



Boya seyreltme ve Winter-Kennedy metotları kullanılarak yapılan hidrolik türbin performans testlerinin karşılaştırmalı analizi-saha çalışması

Comparative analysis of hydraulic turbine performance tests using dye dilution and winter-kennedy methods- a case study

Gökhan Özbek^{1*}, Sabir Rüstemli²

¹ EÜAŞ Alpaslan-1 Hidroelektrik Santrali, Elektrik Bakım Başmühendisliği, gokhanozbek1986@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1160-1955>

² Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, rustemli@beu.edu.tr
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4957-1782>

MAKALE BİLGİLERİ

MakaleGeçmişi:

Geliş 27 Aralık 2024
Revizyon 27 Şubat 2025
Kabul 27 Mart 2025
Online 30 Haziran 2025

AnahtarKelimeler:

Winter-Kennedy Metodu,
Boya Seyreltme Metodu,
Performans Testi,
Debi Ölçümü,
Enerji Verimliliği

ÖZ

Performans testi, hidroelektrik santral verimliliğinin kabul edilemez seviyelere düşmediğinden emin olmak için mutlak yapılması gereken bir faaliyettir. Fabrika çıkışında beyan edilen garantileri kontrol etmek, mevcut durumun analizi ile olası revizyonları ve yatırım maliyetlerini belirlemek, türbin-generatör ünitelerinde verimli çalışma koşullarını aramak ve generatör güç çıkışını artırmak bu testlerin amaçları arasındadır. Bu çalışmada, boya seyreltme ve Winter-Kennedy debi ölçüm metotları kullanılarak bir türbin-generatör ünitesinde performans testleri yapılmıştır. Testler için üniteye Verim İzleme Sistemi kurulmuştur. Testlerden sonra sistem sürekli çalışma modunda bırakılarak, verim izlemenin anlık olarak devam etmesi mümkün kılınmıştır. Testler aynı çalışma ve işletme koşullarında, aynı zaman aralığında yapılmıştır. Böylece test sonuçlarının karşılaştırmalı analizine, testlerin doğruluklarının ölçülmesine imkân sağlanmıştır. Performans testlerinde, türbinde %3.5 oranında bir verim kaybının olduğu görülmüştür. Generatörde ise bu kaybın %0.1 oranında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Testlerde, brüt düşüye göre düzeltilmiş generatör gücü 47.7 MW olarak hesaplanmıştır. Buna göre, tasarım değeri 40 MW olan generatörün kapasitesinin artırılabilceği değerlendirilmiştir.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 27 December 2024
Received in revised form 27 February 2025
Accepted 27 March 2025
Available online 30 June 2025

Keywords:

Winter-Kennedy Metod,
Dye dilution Method,
Performance Test,
Flow Measurement,
Energy Efficiency

ABSTRACT

Performance testing is an activity that must be done to ensure that hydroelectric power plant efficiency does not fall to unacceptable levels. The objectives of these tests include checking the warranties declared at the factory, determining possible revisions and investment costs by analyzing the current situation, searching for efficient operating conditions in turbine-generator units and increasing generator power output. In this study, performance tests were conducted on a turbine-generator unit using dye dilution and Winter-Kennedy flow measurement methods. An Efficiency Monitoring System was installed in the unit for the tests. After the tests, the system was left in continuous operation mode, allowing instantaneous efficiency monitoring. The tests were conducted under the same operating and operating conditions and at the same time interval. Thus, comparative analysis of the test results and measurement of the accuracy of the tests were made possible. In the performance tests, it was observed that there was a 3.5% efficiency loss in the turbine. It was determined that this loss occurred at a rate of 0.1% in the generator. In the tests, the generator power corrected according to gross head was calculated as 47.7 MW. Accordingly, it was evaluated that the capacity of the generator with a design value of 40 MW could be increased.

DOI: 10.24012/dumf.1608410

* SorumluYazar

Giriş

Elektrik enerjisi hayatın vazgeçilmez bir parçası haline gelmiştir. Nüfus artışı, gelişen sanayi ve tüketim alışkanlıkları enerjiye olan ihtiyacı her geçen gün artırmaktadır [1]. Elektrik enerjisinin üretim potansiyeli ve üretimdeki kaynak çeşitliliği, kişi başı enerji üretimi/tüketimi ülkelerin gelişmişlik düzeyini gösteren bir faktör olarak kabul edilmektedir [2, 3]. Özellikle az gelişmiş ve gelişmekte olan devletler yaşam kalitelerini iyileştirmek ve rekabetçi dünyada hayatta kalmak için ulusal ekonomilerini güçlendirmeleri gerektiği yönündeki beklentileri karşılamak amacıyla, üretkenliği artırma konusunda baskı altındadır [4].

İkincil bir enerji çeşidi olarak elektrik, dünyada en çok kullanılan enerji formlarındandır. Elektrik enerjisi kömür, petrol, doğalgaz, nükleer güç ya da yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak elde edilmektedir. Hidrolik güç yenilenebilir enerji kaynakları arasındadır [5, 6]. Hidrolik gücün kaynağının su olması ve evrende su döngüsünün kesintisiz gerçekleşmesi, bu gücü tükenmez yapmakta [7, 8]; suyun karbon molekülü içermemesi, çevreyi ve havayı kirletecek kimyasal atıklara sebebiyet vermemesi ise bu gücü temiz enerji kılmaktadır [9]. Hidrolik güç kullanılarak elektrik enerjisinin elde edildiği tesisler olan hidroelektrik santralleri ise, termik santraller gibi fosil yakıt kaynaklı santrallerin yaklaşık iki katı oranında, %85-90 verimlilikle çalışan santrallerdir. Dünyadaki toplam tüketilen katı yakıtların %10'undan fazlasının tüketildiği termik santrallerin alternatifi olabilecek enerji tesislerin başında bu santraller gelmektedir. Bu santrallerin mevcut durumda bile termik santrallerde atık olarak üretilen cürufun en az 586 milyon ton daha az olmasını sağladığı tespit edilmiştir [10-11].

2015 yılı verilerine göre dünyada toplamda 62500 adet HES bulunmaktadır [12, 13]. Dünya genelinde kurulu HES gücü 2023 yılında 1412 GW olmuştur [14]. 2023 yılında dünya genelinde 29479.05 TWh elektrik enerjisi üretilmişken, bunun %14.28'i yani 4211.01 TWh'lık kısmı hidroelektrik santrallerinden karşılanmıştır [15]. Ülkemizde 2024 yılı Ağustos ayı itibarıyla elektrik enerjisi kurulu gücü 113932 MW olmuştur. Bunun %28.3'lük kısmını hidrolik enerji oluşturmaktadır. Bu dönemde elektrik enerjisi üretim santrali sayısı, lisanssız santraller ile birlikte 31241'e yükselmiştir. Güneş santralleri 29163 adet ile en yüksek orana sahip iken, hidroelektrik santraller 764 adetle ikinci sıradadır. Türkiye elektrik enerjisi tüketimi 2023 yılında bir önceki yıla göre %1.2 oranında artarak 335.2 TWh, elektrik üretimi ise bir önceki yıla göre %0.8 artarak 331.1 TWh olarak gerçekleşmiştir [16]. 2023 yılında üretilen elektrik enerjisinin %19.43'lik kısmı ise hidrolik enerjiden karşılanmıştır [17]. Türkiye Ulusal Enerji Planına göre elektrik tüketiminin 2025 yılında 380.2 TWh, 2030 yılında 455.3 TWh, 2035 yılında ise 510.5 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir [18].

Enerji arzındaki önemi sürekli artan HES'ler, uzun ömürlü olacak şekilde inşa edilirler. Bu durum santrallerin verimliliklerini yükseltme, yenileme ve modernizasyon yoluyla kapasite ve üretimi artırma, işletme ömürlerini uzatma fırsatları sunmaktadır. 2022 yılı analizlerine göre, dünya genelindeki hidroelektrik santrallerinin üretkenlik

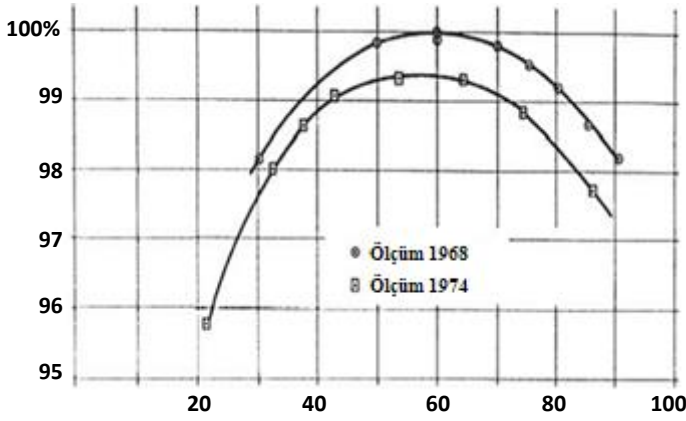
artırıcı modernizasyon çalışmalar ile mevcuttaki toplam kurulu gücün yaklaşık 9 GW artırılabilceği öngörülmüştür. Dünya genelinde 30 yaşından büyük HES'lerin kurulu gücünün 600 GW'a, 40 yaşından büyük HES'lerin kurulu gücünün ise 400 GW'a yaklaşması modernizasyon çalışmalarının önemini ortaya koymaktadır [19].

Enerjide üretkenliğin temel ilkesi, minimum girdi ile maksimum çıktının elde edilmesidir. Üretkenlik yaklaşımları genellikle üretkenliği artırmak için her türlü atığı ve kaybı azaltmaya odaklanır. Hidroelektrik santrallerinin 'yakıtı' olarak kullanılan suyun elektrik enerjisine dönüştürülme oranı, HES verimliliğinin temelini oluşturmaktadır. Bu bağlamda, türbin çarkını döndürmeden veya türbin çarkını döndürmesine rağmen istenilen gücü üretmeden santralden çıkan su, yakıt ya da daha genel bir ifade ile hammadde israfı olarak görülmektedir [4].

