



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi :01.02.2024  
Kabul Tarihi : 11.09.2024

Received Date : 01.02.2024  
Accepted Date : 11.09.2024

### HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE TÜRBİN-GENERATÖR ÜNİTESİNDE VERİM İZLEME SİSTEMİNİN KURULMASI-SAHA ÇALIŞMASI

#### ESTABLISHMENT OF EFFICIENCY MONITORING SYSTEM IN TURBINE- GENERATOR UNIT IN HYDROELECTRIC POWER PLANTS-CASE STUDY

Gökhan ÖZBEK<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-1160-1955)  
Sabir RÜSTEMLİ<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-4957-1782)

<sup>1\*</sup>EÜAŞ Alpaslan-1 Hidroelektrik Santrali, Elektrik Bakım Başmühendisliği, Muş, Türkiye  
<sup>2</sup>Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bitlis, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gökhan ÖZBEK, gokhanozbek1986@gmail.com

#### ÖZET

Hidroelektrik santrallerinde verim kaybının en fazla gerçekleştiği yer, türbinlerdir. Bu kayıpların sebepleri ve oranları santrallere ve hatta türbin-generatör ünitelerinin karakteristiklerine bağlı olarak değişmektedir. Türbinlerdeki verim kaybının tespit edilebilmesi, kestirimci bakımların veya optimizasyon çalışmalarının zamanında, doğru bir şekilde yapılabilmesi türbinin mevcut durumunun bilinmesine bağlıdır. Bu çalışmada, türbin veriminin anlık hesaplanması için Alpaslan-1 Hidroelektrik Santraline ait bir türbin-generatör ünitesinde gerçek zamanlı akış ve verim izleme sistemi kuruldu. Boya seyreltme metodu ile debi ölçümü ve türbin performans testlerinden olan mutlak testler yapıldı. Ölçülen debi değeri ile Winter-Kennedy akış sabiti bulundu ve böylece bir diğer performans testlerinden olan endeks testleri, Winter-Kennedy metodu kullanılarak yapıldı. Ayrıca testlerde santral, ünite, generatör verimleri de hesaplandı. Verim izleme sistemi kullanılarak yapılan testlerde türbin veriminde %3,5 oranında bir düşüşün olduğu görüldü. Winter-Kennedy metodu kullanılarak anlık debi hesabı ve anlık verim hesabı yapılacak şekilde nihai olarak ayarlanan sistem, çalışır vaziyette bırakıldı.

**Anahtar Kelimeler:** Verim izleme sistemi, hidrolik türbinler, debi ölçümü, Winter-Kennedy metodu, endeks testleri

#### ABSTRACT

In hydroelectric power plants, the place where the most efficiency loss occurs is the turbine. The reasons and rates of these losses vary depending on the characteristics of the power plants and even the turbine-generator units. Determining the efficiency loss in turbines, performing predictive maintenance or optimization studies in a timely and accurate manner depends on knowing the current status of the turbine. In this study, a real-time flow and efficiency monitoring system was installed in a turbine-generator unit belonging to Alpaslan-1 Hydroelectric Power Plant for instantaneous calculation of turbine efficiency. Flow measurement and absolute tests, which are turbine performance tests, were performed with the dye dilution method. The Winter-Kennedy flow constant was found with the measured flow value and thus, index tests, which are another performance test, were performed using the Winter-Kennedy method. In addition, power plant, unit and generator efficiencies were also calculated in the tests. In the tests performed using the efficiency monitoring system, it was observed that there was a 3.5% decrease in turbine efficiency. The system, which was finally set to calculate instantaneous flow and instantaneous efficiency using the Winter-Kennedy method, was left in operation.

**Keywords:** Efficiency monitoring system, hydraulic turbines, flow measurement, Winter-Kennedy method, index tests

ToCite: ÖZBEK, G., & RÜSTEMLİ, S., (2024). HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE TÜRBİN-GENERATÖR ÜNİTESİNDE VERİM İZLEME SİSTEMİNİN KURULMASI-SAHA ÇALIŞMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1128-1144.

## GİRİŞ

Enerji, sürdürülebilir büyümenin ekonomik ve toplumsal boyutlarıyla yakından ilişkili olup, aynı zamanda iç ve dış politikaların şekillenmesinde son derece önemli bir parametredir (Demir Onay&Aydın, 2021). Modern dünyada enerji; devletlerin, toplumların varoluşlarını devam ettirebilmesi için sahip olması gereken zorunlu unsurdur (Pekmezci, 2020). Son yüzyılda dünyada meydana gelen hızlı değişim, toplumlar için enerjinin her çeşidini vazgeçilmez kılmuş; enerjiyi hayat kalitesi, refah düzeyi, teknolojik ve sosyal gelişim açısından çok önemli bir faktöre dönüştürmüştür (Mumlu, 2008). Farklı türlerde ortaya çıkan enerji, doğrudan kullanılabilirdiği gibi uygun yöntemler ile dönüştürülerek de kullanılabilir (Koç&Şenel, 2013). Yapılan işe, kullanıldığı alana göre tariflerin yapılması, enerjinin tek veya kapsamlı bir tanımını yapmayı zorlaştırmaktadır (Çengel&Boles, 1996). Ancak genel olarak enerji, bir sistemin harici faaliyet üretmesi (Uzun&Değirmenci, 2018), işin ortaya çıkmasına götüren tek yol, maddede bulunan ve uygun parametre ve şartlarda açığa çıkıp dönüşebilen kaynak, tabiiatta bulunan maddelerden bazılarında bulunan özel kuvvetlerin bir şekilde açığa çıkartılarak işe dönüştürülmesi vb. (Hepbaşlı, 2001; Özbakır, 2006; Kırılı&Kulu, 2016) şeklinde ifade edilir.

Ülkelerin uyguladığı sürekli ekonomik büyüme modeline bağlı olarak sanayi ve endüstri alanındaki gelişmeler, nüfus artışı, kentleşme oranındaki yükseliş gibi faktörler küresel enerji talebini artırmaktadır (Dyrstad vd., 2019). Dünya Enerji Ajansına göre, 2021’de küresel enerji talebi %5,4 artmış, karbondioksit salınımları %5,3 ve elektrik üretim sektörü yatırımları %7 artış göstermiştir (IEA, 2022b; IEA, 2022a). Bunun yanında talep tarafında ham petrol %6,4, kömür %5,1, doğalgaz %5,0 ve elektrik %6,1 civarında artmıştır (IEA, 2022b). Dünya nüfusu, 1974 yılında yaklaşık 4 milyar iken, 2021 yılı itibari ile yaklaşık %100 artışla 7,9 milyara ulaşmıştır. Nüfusun 2040’da ise 9,2 milyara, 2050’de de 9,7 milyara yükselmesi beklenmektedir (UN DESA, 2022). Dünya nüfusunun kentleşme oranının ise 2050’de %68’e yükseleceği hesaplanmaktadır (UN DESA, 2018; EÜAŞ, 2023a).

Dünyada enerji kaynağı olarak kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtlar uzun zamandır kullanılmaktadır (Tekel, 2006). Ancak yapılan araştırmaların sonuçları, fosil yakıtların kullanılmasının dünyayı çevresel bir yıkıma doğru sürüklediği yönündedir (Kocaman, 2015). Ayrıca enerji arzının büyük bir kısmını karşılayan konvansiyonel kaynakların rezervlerinin, yeni keşifler olmaması halinde yakın zamanda tükeneceği, dolayısı ile enerji arzında açık oluşmaması için alternatif kaynak bulma arayışlarının desteklenmesi gerektiği ifade edilmektedir (BP, 2023). Diğer taraftan enerji kesintileri, tedarikteki zorluklar, enerji arz güvenliğindeki endişeler, enerjinin oluşturduğu maliyetler ve dışa bağımlılık giderilmesi gereken başlıca sorunlar olarak ele alınmaktadır (Hardcastle&Waterman-Honey, 2009; Heffner vd., 2010). Bu bağlamda, ihtiyaç duyulan enerjinin ucuz, güvenli ve hızlı olarak sağlanması; kaynakların enerji arz güvenliği içinde çeşitlendirilmesi zaruret arz etmektedir. Aynı zamanda, çevreye duyarlı temiz enerji kullanımının da artırılmasına yönelik planlamaların yapılması gerekmektedir (Flavin&Lenssen, 1994).

Bir politika hedefi olarak enerji verimliliği, bir taraftan ticari ve endüstriyel rekabet gücünü, enerji güvenliğini ifade ederken, aynı zamanda CO2 emisyonunun azaltılıp çevresel kirliliğin en aza indirilmesini de ifade etmektedir (Patterson, 1996). Bu iki hedef, enerji verimliliği politikalarının temel motivasyonu olarak kabul edilmektedir (Bolla vd., 2011). Enerji verimliliği, bir sistemin çıkışından elde edilen enerjinin, sistemdeki sürecin başlanması için kullanılan enerji ile oranlamasını ifade etmektedir. Enerjinin etkin kullanımı olan enerji verimliliği, enerji tasarrufunu artırıcı yöntemleri, kayıp ve kaçakları azaltıcı önlemleri, işletme maliyetlerini düşüren tasarım çalışmalarını ve yatırım maliyetlerinin en kısa sürede karşılanması gibi konuları içermektedir (Meral vd., 2009). Genel bir ifade ile enerji verimliliği, daha az enerji harcayarak aynı işin yapılmasını veya aynı oranda enerji kullanarak daha çok işin yapılmasını amaçlamaktadır.

Araştırmalar, enerji israfının ve enerjinin verimsiz kullanımının enerji krizlerinin meydana gelmesine neden olan başlıca faktörlerden olduğunu göstermektedir (Cui vd., 2014). Enerji israfını engellemek ve var olan kaynak potansiyelini optimum seviyede kullanmak, enerji kaynağı noktasında büyük bir açığı kapatacaktır. Sürdürülebilir kalkınmanın tesisi için enerji kaynaklarına ihtiyaç olduğu kadar, bu kaynakların etkin ve verimli kullanımı da büyük önem arz etmektedir (Aydın&Esen, 2018). Yeni enerji kaynaklarının arzda yerini alması gerçekleşene kadar verimliliği artırıcı önlemler alınması, bu yönde yatırımlar yapılması akılcı çözümler üretecektir (Akhtar vd., 2020). Verimlilik yatırımları en az maliyetli ve en kolay uygulanabilir yaklaşımlar olarak planlanmaktadır. Bu da ekonomik olarak enerjide maliyet girdilerinin azaltılmasını, ilave fosil yakıt tesislerine olan ihtiyacın azalmasını ve karbon salınımlarında düşüşün yaşanmasını sağlayacaktır (Wei vd., 2010; Marques&Pitarra, 2017).

