

Hidrolik Türbin Performans Testlerinin Yapılmasında Winter-Kennedy Metodunun Kullanılması – Saha Çalışması

Using Winter-Kennedy Method in Performing Hydraulic Turbine Performance Tests – Case Study

Gökhan Özbek 

Yüksek Elektrik Mühendisi, EÜAŞ Alpaslan-1 HES İşletme Müdürlüğü, Elektrik Bakım Başmühendisliği, Muş, Türkiye

Prof. Dr. Sabir Rüstemli 

Bitlis Eren Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Bitlis, Türkiye

* Sorumlu yazar: gokhanozbek1986@gmail.com

Geliş Tarihi / Received: 02.06.2022
Kabul Tarihi / Accepted: 25.07.2022

Araştırma Makalesi/Research Article
DOI: 10.5281/zenodo.6948331

ÖZET

İnsanlık tarihi boyunca çeşitli enerji kaynakları farklı nedenlerle kullanılmıştır. Ancak 18.yy da gerçekleştirilen atılımlarla enerji kaynaklarının kullanımı bambaşka bir boyuta ulaşmıştır. Buhar makinelerinin icadı, dinamonun bulunması, elektriğin keşfi insanlık için büyük devrimlerin habercisi olmuştur. Teknoloji, ulaşım ve endüstri alanlarındaki büyük atılımlar birlikte toplumların gelişimini ve refahını enerjiye bağımlı hale getirmiş, enerjiyi hayatın vazgeçilmez bir olgusu haline dönüştürmüştür. Enerjiye olan talebin ise her geçen gün artması, güçlü ve sürdürülebilir enerji politikalarını zorunlu kılmaktadır.

Elektrik enerjisi dönüşümler sonucu elde edilen ikincil bir enerji türüdür. Kömür, doğalgaz, petrol gibi fosil yakıtlar kullanılarak üretilirdiği gibi, güneş rüzgar, biyoyakıt gibi yenilenebilir enerji kaynakları kullanılarak da elektrik enerjisi üretilir. Hidroelektrik santralleri yenilenebilir enerji kaynakları arasında bulunan suyun hidrolik gücünü kullanarak elektrik üreten santrallerdir. Bu santrallerin kurulu verimlerinin yüksek olması, herhangi bir zararlı atıklarının olmaması ve ulusal şebekelerin dengelenmesinde kritik rol oynamaları gibi etkenlerden dolayı kullanımını yaygınlaştırmaktadır. Yoğun bir İşletme programı içerisinde tutulan bu santrallerde çalışma koşullarına, yaşa ve ekipmanın durumuna bağlı olarak teçhizatlarında yıpranmalar, tahribatlar, metal yorgunlukları gibi durumlar oluşmaktadır. Bunlardan dolayı santralin performansın kayıpları artmakta, teçhizatın verimliliği düşmektedir. Üretim esnasında oluşan kavitasyon, vorteks gibi olaylar ise bu kayıpları daha da artırmaktadır. Kayıpların en fazla gerçekleştiği yer, türbin ve türbin bileşenleridir. Bu nedenle, özelde türbin verimliliğinin genelde santral verimliliğinin düzenli bir şekilde takip edilmesi ve mevcut durumun sürekli bir şekilde analiz edilmesi santralin ömrünün uzamasını ve oluşan kayıplarının minimum seviyede tutulmasını getirecektir.

Bu çalışmada, Alpaslan-1 Hidroelektrik Santralinde enerji verimliliğine türbinin etkisini incelemek ve verim kayıplarını tespit edebilmek için saha performans testleri gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, bağıl bir debi ölçüm metodu olan Winter-Kennedy metodu kullanılarak endeks testleri gerçekleştirilmiştir. Testlerde veriler, öncesinde bir ünite kurulmuş olan verim izleme sistemi üzerinden toplanmıştır. Yapılan testlerde türbin veriminde %3,5 oranında bir kaybın olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Winter-Kennedy Metodu, Hidrolik Türbinler, Debi Ölçümü, Verimlilik Testi

ABSTRACT

Various energy sources have been used for different reasons throughout human history. However, with the breakthroughs made in the 18th century, the use of energy resources reached a completely different dimension. The invention of steam engines, the invention of the dynamo, the discovery of

electricity have been the harbinger of great revolutions for humanity. Major breakthroughs in technology, transportation and industry have together made the development and welfare of societies dependent on energy and has turned energy into an indispensable phenomenon of life. The increase in the demand for energy day by day necessitates strong and sustainable energy policies.

Electrical energy is a secondary energy type obtained as a result of transformations. It can be produced by using fossil fuels such as coal, natural gas and oil, as well as by using renewable energy sources such as solar wind and biofuels. Hydroelectric power plants are power plants that produce electricity by using the hydraulic power of water, which is among the renewable energy sources. Due to factors such as the high installed efficiency of these power plants, the absence of any harmful waste and the critical role they play in balancing the national grids, their use is widespread. In these power plants, which are kept in an intensive operation program, conditions such as wear, destruction and metal fatigue occur in their equipment depending on the working conditions, age and condition of the equipment. Because of these, the performance losses of the power plant increase and the efficiency of the equipment decreases. Events such as cavitation and vortex that occur during production further increase these losses. The place where the losses occur the most is the turbine and turbine components. For this reason, regular monitoring of turbine efficiency in particular and power plant efficiency in general and continuous analysis of the current situation will prolong the life of the power plant and keep its losses at a minimum level.

In this study, field performance tests were carried out in order to examine the effect of the turbine on energy efficiency and to determine the efficiency losses in the Alpaslan-1 Hydroelectric Power Plant. In this context, index tests were carried out using the Winter-Kennedy method, which is a relative flow measurement method. In the tests, the data was collected through the efficiency monitoring system, which was previously installed in a unit. In the tests, it was determined that there was a 3.5% loss in turbine efficiency.

Keywords: Winter-Kennedy Method, Hydraulic Turbines, Flow Measurement, Efficiency Test

1. GİRİŞ

Hidroelektrik santraller (HES), birincil enerji kaynağı olarak hidrolik gücün kullanılarak ikincil enerji kaynağı olan elektrik enerjisi üreten santraller olması nedeni ile alternatif/yenilenebilir enerji üretim tesisleri olarak görülmektedir. Bu tesisler, çevreye uyumlu çevre dostu olmaları, ömürlerinin uzun olması ve işletme maliyetlerinin düşük olması gibi birçok nedenden dolayı en çok tercih edilen enerji üretim santrallerindendirler ve dünyadaki enerji arzına katkıları yüksek oranlarda gerçekleşmektedir. 2020 yılı itibari ile HES'ler dünya geneli elektrik enerjisi talebinin yaklaşık %16'sını, Türkiye'nin elektrik enerjisi talebinin ise %25,6'sını karşılamaktadır (EÜAŞ, 2020). Bu santraller 100 yıldan fazla bir geçmişe sahip olup, artık çok gelişmiş bir teknolojiye sahiptirler (Özgören ve diğerleri). Hidroelektrik santrallerinde santral verimliliği temel olarak, santralin kuruluş zamanında debi, brüt düşü, su yoğunluğu ve yer çekim ivmesine bağlı olarak hesaplanan aktif güç ile generatör çıkışındaki aktif güç arasındaki oransal ilişki üzerinden hesaplanır. Kurulu verimleri yüksek olan bu santrallerde işletme sürecinde, verim kayıplarını minimum seviyede tutmak ve böylece santralin ekonomik ömrünü uzatmak için periyodik bakım ve revizyon çalışmaları aralıksız ve etkin bir şekilde yürütülmektedir (Özbek, 2022). Santrallerin uzun süreli işletilmeleri ile birlikte, çalışma koşullarına ve yaşına bağlı olarak teçhizatlarında zamanla metal yorgunluğu, aşınmalar, delinmeler vs. gibi olaylar yaşanmaktadır.

Türkiye'de bulunan mevcut santraller arasında yaşı büyük olan birçok santral bulunmaktadır. Kamuya ait olan Elektrik Üretim A.Ş (EÜAŞ) tarafından işletilen santraller incelendiğinde bu durum daha iyi görülmektedir. Türkiye'de mevcut hidroelektrik santrallerinin toplam kurulu gücü 2020 yılı itibari ile 30.983 MW'tır. EÜAŞ'ın yani kamunun bu yıldaki payı ise 13.983 MW olarak gerçekleşmiştir (EÜAŞ, 2020). Bu pay EÜAŞ'ın toplam 21.588 MW olan kurulu gücünün %64,77'sine denk gelirken, Türkiye'nin toplam HES kurulu gücünün %45,1'ine denk gelmektedir.