Türbin, santralin maliyetini ve genel performansını doğrudan etkilediği için hidroelektrik santrallerindeki en kritik bileşendir. Yüzyılı aşkın süredir kullanılan hidrolik türbinlerin gelişen teknolojiyle birlikte daha az maliyetle daha çok elektrik üretebilme yeteneğine sahip olması istenmektedir. Bunun karşılanabilmesinde ise hidrolik türbinlerin tasarımı önemli bir rol oynamaktadır. Herhangi bir hidroelektrik projesinin maliyet etkin tasarımı için, gerçek kullanıma girmeden önce hidro türbinlerinin hidrolik davranışını ve verimliliğini tahmin etmek çok önemlidir [20]. Hidrolik türbinler farklı çalışma koşullarına sahip olduklarından, her türbin işletme gereksinimlerini karşılamak üzere özel, kendine özgü tasarlanmaktadır [21]. Tasarlanmış bir türbinin performansı ise, bir dereceye kadar, hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonları ile doğrulanabilmektedir. Ancak performans ve güvenilirliği sağlamak için IEC standartlarına göre deneysel testlerin yapılması gereklidir. Model testler için, gerçek santral koşullarını simüle etmek üzere özel olarak tasarlanmış test tesislerine ihtiyaç vardır [22]. Model testlerin sunduğu, fabrika çıkış garanti değerlerin ise türbinin santraldeki montajından sonra yapılacak olan saha performans testleri ile kontrol edilmesi ve doğrulanması elzemdir.

Çalışma koşullarına uygun olarak tasarlanmadan inşa edilen, kapasitesinden daha az elektrik üreten birçok elektrik santrali mevcuttur. Bu tip hidroelektrik santrallerin mevcut türbinlerini uygun maliyetli rehabilitasyon projeleri ile optimize ederek enerji üremini %6-8 oranında artırmak mümkündür [23].

Normalde hidrolik türbinler, performansında bozulma olmadan 50-100 yıllık bir ömre sahip olacak şekilde tasarlanmaktadır. Çalışma koşullarına göre tasarımın yapılmaması haricinde, işletme şartlarında meydana gelen çeşitli olayların etkisiyle türbinlerin ömrü azalmakta ve performanslarında keskin düşüşler yaşanmaktadır. Yararlı iş yapmadan suyun sızması, akış alanı içindeki ikincil akış veya yüzey pürüzlülüğünden kaynaklanan sürtünme kaybı, çarklarda ve kanatlarda süngerleşme, metal yorgunluğu gibi sebepler bu düşüşün kaynakları arasındadır. Aynı türbin üzerinde farklı yıllarda yapılan testlerle, türbindeki performans düşüşü net bir şekilde gözlenebilmektedir. Brekke'nin türbindeki aşınmanın performansa etkisini görmek için yapmış olduğu çalışma sonucunda elde ettiği grafik Şekil 1'de örnek olarak sunulmuştur [24].



Şekil 1. Normal ve aşınmış türbinler için verimlilik eğrisi

Hidrolik ünitelerde mevcut durumun belirlenmesi, gözlemlenen eksikliklerin nedenlerinin tespit edilmesi, aşınmaların ile ilgili olası revizyonların belirlenmesi, yapılacak faaliyetlerin maliyet yönlü analiz edilmesi, rehabilite edilmiş bir ünitenin devreye alınması gibi uygulamalar performans testlerini zorunlu kılmaktadır [25]. Test yapılmadan bir ünitenin ne kadar iyi performans gösterdiğinin, ne kadar iyi performans gösterebileceğine kıyasla, değerlendirilmesi mümkün değildir. Generatörün çalışma aralığını ve hidrolik gücün kullanım oranını artırmak için yüksek verimlilik koşullarını aramak, santralde ekonomik çalışmayı desteklemek için aynı çalışma koşulları altındaki farklı ünitelerinin verimliliklerini karşılaştırmak ve böylece tek bir türbin-generatör ünitesinin çıktısını en üst düzeye çıkarmak gibi amaçlar ancak performans testleri ile mümkün hale gelebilir [26]. Ayrıca performans testi, hidroelektrik santrali performansının kabul edilemez seviyelere düşmediğinden emin olmak için olmazsa olmaz bir uygulamadır [27].

Performans testleri kendi içerisinde farklı zorluklar barındırmaktadır. Verimlilik hesaplamasını gerçekleştirmek için, suyun konumundan kaynaklanan kinetik ve potansiyel enerjisi gibi parametrelerin bilinmesi gerekir. Bunların bilinebilmesi için de türbine giren suyun debisinin ölçülmesi gereklidir. Debinin ölçülmesi ise, hidrolik türbin testlerindeki en zor işlerden biridir [28]. Bunun için farklı metotlar geliştirilmiştir. Bu metotlar termodinamik, akustik, gibson, boya seyreltme, tracer gibi doğrudan (absolute) debi ölçüm metotları ve Winter-Kennedy (W-K) gibi dolaylı/bağıl (relative) debi ölçüm metotları olarak sınıflandırılmıştır [29, 30].

Debi ölçümünde kullanılacak metotun seçimi için birçok parametrenin bir arada değerlendirilmesi gerekir. Santralin ve sahanın fiziksel şartları, değişken çalışma koşulları, debi aralığı, basınç kaybı, işletme gereksinimleri, düşü, cebri borunun yapısı, test hedefleri, testlerin gerçekleşme süreleri, maliyet, doğruluk gereksinimleri, yasal düzenlemeler gibi unsurlar metot seçimini doğrudan etkilemektedir [29]. Doğrudan debi ölçüm metotları ile mutlak testler, dolaylı/bağıl debi ölçüm testleri ile endeks testleri yapılmaktadır. Bağıl metotlarda debi ölçümünden ziyade debi hesaplaması yapılmaktadır.

Literatürde konu ile alakalı farklı çalışmalara rastlanılmaktadır. Cyrenne [31], boya seyreltme metodu ile debi ölçümü hakkında teorik bilgiler sunmaktadır. Boya

seyreltme metodunu maliyet açısından ucuz, doğru sonuçlar veren, güvenilirliği kanıtlanmış çok hassas bir prosedür olarak tanımlamakta ve testler için floresan boyanın özelliklerini sunarak rhodamine boyasını tavsiye etmektedir. Çalışmasında, testlerin aşamalarından, hazırlıklarından, hesaplamalarından bahsetmekte, florometrenin çalışma mantığını, uygulanan IEC standartlarını örnekler vererek göstermektedir. Muthukumar vd. [32], boya seyreltme metodu ile hidroelektrik santrallerinde debi ölçümü yapılması hakkında hem teorik hem de pratik bilgiler sunmaktadırlar. HES'lerde boya testi için kullanılan denklem ve boya testinin yapım şemasının ortaya konulduğu çalışma kapsamında, dikey Kaplan tipi ve dikey Francis tipi türbinlerin kullanıldığı iki farklı hidrolik santralde tek noktadan, sabit akış metodu kullanılarak debi ölçümleri yapılmıştır. Diğer yöntemlerin uygulanabilir olmadığı durumlarda bu metodun kullanılabileceğini, testin başarılı olması için boyanın karışma mesafesine dikkat edilmesi gerektiğini, santrallerin yapım aşamasında test için altyapının kurulmasının önemli olduğunu belirtmişlerdir. Liang ve Richardson [33], boya metodunun özellikle elverişsiz şartlarda belirli akış koşulları altında debi ölçümü yapılabilmesi için pratik çözümler sunduğundan bahsetmektedirler. Yöntemin doğruluğunun, enjekte edilen boya miktarının son konsantrasyonun ve ölçüm noktasına erişimindeki boya kaybının belirlenmesi ile anlaşılacağını, kullanılan RT boyanın milyarda bir mesabesinde belirlenebilir özellikte olduğunu ve boyadaki kaybın ihmal edilecek kadar az olduğunu belirttikleri çalışmada, örnek test sonuçlarını paylaşmaktadırlar. Pant vd. [34], radyoizleyici tekniği ile debi ölçümü üzerine çalışmalar yapmışlardır. Yapay izleyici olarak boyanın ve doğal izleyici olarak tuzun kullanılabildiği izleyici seyreltme tekniğini düzensiz şekilli, büyük çaplı, tamamen veya kısmen dolu boru hatlarında, açık-kapalı kanallarda kullanılabilecek en uygun metot olarak sunmuşlardır. Rodamin B gibi floresan boyalar yüksek seyreltmelerde tespit edilebilir olsa da, genellikle yatak, duvar ve toprakta süspansiyon halinde adsorpsiyon yoluyla su ortamından kaybolduklarını belirtmiş; oluşan bu dezavantajlı durumlardan bazılarının radyo izleyiciler yöntemi kullanarak aşılabileceğini söylemişlerdir. Bu metodun, daha yüksek tespit hassasiyetleri nedeni ile daha iyi doğrulukla daha büyük debileri için yararlı olduğunu, doğayı kirletecek atıklar barındırmadıklarını ayrıca belirtmişlerdir [35]. Pala [36], türbin verimliliğini, verimliliği etkileyen hususları ve verimlilik ölçüm metotlarını incelemiştir. Ultrasonik ve termodinamik metotla verim ölçümü ile ilgili ayrıntılı bilgiler sunmuştur. Çalışmasında, Keban HES'te 1974 yılında faaliyete geçen ünite-4 ile 1982 yılında faaliyete geçen ünite-5 üzerinde termodinamik metotla, farklı güç ve düşü aralıklarında yapılan performans testinin sonuçlarını paylaşmış, tamamen aynı özelliklerde imal edilen ve aynı çalışma koşullarında olan türbinlerin verimliliklerinin farklı bulunması üzerine analizler yapmıştır. Kafalı [37], santrallerde verimlilik artırıcı rehabilitasyonlara başlamadan önce, mevcut verimlilik durumunun teorik ve gerçek performans testleri yapılarak tespit edilmesi gerektiğini söylemiştir. Bu amaçla, Gökçekaya HES'te hem teorik analizler yapılarak muhtemel verimlilik kayıpları hesaplanmış hem de Winter-Kennedy metodu ve akustik metot kullanılarak santraldeki Francis tipi türbinin gerçek

