



Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/yyufbed>



Araştırma Makalesi

Hidrolik Türbin Performans Testlerinin Yapılmasında Boya Seyreltme Metodunun Kullanılması-Saha Çalışması

Gökhan ÖZBEK*¹, Sabir RÜSTEMLİ²

¹ EÜAŞ Alpaslan-1 Hidroelektrik Santrali, Elektrik Bakım Başmühendisliği, 49600, Muş, Türkiye

² Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 13000, Bitlis, Türkiye

Gökhan ÖZBEK, ORCID No: [0000-0003-1160-1955](https://orcid.org/0000-0003-1160-1955), Sabir RÜSTEMLİ, ORCID No: [0000-0002-4957-1782](https://orcid.org/0000-0002-4957-1782)

*Sorumlu yazar e-posta: gokhanozbek1986@gmail.com

Makale Bilgileri

Geliş: 18.10.2022
Kabul: 12.07.2023
Online Aralık 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1190992](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1190992)

Anahtar Kelimeler

Boya seyreltme metodu,
Debi ölçümü,
Hidrolik türbinler,
Verimlilik testleri

Öz: Hidroelektrik santralleri suyun hidrolik gücünü kullanarak elektrik üreten, yüksek verimli enerji santralleridir. Santrallerde birçok nedene bağlı olarak oluşan tahribatlar zamanla teçhizatlardaki verimlilik kayıplarını artırmakta ve santralin performansını düşürmektedir. Santrallerde en fazla verimlilik kaybının gerçekleştiği kısım türbin ve türbin bileşenleridir. Santral verimliliğinin düzenli olarak izlenmesi, kestirimci bakımlarla teçhizatların korunması, santralin ekonomik işletme ömrünün uzatılması gibi amaçlar elektrik üretiminde temel politikalar haline gelmiştir. Hidrolik santrallerde farklı debi ölçüm metotları kullanılarak yapılan türbin performans testleri, bu amaçların gerçekleşmesinde büyük katkılar sunmaktadır. Bu çalışmada, Dikey Francis tipi türbinlerin kullanıldığı Alpaslan-1 HES'in bir ünitesinde boya seyreltme metodu kullanılarak debi ölçümü ve türbin performans testleri gerçekleştirilmiştir. Üniteye kurulumu yapılmış olan verim izleme sisteminden de yararlanılarak yapılan testlerde, santralin devreye alındığı 2012 yılından testlerin yapıldığı zamana kadar geçen sürede türbin veriminde %3.5'lük bir kaybın olduğu tespit edilmiştir.

Using Dye Dilution Method in Performing Hydraulic Turbine Performance Tests-Case Study

Article Info

Received: 18.10.2022
Accepted: 12.07.2023
Online December 2023

DOI:[10.53433/yyufbed.1190992](https://doi.org/10.53433/yyufbed.1190992)

Keywords

Dye dilution method,
Efficiency tests,
Flow measurement,
Hydraulic turbines

Abstract: Hydroelectric power plants are high-efficiency power plants that generate electricity using the hydraulic power of water. Destructions in power plants due to many reasons increase the efficiency losses in the equipment over time and decrease the performance of the power plant. The turbine and turbine components are the parts where the most efficient loss occurs in the power plants. Purposes such as regular monitoring of power plant efficiency, protection of equipment with predictive maintenance, and prolonging the economic operating life of the power plant have become the main policies in electricity generation. Turbine performance tests using different flow measurement methods in hydraulic power plants make great contributions to the realisation of these goals. In this study, flow measurement and turbine performance tests were carried out using the dye dilution method in a unit of Alpaslan-1 HEPP, where vertical Francis-type turbines are used. In the tests carried out using the efficiency monitoring system installed in the unit, it was determined that there was a 3.5% loss in turbine efficiency from the year the power plant was commissioned in 2012 until the tests were conducted.

1. Giriş

Enerji, modern dünyanın oluşmasında büyük etki göstermiştir. Hayatın her alanında etkisini gösteren enerji artık en temel ihtiyaçlar arasına girmiştir. Dünya, artan enerji talebini karşılamak için yeni ve alternatif enerji kaynakları bulma arayışlarına devam etmektedir (Yalılı Kılıç & Adalı, 2023). Yeryüzündeki en büyük enerji kaynakları olan fosil yakıtların, yeni rezervlerin bulunmaması halinde yakında tükenmesi (British Petroleum (BP), 2023) ve bu kaynakların çevre, doğa ve insan sağlığı açısından oluşturduğu olumsuz etkiler nedeni ile ülkeler temiz, güvenilir, kesintisiz, düşük maliyetli ve kaliteli enerji kaynaklarına yönelmektedirler (Esmer, 1996; Arcaklıoğlu & Özcan, 2022). Enerjide bağımsızlık ve sürdürülebilirlik, enerji yönetimi gibi meseleler enerji politikalarına yön veren önemli faktörler haline gelmiştir (Esen & Bayrak, 2015). Bu nedenle, enerji arzında yenilenebilir enerji kaynaklarına öncelik verilerek fosil yakıt kullanımının önüne geçilmesi ve var olan enerji kaynaklarının etkin ve verimli bir şekilde kullanılması öncelikli hedefler arasına girmiştir (Kavak, 2005; Finn ve ark., 2011).

Suyun yeryüzünde sürekli bir döngü içerisinde olması ve buna bağlı olarak yeryüzündeki su oranının hiçbir zaman değişmemesi, suya bağlı olarak oluşan hidrolik gücü tükenmez bir enerji kaynağı kılmakta, yenilenebilir enerji kaynakları arasına sokmaktadır. Suyun oluşturduğu hidrolik gücü kullanarak enerji üreten hidroelektrik santralleri (HES) ülkelerin enerji politikalarında önemli bir yer tutmaktadır. 2020 yılı verilerine göre dünya genelinde elektrik enerjisi talebinin yaklaşık %16'sını, Türkiye'nin elektrik enerjisi talebinin ise %25.6'sını hidrolik santral tesisleri karşılamıştır (Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ), 2021). Hidrolik santral tesislerinin yerli üretim kaynağı olması, enerjide dışa bağımlılığı azaltması, işletme maliyetlerinin düşük olması, uzun ömürlü olması, fosil yakıtlara alternatif olması ve çevreye zarar verecek atıklar barındırmaması gibi etkenler, bu tesisleri vazgeçilmez elektrik üretim kaynakları haline getirmektedir (Özgören ve ark., 2012). Santrallerin ilk kurulum maliyetlerinin yüksek olmasına karşın verimliliklerinin yüksek olması, tarım, sulama, balıkçılık, taşkın önleme gibi alanlar için de kullanılması bu tesislerin diğer avantajları arasındadır. Coğrafik yapısı, akarsu oranı elverişli olan ülkelerin en çok faydalandığı kaynak hidroelektrik enerjisidir (Dinçer ve ark., 2017).

1882 yılında kurulan ilk hidroelektrik santralinin üzerinden 140 yıllık bir zaman geçmiş bulunmaktadır (Güler, 2001). Geçen süre zarfında bu tesislerin teknolojik alt yapılarında büyük bir gelişme kaydedilmiştir. Santrallerde kullanılan türbin, generatör, transformatör gibi kritik teçhizatların imalat verimliliklerinde büyük artışlar sağlanmış ve bu teçhizatlardan büyük güçlerde üretim yapılmıştır. Günümüzde, yük-frekans dengesini sağlaması ve uzaktan kontrol imkanları sunması gibi nedenlerle en çok tercih edilen türbin tiplerinden olan Francis tipi türbinler yaklaşık %97, Kaplan tipi türbinler yaklaşık %96, Pelton tipi türbinler ise yaklaşık %95 verim ile imal edilebilmektedir. İmal edilen generatörlerin verimi ise %98'in üstüne çıkabilmektedir (Özbek, 2022). Dünya genelindeki santrallerin yaklaşık %60'ında kullanılan Francis tipi türbinlerin 1 000 MW gücünde olanları üretilmiştir (Linguip, 2020; Yicaiglobal, 2020).

Hidroelektrik santrallerinde santral verimliliği, santralin kurulu gücü ile generatör çıkış gücünün birbirine oranlanması ile bulunur. Suyun hidrolik gücünün önce mekanik, sonra elektrik enerjisine dönüştürüldüğü bu tesislerde, suyun türbini döndürmek üzere gönderilmesi ile başlayan elektrik üretim sürecinin her aşamasında enerji kayıpları oluşmaktadır. Bu nedenle santrallerin girişindeki hidrolik enerji generatör çıkışında üretilen elektrik enerjisinden daha büyüktür. Teoride enerjinin korunumu bir kanun olarak kabul edilmiş olsa da (Dinçer, 2022) pratikte enerji dönüşümlerinde ısı kaynaklı enerji kayıplarının olmaması mümkün değildir. Diğer taraftan santralin işletme şartları, santrallerde kullanılan malzemelerin yapısı, ünitelerde oluşan kavitezyon, vorteks gibi olaylar santrallerde enerji kayıplarının oluşmasına ve kayıpların zamanla artmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle kayıpları minimize etmek, santralin ömrünü uzatıp verimliliğini koruyabilmek için santrallerde düzenli bakım ve revizyon çalışmaları yapılmaktadır (Özbek, 2022).

Ülkemizde ilk elektrik üretimi 1902 yılında inşa edilen 2 MW gücündeki su türbini ile oluşmuştur (Erol, 2007). Günümüzde Türkiye'de irili ufaklı 744 adet HES bulunmaktadır ve bunların toplam kurulu gücü 2022 yılı itibarı ile 31498 MW'tır. Bu kurulu güç değeri ile ülkemiz, Dünyada 9, Avrupa'da ise 2. sırada yer almaktadır (AA, 2021; GENSED, 2022). Kamuya ait santrallerin bağlı olduğu Elektrik Üretim A.Ş.'nin (EÜAŞ) bünyesinde 2022 yılı itibarı ile toplam 48 tane hidroelektrik santrali bulunmakta ve bu santrallerin Türkiye HES kurulu güç içerisindeki payı 14003 MW'tır. Bu da ülkemizdeki toplam HES kurulu gücün yaklaşık %44.5'e denk gelmektedir (EÜAŞ, 2022).

Hidroelektrik santralleri genellikle 50-100 yıl arasında çalışacak şekilde inşa edilir. Santrallerin yaşlarına bağlı olarak teçhizatlarında zamanla metal yorgunluğu, yıpranma gibi olumsuzluklar meydana gelmektedir. Ülkemizde de özellikle kamuya bağlı santraller incelendiğinde, yaşlarının çok büyük olduğu görülmektedir. Türkiye'nin 2 405 MW kurulu gücü ile en büyük santrali olan Atatürk HES'in yaşı 30 iken, ondan sonra gelen 1 800 MW kurulu gücündeki Karakaya HES'in yaşı 35, 1 330 MW kurulu gücündeki KEBAN HES'in yaşı 48, 702.55 MW kurulu gücündeki Altunkaya HES'in yaşı 35'tir. EÜAŞ'a bağlı santrallerin yarısı 30 yaşından büyüktür ve bu oran 8 302.55 MW'lık bir kurulu güce, yani toplam Türkiye HES kurulu gücünün %26.3'üne tekabül etmektedir (Özbek & Rüstemli, 2022a). Türkiye'nin hidrolik potansiyelinin yaklaşık %60'ını enerji üretiminde gerçekleştirdiği düşünüldüğünde (DSİ, 2020), enerji talebinin karşılanması, enerjide dışa bağımlılığın azalması ve sürdürülebilir enerji politikaları bağlamında mevcut santrallerin verimliliklerinin korunmasının ne kadar önemli olduğu daha iyi anlaşılacaktır.

