur ve uzun ömürlüdürler. Montaj yapılan kısma göre bakım kolaylığı sağlamaktadır. Bakım arıza müdahalelerinde hazne ve atık sudan izole olduğundan, bu şekilde oluşabilecek İSG riskleri taşımamaktadır. Ekipman doğru seçildiğinde, milli kuru tip

santrifüj pompalar yüksek verimlilik sağlayabilir, bu da enerji maliyetlerini düşürebilir.

Dezavantajları; milli santrifüj pompa motoru dış ortamda çalıştırıldığından çevresel gürültü oluşacaktır. Milli kuru tip santrifüj pompalar, dalgıç tip pompalara göre ana bileşen ekipman fazlalığından dolayı yüksek maliyetlidir. Özellikle giriş terfi ünitesinde aşınma halkası ve fanda meydana gelen aşınmalar sebebiyle, pompa verimi düştüğünden kontrolleri aksatılmamalıdır.

3.2 Pompa Sistemlerinde Koruma yöntemleri

Pompa sistemleri, endüstriyel, altyapı ve proses uygulamalarında kritik görevler üstlenir. Pompa sistemlerinde elektriksel ve mekaniksel koruma yöntemleri, sistemin güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışmasını sağlamak için hayati öneme sahiptir. Aksi halde arızalar, duruşlar ve yüksek bakım maliyetleri kaçınılmazdır.

3.2.1 Elektriksel koruma yöntemleri

Elektriksel koruma yöntemleri, elektrikli sistemlerde insanları, ekipmanları ve tesisatı elektriksel tehlikelere karşı korumak amacıyla uygulanan önlemlerdir. Bu yöntemler, elektrik çarpması, yangın, kısa devre, aşırı akım, gerilim dalgalanmaları gibi riskleri azaltmak ya da tamamen ortadan kaldırmak için kullanılır.

Termik röle (aşırı akım koruması); elektrik motorlarını aşırı akıma karşı korumak için kullanılan elektromekanik bir koruma cihazıdır. Genellikle kontaktörlerle birlikte kullanılır ve motorun uzun süreli yüksek akım çekmesi durumunda devreyi keserek motoru korur. Çalışma prensibi ise, termik röleler, motor sargılarından geçen akımın ısı etkisine göre çalışır. İç yapısında genellikle iki farklı metalden oluşan bir bimetal şerit bulunur. Bu bimetal şerit motor akımı uzun süre yüksek kaldığında ısınır ve bükülür. Belirli bir bükülme noktasında mekanizmayı tetikleyerek kontaktörün enerjisini keser. Böylece motorun çalışması durdurulur ve aşırı ısınmanın önüne geçilmiş olur.

Faz koruma rölesi; üç fazlı elektrik sistemlerinde fazlardan birinin kaybolması (faz kopması), faz sırası hatası veya fazlar arasındaki gerilim dengesizliği (asimetrisi) gibi durumlarda devreyi korumak amacıyla kullanılan bir koruma rölesidir. Motorlar, kontaktörler ve diğer üç fazlı yükleri bu tür arızalara karşı korumada kullanılır. Çalışma prensibi ise, faz koruma rölesi üç fazın (R-S-T)

girişini sürekli kontrol eder. Fazlardan biri kesildiğinde, faz sırası yanlış olduğunda ve fazlar arasında ciddi bir gerilim farkı (asimetrik yüklenme) olduğunda, röle çıkış verir (kontakt değiştirir) ve genellikle bağlı olduğu kontaktör ya da motoru devreden çıkararak yükü korumaktadır.

Kaçak akım koruma rölesi, elektrik tesisatlarında oluşabilecek toprak kaçaklarını tespit ederek, can güvenliğini sağlamak amacıyla devreyi hızlı bir şekilde kesen bir koruma cihazıdır. İzolasyon hatası sonucu oluşan kaçak akımı tespit ederek, bu akım belirli bir eşik değeri aştığında devreyi açmaktadır. Çalışma prensibi ise, kaçak akım koruma rölesi, faz ve nötr iletkenleri üzerinden geçen akımları karşılaştırır. Normal çalışma koşullarında fazdan çıkan akım, nötrden dönen akıma eşittir. Eğer bir kaçak oluşursa nötr üzerinden dönen akım azalır, faz ile nötr arasında oluşan fark kaçak akımı oluşturur. Bu fark, rölenin ayarlı hassasiyet değerini (30 mA, 300 mA) aştığında röle devreyi birkaç milisaniyede keser.

Motor koruma şalteri; elektrik motorlarını aşırı akım, kısa devre ve faz hatalarına karşı koruyan kompakt bir anahtarlama ve sistemi koruyan ekipmandır. Elektrik panolarında kontaktörlerle birlikte kullanılır ve motoru çalıştıran devrenin hem açma-kapama anahtarı hem de koruma elemanı olarak görev yapar.

Çalışma prensibi ise, üç temel koruma sağlamaktadır.

Aşırı yük koruması (termik koruma); motor nominal akımın üzerinde uzun süre çalışırsa, bimetal mekanizma devreyi keser.

Kısa devre koruması (manyetik koruma); ani yüksek akım (kısa devre) olduğunda, manyetik bobin devreyi çok hızlı bir şekilde keser.

Faz kaybı / faz dengesizliği koruması; bir faz kesildiğinde ya da gerilim ciddi oranda dengesizse, asimetrik akım artışı algılanarak cihaz devreyi açar.

3.2.2 Mekaniksel koruma yöntemleri

Makineler, ekipmanlar ve tesislerde insanların fiziksel zarar görmesini önlemek amacıyla alınan önlemlerdir. Bu yöntemler; hareketli parçaların, kesici veya ezici ekipmanların, sıcak yüzeylerin ve benzeri tehlikelerin neden olabileceği kazalara karşı koruma sağlar.

Basınç tahliye vanası, kapalı bir sistemdeki aşırı basınç yükselmesini önlemek amacıyla kullanılan otomatik bir emniyet valfidir. Sistem içindeki basınç

belirli bir eşiğin üzerine çıktığında sistem kendiliğinden açılır, fazla basıncı tahliye eder ve ardından tekrar kapanarak normal işletmeye geri döner. Çalışma prensibi ise, vananın içinde ayarlanmış bir yay mekanizması bulunur. Sistemdeki basınç, yay kuvvetini aşacak seviyeye ulaştığında, valf açılır. Fazla basınç dışarı atılır ve sistem güvenli basınca iner. Basınç normale döndüğünde yaya geri baskı uygular ve valf kapanır. Bu işlem tamamen otomatik gerçekleşir.

Geri Akış Önleyici Vana (Çek valf), bir akışkanın yalnızca tek yönde geçişine izin veren, ters akışı otomatik olarak engelleyen pasif bir vana türüdür. Sistemde geri kaçak oluşmasını önleyerek pompaları, tankları, boruları ve ekipmanları korur. Çalışma prensibi ise, çek valf içinde bir disk, küre veya klape mekanizması bulunur. Akış doğru yönde olduğunda, akışkan basıncı valfi açar ve geçiş sağlanır. Akış ters yönde olduğunda, mekanizma kapanır ve geri akış engellenir. Çek valfler otomatik çalışır, harici enerji veya sinyal gerektirmezler.

Kuru Çalışma Koruması; pompa sistemlerinde suyun veya akışkanın olmadığı durumda pompanın çalışmasını otomatik olarak durdurarak, pompada oluşabilecek hasarları önleyen bir güvenlik sistemidir. Pompalar akışkan olmadan (kuru) çalıştırıldığında; soğutma sağlamaz, pompa ısınır. Sızdırmazlık elemanları (salmastralar) zarar görür. Pompa boşa döner, içindeki parçalar aşınır. Sonuç olarak, ekipmanın kuru çalışma korumasının yapılmadığı durumda, yüksek bakım maliyeti ve arıza riski ile karşı karşıya kalmaktadır. Kuru çalışma koruması, bu durumu algılayarak pompanın çalışmasını durdurur ve arızaların önüne geçer.

3.2.3 Pompa sızdırmazlık elemanları

Pompalarda ve bağlantılı sistemlerde kullanılan sızdırmazlık elemanları hem akışkan kayıplarını önlemek hem de sistem güvenliğini sağlamak açısından kritik öneme sahiptirler. Bu elemanlar, sistemin içindeki sıvı ya da gazın dış ortama kaçmasını veya dış ortamın içeri girmesini engeller. Sızdırmazlık elemanları, uygulama yerine ve çalışma koşullarına bağlı olarak statik veya dinamik türde sınıflandırılırlar. Pompa ve akışkan devrelerinde yaygın olarak; kendir (lif conta), teflon bant (PTFE bant), muhtelif contalar (düz, spiral, metal vs.), o-ring, yağ keçesi (radial shaft seal), yumuşak salmastra, mekanik salmastra (Mechanical seal), bakır pul gibi sızdırmazlık elemanları kullanılmaktadır.

Statik sızdırmazlık; hareketli olmayan, sabit parçalar arasında sızdırmazlığın sağlandığı malzemelerle gerçekleştirilmektedir. Genellikle conta, teflon bant, bakır pul gibi elemanlar kullanılır. Çalışma sırasında hareket olmadığından malzeme seçimi daha geniştir.

Dinamik Sızdırmazlık; dönme, ileri geri hareket gibi sürekli ya da periyodik hareketin olduğu bölgelerde uygulanmaktadır. Pompa milleri, pistonlar, hidrolik silindirler bu kapsama girer. Bu bölgelerde o-ring, yağ keçesi, yumuşak veya mekanik salmastralar tercih edilir. Pompalarda sızdırmazlık genellikle mil giriş çıkış bölgelerinde uygulanır. Bu bölgelerde, pompa akışkanının dışarı kaçması ya da dış ortamın içeri girmesi istenmez [14].

Yumuşak Salmastra; PTFE kaplı lif, grafit, aramid lifleri gibi malzemelerden imal edilmektedir. Salmastra yuvası adı verilen bölme yerleştirilir. Sızdırmazlık, salmastranın mil etrafında sıkıştırılması ile sağlanmaktadır. Yumuşak salmastraların etkinliği; doğru seçim, hassas montaj, dikkatli alıştırma süreci ve uygun kaçak kontrolü ile sağlanmalıdır. Diyagonal örgü, kaliteli empenye, doğru tolerans ve dikkatli sıkma işlemi salmastranın ömrünü ve pompanın güvenilirliğini büyük ölçüde artırır. Yumuşak salmastralar hem ekonomik hem de esnek çözümler sundukları için geniş uygulama alanlarına sahiptir.



Şekil 3.4: Yumuşak Salmastra ve Montaj Yuvası

Mekanik Salmastra; günümüzde pompalarda en yaygın kullanılan ve en önemli sızdırmazlık elemanıdır. Farklı türleri bulunmakla birlikte, en çok tercih edilen tiplerinden biri; pompa bloğuna monte edilen sabit parça, pompa miline takılan hareketli parça, yay, yay tutucusu ile sabit ve hareketli sızdırmazlık

elemanlarından oluşur (Şekil 3.5). Bu bileşenler ile birlikte çalışarak pompa içerisinde sızdırmazlığı sağlamaktadır.



Şekil 3.5: Mekanik Salmastra ve Elemanları

Genellikle karbon, seramik, tungsten karbür gibi sert malzemelerden imal edilmektedir. Sızdırmazlık, iki yüzeyin statik ve döner kısmın teması ile sağlanır. Mekanik salmastranın çalışma prensibi; mile takılan hareketli parça, yay ve akışkan basıncının etkisiyle sabit parçaya doğru itilerek bu iki parçanın yüzeyleri temas eder ve akışkanın mil çevresinden dışarı sızması engellenir. Sabit parçanın dış tarafından olası sızıntı ise, üzerine takılan bir lastik conta veya o ring ile önlenir. Bu sayede, mekanik salmastra hem iç hem de dış kısımdan akışkan sızdırmazlığını sağlamaktadır. Mekanik salmastranın mil ile birlikte dönen parçası, yay ve akışkan basıncıyla pompa bloğundaki sabit parçaya doğru itilmektedir. Mekanik salmastralar, yumuşak salmastralara göre daha yüksek basınç, sıcaklık ve hız dayanımına sahiptir ve daha uzun ömürlüdür. Eğer salmastra yeterince sızdırmaz değilse, pompa ilk çalıştırmada dış ortamdan hava emer. Bu durum, pompanın kavitasyona uğramasına, emiş yapmamasına ve performans kaybına yol açar. Bu nedenle, vakum altında çalışan sistemlerde salmastra ve conta bölgelerinin yüzey işçiliği ve montajı çok hassas olmalıdır. Sızdırmazlık zafiyeti sonucu;

- Pompa gövdesinde sıvı kaçakları,
- Motor statoruna sıvı teması ile stator sargısının yanması,
- Mil veya yatak hasarı,
- Hava emilmesi sonucu emiş kaybı,

- Enerji verimliliğinin düşüşü,
- Proses kontrol kayıpları,
gibi arızalar yaşanmaktadır.