2022 yılı itibari ile Türkiye’de 744 adet HES bulunurken, bu santrallerin toplam kurulu gücü 31.498 MW olmuştur (GENSED, 2022). EÜAŞ'a bağlı olan 48 adet HES'in toplam kurulu gücü ise 14.003 MW 'tır. EÜAŞ'A bağlı HES'lerin 36 adeti 20 yaşından büyüktür ve bu santrallerin toplam kurulu güçleri 10.515,76 MW'a denk gelmektedir. Santrallerin 24 adeti yani mevcut santrallerin yarısı 30 yaşından büyüktür ve bu da 8.302,55 MW'lık bir kurulu güce yani EÜAŞ'ın toplam HES Kurulu gücünün %59,3'üne denk gelmektedir. 40 yaşından büyük olan HES sayısı 14 adettir ve 2.729,6 MW'lık bir güce denk gelmektedir. 60 yaşından büyük 8 adet santral bulunmaktadır. EÜAŞ'a bağlı santrallerden kurulu güce göre ilk 15 santralin yaşları ve kurulu güçleri Tablo 1'de verilmiştir (EÜAŞ, 2022).

Tablo 1. EÜAŞ'a bağlı santrallerin kurulu güçleri ve yaşları

	SANTRAL ADI (HES)	KURULU GÜCÜ (MW)	YAPIM YILI	YAŞI
1	Atatürk	2405	1992	30
2	Karakaya	1800	1987	35
3	Keban	1330	1974	48
4	Altınkaya	702,55	1987	35
5	Birecik	672	2001	21
6	Berke	510	2002	20
7	Hasan Uğurlu	500	1979	43
8	Sır	283,5	1991	31
9	Gökçekaya HES	278,4	1973	49
10	Karkamış	189	1999	23
11	Özlüce	170	1999	23
12	Çatalan	168,9	1997	25
13	Sarıyar Hasan Polatkan	160	1956	66
14	Gezende	159,375	1994	28
15	Aslantaş	138	1984	38
16	Hirfanlı	128	1960	62
17	Kılıçkaya	120	1990	32
18	Dicle	110	2000	22
19	Kralkızı	94,5	1998	24
20	Çamlıca 1	84	1998	24
21	Kesikköprü	76	1967	55
22	Demirköprü	69	1960	62
23	Suat Uğurlu	69	1982	40
24	Seyhan 1	60	1956	66
25	Derbent	56,4	1991	31
26	Kapulukaya	54	1989	33
27	Çamlığöze	32	2000	22
28	Tortum	26,2	1960	62
29	Kepez 1	26,4	1961	61
30	Girlevik 2 Mercan	12,33	2001	21
31	Gaziler	11,1	2002	20
32	Seyhan-2	7,5	1992	30
33	Yüreğir	6	1972	50
34	Kepez 2	6	1986	36
35	Dereiçi	0,4	1949	73
36	Koyulhisar	0,2	1957	65
37	Ilisu	1208,6	2020	2
38	Deriner	669,6	2013	9
39	Ermenek	302,4	2012	10
40	Borçka	300,6	2007	15

	SANTRAL ADI (HES)	KURULU GÜCÜ (MW)	YAPIM YILI	YAŞI
41	Obruk	210,8	2009	13
42	Batman	198,475	2003	19
43	Alpaslan 1	160	2012	10
44	Akköprü	115	2012	10
45	Muratlı	115	2005	17
46	Kiğı	138	2017	5
47	Topçam	61	2017	5
48	Erik	6	2012	10

Türkiye'nin hidroelektrik potansiyeli, teorik potansiyeli brüt olarak 433 milyar kWh/yıl olarak hesaplanmışken, teknik potansiyeli 216 milyar kWh/yıl, kullanılabilir kısmı ise 180 milyar kWh/yıl olarak belirtilmiştir. Ülkemizde ise 2020 yılı itibari ile kullanılabilir kısımda geline seviye 108 milyar kWh/yıl olmuştur (DSİ, 2020). Yani potansiyelin gerçekleşme oranı %60'tır. HES'lerde gerçekleşme oranının her geçen gün arttığı ülkemizde, mevcut santrallerin yaşlarının enerji sürekliliği noktasında sorunlara sebep vereceği ortadadır (Rüstemli ve Özbek, 2022a). Kurulu gücü yüksek olan Atatürk HES, Karakaya HES, Keban HES, Altunkaya HES gibi santrallerin yaşlarının 30 yıldan fazla olması, enerji arzında sorun yaşanmaması için santrallerde yaşa bağlı olarak oluşacak olan yıpranma ve metal yorgunluğuna karşı verimlilik politikalarının hassasiyetle yürütülmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Hidroelektrik santralleri ulusal şebekeler için büyük roller oynamaktadır. Rüzgar, güneş gibi yenilenebilir enerji kaynakları ile enerji üreten santraller elektrik iletim veya dağıtım şebekelerine bağlandıklarında şebekeleri kararsızlığa sürükleyebilmektedirler. Şebekelerde oluşan bu kararsızlık ise kısa sürede devreye alınabilme ve kolay bir şekilde yük al-yük at manevraları yapılabilme özelliğine sahip olan hidrolik santraller üzerinden giderilmeye, ve böylece elektrik şebekeleri dengelenmeye çalışılmaktadır (Özbek, 2022). Termik ve doğalgaz santrallerinin devreye alınma sürelerinin çok uzun olması bu santrallerde manevra yapma yeteneğini kısıtlamaktadır. Ayrıca bu santrallerin herhangi bir sebepten dolayı devreden çıkması halinde bir anda şebekenin büyük bir enerji arzı açığı ortaya çıkmakta ve bu açığın anında kapatılması için de yine HES'ler kullanılmaktadır. Bu nedenlerden dolayı ile hidroelektrik santraller, normal işletme programı dışında sık sık devreye alınıp çıkarılmak, yük alıp-vermek, acil durdurmaya gitmek gibi manevralara zorlanmaktadırlar. Bu da türbinlerde çeşitli hidrolik kararsızlıkların oluşmasına sebebiyet vermektedir. Kısmi yük ve aşırı yük gibi tasarım dışı işlemler vorteks, kavitasyon olaylarını artırarak, ünitelerde yüksek ve düşük frekanslı birçok basınç dalgalanmalarına, generatör-türbin balans bozukluklarına, vibrasyona neden olmaktadır (Goyal ve Gandhi, 2018). Ünite ekipmanlarında oluşan tahribatlar, bazen önü alınamaz sonuçlar doğurmaktadır.

Türbin bileşenlerinde oluşan aşınmalar türbinin verimliliğini ve performansını düşürün önemli etkenlerdir. Türbine gelen suyun içerisinde barındırdığı sert minarelerin, partiküllerin yüzeylere temas etmesi ile bileşenlerde ciddi aşınmalar meydana getirmektedir. Francis türbinlerde, tasarım dahilinde ayar kanadının altı ve üstü arasında boşluklar mevcuttur. Ayar kanatlarındaki aşınmalar ile birlikte bu boşluklar artmakta; belirli bir eşik değere kadar bu artış akış parametrelerini çok fazla etkilememek ile birlikte, eşik değeri aşan aşınmalarda, sızıntı oranı dolayısı ile kayıpları yükseltmektedir. Tortu erozyonu, kavitasyon gibi olaylar bu aşınmayı tetiklemektedir (Thapa ve diğerleri, 2015). Kavitasyon olayı türbinlerin verimliliğini etkileyen en önemli etkidir. Basınç dalgalanmaları ile suda meydana gelen buharlaşma neticesinde oluşan doymuş su buharı olan vakumlu taneciklerin hareket etmeleri, bölünüp birleşmeleri, genişleyip küçülmeleri veya ani patlamalar ile büyük bir hızla malzeme yüzeylerine çarpmaları yıllar içerisinde türbin ve bileşenlerinde büyük tahribatlar oluşturmakta, süngerleşmelere sebebiyet vermektedir. Bu hasarın giderilmesi için yapılan onarımlar biel türbin veriminde %1-2'lik kaybın önüne geçememektedir (Gögebakan, 2019). Su alma ağında ve emme borusunda oluşan vorteks/girdaplar ise düşü kaybının