Hidroelektrik santrallerinde gerçekleşen kayıpları genel hatlarıyla su alma ağız yapılarındaki kayıplar, türbin ve türbin bileşenlerindeki kayıplar, generatör kayıpları, şalt ve diğer elektrik tesislerindeki kayıplar şeklinde sınıflandırabiliriz (Kafalı, 2020). Bunlar içinde kayıpların en fazla gerçekleştiği ve santral verimliliğinin düşmesinde daha çok etkisi olan kısım türbin ve türbin bileşenleridir. Kavitasyon, vorteks, tortu erozyonu, vibrasyon, korozyon gibi birçok olay nedeni ile türbinlerde ve diğer bileşenlerinde süngerleşme, aşınma, delinme, kırılma, çatlama gibi problemler gerçekleşmektedir (Göğüş ve ark., 2013; Thapa ve ark., 2015; Gögebakan, 2019). Diğer taraftan hidroelektrik santralleri şebeke kararsızlıklarının giderilmesi, dengeleme, şebekeyi ani ve hızlı bir şekilde besleme çalışmaları gibi nedenlerle normal işletme programı dışında sık sık devreye alınıp çıkarılmak, yük alıp-vermek, acil durdurmaya gitmek gibi manevralara zorlanabilmektedirler. Bu çalışma koşulları da türbinlerde çeşitli hidrolik kararsızlıkların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Özellikle kısmi yük ve aşırı yük gibi tasarım dışı işlemler vorteks, kavitasyon gibi olayları artırarak, ünitelerde yüksek ve düşük frekanslı basınç dalgalanmalarına, generatör-türbin balans bozukluklarına veya vibrasyona neden olmaktadır (Goyal & Gandhi, 2018).

Çeşitli nedenler ile performans kayıpları yaşayan santrallerde verimliliği artıracak büyük rehabilitasyon çalışmaları yapılmaktadır. Bu çalışmalarla santral verimliliği optimum seviyeye getirilmek istenmektedir. EÜAŞ bünyesinde 2007 yılında yapılan bir çalışmada santrallerde verimlilik artışı analizleri yapılmış ve yapılacak doğru müdahaleler ile performans kaybına uğramış olan türbinlerin verimliliklerinin %0.7-%6 arasında arttırılabileceği görülmüştür. Elbette doğru bir çalışmanın yapılabilmesi için santral teçhizatının mevcut durumunun bilinmesi ve iyi analiz edilmesi gerekmektedir (Sav, 2010).

Bu çalışmada, 2012 yılında EÜAŞ'a bağlı olarak devreye alınan, Dikey Francis tipi reaksiyoner türbinlerinden oluşan dört üniteye sahip ve baraj tipi santral olan Alpaslan-1 HES'in bir ünitesinde yapılan performans testleri ile türbinin ve santralin mevcut durumu incelenmiştir. Üzerinde verim izleme sistemi (VİS) kurulmuş olan ünite-3'te yapılan testlerde, boya seyreltme (dye dilution) metodu kullanılarak doğrudan debi ölçümleri gerçekleştirilmiş, bu metot ile farklı ayar kanatlarında mutlak testler yapılarak türbinin, generatörün, ünitenin ve santralin mevcut verimliliği tespit edilmiştir.

Verimlilik testlerinde, ünitenin debisinin ölçülmesi ve bu ölçüm için kullanılacak olan metodun belirlenmesi en önemli kriterlerdendir. Debi ölçüm metotları, doğrudan ölçüm metotları ve bağıl ölçüm metotları olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Mutlak testlerde doğrudan debi ölçümü yapılırken, endeks testlerinde ise mutlak testlerde ölçülen debi ve salyangozdaki Winter-Kennedy tapalarından ölçülen diferansiyel basınç (DP) kullanılarak bağıl debi hesaplaması yapılır. Alpaslan-1 HES'te doğrudan bir debi ölçüm yöntemi olan boya seyreltme metodu kullanılarak yapılan performans testlerinin yanı sıra bağıl bir debi hesaplama yöntemi olan Winter-Kennedy metodu kullanılarak da performans testleri yapıldı. Doğrudan debi ölçümünde bulunan debi değeri, Winter-Kennedy akış sabitinin bulunmasında kullanıldı (Özbek & Rüstemli, 2022a). Yapılan bu çalışmalarla, iki ayrı metot kullanılarak yapılan performans testlerinin sonuçlarının kıyaslanması yapıldı. Her iki testte de benzer sonuçlar elde edildi ve türbinde tasarım değerine göre %3,5'lik bir verimlilik kaybının olduğu görüldü.

1.1. Boya seyreltme metodu ile debi ölçümü

Yüzey veya yer altı sularında, kapalı veya açık kanallarda akış halinde olan suyun debisinin belirlenmesinde doğal ve yapay olmak üzere iki çeşit izleme tekniği (tracers) kullanılır. Suyun içerisinde

kendiliğinden bulunan mikroorganizmalar, iyonlar ve çevresel izotopların izlenmesi ile debi ölçümü yapılması, doğal izleme tekniğinde. Yapay izleme tekniğinde ise izlenecek veya ölçülecek sisteme dışarıdan, harici olarak izleyici verilmektedir.

Yapay izleyicilerin genel özellikleri şu şekildedir (Doğdu & Yiğitler, 2010);

- Zehirli etkisi olmadığı için çevreye, insanlara ve diğer canlılara zarar vermezler.
- Suda kolaylıkla çözünebilirler.
- Su ile hızlı bir şekilde ve yüksek oranlarda karışım gösterebilirler.
- Su içerisinde hiçbir şekilde kendiliğinden bulunmazlar. Çalışmalar için dışarıdan yapay olarak suya karıştırılmaları gerekir.
- Su içerisindeki yoğunlukları, milyarda bir mertebesinde dahi olsa kolayca tespit edilebilirler.
- Su içerisinde doğal olarak bulunan diğer iyonlarla herhangi bir tepkimeye girmezler. Böylelikle kimyasal tepkimeler neticesinde oluşan çökmeler, burada gerçekleşmemektedir. Buna bağlı olarak debi ölçümlerinde yoğunluktan kaynaklı kayıplar meydana gelmez.
- Su içerisinde bulunan tortular, mineraller vs. gibi küçük partiküller tarafından da tutulamazlar. İdealde bu özelliğe sahip olacak şekilde imal edilse de pratikte dikkate alınmayacak oranlarda kayıpların oluşma ihtimali vardır.

Yapay izleyici metotla debi ölçümü daha çok bazı özel boyalar ve tuzlar aracılığı ile yapılmaktadır. Debi ölçümünde izleyici olarak özel boyanın kullanıldığı metoda boya seyreltme metodu (dye dilution metot) denilmektedir. Bu metot, ölçümlerin basit ekipmanlar ile kolay bir şekilde yapılabilmesi, karmaşık olmayan uygulaması ve ölçümlerin belirsizlik değerinin düşük olması nedeni ile sıklıkla tercih edilen bir metottur.

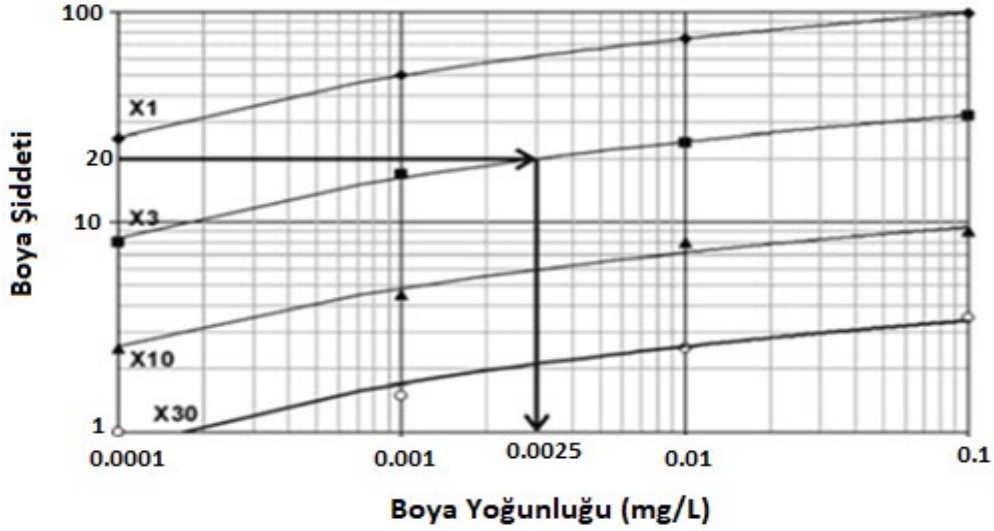
1.1.1. Ölçümlerde kullanılan ekipmanlar

Floresan Boya ve Rhodamine-WT: Floresan boyalar, parlak veya parlak yapıya sahip boyalardır. Parlaklıklarının ortaya çıkması için uzun dalga ultraviyole ışınlarına veya mavi viyola ışınlarına tutulmaları gerekmektedir. Geniş bir spektrumda pigment sunan bu boyalar, yansıtıkları veya yaydıkları ışınlar ile kolayca fark edilebilirler. Çeşitli amaçlar için kullanılan birçok floresan boya vardır. Boya seyreltme metodu ile debi ölçümünde kullanılan floresans boya, özel olarak üretilmiş Rhodamine-WT (Rodamin) boyasıdır. Boya-su karışımı bir örnekte, boyanın yoğunluğu sudaki boyanın floresan seviyesi ile doğru orantılıdır ve boya milyon parçacık seviyesinde (PPB) tespit edilebilir.

Sabit Sıcaklık Banyosu: Rhodamine WT boyasının floresan seviyesi sıcaklık değişimine son derece duyarlıdır ve sıcaklıkla ters orantılı olarak santigrat derece başına yaklaşık %2.6 oranında seviye değişim yaşanabilir. Boya testinde, test numuneleri ile test için hazırlanan standart çözeltiler analiz aşamasında aynı sıcaklıkta olmalıdır. Bu değer iki numunenin florometrik analizden önce daldırıldığı sabit sıcaklık banyosu ile sağlanır (Liang & Richardson, 1969).

Enjeksiyon Pompası: Boya enjeksiyonu su alma ağzında, cebri boru girişinden yapılmaktadır. Burada enjekte edilen boya çözeltisinin konsantrasyon değeri ve miktarı bilinmektedir. Bu boya çözeltisinin sabit hız ve oranda enjekte edilmesi için sabit deplasmanlı pompalar kullanılmaktadır. Bu pompalar enjeksiyon sırasında oluşan basınç değişiminden etkilenmeksizin sabit bir akışta boya çözeltisinin suya karışımını sağlamaktadır.