Şekil 3.6: Mekanik Salmastra İç Yapısı

Sızdırmazlık elemanları, pompaların güvenli, verimli ve uzun ömürlü çalışması için vazgeçilmezdir. Doğru eleman seçimi, uygun montaj, düzenli bakım ve uygun malzeme kombinasyonu, sızdırmazlık performansını doğrudan etkiler. Özellikle dinamik sızdırmazlık elemanlarında yüzey kalitesi, hizalama ve sıkma kuvvetleri kritik öneme sahiptir.

Yataklar ve rulmanlar; mile sıkıca geçirilerek bir veya iki noktadan yataklayan, içi bilyeli veya masuralı elemanlardır. Pompalarda ayrıca pirinçten yapılmış yataklar da kullanılabilir. Rulmanlar; pompalar, türbinler, kompresörler gibi birçok makinede yaygın olarak kullanılır.



Şekil 3.7: Motor Rulmanı

Bilyeli, konik masuralı, silindirik masuralı, fiçli masuralı ve iğne masuralı gibi çeşitli tipleri bulunur. Paslanmaz çelikten üretilen rulmanlar açık ya da kapalı yapıda

olabilir. Kullanımda, iç çap, dış çap ve kalınlık gibi ölçüleri belirten seri numaraları ile tanımlanıp sipariş edilmektedirler [11].

Rulmanın dış halkasında numaranın yanında herhangi bir ibare yoksa her iki tarafı da açıktır. Eğer üzerinde **Z** veya **R** harfi bulunuyorsa bir tarafı, **ZZ** veya **RR** yazıyorsa her iki tarafı kapalıdır. Kapalı rulmanlar genellikle elektrik motorlarında tercih edilir ve greslemeye ihtiyaç duymazlar. Ancak aynı ölçülere sahip açık rulman gerektiğinde ve sadece kapalı rulman mevcutsa, kapakları tutan yaylı segmanlar çıkarılarak rulman açık hale getirilebilir. Bu durumda rulmanın mutlaka greslenmesi gerekmektedir [11].

Mil Koruma Burçları; döner ekipmanlarda milin sızdırmazlık elemanlarıyla temas ettiği bölgelerin aşınmasını önlemek amacıyla kullanılan, değiştirilebilir koruyucu bir yüzey kaplamasıdır (Şekil 3.8). Milin yüzeyine geçirilerek, pahalı olan milin yerine ucuz ve kolay değiştirilebilir bir parça olan burç aşınmaktadır. Mil koruma burçları mil yüzeyini mekanik salmastra, keçeler veya contaların oluşturduğu sürtünmeden korur. Mil yüzeyinde oyuk, çizik veya aşınma oluşmasını engeller. Bakım ve onarım süresini kısaltır, maliyeti azaltır. Aşınmış mil yerine sadece burcun değiştirilmesi ekonomik olarak tercih edilmektedir.



Şekil 3.8: Pompa Mili ve Yeni, Eski Mil Koruma Burçları

Aşınma Halkası; santrifüj pompalarda fan ile pompa gövdesi arasında yer almaktadır (Şekil 3.9). Sızdırmazlık yüzeyi oluşturarak pompa verimini artırır ve fan ile gövde arasındaki aşınmayı önleyerek değiştirilebilir bir yüzey sağlamaktadır. Aşınma halkaları, özellikle pompanın dönen parçaları ile sabit parçaları arasında oluşabilecek metal-metal temasını engelleyerek, sistemin hem verimli hem de uzun

ömürlü çalışmasını sağlamaktadır. Aşınma halkası, pompa fanının düzgün ekseninde dönmesini sağlayan ve hafif merkezleyici bir pasif yataklama elemanıdır. Bu, pompanın eksensel dengesini desteklemektedir. Santrifüj pompalarda fanın çıkış tarafı yüksek basınç, giriş tarafı ise düşük basınç bölgesidir. Aşınma halkası, bu iki bölgeyi fiziksel olarak ayırır ve basınç farkından doğan iç kaçakları sınırlamaktadır.

Aşınma halkası ile pompa fanı arasında bilinçli olarak bir boşluk bırakılır. Bu boşluk sayesinde, fandan çıkan bir miktar akışkan tekrar girişe dönebilir. Ancak bu boşluğun fazla olması durumunda; geri kaçak artar, hidrolik verim düşer ve pompanın yük altında çalışma eğrisi bozulur. Verimliliği artırmak için boşluğun minimumda tutulması gerekmektedir. Tipik olarak bu boşluk mikron düzeyindedir ve pompa üreticisi tarafından toleranslarla belirlenir. Aşınma halkası zamanla sürtünme, kavitasyon ve aşındırıcı akışkanlar nedeniyle aşınır. Boşluk miktarı ilk tasarım değerinin iki katına çıkarsa, aşınma halkası değiştirilmelidir. Bu önlem, hem pompa performansını korumak hem de daha pahalı parçaların zarar görmesini engellemek için alınır.



Şekil 3.9: Yeni ve Arıza Sebebiyle Demontajı Yapılan Aşınma Halkaları

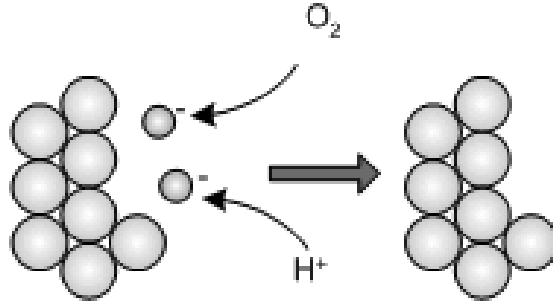
Aşınma halkaları farklı işletme koşullarına göre çeşitli malzemelerden üretilir. Malzeme seçimi, aşındırıcılık derecesi, kimyasal ortam, çalışma sıcaklığı, basınç ve akışkanın viskozitesi gibi etkenlere bağlıdır. Aşınma halkaları; bronz, dökme demir, paslanmaz çelik ve nikel alaşımli dökme demir malzemeler kullanılarak üretilirler. Yüksek korozyon ve kimyasal ortam kullanımlarında

paslanmaz çelik tercih edilirken, kimyasal olarak zorlu ortamlarda nikel alaşımlı dökme demir tercih edilmektedir [11].

Aşınma halkaları, pompa performansının korunması, enerji verimliliğinin sağlanması ve bakım kolaylığı açısından kritik bir parçadır. Boşluk toleranslarının izlenmesi ve periyodik kontrollerle zamanında değiştirilmesi, pompa sistemlerinin ömrünü uzatmakta ve işletme güvenliğini arttırmaktadır.

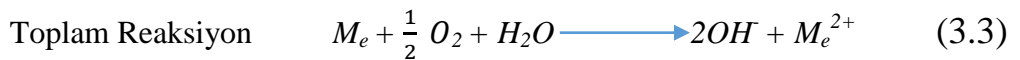
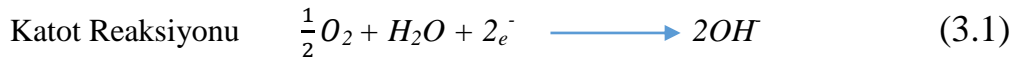
3.2.4 Katodik koruma

Katodik koruma, korozyon sisteminde anodu katot haline getirmek için metalin potansiyelini değiştirmektir. Korozif ortamda bulunan metalin korozyona uğramasını engelleyen elektrokimyasal metottur. Temel prensipleri elektrokimyasal korozyon esasına dayanır. Korozif ortam içinde bulunan metal malzeme korozyona uğradığında, pozitif yüklü atomlar metal yüzeyinden uzaklaşır ve ortam içinde çözünmektedir. Metal yüzeyinde negatif yüklü elektronlar kalır. Metal yüzeyindeki elektronlar, ortamda bulunan serbest oksijen veya pozitif yüklü hidrojen atomları tarafından çekilir ve korozyonun oluşumu devam eder [15].



Şekil 3.10: Oksijenin Metal ile Reaksiyonu

Metal ile oksijenin reaksiyon ifadesi aşağıdaki gibidir.



Metal yüzeyindeki elektronların çekilememesi halinde metal negatif olarak çok fazla yüklenmiş olur ve elektrostatik çekim kuvveti sebebiyle atomlar metal yüzeyi terk edemez. Korozyonu önlemenin kısaca tanımı, metali çok fazla elektronla

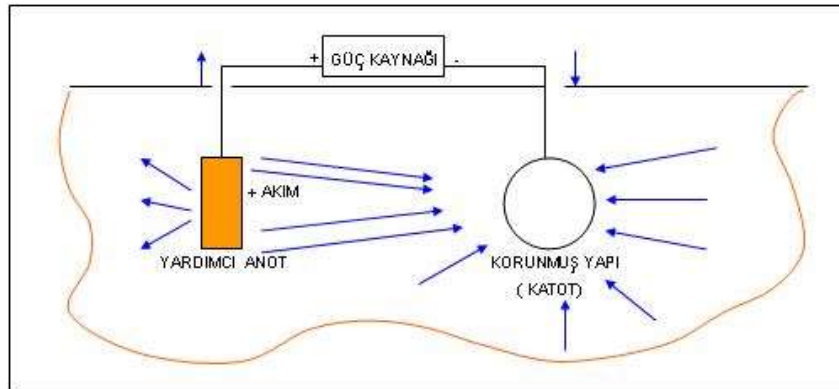
yükleyerek elektrostatik çekim kuvveti ile metal yüzeyindeki pozitif yüklü atomların yüzeyden uzaklaşmasını önlemektir. Bu sistem katodik koruma olarak adlandırılmaktadır.

Katodik koruma sistemlerinin uygulama alanları

- Kanalizasyon sistemleri
- İçme suyu dağıtım şebekeleri
- Doğalgaz dağıtım şebekeleri
- Deniz iskele ve rıhtımların çelik kazıkları
- Petrol ve yakıt dağıtım şebekeleri
- Yeraltında bulunan yakıt tankları ve toprak seviyesinde bulunan takların tabanı
- Toprak üstü ya da altında bulunan likit depolama tanklarının iç kısımları
- Yangın tesisatı sistemleri

Katodik koruma uygulama biçimlerine göre 2 şekilde ele alınabilir.

Dış Akım Kaynaklı Katodik Koruma; akım kaynaklı koruma yönteminde, korunacak yapı doğru akım kaynağının negatif kutbuna bağlanmaktadır (Şekil 3.11). Bu yöntem ile doğru akım kaynağından korunacak metale doğru sürekli elektron akışı sağlamış olur. Metalden sürekli elektron çıkışı olması ve doğru akım kaynağından sağlanan elektron akışı ile metalde oluşabilecek korozyon önlenmiş olacaktır. Dışarıdan bir akım kaynağı vasıtasıyla yapılan bu yöntem dış akım kaynaklı katodik koruma olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 3.11: Metalin Elektron Akımı ile Katodik Korunması

Bu yöntem, sıvı içerisindeki uygulamalarda çok dikkatli ve kontrollü şekilde uygulanmalıdır. Korunması amaçlanan ekipman doğru akım kaynağına bağlanır ve akım sıvı içinden geçerek elektrottan ekipmana doğru akmaktadır. Bu sistemde

elektrotun görevi, doğru akım yoğunluğu ve yeterli gerilim düşümünü oluşturmaktır. Akımın doğru değere ayarlanması çok önemlidir. Doğru olmayan akım yoğunluğu değerleri ekipman üzerindeki boyaya ve rulmanlara zarar verebilir. Bu sistemlerin kullanımı büyük hacimli istasyonlar için tercih sebebidir. Dış akım kaynaklı katodik koruma sistemlerinde; Fe-Si, Pb-Sb-Ag ve Ti bazlı anotlar kullanılmaktadır.