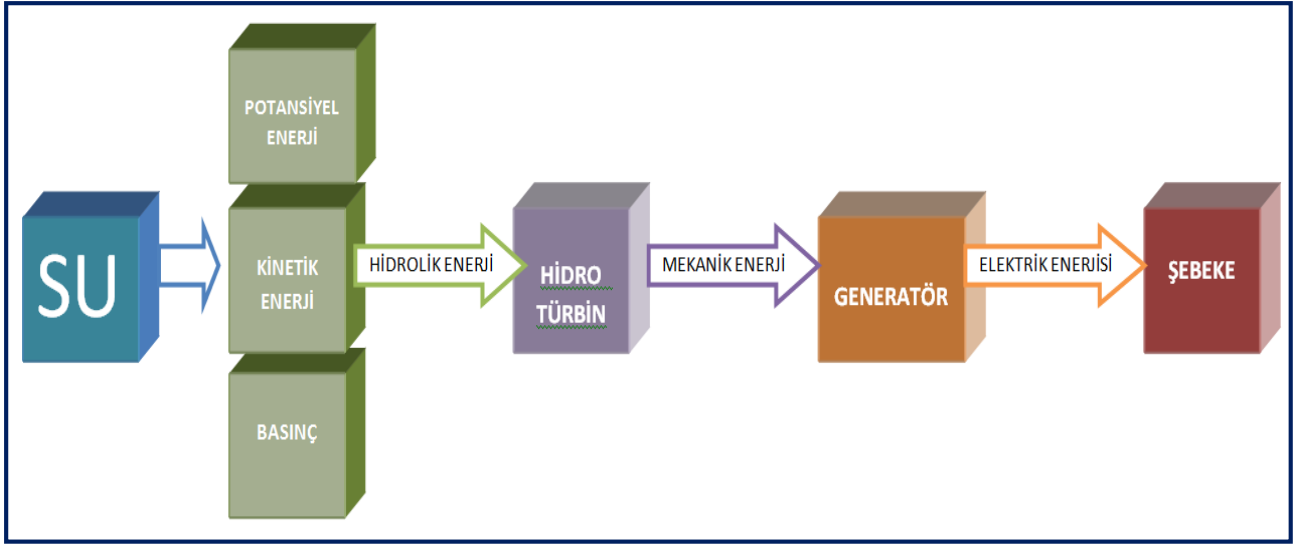
artmasına, debide azalmaya, hidrolik yük kaybında artışa, kavitasyon ve vibrasyon oluşumunda artışa neden olmaktadır (Göğüş ve diğerleri, 2013). Vibrasyon sadece vorteks veya kavitasyona bağlı olarak gerçekleşmez, rotor-stator arasındaki manyetik alan dengesizlikleri de vibrasyon oluşumuna neden olmaktadır. Bütün bu etmenler türbinin verimli çalışmasını doğrudan etkilemektedir.

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 verim artışı analizleri yapılmış ve yapılacak olan doğru müdahaleler ile türbin verimliliklerinin %0,7-6 arasında artırılabilmesi ön görülmüştür. Doğru bir çalışmanın yapılabilmesi için santral teçhizatının mevcut durumunun bilinmesi, iyi analiz edilmesi gerekmektedir (Sav, 2010). Bu çalışmada, EÜAŞ'a bağlı olarak 2012 yılında işletmeye alınan ve baraj tipi olan Alpaslan-1 HES'te Dikey Francis tipi türbin üzerinden yapılan saha performans testleri ile türbinin mevcut durumu incelenmiştir. Test kapsamında, santralin bir ünitesinde verim izleme sistemi kurulumu yapılmış, bağıl bir debi ölçüm metodu olan Winter-Kennedy metodu kullanılarak endeks testleri gerçekleştirilmiş, elde edilen veriler üzerinden santral, ünite, generatör ve türbin verimlilikleri hesaplanmıştır.

1.1. Hidroelektrik Santralleri

Yeryüzündeki bütün enerji kaynakları güneşin maddeler üzerinde oluşturduğu fiziksel ve kimyasal etkilerin neticesinde oluşmaktadır. Dolayısı ile güneş, bütün enerji türlerinin ana kaynağıdır. İnsanlık hayatının ve hatta canlı hayatının, genel olarak yeryüzünde canlılık adına var olan her şeyin kökeninde ise su vardır. Canlı yaşamı için suyun olmadığı bir dünya düşünülemez. Su sadece canlılar için bir yaşam kaynağı değildir, aynı zamanda bir enerji kaynağıdır. Dünya yüzeyinin %71'i su ile kaplıdır ve yeryüzünde 1,36 milyar km³ su rezervi olduğu hesaplanmaktadır. Yapılan araştırmalarla bu oranın sabit olduğu ve hiçbir dönemde değişmediği ortaya konulmuştur. Suyun dünyadaki oranının aynı kalması, birbirini tamamlayan ve bütünsellik bağlamında bir kopukluğun olmadan, sürekli ve aralıksız olarak gerçekleşen bir döngünün içerisinde olmasından kaynaklanmaktadır. Yeryüzünde bulunan suyun %97,2'lik gibi büyük bir kısmı okyanuslarda, %2,15'lik bir kısmı buzullarda bulunmaktadır. Geri kalan %0,65'lik bir kısım yeryüzünde göl, bataklık, yer altı suları vs. olarak dağılan sulardır. Irmak ve nehirlerde bulunan su ise sadece %0,0001 oranındadır (Tuncer, 2021). Suyun bu muazzam potansiyeli tarih boyunca insanlar tarafından ulaşım, tarım vs. gibi alanlarında kullanılmıştır. Günümüzde ise su, tükenmez enerji kaynağı olarak yenilenebilir enerji kaynakları sınıfında yer almaktadır. Gerek okyanus ve denizlerde oluşan gelgit, akıntı, dalga gibi hareketlerden, gerekse suyun potansiyel ve kinetik enerjisinin oluşturduğu hidrolik güç ile elektrik enerjisi üretimi gerçekleştirilmektedir (Rüstemli ve Özbek, 2022b).

Hidrolik santrallerde su, depolama tipi yerlerde bir düşüye bağlı olarak potansiyel güce sahiptir. Bu suya akışkanlık kazandırıldığında ise, harekete bağlı olarak kinetik enerji ortaya çıkmaktadır. Diğer taraftan akışkanlık kazandırılan suyun bir basınç kuvveti de oluşmaktadır. Basınç kuvvetini, potansiyel ve kinetik enerjiyi bünyesinde barındıran su, hidrolik bir güce dönüşmektedir. Düşüsü belli olan bu suyun belli bir debide su iletim kanalları vasıtası ile hidrolik bir türbini tahrik etmesi sağlanmaktadır. Türbinde, hidrolik güçten mekanik güce bir dönüşüm söz konusudur. Türbin ve generatör shaft mili üzerinden akuple bir haldedir. Türbinde oluşan dönme hareketi, yani mekanik enerji shaft miline bağlı olan generatör rotorunun senkron bir hızda dönmesini sağlamaktadır. Rotorun dönmesi ile birlikte statorda indüksiyon yolu ile elektrik enerjisi üretilir. Türbini tahrik eden su ise emme borusu üzerinden dere yatağına dökülür (Mercan, 2014). Hidroelektrik santrallerinde gerçekleşen enerji dönüşümleri Şekil 1'de verilmiştir (Özbek, 2022).