zamanlı performans testleri yapılmıştır. Yan vd. [38], Winter-Kennedy metodu kullanarak debi hesaplaması yaptıkları çalışmalarında, W-K akış hızı katsayısını Gibson yöntemi ile kalibre ederek, 300 MW Francis türbinde yapılan verimlilik testlerinin sonuçlarını açıklamışlardır. Test sonuçları kullanılarak türbin verimlilik eğrisini üretici tarafından sağlanan eğri ile karşılaştırmışlardır. Salyangozu da içerecek şekilde yapılan HAD (CFD) hesaplamaları, W-K debi hesaplama formülündeki katsayı $K(K_1)$ 'nin ve endeks $n(K_2)$ 'nin akış hızı üzerindeki etkisini analiz etmek için kullanmış, iki eğri arasında oluşan farkın temel nedeninin n ve K belirsizlik değerleri olduğunu belirtmişlerdir. Zhou vd. [39], türbin verimlilik ölçüm yöntemlerini, bu yöntemlerin özelliklerini, uygulamadaki zorluklarını incelemekte, termodinamik test yöntemi ile ilgili ayrıntılı bilgiler sunmaktadırlar. Termodinamik, ultrasonik ve Winter-Kennedy metodları arasında yaptıkları karşılaştırmalar neticesinde, yüksek düşüye sahip türbinlerde verimlilik ölçümü için termodinamik metodun daha uygun bir metod olduğunu belirtmektedirler. Baidar vd. [40], W-K yönteminin sorunlarını ve zorluklarını inceledikleri çalışmalarında, W-K metodunun uygulama olarak basit ve az masraflı bir yöntem olduğunu, genellikle yenileme projeleri için verimlilik artışını doğrulamak, bazen de sürekli debi akışını izlemek için santrallerde sıklıkla kullanıldığını belirtmektedirler. Farklı araştırma sonuçlarına göre testlerdeki belirsizliklerin çok yüksek ve tutarsız çıktığını, bu tutarsızlığın araştırmacılar tarafından ciddi bir analize tabi tutulmadan, daha çok yenileme sonrasına veya zaman içinde akış koşullarındaki değişikliklere atfedildiğini ifade etmektedirler. Ancak bundan ziyade, şartların özelliklerine göre yaklaşım geliştirilmesi gerektiğini, metodun kalibrasyonu doğru yapıldığında ve akış koşullarında değişiklik olmaması halinde debi ölçümü ve verimlilik testleri için uygun olduğunu açıklamışlardır. W-K metodu için son 20 yılda yapılan birçok araştırmada %10'a varan hataların bildirildiğini söyledikleri çalışmada, eski türbin ile kalibre edilmiş W-K akış katsayılarının yeni türbin için kullanılmasının, akış fiziği değiştiği için önerilmediğini belirtmektedirler. W-K araştırmalarında, W-K diferansiyel basınç musluklarının olduğu yerde hız alanı, basınç ölçümleri ve giriş koşullarının değiştirilmesi, musluklara yakın yerel akış bozukluklarında pürüzlülüğün etkisi, türbin, ayar kanadı, boşluk aralığı, değişen kanat eğimi gibi akış geometrisindeki değişikliğin etkisi vb. durumların metod bağlamında araştırılmasını önermişlerdir [41]. Farklı bir çalışmalarında [42], farklı koşullardaki iki Kaplan tipi türbin üzerinden hesaplamalı akışkanlar dinamiği simülasyonlarının yardımı ile W-K yönteminin sınırlamaları daha iyi anlaşılmasına çalışılmıştır. Bir başka çalışmalarında ise [43], düz ve eğri cebri borularda, değişen akışlarda W-K metodu ile debi ölçümleri yapılmış, metodun kararlılığının arkasındaki fiziksel mekanizma sunulmuştur. Jain vd. [20], Francis tipi reaksiyoner bir türbinin fiili çalışmaya geçmeden önce performansına ait tahmini değerlerini HAD yaklaşımı ile belirlenme yoluna gitmiş, ortaya çıkan değerleri model test yöntemi ile doğrulamaya çalışmışlardır.

Literatüre bakıldığında aynı türbin-generatör ünitesi üzerinde farklı metodlar kullanılarak performans testlerinin yapıldığına dair çalışmalara rastlanılmamaktadır. Aynı türbin üzerinde aynı metod kullanılarak farklı zamanlarda

yapılan uygulamalara ise çok az rastlanılmaktadır. W-K metodu ile sürekli verimlilik izlemenin yapıldığı santrallerde ise akış sabitinin belli aralıklarda mutlak debi ölçüm metodları ile kalibre edilmesi gerektiği söylenmiştir ancak böyle bir çalışmaya da rastlanılmamıştır.

Bu çalışmada, Boya seyreltme (dye delition) ve Winter-Kennedy (W-K) debi ölçüm metodları uygulanarak Alpaslan-1 HES'te türbin performans testleri yapılmıştır. Bir üniteye gerçekleştirilen testlerde kullanılmak üzere Efficiency Monitoring System (EMS), yani Verim İzleme Sistemi (VİS) kurulumu gerçekleştirilmiştir. Testler için gerekli olan veriler VİS ve üzerinden toplanılmıştır. Mutlak ve endeks testleri yapıldıktan sonra VİS'te herhangi bir değişiklik yapılmamış, sistem faal olarak bırakılmıştır. Böylece ilgili üniteye verim izlemenin W-K metodu kullanılarak aralıksız yapılmasına imkân sağlanmıştır. Sistem kurulurken verilerin toplanması için santraldeki mevcut ölçüm aletlerinin bir kısmından faydalanılmıştır. Herhangi bir ölçü aleti olmayan lokasyonlarda ihtiyaca binaen harici olarak yerleştirilen enerji analizörleri, basınç sensörleri/transmitter üzerinden veriler toplanılmıştır. Boya testleri için ayrıca, Florometre ve Veri Kayıt Cihazı (DAQ) kullanılmıştır.

Çalışmamız, aynı çalışma koşulları altında aynı üniteye farklı metodlar kullanarak testlerinin yapılması ve bu veriler üzerinden testlerin doğruluklarının karşılaştırmalı incelenmesi yönü ile literatüre özgün bir katkı sunmaktadır.

Materyal ve Metod

Hidrolik türbin performans testleri 2019 yılında nisan ayı içerisinde ünite-3'te gerçekleştirilmiştir. Muş sınırları içerisinde Murat Nehri üzerine inşa edilmiş olan santral, Elektrik Üretim A.Ş.'ye bağlı olarak 2012 yılında elektrik enerjisi üretimine başlamıştır. 4 adet türbin-generatör ünitesi bulunan baraj tipi santralin kurulu gücü 180 MVA olup generatörlerin tasarım verimi %98.3, türbinlerin tasarım verimi %95.4'tür. Türbinler 41.75 MW güçte, 250 d/d nominal sekron hızda, 55.4 m³/s nominal debide çalışacak şekilde üretilmişlerdir. Santralin nominal brüt düşüşü 82.5 m, nominal net düşüşü 80.6 m'dir [44].

VİS'in kurulumu ve türbin performans testleri EÜAŞ'ın koordinasyonunda ve yürütücülüğünde; HATCH Ltd. şirketi ile SU-ENER Mühendislik ve Enerji Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti. firmalarının katkıları ile yapılmıştır.

Santralde performans testleri normal işletme aralığında, %50-100 ayar kanat açıklıkları arasında, ünitenin güç faktörü 1.0 alınarak gerçekleştirilmiştir. Santral kumanda odası üzerinden ünitenin devreye alınması ve çıkarılması, ayar kanat açıklıklarının ayarlanması gibi gerekli işlemler yapılmıştır. VİS üzerinden bütün veriler toplanarak, türbin verimlilik hesaplaması gerçekleştirilmiştir. Generatör, ünite, santral verimlilik hesaplamalarında VİS'ten elde edilen veriler kullanılmıştır. Testlerin hangi ayar kanat açıklıklarında ve düzene göre yapıldığı, hangi noktalarda iki testinde gerçekleştirildiği Tablo 1'de sunulmuştur [44].

Tablo 1. Testlerin gerçekleştirilme düzeni ve planlaması

Test Numarası	Ayar Kanadı Açıklığı (%)	Generatör Gücü (MW)	Yorumlama
0b	0	0	Devre Dışı Bırakma Kontrolü
1	51.1	21.3	Endeks
2	80.4	40.7	Endeks
3	85.3	43	Endeks+Boya
4	99.2	47.5	Endeks
5	90.5	44.6	Endeks
6	95.1	46.4	Endeks+Boya
7	70.5	34.4	Endeks
8	75	38	Endeks+Boya
9	60.5	27.8	Endeks
10	65	30.7	Endeks+Boya
0c	0.1	0	Devre Dışı Bırakma Kontrolü

Boya testlerinde,

- Test için Rhodamine WT floresan boyadan yararlanılmıştır. Kullanılacak boyanın miktarı tartılarak belirlenmiştir.
- Boya çözeltisi enerji kapaklarının bulunduğu yerden enjekte edilmiştir. Örnek numuneler salyangoz girişinden toplanılmıştır. Bu iki yer arasındaki mesafe, yani cebri boru uzunluğu çözeltinin karışımı için uygun bulunmuştur.
- Ön karışım için baraj rezervuar kısmına bir pompa indirilmiştir. Boya solüsyonu ile suyun karışımı ara bir monifolda sağlanmıştır.
- Sabit debide boya enjeksiyonu yapılmıştır. Boya enjeksiyon hızını takip için laboratuvar tipi tartı kullanılmıştır. Bilgiler bir bilgisayara aktararak, izlenmiştir.
- Flometrik analiz için her testte 8 kap numune çözelti alınmıştır [45].
- Boya testlerinin sayısı ve yapıldığı ayar kanat açıklıkları Tablo 1’de sunulmuştur.

Endeks testlerinde;

- Winter-Kennedy diferansiyel basınç tapalarının salyangoz içerisinde mevcut olduğu görülmüştür.
- Fark basınç tapalarından çekilen piyezometre boruları üzerinden Fark basınç sensörüne taşınmıştır.
- W-K akış sabiti boya testi ile kalibre edilmiştir.
- Testlerin sayısı ve yapıldığı ayar kanat açıklıkları Tablo 1’de sunulmuştur.
- Bazı testler tekrar edilmiştir [46].

Devre dışı halde okuma alınması sırasında (0b, 0c) türbin girişindeki basınç transdüserlerinden alınan statik basınç okumaları ile belirtilen göl suyu (yükleme havuzu) seviyesi okumaları arasında bir karşılaştırma yapılmıştır. Basınç okuması, elle mezura daldırılarak yapılan ölçümle oldukça uyumlu çıkmıştır ancak kontrol dairesindeki okumalar basınç okumalarının yaklaşık 0,8 m üstünde düşü su seviyesi göstermiştir. Bu testin amaçları doğrultusunda VİS giriş basınç transdüserinden alınan okumalar kullanılarak türbin giriş basıncı hesaplanmaktadır.