Eriyen Galvanik Anot Kullanımı

Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinde; korunmak istenen metal yapıya, kendisinden daha az asal, yani daha kolay eriyen ve daha negatif potansiyele sahip bir metal bağlanır (Şekil 3.12). Bu sayede bir galvanik pil oluşur ve yapı katot haline gelir. Galvanik anot, çözünerek pozitif iyonlar oluşturur ve böylece koruma için gerekli doğru akımı üretir. Bu sistem, değişen koşullara göre kendiliğinden uygun akımı sağlayabilir.



Şekil 3.12: Eriyen Galvanik Anot

Galvanik anotlu katodik koruma sistemlerinde genellikle çinko, alüminyum ve magnezyum anot malzemeleri kullanılır.

Galvanik anotlar, kendiliğinden gerçekleşen yükseltgenme reaksiyonlarıyla çözünerek akım üretir. Bu süreçte açığa çıkan elektronlar, dış devre üzerinden katoda yani korunan metal yapıya iletilir. Böylece katotta koruma için gerekli elektronlar sağlanır ve metal yüzeyindeki tüm anodik reaksiyonlar durmaktadır. Galvanik anotlar, belirli bir süre koruyacak sayıda ve uygun noktalardan yapıya bağlanır. Anotlar, özel dolgu malzemesiyle çevrelenmiş torbalar içinde anot çukurlarına yerleştirilir. Bu dolgu malzemesi, elektriksel direnci düşürerek anotun üniform akım üretmesini ve düzgün şekilde harcanmasını sağlamaktadır.

Anotların akım kapasiteleri ve verimleri hesaplanarak bilinmektedir. Bu özelliklere göre, korunacak yüzeyin istenen sürede katot olarak kalması sağlanır. Galvanik anotlar, harici elektrik kaynağına ihtiyaç duymadan çalıştıkları için, özellikle elektrik temin edilemeyen ya da altyapısı uygun olmayan bölgelerde tercih edilmektedir. Galvanik anotlar, koruma süresince belirli bir hızla çözünerek ağırlık kaybederler. Bu nedenle, korumanın sürekliliği için, anotlar belirli aralıklarla yenilenmelidir. Ayrıca, daha önce kullanılmış anotlar kesinlikle tekrar kullanılmamalıdır.



Şekil 3.13: Eriyen Galvanik Anot Ölçüm ve Kontrolleri

Katodik koruma, deniz suyu, asidik veya alkalik sular gibi farklı su tiplerinde uygulanabilir. Eriyebilen galvanik anotlar kullanılarak yapılan katodik korumanın, deniz suyu ve klorür içeren sular gibi ortamlardaki uygulamaları bulunmaktadır.

Katodik Korumada Sıvının İletkenlik Direncinin Önemi; katodik koruma, metallerin özellikle boru hatları, dalgıç pompalar, kollektör hatları gibi korozyona karşı korunması için uygulanan yöntemin etkili olabilmesi için çevredeki ortamın, özellikle de suyun iletkenliği çok önemlidir.

Çizelge 3.1: 20 C'deki Deniz Suyu Sıcaklığındaki İletkenlik Verileri

Deniz	İletkenlik Direnci (Ohm x cm)	İletkenliği (uS/cm)	Tuzluluğu (%)	Klorür Miktarı (mg/lt)
Karadeniz	32	31500	2.2	12200
Akdeniz	19.5	51500	3.8	21000
Kızıldeniz	19	53500	4.1	22500
Atlantik	20	48000	3.5	19500
Ölüdeniz	3.1	122000	34	120000
Pasifik	20	47000	3.4	19000

Suyun iletkenlik direnci, elektrik akımının sudan ne kadar kolay geçtiğini göstermektedir. Direnç ne kadar yüksekse, akımın geçişi o kadar zor olur ve katodik koruma daha az etkili olacaktır. Düşük direnç yani yüksek iletkenlik değeri, katodik koruma sisteminin daha verimli çalışmasını sağlanacaktır. Deniz suyunun tuzluluğu, içindeki klorür (Cl) iyonlarının yoğunluğuna göre belirlenir.

$$\text{Tuzluluk bağıntısı; Tuzluluk (\%)} = 0.18 \times \text{Klorür yoğunluğu (g/kg)}$$

Koruma Yapılan Metaller; katodik koruma, korozyonu azaltmak amacıyla tüm metallerde uygulanabilir. Karbon çelikleri, alaşımsız dökme demir, paslanmaz çelikler, bakır alaşımlar ve alüminyum gibi metallerde uygulamalar yapılmaktadır. Bu metallerin deniz suyunda etkili şekilde korunabilmesi için, suyun iletkenliği ve akış hızına bağlı olarak farklı akım yoğunluklarına (mA/m²) ihtiyaç vardır. Boyalı yüzeylerde, boyanın hasar gördüğü yerlerde koruma gerektiğinden, daha düşük akım yoğunluğu yeterli olacaktır. Deniz suyu belirli bir hızla V (m/sn) akıyorsa, gerekli akım yoğunlukları (V+1) katsayısıyla artırılmalıdır.

Çizelge 3.2: Gerekli Akım Yoğunluğu Tablosu (mA/m²)

Metaller	Kaplanmış	Kaplanmamış
Karbon çeliği ve dökme demir	15	70
Paslanmaz çelik	15	100
Alüminyum	5	25
Bakır alaşımları	30	200

Anotun Verim ve Performansı; deniz suyuna karşı katodik korumada eriyen anot olarak çinko, magnezyum ve alüminyum gibi metaller kullanılmaktadır. Anot, korunacak metalden daha kolay aşınan olmalıdır. Anotun kimyasal bileşimi çok önemlidir; örneğin çinko anotların demir içeriği düşük olmalıdır, aksi halde yeterli akım sağlayamaz.

Anot geometrisi de önemlidir; uzun ve dar anotlar daha iyi akım dağılımı sağlar. Anot kapasitesi Ah/kg cinsinden ifade edilir ve gereken anot miktarını belirlemede kullanılır. Magnezyum, yüksek dirençli sıvılar için uygundur ama deniz suyunda hızla tükenir.

Çinko, 60°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılmamalıdır. Bu sıcaklık üzerinde çinko daha asal hale gelip çeliği korumak yerine korozyonunu hızlandırabilir.

Çizelge 3.3: Anot Malzeme Kapasitesi

Anot Malzemesi	Kapasite Ah/kg
Alüminyum	1500
Magnezyum	1100
Çinko	750

Eriyen Anotlar ile Yapılan Katodik Korumaya Ait Hesaplamalar

Bir dalgıç pompanın eriyen anotlarla korunması için yapılacak hesaplamalarda şu adımlar izlenmelidir:

- Suyun iletkenlik direnci 200 ohmxcm'den düşük olmalıdır. Daha yüksek dirençte, anotlar daha küçük parçalara bölünerek kullanılmalıdır.
- Korunacak yüzey alanı belirlenmeli; boyanmış (kaplanmış) ve boyasız (kaplanmamış) alanlar ayrı ayrı hesaplanmalıdır.
- Pompa içindeki yüksek su hızı ve boru-bağlantıların anot tüketimine etkisi dikkate alınmalıdır.
- İç ve dış yüzeyler için gerekli koruma akımı ayrı ayrı hesaplanmalıdır.

Katodik koruma için anot kütlesi M eşitliği;

$$M = Akım \times Alan \times 8,65 \times yıl \times \frac{1 + su \text{ hızı}}{Anot \text{ kapasitesi} \times Anot \text{ geometrik faktörü}} \quad (3.4)$$

Anot geometrik faktörü, uzun ince anotları için 0,9 ve diğer geometrik durumlar için 0,85'dir. Bu yaklaşım, doğru anot miktarının belirlenmesi ve etkili koruma sağlanması için kullanılmaktadır.

Anotların Ekipman Üzerinde Yerleşimi; dalgıç pompalarda, anotlar hem pompanın dışına hem de içine yerleştirilmelidir. Eğer iç kısma yerleştirilemiyorsa, emme (giriş) noktasına yakın bir bölge seçilmelidir. Anotlar, su hızının düşük olduğu yerlere yerleştirilmelidir; aksi takdirde erozyon aşınması meydana gelebilir.

Anotlar, korunacak metal ile elektriksel temas içinde olmalıdır. Koruma akımı, anottan suya, oradan metale ve tekrar anoda dönecek şekilde bir devre oluşturmalıdır. Anotlar doğrudan metale bağlanmak zorunda değildir; iletken bir tel ya da çelik şerit ile bağlantı sağlanabilir. İyi bir akım dağılımı için birden fazla anot kullanılabilir. Özellikle köşeler, bölmeler ve çıkıntılar, akım dağılımını olumsuz etkilemektedir, dikkat edilmelidir [16].

Anotun erimesi; düzenli olarak kontrol edilmelidir, bu sayede tükenme hızları izlenerek değiştirme zamanı tahmin edilebilir. Anotlar, kütlelerinin %70'ini kaybettiklerinde mutlaka değiştirilmelidir. Anot erime hızı, tuzluluk, oksijen, pH, sıcaklık ve su hızı gibi birçok faktöre bağlıdır; ancak en çok etkileyen faktör, korunacak alanın büyüklüğüdür. Boyasız dış metal yapılar da anot tüketimini arttırmaktadır. Bu nedenle deniz suyundaki anotların ömrünü tahmin etmek çok zordur. Yeni kurulumlarda, anotların tükenme hızını izlemek için 1 ay, 3 ay ve 6 aylık periyodik aralıklarla kontroller yapılmalıdır. Eğer beklenenden daha fazla anot erimesi gözlenirse; yakın çevredeki büyük çelik yapılarla elektriksel temas, pompanın topraklamasında sorun, başka bir kaynaktan gelen kaçak akım ve aşırı düşük veya yüksek pH değerleri kontrol edilmelidir.

3.3 Pompalarda Yol Verme Yöntemleri

Pompalarda yol verme, motorun ve pompanın çalışmaya başlaması için gerekli elektriksel ve mekanik sürecin kontrol edilmesidir. Yol verme işlemi, sistemin güvenliği, pompanın ömrü ve enerji verimliliği açısından çok kritik bir aşamadır. Özellikle büyük güçlü pompalar ve hassas sistemlerde doğru yol verme yöntemi seçilmelidir. Pompa sistemlerinde motorun ilk çalıştırılması sırasında

oluşabilecek yüksek kalkış akımı, mekanik zorlanmalar ve sistem üzerindeki etkileri azaltmak için çeşitli yol verme yöntemleri kullanılır.

Doğrudan Yol Verme; yönteminde motor, kontaktör aracılığıyla doğrudan şebekeye bağlanır. Motor koruma şalteri, kontaktör ve termik röle ile yapılan en basit ve ekonomik yol verme yöntemidir. Pompa tam yüke girene kadar olan başlangıç akımı 6 ila 8 katına kadar çıkmaktadır. Pompaya bu şekilde yol verme yönteminde, gerilim düşümü oluşmaktadır. Şebeke gerilimine ani yük bindirmektedir. 5 kW üzerinde olan pompaların bu yöntemle yol verme işlemi tavsiye edilmemektedir. Yüksek kalkış momenti, mekanik sistemlere zarar verebilir.