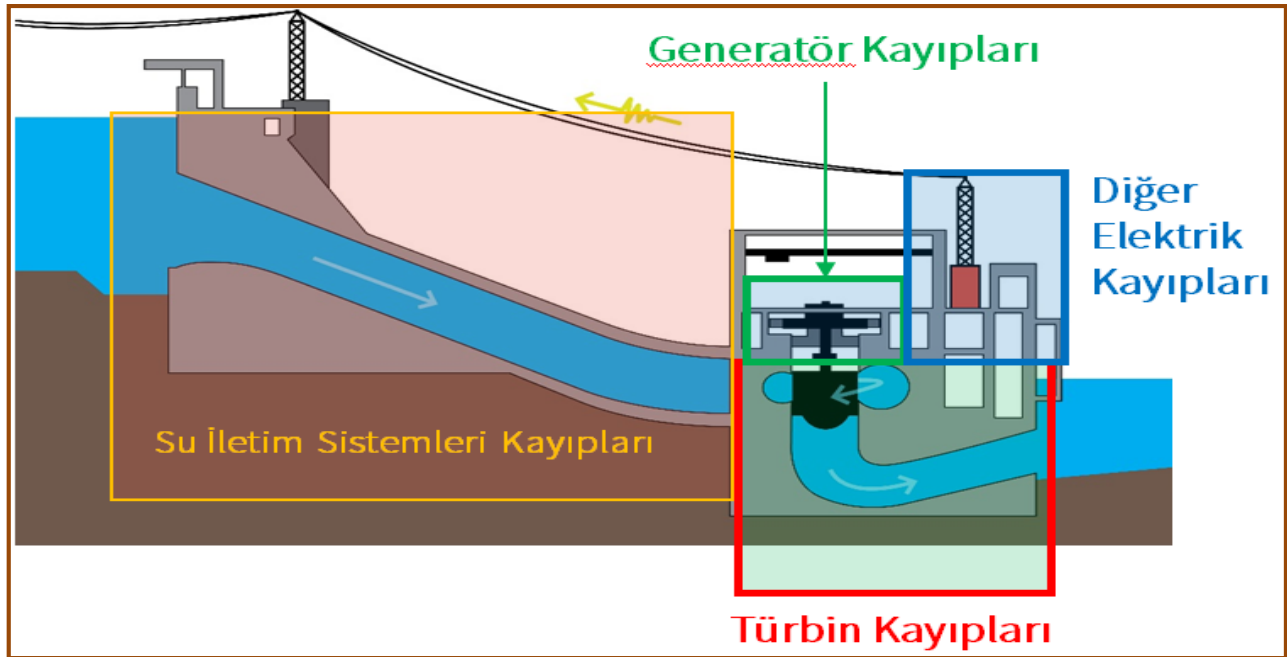


Şekil 1. Hidroelektrik santrallerinde gerçekleşen enerji dönüşümleri

Hidroelektrik santrallerdeki en büyük dezavantajı kurulum maliyetinin yüksek olmasıdır. Diğer taraftan kurulumu yapılan yerlerde ekolojik ve iklimsel bazı değişikliklere neden olduğu da iddia edilmektedir. Ancak avantajlarının dezavantajlarından çok daha fazla olması HES'leri çokça tercih edilen bir enerji santrali türü haline getirmiştir (Soral, 2020).

1.1.1. Hidrolik Santrallerde Oluşan Kayıplar

Hidroelektrik santrallerde oluşan kayıplar, santral performansını ve dolayısı ile verimliliğini doğrudan etkileyen ve santralin ekonomik ömrünü tayin eden en önemli faktördür. Hidrolik tesislerde oluşan kayıpları genel olarak su alma sistemlerinde, türbin sistemlerinde, generatör sistemlerinde ve ana güç transformatörleri dahil olacak şekilde şalt tesislerinde meydana gelen kayıplar olmak üzere dört grup halinde sınıflandırabiliriz. Şekil 2’te kayıpların sınıflandırılması gösterilmiştir (Westermenn, 2021).



Şekil 2. Hidroelektrik santrallerinde oluşan kayıplar

1.1.1.1. Su Alma Sistemlerinde Oluşan Kayıplar

Suyun, iletim kanal yüzeylerine temas etmesinden dolayı oluşan sürtünme kayıpları, suyun yön değiştirmesinden dolayı oluşan kayıplar, cebri borudaki kavisler, daralmalar, çatallaşmalar gibi etkenler, rotor kanatlarına çarpmadan doğrudan emme borusuna veya çıkışa giden kaçak sulardan dolayı oluşan düşü kayıpları, branşmanlarda oluşan sızıntılar, ızgara önünde oluşan yosunlar, birikintiler, vanalarda oluşan sızıntılar bu sistemlerdeki kayıplar olarak tanımlanabilir (Şargın, 2006).

1.1.1.2. Generatör Sistemlerinde Oluşan Kayıplar

Generatör sisteminde oluşan kayıpları genel anlamda bakır ve demir kayıpları oluşturmaktadır. Demir kayıpları ikiye ayrılır, bunlar histerisiz ve Eddy (Fuko) kayıplarıdır. Demir kayıpları çekirdek ve nüve kayıpları olarak da bilinir. Sargı dirençlerinden dolayı oluşan kayıplara ise bakır kayıpları denir. Bu kayıplara I^2R kayıpları da denilmektedir. Generatörün boшта ve yükte çalışmasına göre kayıpları değişmektedir. Boшта çalışmada aynı zamanda uyartım kayıpları da oluşmaktadır. Diğer taraftan generatör rotoru döndüğünden dolayı hava, sürtünme ve rüzgar/vantilasyon kayıpları da oluşmaktadır.

1.1.1.3. Diğer Elektrik Sistemlerinde Oluşan Kayıplar

Ana Güç Transformatörlerinde Oluşan Kayıplar: Generatörde oluşan kayıplara benzerdir. Buna göre demir kayıpları olan fuko, histerisiz kayıpları, bakır kayıpları temel kayıplarıdır. Levha, kazan gibi kayıplardan da bahsetmek mümkündür. Transformatörlerde dönen parça olmadığından dolayı sürütme ve rüzgar/vantilatör kayıpları yoktur.

Şalt Sahasında Oluşan Kayıplar: Şalt sahalarında bulunan ölçüm trafoları, kesiciler, ayırıcılar, izolatörler, iletim baraları gibi teçhizatlarda enerji kayıplar oluşmaktadır (Şargın, 2006).

1.1.1.4. Türbin Sistemlerinde Oluşan Kayıplar

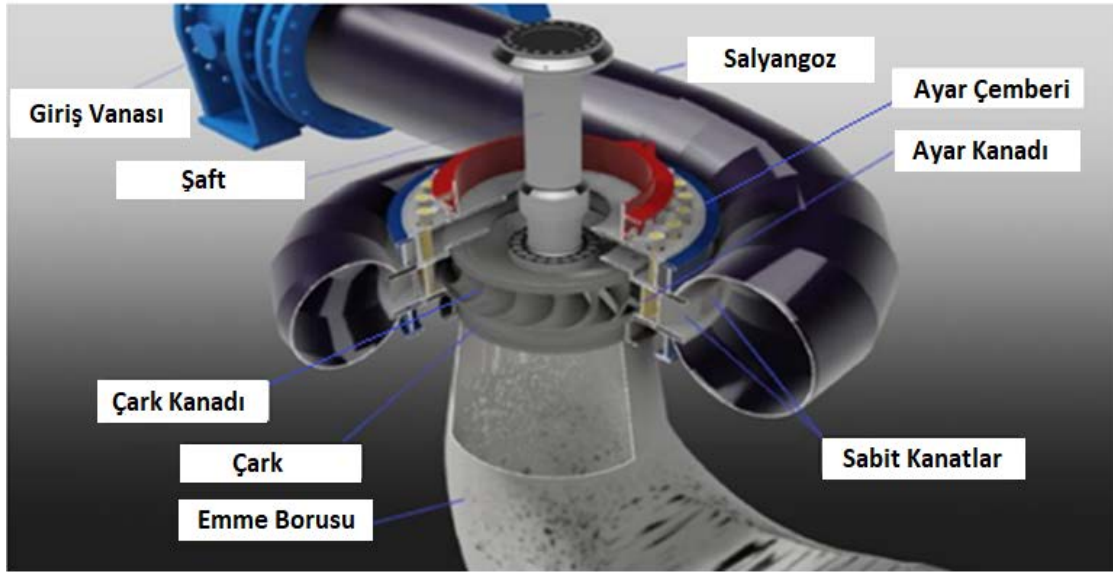
Hidrolik makinalar içinden geçen alışkandan enerji alan veya ona enerji veren rotasyon simetrik makinalardır. Bir turbo makinada enerji dönüşümü, sürekli bir biçimde çark yani rotor adı verilen ve eksenini etrafında dönen, dönel simetrik bir çarkta gerçekleşir. Çark içinden geçen akışkandan enerji alıyorsa makinaya "türbin", akışkan çarktan enerji alıyorsa "rotodinamik pompa" veya "turbo pompa" adı verilir (Köse, 1996).