Florometre: Boya seyreltme yönteminde, boyanın floresan seviyesini analiz eden alete fluorometer (florometre) denilmektedir. Boya-su çözeltisinde floresansın yani boyanın şiddetinin belirlenmesinde kullanılan bu cihaz, öncelikle hazırlanan standart çözeltilerle kalibre edilerek boyaya ait optimal aralıkların belirlenmesini sağlar. Ayrıca bu cihaz, numune alma noktasında, boya çözeltisinin geçtiği anı yakalamak ve numune toplamak için de kullanılır. Bütün floresan boyaların farklı seviyelerde uyarılma ve yayılma dalga boyları (λ) vardır ve bundan dolayı da suya farklı renk verirler. Boya seyreltme metodunda kullanılan ve suya kırmızı renk veren rodamin WT boyası 558 nm uyarılma, 583 nm yayılma dalga boylarına sahip olduğu için su-boya çözeltisindeki ışık şiddeti florometre cihazı ile rahatlıkla ölçülebilmektedir. Florometre cihazında ölçülen ışığın bağıl şiddeti, boya-su karışımındaki boyanın yoğunluğunu, dolayısı ile boyanın miktarını belirler. Işık şiddeti ne kadar fazla ise boyanın miktarı da o kadar fazladır. Standart çözeltilere göre hazırlanmış tipik bir yoğunluk-boya şiddeti grafiği Şekil 1'de sunulmuştur (Doğdu & Yiğitler, 2010).



Şekil 1. Boya şiddeti-boya derişimi florometre okumaları (Doğdu & Yiğitler, 2010).

1.1.2. Ölçüm standartları ve yapılan hesaplamalar

Enjeksiyon Çözeltisinin Hazırlanması: Bu metodun temel denklemi aşağıdaki gibidir;

$$Q_1 C_1 = Q_2 C_2 \quad (1)$$

Burada;

- Q_1 : Enjekte edilen boya çözeltisinin debisi
- C_1 : Enjekte edilen boya çözeltisinin konsantrasyonu
- Q_2 : Belirlenecek olan debi
- C_2 : Su akışı içerisindeki boya-su karışımının konsantrasyonu

Teoride, enjeksiyon için herhangi bir boya çözeltisi konsantrasyonu kullanılabilir. Ancak uygulamada, florometre için iyi çalışma aralığı yaklaşık 5-10 ppb'lik bir konsantrasyondur. Enjeksiyon çözeltisi, sisteme enjeksiyondan sonra çözeltinin nihai konsantrasyonunu yaklaşık 5-10 ppb olacak şekilde hazırlanır. Çözelti, Rhodamine WT boyasının sistemden test edilen suyla seyreltilmesi ile hazırlanır. Klorlu olması nedeni ile musluk suyu ve başka bir yerden alınmış su, çözelti hazırlandığında kullanılmaz. Seyreltme şu şekilde hesaplanır (Cyrenne, 2002);

$$C_1 = C_2 \frac{Q_2}{Q_1} \quad (2)$$

Burada;

- C_1 : Enjeksiyon çözeltisi konsantrasyonu (ppb)
- C_2 : Enjeksiyondan sonra istenen konsantrasyon (5-10ppb, $\mu\text{g/L}$)
- Q_1 : Enjeksiyon çözeltisi debisi (litre/sn)
- Q_2 : Ölçülmekte olan beklenen debi (litre/sn)

Test Numunesinin Toplanması: Debi ölçümü için alınacak test numunesinin toplandığı mesafe, bu metotta önemli bir kriterdir. Ölçümlerin doğru sonuçlar vermesi için numune, standartlara göre belirlenmiş olan bir mesafeden ve boya çözeltisinin su ile yeteri kadar karıştığı bir noktadan alınmalıdır. Numune alımı için florometre cihazı sürekli akış izleme modunda tutularak cebri boruya bir sensör/tapa aracılığı ile bağlanır. Suya tam karışmış halde bulunan boya-su karışımı çözelti, sensörün/basınç tapasının olduğu bölgeden geçmeye başladığında florometre cihazı uyarı vermeye başlar. Böylece boya çözeltisinin örnek alma noktasından ne zaman geçtiği ve numunenin ne zaman alınması gerektiği belirlenir (Özbek & Rüstemli, 2022b). Enjekte edilen boya çözeltisi, numune alma noktasından

geçtiğinde florometrenin sinyal çıkışına bağlanan grafik/veri kaydedicide floresan seviyesinde bir artış gözlenir. Bu artış bilgisayarda (PC) anlık olarak izlenebilir. Boya seviyesi, tek tip boya konsantrasyonunu gösteren bir platoda stabilize hale geldiğinde, homojen bir karışım halinin oluştuğu anlaşılır. Bu anlarda örnekleme testi için su-boya karışımı numune kabı ile alınır. Boya çözeltisinin florometreden izlenişi ve örnek toplama işlemi Şekil 3'te gösterilmiştir.

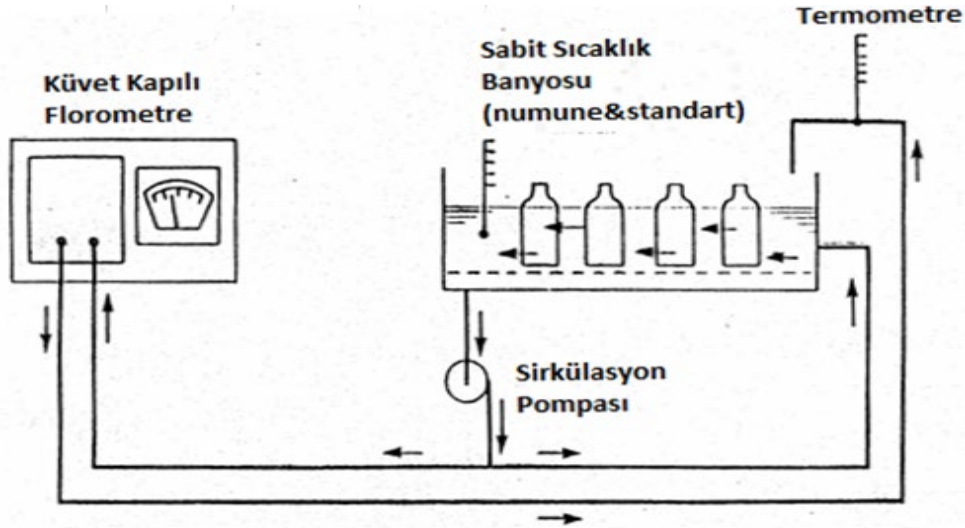
Standart Çözeltilerin Hazırlanması: Standart çözeltiler/solüsyonlar ideal haliyle laboratuvarda hazırlanır. Saha ölçümlerinde beklenen konsantrasyonlarda bir çözeltinin benzeri, çalışmanın yapılacağı sahanın şartları sağlanarak seyreltme işlemi ile yapılır. Her akışa uygun bir standart çözelti hazırlanır ve bu çözeltide kullanılan su, test edilen sistemden alınır. Böylece test numuneleri ile aynı bulanıklık, ph vb. değerlerine sahip su kullanılarak ölçümlerde hata yapılmamış olunur. Ancak pratikte, standart çözelti sahada da ayarlanabilmektedir. Standartları hazırlamak için kullanılan seyreltme faktörü (dilution factor) aşağıdaki gibidir.

$$DF = \frac{Q_2}{Q_1} \quad (3)$$

Burada; Q_1 : Enjeksiyon boyasının debisi,
 Q_2 : Ölçülecek debi

Bu faktör birkaç milyon mertebesinde çok büyük ölçekli olduğundan, standart çözeltiler seri seyreltme yöntemi kullanılarak yoğunlukları düşürülür. Genellikle ardışık dört seyreltme yapılır.

Analizlerin Yapılması: Test örnekleri ve standart çözeltiler tüm sıcaklıklar dengelenene kadar sıcaklık eşitleme banyosunda saklanır. Analizlerde, öncelikle florometrenin doğru sonuçlar vermesi için cihazın kalibre ayarlarının yapılması gerekmektedir. Bunun için daha öncesinde, bilinen miktarda ve bilinen konsantrasyonda hazırlanmış olan standart çözeltiler kullanılır. Standart çözeltilerin kullanılması ile boya şiddeti-konsantrasyon grafiği oluşturulur. Kalibre ayarları yapıldıktan sonra florometre cihazı ile test esnasında toplanan örnek boya çözeltilerinin floresan seviyeleri, dolayısı ile örnek çözeltinin/çözeltilerin konsantrasyonları ölçülür. Bu işlemlere florometrik analiz denir. Elde edilen değerler kullanılarak cebri borudan geçen suyun debisi ölçülür. Florometrik analiz için oluşturulan düzenek Şekil 2'de gösterilmiştir (Cyrenne, 2002).

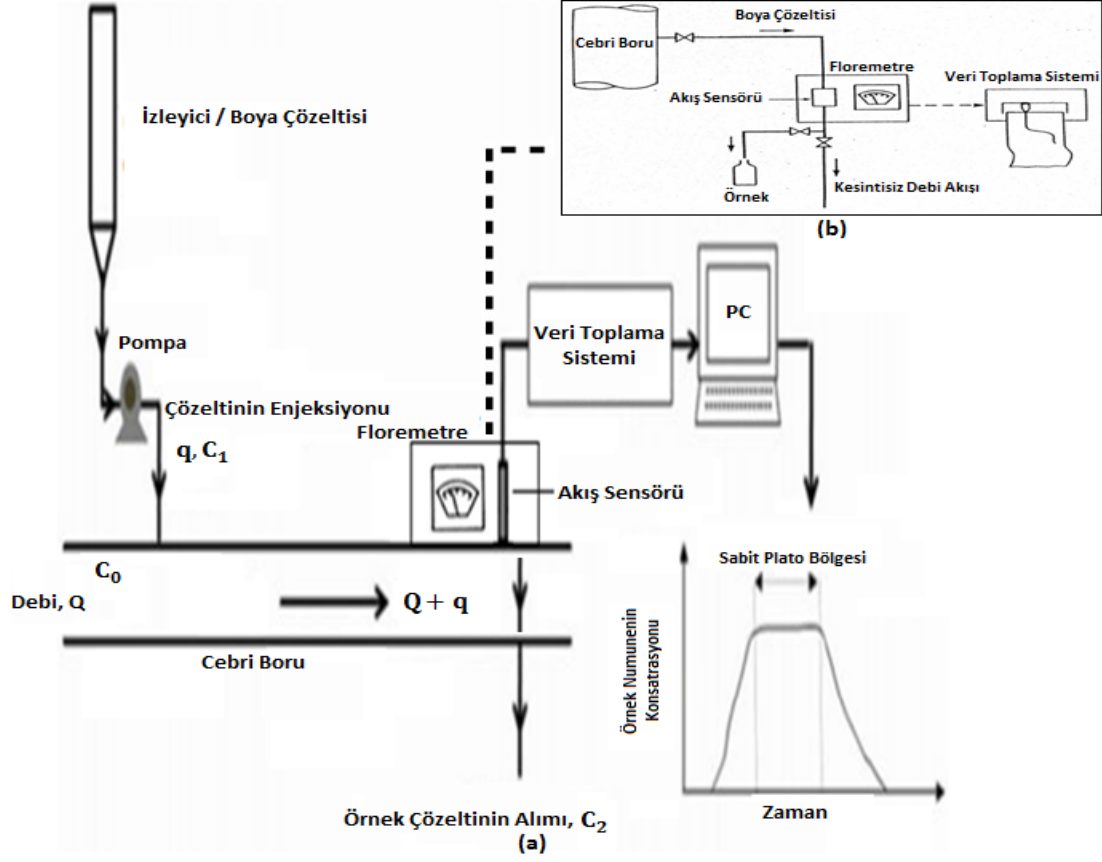


Şekil 2. Florometrik analiz uygulama şeması (Cyrenne, 2002).