Yıldız Üçgen Yol Verme yönteminde, motor, kalkış sırasında yıldız bağlantı ile düşük gerilimde çalıştırılır. Belirli bir süre (4 ile 8 sn arası) sonra üçgen bağlantıya geçirilerek tam gerilim verilir. Yıldız bağlantı tam yol verme akımının yaklaşık 1/3'üne denk gelmektedir. Bu sistemde motor stator sargıları motor klemensinde köprülenmemiş şekilde bağlı olması gerekmektedir. Bu yöntemde sistem daha az mekanik zorlanma yaşar ve kalkış akımı düşer, şebekeyi yormaz. Yıldız bağlantıdan üçgen bağlantıya geçiş anında moment kaybı ve ani akım artışı olabilmektedir.

Yumuşak kalkış (Soft Starter) ile yol verme yönteminde ise, gerilim kontrollü yarı iletken elemanlı sistemlerdir. Motora uygulanan gerilim, zamanla yavaş yavaş artırılır, böylece motor yavaşça hız kazanır. Başlangıç akımı cihaz üzerinden rampa ayarları ile ayarlanabilir ve tam yol verme akımı nominal akımın 2, 3 katı olabilir. Zamana ve akıma göre kontrollü, yumuşak bir şekilde yol verme işlemi gerçekleştirilir. Bu durum mekanik ekipmanlarda oluşabilecek riskleri minimum seviyede tutar.

Frekans Konvertörü ile Yol Verme yönteminde, frekans konvertörü uluslararası literatürde yaygın adıyla VFD, (Variable Frequency Drive) elektrik motorlarının hızını ve momentini kontrol etmek için kullanılan elektronik bir güç dönüşüm cihazıdır. Frekans konvertörü ile motora uygulanan frekans ve gerilim ayarlanarak motorun hızını değişken şekilde kontrol edilmektedir. Alternatif akımda motorlara uygulanan şebeke frekansı genellikle sabittir, ancak motor devir sayısını, değiştirmek için motorun çalıştığı frekansı değiştirmek gerekir. Frekans konvertörüne aşağıdaki bağlantı ile frekans değişimi uygulanmaktadır [13].

$$n = 60 \cdot \frac{f}{p} \quad (3.5)$$

n : Motorun dakikadaki devir sayısı (dev/dk)

f : Frekans (Hz)

p : Motor kutup sayısı



Şekil 3.14: Frekans Konvertörü ve Touch Panel Kontrol Ekranı

Frekans konvertörü doğrultucu, evirici ve frekans dönüştürücü olarak üç bölümden oluşmaktadır. Doğrultucu bölümünde şebekedeki alternatif akım (AC) doğru akıma (DC) dönüştürülür. DC enerji burada geçici olarak depolanır ve filtre edilir. Evirici bölümünde ise, DC enerji istenilen frekansta ve gerilimde AC enerjiye çevrilerek motor enerji beslemesi sağlanmaktadır. Frekans dönüştürücüsü ile frekans değiştirildiğinde, motorun dönme hızını da değişecektir (Şekil 3.14).

Frekans konvertörü kullanımının sağladığı avantajları; aşağıdaki gibi sıralandırılabilir.

- İhtiyaca göre yapılacak hız ayarı ile elektrik enerji tasarrufu sağlanabilir
- Motorun yumuşak devir alması sebebiyle aşırı akımların önüne geçilecektir.
- Yavaş ivmelenmenin bir diğer avantajı da mekanik aksamlarda bulunan rulman, salmastra gibi ekipmanların kullanım ömrü uzayacak ve özellikle dikey hatlarda montajlanan çekvalflerin yumuşak şekilde hareketi ile hem

borulama hattını hem de çekvalfte meydana gelebilecek mekanik darbeleri minimize edecektir.

- Scada, PLC gibi otomasyon sistemlerine entegre edilmesi ile PID kontrol sağlanabilir, özellikle pompa sistemlerde sabit debi çıkışı sağlanabilir.

Özellikle değişken basınç veya debi gereksinimi olan sistemlerde hem teknik hem de ekonomik açıdan çok avantajlıdır.

Oto Transformatörle Yol Verme yöntemi; motora kalkış sırasında daha düşük bir gerilim uygulanması amacıyla kullanılmaktadır. Gerilim değiştirmeli bir yol verme yöntemidir. Bu sayede şebekede oluşabilecek ani yüklenmeleri azalır, motor kalkış akımı ve momentini sınırlar ve bu yöntem özellikle yüksek güçlü motorlarda kullanılmaktadır.



Şekil 3.15: 6.3 kV Beslemeli Oto Transformatör ve Besleme Panosu

Sistemin çalışma prensibi; motor oto transformatörün düşük bir çıkış gerilimine bağlanır. Düşük gerilim, düşük kalkış akımı ve moment oluşturacaktır. Bu sayede oto transformatör hem gerilimi düşürecek hem de kalkış akımını sınırlandıracaktır. Motor hız kazandıkça oto transformatör çıkışı motor üzerinden ayrılır. Bu süre bir zaman rölesi ve bypass kontaktörü yardımıyla yapılabilir. Motor, oto transformatörden ayrılması ile doğrudan şebeke üzerinden tam gerilim altında nominal hızda çalışmaya devam eder.

Çizelge 3.4: Pompa Yol Verme Sistemlerinin Kıyaslanması

Yöntem	Kalkış Akımı	Kalkış Momenti	Maliyet	Karmaşıklık	Uygunluk
Doğrudan Yol Verme	Çok Yüksek	Yüksek	Düşük	Basit	Küçük pompalar
Yıldız-Üçgen	Orta	Düşük	Orta	Orta	Orta güçte pompalar
Soft Starter	Ayarlanabilir	Ayarlanabilir	Orta Yüksek	Orta	Orta Büyük pompalar
Frekans Konvertörü	Düşük	Yüksek	Yüksek	Karmaşık	Tüm pompa sistemleri
Oto Transformatör	Düşük-Orta	Orta	Yüksek	Karmaşık	Büyük sistemler

3.4 Pompalarda Yol Verme Sıklığı

Pompalarda başlatma-durdurma (start stop) sayısı, pompanın ve motorun mekanik ve elektriksel ömrünü, sistem güvenliğini ve bakım ihtiyacını doğrudan etkileyen çok önemli bir kriterdir. Elektrik motoru ile pompaya yol verirken, ilk kalkış akımı nominal akımdan çok yüksektir. Bu durum, motor sargılarının aşırı ısınmasına sebep olmaktadır. Aynı zamanda yol verme sıklığı sonucunda mekaniksel parçalarda aşınmalar oluşarak arızalara sebep olmaktadır. Bu sayı, pompa tipi, motor tipi, sistem hacmi ve kontrol tipi gibi faktörlere bağlı olarak belirlenir.

Çizelge 3.5: Motor Gücüne Göre Saatteki Maksimum Kalkış Sayıları

Motor Gücü (kW)	<5,5	5,5-15	15-45	45-135	135-300	400
Saatteki maksimum kalkış Sayısı	18	12	8	5	3	2

Pompaların sağlıklı çalıştırılması ve arızaların minimuma indirilmesi için çok sık çalıştırılıp durdurulmamasına dikkat edilmelidir.

4. POMPA SEÇİMİNDE DİKKAT EDİLMESİ GEREKEN UNSURLAR ve MEVCUT POMPA SİSTEMLERİNİN ANALİZİ

Pompa seçimi, mühendislikte hidrolik, mekanik, elektrik ve sistem dinamiği disiplinlerini içeren teknik analiz gerektirir. Uygun pompanın seçilmesi, sistemin verimliliği, güvenliği ve uzun ömürlü çalışması için kritik mühendislik tasarımıdır. İlk olarak sistemin ihtiyaçlarının belirlenmesi gerekmektedir. Terfi ettirilecek sıvının özellikleri, debisi, basma yüksekliği, basıncı, pompa çalışma sürekliliği, gibi birçok teknik bilgilerin tespit edilmesi gereklidir. Belirlenen teknik veriler ışığında pompa verimlilik grafiği üzerinden sisteme en uygun pompa seçimi yapılmalıdır. Pompa verimlilik grafiği üzerinde en verimli çalışma noktasına Best Efficiency Point (BEP) adı verilir. Bu nokta verim eğrisinin zirvesine en yakın olan çalışma şartlarını barındırmaktadır. Sistemde pompa çalışması bu noktadan uzaklaştıkça pompa verimi düşer, ısınma problemleri, gürültü, titreşim, kavitasyon gibi istenmeyen durumlar söz konusu olur ve pompanın ömrü kısalmır.

4.1 Basınç Etkisi

Pompa seçiminde basınç, en önemli mühendislik parametrelerinden biridir. Çünkü bir pompanın amacı yalnızca sıvıyı taşımak değil, aynı zamanda onu istenilen basınçta ve debide sistemin ihtiyacı olan noktaya ulaştırmaktır. Elektrik enerjisini, sıvının potansiyel ve kinetik enerjisine dönüştürür. Bu dönüşümün en kritik bileşeni basınçtır, çünkü sıvının taşınabilmesi için pompa tarafından oluşturulan basınç, sistemin hidrolik dirençlerini yenmek zorundadır. Sistemde karşılanması gereken iki tür basınç vardır; birincisi kot farkından doğan statik basınç ve ikincisi; sistem içindeki sürtünme, dirsek, vana ve diğer hidrolik dirençlerin sebep olduğu kayıpların karşılanması için gereken dinamik basınç vardır. Basınç bar veya mSS (su sütunu) terimleriyle ifade edilmektedir. 1 m yüksekliğindeki bir su sütununun altındaki yüzeye yaptığı basınç 1mSS olarak ifade edilir. 1 mSS suyun basıncı, suyun sıcaklığına bağlı olarak yoğunluğunun değişmesine göre farklılık gösterir.

1 mSS basıncın karşılığı şu şekilde hesaplanabilir;

$$P = \rho \cdot g \cdot h \quad (4.1)$$

P: Basınç (Pa)

ρ : Suyun yoğunluğu (kg/m³)

g: Yerçekimi ivmesi (9,81 m/s²)

h: Suyun yüksekliği (m)

Sıvının sıcaklığı 20°C alınır;

$$P = \rho \cdot g \cdot h = 998,2019 \text{ kg/m}^3 \times 9,81 \text{ m/s}^2 \times 1 \text{ m} = \mathbf{9.792,36 \text{ Pa}}$$
 olacaktır.

1 bar basınç 100.000 Pa olduğundan

$$9.792,36 \text{ Pa} = 10,2120 \text{ mSS}$$
 etmektedir.

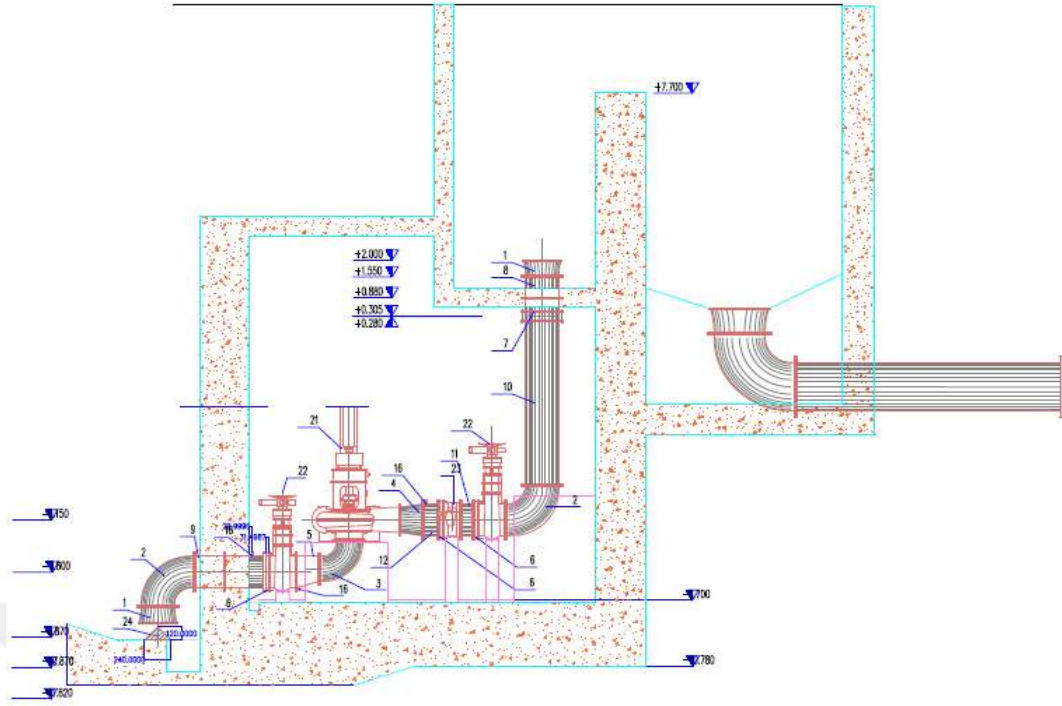
Pratikte 1 bar 10 mSS olarak kullanılmaktadır.