Ülkelerin gelişimi için temel gereksinimlerinden biri elektrik enerjisidir (Pamir, 2003). Birçok alanda meydana gelen gelişmeler, elektrik enerjisine olan ihtiyacı artırmaktadır. Dünya nüfusunun yaklaşık %10'nun hala elektrik kullanmadığı göz önüne alındığında bu ihtiyacın her geçen gün daha da artacağı öngörülmektedir (EÜAŞ, 2023a). Diğer taraftan hassas cihazların kullanımının artması, elektriğin iletiminde ve dağıtımında yüksek oranlarda oluşan teknik kayıplar vs. elektrik enerjisinin kesintisiz, güç kalitesi problemlerinden arındırılmış, kayıp oranının minimize edilmiş olmasını zorunlu kılmaktadır (Düzgün, 2023). Elektrik talebinin verimli bir şekilde karşılanması için ülkelerde kaynak çeşitliliğine sahip yeni elektrik üretim santrallerinin kurulması; ekonomik koşullara, coğrafi ve jeopolitik konuma, enerji sektörünün mevcut yapısına uygun enerji politikalarının hayata geçirilmesi öncelikli konular arasında olmalıdır (Meral vd., 2009).

Dünyadaki en büyük elektrik enerjisi kaynaklarından biri, hidroelektrik santralleridir. Yenilenebilir enerji kaynakları statüsünde bulunan hidroelektrik santraller (HES), ülkemizde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Uluslararası Hidroelektrik Derneği'nin verilerine göre Türkiye, hidroelektrik santralleri kurulu gücü bakımından dünyada 9., Avrupa'da ise 2. sırada bulunmaktadır (İHA, 2022). 2022 yılı verilerine göre Türkiye'nin kurulu gücü 104.055 MW iken bunun %30,4'ü, yani 31.586 MW'lık kısmı HES'lere aittir. Diğer taraftan yıllık 325.887.572 MWh'lık elektrik üretiminin %20,48'i, yani 66.752.993 MWh'lık kısmı bu santrallerden karşılanmaktadır. Ancak ülkemizde elektrik üretimindeki en büyük pay %58,05 ile hala fosil yakıtlarıdır (EÜAŞ, 2023b). Bu nedenle, enerji üretimi için alternatif kaynaklar bulmanın yanı sıra, mevcuttaki santrallerde enerji verimliliğinin, en büyük enerji kaynağı kabul edilerek yapılacak verimlilik çalışmalarının ülkemizin kalkınmasına ve güçlenmesine büyük katkıları olacaktır. Bu bağlamda, endüstriyel verimlilik izleme ve enerji yönetim sistemi, enerji israfının azaltılmasına yardımcı olabileceği gibi ekonomik, sosyal ve çevresel iyileştirmelere de öncülük edecektir (Martirano vd., 2019).

Bir elektrik üretim tesisinde enerji verimlilik stratejilerinin uygulanabilmesi güç üretimi ve performans kayıp verilerinin düzenli olarak alınmasına bağlıdır. Verimlilik izleme ve veri kayıt sisteminin kurulması günlük, aylık ve yıllık bazda verimlilik değerlendirme raporları sağlayarak, ünite performans iyileştirme politikalarının planlanmasına, kestirimci bakım çalışmalarının yapılmasına yardımcı olacaktır. Endüstriyel ve sanayi tesislerinde enerji yönetiminde verimliliğin izlenebilir bir olguya dönüştürülmesi ile performans takipleri sürdürülebilir enerji politikalarına yön verecektir.

Bu çalışmada, Alpaslan-1 HES'te boya seyreltme (dye delition) ve Winter-Kennedy (W-K) debi ölçüm metotları uygulanarak yapılması planlanan türbin performans testlerinde kullanılmak üzere Efficiency Monitoring System (EMS), yani Verim İzleme Sistemi (VİS) kurulumu yapıldı. Mutlak ve endeks testleri yapıldıktan sonra VİS'te herhangi bir değişiklik yapılmadı ve sistem aralıksız çalışacak şekilde bırakıldı. Böylece ilgili ünite bazlı verim izlemenin aralıksız yapılmasına imkân sağlandı. Sistem kurulurken verilerin toplanması için santraldeki mevcut ölçüm aletlerinin bir kısmından faydalandı, herhangi bir ölçü aleti olmayan lokasyonlarda ve gerek duyulan yerlerde ise harici olarak yerleştirilen enerji analizörleri, basınç sensörleri/transmitter üzerinden veriler toplandı. Sistemin kurulumunda gerekli olan sabit değerlerin hesaplamaları yapılarak sisteme yüklendi. Değişken değerlerin hesaplamalarının yapılabilmesi için toplanan veriler ise modüller üzerinden PLC sunucusuna aktarıldı. Böylece gerçek zamanlı verimliliğin hesaplanması ve verilerin kayıt altında tutulması sağlandı. Çalışmada uygun maliyetli, yenilikçi ve gerçek zamanlı bir sistem tasarımı hedeflendi. Sistem, kendiliğinden verileri toplayabilecek ve verilere uzaktan erişime imkân sağlayabilecek şekilde tasarlandı. Sistemden çekilen verilerle ünitenin performansı takip edilebilecek, performanstaki değişimler ve yaşanan verimlilik kayıpları anlık olarak görülebilecektir. Bu da işletmeye yapacağı çalışmalar için yol gösterici olacaktır.

Çalışmanın birinci bölümünde, Veri İzleme Sistemi kurulumu anlatılmıştır. Kurulum için verilerin alındığı lokasyonlar, gerekli olan ölçü aletlerinin ve diğer ekipmanların yapıları, bu ekipmanların yerleşim şekilleri, çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Ayrıca yapılan hesaplamalar ve bu hesaplamalarda kullanılan formüller verilmiştir. İkinci bölümde sistemin çalışması için gerekli olan sabit ve değişken değerlerin, toplanan veriler üzerinden yapılan hesaplamalarına yer verilmiştir. Ayrıca VİS kullanılarak yapılan ve başka çalışmalarımızda ayrı ayrı konu olan mutlak ve endeks testlerinin özet sonuçları birlikte verilerek çalışma bağlamında değerlendirmelerde bulunulmuştur. Yapılan literatür taramalarında, enerji üretim santrallerinde ekipman performansının takibi için VİS'in kurulması ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Enerji verimliliği modelleme sistemleri, enerji

tüketiminde tasarruf, personel verimliliği, ekonomik anlamda üretim verimliliği gibi sanayi ve endüstriyel kuruluşların farklı alanlar için yapılan izleme sistemlerine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalara atıf yapılarak, kaynakçada yer verilmiştir. Bu bağlamda çalışmamız bundan sonraki çalışmalar için kaynak oluşturabilecek bir niteliğe sahiptir.

## MATERYAL ve YÖNTEM

Verim İzleme Sistemi (VİS) yani Efficiency Monitoring System (EMS), 2019 yılında nisan ayı içerisinde Alpaslan-1 Hidroelektrik Santrali (HES)'te kurulmuştur. Santral, Muş'ta Murat nehri üzerinde kurulmuş olup Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Elektrik Üretim A.Ş. bünyesinde 2012 yılından beridir faaliyetlerini yürütmektedir. Santralde bulunan generatörler 45 MVA gücünde %98,3 verimli olarak imal edilmiştir. Yarı batık, baraj tipi su depolamalı olan santral, orta düşüklüdüdür. Santral, nominal brüt düşüsü 82,5 m, nominal net düşüsü 80,6 m olacak şekilde tasarlanmıştır. Santraldeki bütün ünitelerde 41,75 MW gücünde, 55,4 m<sup>3</sup>/s nominal debide, %95,4 verim ile imal edilmiş olan dikey Francis tipi türbin bulunmaktadır.

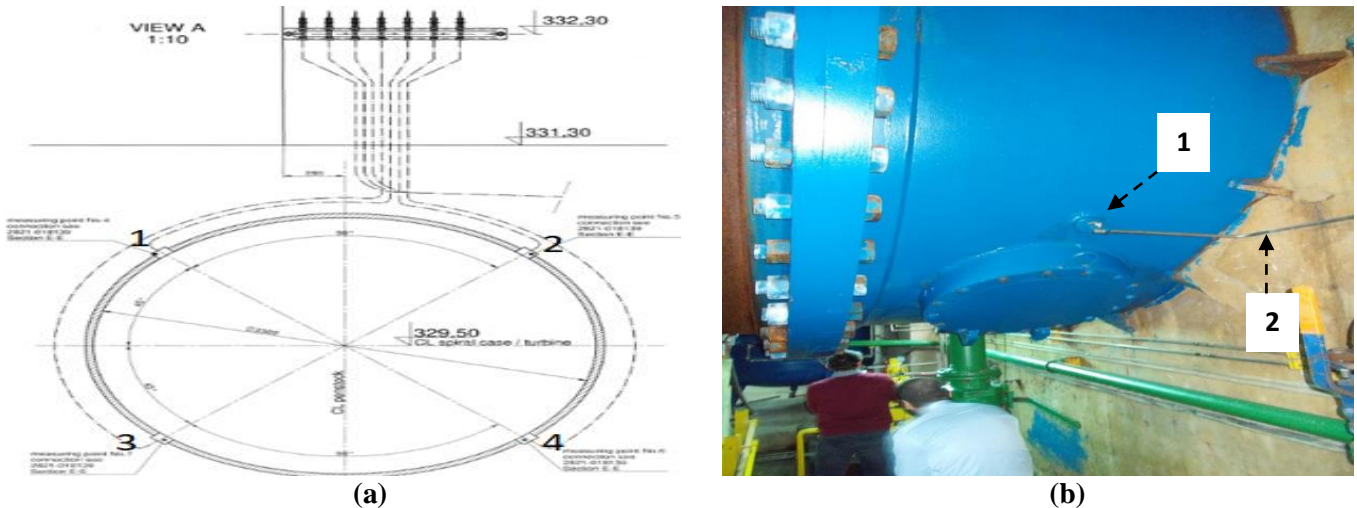
Verim izleme sistemi kullanılarak Nisan 2019 tarihi içerisinde hidrolik türbin performans testleri gerçekleştirildi. Performans testlerinde mutlak test olarak boya seyreltme metodu, endeks test olarak Winter-Kennedy metodu kullanıldı. Verim izleme sisteminin kurulumu ve türbin performans testleri Elektrik Üretim A.Ş.'in (EÜAŞ) koordinasyonunda ve yürütücülüğünde, yabancı ülke menşeli HATCH Ltd. şirketi ile Türkiye menşeli SU-ENER Mühendislik ve Enerji Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti. firmalarının çalışma bazlı katkıları ile gerçekleştirilmiştir (ETKB vd., 2020a).