1.2. Hidroelektrik santrallerinde boya seyreltme metodunun uygulama şematifi

Boya seyreltme metodu kullanılarak hidroelektrik santrallerinde debi ölçümünün yapılmasını genel hatları ile gösteren şema, testler sırasında florometrenin kullanılması şekli ve boya çözeltisi numunesinin alımı esnasında sabit plato bölgesinin oluşumunun grafiksel gösterimi Şekil 3'te verilmiştir (Cyrenne, 2002; Pant ve ark., 2017). Bu yöntemin hidrolik santrallerde seçilmesinde en önemli kriter

cebri boru uzunluğudur. Boya çözeltisinin yeteri kadar su ile karışımının sağlanması için yeterli mesafede akışının olması gerekmektedir (EÜAŞ, 2020).



Şekil 3. (a) Hidroelektrik santrallerinde boya seyreltme metodunu kullanarak debi ölçümü yapılmasını gösteren şema (Cyrenne, 2002; Pant ve ark., 2017), (b) Florometrenin ölçümlerde kullanılması şeklini (Cyrenne, 2002).

Bu metod hidroelektrik santrallerinde uygulanırken kullanılan boyanın debisi, belirli bir süre boyunca enjekte edilen boya çözeltisi miktarının hassas bir terazi ile tartılmasıyla veya boya çözeltisinin bulunduğu kavanozdaki hacim değişikliğinin kaydedilmesi ile ölçülebilir.

Buna göre denklem aşağıdaki gibidir (Kulin & Compton, 1975; USDA, 1997; Chang, 2003);

$$qC_1 + QC_0 = (Q + q)C_2 \quad (4)$$

Böylece santral debisinin ölçümü için kullanılacak denklem;

$$Q = \left(\frac{C_1 - C_2}{C_2 - C_0} \right) q \quad (5)$$

şeklinde olur (Liang & Richardson, 1969; Muthukumar ve ark., 2010).

Burada

q : Enjekte edilen boya çözeltisinin debisi

Q : Ölçülecek debi

C_1 : Enjekte edilen boya çözeltisinin konsantrasyonu

C_2 : Örnekleme noktasında alınan boya-su karışımının konsantrasyonu

C_0 : Boya çözeltisinin doğal sudaki başlangıç/arka plan konsantrasyonu (Muthukumar ve ark., 2010);

4 nolu denklemde, $C_2 \gg \gg \gg C_0$ olduğu için C_0 değeri ihmal edildiğinde, enjekte edilecek boya çözeltisinin konsantrasyonu, aşağıdaki formül ile hesaplanabilir.

$$C_1 = \frac{(Q + q)}{q} C_2 \quad (6)$$

4 nolu denklemde, $Q \gg \gg \gg q$ olduğundan $Q+q \approx Q$ olarak kabul edildiğinde, test için cebri borudan enjekte edilecek boyanın miktarı aşağıdaki denklem ile bulunur (Pant ve ark., 2017).

$$q = Q \frac{C_2}{C_1} \quad (7)$$

veya

$$q = Q \frac{c}{C} \quad (8)$$

Burada;

C_2, c : Enjekte edilecek boya çözeltisinin istenilen konsantrasyonu

C_1, C : Seyreltilecek boya çözeltisinin bilinen konsantrasyonu

Çözeltinin konsantrasyonunun ve miktarının belirlenmesi için yapılan hesaplamalarda kullanılan Q değeri, cebri borudan geçen ve santralin kurulu gücünün belirlenmesinde kullanılan nominal debi değeridir. IEC41 standartlarına göre ise hesaplamalarda kullanılmak üzere, karışım sonrası istenilen nihai boya çözeltisi konsantrasyonunun 5-10 $\mu\text{g/L}$ olması gerekmektedir (EÜAŞ, 2020).

2. Materyal ve Yöntem

Alpaslan-1 Hidroelektrik Santrali (HES) Murat Nehri üzerinde kurulmuş ve 2012 yılında enerji üretimine başlamıştır. Santral, Muş'un 50 km kuzeydoğusunda yer almaktadır ve T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Elektrik Üretim A.Ş. bünyesinde faaliyetlerini yürütmektedir. Santralde her biri 45 MVA gücünde olan dört ünite bulunmaktadır. Üniteler dikey Francis türbin-generatör tipindedir. Generatörlerin üretim tarihi 2004 iken, türbinlerin üretim tarihi 2005'tir. Alpaslan-1 HES, baraj tipi depolamalı santraller sınıfındadır. Santral yarı batık, orta düşülü olarak yapılmıştır. Barajın toplam yağış alanı yaklaşık olarak 15 460 km^2 , toplam göl hacmi ise yaklaşık 3 milyar m^3 seviyesindedir.

Santrale ait şalt sahası 154 kV gerilime uyumlu çift bara sistemine göre tasarlanmıştır. Şalt sahası çıkışında, farklı yerlerdeki TEİAŞ trafo merkezlerini besleyen 3 adet 154 kV enerji iletim hattı mevcuttur. Santralde iki adet iletim kanalı-cebri boru mevcuttur. Bu cebri borular santrale girişte pantolon tipine dönmektedir. Su alma ağzında bulunan giriş kapakları ile santral girişindeki ayrılma noktası arasındaki mesafeye göre cebri borunun uzunluğu yaklaşık olarak 270 m'dir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB, 2020). Alpaslan-1 HES'te 2015-2021 yılları arasında üretilen brüt ve net enerji miktarları Çizelge 1'de sunulmuştur.

Çizelge 1. Alpaslan-1 HES üretim değerleri (2015 -2021)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Brüt Üretim (MWh)	542 710.73	462 132.30	409 675.00	419 578.91	621 768.80	483 099.80	392 413.100
Net Üretim (MWh)	538 030.19	445 571.60	405 439.49	413 837.27	616 320.19	478 965.94	388 633.630

Alpalsan-1 HES'in türbin ve senkron generatör tasarım değerleri aşağıdaki gibidir.

<u>Türbin</u>		<u>Generatör</u>	
Tipi	:Dikey Francis	Türü	:Çıkrık kutuplu,
Nominal Gücü	: 41.75 MW	Kutup sayısı	: 12
Brüt/Nominal Düşü	: 82.5 m	Çıkış Gerilim	: 13.8 kV
Net Düşü	: 80.6 m	Verim	: %98.3
Nominal Türbin Debisi	: 55.4 m ³ /s	Nominal Çıkış Gücü	: 0.9 PF'de 45 MVA
Hız	: 250 d/d		
Verim	: %95.4		

2.1. Performans testlerinin yapılması

Hidrolik türbin performans testleri 16 ve 20 Nisan 2019 tarihleri arasında ünite-3'te gerçekleştirildi. Testlerin noktaları/sıralaması Çizelge 2'de gösterilmektedir (ETKB, 2020).

Çizelge 2. Testlerin noktaları/sıralaması

Test Numarası	Ayar Kanadı Açıklığı (%)	Generatör Gücü (MW)	Yorumlama
0b	0	0	Devre Dışı Bırakma Kontrolü
3	85.3	43	Boya Testi
6	95.1	46.4	Boya Testi
8	75	38	Boya Testi
10	65	30.7	Boya Testi
0c	0.1	0	Devre Dışı Bırakma Kontrolü

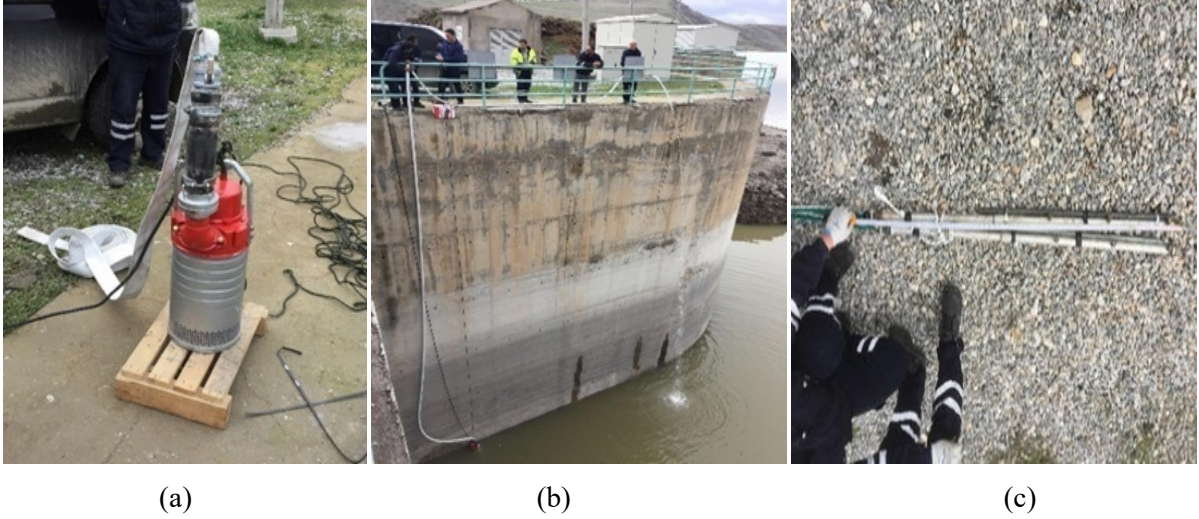
2.2. Boya seyreltme metodu ile debi ölçümü ve performans testlerinin yapılması

Alpalsan-1 HES'te yapılan testlerde;

- Cebri borudan enjekte edilen boya çözeltisi miktarı, çözeltinin ağırlığı tartılarak belirlendi.
- Yapay izleyici olarak hazırlanan boya çözeltisinde, yoğunluğu sudan %10 daha yüksek olan Rhodamine WT floresan boya kullanıldı.
- Farklı ayar kanat açıklıklarında toplamda 4 defa testler gerçekleştirildi. Testler %65-%95 ayar kanat açıklıkları arasında yapıldı. Ayar kanat açıklıkları ile ilgili ayarlamalar santral kumanda odasından yönetildi.
- Santraldeki testler, sabit enjeksiyon yolu kullanılarak testler yapıldı. Testlerdeki ölçümler normal işletme aralığında gerçekleştirildi.
- Ünitenin devreye alınması, çıkarılması vs. gibi manevralar santral kontrol kumanda odasından yapıldı. Testte verilerin toplanması ve santral, ünite gibi diğer verimliliklerin hesaplanması işlemleri ünite 3'te kurulu olan Verim İzleme Sistemi (Efficiency Monitoring System (EMS)) kullanılarak gerçekleştirildi.