Gereğinden düşük basınçlı pompa seçilmesi; terfi ettirilecek sıvının istenilen mesafeye taşınmaması ve sistemin verimsiz çalışmasına sebep olmaktadır. Yüksek basınçlı pompa seçilmesi ise, aşırı enerji tüketimine, basma sisteminin boğularak zorlanmasına sebep olacaktır.

Kavitasyon riski; bir sıvı içinde basıncın, sıvının buhar basıncının altına düşmesi sonucu buhar kabarcıklarının oluşması ve ardından bu kabarcıkların yüksek basınç bölgelerinde ani olarak patlaması olayıdır. Oluşan kabarcıklar mikro kabarcıklar, basınç artışıyla şiddetle içe çöker. Özellikle düşük basınçlı pompanın emiş ağzı, fan veya salyangozda oluşur. Bu durum pompa çalışmasında gürültü, titreşim, pompa verimliliğinin azalması ve aşırı ısınma gibi ciddi sorunlara yol açabilir.

4.2 Basma Yüksekliği (Total Dynamic Head, TDH)

Bir pompanın sıvıyı emme noktasından basma noktasına kadar taşınması için sıvıya kazandırdığı toplam enerjinin yükseklik cinsinden ifadesidir. Sıvıya verdiği toplam hidrolik enerjiyi temsil etmektedir. Genellikle metre (m) cinsinden ifade edilir ve hem yükseklik hem de basınç faktörlerini içeren bir enerji ifadesidir.



Şekil 4.1: Terfi Pompası Emiş Basma Hattı Teknik Resim Çizimi

Basma yüksekliği genel formülü aşağıdaki denklem ile ifade edilmektedir.

$$TDH = H_s + H_f + H_p \quad (4.2)$$

TDH: Toplam Dinamik Basınç

Statik Yüksekliği (H_s); pompa giriş noktası ile sıvı kaynağı seviyesi arasındaki dikey mesafedir. Eğer pompa sıvı seviyesinin üzerindeyse emme yüksekliği, altındaysa emme derinliği olur. Z_1 ile ifade edilir.

Statik basma yüksekliği; pompadan sonra sıvının iletildiği nokta ile pompa çıkışı arasındaki dikey mesafedir.

$$Z_2 \text{ ile ifade edilir. Statik yükseklik } H_s = Z_2 - Z_1 \text{ (m) olur.} \quad (4.3)$$

Sürtünme kayıpları (H_f); sıvının boru boyunca akarken karşılaştığı direnç nedeniyle kaybettiği enerjidir, metre (m) cinsinden ifade edilir. Sürtünme kayıpları boru, dirsek, vana gibi hidrolik sistemi oluşturan parçalarda gerçekleşir. Eşitliği;

$$H_f = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \quad (4.4)$$

H_f : Sürtünme kayıpları (m)

f : Sürtünme katsayısı

L: Boru uzunluğu (m)

D: Boru iç çapı (m)

V: Sıvı hızı (m/s)

g: Yerçekimi kuvveti (9,81 m/s²)

Çıkış basınç yüksekliği (H_p); pompa çıkışında bulunan basınç değerinin, sıvı yoğunluğu ve yerçekimi ivmesine göre yükseklik eşdeğeridir.

$$H_p = \frac{P}{\rho g} \quad (4.5)$$

H_p: Çıkış basınç yüksekliği

P: Pompa çıkış basıncı

ρ: Sıvı yoğunluğu (kg/m³)

g: Yerçekimi kuvveti (9,81 m/s²)

$$TDH = \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \right) - \left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 \right) + H_f \quad (4.6)$$

P₁, P₂: Emme ve basma noktalarındaki basınçlar (Pa)

V₁, V₂: Emme ve basma noktalarındaki akış hızları (m/s)

Z₁, Z₂: Emme ve basma noktalarındaki kot yükseklikleri (m)

Basma yüksekliği pompa eğrisinden doğru çalışma noktası seçimi için esastır. Enerji tüketimini doğrudan etkilemektedir. Yetersiz basma yüksekliği sıvının taşınmasında olumsuz etki eder ve sistem işlevsiz kalır. Aşırı basma yüksekliği ise yüksek enerji tüketimine ve hidrolik sistemde titreşimlere sebep olabilir.

Pompanın motor gücü doğrudan basma yüksekliği ile orantılıdır.

$$P = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\eta} \quad (4.7)$$

P: Pompanın motor gücü

Q: Debi (m³/s)

H: Basma yüksekliği (m)

η: Verim

ρ · g · H: Pompanın sıvıya verdiği spesifik enerji

4.3 Sıvı Yoğunluğu (ρ)

Sıvı yoğunluğu, pompa sistemlerinde kullanılan akışkanın birim hacimdeki kütlesidir ve kg/m^3 cinsinden ifade edilir. Pompa seçiminde, güç hesabında ve sistemin hidrolik davranışlarında kritik rol oynar. Yoğunluk arttıkça, pompa motoru daha fazla güç harcar. Sıvı yoğunluğunun açık ifadesi aşağıdaki şekildedir;

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (4.8)$$

ρ : Yoğunluk (kg/m^3)

m : Kütle (kg)

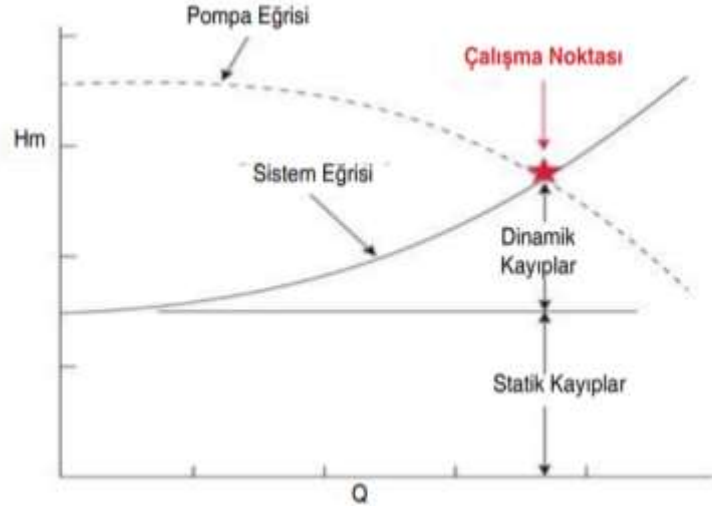
V : Hacim (m^3)

4.4 Basınç, Basma Yüksekliği ve Sıvı Yoğunluk İlişkisi

Basınç (P), basma yüksekliği (TDH) ve sıvı yoğunluğu (ρ) arasındaki ilişki, hidrolik sistemlerdeki enerji dönüşümlerinin temelini oluşturur. Bu ilişki özellikle pompa sistemlerinde, doğru pompa seçimi ve sistem tasarımı açısından kritik öneme sahiptir. Pompalarda, pompa karakteristiği basma yüksekliği ve debi (H, Q) eğrisi ile belirlenir. Bu eğri sıvının yoğunluğundan etkilenmez. Ancak yoğunluk arttıkça; pompa çıkış basıncı yükselir ve bu durumda pompa motor gücü ihtiyacı artacaktır. Bu nedenle yoğunluğu yüksek sıvılar için aynı pompada basma yüksekliği ve debi aynı kalsa bile daha güçlü motor seçimi gerekmektedir.

4.5 Pompa Performans Grafiği

Pompa performans grafiği, bir pompanın farklı debilerde ne kadar verimli çalıştığını gösteren teknik açıdan kritik bir grafikdir. Özellikle santrifüj pompaların seçiminde ve sistem tasarımında bu grafik referans alınır. Şekil 4.2'de belirtilen çalışma noktası, pompanın tasarlandığı ve en verimli çalıştığı noktadır.



Şekil 4.2: Pompa İçin Çalışma Noktası (BEP)

Bu noktanın özellikleri:

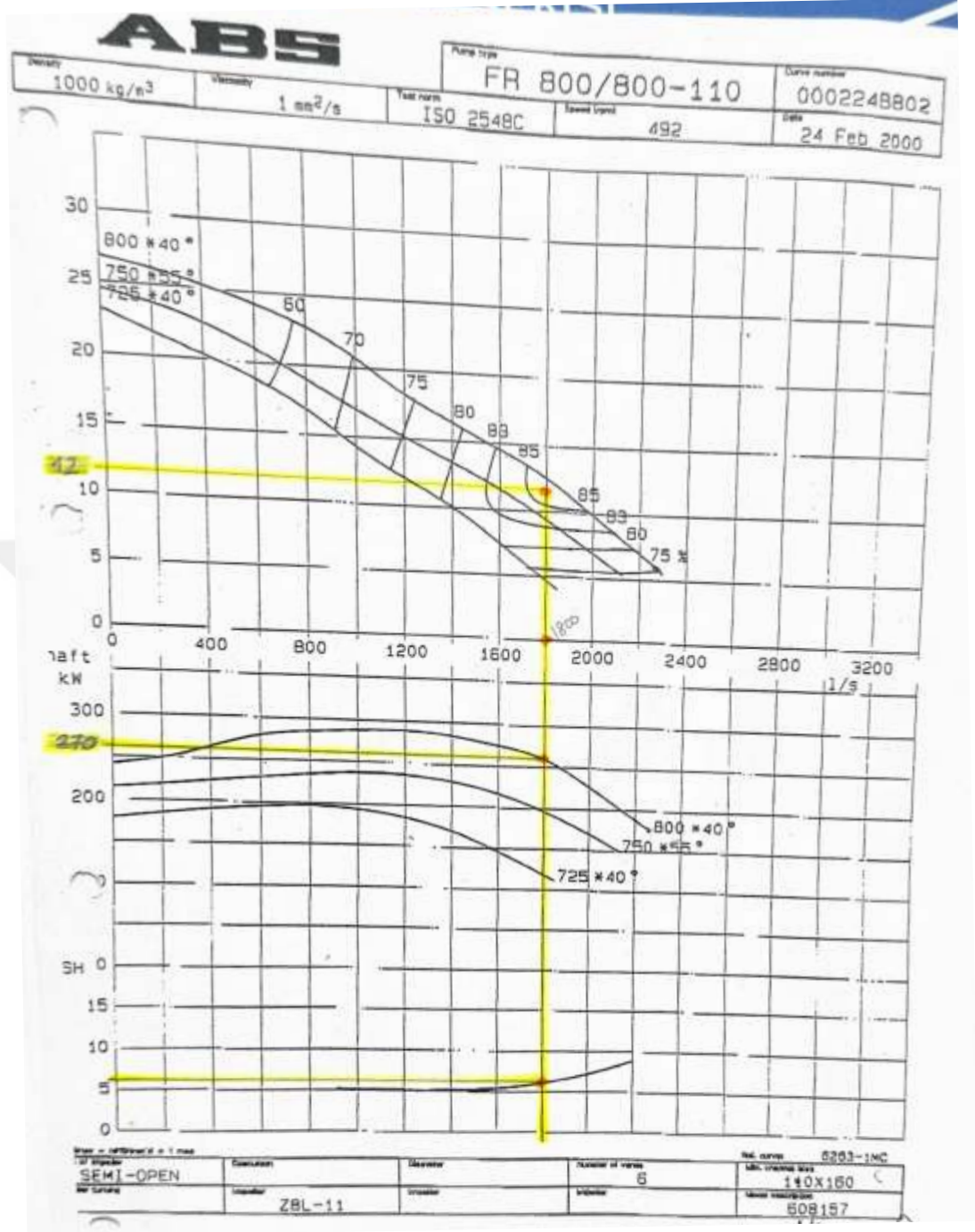
- Titreşim ve gürültü en düşük seviyededir,
- Mekanik aşınma minimumdur,
- Enerji tüketimi en verimli değerdedir,
- Pompa ömrü uzundur.