### Kurulumda Kullanılan Araçların Fonksiyonları

#### Giriş Basınç Sensörü

Santrallerde kurulum aşamasında salyangoz girişlerine, aralarında 90 derecelik açı olacak şekilde 4 adet basınç tapası yerleştirilmektedir. Bu tapalar net düşü hesabında gerekli olan giriş basınç değerinin bulunması için kullanılırken, doğrudan debi ölçüm metodu olan boya seyreltme metodunda örnek numunenin alınmasında da kullanılabilir.

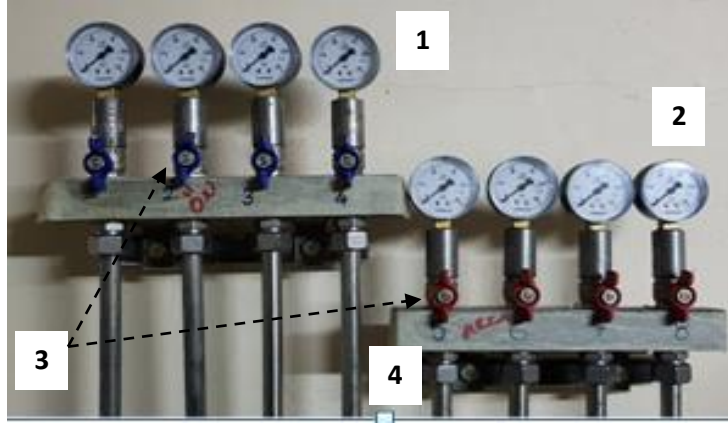
Tapaların olmadığı santrallerde, sonradan yapılacak çalışmalar ile bu tapalar yerleştirilmektedir. Örnek bir salyangoz giriş dikey kesit planı üzerinden basınç tapalarının yerleşim yerlerinin 1-2-3-4 numaraları ile gösterimi, basınç tapasının ve tapaya bağlı piyezometre borusunun görünümü Şekil 1'de verilmiştir (ETKB vd., 2020b).



Şekil 1. a. Salyangoz Giriş Basınç Tapalarının Yerleşim Planı (1-2-3-4) b. (1)Tapa, (2)Piyezometre Borusu

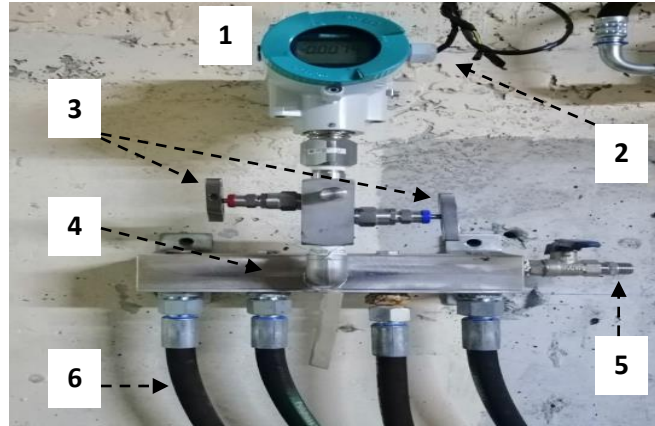
Basınç tapaları salyangoz girişine, dışarıdan piyezometre borularına bağlı olacak şekilde yerleştirilmektedir. Her bir tapadan çıkan piyezometre borusu memba tarafında ve ilgili ünitenin türbin çukurunun dışında yer alacak şekilde yerleştirilen kapama vanalarına gitmektedir. Normalde bu vanaların uçlarında manometreler bulunmaktadır.

Bu manometreler aracılığı ile salyangoz girişindeki suyun basınç değerleri her bir nokta için ayrı ayrı görülmektedir. Manometrelerin, piyezometre borularının, kapama vanalarının çalışmadan önceki görünümünü gösterir örnek, Şekil 2’de verilmiştir.



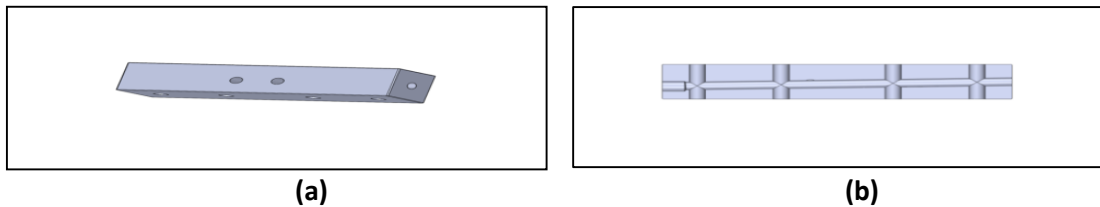
Şekil 2. (1)Giriş Basınç Manometreleri, (2)Fark Basınç Manometreleri, (3)Kapatma Vanaları, (4)Piyezometre Boruları

Sistemin kurulumunun yapılabilmesi için piyezometre borularının sonlandırıldığı kapama vanalarına bağlı olan bütün manometreler söküldü ve yerlerine giriş basınç sensörüne/transmitter ait kollektör yerleştirildi. Şekil 3’te yeni sistemde kullanılan görüntülü giriş basınç sensörü, bu sensöre ait kollektör gösterilmiştir.



Şekil 3. (1)Giriş Basınç Sensörü, (2) Veri Kablosu Bağlantı Yeri, (3)Açma-Kapama Vanaları, (4)Giriş Basınç Kollektörü, (5)Drenaj Vanası, (6)Bağlantı Hortumu

Kollektörler, farklı noktalardan alınan basınç değerlerini bir araya getirerek tek bir ölçüm cihazında toplamaya yarayan araçlardır. Giriş basınç ölçümünde kullanılan kollektörün dış ve iç yapısını gösteren teknik çizim Şekil 4’te sunulmuştur (Gezer, 2021).



Şekil 4. Giriş Basınç Sensörü Kollektörünün; (a)Dış Yapısı, (b)İç Yapısı

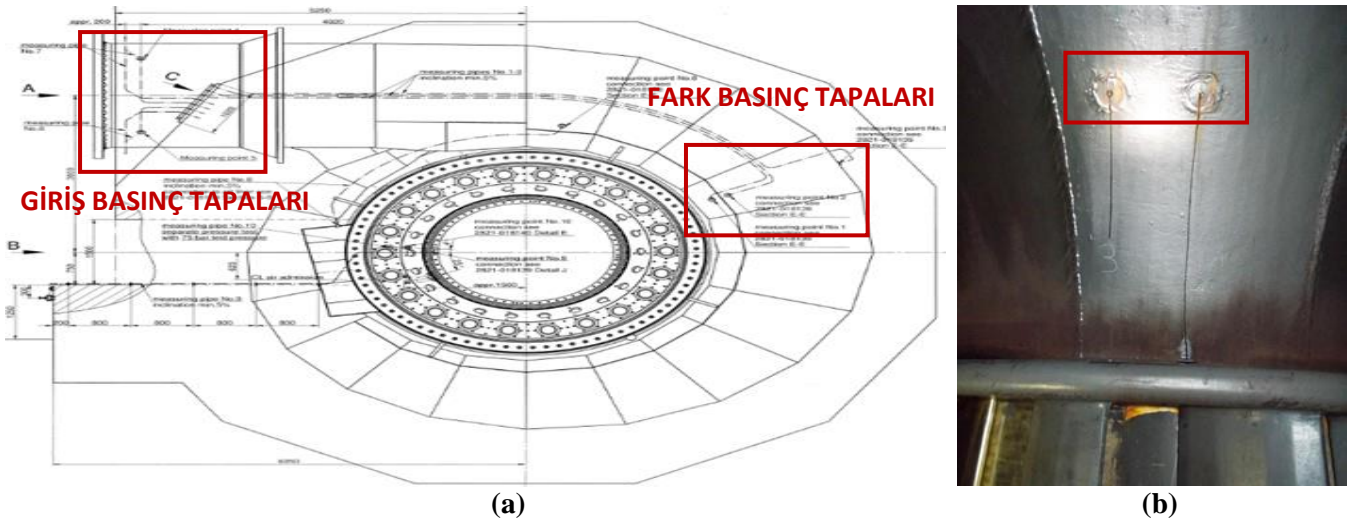
Salyangoz giriş basınç ölçümünde kullanılan kollektörün dış ve iç yapısı tek parça halindedir ve iç yapıda herhangi bir ayrı bölme bulunmamaktadır. İç yapı, drenajı kolaylaştırmak amacı ile eğimli imal edilmektedir. Kollektörün

üst kısmında 2 tane çıkış ucu bulunmaktadır. İhtiyaç olmaması halinde uçlardan bir tanesi köreltilmekte, diğer uç ise basınç sensörü bağlantısında kullanılmaktadır. Kolektörün alt kısmında basınç tapası sayısına uygun olacak şekilde 4 adet giriş bulunmaktadır. Kolektörde 4 adetten fazla giriş bulunması halinde, fazla girişler köreltilmektedir. Salyangoz girişinde yedek basınç tapaları mevcut ise bunlar kolektörün köreltilmiş uçlarına bağlanmakta ve ihtiyaç duyulması halinde kullanılmaktadır. Kolektörün yanlarında birer tane giriş ucu bulunmaktadır. Bu uçlardan biri ihtiyaç duyulmaması halinde köreltilirken, diğer uç kolektörün içini temizlemek amacıyla selenoid drenaj valfi veya drenaj vanası atılması için açık bırakılmaktadır. Kolektörün üstünde bulunan açma-kapama vanaları, basınç sensörünün güvenli bir şekilde takılıp çıkarılması ve herhangi bir arıza durumunda sensöre müdahale edilebilmesi için kullanılmaktadır.