2.2.1. Boya çözeltisinin enjekte edilmesi

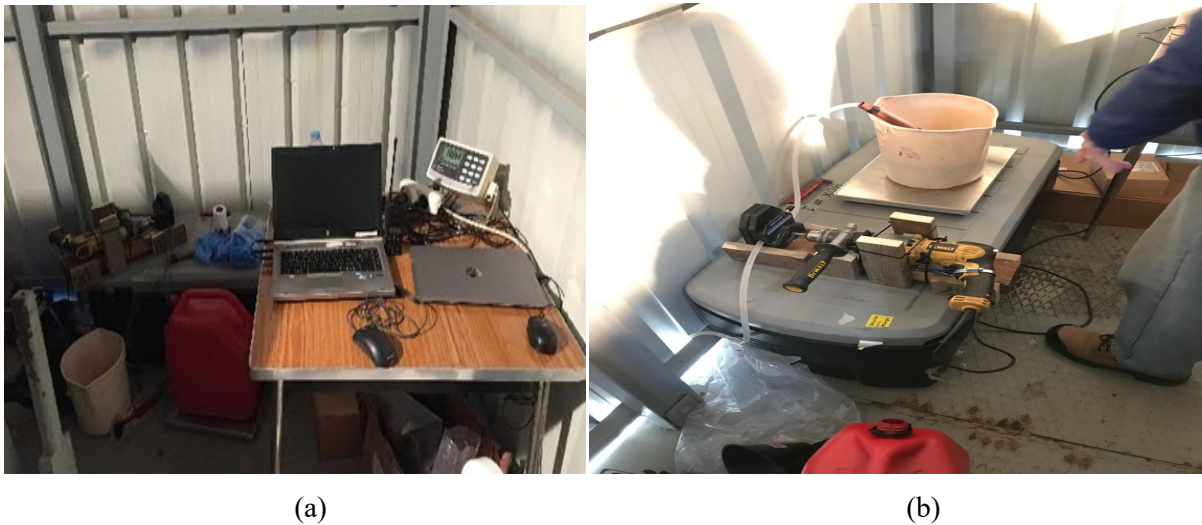
Testlerde, boya çözeltisinin enjeksiyonunun cebri borunun girişinden gerçekleştirilebilmesi için sabit akışlı dalgıç tipi bir su pompası kullanıldı. Pompa, boya çözeltisi ile suyun ön karışımının olacağı monifolda baraj rezervuar alanındaki suyun gönderilmesini sağlayacak şekilde kuruldu. Sabit akışlı dalgıç tipi pompanın çıkışına 30 m uzunluğunda bir hortum yerleştirildi. Hortumun diğer ucu ise ön karışımın gerçekleşeceği monifolda bağlandı. Daha sonra pompa kontrollü bir şekilde baraj rezervuar seviyesinde suya daldırıldı. Burada pompa çalıştırılarak baraj gövdesindeki mevcut suyun monifolda gönderilmesi ve böylece ilk karışımın gerçekleştirilmesi sağlandı. Bu yöntem boya çözeltisinin daha hızlı ve kontrollü karışımını sağlamaktadır. Sabit akışlı dalgıç tipi pompa, pompanın ucuna yerleştirilmiş olan hortum ve pompanın rezervuar alanındaki yerleşim yeri Şekil 4'te gösterilmiştir (ETKB, 2020).



Şekil 4. (a) Dalgıç tipi pompa (EÜAŞ, 2020), (b) Pompanın yerleşim yeri (ETKB, 2020), (c) Boya enjeksiyon boruları (ETKB, 2020).

Enjeksiyon manifoldunun giriş uçlarından biri baraj rezervuar alanından su gönderen dalgıç tipi pompaya bağlı iken diğer ucu boya çözeltisinden gelen sabit akışlı pompaya bağlıdır. Manifoldun çıkış kısmında da iki adet uç vardır. Bu çıkışlara cebri borunun merkezine kadar indirilecek olan hortumlar bağlandı. Her hortumun başına enjeksiyon boruları yerleştirildi. Boruların boyları 1.5 m uzunluğundadır ve çözeltinin su ile iyice karışması için üzerinde birçok nozul bulunmaktadır. Boya enjeksiyon borusu Şekil 4'te gösterilmiştir. Enjeksiyon boruları cebri boru girişine enerji kapaklarının bulunduğu yerden gönderildi. Şekil 6(a)'da bu durum gösterilmiştir.

Test başlamadan önce 1 L'lik bir deney balon joesi içerisinde 1/3 oranında rodamin boya, 2/3 oranında su olacak şekilde karışım yapıldı. Bu karışımın suyun yoğunluğu 998 g/L, boyanın yoğunluğu ise 1 022 g/L olarak ölçüldü. Boya enjeksiyon oranının hassas olarak ölçülebilmesi için 20 L'lik bir boya çözeltisi kabı hazırlandı ve hassas bir tartıya oturtuldu. Kap içerisindeki boya çözeltisi ön karışımın olduğu manifolda sabit akışlı bir pompa aracılığı ile gönderildi. Hesaplamalarda kullanılan boya enjeksiyon debisi, birim zamana oranla enjekte edilen boyanın ağırlığının veya hacminin bilinmesi ile hesaplanmaktadır. Bu nedenle gözlem istasyonunda tartı üzerinde bulunan çözelti değeri, test aşamasında sürekli bir şekilde takip edildi. Cebri boru girişine enjekte edilen boya çözeltisinin enjeksiyonunu izlemek için kurulan istasyon ve çözeltinin sabit debide enjekte edilmesinde kullanılan yöntem Şekil 5'de gösterilmiştir (ETKB, 2020).

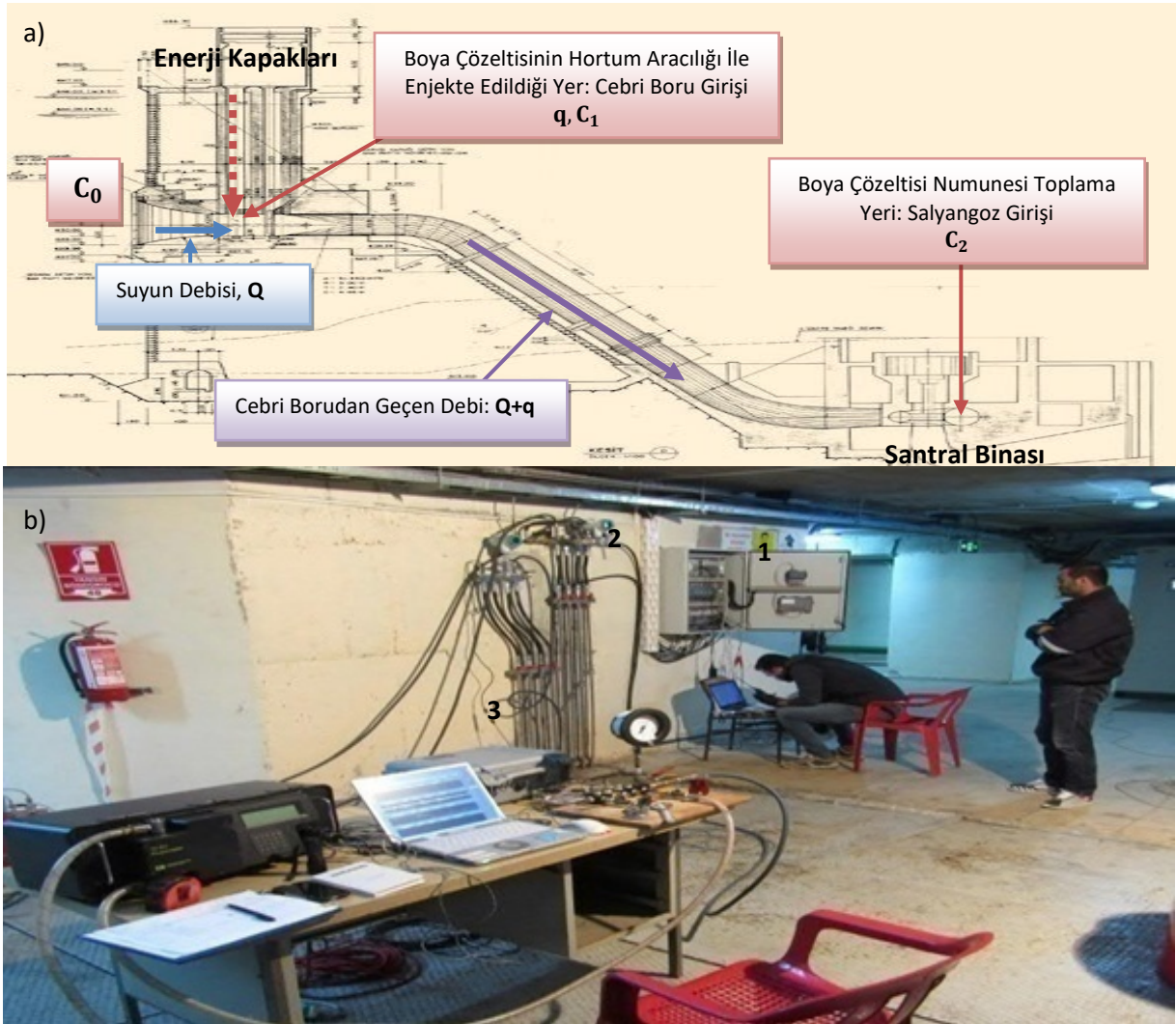


Şekil 5. (a) Boya çözeltisi enjeksiyonu izleme istasyonu, (b) Boya çözeltisi enjeksiyonu (ETKB, 2020).

2.2.2. Boya çözeltisi örneklerinin toplanması

Santraldeki mevcut düzende, cebri boru girişi ile pantolon kısmına kadar olan mesafe yaklaşık 270 m'dir. Boya seyreltme metodunda çözeltinin karşımı için bu mesafe, yeterli bir uzunluk olarak değerlendirilmiştir.

Genel bir tasarım modeli olarak, santrallerin kurulum aşamasında, salyangozun giriş kısmına aralarında 90 derecelik açı bulunacak şekilde 4 adet basınç tapası yerleştirilmektedir. Bu tapalardan çekilen hortumlar bir kolektör yardımı ile basınç sensörlerine bağlanmaktadır. Bu sensör salyangoz girişindeki basınç değerini bar seviyesinde ölçmektedir. Ölçülen bu değer, verim izleme sistemi için, özellikle de net düşünün hesaplanmasında kullanılmaktadır. Salyangoz girişinde basınç tapalarının olmadığı eski santrallerde ise, daha sonra yapılan çalışmalar ile bu tapalar yerleştirilebilmektedir. Salyangozun girişine yerleştirilmiş tapalar aracılığı ile salyangoz girişindeki basıncı ölçen sensör, ünite-3 üzerinde kurulmuş olan verim izleme sistemine ait pano, numune alma istasyonu (ETKB, 2020), boya çözeltisinin enjeksiyon noktası ve numune toplama yeri (Özbek, 2022) Şekil 6'de gösterilmiştir.



Şekil 6. (a) Boya çözeltisinin enjeksiyon noktası ve toplama yerinin gösterimi (Özbek, 2022), (b) Verim izleme sistemi panosu (1), basınç ölçüm sensörleri (2), numune toplama istasyonu (3) (ETKB, 2020).