En verimli çalışma noktası dışındaki uzun süreli çalışma durumunda aşağıdaki problemler gözlenir;

- Mil yataklarında aşırı yüklenme,
- Kavitasyon,
- Düşük sistem performansı,
- Artan bakım maliyeti,
- Enerji tüketimi,
- Debi düşüklüğü.

Şekil 4.3’de ABS FR 800/800-110 modeli pompa performans grafiği incelendiğinde 725*40°, 750*55° ve 800*40° olmak üzere üç çeşit pompa fan tipine göre veriler yansıtılmıştır. Pompada 800*40° fan tipi tercih edilmiştir. Kullanılan fan tipine göre grafik üzerinde yapılan işaretlemelerde;

- $H_m=12$ mSS $Q=1800$ lt/sn $P=270$ kW olduğu görülmektedir.



Şekil 4.3: ABS FR 800/800 110 Modeli Pompa Performans Grafiği

Saha ölçümleri ve performans grafiği kıyaslandığında, üretici firmanın sunmuş olduğu verilerin uygulamada da doğruluğu görülmüştür.

Pompa fanında zamanla meydana gelen aşınmalar sonucu debi ve enerji tüketiminde azalmalar gözlemlenmektedir. Bu tür durumlarda pompa gözetleme kapağı açılarak, fan ile aşınma halkası arasındaki boşluk ölçülmektedir. Aşınmalar sonucu bu boşluğun artması pompa debisinin düşmesine ve sistemin verimsizleşmesine sebep olmaktadır [12].

4.6 Mevcut Pompa Sistemlerinin Analizi

Pompa sisteminde verim düşüklüğü varsa; aşınma, tıkanma, vana konumu, kavitasyon veya yanlış pompa seçimi olabilir. Pompa eğrisi ile sistem eğrisinin kesiştiği nokta gerçek işletme noktasıdır. Sistemin yeniden tasarımı gerekiyorsa bu iki eğrinin uygun şekilde eşleşmesi gerekir.

Mevcut bir pompa sisteminin analizi; sistemin verimliliğini, kapasitesini, hidrolik uygunluğunu ve enerji tüketimini değerlendirmek amacıyla yapılır. Bu analizde temel amaç; enerji kayıplarını azaltmak, pompa performansını optimize etmek, gereksiz işletme maliyetlerini düşürmektir.

Yapılacak sistem analizinde incelenecek temel parametreler aşağıdaki gibidir;

Sahadan gerçek zamanlı debi, basınç, motor gücü ölçümleri alınır, pompanın sahadaki montaj yerine göre üreticiden sağlanan performans grafiği incelenir ve ölçüm değerleri ile kıyaslanır, pompanın en verimli çalışma noktasında çalışıp çalışmadığı kontrol edilir, sistemin ihtiyaç duyduğu işletme basıncı kontrol edilir, hidrolik borulama sisteminde; hat uzunluğu, boru çapları, bağlantı elemanları ve dirsekler incelenir. Pompa basma yüksekliğine olan olumsuz şartlar incelenir.

Mevcut bir pompaj sisteminin detaylı analizi sayesinde; enerji verimliliği artırılabilir, arıza riski ve bakım maliyetleri düşer, sistem güvenliği ve operasyonel kararlılık sağlanır.

4.6.1 Yüksek Verimli Motorlar

Yüksek verimli motorlar, elektrik enerjisini mekanik enerjiye daha az kayıpla dönüştüren motorlardır. Tesislerinde, özellikle pompa, fan, kompresör gibi sürekli çalışan ekipmanlar için yüksek verimli motorlar hem enerji tasarrufu hem de karbon salınımı açısından kritik öneme sahiptir.

Yüksek verimli motorlar, IE3 (Premium Efficiency) ve IE4 (Super Premium Efficiency) gibi uluslararası enerji verimlilik sınıflarına sahip elektrik motorlarıdır (Çizelge 4.1). Verimleri, standart motorlara göre %2–8 daha yüksektir.

Türkiye ve Avrupa Birliği'nde yeni kurulan tesislerde yönetmeliklere bağlı olarak genellikle minimum IE3 sınıfı motor kullanımı zorunludur. Yüksek verimli motorlar; %5 ila 10 arasında daha az elektrik enerjisi tüketmeleriyle enerji tasarrufu

sağlamaktadır, bu durumda uzun vadeli çalışmalarda düşük işletme maliyetini oluşturmaktadır. Ekipman olarak daha az ısıl ve mekanik zorlanma avantajıyla uzun ömürlüdür.

Çizelge 4.1: Uluslararası Verimlilik Sınıfları (IEC 60034-30 Standardına Göre)

Sınıf	Açıklama	Verimlilik
IE1	Standart verimlilik	Düşük
IE2	Yüksek verimlilik	Orta
IE3	Üstün verimlilik	Yüksek
IE4	Süper üstün verimlilik	Çok yüksek
IE5	En yüksek üstün verimlilik	Geliştirme aşamasında

Yüksek verimli motorların yapısal özellikleri;

- Daha kaliteli sac malzemedен üretilerek manyetik kayıplar azaltılmıştır.
- Gelişmiş stator ve rotor tasarımı ile verimli hale getirilmiştir.
- Direnç kayıplarını düşürmek için bakır oranı yükseltilmiştir.
- Optimize hava boşluğu sebebiyle manyetik akıyı arttırmaktadır.
- İzolasyon kalitesi yüksek olmasıyla ısı kayıplarına karşı dirençlidir.

Standartlar ve Etiketler aşağıdaki gibidir;

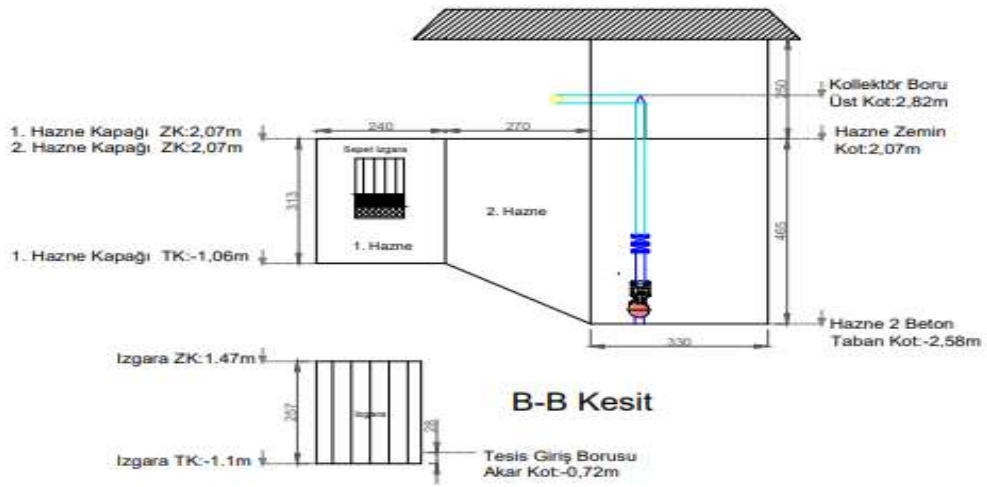
- **IEC 60034-30:** Motor verimlilik sınıflandırması
- **EN 60034-2-1:** Verim ölçüm yöntemleri
- **ERP Direktifi (Avrupa):** IE3 minimum şart
- **Etiketleme:** Motor plakasında IE2/IE3/IE4 bilgisi yer alır

4.6.2 Terfi pompa sistemlerinde yeni nesil pompa motorları ile enerji verimliliği

Atık su arıtma terfi merkezi, mevcut pompa analizleri sonucu pompa verimlerinin çok düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu bölümde; yüksek verimli elektrik motoruna sahip yeni tip pompa değişimlerinin sistem üzerindeki etkileri ve pompa kıyaslaması yapılmıştır. Seçilecek pompa öncesinde tesisin kot seviyelerinin bilinmesi gerekmektedir. Bu sebeple Nivelman cihazı ile deniz seviye kotu baz alınarak tesisin; pompa emiş kotu, hazne kotları ve pompa basma hattı kot ölçümleri yapılmıştır (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2: Atık Su Arıtma Terfi Merkezi Kot Ölçümleri

Ölçüm Lokasyonu	Kot Ölçüsü (mt)
Terfi merkezi pompa emiş kotu	-2,58
Terfi merkezi 2 no.lu hazne beton taban kotu	-2,58
Terfi merkezi kaba ızgara beton taban kotu	-1,1
Terfi merkezi 1 no.lu hazne beton taban kotu	-1,06
Terfi merkezi kaba ızgara içerisinde bulunan tesis giriş borusu akar kotu	-0,72
Terfi merkezi kollektör odası zemin kotu	1,58
Terfi merkezi 2 no.lu hazne derinlik kotu	4,65



Şekil 4.4: Atık Su Arıtma Terfi Merkezi Kesit Ölçümleri

Halen kullanılan örnek bir atık su arıtma terfi merkezinin fiziki kot ölçümleri verilmektedir (Şekil 4.4). Tesis Ø315 HDPE borular ile 810 mt basma hattı uzunluğuna sahiptir. Saha ölçümlerinde elde edilen teknik bilgiler ışığında; pompa motor verimlilik sınıfı IE3 Premium Efficiency'ye sahip, verimliliği %96 olan ıslak tip dalgıç pompa seçilmiştir. (Şekil 4.5)



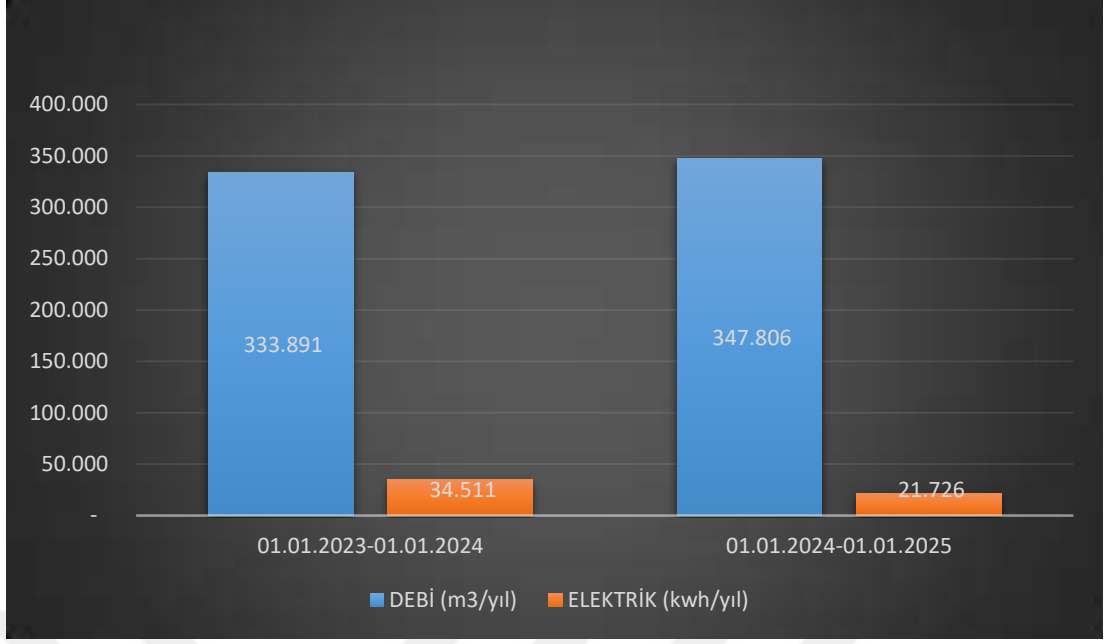
Şekil 4.5: Motor Sınıfı IE3 Olan Yüksek Verimli Pompa [25]

Pompaların çalıştırılmasında ekipmanın ve hidrolik bağlantıların korunumu, enerji verimliliğinin sağlanması ve SCADA üzerinden debi oranlı çalışma sistemi düşünülerek frekans konvertörü ile gerçekleştirilmektedir.