Hidroelektrik santrallerinde kullanılan türbinlerin yani su türbinleri diğer adı ile hidrolik türbinlerin temel fonksiyonu, yüksek basınçlı olarak iletim kanalları ile yönlendirilmiş olan suyun yani hidrolik gücün generatör rotoru için bir tahrik kaynağı olmaktır. Hidrolik türbinler 1800'lü yılların başından itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Howd, James B. Francis, Lester Allan Pelton, Victor Kaplan, M. Michell, Banki, Glikes ve diğerleri tarafından farklı dönemlerde türbinler üzerinde çalışmalar yapılmış, yeni türbin modelleri bulunmuş veya var olan modelleri geliştirilmiştir.

Enerjinin uzak yerlere naklinin gerçekleşmesi ile birlikte büyük güçte birçok santral inşa edilmeye başlanmış ve zaman içerisinde bu santraller ortak ağlar üzerinden enerji temini yapmaya başlamışlardır. Oluşan bu bütünleşmiş sistemler yük-frekans kontrolü gibi çok kritik bir uygulamayı gündeme getirmiştir. 20. yy başlarından itibaren, otomatik yük-frekans kontrolü yapan Francis, Kaplan ve Pelton tipi hidrolik türbinlerin kullanım sahaları genişlemeye başlamıştır (Demirhan, 2006).

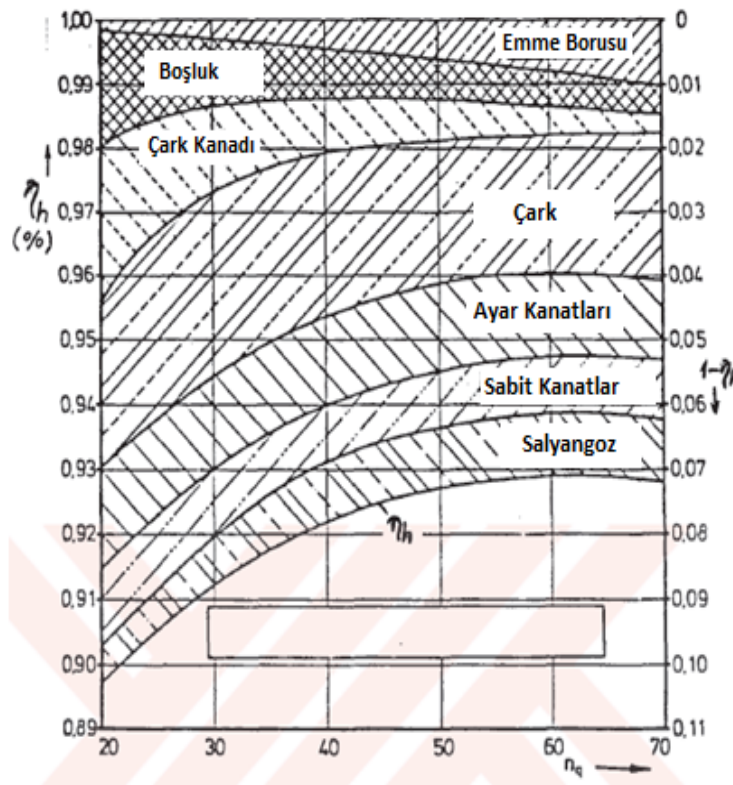
Francis tipi türbinler geniş bir çalışma aralığına sahip bir iç akış reaksiyon türbinidir. Bu türbinlerin birçok uygulama alanları vardır ama daha çok orta-yüksek düşü ve orta debili santrallerde kullanılmaktadırlar. Yüksek verimli aralıklarda çalışması ve her geçen gün çalışma aralığının genişletilmesi, yük-frekans dengesini sağlayacak manevraların ve debi ayarın çok daha kolay bir şekilde gerçekleşmesi, türbin boyutunun küçük olması Francis tipi türbini ayrıcalıklı kılan özelliklerindedir. Dünya genelindeki santrallerin yaklaşık %60'ın da bu tip türbin kullanılmaktadır (Linguip, 2021). Francis tipi türbinlerde salyangoz, sabit kanatlar, ayar kanatları, ayar çemberi,

çark ve çark kanatları, emme borusu gibi temel donanımlar mevcuttur. Francis tipi türbinin bileşenlerinin gösterimi Şekil 3'te verilmiştir (TEMSAN).



Şekil 3. Francis tipi türbinin bileşenleri

Francis türbinlerde, temel donanımlarında ayrı ayrı olarak verim kayıpları meydana gelmektedir. Bir santralde en büyük verim kayıpları türbinde gerçekleşirken, türbin bileşenleri içerisindeki en büyük kayıplar çark ve çark kanatlarında meydana gelmektedir. Francis türbinlerde $n_q = 20-70$ d/dak'da geometrik ve hidrolik pürüzsüz yüzeyler için bileşenlerine ait verim ve kayıpların dağılımı Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Francis türbinlerinde $n_q = 20-70$ d/dak'da geometrik ve hidrolik pürüzsüz yüzeyler için bileşenlerine ait verim ve kayıpların dağılımı

1.2. Hidroelektrik Santrallerde Verim Ölçüm Metotları

Hidroelektrik santrallerde verimlik ölçümü yapılabilmesi için birçok metot geliştirilmiştir. Mutlak/(absolute) ve endeks/(relative) testleri olarak gerçekleştirilen testlerde debi ölçüm metotları kullanılmaktadır. bu testlerde etçihazatın mevcut durumu analiz edilebilmektedir. Testlerde, ünitelerde kurulumu yapılan Verim İzleme Sistemi(VİS), diğer bir ifade ile Efficiency Monitoring System (EMS) kullanılarak da veriler toplanmakta ve anlık olarak verim takibi yapılabilmektedir. Böylece kestirimci bakım çerçevesinde, teçhizata doğru müdahaleler doğru zamanda yapılarak santralin verimi maksimum seviyede tutulabilmektedir.

1.2.1. Debi Ölçüm Metotları

Debi ölçümü, fiziksel özelliklere ve özellikle cebri boru uzunluğuna, test hedeflerine, test süresine, maliyete, kesinlik derecesine göre farklı metotlar kullanılarak yapılmaktadır. Bunlar doğrudan ve bağıl ölçüm yöntemleri olmak üzere ikiye ayrılırlar. Kullanılan debi ölçüm metoduna göre türbin verimlilik ölçüm metodu adlandırılır. Debi ölçüm metotları aşağıda verilmiştir (Westermann, 2021).

Doğrudan debi ölçüm yöntemleri;

- Termodinamik Metot İle Debi Ölçümü
- Akustik (Ultrasonik) Metot İle Debi Ölçümü
- Moline (Intake Current Meter) Metot ile Debi Ölçümü
- Basınç-Zaman (Pressure-Time, Gibson Metot) Metot İle Debi Ölçümü
- Boya Seyreltme (Dye Dilution) Metot İle Debi Ölçümü
- Geçiş Zamanlı (Transit Time, (salt velocity or Tracer)) Metot İle Debi Ölçümü
- Volimetrik Metot ile Debi Ölçümü

Bağıl debi ölçüm yöntemleri;

- Winter-Kennedy Metot (Fark Basınç Yöntemi)
- Harici Boru Montajlı Akustik Metot