Boya testlerinde salyangozun girişinde bulunan basınç tapaları kullanılarak hem rodamin-wt floresan boyanın geçişi izlendi, hem de ölçümlerde kullanılmak üzere örnek çözeltiler bu tapalar üzerinden toplandı. Testler esnasında, florometre cihazı salyangoz girişindeki tapalardan gelen hortumlara bağlandı ve test başlamadan önce cihaz sürekli akış izleme modunda çalışacak şekilde ayarlandı. Verilerin anlık ve gerçek zamanlı izlenebilmesi için bir PC kullanıldı. İlk etapta suyun

içerisindeki floresan seviyesinde bir artışın meydana geldiği gözlemlendi. İlerleyen dakikalarda, bu floresan seviyesinin sabit bir platoya ulaştığı görüldü. Sabit platonun oluşması boya çözeltisinin su içerisinde tam bir karışıma girdiğini gösterdiği için bu anlarda debi ölçümünde kullanılacak olan numuneler alınmaya başlandı. Yaklaşık 2 dakika içerisinde 8 şişe numune alındı. Daha sonra sudaki floresan seviyesinin düşmeye başladığı gözlemlendi. Floresan seviyesindeki düşüşün başlaması ile numune alımı durduruldu. Nihayetinde floresan boya çözeltisinin suyun içerisindeki karışımının tamamen bittiği görüldü. Florometre cihazı bu aşamada sadece sudaki floresansı yani boya çözeltisini tespit etmek ve numune alınacak olan anı belirlemek için kullanılmıştır.

2.2.3. Boya çözeltisi örneklerinin analizi

Toplanan örneklerin konsantrasyonlarının karşılaştırmalı bir analiz ile tespit edilmesi için florometrik analiz gerçekleştirildi. Alınan örneklerin sıcaklığının, daha önce hazırlanan standart çözeltiler ile aynı seviyede olması için örnek ve standart çözeltiler sıcaklık banyosu kabına yerleştirildi. Testlerden önce ve sonra alınan enjeksiyon solüsyonu örnekleri kullanılarak iki grup halinde bağımsız olarak standart solüsyonlar hazırlandı. Bu solüsyon bilinen miktarda ve bilinen seviyede boya (floresan) içermektedir. Standartlar kullanılarak florometre cihazı kalibre edildi. Daha sonra ise konsantrasyonlarını belirlemek üzere salyangoz girişinden alınan örnek boya-su karışımı çözeltilerinin analizleri yapıldı.

2.3. Verim izleme sistemindeki hesaplamalarda kullanılan ölçümler

Göl Suyu Seviyesi Ölçümü: Göl seviyesi kotunu belirlemek için santralin kurulumunda yerleştirilmiş olan cihaz kullanıldı.

Türbin Giriş Basıncı Ölçümü: Türbin giriş basıncı, türbin girişindeki dört basınç piezometre hattına bağlanmış olan EMS basınca duyarlı manifolda ölçüldü. EMS basınç sensörüne yedek olarak, Hatch, 200-psi basınca kalibre edilmiş bir geçici transdüser kullanıldı.

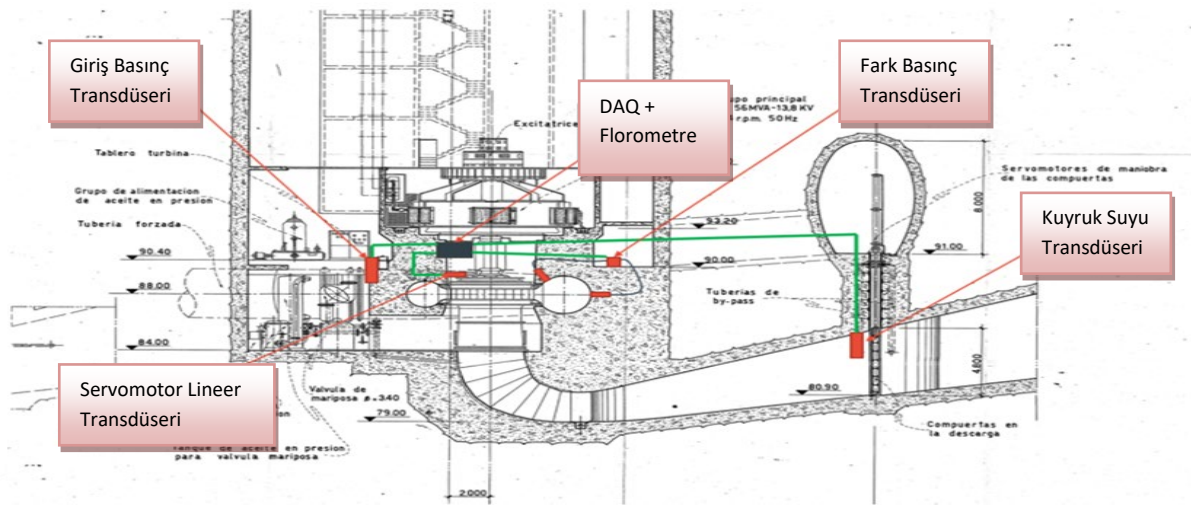
Kuyruk Suyu Seviyesi Ölçümü: Daldırılabilir tipi seviye sensörü kullanılarak, kuyruk suyu seviyesi ölçüldü.

Ayar Kanadı Pozisyon Ölçümü: Her test için verim ölçüm sistemi ile hız regülatörü kontrol panosunda bulunan panelden gerçek zamanlı ayar kanadı verileri alındı. Bu iki değer arasında uygunluk görüldü.

Çıkış Gücü Ölçümü: Her test için verimlilik izleme sisteminde alınan değerler ile hız regülatörü panosu panelinden alınan değerler kaydedildi. İki değer arasında uygunluk görüldü.

Debi Ölçümü: Türbin debisi, boya seyreltme yöntemi kullanılarak ölçüldü.

Winter-Kennedy Diferansiyel Fark Basıncı Ölçümü: Boya testlerinde bu değer kullanılmamıştır. Verim İzleme Sisteminde endeks testleri ile debi hesaplanmasında gerekli olan bir ölçümdür. Verilerin alındığı sensörlerin yerleri şema Şekil 7'de verilmiştir (Westermann, 2021).



Şekil 7. Verilerin alındığı sensörlerin yerlerini gösteren şema (Westermann, 2021).

Çıkış sinyalleri, LabView yazılımını kullanan bir veri toplama programının çalıştığı dizüstü bilgisayara bağlı bir analog-dijital dönüştürücü kullanılarak elektronik olarak kaydedilmiştir. Veriler 10 Hz hızda yaklaşık 12 saniye boyunca örneklenmiştir. Daha sonra test parametreleri hesabı için bu verilerin ortalaması alınmıştır. Testlerde kullanılan veri toplama cihazı (DAQ), biri sekiz 20-mA kanallı, diğeri 32 ± 200 -mV kanallı iki harici 16-bit analog-dijital modülden oluşmaktadır.

3. Bulgular

Alpaslan-1 HES'te ünite-3'te yapılan her boya testinde, salyangoz girişinden her seferinde 8 tane kap olacak şekilde alınan boya-su karışımı numunelerinin tamamı florometrik analizlere tabi tutuldu. Santralin debisinin ölçümü için yapılan ilk testte alınmış olan boya çözeltisi numunelerinin analiz sonuçları ve debi ölçümü Çizelge 3'te verilmiştir (ETKB, 2020).

Çizelge 3. İlk teste ait boya çözeltisinin florometrik analizi ve debi ölçümü (ETKB, 2020)

Test	Alpaslan-1 HES Ünite 3 /Boya Seyreltme Metodu ile Türbin Debi Ölçümü						
Analiz Tarihi	19-20 Nisan 2019						
Kalibrasyon Standardı	6.22 ug/L						
Numune	Konum	Analiz Zaman	Florometre Okumaları (ug/L)	Sıcaklık (°C)	*Kalibrasyon Düzeltmesi (ug/L)	**Net Okuma (ug/L)	Notlar
Standart	İlk		6.35				
Standartlar İçin Kullanılan Su			0.25				
	D/s arka planı		0.25				
1	S/C Giriş Musluğu 4	08:15	4.08	18.70	0.981	4.00	Başlama 09.15
2	S/C Giriş Musluğu 4	08:17	4.09	18.70	0.982	4.02	
3	S/C Giriş Musluğu 4	08:18	4.08	18.60	0.983	4.01	
4	S/C Giriş Musluğu 4	08:19	4.15	18.60	0.984	4.08	
5	S/C Giriş Musluğu 4	08:21	3.68	18.70	0.985	3.63	Aykırı Değer
6	S/C Giriş Musluğu 4	08:22	3.93	18.70	0.987	3.88	
7	S/C Giriş Musluğu 4	08:24	4.13	18.70	0.988	4.08	
8	S/C Giriş Musluğu 4	08:27	4.19	18.60	0.989	4.14	
Standart	Son	08:29	6.29	18.90			
	Ortalama Konsantrasyon					4.03 ug/L	
	%95 Güven Seviyesinde					0.08 ug/L	
	Güven Aralığı/Ortalama					1.92 %	
*Standarda göre kalibrasyon düzeltmesi							
**Net Okuma = (Florometre okuması x Kalibrasyon düzeltmesi) + Musluk suyu - D/S arka planı							
Debi Hesabı							
	q=	245.63	mL/min	+/-	0.50 %		
	C=	5.6500E+07	ug/L				
	c=	4.03	ug/L	+/-			
	Q=	2028.1	cfs	+/-	1.99 %		
		57.45	m ³ /s				
Enjeksiyon Çözeltisinin Yoğunluğu		1.0220					

Boya seyreltme metodu ile kullanılarak yapılan testlerde elde edilen örnek çözeltilerin analizi ile türbin debisi $57.45 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak ölçüldü. Testlerde, kalibrasyon için kullanılan standart çözeltinin yoğunluğu 6.22 ug/L olarak alındı ve örnek çözeltinin yoğunluğunun ortalama değeri 4.03 ug/L olarak bulundu. Numune ve standart çözeltilerin sıcaklıkları yaklaşık $19 \text{ }^\circ\text{C}$ de tutulmuştur.

$$V^2/2g \quad (9)$$

5. Türbin girişindeki musluklardaki enerji çizgisi (m) = (T3) + (T4).
6. Emme borusu çıkışındaki statik düşü (m), elle mezura daldırılarak ölçülmüştür.
7. Emme borusu çıkışındaki hız düşüsü, türbin deşarjı ve en kesit alanı kullanılarak hesaplanmıştır (m).
8. Emme borusu çıkışındaki enerji çizgisi (m) = (T6) + (T7).
9. Generatör Gücü, santraldeki çok fonksiyonlu ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür (MW).
10. Türbin debisi (m³/s)
11. Benzer makinelerin performans garantilerinden alınan generatör verimi değeri (%)
12. Türbin Net düşüsü (m) = (T5) - (T8)
13. Türbin Brüt düşüsü (m) = (T2) - (T6)
14. Düzeltilmiş Generatör Gücü,

$$P_{\text{düzeltilmiş}} = P_{\text{gen}} \left(\frac{H_{\text{nominal net}}}{H_{\text{ölçülen net}}} \right)^{1.5} \quad (10)$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

15. Düzeltilmiş Türbin Debisi,

$$Q_{\text{düzeltilmiş}} = Q \left(\frac{H_{\text{nominal net}}}{H_{\text{ölçülen net}}} \right)^{0.5} \quad (11)$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

16. Düzeltilmiş Net Düşü (m), Hrated
17. Brüt Düşüye Göre Düzeltilmiş Generatör Gücü

$$P_{\text{düzeltilmiş}} = P_{\text{gen}} \left(\frac{H_{\text{nominal brüt}}}{H_{\text{ölçülen brüt}}} \right)^{1.5} \quad (12)$$

formülü kullanılarak hesaplanmıştır.