Çizelge 4.3: Eski ve Yeni Pompa Teknik Bilgileri

Dalgıç Islak Tip Pompa Teknik Bilgiler	Demontajı Yapılan Pompa Bilgileri	Montajı Yapılan Yüksek Verimli Pompa Bilgileri
Debi	255 m ³ /h	343 m ³ /h
Hm	15 mSS	0-22 mSS
Güç/Akım/Gerilim	12,5 kW/22 A/ 380 VAC	9,9 kW/18,1 A/ 400 VAC
Devir	1480 RPM	1466
Cos Ø	0,95	0,82
Frekans	50 Hz	50 Hz

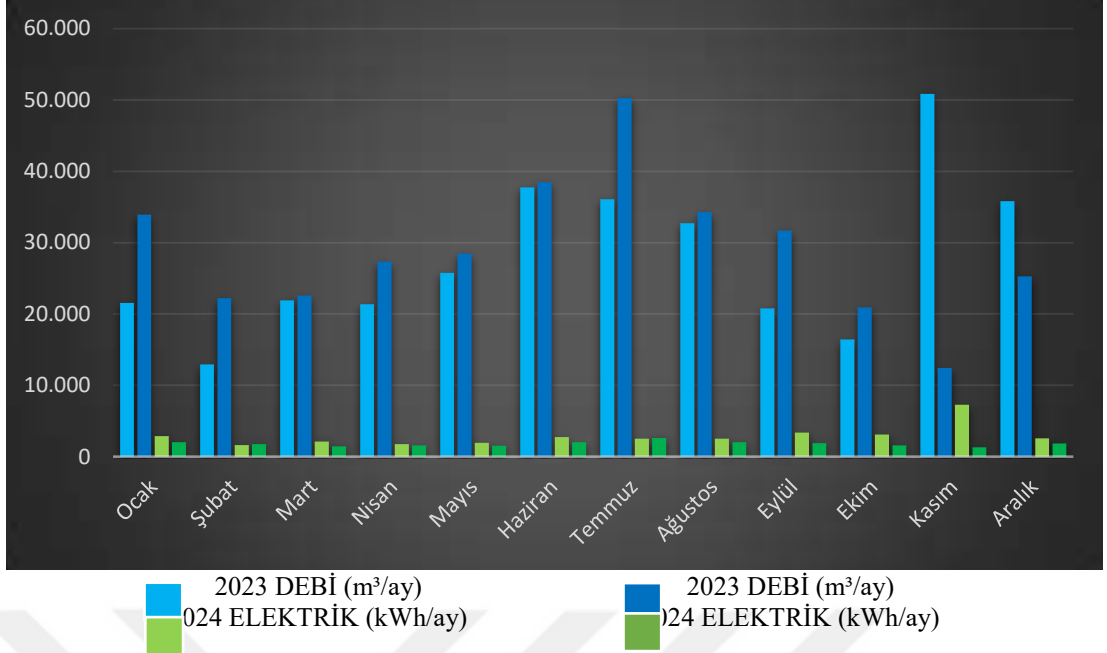
Sistemde verimliliği iyileştirmek için yapılan pompa değişiminden sonra, bir yıllık debi ve elektrik enerji verileri incelendiğinde; eski pompalara ait yıllık debi **333.891 m³**, tüketilen elektrik miktarı yıllık **34.511 kWh** olarak hesaplanmıştır. Yapılan hesaplara göre eski pompalar **1 m³** atık suyu terfi ettirirken **0,103 kWh** elektrik tüketimi yaptığı görülmüştür. Değişimi yapılan pompalara ait yıllık debi 347.806 m³ ölçülmüş, tüketilen elektrik miktarı yıllık **21.726 kWh** olarak hesaplanmıştır. Değişimi yapılan pompaların ise **1 m³** atık suyu terfi ettirirken **0.062 kWh** elektrik tüketimi yaptığı görülmüştür.



Şekil 4.6: Eski/Yeni Pompaların Bir Yıllık Debi Ve Elektrik Tüketim Grafiği

Çizelge 4.4: Örnek Verilen Terfi Merkezi 2023 ve 2024 Yıllarına Ait Debi Ve Elektrik Tüketim Verileri

Aylar	2023 Yılı Debi Değeri (m ³ /ay)	2024 Yılı Debi Değeri (m ³ /ay)	2023 Yılı Elektrik Tüketimi (m ³ /ay)	2024 Yılı Elektrik Tüketimi (m ³ /ay)
Ocak	21.565	33.925	2.898	2.021
Şubat	12.930	22.219	1.636	1.751
Mart	21.910	22.591	2.119	1.471
Nisan	21.360	27.318	1.781	1.583
Mayıs	25.760	28.461	1.933	1.555
Haziran	37.759	38.444	2.748	2.031
Temmuz	36.078	50.268	2.528	2.639
Ağustos	32.703	34.285	2.506	2.025
Eylül	20.790	31.671	3.393	1.899
Ekim	16.420	20.919	3.110	1.569
Kasım	50.820	12.423	7.276	1.312
Aralık	35.796	25.282	2.584	1.869



Şekil 4.7: Eski/Yeni Pompaların Aylık Bazda Debi ve Elektrik Tüketim Grafiği

Ölçüm sonuçları ve grafiklerden de anlaşılacağı üzere, değişimi yapılan yüksek verimli pompalar, eski pompalara göre 1 yıl içerisinde **13.915 m³** fazla atık suyu terfi ettirilmiş olup **1 m³** atık suyu terfi ettirirken **0.041 kWh** elektrik tasarrufu sağlandığı görülmüştür.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Atık su arıtma tesisleri, sürekli çalışma esasına dayalı olarak faaliyet gösteren ve enerji tüketimi açısından yoğun süreçlere sahip entegre sistemlerdir. Bu tesislerde, özellikle elektrik motorları, blowerlar ve pompalar gibi yüksek güçlü ekipmanlar, toplam enerji tüketiminin önemli bir kısmını oluşturmaktadır. Dolayısıyla, bu tür ekipmanlara yönelik geliştirilecek enerji verimliliği uygulamaları, işletme performansının artırılması ve sürdürülebilirlik hedeflerine ulaşılması açısından stratejik bir öneme sahiptir. Enerji yönetiminin optimizasyonu bağlamında, yüksek verimli motor ve pompa sistemlerinin tercih edilmesi günümüzde kritik bir gereklilik haline gelmiştir. Özellikle IE4 verim sınıfına sahip motor teknolojileri, geleneksel motorlara kıyasla daha düşük enerji kayıpları ve daha yüksek performans sunmaktadır. Bu motorlar yalnızca enerji tasarrufu sağlamakla kalmamakta; aynı zamanda düşük ısı kayıpları sayesinde ekipman ömrünü uzatmakta ve bakım gereksinimlerini azaltmaktadır. Elde edilen teknik ve ekonomik veriler, enerji tüketiminin azaltılması, işletme maliyetlerinin düşürülmesi ve ekipman ömrünün uzatılması açısından bu tür teknolojilerin yaygınlaştırılmasının gerekliliğini açıkça ortaya koymaktadır. Bununla birlikte, mevcut standart motorların kademeli olarak yüksek verimli motorlarla değiştirilmesi önerilmektedir. Ayrıca, frekans konvertörlerinin entegrasyonu sayesinde motor sistemlerinin değişken yük koşullarına uyum sağlayabilmesi mümkün olmakta, bu da enerji verimliliğini daha da artırmakta ve sistem dinamiklerinin daha esnek bir biçimde yönetilmesine olanak tanımaktadır. Bu tür sistemlerin, yalnızca yeni projelerde değil, aynı zamanda mevcut altyapılara da entegre edilerek standart hale getirilmesi önem arz etmektedir. Pompa sistemlerinin belirli periyotlarla debi, güç ve basma yüksekliği gibi temel performans parametrelerine göre izlenmesi; sistemin hem anlık hem de uzun vadeli verimliliğinin sağlıklı bir biçimde değerlendirilmesine katkı sağlamaktadır. Bu bağlamda, SCADA gibi otomasyon sistemlerine entegre edilen yazılımlar aracılığıyla enerji tüketimi sürekli olarak izlenmeli, kayıt altına alınmalı ve geçmişe dönük veriler ışığında optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmelidir. Yapılan performans analizleri sonucunda, pompanın çalışma koşullarına uygunluğu değerlendirilebilir ve

olası verimlilik kayıpları erken aşamada tespit edilebilir. Pompa ve motor seçimi süreçlerinde, yalnızca ilk yatırım maliyeti değil, aynı zamanda uzun vadeli enerji tüketimi ve bakım maliyetleri de dikkate alınmalıdır. Bu seçimler yapılırken, teknik verilerin üretici kataloglarıyla karşılaştırılması ve sistem gereksinimlerine tam uyum sağlanması büyük önem taşımaktadır. Ayrıca, yüksek verimli motor ve pompa sistemlerinin çevresel etkilerini ve ekonomik geri dönüşlerini ortaya koyan yaşam döngüsü analizleri, yatırım kararlarına bilimsel bir zemin sağlamaktadır.

Enerji verimliliği iyileştirmelerine yönelik olarak uygulanan teknolojilerin, yatırım geri dönüş süresi, net bugünkü değer ve iç kârlılık oranı gibi finansal metriklerle değerlendirilmesi, karar vericilere hem teknik hem de ekonomik açıdan yön gösterici olabilmektedir. Bu yaklaşım, enerji yoğun endüstrilerde gerçekleştirilen sistematik çalışmaların yalnızca işletme verimliliğini artırmakla kalmayıp, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik hedeflerine de katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Sonuç olarak, atık su arıtma tesislerinde enerji verimliliğine yönelik teknolojik iyileştirmelerin sistematik biçimde uygulanması, hem ekonomik performansı artırmakta hem de sürdürülebilirlik ilkeleriyle uyumlu bir işletme modeli geliştirilmesine imkân tanımaktadır. Bu bağlamda, enerji yönetimi politikalarının yenilikçi teknolojiler ve otomasyon sistemleriyle desteklenmesi, gelecekteki çevresel yüklerin azaltılması ve kaynakların daha verimli kullanılması açısından vazgeçilmezdir.

Atık su arıtma tesislerinde kullanılan pompa ve motor sistemlerinin güvenilirliği, tesisin genel operasyonel sürekliliği açısından kritik bir öneme sahiptir. Geleneksel bakım yaklaşımları, genellikle arıza gerçekleşikten sonra müdahale esasına dayanmakta olup, bu durum hem plansız duruşlara hem de yüksek bakım maliyetlerine yol açabilmektedir. Bu kapsamda, kestirimci bakım stratejileri, arızaları meydana gelmeden önce tespit etme potansiyeli sunarak daha sürdürülebilir ve ekonomik bir bakım yönetimi yaklaşımı sağlamaktadır.

Kestirimci bakım uygulamaları, ekipmanlardan gerçek zamanlı olarak toplanan sensör verilerinin analizi yoluyla ekipmanın anlık durumu hakkında bilgi sunmayı amaçlar. Bu veriler genellikle sıcaklık, titreşim, akım, ses, basınç ve debi gibi fiziksel büyüklükleri kapsamaktadır. Ancak bu tür veriler, çoğunlukla doğrusal olmayan, karmaşık ve çok değişkenli bir yapıya sahiptir. Bu nedenle, klasik istatistiksel analiz yöntemleri arıza tahminlerinde yetersiz kalabilmektedir. Yapay

sinir ağıları (YSA), çok değişkenli ve doğrusal olmayan veri kümeleri arasında karmaşık ilişkileri modelleyebilme yetenekleri sayesinde, kestirimci bakım uygulamalarında önemli bir avantaj sunmaktadır. YSA modelleri, geçmişe ait sensör verilerinden öğrenerek, ekipmanın gelecekteki davranışlarına ilişkin yüksek doğrulukta tahminlerde bulunabilir. Bu sayede, olası arızalar henüz gerçekleşmeden önce tespit edilebilmekte ve bakım planları proaktif olarak oluşturulabilmektedir. YSA tabanlı kestirimci bakım sistemleri ile plansız duruş sürelerinin minimize edilmesi, ekipman ömrünün uzatılması, enerji tüketiminin optimize edilmesi, gereksiz parça değişimlerinin önlenmesi, iş gücü ve stok yönetiminin etkinleştirilmesi gibi avantajlar hedeflenmektedir. Bu avantajlar, özellikle sürekli çalışan ekipmanların bulunduğu atık su arıtma tesisleri, pompa istasyonları, ısıtma, havalandırma ve iklimlendirme sistemleri, üretim hatları ve enerji santralleri gibi işletmelerde önemli operasyonel faydalar sağlamaktadır.