W-K akış sabiti aşağıdaki formül ile bulunmuştur.

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

Burada;

K_1 : W-K Akış Sabiti,

Q: Debi,

ΔP : Fark Basıncı

W-K akış sabiti bulunurken, denklemden kullanılan debi, boya testlerinde ölçülen debidir. Fark basınç ise salyangoz içerisinde farklı noktalara yerleştirilmiş olan tapalar üzerinden alınan değerdir. Akış sabiti bulunduğundan sonra ise fark basınç bilgisi ve akış sabiti kullanılarak, aynı denklem bu kez debi hesabı için kullanılmaktadır. Böylece anlık olarak debinin izlenmesi mümkün olmaktadır. Denklemden K_2 endeks değeri, IEC-41 standartları kapsamında 0.48-0.50 aralığında bir değer olarak alınmakta ancak genelde 0.5 olarak kullanılmaktadır [47]. Hesaplanan akış sabiti sadece o üniteye ait olduğundan, başka bir üniteye kullanılmamaktadır. Debi hesabının düzenli ve anlık yapılabilmesi için akış sabitinin VİS’e ait PLC programına yüklenmesi gerekir.

Boya seyreltme testlerinde ayrıca, sekiz 20-mA kanallı ve 32 ± 200 -mV kanallı iki harici 16-bit analog-dijital modülden oluşan veri toplama cihazı (Data Acquisition System (DAQ)) kullanılmıştır. LabView yazılımı bulunan (DAQ yazılımı) bir bilgisayar üzerinden çıkış sinyalleri kaydedilmiştir. Veri toplama sistemi tarafından kaydedilen enstrümantasyon sinyalleri şunlardır;

- Saha Florometresi kullanılarak flüoresans değeri,
- Bir 200-psi basınç transdüseri kullanılarak elde edilen türbin giriş basıncı değeri.

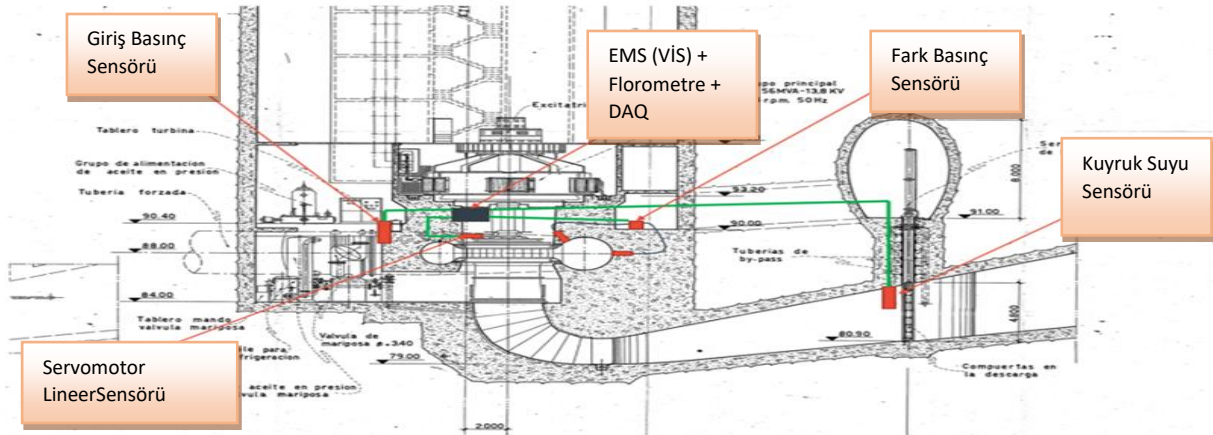
Ayrıca her test sırasında ise VİS tarafından aşağıdaki değerler eşzamanlı olarak okunmuştur;

- Salyangoz giriş basınç tapalarından gelen değerler,
- Kuyruk suyu seviye değeri,
- Türbin ayar kanadı servomotor pozisyon bilgisi,
- Generatör çıkış gücü,
- Salyangoz içerisindeki fark basınç tapalarından gelen değerler (Winter-Kennedy Diferansiyel Basınç değerleri).

Boya numunelerinin toplanması için kurulan florometre, DAQ cihazı, veri kayıt bilgisayarı, her iki testte kullanılan VİS’e ait pano, net düşü hesaplamalarında kullanılan giriş basınç sensörü, W-K metodu ile debi hesaplamasında kullanılan fark basınç sensörleri, cebri boru girişinde boya enjeksiyonu için dalgıç tipi boyanın membaya indirilmesi ve boya çözeltisinin enjeksiyonu, boyanın enjeksiyonu için oluşturulan düzenek Şekil 2’de, her iki test için gerekli olan verilerin sensörler üzerinden toplandıkları lokasyonlar ise Şekil 3’te gösterilmiştir [30].



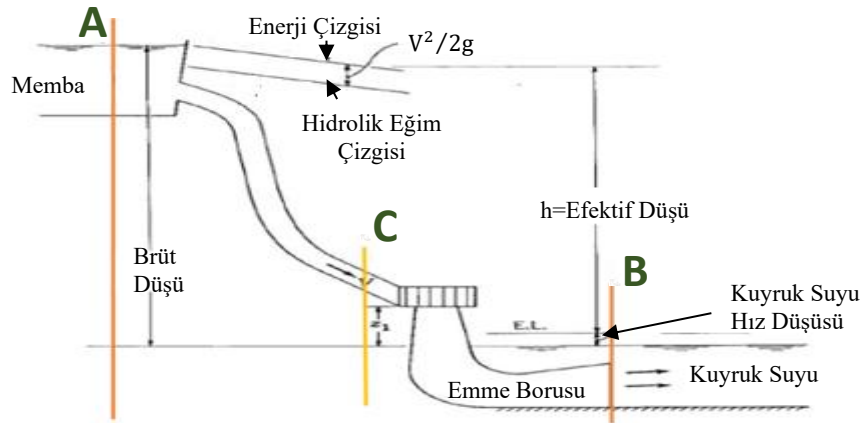
Şekil 2.(a) (1)Florometre, DAQ, Veri kayıt bilgisayarı, (2)Giriş basınç ve fark basınç sensörleri, (3)VİS panosu, (b) Cebri boru girişinde boya enjeksiyonu, (c) Boya enjeksiyon düzeneği



Şekil 3. Verilerin toplandığı lokasyonla

Testlerin yapılmasında gerekli olan önemli verilerden biri de düşü değeridir. Santrallerdeki enerji çizgileri üzerinden istenilen düşüler berneolli denklemi kullanılarak

hesaplanmaktadır [48]. Enerji çizgileri Şekil 4'te gösterilmiştir [37, 30].



Şekil 4. Hidroelektrik santrallerde enerji çizgileri

Buna göre, A-B enerji çizgileri arasında denklem yazılarak brüt düşü, C-B enerji çizgileri arasında denklem yazılarak net düşü hesaplanmıştır. Brüt düşü santral verimliliği hesabında, net düşü türbin ve ünite verimliliği hesabında kullanılmaktadır. Brüt düşü hesaplaması yapılabilmesi için testler esnasında göl kodunun ölçülmesi gerekmektedir.

Bunun için santralde kurulu olan seviye sensörlerinden faydalanılmıştır.

Bulgular ve Tartışma

Alpaslan-1 HES Ünite-3'te yapılan testlerde elde edilen değerler Tablo 2'de sunulmuştur [44].

Tablo 2. Performans testi sonuçları

Test No	Ayar Kanat Açıklığı (1) (%)	Memba Su Seviyesi (2) (m)	Türbin Giriş Basınç Tapası			Emme Borusu Çıkış								Nominal Net Düşüye Göre Düzeltme			Brüt Düşüye Göre Düzelt. Gen. Gücü (17) (MW)	Santral Verimi (18) (%)	Ünite Verimi (19) (%)	Türbin Verimi (20) (%)
			Statik Düşü (3) (m)	Hız Düşüsü (4) (m)	EGL1 (5) (m)	Statik Düşü (6) (m)	Hız Düşüsü (7) (m)	EGL2 (8) (m)						Generator Gücü (9) (MW)	Ölçülen Ünite Debisi (10) (m3/s)	Generator Verimi (11) (%)				
Kapatma Kontrolü																				
Test0b2.out	0.00	1442.68	1443.01		1443.01	1367.92		1367.92				75.09	74.76							
Endeks Testi																				
Test1.out	51.07	1442.65	1441.74	0.70	1442.44	1367.93	0.09	1368.02	18.80	31.67	96.7%	74.43	74.72	21.19	32.96	80.60	21.81	81.3%	81.6%	84.3%
Test2R.out	80.42	1442.69	1440.01	2.08	1442.09	1368.15	0.26	1368.41	35.45	54.64	98.0%	73.68	74.54	40.56	57.14	80.60	41.28	89.0%	90.1%	91.9%
Test3R.out	85.27	1442.69	1439.65	2.35	1442.00	1368.22	0.29	1368.51	37.30	57.99	98.1%	73.49	74.47	42.84	60.73	80.60	43.49	88.3%	89.5%	91.2%
Test4R.out	99.22	1442.69	1438.75	3.03	1441.78	1368.23	0.37	1368.60	40.90	65.88	98.2%	73.18	74.46	47.28	69.15	80.60	47.70	85.3%	86.8%	88.3%
Test5.out	90.53	1442.68	1439.30	2.58	1441.88	1368.20	0.32	1368.52	38.60	60.79	98.2%	73.36	74.48	44.45	63.72	80.60	45.00	87.2%	88.5%	90.2%
Test5R.out	90.70	1442.71	1439.29	2.63	1441.92	1368.20	0.32	1368.52	39.00	61.44	98.2%	73.40	74.51	44.88	64.38	80.60	45.44	87.1%	88.5%	90.1%
Test6.out	95.11	1442.68	1438.99	2.84	1441.83	1368.24	0.35	1368.59	40.00	63.83	98.2%	73.24	74.44	46.18	66.95	80.60	46.67	86.1%	87.5%	89.1%
Test6b.out	95.11	1442.69	1438.99	2.84	1441.83	1368.24	0.35	1368.59	40.00	63.83	98.2%	73.24	74.45	46.18	66.95	80.60	46.66	86.1%	87.5%	89.1%
Test7.out	70.53	1442.69	1440.69	1.54	1442.24	1368.09	0.19	1368.28	30.10	47.01	97.7%	73.96	74.60	34.25	49.07	80.60	35.01	87.8%	88.6%	90.6%
Test8a.out	74.96	1442.69	1440.34	1.82	1442.16	1368.12	0.22	1368.34	33.20	51.11	97.9%	73.82	74.57	37.88	53.40	80.60	38.63	89.1%	90.0%	91.9%
Test9.out	60.55	1442.70	1441.30	1.09	1442.38	1368.07	0.13	1368.20	24.50	39.49	97.3%	74.18	74.63	27.75	41.16	80.60	28.48	85.0%	85.6%	87.9%
Test10.out	65.03	1442.71	1441.03	1.29	1442.33	1368.02	0.16	1368.18	27.00	43.07	97.5%	74.15	74.69	30.60	44.90	80.60	31.34	85.9%	86.5%	88.7%
Boya Testi																				
Test3a.out	84.59	1442.69	1439.61	2.30	1441.91	1368.22	0.28	1368.50	37.00	57.45	98.1%	74.41	74.47	42.57	60.20	80.60	43.14	88.5%	89.7%	91.5%
Test6.out	95.11	1442.69	1438.99	2.78	1441.77	1368.24	0.34	1368.58	40.00	63.07	98.2%	74.19	74.45	46.23	66.19	80.60	46.66	87.1%	88.6%	90.3%
Test8a.out	74.96	1442.69	1440.34	1.82	1442.16	1368.12	0.22	1368.34	33.20	51.09	97.9%	74.81	74.57	37.88	53.39	80.60	38.63	89.1%	90.0%	91.9%
Test10.out	65.03	1442.71	1441.03	1.29	1442.32	1368.02	0.16	1368.18	27.00	42.96	97.5%	74.14	74.69	30.60	44.79	80.60	31.34	86.1%	86.7%	88.9%
Kapatma Kontrolü																				
Test0c.out	0.07	1442.71	1442.71		1442.71	1368.12		1368.12				74.59	74.59							