18. Santral verimi (%) - aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Santral verimi} = \frac{(T9)}{\rho g (T13)(T10)} \quad (13)$$

19. Ünite verimi (%) - aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Ünite verimi} = \frac{(T9)}{\rho g (T12)(T10)} \quad (14)$$

20. Türbin verimi (%) - aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\text{Türbin Verimi} = \frac{(T19)}{(T11)} \quad (15)$$

Tablodaki hesaplamaları yapmak için kullanılan yukarıdaki denklemlerde (T9), (T10), (T11), (T12), (T13), (T19) olarak belirtilen numaralar, tablodaki sütün numaralarıdır.

Aşağıdaki formül kullanılarak generatörde meydana gelen kayıplar ve şaft milindeki aktif güç hesaplanmıştır.

$$P_{\text{şaft}} = P_{\text{gen}} + P_{\text{kayıp}} \quad (16)$$

Buna göre;

$$P_{\text{kayıp}} = AP_{\text{gen}}^2 + BP_{\text{gen}} + C \quad (17)$$

Burada, A, B, C santral kurulumunda elde edilmiş olan verim eğrisinden elde edilen sabitler olup, $A = -4.167 \times 10^{-4}$, $B = 8.583 \times 10^{-2}$, $C = 93.9$ olarak alınmıştır.

Boya testlerinde en yüksek türbin verim noktasına %74.96 ayar kanadı açıklığında, 51.09 m³/s debide, 73.81 m net düşüde ulaşılmıştır. Türbinin verimi bu noktada %91.9 iken, elde edilen generatör çıkış gücü ise 37.88 MW olmuştur. Her bir test çalışmasında elde edilen türbin test sonuçları, test kanununa göre yakınlık yasaları kullanılarak, ölçülen gerçek net düşü değerinden santralin nominal (tasarım) net düşü değeri olan 80.6 m nominal net düşü değerine düzenlenmiştir.

Testlerde en iyi türbin verimliliği değerinde ünite verimi %90.0, santral verimi %89.1, generatör verimi de %97.9 olarak hesaplanmıştır. En düşük ayar kanat açıklığında, yani %65.03 değerinde türbin verimliliğinde %3'lük bir kaybın olduğu; en yüksek ayar kanat açıklığında ise yani %95.11'de türbin verimliliğinde %1.6'lık bir kaybın olduğu gözlemlenmiştir. Santral ve ünite verimi türbin verimliliği ile doğrusal orantılıdır. Türbindeki verim artışı doğrudan ünite ve santral verimliliğinin de artması anlamına gelmektedir.

Generatör çıkış gücü ise debi ile dolayısı ile ayar kanat açıklığı ile doğru orantılıdır. En yüksek generatör çıkış gücü, en yüksek türbin, santral, ünite verimliliği anlamına gelmemektedir. Testlerde en yüksek generatör çıkış gücüne %95.11 ayar kanat açıklığında, 63.07 m³/s debide ulaşılmıştır. 80.6 m net düşüye göre düzenlenmiş sonuçlara göre generatör çıkış gücü 46.23 MW olmuştur. Burada generatör verimi %98.2 olarak hesaplanmıştır. Bu, %98.2 oranındaki bir generatör verimine göre türbin çıkışı şaftındaki türbin çıkış gücünün 47.07 MW olduğu anlamına gelir. Bu çıkış gücünde santral verimi %87.1, ünite verimi %88.6, türbin verimi %90.3 olarak ölçülmüştür. Düşü, nominal düşünün altında olduğundan ve türbin de hala nominal gücüne ulaşabildiğinden, türbinde gelecekte kullanılacak ek güç bulunmaktadır. Ancak generatör ve diğer bileşenlerin yükseltilmesi gerekebilir. Alpaslan-1 HES'te ünite-3'te yapılan türbin saha performans testleri sonuçlarının özeti Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Türbin saha performans testlerinin sonuçlarının özeti

	En İyi Verimde (Tek Ünite)	En büyük Güçte
Türbin Verimi (%)	91.9	90.3
Kanat açıklığı (%)	74.96	95.11
Generatör Çıkış Gücü (MW)	37.88	46.23
Ünite Debisi (Normalleştirilmiş)	53.39	66.19
Ünite Debisi (Ortalama Ölçülen)	51.09	63.07
Net Düşü (normalleştirilmiş)	80.60	80.60
Net Düşü (Ortalama Ölçülen)	73.81	73.19
Generatör Verimi (%)	97.9	98.2
Ünite Verimi (%)	90.0	88.6
Santral Verimi (%)	89.1	87.1

Yapılan ölçümlerde generatör verimi %98.2 olarak hesaplanmıştır. Bu da 2012 yılında devreye alınmış olan ünitenin geçen süre zarfında sadece %0.1'lik gibi çok düşük bir kayıp yaşadığı anlamına gelmektedir. Generatör verimi genellikle %97.0 ila %98.5 arasında değişiklik göstermekte olup zaman içinde önemli bir düşüş sergilemez. Generatörün göstergeleri izlenerek genellikle yaklaşmakta olan sorunlar tespit edilir ve kaybı yakından izlemek yerine koruyucu bakım önlemleri uygulanır. Türbin performans testleri, türbinin mevcut veriminin orijinal ekipman üreticisinin belirlediği %95,4'lük tasarım pik performans değerinin yaklaşık %3.5 altında olduğunu göstermiştir. Salyangoz, emme borusu, türbin çarkı ve çark kanatları, ayar kanatları, sabit kanatlar kayıpların meydana geldiği yerlerdir. Emme borusu kayıpları genel olarak %1'in altında küçük oranlardadır. Ancak zaman içerisinde kayıplarda %0.3'lük bir artış olması beklenir. Genellikle santralin türbin kayıplarının yılda %0-0.15 arasında olması beklenir (ETKB, 2020). Santrallerde su giriş ağzındaki kayıplar genel olarak ihmal edilir. Ancak giriş ızgarasında organik madde veya çöp birikintisi düşü kayıplarına neden olabilmektedir. Trafo ve şalttaki kayıplar şiddet olarak nispeten düşüktür ve zaman içinde önemli bir ilerleme eğilimi göstermez.

3.1. Belirsizlik oranının değerlendirilmesi

Testin doğruluğunu tahmin etmek amacıyla bir belirsizlik analizi yapılmıştır. Verim ölçüm testlerindeki belirsizlik, ölçülen niceliklerin belirsizliklerinin kareleri toplamının karekökü alınarak hesaplanmaktadır.

$$F_{eff} = (F_q^2 + F_e^2 + F_p^2)^{0.5} \quad (18)$$

Burada;

- F_q: Deşarj ölçümündeki bağıl belirsizlik
- F_e: Spesifik hidrolik enerjideki bağıl belirsizlik
- F_p: Güç ölçümündeki bağıl belirsizlik

Sıralanan üç bileşen rastgele ve sistematik belirsizlik analizine tabi tutularak genel verim belirsizliği hesaplanmaktadır. Buna göre yapılan hesaplamalarda; F_q: %2, F_e:% 0.19, F_p: %1.33 olarak bulunmuştur. Böylece genel verim belirsizliği F_{eff}: %2.41 olarak tahmin edilmiştir (ETKB, 2020). En yüksek bileşen belirsizliği debi değerindedir. Belirsizliğin, boya testlerindeki kabul edilebilir belirsizlik aralığından yüksek çıkmasının başta boya karışımı için kullanılabilir cebri boru uzunluğu olmak üzere santralin fiziksel yerleşim düzenine ve taşıma sisteminin karmaşıklığına bağlı olduğunu belirtmek gerekir. Boya testlerinde genel olarak belirsizliğin %1-1.5 arasında olması istenmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Ülkemizde bulunan HES'lerin yaşlarının artması ve santral teçhizatlarında çeşitli nedenlerle oluşan kayıplar, santralde verimlilik ve performans düşüşlerine neden olmaktadır. Santraldeki kayıplar su alma ağzında, generatörde, şalt tesislerinde ve türbinde meydana gelmektedir. En büyük kayıplar türbinde olmaktadır. Diğer kayıplar, olağanüstü bir gelişme yaşanmaması halinde, genellikle 20-30 yıllık işletme sürecinden sonra göz önüne alınmaktadır. Bu kapsamda, 2012 yılında devreye alınmış olan Alpaslan-1 HES'te boya seyreltme metodu kullanılarak yapılan performans testleriyle tesiste bulunan elektrik ve mekanik ekipmanın mevcut durumu, ünitelerin kapasitesi, enerji verimliliğini ve güvenilirliğini artırma fırsatları, tesislerinin hizmet ömürleri süresince enerji verimliliğinde yapılabilecek iyileştirmeler değerlendirilmiştir. Çalışmada santraldeki bir ünitenin performansı ölçülmüş, hidrolik enerjiden elektrik enerjisine dönüşümün bir incelemesini gerçekleştirilmiştir.

Ulaşılan sonuçlara göre, Alpaslan-1 santralindeki türbin-jeneratör üniteleri tamamen işlevseldir ve türbin çarklarının durumu genel olarak iyi durumdadır. Ancak Ünite-3'te türbinin hemen altındaki emme borusu üst bandında oldukça yaygın bir kavitasyon oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu hasarın ilerlememesi için onarılması gerekmektedir. Türbinlerde bazı yağ kaçakları gözlemlenmişse de bu sorunların şu anda jeneratör çıkış gücünü etkilediği düşünülmektedir. Bu problemler, zorunlu kesintilerde ciddi bir artışa neden olmamakla birlikte, üretimi de olumsuz bir şekilde etkilememektedir. Hız regülatörü ciddi bir çalışma ya da bakım sorunu olmaksızın düzgün çalışmaya devam etmektedir. Jeneratörler ve yardımcı sistemler iyi durumdadır. Yapılan performans testlerinde, santralin devreye alındığı yıldan, testlerin yapıldığı 2019 yılına kadar geçen sürede santral ekipmanlarında verim kayıpları yaşandığı görülmüştür. Ünite-3'te yapılan testlerin sonuçları santralin tasarım değerleri ile kıyaslandığında, generatörde %0.1'lik bir kayıbm, Dikey Francis tipi türbinde ise %3.5'lik bir kayıbm meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu sonuçların daha net anlaşılabilmesi için farklı metodların kullanıldığı mutlak veya endeks testleri ile teyit edilmesine ihtiyaç vardır.