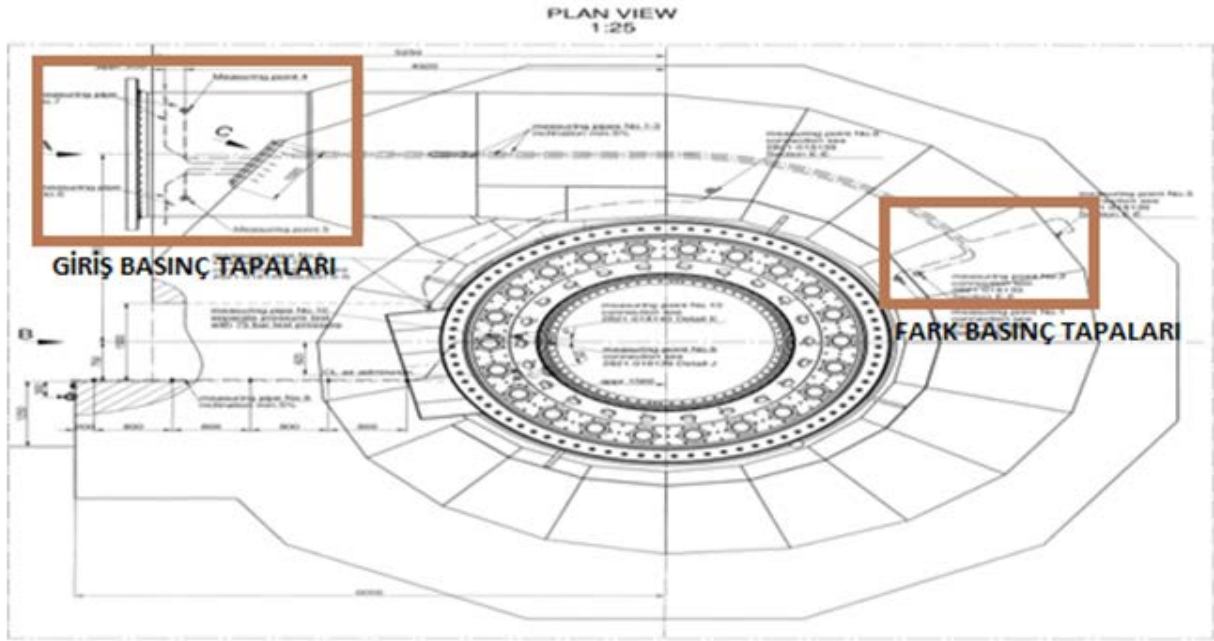
1.2.2. Winter-Kennedy Metodu ile Bağıl Debi Ölçümü

Winter-Kennedy metodu ile debi ölçümü hidroelektrik antrallerinde genel olarak kullanılan bir metottur. Çünkü santrallerin kurulum aşamasında, türbin verimlilik testlerinin yapılabilmesi ve verimliliğin izlenebilmesi için salyangoz içerisine fark basınç tapaları, diğer bir ifade ile Winter-Kennedy diferansiyel basınç tapaları yerleştirilmiş bulunmaktadır.

Devreye alınan bir ünitelerde salyangoz içerisinde su kaynaklı basınç oluşmaktadır. Salyangoz içerisinde türbine yakın olan kısımda suyun hızı yüksek olduğundan dolayı bu noktalardaki basınç değeri düşük, türbinden uzak olan kısımlarda ise suyun hızı azaldığından dolayı bu noktalardaki basınç değeri yüksek olmaktadır. Salyangoz içerisinde türbine yakın kısımdan başlayarak salyangozun dış çeperine doğru yerleştirilmiş olan basınç tapaları aracılığı ile bu farklı basınç değerleri, fark basınç sensörleri aracılığı ile okunmaktadır. Okunan bu değer Winter-Kennedy metodu ile debi hesaplamasında kullanılmaktadır.

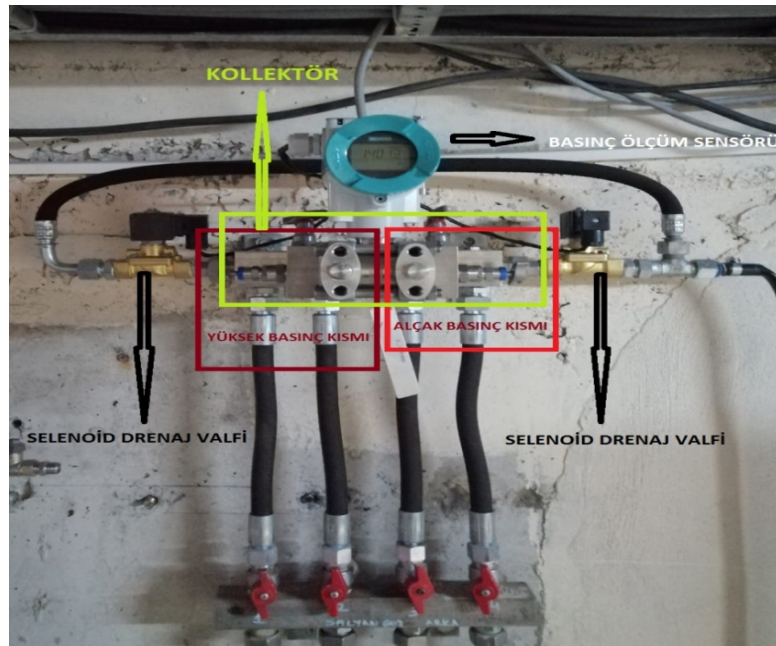
Fark basınç tapaları salyangoz içerisine, farklı basınç değerlerinin bulunduğu yerlere en az 2 adet olacak şekilde yerleştirilirler. Ancak genel olarak 4 tupa kullanılmaktadır. Santralin durumuna göre veya yedek tapaların mevcudiyetine göre tapaların adet sayısı değişmektedir. Santrallerde bulunmaması halinde ise sonradan bu tapalar salyangoz içerisine yerleştirilebilmektedirler. Salyangozun girişinde bulunan ve aralarında 90 derecelik açılı bulunacak şekilde yerleştirilmiş olan 4 adet giriş basınç tapası ise verimlilik ölçümlerinde özellikle net düşünün hesaplanmasında kullanılmaktadır. Bu tapalar aracılığı ile giriş basıncı bar seviyesinde ölçülmektedir. Şekil 5'te

Winter-Kennedy diferansiyel basınç tapalarının/fark basınç ve giriş basınç tapalarının salyangoz içerisindeki yerleşimi gösterilmiştir.



Şekil 5. Şekil salyangoz giriş basınç ve fark basınç tapalarının yerleşim planı

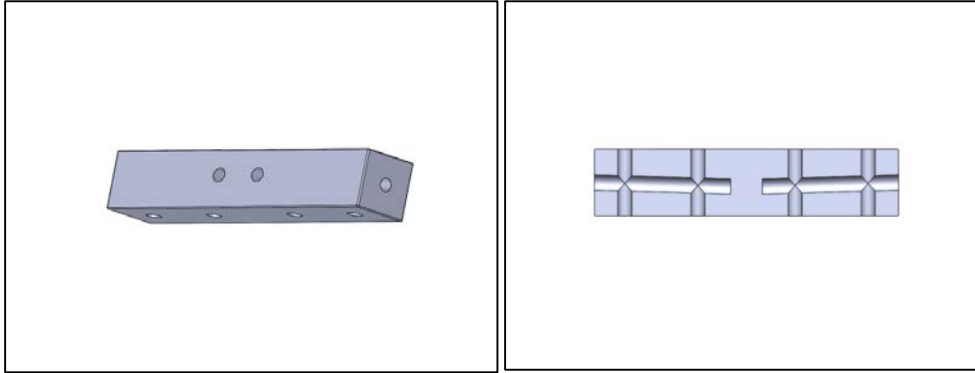
Salyangoz içerisindeki tapalara bağlanmış olan basınca dayanıklı hortumlar kullanılarak ilgili ünitenin yanına yerleştirilmiş olan kollektörlere giriş yapılır. Kollektörlerden alınan çıkışlar ile fark basınç sensörüne bağlantı yapılır. Böylece salyangoz içerisindeki oluşan fark basıncı ölçülmektedir (Gezer, 2021). Ölçümlerde kullanılan fark basınç sensörü Şekil 6'da gösterilmiştir.