Çalışmada, piyezometre kapama vanalarının çıkışlarından kolektörün alt kısmında bulunan 4 girişine hortumlar aracılığı ile bağlantı yapıldı. Kolektörün üst kısmındaki çıkışlarından biri köreltilmiş olduğundan diğer ucuna görüntülü basınç sensörü yerleştirildi. Böylece dört farklı noktadan kolektöre gelen su deşarj basınçları, giriş basınç değeri olarak 'bar' seviyesinde ölçüldü. Kolektörün yanlarındaki uçlarından biri köreltilmiş olduğundan sağdaki uca manuel açılıp kapanan bir drenaj vanası atıldı. Giriş basınç sensöründen elde edilen veriler VİS panosuna analog giriş modüller aracılığı ile toplandı. Şekil 3'te piyezometre kapama vanaları ile kolektör arasındaki bağlantıyı sağlayan hortumlar, sensör ile analog modül arasında veri akışı sağlayan kablonun bağlantı yeri, drenaj vanası, kolektörün üstünde bulunan açma kapama vanaları gösterilmiştir.

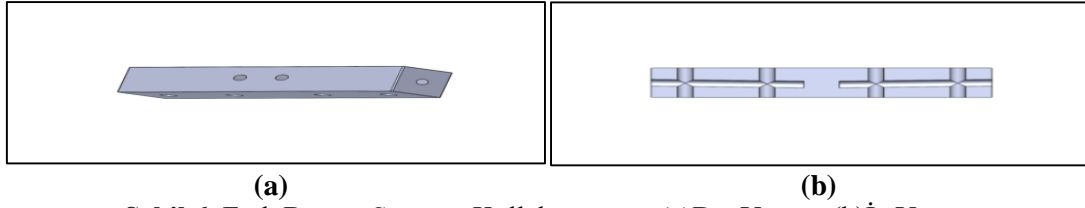
### Fark Basınç Sensörü

Akışkanlarda hız ile basınç arasında ters orantı vardır. Salyangoz içerisinde suyun hızının yüksek olduğu yerlerde basınç daha düşük, suyun hızının düşük olduğu yerlerde basınç daha yüksektir. Suyun hızının farklı olmasından dolayı salyangoz içerisinde oluşan basınç farkı kullanılarak, ünitelerin elektrik üretiminde sarf ettiği suyun debisi hesaplanabilmektedir. Bu nedenle santrallerde kurulum aşamasında salyangozun içerisinde farklı noktalara basınç tapaları yerleştirilmektedir. Atılacak olan tapaların sayısı santralin durumuna, salyangozun çapına, ölçümün hassasiyetine vs. etkenlere bağlı olarak değişmektedir (Özbek, 2022). Tapalar mevcut değil ise, sonradan yapılacak çalışmalarla salyangoza yerleştirilebilirler. Aynı şekilde, gerek duyulması halinde mevcut tapaların sayısı da artırılabilir. Şekil 5.a'da örnek bir salyangoz yatay kesit planı üzerinden giriş basınç ve fark basınç tapalarının yerleşim yerleri, Şekil 5.b'de ise fark basınç tapalarının görünümü verilmiştir.



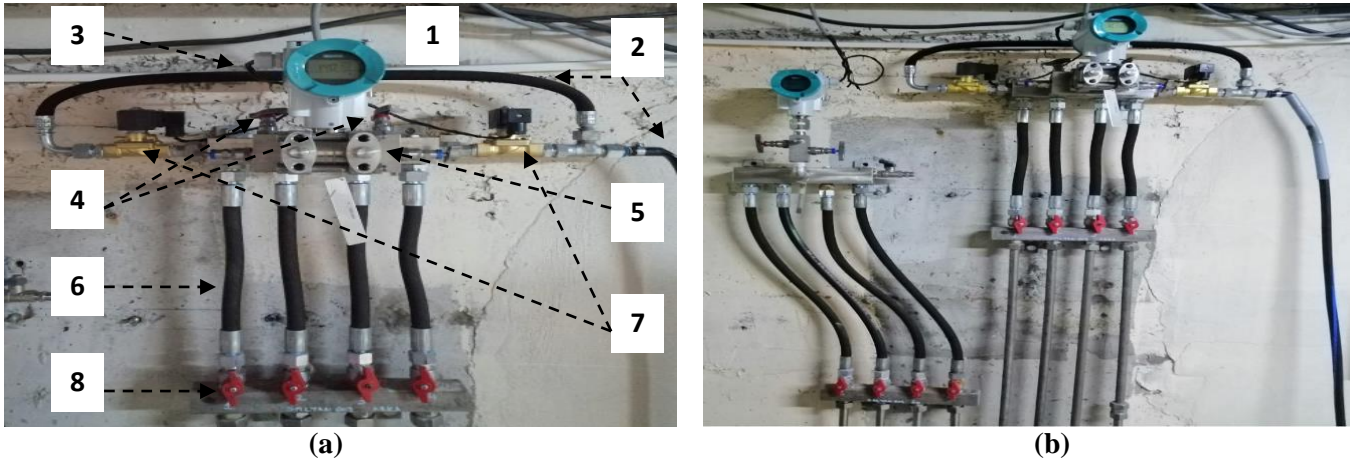
Şekil 5. a. Giriş Basınç ve Fark Basınç Tapalarının Yerleşim Yeri b. Fark Basınç Tapaları

Fark basınç sensörüne ait kolektörün altında, kapama vanalarından gelen hortumların bağlandığı girişler, üstünde ise 2 tane çıkış bulunmaktadır. Bu çıkışlara doğrudan fark basınç sensörü bağlanmaktadır. Kolektörün dış yapısı tek parça olarak imal edilmiştir. Ancak iç yapısı orta kısmı doldurularak iki eşit parçaya ayrılmıştır. Böylece kolektörde birbirinden bağımsız, ayrı giriş ve çıkışları olan iki bölme olmaktadır (Gezer, 2021). Şekil 6'da fark basınç sensörleri için kullanılan kolektörün teknik çizimi verilmiştir.



Şekil 6. Fark Basınç Sensörü Kollektörünün; (a)Dış Yapısı, (b)İç Yapısı

Alpaslan-1 HES'e ait salyangozlarda 2 tanesi alçak basınç bölgesinde, 2 tanesi yüksek basınç bölgesinde olmak üzere toplamda 4 tane fark basınç tapası bulunmaktadır. Şekil 2'de gösterildiği üzere, bu tapalara bağlı olan piyezometre boruları ilgili ünitenin türbin çukurunun dışına kadar çekilmiş, kapama vanaları ile sonlandırılmıştır. Çalışma kapsamında bu manometreler söküldü ve yerlerine fark basınç sensörünün bağlanacağı kollektör yerleştirildi. Kullanılan kollektörün 4 girişi ve 2 çıkışı bulunmaktadır. Kollektörün sağ tarafındaki bölmede bulunan 2 girişine, yüksek basıncın tapaları; sol tarafındaki bölmede bulunan 2 girişine ise alçak basınç tapaları bağlandı. Bağımsız bölmelerin drenajının sağlanması için kollektörün yanlarına selenoid drenaj valfleri yerleştirildi. Kurulumda kullanılan görüntülü fark basınç sensörü ve kollektörü, bağlantı hortumları, selenoid drenaj valfleri, veri kablosu bağlantı yeri, açma kapama vanaları, piyezometre borusu kapama vanaları Şekil 7.a'da gösterilmiştir.



Şekil 7.a. (1)Fark Basınç Sensörü, (2)Kollektör Drenaj Hortumu, (3)Veri Kablosu Bağlantı Yeri, (4)Sensör Açma-Kapama Vanaları, (5)Kollektör, (6)Bağlantı Horumu, (7)Selenoid Valf, (8)Kapama Vanaları b. Giriş ve Fark Basınç Sensörlerinin Nihai Yerleşim Şekli

Kollektörün üst kısmında sağ bölmeye ait olan çıkış, yüksek basınç değerlerini; sol bölmeye ait olan çıkış ise alçak basınç değerlerini sensöre taşımaktadır. Böylece basınç tapaları ile farklı bölgelerden alınan değerler sensörde tek değer olarak, 'mbar' seviyesinde ölçüldü. Bu değer fark basıncı olarak kabul edilerek, debi hesaplamalarında kullanılmak üzere VİS'e iletildi. Şekil 7.b.'de, yapılan çalışmanın nihayetinde giriş ve fark basınç sensörlerinin ünite-3 türbin çukurunun dışındaki yerleşim şekli gösterilmiştir. Salyangoz içerisine yerleştirilen tapalara, *Winter-Kennedy diferansiyel basınç tapaları veya Winter-Kennedy muslukları*; fark basınç sensörüne ise *Winter-Kennedy diferansiyel basınç transmitter* da denilmektedir (Özbek, 2022). Winter-Kennedy metodu, debi hesaplamalarında büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Bağlı bir yöntem olan W-K metodu ile debi hesaplamasının yapılabilmesi için öncelikle W-K akış sabitinin bulunması gerekmektedir. Bunun için doğrudan debi ölçüm metodlarından birisi kullanılarak ünitenin debisi ölçülür. Daha sonra ölçülen debi ile fark basınç sensöründen gelen değer denklem (1) de kullanılarak akış sabiti bulunur ve VİS'e yüklenir. VİS ise Winter-Kennedy akış sabiti değerini ve fark basınç sensöründen gelen değeri yine denklem (1) üzerinden kullanır ve anlık bazda türbinin debisini hesaplar. Alpaslan-1 HES'te boya seyretlme metodu ile ünitenin debisi ölçülmüş, bu değer kullanılarakta W-K akış sabiti bulunmuştur. Winter-Kennedy metoduna ait denklem aşağıda verildiği gibidir;

$$Q = (K_1)\Delta P^{K_2} \quad (1)$$

Burada;  $K_1$ : Akış Sabiti,  $Q$ : Debi ( $m^3/s$ ),  $\Delta P$ : Fark Basıncı (mbar)

Hesaplanan  $K_1$ , W-K akış sabiti, sadece ölçüm yapılan üniteye ait bir değerdir ve değişmemektedir.  $\Delta P$ , fark basınç sensörünün okuduğu değerdir.  $K_2$  üs değeri ise IEC-41 standartlarına göre genel olarak 0,5 alınır. Uygulamada 0,48-0,52 arası kullanımı mevcuttur (Gezer, 2021; Westermann, 2021).