Tablo 2'deki sütunların açıklamaları ve yapılan hesaplamalar;

1. Ayar kanadı (servomotor) açıklığı (%).
2. Memba su seviyesi (m).
3. Türbin girişindeki muslukların statik düşüsü, türbin girişindeki EMS basınç ile ölçülmüştür (m).
4. Türbin giriş musluklarındaki hız düşüsü, türbin deşarjı ve en kesit alanı kullanılarak hesaplanmıştır (m),

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

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 denklemi

$$P_{\text{düzeltilmiş}} = P_{\text{gen}} (H_{\text{nominal net}}/H_{\text{ölçülen net}})^{1.5} \quad (3)$$

15. Düzeltilmiş Türbin Debisi denklemi;

$$Q_{\text{düzeltilmiş}} = Q (H_{\text{nominal net}}/H_{\text{ölçülen net}})^{0.5} \quad (4)$$

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

$$P_{\text{düzeltilmiş}} = P_{\text{gen}} (H_{\text{nominal brüt}}/H_{\text{ölçülen brüt}})^{1.5} \quad (5)$$

18. Santral verimi (%) denklemi;

$$\text{Santral verimi} = \frac{(T9)}{\rho g (T13)(T10)} \quad (6)$$

19. Ünite verimi (%) denklemi;

$$\text{Ünite verimi} = \frac{(T9)}{\rho g (T12)(T10)} \quad (7)$$

20. Türbin verimi (%) denklemi;

$$\text{Türbin Verimi} = \frac{(T19)}{(T11)} \quad (8)$$

Denklemlerde (T3), (T4) (T19) vs. olarak belirtilen numaralar, Tablo 2'deki sütun numaralarına (T19: Tablo 2'de 19 numaralı başlık altındaki değer) atıf yapmaktadır.

g: Yer çekim kuvveti (**m/s²**),

ρ: Suyun yoğunluğu (**kg/m³**),

V: Akışkanın hızı (m/s)

Generatör kayıpları ve shaft milindeki güç

$$P_{\text{shaft}} = P_{\text{gen}} + P_{\text{kayıp}} \quad (9)$$

$$P_{\text{kayıp}} = AP_{\text{gen}}^2 + BP_{\text{gen}} + C \quad (10)$$

denklemleri ile bulunur. $A = -4.167 \times 10^{-4}$, $B = 8.583 \times 10^{-2}$, $C = 93.9$ generatör sabiteleridir.

Fark basınç sensöründen alınan değer ile boya seyreltmede ölçülen $Q=57.45 \text{ m}^3/\text{s}$ debi kullanılarak unite-3 W-K akış sabiti değeri, $K_1 = 3.47 \text{ m}^3/\text{s}/\sqrt{\text{kPa}}$ bulunmuştur. Fark basınç sensörünün okuduğu 'mbar' değeri, VİS'te pascal (pa) değerine dönüştürülerek kullanılmıştır. Testlerde ölçülen net düşü değerine göre bulunan sonuçlar, yakınlık yasaları kullanılarak santralin nominal ve brüt düşü değerine göre de normalleştirilmiştir.

W-K metodu kullanılarak yapılan endeks testlerde, en yüksek türbin verimi %91.9 olarak ölçülmüştür. Bu değere %80.42 ve %74.96 ayar kanat açıklıklarında ulaşılmıştır. Bu ayar kanat açıklıklarında ünitenin ölçülen debisi 54.64/51.11 m³/s olmuşken, ölçülen net düşü değeri 73.68/73.82 m olmuştur. %80.42 ayar kanat açıklığında ünite verimi %90.1, santral verimi ise %89 bulunmuştur. Testlerde en yüksek generatör verimi, maksimum çıkış gücünde %98.2 olarak hesaplanmıştır. Bu değere %99.22 ayar kanat açıklığında ulaşılmıştır. Bu noktada ünitenin ölçülen debisi 65.88 m³/s olmuşken, ölçülen net düşü 73.18 m olarak gerçekleşmiştir. 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 hesaplanmıştır. Kurulum projesinden alınan generatör verimlilik katsayıları kullanılarak generatördeki kayıpların hesaplamaları yapılmış ve bu generatör verimine göre shaft milindeki güç 48.34 MW bulunmuştur.

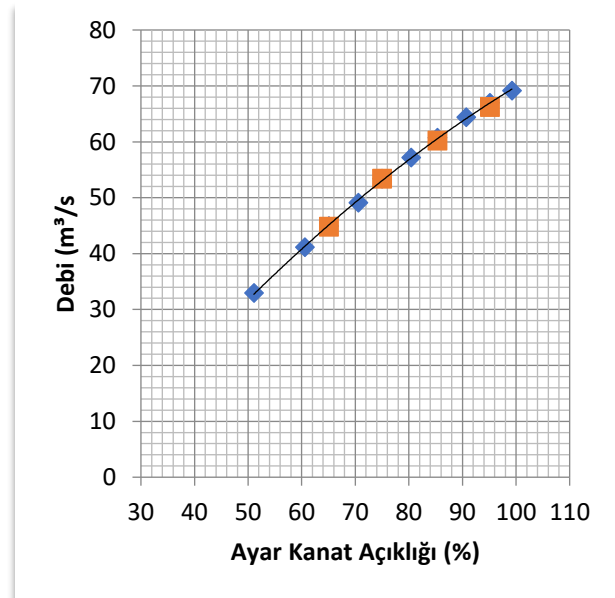
Boya seyreltme (dye delition) metodu kullanılarak yapılan mutlak testlerde, en yüksek türbin verimliliği %91.9 olarak ölçülmüştür. Bu değere %74.96 ayar kanat açıklığında ulaşılmıştır. Bu noktada ünitenin ölçülen debisi 51.09 m³/s olmuşken, ölçülen net düşü değeri 73.81 m olmuştur. Ölçülen generatör çıkışının 33.20 MW olduğu bu ayar kanat açıklığında gerçekleşen generatör verimi %97.9 olmuştur. Santral ve ünite veriminin en yüksek olduğu yer %74.96 ayar kanat açıklığında

olmuştur. Bu noktada santral verimi % 89.1 iken, ünite verimi %90 olmuştur. Generatör verimi %95.11 ayar kanat açıklığında en yüksek değerine ulaşmış ve %98.2 olarak bulunmuştur. Bu noktada ünitenin ölçülen debisi $63.07 \text{ m}^3/\text{s}$, ölçülen net düşü değeri ise 73.19 m 'dir. Generatör çıkış gücü, 80.6 m olan santralin nominal net düşü değerine normalleştirildiğinde ise 46.23 MW olarak bulunmuştur. Buna göre bu generatör veriminde şaft milindeki aktif güç 47.07 MW olarak hesaplanmıştır.

Test sonuçlarının analizi için Tablo 2'de sunulan değerler üzerinden, farklı parametreler baz alınarak grafikler oluşturuldu. Aşağıda sunulan grafiklerde kırmızı renk ile gösterilen noktalar boya testlerinin sonuçlarını, mavi renk ile gösterilen noktalar ise endeks testlerinin sonuçlarını göstermektedir. Grafiklerdeki polinom eğrisi endeks test sonuçlarına göre oluşturulmuştur. Endeks testlerinden elde edilen polinoma boya testlerinden elde edilen değerler işlenmiş, iki test sonuçları arasında uyumluluk aranmıştır.