Kestirimci bakım süreçlerinde, sensörlerden elde edilen yüksek hacimli verilerin etkin biçimde işlenmesi gerekmektedir. Söz konusu veriler SCADA sistemleri veya IoT tabanlı veri toplama altyapıları aracılığıyla sürekli izlenebilir. Elde edilen veriler, yapay sinir ağı modellerine girdi olarak sunulurken model eğitimi gerçekleştirilir. Eğitilmiş model, daha sonra gerçek zamanlı veri akışlarını analiz ederek olası arızaları tahmin edilmesini sağlayacaktır. Bu süreçte; sensör verilerinin doğruluğu ve sürekliliği, modelin belirli periyotlarla yeniden eğitilerek güncel tutulması ve tahmin doğruluğunun validasyon metotları ile test edilmesi gibi noktalara dikkat edilmesi gerekmektedir.

Yapay sinir ağı temelli kestirimci bakım yaklaşımları, geleneksel bakım stratejilerinden farklı olarak ekipmanların sağlığını sürekli izleyen ve arıza risklerini önceden belirleyebilen yapılar sunmaktadır. Özellikle enerji yoğun ve süreklilik gerektiren atık su arıtma tesislerinde, bu tür sistemlerin yaygınlaştırılması; enerji verimliliğinin artırılması, çevresel sürdürülebilirliğin sağlanması ve bakım maliyetlerinin azaltılması açısından büyük önem arz etmektedir. Yapay zekâ destekli kestirimci bakım sistemleri, yalnızca bugünkü ihtiyaçlara değil, gelecekteki akıllı altyapı sistemlerinin temel bileşeni olma potansiyeline de sahiptir.

Atık su kalitesinin değerlendirilmesinde en yaygın kullanılan parametrelerden biri olan Biyolojik Oksijen İhtiyacı (BOİs), suda bulunan biyolojik olarak parçalanabilir organik maddelerin, mikroorganizmalar tarafından beş günlük süre

zarfında oksitlenmesi sonucu tüketilen çözülmüş oksijen miktarını ifade etmektedir. BOİ₅ değeri, atık suyun organik yükünü ve arıtma tesislerinin arıtma etkinliğini değerlendirmek açısından temel bir göstergedir. Ancak BOİ₅ analizinin gerçekleştirilmesi için standart yöntemlerde en az beş günlük bir inkübasyon süresi gerekmektedir. Bu durum, özellikle gerçek zamanlı süreç kontrolü ve acil durum yönetimi açısından ciddi bir zaman kısıtı oluşturmaktadır. Geleneksel laboratuvar analiz yöntemlerinin zaman alıcı ve maliyetli olması, son yıllarda yapay zekâ tabanlı yöntemlerin çevre mühendisliği alanında yaygın olarak kullanılmasına neden olmuştur. Özellikle Yapay Sinir Ağları (YSA), doğrusal olmayan, çok değişkenli ve karmaşık ilişkileri modelleme yetenekleri sayesinde, çevresel parametrelerin tahmininde yüksek başarı sağlamaktadır. Bu çalışmada, BOİ₅ değerinin tahmininde ileri beslemeli ve geri yayımlı bir YSA mimarisi kullanılarak, geleneksel yöntemlere kıyasla daha hızlı ve güvenilir bir yöntem geliştirilmiştir.

Bu çalışmada, örnek bir atıksu arıtma tesisine ait 164 veri seti olarak kullanılmıştır. Modelde, BOİ₅ parametresini tahmin etmek üzere KOİ (Kimyasal Oksijen İhtiyacı), T-N (Toplam Azot), T-P (Toplam Fosfor), AKM (Askıda Katı Madde), İ (İletkenlik) ve ÇOI (Çözülmüş Oksijen İhtiyacı) girdi parametreleri kullanılmıştır. Girdi verileri kullanılarak oluşturulan ileri beslemeli geri yayımlı YSA modeli (İBGYYSA), çıkış parametresi olarak BOİ₅ değerini tahmin etmek üzere eğitilmiştir. Modelin performansı, tahmin edilen BOİ₅ değerleri ile laboratuvar ortamında ölçülen gerçek BOİ₅ değerleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, YSA modeli ile elde edilen tahmin değerlerinin gerçek ölçüm verileri ile yüksek oranda uyumlu olduğu belirlenmiştir. Özellikle, klasik yöntemlerde gereken 5 günlük bekleme süresine kıyasla, YSA modeli sayesinde anlık ve dinamik tahminlerin yapılabilmesi, tesis yönetimi açısından önemli bir avantaj sağlamaktadır. Böylece, erken müdahale, arıtma verimliliğinin izlenmesi ve süreç optimizasyonu gibi birçok konuda yapay zekâ destekli karar verme süreçlerinin desteklenebileceği ortaya konmuştur.

BOİ₅, su kalitesinin değerlendirilmesinde kritik bir parametre olmasına rağmen, geleneksel ölçüm yöntemleri operasyonel anlamda ciddi zaman kısıtları yaratmaktadır. Bu çalışmada kullanılan YSA tabanlı tahmin modeli, BOİ₅ değerinin kısa sürede ve yüksek doğrulukla tahmin edilmesini mümkün kılarak, atık su yönetiminde yeni nesil akıllı sistemlerin geliştirilmesine zemin hazırlamaktadır.

Gelecekte, bu modellerin IoT sensör sistemleri ile entegre edilmesi ve SCADA sistemlerine uyarlanması sayesinde, gerçek zamanlı otomatik kontrol ve optimizasyon mekanizmalarının daha da etkin hâle getirilmesi mümkündür. Bu doğrultuda, yapay zekâ temelli tahmin sistemlerinin yalnızca BOİs değil, diğer çevresel parametrelerin belirlenmesinde de yaygınlaştırılması, sürdürülebilir ve çevre dostu atık su arıtma süreçlerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.



KAYNAKÇA

- [1] Kuş B.A., (2020). “Development and testing of a graphical simulator for wastewater treatment plant design and analysis”, Doktora Tezi, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep.
- [2] Güneş G., (2023). “Process modeling and energy optimization of a full scale advanced biological wastewater treatment plant in İstanbul”, Doktora Tezi, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul.
- [3] Şenol, G. K. ve Karakuş, C. (2017). “Pompa ve pompaj sistemlerinde enerji tasarrufu uygulamaları”. *Mühendis ve Makine*, Sayı; 58 (687), s.s; 1-13.
- [4] Akhan, H. (2022). “Sanayide enerji yönetimi: pompa ve fan sistemlerinde verimlilik artırıcı uygulamalar”. *Trakya Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Sayı; 23 (1), s.s;11-23
- [5] Ovalı, İ., Atalay, Ö., Yılmaz, E. (2021). “Santrifüj pompa tasarımında sayısal yöntemlerin (HAD/CFD) kullanımı”. *Mühendis ve Makine*, Sayı; 62 (705), s.s; 654-664
- [6] Türkmenler, H. (2016). “Atık Su Arıtma Tesislerinde Enerji Verimliliği”. *Politeknik Dergisi*, Sayı; 20 (2), s.s; 495-502
- [7] Boztoprak H., (2014). “Görüntü işleme teknikleri ve yapay zekâ yöntemleri kullanarak atıksu arıtmada performans analizlerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- [8] Mugwamba T., (2020). “Voltage controlled photo voltaic pumping system with a brushless dc motor (BLDC)”, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir.
- [9] Kebir F. O., (2013). “Atık su arıtma tesislerinde enerji tüketiminin enerji optimizasyonu ile azaltılması”, Mustafa Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Hatay.
- [10] Okullu U., (2016). “İnline tip santrifüj pompalarda verim analizi ve kavitasyon incelenmesi”, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce.
- [11] Sarıgül A., (2010). “Santrifüj pompalarda enerji verimliliği”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [12] Karakaya, K., Arifoğlu, B., (2021). “İSKİ terfi merkezleri için SCADA sistemlerinde raporlama yazılımı oluşturma ve verimliliğe etkisinin analizi”. *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 4 (2), 73-82
- [13] Karaca M., (2012). “Değişken devirli sirkülasyon pompalarında enerji verimliliği”, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul.
- [14] Evcen D.E., (2022). “Yüksek basınç altında çalışan sızdırmazlık elemanlarının ömürlerinin belirlenmesi”, Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Konya.

- [15] Mutlu Y., (2010). “İstanbul su ve kanalizasyon idaresi katodik koruma uygulamaları ve ekonomik analiz”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] Bıyık G., (2013). “Katodik koruma sistemleri”, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [17] “Atıksu arıtma tesisi enerji teşviki yönetmeliği” (T.C. Resmî Gazete, 11 Kasım 2023, sayı: 32366).
- [18] “Su ve atık su istatistikleri”, (2022) (Türkiye İstatistik Kurumu, 13 Aralık 2023, sayı: 49607).
- [19] Sengorur B., Dogan E., Koklu, R., Samandar A., “Dissolved Oxygen Estimation Using Artificial Neural Network For Water Quality Control”, Fresenius Env. Bul. 15 p.p: 1064-1067 (2006).
- [20] Govindaraju, R.S., and Rao, R. A., “Artificial Neural Networks in Hydrology”, Kluwer Academic Publishers, p.p: 93-109 (2000).
- [21] Fogelman S., Blumenstein M., Zhao H., “Estimation of chemical oxygen demand by ultraviolet spectroscopic profiling and artificial neural networks”, Neural Comput & Applic., 15 p.p: 197– 203 (2006).
- [22] Zaheer I., Bai C.G., “Application of Artificial Neural Network for Water Quality Management”, Lowland Tech. Int. 5 p.p:10-15 (2003).
- [23] Aguilera P.A., Frenich A.G., Torres J.A., Castro H., Vidal J.L.M. and Canton M., “Application of the Kohonen neural network in coastal water management: methodological development for the assessment and prediction of water quality”, Water Res. 35 pp 4053–4062 (2001).
- [24] ASCE Task Committee on Application of Artificial Neural Networks in Hydrology. “Artificial neural networks in hydrology. I: Preliminary concepts.” J. Hydrologic Energy., ASCE, 5(2), p.p:115–123. (2000).
- [25] <https://www.xylem.com/en-us/products--services/pumps-packaged-pump-systems/pumps/submersible-pumps/wastewater-pumps/n-technology-pumps/n-3153/>

ÖZGEÇMİŞ

Şahin DURMAZ

EĞİTİM:

- Tuzla Teknik Lisesi, Elektronik Bölümü, (2002),
- Marmara Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Endüstriyel Elektronik, (2005)
- Anadolu Üniversitesi, İşletme Fakültesi, İşletme Bölümü, (2012)
- Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, (2019)
- İstanbul Gedik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

İŞ DENEYİMLERİ:

- Federal Aydınlatma, Üretim Sorumlusu, (2005-2010)
- Siemens A.Ş. Kalite Kontrol Teknikeri (2010-2011)
- İSKİ, Atık Su Arıtma Tesisleri, Elektrik-Elektronik Bakım Onarım Mühendisi (2013- devam ediyor)

YAYINLAR:

- Durmaz, Ş., Keskin, M., Kuyumcu Erfan, F., (2025). “Yapay sinir ağları yöntemi kullanılarak atık su arıtma tesisinin modellenmesi”.7. Bilsel Uluslararası Sümela Bilimsel Araştırmalar Kongresi, ISBN: 978-625-97089-7-3, p.p: 116-126