### **Selenoid Drenaj Valfi**

Verim izlem sistemi sürekli faal halde bulunduğundan dolayı, kolektörler içerisinde zamanla kir, çakıl, kum gibi malzemeler birikebilmekte, hava boşlukları oluşabilmektedir. Kolektörde biriken kirin dışarı atılması gerekmektedir. Sensörlerin ölçüm hassasiyetine göre valflerin kullanımı değişmektedir. Giriş basınç sensörleri 'bar' seviyesinde ölçüm yaptıkları için burada kullanılan kolektörlere selenoid valf takmak gerekmez. Nitekim, Şekil 3'te gösterildiği üzere, Alpaslan-1 HES'te giriş basınç kolektörün temizleme uçlarından biri köreltildi diğerine ise drenaj vanası bağlandı. Fark basınç sensörlerinde ise durum değişmektedir. Bu sensörler 'mbar' seviyesinde hassas ölçümler yapmaktadırlar. Kolektörün içinde biriken kir veya hava basınç ölçümünü ciddi oranda etkileyeceğinden dolayı periyodik aralıklarla drenajın sağlanması gerekmektedir. Şekil 7.a'da görüldüğü üzere, santralde kullanılan kolektörün her iki bölümündeki drenajın sağlanması için selenoid valf takıldı. Valflerin çalışma periyotları sistemin durumuna göre belirlendi ve her saat başı 10 sn çalışacak şekilde ayarlandı.

### **Daldırma Tipi Basınç Sensörü**

Türbin çarklarından çıkarak işlevini tamamlamış olan su, emme borusu aracılığı ile santralin dışına iletilmektedir. Santralin çıkışındaki bu suya, *mansap* denildiği gibi, *kuyruk suyu* da denilmektedir. Verimlilik hesaplamalarında brüt düşüyü ölçmek ve net düşüyü bulmak için kuyruk suyu seviyesinin ve türbin çıkış suyunun basıncının bilinmesi gerekmektedir. Kuyruk suyuna yerleştirilen basınç sensörleri/transmitter yardımı ile su seviyesi ve çıkış basıncı ölçülebilmektedir. Ölçümlerde daldırma tipi sensör veya ultrasonik tipi sensör kullanılmaktadır. Çalışmada, daha sağlıklı sonuçlar vermesi nedeni ile daldırma tipi basınç sensörü tercih edilmiştir. Santrallerde bu ölçümler için kuyruk suyunun dip kısmına kadar indirilmiş borular bulunmaktadır. Türbinler çalışmadığında, mansap havuzunda bulunan enerji kırıcı kuyuya borular vasıtası ile sensör yerleştirildi. Sensör yerleştirilirken, sensörün havuzun dibine ulaşmamasına dikkat edildi. Çünkü kuyruk suyunun dip kısmında bulunan çamur, çakıl, kil vs. gibi maddeler, sensörün tıkanarak çalışmamasına veya yanlış değerler vermesine neden olmaktadır. Seviye sensörünün daldırılacağı noktanın belirlenmesinde, santralde mevcut olan projelerden faydalanıldı. Sensörün bağlı olduğu kablunun üzerinde ise metrajlar bulunmaktadır. Bu metrajlara bakılarak, mansapta daldırılmış olan sensörün hangi mesafede olduğu belirlenebilmektedir. Seviye ve çıkış basınç ölçümü, üniteler çalışmaya başladığında yapılmaya başlandı. Kuyruk suyuna daldırılmış olan sensörler, 0-1 bar aralığında basınç ölçümü yapabilmektedirler. Dalgıç tipi sensör, sensörün daldırıldığı yer ve daldırma şekli Şekil 8'de gösterilmiştir (ETKB vd., 2020b).



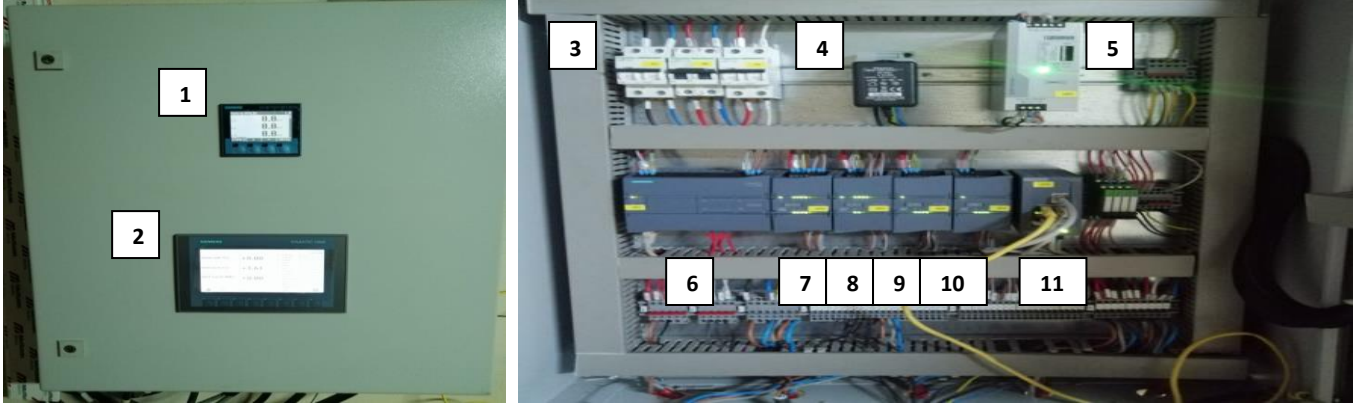
**Şekil 8. a. Dalgıç Tipi Sensör b. Sensörün Daldırılma Şekli c. Sensörün Daldırıldığı Yer**

### **Pano**

VİS kapsamında kurulumu yapılan pano bütün verilerin toplandığı, hesaplamaların yapıldığı, verimin izlendiği ve uzaktan erişimin sağlandığı yerdir. Veri toplama sistemi, VİS için gerekli sinyalleri gerçek zamanlı olarak toplamak için kullanılır. Veri toplama sistemi analog giriş modülleri olan bir PLC, bir enerji analizörü ve analog çıkış modüllerinden oluşur. Sinyallerin çoğu fiziksel bağlantılı analog giriş modüllerinden elde edilir. Sadece güçle ilgili



sinyaller ethernet tabanlı protokoller üzerinden enerji analizöründen aktarılır. PLC sunucusu, enerji analizörü ve dokunmatik ekranın hepsi bir ağ anahtarı aracılığıyla oluşturulmuş Ethernet'e dayalı bir ağa bağlandı. İzleme Sistemine uzaktan bağlantılar için bir Ethernet portu tahsis edildi. VİS'e ait dataların bilgisayar ortamına indirilmesi işlemleri PLC sunucusuna ait IP adresi üzerinden yapıldı. Panonun dış kapak ve iç kısmının görünümü ve panodaki teçhizatların tanımı Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. (1)Enerji Analizörü, (2)Dokunmatik Ekran Paneli, (3)Sigortalar, (4)Adaptör, (5)24 V DC Güç Kaynağı, (6)PLC-Sunucusu, (7- 8-9-10)Giriş ve Çıkış Modülleri, (11)Ethernet Switch

### **Dokunmatik Ekran Paneli**

Panoda bulunan dokunmatik ekran panelinde üniteye ait verim, debi, aktif güç değerleri, hesaplamaları yapılarak VİS'e yüklenmiş olan sabit değerler ile santral işletmesine bağlı olarak değişen değerlere ait bütün parametreler anlık olarak görülebilmektedir. Sistem için gerekli skala ayarları ve sistemin kontrolü bu panel üzerinden yapılmaktadır. Panele manuel olarak da değer girişi yapılabilmektedir.

### **Enerji Analizörü**

VİS'te okunması gereken en önemli parametrelerden biri generatör çıkış gücüdür. Çıkış gücünü doğru şekilde okuyabilmek için, generatör çıkış hücrelerinde mevcut olan akım ve gerilim transformatörlerden yararlanıldı. Bu ölçü trafolarında yapılan seri ve paralel bağlantılar üzerinden veriler, kalibre ayarları yapılarak VİS panosuna yerleştirilmiş olan enerji analizörüne iletildi. Analizörünün ölçtüğü değer ile santrale ait hız regülatörü paneli üzerinden okunan değer eşleştirilerek, herhangi bir sapma olmadığı belirlendi.

### **Manyetostriktif Transdüser**

Servo motorların pozisyon ölçümü için bir manyetostriktif transdüser kullanılır. Ayar kanadı pozisyonu, %1-100'lük bir gerçek aralık ile 0-10°luk bir sinyal aracılığıyla kontrol odasına iletir. Sistem, bu sinyali bir analog giriş modülü aracılığıyla alarak ayar kanadı pozisyonu bilgilerini toplamaktadır. Her bir testte VİS ve hız regülatörü panelinde gösterilen ayar kanadı pozisyonu kaydedildi.

Böylece, yukarıda bahsedilen araçlar kullanılarak verim izleme sistemi tarafından eş zamanlı olarak türbin giriş basıncı, Winter-Kennedy diferansiyel basıncı, ayar kanadı servomotor pozisyonu, generatör çıkış gücü, kuyruk suyu seviyesi ve çıkış basıncı okumaları gerçekleştirilmiştir. Buralardan elde edilen veriler ile debi, net düşü, generatör kayıpları, su yoğunluğu ve türbin verimliliği hesaplamaları yapılmaktadır.