Şekil 6. Fark basınç sensörü

Fark basınç ölçümlerinde kullanılan kollektörlerde, alt kısmında tapalardan gelen hortumların bağlandığı en az dört adet giriş bulunmaktadır. Burada kullanılan kollektörler tek parça olarak imal

edilmiş olsa da, kollektörlerin içyapısı orta kısmı doldurularak ikiye ayrılmıştır. Böylece kollektörün sağında ve solunda birbirinden bağımsız ve 2 adet girişi, 1 adet çıkışı olan iki ayrı bölme oluşmaktadır. Kollektörün sağ tarafındaki girişlerine salyangoz içerisinde yüksek basıncın olduğu yerlere yerleştirilmiş olan tapalardan gelen hortumlar, sol tarafındaki girişlerine ise alçak basınç tarafına yerleştirilmiş bulunan tapalardan gelen hortumlar bağlanmaktadır. Kollektörün üst kısmında yer alan iki adet çıkıştan bir tanesi kollektörün yüksek basınç kısmından gelen basıncı, diğeri ise alçak basınç tarafından gelen basıncı sensöre taşımaktadır. Böylece basınç sensörü, kendi içerisinde bu iki farklı basınç değerlerini kıyaslayarak mbar seviyesinde hassas bir ölçüm değeri vermektedir (Gezer, 2021). Fark basınç sensörlerinin ölçümlerinde kullanılan kollektörlerinin dışyapısı ve içyapısı Şekil 7'de verilmiştir.



Şekil 7. Fark basınç sensörleri kollektörlerinin dışyapısı ve içyapısı

Selonoid drenaj valfi fark basınç sensörleri ile ölçüm yapılan sistemde, kollektörlerin hem alçak basınç tarafında ve hem de yüksek basınç tarafında bulunmaktadır. Elektronik bağlantı yapılan bu valfler otomatik olarak açma ve kapama yapacak şekilde konumlandırılmışlardır. Bu valf, her saat başında yaklaşık 10 sn gibi bir süre boyunca açılıp-kapanarak kollektörün içerisini temizlemektir. Fark basınç sensörü mbar seviyesinde hassas bir ölçüm yaptığından dolayı, ölçümlerde hata oranını minimize etmek adına, kollektör içerisinde herhangi bir şekilde hava, kir, çakıl gibi maddelerin olmaması gerekmektedir.

Winter-Kennedy metodu bağımlı bir metottur. Bir santraldeki türbinin debisi doğrudan bu metot ile ölçülememektedir. Bu metodun kullanılabilmesi için akustik, boya seyreltme, termodinamik gibi doğrudan debi ölçüm metodlarından birinin kullanılarak, türbinin debisinin ölçümünün yapılması gerekmektedir. Bu metotlar kullanılarak edilen debi değeri ile fark basınç sensöründen gelen değer Winter-Kennedy denkleminde kullanılarak, öncelikle akış sabiti değeri bulunmaktadır. Daha sonraki bağıl debi hesaplamalarında ise akış sabiti değeri ve fark basınç değeri kullanılarak, yine bu denklemden faydalanılarak anlık bazda türbinin debisi hesaplanabilmektedir. Bu nedenle, Winter-Kennedy metodu için debi ölçümünden ziyade debi hesaplaması yapılmaktadır, denilebilir. Buna göre debi hesaplanmasında kullanılan Winter-Kennedy denklemi aşağıdaki gibidir;

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

Burada;

K_1 : Akış Sabiti

Q: Debi

ΔP : Fark Basıncı

K_1 akış sabiti, sadece ölçüm yapılan santral ünitesine ait bir değer olmaktadır. Formüldeki ΔP , fark basınç tapaları aracılığı ile sensörler üzerinden okunan değerdir. K_2 üs değeri ise IEC-41 standartlarına göre genel olarak 0,5 alınır. Uygulamada 0.48-0,52 arası kullanımı da mevcuttur.

2. MATERYAL VE YÖNTEM

2.1. Alpaslan-1 HES Genel Bilgiler

Alpaslan-1 Hidroelektrik Santrali (HES) Murat Nehri üzerinde kurulmuş ve 2012 yılında enerji üretimine başlamıştır. 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. Santral, Muş'un 50 km kuzeydoğusunda yer almaktadır ve T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığına bağlı olarak Elektrik Üretim A.Ş. bünyesinde faaliyetlerini yürütmektedir. Alpaslan-1 HES'in genel görünümü Şekil 8'de verilmiştir (EÜAŞ, 2022).



Şekil 8. Alpaslan-1 HES genel görünümü

Alpaslan-1 HES, baraj tipi depolamalı santraller sınıfındadır. Baraj gövdesi kil, çekirdekli kaya ve kum-çakıl dolgu tipinde yapılmış ve toplamda 3.78 milyon m³ gövde dolgu hacmine sahiptir. Santral yarı batık, orta düşüklü olarak yapılmıştır. Barajın toplam yağış alanı yaklaşık olarak 15.460 km², toplam göl hacmi ise yaklaşık 3 milyar m³ seviyesindedir. Santral ait şalt sahası 154 kV gerilime uyumlu çift bara sistemine göre tasarlanmıştır. Şalt sahası çıkışında, farklı yerlerdeki TEİAŞ trafo merkezleri 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. Borulardan biri ünite-1 ve ünite-2' nin, diğeri de ünite-3 ve ünite-4'ün salyangoz girişine bağlanmaktadır. Giriş kapakları ile ayrılma noktası arasındaki mesafeye göre cebri boru uzunluğu yaklaşık olarak 270 m'dir (ETKB ve diğeri, 2020). Alpaslan-1 HES'te 2015-2020 yılları arasında üretilen brüt ve net enerji miktarları Tablo 2'de sunulmuştur.

Tablo 2. Alpaslan-1 HES üretim değerleri (2015 -2020)

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Brüt Üretim (MWh)	542.710,73	462.132,30	409.675,00	419.578,91	621.768,80	483.099,80
Net Üretim (MWh)	538.030,19	445.571,60	405.439,49	413.837,27	616.320,19	478.965,94

Alpaslan-1 HES'in türbin ve generatör tasarım değerleri aşağıdaki gibidir;

Türbin

Tipi	: Dikey Francis
Nominal Gücü	: 41,75 MW
Brüt/Nominal Düşü	: 82,5 m
Net Düşü	: 80,6 m
Nominal Debi	: 55,4 m ³ /s
Hız	: 250 devir/dakika
Verim	: %95,4

Generatör

Türü	: Çıkık kutuplu, senkron
Rotor Kutup sayısı	: 12
Çıkış Gerilim	: 13,8 kV
Verim	: %98,3
Nominal Çıkış Gücü	: 0,9 PF'de 45 MVA

2.2. Hidro Türbin Performans Testlerinin Yapılması

Alpaslan-1 HES' te hidrolik türbin performans testleri 16 ve 20 Nisan 2019 tarihleri arasında ünite-3'te gerçekleştirilmiştir. Türbin-Generatör ünitesinin performansının gerçek değer aralıklarında tespit edilebilmesi için çalışmalar yürütülmüş, santralin işletim şartlarını etkileyen parametreler ile ilgili ölçümler yapılmış, analizler ortaya konulmuştur. Testler Kanada menşeli HATCH Ltd. şirketi, SU-ENER Mühendislik ve Enerji Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti. ile EÜAŞ tarafından ortak olarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde, önceki günlerde kurulumu gerçekleştirilen Verim İzleme Sistemi(VİS) ile testler için gerekli veriler toplanmıştır. Test günü, doğrudan debi ölçüm metodu olan boya seyreltme metodu kullanılarak debi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Winter-Kennedy metodu kullanılarak endeks testler yapılmıştır. Santralde gerçekleştirilen testlerin noktaları/sıralaması Tablo 3'te verilmiştir (ETKB ve diğerleri, 2020).

Tablo 3. Test noktaları/sıralaması

Test Numarası	Ayar Açıklığı (%)	Kanadı	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
4	99,2		47,5	Endeks
5	90,5		44,6	Endeks
6	95,1		46,4	Endeks
7	70,5		34,4	Endeks
8	75		38	Endeks
9	60,5		27,8	Endeks
10	65		30,7	Endeks
0c	0,1		0	Devre Dışı Bırakma Kontrolü

Endeks testleri aşağıda belirtilen koşullarda yapılmıştır.

- Testlerdeki ölçümler normal santral işletme aralığında yapılmıştır.
- Farklı ayar kanat açıklıklarında olmak üzere toplamda 10 defa endeks testi yapılmıştır.
- Testler %50-%100 ayar kanat açıklıkları arasında yapılmıştır. Ayar kanat açıklıkları ile ilgili ayarlamalar santral kumanda odasından yapılmıştır.
- Ünitenin güç faktörü 1,0 olarak alınmıştır.
- Endeks testlerinde elde edilen bütün değerler verim izleme sistemi üzerinden alınmıştır.
- Ünitenin devreye alınması, çıkarılması vs. gibi manevralar santral kontrol kumanda odasından yapılmıştır.
- Bunların haricinde bazı endeks testlerinin ise tekrarının yapılmasına gerek duyulmuştur.