Santralin veriminin korunması veya artırılması için, su alma ağzı yolunda bulunan ızgaraların sürekli temiz tutulması, su geçişinde zaman içinde oluşan düşü kayıplarının izlenmesi, generatörlerde yalıtımlardaki bozulmaları belirlemek, takip etmek, kısmi deşarj durumunu ölçmek için yıllık detaylı incelemelerin yapılması gibi çalışmalar yürütülmelidir. Verimliliğinin takibi için, santralde kaydedilen düşü, debi ve güç değerleri incelenerek santral verimliliği teorik olarak hesaplanmalı ve elde edilen sonuçlar santralin başlangıç değerleri ile kıyaslanarak analiz edilmelidir. Ayrıca periyodik aralıklarla saha da performans testleri yapılmalıdır. Verimliliği artırıcı faaliyetler için maliyet analizleri yapılmalı ve oluşan tabloya göre aksiyonlar geliştirilmelidir.

Sonuç olarak, yapılan bu saha çalışması ile mevcut hidrolik santralin bir ünitesinde boya seyreltme metodu kullanılarak debi ölçümü ve mutlak testler gerçekleştirilmiş, santralin performansı gözlemlenmiştir. Daha önce kurulumu yapılmış olan verim izleme sistemi de kullanılarak türbin, generatör, ünite, santral verimlilikleri hesaplanmıştır. Boya seyreltme metodu kullanılarak elde edilen debi ile Winter-Kennedy akış sabiti bulunmuş, böylece ünite-3'ün veriminin sürekli takibinin yapılması sağlanmıştır. Bu çalışmaların santraldeki diğer ünitelerde de yapılması önem taşımaktadır. Verimliliğinin anlık olarak ölçülebildiği ve izlenebildiği santrallerde, bakım ve onarım çalışmaları ile santral bileşenlerine doğru müdahaleler yapılabilecek olması, santraldeki kestirimci bakımlar için aksiyon geliştirmeyi kolaylaştıracak olması konunun önemini ortaya koymaktadır. Ülkemizde daha önce böyle bir çalışmaya rastlanılmadığı ifade edilmelidir. Bu çalışmanın, santrallerimizde boya testi veya diğer mutlak ve endeks testleri ile yapılan performans testlerinin yaygınlaşmasına öncülük etmesi ve bu testlerin daha etkin kullanılması için teşvik edici olması umulmaktadır.

Teşekkür

Bu çalışmaya vermiş olduğu desteklerden dolayı, EÜAŞ Genel Müdürlüğüne (Ankara) teşekkür ederiz.

Kaynakça

- Anadolu Ajansı (AA). (2021). Türkiye, hidroelektrik kurulu gücünde dünyada ilk 10 ülke arasında bulunuyor. <https://www.aa.com.tr/tr/ekonomi/turkiye-hidroelektrik-kurulu-gucunde-dunyada-ilk-10-ulke-arasinda-bulunuyor/2352223> Erişim tarihi: 20.04. 2022.
- Arcaklıoğlu, E., & Özcan, H. (2022). Enerji, Çevre ve Sürdürülebilirlik. İ. Dinçer & M. A. Ezan (Eds.), *Enerji: Kavramlar ve Uygulamalar* (s.849-910). Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları doi:10.53478/TUBA.978-625-8352-00-9
- British Petroleum (BP). (2023). BP Energy Outlook 2022 Edition. Britanya: British Petroleum <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> Erişim tarihi: 01.07.2023.
- Chang, M. (2003). *Forest Hydrology: An Introduction to Water and Forests*. Boca Raton, USA: CRC Press.
- Cyrenne, M. (2002, July). *Flow measurement using the dye dilution technique*. IGHM 2002 International Conference, Toronto.
- Devlet Su İşleri (DSİ). (2021). 2020 Yılı Faaliyet Raporu. Ankara: Devlet Su İşleri <https://cdnys.tarimorman.gov.tr/api/File/GetFile/425/KonuIcerik/759/1107/DosyaGaleri/DS%C4%B0%202020-yili-faaliyet-raporu.pdf> Erişim tarihi: 14.10.2021.
- Dinçer, İ. (2022). Termodinamik Kavramlar ve Yöntemler. İ. Dinçer, & M. A. Ezan (Eds.), *Enerji: Kavramlar ve Uygulamalar* (s. 1-76). Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi Yayınları. doi:10.53478/TUBA.978-625-8352-00-9.ch01
- Dinçer, F., Atik, İ., Yılmaz, Ş., & Çingı, A. (2017). Hidrolik enerjisinden yararlanmada ülkemiz ve gelişmiş ülkelerin mevcut durumlarının analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 8(3), 555-561.
- Doğdu, M. Ş., & Yiğitler, O. (2010). Yüzey ve yeraltı suyu izleme teknikleri. *DSİ Teknik Bülteni*, 108, 1-12.
- Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ). (2020). *Enerji Verimliliğinde Temel Yaklaşımlar*. Ankara, Türkiye: EÜAŞ Yayınları.
- Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ). (2021). 2020 Yılı Faaliyet Raporu. Ankara: Elektrik Üretim A.Ş. <https://www.euas.gov.tr/yillik-raporlar> Erişim tarihi: 04.10.2021.
- Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ). (2022). Hidroelektrik santraller. <https://www.euas.gov.tr/santraller> Erişim tarihi: 20.04.2022.
- Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Dünya Bankası & Hatcd Ltd. (2020). *Alpaslan-1 HES türbin performans test raporu*. Elektrik Üretiminde Enerji Verimliliği Enerji Sektör Programı Faz 2 Proje Mühendislik Raporu, Proje No: H358793, 73 s, Ankara.
- Erol, E. (2007). *Türkiye'de elektrik enerjisinin tarihi gelişimi: 1902-2000*. (PhD), İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.

- Esen, Ö., & Bayrak, M. (2015). Enerji açığının belirleyicilerinin teorik perspektiften incelenmesi. *Anemon Muş Alparslan Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 3(1), 45-61.
- Esmer, O. (1996, Kasım). *Enerji Politikaları*. TMMOB 1. Enerji Sempozyumu, Ankara.
- Finn, P., Fitzpatrick, C., Connolly, D., Leahy, M., & Relihan, L. (2011). Facilitation of renewable electricity using price based appliance control in Ireland's electricity market. *Energy*, 36(5), 2952-2960. doi:10.1016/j.energy.2011.02.038
- Goyal, R., & Gandhi, B. K. (2018). Review of hydrodynamics instabilities in francis turbine during off-design and transient operations. *Renewable Energy*, 116, 697-709. doi:10.1016/j.renene.2017.10.012
- Gögebakan, M. E. (2019). *Hidrolik türbinlerin kanat yüzeylerinde kaviteasyon olayının incelenmesi*. (MSc), Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Şanlıurfa, Türkiye.
- Göğüş, M., Köken, M., & Baykara, A. (2013). *Su alma yapılarında girdap oluşumu ve önlenmesi için gerekli düzeneklerin belirlenmesi*. TÜBİTAK MAG Proje Raporu, Rapor No: 110M676, 86 s, Ankara.
- Güler, E. (2001). *Türkiye'de elektrik*. (MSc), İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü, İstanbul, Türkiye.
- Güneş Enerjisi Sanayicileri ve Endüstrisi Derneği (GENSED). (2022). TEİAŞ 2022 ocak ayı kurulu güç raporunu yayınladı. <https://www.gensed.org/basin/tei%CC%87as-2022-ocak-ayi-kurulu-guc-raporunu-yayinladi> Erişim tarihi: 20.04.2022.
- Kafalı, K. (2020). *Hidroelektrik bir santralin teorik ve gerçek performansının karşılaştırılması*. (MSc), Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye, Türkiye.
- Kavak, K. (2005). *Dünyada ve Türkiye'de enerji verimliliği ve Türk sanayisinde enerji verimliliğinin incelenmesi*. (Uzmanlık Tezi), Devlet Planlama Teşkilatı İktisadi Sektörler ve Koordinasyon Genel Müdürlüğü, Ankara.
- Kulin, G., & Compton, P. R. (1975). *A Guide to Methods and Standards for the Measurement of Water Flow* (13th Ed.). Washington D.C., USA: U.S. Department of Commerce, National Bureau of Standards.
- Liang, W. S., & Richardson, E. V. (1969). *Dye dilution method of discharge measurement*. Colorado State University Water Management Technical Report, Report No: 3(CER 69/70-45), 26 p, Colorado.
- Linguip. (2020). What is francis turbine. <https://www.linquip.com/blog/what-is-francis-turbine/> Erişim Tarihi: 07.12.2021.
- Muthukumar, U., Chandapilli, J., & Sasendra, S. (2010, October). *Flow measurement in hydroelectric stations using tracer dilution method-case studies*. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHM), Roorkee.
- Özbek, G. (2022). *Hidroelektrik santrallerinde enerji verimliliğine türbinin etkisi*. (MSc), Bitlis Eren Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bitlis, Türkiye.
- Özbek, G., & Rüstemli, S. (2022a). Hidrolik türbin performans testlerinin yapılmasında Winter-Kennedy metodunun kullanılması. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 9(22), 41-61. doi:10.5281/zenodo.6948331
- Özbek, G., & Rüstemli, S. (2022b, Nisan). *Hidroelektrik santrallerinde boya seyreltme metodu ile debi ölçümü ve türbin verimlilik testleri*. Bakü Avrasya Üniversitesi 30. Kuruluş Yılı Münasebetiyle Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, Bakü.
- Özgören, M., Köse, F., Aksoy, M. H., Canlı, E., Solmaz, Ö., Doğan, S., & Yağmur, S. (2012). *Konya'da yenilenebilir enerji kaynakları malzeme üretilebilirlik araştırması*. Konya Sanayi Odası-Mevlana Kalkınma Ajansı Raporu, Proje No: KSO/MEVKA/DFD2011/Hizmet 1 projesi, Konya.
- Pant, H. J., Biswal, J., Goswami, S., Samantray, J. S., & Sharma, V. K., Sarma, K. S. S., & Shukla, S. (2017, May-June). Development and application of radiotracer dilution technique for flow rate measurements. *BARC Newsletter*, 1-9. https://www.barc.gov.in/barc_nl/2017/20170506.pdf
- Sav, M. (2010). *Francis tipi hidrolik türbinlerde kaviteasyonun etkisi*. (MSc), Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elâzığ, Türkiye.
- U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation (USDA). (1997). *Water Measurement Manual* (3rd Ed.). Denver, USA: U.S. Government Printing Office

- Thapa, B. S., Dahlhaug, O. G., & Thapa, B. (2015). Sediment erosion in hydro turbines and its effect on the flow around guide vanes of francis turbine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 1100-1113. doi:10.1016/j.rser.2015.04.178
- Westermann, J. (2021, March). *Efficiency improvement*. EUAŞ IPA Training Program, Ankara.
- Yicaiglobal. (2020). China starts to install world's largest hydroelectric turbine. <https://www.yicaiglobal.com/news/china-starts-to-install-world-largest-hydroelectric-turbine>
Erişim tarihi: 19.01.2022.
- Yalılı Kılıç, M., & Adalı, S. (2023). Güneş enerjisi kullanarak bir villanın elektrik ihtiyacının karşılanması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(1), 121-130. doi:10.53433/yyufbed.1122428