### **KurulumdaYapılan Hesaplamalar**

#### **Net Düşü Hesabı**

Hidroelektrik santrallerinde net düşünün hesaplanmasında *Bernoulli denklemi* kullanılmaktadır. Kayıpların ihmal edildiği bu denklem ile ilk defa basınç, kinetik enerji ve potansiyel enerji arasında bir bağlantı kurulmuştur. Enerjinin korunum yasasına dayanan bu denklem, bir kanal içerisinde akan bir akışkanın sahip olduğu mekanik enerjinin, kanalın bütün noktalarında aynı olduğu mantığına dayanmaktadır. Akışkanın hızlanması ile suyun dinamik basıncı ve kinetik enerjisi artarken, potansiyel enerjisi ve statik basıncı azalır ancak kanal içerisindeki toplam enerji miktarı değişmez. Buna göre denklem şöyledir;

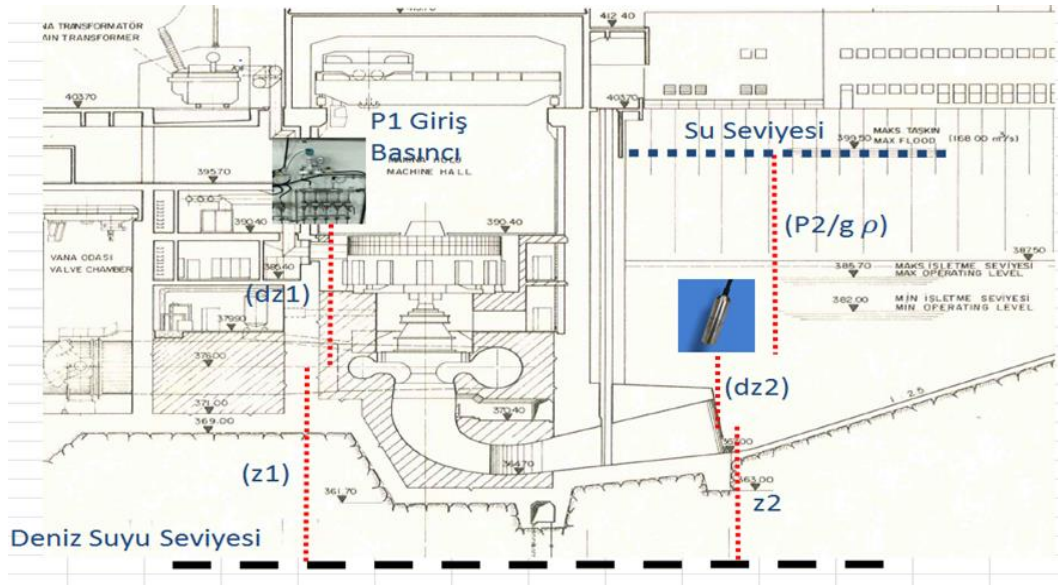
Girişteki Toplam Enerji = Çıkıştaki Toplam Enerji

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho gh_2 \quad (2)$$

Bu denklemde net düşüyü metre cinsinden bulabilmek için bütün parametreler  $\rho g$ 'ye bölünür ve böylece denklem aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \quad (3)$$

Hidroelektrik santrallerinde daldırma tipi basınç sensörünün kullanımı, kuyruk suyu seviyesi ve çıkış basıncının ölçülmesi, giriş suyu seviyesi ve basıncının ölçülmesi şematik olarak Şekil 10'da gösterilmiştir (Gezer, 2021).



Şekil 10. Net Düşü Hesabı

Buna göre, Bernoulli denklemi kullanılarak, santralin net düşüsü aşağıdaki denklemle hesaplanır;

$$H_{net} = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + z_1 - z_2 + dz_1 - dz_2 \quad (4)$$

$\gamma = \rho g$  olarak alınırsa, denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$H_{net} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + z_1 - z_2 + dz_1 - dz_2 \quad (5)$$

Burada;

$P_1$ : Salyangoz giriş basıncı (bar)

$P_2$ : Emme borusu çıkış basıncı (bar)

$g$ : Yer çekim kuvveti ( $m/s^2$ )

$\rho$ : Suyun yoğunluğu ( $kg/m^3$ )

$\gamma$ : Suyun özgül ağırlığı ( $N/m^3$ )

$z_1$ : Salyangoz giriş merkezinin deniz suyu seviyesi arasındaki mesafe (m)

$z_2$ : Emme borusu çıkışı merkezinin deniz seviyesi arasındaki mesafe (m)

$dz_1$ : Salyangoz giriş merkezinin basınç sensörü arasındaki mesafe (m)

$dz_2$ : Emme borusu çıkışı merkezinin daldırma tipi sensörü arasındaki mesafe (m)

$V_1$ : Suyun salyangozdaki giriş hızı olup,  $Q/A_1$  (m/s) formülü ile bulunur.

$V_2$ : Suyun emme borusundaki çıkış hızı olup,  $Q/A_2$  (m/s) formülü ile bulunur.

Q: Debi,  $A_1$ : Salyangoz giriş kesit alanı,  $A_2$ : Emme borusu çıkış kesit alanı

Hidrolik santrallerde salyangoz giriş borusu yuvarlaktır ve alan hesabı  $\pi d^2/4$  formülü kullanılarak; emme borusu dikdörtgendir ve alan hesabı borunun yüksekliği ile genişliği kullanılarak yapılmaktadır.

### Yer Çekimi İvmesi Hesabı

Yer çekimi ivmesi santralin bulunduğu konuma göre değişiklik gösterir. Her santralin yer çekimi ivmesi ayrı ayrı hesaplanmak zorundadır. Buna göre yer çekim ivmesi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$g = 9,7803(1 + 0,0053\sin^2\varphi) - 3 \cdot 10^{-6} \cdot z \quad (6)$$

Burada;  $\varphi$ : Enlem (radyan), z: Rakım (m)

### Su Yoğunluğu Hesabı

Her santralin enerji üretiminde kullandığı suyun yoğunluk değeri farklılık gösterir. Bunun için hesaplamalara katılan yoğunluk değerinin her santral için ayrı ayrı bulunması gerekmektedir (ETKB vd., 2020a). Buna göre su yoğunluğu aşağıdaki denklem ile bulunur;

$$\rho = 1000[(1 - A \cdot P_1) + 8 \cdot 10^{-6}(\vartheta - B + C \cdot P_1)^2 - 6 \cdot 10^{-8}(\vartheta - B - C)^3]^{-1} \quad (7)$$

Burada; A, B, C sabit değerler olup;  $A = 4.6699 \cdot 10^{-10}$ ,  $B = 4.0$ ,  $C = 2.1318913 \cdot 10^{-7}$

$\vartheta$ : Sıcaklık(°C),  $P_1$ : Giriş Basıncı (bar)

### Türbin Verimlilik Hesabı

Türbin verimliliği, türbinin girişindeki hidrolik güç ile türbinden şafta geçen gücün oranlanması ile bulunur. Santallerde türbin çıkışındaki yani şaft milindeki aktif gücü okumanın bir yolu mevcut değildir. Ancak verimlilik izleme sisteminde generatör çıkışındaki aktif güç, anlık olarak okunabilmektedir. Generatör çıkışında okunan değere, generatörde oluşan kayıplar eklenirse türbin çıkışı/şaft milindeki aktif güç hesaplanabilir (Westermann, 2021). Tersine hesaplama yöntemi ile şaft milindeki aktif güç;

$$P_{\text{şaft}} = P_{\text{gen}} + P_{\text{kayıp}} \quad (8)$$

$$P_{\text{kayıp}} = A + BP_{\text{gen}} + CP_{\text{gen}}^2 + DP_{\text{gen}}^3 + EP_{\text{gen}}^4 \quad (9)$$

formülü ile bulunur. Burada; A, B, C, D, E generatör tasarım verimlilik eğrisinden elde edilen katsayılar olup, her santral için farklıdır. Buna göre türbin verimliliği aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\eta_{\text{türbin}} = \frac{P_{\text{şaft}}}{\rho g H_{\text{net}} Q} \quad (10)$$

Verim izleme sisteminde, hesaplanan ve ekranda gözüken verim, türbin verimidir. Türbin veriminin hesaplanması için formülde bulunan;

g: Yer çekim kuvveti ( $m/s^2$ ), yukarıda verilen denklem ile bulunur.

$\rho$ : Suyun yoğunluğu ( $kg/m^3$ ), yukarıda verilen denklem ile bulunur.

$H_{\text{net}}$ : Net düşü (m), Bernoulli denklemi kullanılarak bulunur.

Q: Debi ( $m^3/s$ ), Winter-Kennedy metodu kullanılarak bulunur.

Böylece, yapılan bütün çalışmalar ve hesaplamalar neticesinde VİS sistemi ile türbin verimi anlık olarak takip edilmektedir. Türbin verimini bulmak için hesaplanan parametreler kullanılarak diğer verimlerde harici olarak hesaplanabilmektedir. Verim hesabında kullanılan bütün güçler, aktif güçtür ve birimi 'Watt' tır. Santralde, generatör çıkışındaki aktif güç ile türbin girişinde net düşüye bağlı oluşan hidrolik gücü oranladığımızda ilgili ünitenin verimini hesaplayabiliriz.

$$\eta_{\text{ünite}} = \frac{P_{\text{gen}}}{P_{\text{giriş}}} = \frac{P_{\text{gen}}}{\rho g H_{\text{net}} Q} \quad (11)$$

Generatör çıkışındaki aktif güç ile türbin çıkışında, shaft milinde olan gücü oranladığımızda generatör verimini hesaplayabiliriz.

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{P_{\text{gen}}}{P_{\text{shaft}}} \quad (12)$$

Generatör çıkış gücü ile santralin kurulu gücünü yani brüt düşüye bağlı olarak hesaplanan gücü oranlarsak santralin verimini hesaplayabiliriz. Brüt düşünün hesaplanması için gerekli olan göl kodu değeri, santralde öncesinde yerleşik olan seviye sensörü üzerinden alınmıştır

$$\eta_{\text{santral}} = \frac{P_{\text{gen}}}{\rho g H_{\text{brüt}} Q} \quad (13)$$

## BULGULAR ve TARTIŞMA

Alpaslan-1 HES'te Verim İzleme Sisteminde kullanılan ve dokunmatik ekran panelinde görülen sabit ve değişken değerler Tablo 1' de verilmiştir.

**Tablo 1.** Hesaplamalarda Kullanılan Sabit ve Değişken Değerler

Sabit Değerler	Değişken Değerler
$K_1$ : Akış Sabiti,	$\Delta P$ : Fark Basıncı
$K_2$ üs değeri	$P_1$ : Salyangoz giriş basıncı
$z_1$ : Salyangoz giriş merkezinin deniz suyu seviyesi arasındaki mesafe (m)	$P_2$ : Emme borusu çıkış basıncı
$z_2$ : Emme borusu çıkışı merkezinin deniz seviyesi arasındaki mesafe (m)	$\vartheta$ : Sıcaklık
$A_1$ : Salyangoz giriş kesit alanı	$P_a$ : Generatör çıkış gücü
$A_2$ : Emme borusu çıkış kesit alanı	$Q$ : Debi,
$dz_1$ : Salyangoz giriş merkezinin basınç sensörü arasındaki mesafe	$H_{\text{net}}$ : Net düşü
$dz_2$ : Emme borusu çıkışı merkezinin daldırma tipi sensörü arasındaki mesafe	$g$ : Yer çekim kuvveti
$\varphi$ : Enlem	$\rho$ : Suyun yoğunluğu
$z$ : Rakım	$\gamma$ : Suyun özgül ağırlığı
A, B, C, D, E generatör tasarım verimlilik eğrisinden elde edilen katsayılar	$V_1$ : Suyun salyangozdaki giriş hızı
	$V_2$ : Suyun emme borusundaki çıkış hızı
	$P_{\text{loss}}$ : Generatör kayıpları
	Efficiency: Türbin verimi

Oluşturulan sabit ve değişken değerler özelde ünite-3'e ait değerlerdir. Enlem, rakım, salyangoz giriş alanı ve emme borusu çıkış alanları gibi değerler bütün üniteler için aynı olsa da diğer değerler farklılık gösterecektir. Sıcaklık bütün ünitelerde farklılık göstermekle beraber, çalışmanın kolaylığı için sabit bir değer olarak alınabilir. Ünite-3 verimlilik hesaplamalarında gerekli oldukları için ölçülerek veya hesaplanarak bulunan ve verim izleme sistemine yüklenen değerler Tablo 2'te verilmiştir.