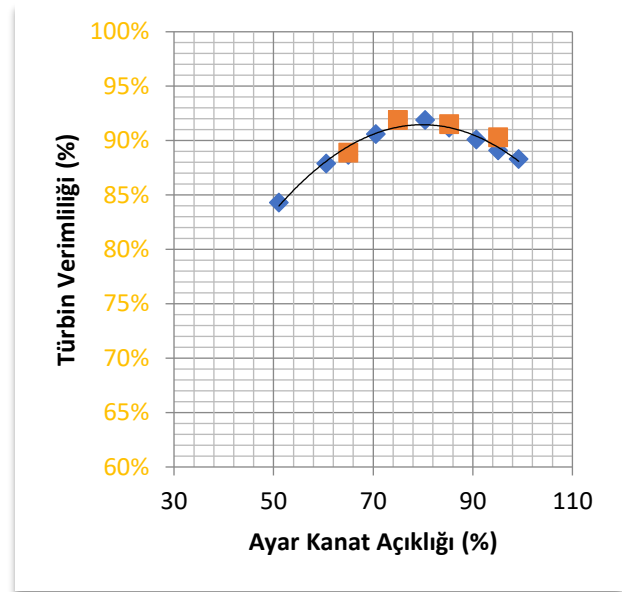
Nominal net düşüye göre oluşan grafikler

Tablo 2'de santralin nominal net düşüsü olan 80.6 m göre düzenlenmiş değerler baz alınarak, farklı parametrelerde grafik oluşturulduğunda aşağıdaki bulgular elde edilmiştir. Boya testleri, endeks testleri ile aynı ayar kanat açıklığında olacak şekilde, 4 farklı açıklıkla gerçekleştirildi. Debi her test için ayrı ayrı ölçüldü. Buna göre $\%85.27(84.59)/95.11/74.96/65.03$ ayar kanat açıklıklarında yapılan endeks testlerinde nominal net düşüye göre normalleştirilmiş debiler sırası ile $60.73/66.95/53.40/44.90 \text{ m}^3/\text{s}$ olurken; boya testlerinde $60.20/66.19/53.39/44.79 \text{ m}^3/\text{s}$ oldu. İki testteki debi ölçümleri arasında farklar mevcuttur ancak oluşan değerlerin birbiri ile uyumlu olduğu söylenebilir. Diğer taraftan, ayar kanat açıklığı arttıkça ölçülen debi değerinde de artış olması beklenir. Bütün testler grafiğe işlendiğinde iki parametre arasında doğrusala yakın bir ilişki olduğu doğrulandı. Ayar kanat ile debi ilişkisini gösteren grafik Şekil 5'te sunulmuştur.



Şekil 5. Ayar kanat açıklığı-debi ilişkisi

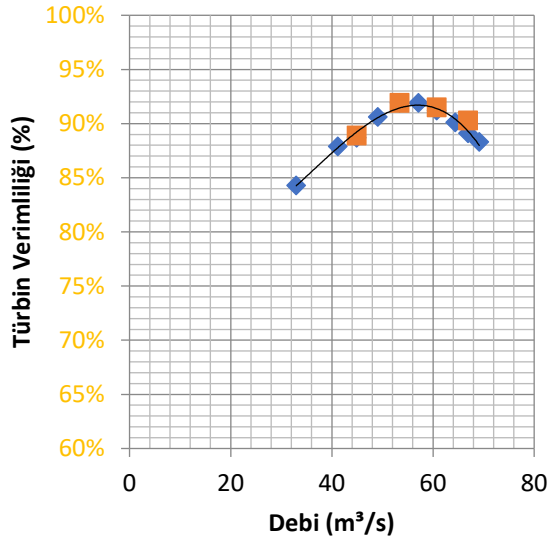
Ayar kanat açıklığı arttığında ölçülen debi miktarı doğru orantılı artarken, türbin verimliliğinde böyle bir ilişki beklenmez. Zaten testlerin bir amacı da türbinin farklı ayar kanat açıklıklarında ve debilerde verimli çalışma aralığını belirlemektir. Endeks testlerinde en düşük ayar kanat açıklığı olan $\%51.07$ 'de türbin verimliliği $\%84.3$ olurken, en yüksek ayar kanat açıklığı olan $\%99.22$ 'de türbin verimliliği $\%88.3$ olarak ölçüldü. Türbinin veriminin en yüksek olduğu $\%91.9$ 'luk değere, $\%80.42/74.96$ ayar kanat açıklıklarında ulaşıldı. Boya testlerinde 4 farklı ayar kanat açıklığında elde edilen türbin verimlilik oranları sırası ile $\%91.5/90.3/91.9/88.9$ iken, aynı kanat açıklığında yapılan endeks testlerinde bu değerler $\%91.2/89.1/91.9/88.7$ oldu. İki testin türbin verimliliği ölçümleri noktasında uyumlu olduğu görüldü. Ayar kanat açıklığı ile türbin verimliliği arasındaki ilişkiyi gösteren grafik Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. Ayar kanat açıklığı-türbin verimliliği ilişkisi

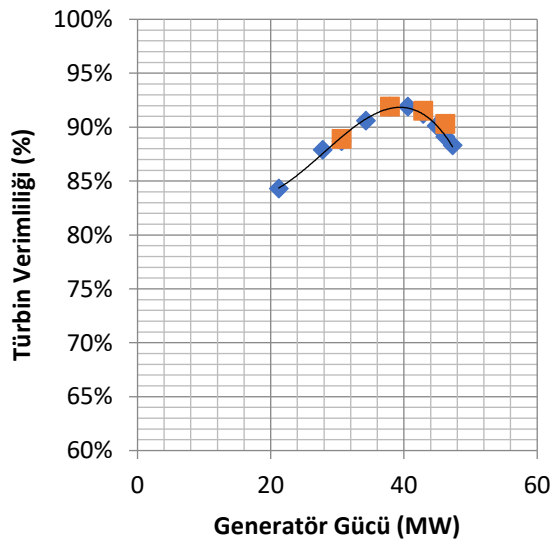
İlgili parametrelere ait veriler grafiğe işlendiğinde, ayar kanat açıklığı arttıkça türbin verimlilik eğrisinin öncelikle artış gösterdiği, eğrinin bir pik noktasına ulaştıktan sonra düşüşe geçtiği görülmektedir. Debi ölçümleri ile türbin verimliliği kıyaslandığında da benzer grafik ortaya çıkmaktadır.

Endeks testlerinde, normalleştirilmiş debi en düşük değer olan $32.96 \text{ m}^3/\text{s}$ iken türbin verimliliği $\%84.3$ olarak ölçüldü. Debi en yüksek değer olan $69.15 \text{ m}^3/\text{s}$ iken türbin verimliliği $\%88.3$ olarak ölçüldü. $\%91.9$ 'luk en yüksek türbin verimlilik değerine ise $57.14/53.40 \text{ m}^3/\text{s}$ debide ulaşıldı. Boya testlerinde de en yüksek verimlilik değerlerine $53.39 \text{ m}^3/\text{s}$ değerinde ulaşıldı. Debi-türbin verimliliği arasındaki ilişki Şekil 7'de sunulmuştur.



Şekil 7. Debi-türbin verimliliği ilişkisi

Endeks testlerinde, generatör çıkış gücü en düşük değer olan 21.9 MW iken, türbin verimliliği %84.3 olarak ölçüldü, generatör gücünün en yüksek değer olan 47.28 MW'ta ise türbin verimliliği %88.3'tür. Ancak türbinin en verimli olduğu değer olan %91.9'da generatör çıkış gücü 40.56/37.88 MW olarak ölçüldü. Boya testlerinde de en yüksek generatör çıkış gücünde türbin verimliliği %90.3 iken, en düşük generatör çıkış gücünde türbin verimliliği %88.9'dur. Türbin verimliliğinin en yüksek olduğu %91.9'da, generatör çıkış gücü 37.88 MW'tır. 4 defa gerçekleştirilen boya testleri, endeks testleri ile aynı ünite, aynı ayar kanat açıklığında yapıldığından, generatör çıkış gücü değerleride aynı olmuştur. Generatör çıkış gücü ile türbin verimliliği arasındaki ilişki Şekil 8'de sunulmuştur.



Şekil 8. Generatör çıkış gücü-türbin verimliliği ilişkisi

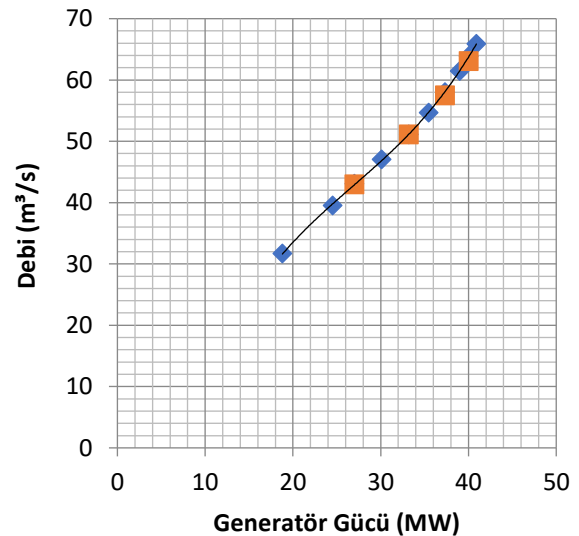
Ayar kanat açıklığı arttıkça generatör çıkış gücü artmaktadır. Ancak maksimin generatör çıkış gücü elde edilmesi, türbinin en iyi verimde çalıştığı anlamına

gelmemektedir. Test sonuçlarına bakıldığında, türbin verimliliği ile ayar kanat açıklığı grafiğinde oluşan durumun bir benzerinin generatör çıkış gücü grafiğinde de olduğu görülmektedir.

Her iki performans testi sonuçlarında bir uyumluluk söz konusu olsa da, generatör çıkış gücü arttıkça testlerde elde edilen ve grafiğe işlenerek kırmızı ve mavi olarak gösterilen verimlilik değerleri arasında farklılıkların olduğu görülmektedir. Bu farklılıkların debi ölçümlerinde elde edilen sonuçlardan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Boya testlerinde yapılan debi ölçümlerinde belirsizlik katsayı oranı daha düşüktür ve ölçülen değer, gerçek değere daha yakındır. Endeks testlerinde ise salyangoz içerisindeki su hızı, sürtünme katsayıları, basınç, fark basınç sensörlerinin durumu, debi miktarındaki değişiklik gibi etmenler bağlı debi hesaplamalarında sapmalar oluşturabilmektedir. Dolayısı ile aynı ayar kanat açıklığında yapılan farklı performans testlerinde farklı debi ölçüm sonuçlarının elde edilmesi beklenen bir durumdur. Aynı ayar kanat açıklığında boya testlerinde elde edilen debiler ile endeks testlerinde elde edilen debiler arasındaki uyum, boya testinin belirsizlik katsayısı düşük olduğunda, endeks testlerindeki debi hesaplamalarının doğruluğunun kontrol edilmesi olarak okunabilir.

Ölçülen debiye göre generatör gücü grafiği

Testlerde, ölçülen türbin debisi ile generatör çıkış gücü arasında doğrusala yakın bir ilişki olması beklenir. Tablo 2'de 9 ve 10 numaralı sütunlarda sunulan gerçek zamanlı değerlere bakıldığında, endeks testlerinde debi, en düşük oran olan 31.67m³/s olduğunda generatör gücü en düşük değer olarak 18.80 MW'dır. Debi en büyük değer olan 65.88m³/s olduğunda generatör çıkış gücü de en yüksek seviyeye gelmekte ve 40.90 MW olmaktadır. Boya testlerinde de en yüksek debi değerinde generator çıkış gücü en yüksek değerinde, 40 MW; en düşük debi değerinde Generatör çıkış gücü de en düşük değerinde, 27 MW oldu. Generatör çıkış gücünün türbin debisi ile oluşan grafiksel ilişkisi Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 9. Generatör çıkış gücü-debi ilişkisi

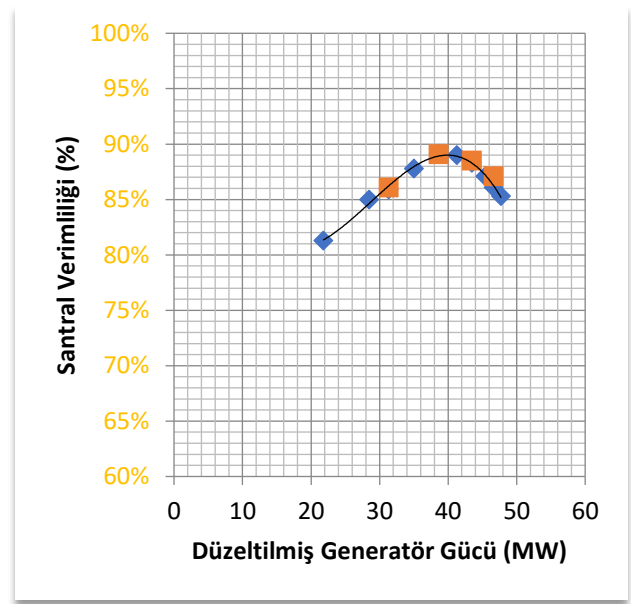
Brüt düşü değerine normalleştirilmiş generatör gücüne göre santral verimliliği grafiği

Santral verimliliği generatör çıkış gücünün brüt düşüden kaynaklı santral kurulu gücüne oranlanmasıyla, ünite verimliliği ise generatör çıkış gücünün net düşüden kaynaklı türbinin girişindeki hidrolik güce oranlanmasıyla bulunur. Bu verimlilikler türbin verimliliği ile doğrusala yakın bir ilişkiye sahiptir ancak generatör verimliliği ile ilgili böyle bir ilişkiden bahsetmek mümkün değildir. Generatör verimliliği, generator çıkış gücünün şaft milindeki, yani türbin çıkışındaki mekanik güce oranlanması ile bulunur.

Tablo 2’de 11, 18, 19, 20 numarada verilen değerler incelendiğinde bu durum doğrulanmaktadır. Türbin veriminin en yüksek olduğu yerde santral ve ünite verimlilikleri de en yüksek değerdeyken, generatör verimliliği en yüksek değerinde değildir. Aynı şekilde maksimum generatör çıkış gücü elde edilmesi santralin ve ünitenin en iyi verimde çalıştığı anlamına gelmemektedir. Tablo 2’de 17 numarada verilen ve santrale ait 82.5 m brüt düşüye göre düzenlenmiş olan generatör çıkış gücü baz alındığında bu durum doğrulanmaktadır. Endeks testlerinde, santral ve ünite veriminin en düşük olduğu değer olan %81.3 ve %81.6 da, düzeltilmiş generatör çıkış gücü 21.81 MW iken, bu verimlilikler sırası ile %89.1 ve %90’da en yüksek değerde iken düzeltilmiş generatör çıkış gücü 38.63 MW’tır. En yüksek düzeltilmiş generatör çıkış gücü değeri olan 47.70 MW ise santral verimi %85.3 ünite verimi %86.8 ölçüldü. Aynı durum boya testlerinin sonuçlarına bakıldığında görülmektedir. Dolayısı ile santralin çalışma şartları, üretilecek elektrik enerjisi türbin verimliliği göz önüne alınarak yapılması gerekir. Buna göre, generatör çıkış gücü ile türbin verimliliği endeksleri üzerinden santralin işletme aralıkları belirlenmelidir. Bu türbin-generatör ünitesinin uzun ömürlü olmasına, verimli çalışmasına katkı sağlayacaktır.

Santralde kurulu brüt düşüye göre en yüksek generatör çıkışının 47.70 MW olarak hesaplanması, 40 MW aktif çıkış gücüne sahip olan mevcuttaki generatörün çıkış gücünün artırılabilirliğini göstermektedir. Bunun için nominal sekron hıza bağlı olarak generatör kutup sayısının değiştirilmesi gerekmektedir. Böyle bir proje ise kapsamlı bir fizibilite çalışmasına, detaylı bir maliyet analizine dayandırılmalıdır.

Brüt düşüye göre düzeltilmiş/normalleştirilmiş generatör çıkış gücü ile santral verimliliği arasındaki ilişki Şekil 10’da sunulmuştur.



Şekil 10. Düzeltilmiş generatör gücü - santral verimliliği ilişkisi

Sonuçlar

Hidroelektrik santrallerde mevcut hidrolik enerjinin ne kadarının mekanik enerjiye ve dolayısı ile elektrik enerjisine dönüştürüldüğünün tespit edilmesi, santralin verimliliğinin izlenmesi ve buna bağlı olarak santralde iyileştirme faaliyetlerinin yürütülmesi gibi çalışmalar ülkemizde çok yaygın değildir. Hidroelektrik tesislerde performans testlerinin yapılması hayati önem taşımakla beraber, zorlu bir faaliyettir. Hidroelektrik santralinin kapasitesi, suyun debisine ve düşüsüne bağlıdır. Bu değerlerden debi değerini ölçmek ise en zor işittir. Bu çalışma kapsamında boya seyreltme ve Winter-Kennedy debi ölçüm metotları kullanılarak performans testleri yapılmıştır. Sürekli verim izlemenin yapılması için Winter-Kennedy akış sabiti belirlenerek santralde bir ünite verim izleme sistemi kurulmuştur. Testlerde en yüksek türbin verimi %91.9 olarak bulunmuştur. Buna göre %3.5’lik bir verim kaybının olduğu tespit edilmiştir. Generatörde ise %0,1 oranında ihmal edilebilecek seviyede verim kaybı söz konusudur.

Her iki test sonuçları karşılaştırıldığında, verilerin birbiri ile uyumlu olduğu görülmüştür. Verimlilik ölçümünden elde edilen bilgiler, santralin mevcut durumunun incelenmesinde, ileride yapılabilecek kapsamlı revizyonlar hakkında ekonomik ve mühendislik kararlar alınmasında kullanılmalıdır. Bu bilgilere ışığında, üretkenlik ve optimum işletme maliyeti göz önünde bulundurularak bakım stratejisi geliştirilmelidir. Bakım programında değişiklik, türbin tasarımında değişiklik, bakım için envanter düzenlemesi ve yüzey kaplama ile önleyici tedbirler, hidrolik türbinin üretkenliğini artırma gibi planlamalar bu stratejilerden bazıları olabilir.

Verimlilik ve maksimum güç çıkışı, hidrolik türbinlerde analiz edilecek en önemli hedeflerden ikisidir. Türbinler normalde değişken koşullarda çalışırlar. Winter-Kennedy metodunun düşük ve yüksek debi değerlerinde, kısmi ve tam yükte çalışmada belirsizliklerinin farklılık

göstermesi, sadece bu metoda bağımlı kalınmamasını gerektirir. Verim izleme sisteminin sürekli faal olmasının yanı sıra, periyodik aralıklarla doğrudan debi ölçümleri ile testler yapılmalı ve W-K akış sabiti kalibre edilmelidir.

Geçmiş dönemlerde, performans ve verimlilik testleri pahalı ve yoğun emek gerektiren faaliyetler olarak görülmekteydi. Ancak, son yıllarda testlerin yürütülmesi süreçleri önemli ölçüde değişmiş bulunmaktadır. Test ekipmanları, yazılım ve donanım alanındaki gelişmeler, gereken kişi sayısını ve test alanına gönderilmesi gereken ekipman miktarını büyük oranlarda azaltmaktadır. Saha testini kolaylaştıran başka iyileştirmeler de söz konusudur. Yakın zamana kadar, basınç dönüştürücülerini kalibre etmek için test yerlerine ölü ağırlık test cihazının gönderilmesi gerekirdi, ancak günümüzde hafif, kullanımı kolay, taşınabilir bir kalibrasyon cihazıyla aynı görev rahatlıkla gerçekleştirilmektedir. Dolayısı ile bu testlerin yaygınlaştırılmasının önünde ciddi bir engel bulunmamaktadır. Bu kapsamda, santraldeki diğer ünitelerde de bu çalışmanın yapılması, zamanla ülkemizdeki bütün santrallerde bu faaliyetlerin yürütülmesi, bir tercih değil zorunluluk olarak görülmelidir.

Etik kurul onayı ve çıkar çatışması beyanı

Hazırlanan makalede etik kurul izni alınmasına gerek yoktur. Çalışma yüksek lisans tezinden türetilmiştir.

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Yazar katkıları

Yazarlar makaleye eşit katkıda bulunmuşlardır.