**Tablo 2.** Alpaslan-1 HES Karakteristikleri

Karakteristikler	Sembol	Değer	Birim
Giriş Alanı	$A_1$	8,549	$m^2$
Çıkış Alanı	$A_2$	24,354	$m^2$
Salyangoz Giriş Merkezinin Deniz Suyu Seviyesi İle Arasındaki Mesafe	$z_1$	1366,000	m
Emme Borusu Çıkışı Merkezinin Deniz Seviyesi İle Arasındaki Mesafe	$z_2$	1360,375	m
Salyangoz Girişi Merkezinin Basınç Sensörü Arasındaki Mesafe	$dz_1$	5,300	m
Emme Borusu Çıkışı Merkezinin Daldırma Tipi Sensörü Arasındaki Mesafe	$dz_2$	4,715	m
Enlem	$\Phi$	39.000	derece
Rakım	$Z$	1366,000	m
Sıcaklık	$\Theta$	14.000	
Yer Çekim İvmesi	$G$	9,824	$m/s^2$
Su Yoğunluğu	$P$	999,7	$kg/m^3$

Çalışmalarda W-K akış sabitinin hesaplanması için boya seyreltme metodu ile debi ölçümü gerçekleştirildi ve ünitenin debisi,  $Q=57,45 m^3/s$  olarak bulundu. Fark basınç sensöründen alınan değer ile ölçülen debi kullanılarak bulunan W-K akış sabiti değeri,  $K_1 = 3,47 m^3/s/\sqrt{kPa}$  dır. W-K debi hesaplama formülündeki  $K_2$  üs değeri 0,5 alındı. Fark basınç sensörünün okuduğu 'mbar' değeri, VİS'te pascal (pa) değerine dönüştürülerek kullanıldı. Verim izleme sistemi kurulduktan sonra, türbin ayar kanat açıklığı %50-100 arasında olacak şekilde, Winter-Kennedy metodu ile 10 farklı açıklıkta endeks testleri, boya seyreltme metodu ile 4 farklı açıklıkta mutlak testler yapıldı (ETKB vd., 2020a). Testlerde ölçülen net düşü değerine göre bulunan sonuçlar, yakınlık yasaları kullanılarak santralin nominal düşü değerine göre normalleştirildi.

W-K metodu kullanılarak yapılan testlerde en yüksek türbin verimi %91,9 olarak ölçüldü. Bu değere %80,42 ayar kanadı açıklığında ulaşıldı. Bu ayar kanat açıklığında ünitenin debisi 54,64 m<sup>3</sup>/s olurken, ölçülen net düşü değeri 73,68 m oldu. Yapılan testlerle türbin veriminin en iyi değerlerde olduğu noktada, ünite ve santral veriminin de en iyi değerde olduğu teyit edildi. Buna göre ünite verimi %90,1 olarak hesaplandı. Santral verimi ise %89 bulundu. Testlerde en yüksek generatör verimi, maksimum çıkış gücünde %98,2 olarak hesaplandı. Bu değere %99,2 ayar kanat açıklığında ulaşıldı. Bu noktada ünitenin debisi 65,88 m<sup>3</sup>/s olurken, net düşü 73,18 m olarak gerçekleşti. Bu düşü değerinde elde edilen 40,9 MW'lık en yüksek generatör çıkış gücü nominal net düşü değeri olan 80,6 m'ye göre normalleştirildiğinde, 47,28 MW olarak bulundu. Aşağıda verilen generatör verimlilik katsayıları kullanılarak generatördeki kayıpların hesaplamaları yapıldı ve bu generatör verimine göre shaft milindeki güç yani türbin çıkış gücü 48,34 MW bulundu (Özbek&Rüstemli, 2022).

$$P_{kay\Box p} = AP_{gen}^2 + BP_{gen} + C$$

Burada  $A = -4,167 \times 10^{-4}$ ,  $B = 8,583 \times 10^{-2}$ ,  $C = 93,9$  dir.

Boya seyreltme (dye delition) testlerinde en yüksek türbin verimliliği %91,9 olarak ölçüldü. Bu değere %74,96 ayar kanat açıklığında ulaşıldı. Bu noktada ünitenin debisi 51,09 m<sup>3</sup>/s olurken, ölçülen ne düşü değeri 73,81 m oldu. Generatör çıkışının 37,88 MW olduğu bu ayar kanat açıklığında gerçekleşen generatör verimi %97,9 olmuştur. Santral ve ünite veriminin en yüksek çıktığı bu noktada, santral verimi 89,1 bulunurken, ünite verimi %90,0 olarak bulundu. Testlerde en yüksek generatör verimi %98,2 olarak gerçekleşti ve bu değere %95,11 ayar kanat açıklığında ulaşıldı. Bu noktada ünitenin debisi 63,07 m<sup>3</sup>/s olarak ölçüldü. Ölçülen net düşü değeri 73,19 m dir. Bu değer 80,6 m olan santralin nominal net düşü değerine normalleştirildiğinde ise generatör çıkış gücü 46,23 MW olarak bulundu. Buna göre bu generatör veriminde shaft milindeki aktif güç 47,07 MW olarak hesaplandı. (Özbek&Rüstemli, 2023). Alpaslan-1 HES'te ünite-3'te yapılan türbin saha performans testleri sonuçlarının özeti Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Performans Test Sonuç Özetleri

TESTLER	Winter-Kennedy		Boya Seyreltme	
	En İyi Verimde (Türbin)	Maksimum Çıkış Gücünde	En İyi Verimde (Türbin)	Maksimum Çıkış Gücünde
Türbin Verimi (%)	91,9	88,3	91,9	90,3
Kanat açıklığı (%)	80,42	99,22	74,96	95,11
Generatör Çıkış Gücü (MW)	40,56	47,28	37,88	46,23
Ünite Debisi (Normalleştirilmiş)	57,14	69,15	53,39	66,19
Ünite Debisi (Ortalama Ölçülen)	54,64	65,88	51,09	63,07
Net Düşü (normalleştirilmiş)	80,60	80,60	80,60	80,60
Net Düşü (Ortalama Ölçülen)	73,68	73,18	73,81	73,19
Generatör Verimi (%)	98,0	98,2	97,9	98,2
Ünite Verimi (%)	90,1	86,8	90,0	88,6
Santral Verimi (%)	89,0	85,3	89,1	87,1

En yüksek türbin verimin bulunduğu düşü değerinin, santralin tasarımdaki nominal düşü değerinin yaklaşık %10 altında olmasına rağmen, türbinin hala nominal gücüne yakın değerler alması dikkat çekmektedir. Bu durum, gelecekte kullanılacak ek türbin gücünün bulunduğu sonucuna bizi götürmektedir. Ancak güç artırımının yapılabilmesi için generatör ve diğer bileşenlerin değiştirilmesi, yeni güce uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

Yapılan testlerde generatör veriminde ciddi bir düşüşün oluşmadığı görülmüştür. 2012 yılından beridir faaliyette olan ünite sadece %0,1 lik bir verim kaybının olduğu tespit edilmiştir. Bu da geçen süre zarfında generatörde beklenen verim kayıpları dışında, beklenilmeyen veya nedeni bilinmeyen bir verim kaybının olmadığı anlamına gelmektedir. Türbinde gerçekleşen kayıpların yıllık bazda %0-0,15 olması beklenen bir durumdur. Alpaslan-1 HES'te yapılan her iki testte de türbin verimi %91,9 olarak bulunmuştur. Bu duruma göre türbin ve türbin bileşenlerinde %3,5 oranından bir performans düşüklüğü yani verim kaybı söz konusudur. Bu verim kayıpları elbette ki santrale göre değişmektedir. Hatta aynı santraldeki ünitelerde bile bu kayıpların oranı ve nedenleri değişebilmektedir. Kavite hasarı, türbin çarkı kanadında kaynağa bağlı bozulma, su geçişlerindeki yüzey pürüzlülüğü ve türbin çarkı conta boşluğu, korezyon, vorteks, metal yorgunluğu, tortu erezyonu gibi sebepler, performans düşüklüğünün nedeni olarak sunulabilir. Santral veriminin izlenmesiyle esas olarak ünite veriminde gerçekleşecek kayıpların takip edilmesi ve bakım ekibinin doğru karar almasına yardımcı olunması amaçlanmaktadır.

## SONUÇ

Hidroelektrik santrallerde en büyük verim kaybı türbin ve türbin bileşenlerinde meydana gelmektedir. Coğrafi ve teknik şartlara bağlı olarak santralin ve türbin-generatör ünitesinin yıllık verim kaybı oranı değişmektedir. Ünitenin yıllara göre performans değişikliğinin bilinmesi santraldeki optimizasyon çalışmalarına yol göstereceği gibi enerji

yönetiminde de kolaylık sağlayacaktır. Ölçülebilen ve izlenebilen bir sisteme sahip olmak, teknik anlamda performans ile ilgili bilinmezlikleri ve belirsizlikleri ortadan kaldırma, üniteye zamanında ve doğru müdahaleler yapma imkânı sağlayacaktır. Böylece daha yüksek oranda ünite ve santral kullanılabilirliği, iyileştirilmiş enerji verimliliği ve daha fazla enerji üretimi tesis edilmiş olacaktır. Ayrıca böyle bir sistem, ünitelerin kapasitesini, enerji verimliliğini ve güvenilirliğini artırma fırsatlarını değerlendirme imkanı da sunacaktır.