Kaynaklar

- [1] H. Akın, "Su türbini tasarımı amaçlı sayısal yöntemler geliştirilmesi ve uygulaması," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Ankara, Türkiye, 2014.
- [2] F. Eraydın, "Hidroelektrik santrallerde net düşü değişiminin aktif güç çıkışı üzerine etkisinin incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, Türkiye, 2019.
- [3] A. Çoşkun, "Türkiye'de elektrik enerjisi sorunu ve ekonomik gelişmemizdeki önemi", *Sosyal Siyaset Konferansları Dergisi*, vol. 34, pp. 73-83, Feb. 2012.
- [4] R. Shrestha, B. Thapa, P. Gautam, P. Upadhyay, "Productivity and efficiency measurement in hydraulic turbine," *10th. National Convention, Building New Nepal: Challenges and Opportunities*, Kathmandu, Nepal; Apr.11-13 2007.
- [5] M. S. Güney, K. Kaygusuz, "Hydrokinetic energy conversion systems: a technology status review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, pp. 12996-3004, Dec. 2010, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.016>

- [6] A. Kerim, V. Süme, "İçmesuyu şebekelerinden enerji elde edilmesi; boru içi türbin modeli," *Türk Hidrolik Dergisi*, Vol. 5, no. 1, pp. 8-17, Jun. 2021.
- [7] G. Urquiza, M. A. Basurto-Pensado, L. Castro, A. Adamkowski, W. Janick, "Flow measurement methods applied to hydro power plants," in *Flow Measurement*, G. Urquiza, L. Castro Ed., London, England: Intech, 2012, pp.151-198, <https://doi.org/10.5772/36508>
- [8] Ü. Beyazgül, "Elektrik üreten bir piko su türbini performansının deneysel ve nümerik incelenmesi," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, 2022.
- [9] S. H. Vinchurkar, B. K. Samtani, "Performance evaluation of the hydropower plants using various multi-criteria decision-making techniques," *International Journal of Engineering and Advanced Technology*, vol. 8, no. 6, pp. 2131-2138, Aug. 2019, <https://doi.org/10.35940/ijeat.F8490.088619>
- [10] C. P. Shea, "Renewable energy: today's contribution, tomorrow's promise", Washington, USA: Worldwatch Institute, 1988.
- [11] S. Bozkurt, R. Tür, "Dünyada ve Türkiye'de hidroelektrik enerji, gelişimi ve genel değerlendirme" in *4. Su Yapıları Sempozyumu*, Antalya, Türkiye, 2015, pp. 322-330.
- [12] EIA, U.S. Energy Information Administration. The world's nine largest operating power plants are hydroelectric facilities. <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=28392>, Accessed on: October 22, 2024
- [13] H. A. Mahauddin, I. Jauhari, N. N. Nik Ghazali, N. M. Sultan, S. Julai, "Development and performance testing of a new in-pipe hydropower prototype towards Technology Readiness Level (TRL) 6," *Cogent Engineering*, vol. 11, no. 1, pp. 1-17, 2024, <https://doi.org/10.1080/23311916.2024.2319402>
- [14] IHA, International Hydropower Association. 2024 World Hydropower Outlook. <https://www.hydropower.org/publications/2024-world-hydropower-outlook>, , Accessed on: October 25, 2024.
- [15] Our World in Data. Energy production and consumption (January 2024). <https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>, , Accessed on: October 25, 2024.
- [16] ETKB, Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı. Elektrik. <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik>, , Accessed on: October 24, 2024.
- [17] EÜAŞ, Elektrik Üretim Anonim Şirketi. Yıllık faaliyet raporu 2023. <https://www.euas.gov.tr/raporlar>, Accessed on: October 24, 2024.
- [18] ETKB, Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı. Türkiye ulusal enerji planı 2022. <https://enerji.gov.tr/duyuru-detay?id=20317>,
- [19] REN21, Renewables Now. Key facts hydropower. Renewables global status report. https://www.ren21.net/gsr-2023/modules/energy_supply/02_market_develop

- ments/05_ hydropower/, Accessed on: October 25, 2024.
- [20] S. Jain, R. P. Saini, A. Kumar, "Cfd approach for prediction of efficiency of francis turbine," in *8th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHM)*, Roorkee, India; 2010, pp. 257-263.
- [21] M. K. Shukla, R. Jain, V. Prasad, S. N. Shukla, "CFD analysis of 3-D flow for francis turbines", *MIT International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 1, no. 2, pp. 93-100, Aug. 2011.
- [22] B. Kavurmacı, K. Celebioglu, S. Aradag, Y. Tascioglu, "Model Testing of francis-type hydraulic turbines," *Measurent and Control*, vol. 50, no. 3, pp. 70-73, Jun. 2017, <https://doi.org/10.1177/0020294017702284>
- [23] Z. Carija, Z. Mrsa, S. Fucak, "Validation of francis water turbine CFD simulations," *Strojarstvo*, vol. 50, no. 1, pp. 5-14, Mar. 2008.
- [24] H. A. Brekke, "Discussion on pelton turbines versus francis turbines for high head plants Proceedings," in *Symp. ASCE-IAHR/ASME Colorado State Universty*, Colorado, USA, 1978, pp. 167-177.
- [25] J. Steller, A. Adamkowski, A. Henke, W. Janick, M. Kaniecki, Z. Krzemianowski, "Discharge measurement and performance tests of hydraulic units in low-head small hydropower installations," *Transactions of the Institute of Fluid-Flow Machinery* vol. 130, pp. 3-29, Dec. 2015.
- [26] Y. Li, M. Yu, j. Cheng, Y. Yin, J. Wang, "The application of turbine efficiency measurement in huge hydraulic power stations," in *12th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHM)*, Beijing, China, 2018, pp. 1-5.
- [27] C. Purece, L. Corlan, V. Pleşca, "Determination of turbine efficiency for small hydro power plants," *Journal of Sustainable Energy* vol. 11, no. 2, pp. 100-106, Dec. 2020.
- [28] A. Adamkowski, W. Janicki, J. Kubiak, G. Urquiza, F. Sierra, J. M. Fernández, "Water turbine efficiency measurements using the gibson method based on special instrumentation installed inside pipelines," in *6th. International Conference on Innovation in Hydraulic Efficiency Measurements*, Oregon, USA, 2006, pp. 1-12.
- [29] S. Ghosh, S. Mali, J. T. Kshirsagar, "Performance testing of a low head small hydro power (SHP) plant-Zho Suwei (TAIWAN) –a case study," in *8th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHM)*, Roorkee, India, 2010, pp. 44-54.
- [30] J. Westermann, "Efficiency Improvement," presented at the *EUAS IPA Training Program*, Ankara, Türkiye, Mar. 25-26, 2021.
- [31] M. Cyrenne, "Flow measurement using the dye dilution technique," in *4th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHM)*, Toronto, Canada, 2002, pp. 1-10
- [32] U. Muthukumar, J. Chandapilli, S. Sasendra, "Flow measurement in hdroelectric stations using tracer dilution method – case studies," *8th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHM)*, Roorkee, India, 2010, pp. 34-43
- [33] W. S. Liang, E. V. Richardson, "Dye dilution method of discharge measurement," Colorado State Universty Water Management Technical Report, Report No: 3(CER 69/70-45), Oct. 22, 2024. Available: <http://hdl.handle.net/10217/39018>
- [34] H. J. Pant, J. Biswal, S. Goswami, J. S. Samantray, V. K. Sharma, K. S. S. Sarma, "Development and application of radiotracer dilution technique for flow rate measurements," *BARC Newsletter*, Vol. May – June, pp. 1-9, Jul. 2017.
- [35] H. J. Pant, "Radiotracer applications in industry, the environment and research," in *Ionising Radiation and Manking*. D. V. Gopinath, N. Ramamoorthy, Ed. Newcastle, UK: Cambridge Scholars Publishing, 2020, pp. 211-264.
- [36] R. Pala, "Hidroelektrik santrallerde türbin verimliliğinin termodinamik metotla ölçülmesi," Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye, 2007.
- [37] K. Kafalı, "Hidroelektrik bir santralin teorik ve gerçek performansının karşılaştırılması," Yüksek lisans tez, Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği ABD, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, Türkiye 2020.
- [38] Z. G. Yan, L. J. Zhou, Z. Wang, "Turbine efficiency test on a large hydraulic turbine unit. *Science China Technological Sciences* vol. 55, no. 8, pp. 2199–2205, Aug. 2012. <https://doi.org/10.1007/s11431-012-4914-6>
- [39] Y. Zhou, P. Luoping, C. Dengfeng, "Turbine efficiency measurement by thermodynamic test method. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 261-267, Dec. 2019, <https://doi.org/10.5293/IJFMS.2019.12.4.261>
- [40] B. Baidar, J. Nicolle, C. Trivedi, M. J. Cervantes, "Winter-Kennedy method in hydraulic discharge measurement: problems and challenges," in *11th. International Conference on Hydraulic Efficiency Measurement (IGHM)*, Linz, Austria, 2016,
- [41] B. Baidar, "A numerical investigation of the winter-kennedy method with application to axial turbines," Ph.D. dissertation, Dep. of Engineering Science and Mathematics, Lulea University of Technology, Norrbotten, Switzerlad, 2020.
- [42] B. Baidar, J. Nicolle, B. K. Gandhi, M. J. Cervantes, "Sensitivity of the winter-kennedy method to inlet and runner blade angle change on a kaplan turbine," in *29th. IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*, Kyoto, Japan, 2019, pp.022038 <https://doi.org/10.1088/1755-1315/240/2/02203>
- [43] Baidar B, Nicolle J, Gandhi BK, Cervantes MJ. Numerical study of the winter–kennedy flow measurement method in transient flows. *Energies*, vol. 13, no. 6, pp. 1310, Mar. 2020, <https://doi.org/10.3390/en13061310>
- [44] Enerji ve Tabi Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), "Dünya Bankası, Hatcd Ltd. Elektrik üretiminde enerji verimliliği, enerji sektör programı faz 2

- projesi; Alpaslan-1 HES türbin performans test raporu, Proje No: H358793,” Ankara, Türkiye, 2020.
- [45] G. Özbek, S. Rüstemli, “Hidrolik türbin performans testlerinin yapılmasında boya seyreltme metodunun kullanılması-saha çalışması,” *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi* vol. 28, no. 3, pp. 973-992, Dec. 2023. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1190992>
- [46] G. Özbek, S. Rüstemli, “Hidrolik türbin performans testlerinin yapılmasında winter-kennedy metodunun kullanılması-saha çalışması,” *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences* vol. 9, no. 22, pp. 41-61, Aug. 2022. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6948331>
- [47] G. Özbek, “Hidroelektrik santrallerinde enerji verimliliğine türbinin etkisi,” Yüksek lisans tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği ABD, Bitlis Eren Üniversitesi, Bitlis, Türkiye, 2022.
- [48] O. Gezer, “Verim izleme sistemi kurulumu ve operasyonlar” presented at the *EUAS IPA Training Program*, Ankara, Türkiye, Mar. 25-26, 2021.