Bu çalışma kapsamında, Alpaslan-1 HES'e ait bir üniteye performans testleri yapılabilmesi için gerçek zamanlı bir akış ve verimlilik izleme sistemi kuruldu. Testler bittikten sonra da sistem çalışır vaziyette, anlık olarak türbin verimliliğini hesaplayacak şekilde bırakıldı. Kurulum esnasında elektrik ve mekanik teçhizatın mevcut durumu değerlendirildi, bütün ölçü aletleri kontrol edildi. Kurulumda gerekli olan basınç sensörleri/transmitter, analizör, PLC sunucusu, modüller, dokunmatik ekran vs. gibi teçhizat temin edilerek kritik noktalarda veri toplanması için kullanıldı. VİS için gerekli olan bütün parametreler belirlendi, hesaplandı, ölçüldü ve sisteme yüklendi. Debi hesabının W-K metodu ile sürekli yapıldığı sistemde, endeks testleri metodu ile türbin verimliliği anlık olarak ölçüldü. Neticede, VİS kullanılarak yapılan performans testlerinde generatörde ciddi bir verim kaybının olmadığı, türbinde ise %3,5'lik bir kaybın olduğu tespit edildi. Santraldeki teçhizatın ve ölçü aletlerinin genel olarak iyi durumda olduğu gözlemlendi. İki farklı metot kullanılarak yapılan performans testlerinde elde edilen değerlerin paralellik göstermesi, testlerin başarılı kabul edilebileceğini anlamına gelmektedir. Ancak yine de farklı bir metot kullanarak bir performans testinin yapılması ve sonuçların teyit edilmesi tavsiye edilmiştir.

Santrallerde verim izlem sisteminin kurulması ile ilgili akademik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu yönü ile alan, daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç duymaktadır. Diğer taraftan ülkemizde bu sistemi kullanan santrallerin olup olmadığına dair bir bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle, enerji verimliliği ve yönetimi kapsamında VİS'in ülkemizdeki bütün santrallerde ve bu santrallerde bulunan bütün ünitelerde kurulması tavsiye edilmektedir. Sadece verimlilik kayıplarının değil, bu kayıplara neden olan tortu erezyonu, vibrasyon, balanssızlık, kavitasyon gibi olayların takip edilmesi, santral izlenebilirliğinin en alt bileşenlere kadar indirilmesi çok değerli sonuçlar verecektir. Santrallerin belli periyotlarla farklı metotlar kullanılarak mutlak testleri yapmaları, hem VİS üzerinden sürekli gerçekleşen endeks testleri sonuçlarını kıyaslama açısından, hem de geçmiş değerlerle karşılaştırma imkânı vermesi açısından faydalı olacaktır. Santrallerin verim kayıplarının giderilmesi amacı ile yapılacak olan çalışmalara, büyük revizyonlara başlanılmadan önce maliyet analizi yapılması tavsiye edilmektedir.

## KAYNAKLAR

- Akhtar T., Rehman A.U., Jamil M., & Gilani S.O. (2020). Impact of an energy monitoring system on the energy efficiency of an automobile factory: A case study. *Energies*, 13(10), 1-20. <https://doi.org/10.3390/en13102577>
- Aydın, C., & Esen, Ö. (2018). Does the level of energy intensity matter in the effect of energy consumption on the growth of transition economies? Evidence from dynamic panel threshold analysis. *Energy Economics*, 69, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.11.010>
- Bolla, R., Bruschi, R., Davoli, F., & Cucchiatti, F. (2011). Energy efficiency in the future internet: a survey of existing approaches and trends in energy-aware fixed network infrastructures. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(2), 223-244. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.071410.00073>
- British Petroleum (BP). (2023). *BP Energy Outlook 2022 Edition*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> Accessed 21.12.2023
- Cui, Q., Kuang, H., Wu, C., & Li, Y. (2014). The changing trend and influencing factors of energy efficiency: The case of nine countries. *Energy*, 64(C), 1026-1034. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.060>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (1993) Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik. *Taner Derbentli (Çev.), İstanbul: Literatür Yayıncılık*.
- Demir Onay, R. & Aydın, C. (2021). Enerji-sermaye arasındaki değişken ikame esnekliğinin ekonomik büyümeye etkisi. *JOEEP: Journal of Emerging Economies and Policy*, 6(2), 196-204.
- Düzgün, B. (2018). Türkiye elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi ve 2023 projeksiyonları. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 621-632. <https://doi.org/10.2339/politeknik.389604>

- Dyrstad, J.M., Skonhoft, A., Christensen, M.Q., & Ødegaard, E.T. (2019). Does economic growth eat up environmental improvements? Electricity production and fossil fuel emission in OECD countries 1980–2014. *Energy Policy*, 125,103–109. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.051>
- Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı(ETKB), Hatcd Ltd., & Dünya Bankası. (2020a). Elektrik üretiminde enerji verimliliği-Alpaslan-1 HES türbin performans testleri. Test Raporu. Ankara 73s.
- Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Hatcd Ltd., & Dünya Bankası. (2020b). Elektrik üretiminde enerji verimliliği-Alpaslan-1 HES ölçü cihazları değerlendirme raporu. Değerlendirme Raporu. Ankara 57s.
- EÜAŞ, Elektrik üretim Anonim Şirketi. (2023a). *Elektrik üretimi ve ticareti sektör raporu 2022*. <https://www.euas.gov.tr/raporlar> Erişim tarihi 24.12.2023
- EÜAŞ, Elektrik Üretim Anonim Şirketi. (2023b). *Yıllık faaliyet raporu 2022*. <https://www.euas.gov.tr/raporlar> Erişim tarihi 24.12.2023
- Flavin, C., & Lenssen, N. (1994). Enerjide arayışlar. *Yaman Köseoğlu (Çev.). İstanbul: Tema Vakfı Yayınları*
- Gezer, O. (2021, Nisan). Verim izleme sistemi kurulumu ve operasyonlar. EÜAŞ IPA Eğitim Programı (s: 2-30). EÜAŞ.
- Hardcastle, A., & Waterman-Hoey, S. (2009). Energy efficiency industry trends and workforce development in washington state. Study Report Phaes 1. University of Washington State University, Washington 67s.
- Heffner, G., Maurer, L., Sarkar, A., & Wang, X. (2010). Minding the gap: World Bank's assistance to power shortage mitigation in the developing world. *Energy*, 35 (4), 1584–1591. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.05.027>
- Hepbaşlı, A. (2001). Sanayide Enerji Yönetim Programının Temeller. *Termoklima Dergisi*, 106, 63-75.
- IEA, International Energy Agency. (2022a, June). *World energy investment 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2022> Accessed 25.12.2023
- IEA, International Energy Agency. (2022b, October). *World energy outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> Accessed 25.12.2023
- IHA, International Hydropower Association (2022, July). *2022 Hydropower Status Report*. <https://www.hydropower.org/publications/2022-hydropower-status-report> Erişim tarihi 25.12.2023
- Kırlı, M., & Kulu, T. (2016). Enerji yönetimi ve enerji muhasebesi. *Journal of Human Sciences*, 13(3), 4891-4905. <https://doi.org/10.14687/jhs.v13i3.4244>
- Kocaman, B. (2015). Yenilenebilir enerji kaynaklı mikro şebekelerde enerji yönetimi. Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli 178s.
- Koç, E., & Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu - Genel değerlendirme, *TMMOB Mühendis ve Makine Dergisi*, 54 (639), 32-44.
- Marques, G., & Pitarma, R. (2017). Monitoring energy consumption system to improve energy efficiency. In: A. Rocha, A.M. Correia, H. Adeli, L.P. Reis, & S. Costanzo (Eds.), *Recent Advances in Information Systems and Technologies Volume 2* (pp. 3-11). Guarda:Polytechnic Institute of Guarda – Unit for Inland Development, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56538-5>
- Martirano, L., Bua, F., Cristaldi, L., Grigis, G., Mongiovì, L.G., Polverini, S., Tironi, E. (2019). Assessment for a distributed monitoring system for industrial and commercial applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 55(6), 7320-7327. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2939507>
- Meral, M.E., Teke, A., & Tümay, M. (2009). Elektrik tesislerinde enerji verimliliği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 14(1), 31-37. <https://doi.org/10.17482/uujfe.79724>
- Mumlu, G. (2008). Enerji yönetim sistemi ve bir sanayi tesisinde enerji yönetimi uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya 116s.



- Özbakır, P. (2006). Enerji yönetimi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 157s.
- Özbek, G. (2022). Hidroelektrik santrallerinde enerji verimliliğine türbinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Anabilim Dalı, Bitlis 126s.
- Özbek, G., & Rüstemli, S. (2022). Hidrolik türbin performans testlerinin yapılmasında Winter-Kennedy metodunun kullanılması. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 9 (22), 41-61. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6948331>
- Özbek, G., & Rüstemli, S. (2023). Hidrolik türbin performans testlerinin yapılmasında boya seyreltme metodunun kullanılması-saha çalışması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(3), 973-992. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1190992>
- Pamir A. N. (2003). Dünyada ve Türkiye’de enerji, Türkiye’nin Enerji kaynakları ve enerji politikaları. *Metalurji Dergisi*, 134, 73-100.
- Patterson, M.G. (1996). What is energy efficiency? Concepts, issues and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)
- Pekmezci, Z. (2020). Nükleer santrallere yönelik yerel halkın bakışı: Sinop ili örneği. Yüksek lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kamu Yönetimi Ana Bilim Dalı, Samsun 173s.
- Tekel, E. (2006). Termik santrallerin enerji ve ekserji analizi. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli 99s.
- UN DESA, Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations. *World population prospects 2022*. <https://population.un.org/wpp/> Accessed 24.12.2023
- UN DESA, Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations. *World urbanization prospects 2018*. <https://population.un.org/wup/> Accessed 24.12.2023
- Uzun, A., & Değirmen, M. (2018). Endüstriyel işletmelerde enerji verimliliği ve enerji yönetimi. *International Journal of Economic Studies*, 4(2), 83-97.
- Wei, M., Patadia, S., & Kammen, D.M. (2010). Putting renewables and energy efficiency to work: how many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy Policy*, 38(2), 919-931. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.044>
- Westermann, J. (2021, March). Efficiency Improvement. EÜAŞ IPA Training Program (pp. 10-55). EÜAŞ.