Endeks testleri için gerekli olan debi ölçümü, bağıl debi hesaplama yöntemi olan Winter-Kennedy metodu kullanılarak yapılmıştır. Burada boya seyreltme yöntemi ile yapılan testte ölçülen debi ve salyangoz içerisindeki tapalar aracılığı ile fark basınç sensörlerine gelen basınç değeri kullanılarak ünitenin akış sabiti bulunmuştur. Testlerde K_2 değeri 0,5 alınmıştır (ETKB ve diğerleri, 2020).

2.2.1. Testlerde Yapılan Ölçümler İçin Kullanılan Ekipmanlar ve Verilerin Toplanması

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

Türbin Giriş Basıncı Ölçümü: Türbin giriş basıncı, türbin girişindeki dört basınç piezometre hattına bağlanmış olan EMS basınca duyarlı manifoldda ölçülmüştür. Bütün basınç musluklarının içerisinde gerekli drenajlar yapılmıştır. EMS basınç sensörüne yedek olarak, Hatch, 200-psi basınca kalibre edilmiş bir geçici transdüser takmıştır. Bu basınç transdüseri EL 1371,0 m yükseklikte (1369,3 m türbin zemin kotununun 1,70 m üstünde) bulunan EMS manifolduna monte edilmiştir.

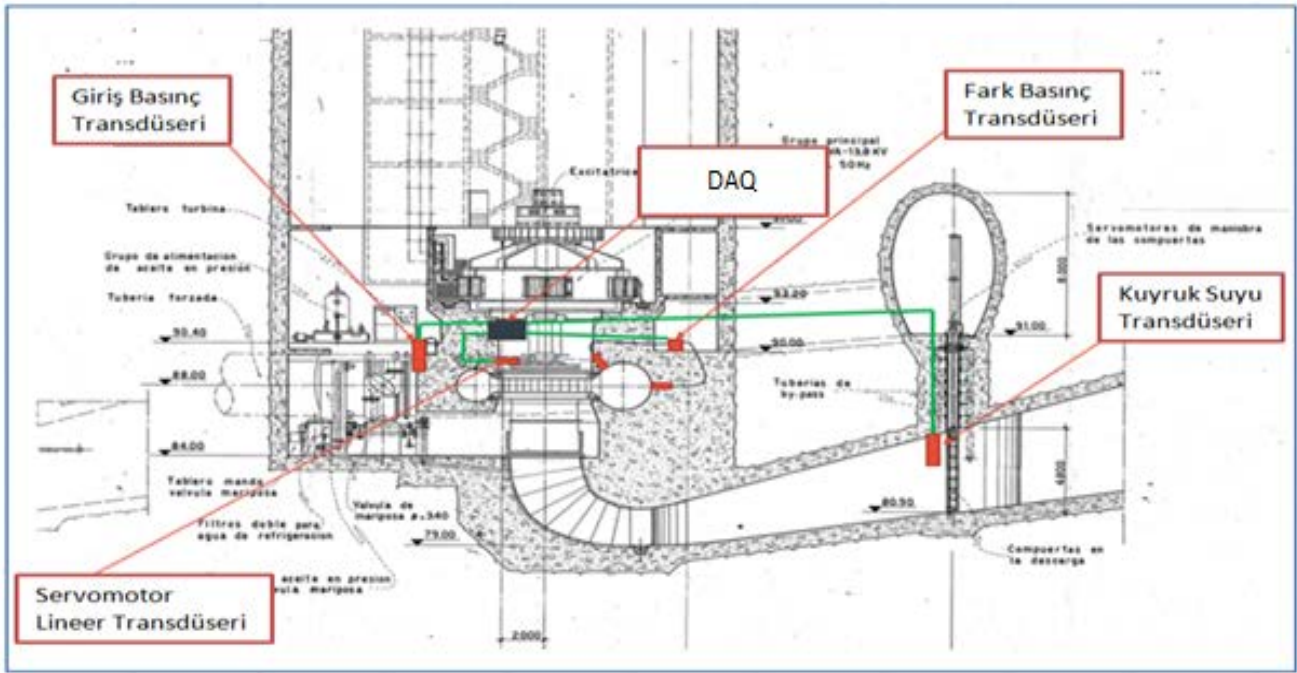
Kuyruk Suyu Seviyesi Ölçümü: Daldırılabilir tipi seviye sensörü kullanılarak, kuyruk suyu seviyesi ölçülmüştür. Kuyruk suyu kotu 1380,8 m olarak tespit edilmiştir.

Ayar Kanadı Pozisyon Ölçümü: Her test için verim ölçüm sistemi ile hız regülatörü kontrol panosunda bulunan panelden gerçek zamanlı veriler alınmıştır. Bu iki değer arasında uygunluk olduğu görülmüştür.

Çıkış Gücü Ölçümü: Her test için verimlik izleme sisteminden alınan değerler ile hız regülatörü panosu panelinden alınan değerler kaydedilmiştir. İki değer arasında uygunluk olduğu görülmüştür.

Winter-Kennedy Diferansiyel Basınç Ölçümü: Santral kurulumunda ikisi alçak basınç tarafında ikisi yüksek basınç tarafında olacak şekilde yerleştirilmiş olan 4 adet tapalardan gelen veriler fark basınç sensörü yardımı ile okunmuştur.

Çıkış sinyalleri, LabView yazılımını kullanan bir veri toplama programının çalıştığı dizüstü bilgisayara bağlı bir analog-dijital dönüştürücü kullanılarak elektronik olarak kaydedilmiştir. Böylece veri toplama cihazı (DAQ) ile ve bir dizüstü bilgisayar kullanılarak testler sırasında ölçülen bütün değerler okunmuş ve kaydedilmiştir. Veriler 10 Hz hızda yaklaşık 12 saniye boyunca örneklenmiştir. Daha sonra test parametreleri hesabı için bu verilerin ortalaması alınmıştır. EMS Diferansiyel Basınç sisteminden alınan ölçümler Hatch'in Diferansiyel Basınç sensöründen alınan ölçümlerle karşılaştırılarak değerlerin doğruluğu analiz edilmiştir. Testlerde kullanılan veri toplama cihazı, biri sekiz 20-mA kanallı, diğeri 32 ± 200 mV kanallı iki harici 16-bit analog-dijital modülden oluşmaktadır. Verilerin anlık olarak alındığı sensörlerin yerlerini gösterir şema Şekil 9'da gösterilmiştir (Westermann, 2021).



Şekil 9. Verilerin alındığı sensörlerin yerlerini gösterir şema

3. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

3.1. Akış Sabitinin Hesaplanması

Alpaslan-1 HES ünite-3'te yapılan boya seyreltme testleri neticesinde türbinin debisi birinci testte $57,45 \text{ m}^3/\text{s}$ olarak ölçülmüştür. Bu değer ve fark basınç sensörlerinden gelen değerler kullanılarak Winter-Kennedy akış sabiti ünite-3 için, $K_1 = 3,47 \text{ m}^3/\text{s}/\sqrt{\text{kPa}}$ olarak bulunmuştur. Fark basınç sensörünün okuduğu mbar değeri, Verim İzleme Sistemine tanıtılmış formülasyon ile pascal (pa) değerine dönüştürülmektedir.

3.2. Endeks Testlerinde Elde Edilen Bulgular

Ünite-3'te yapılan endeks testlerinde elde edilen sonuçlar Tablo 4'de gösterilmiştir (ETBK ve diğerleri, 2020).

Tablo 4. Test sonuçları

Test No	Ayar Kanat Açıklığı (%) (1)	Membra Su Seviyesi (m) (2)	Türbin Giriş Basınç Tapası		Emme Borusu Çıkış		Ölçülen Ünite Debişi (m ³ /s) (10)	Ölçülen Türbin Verimi (%) (11)	Ölçülen Net Düşü (m) (12)	Ölçülen Türbin Verimi (%) (13)	Nominal Net Düşüye Göre Düzeltme			Brüt Düşüye Göre Düzelt. Gen. Gücü (MW) (17)	Santral Verimi (%) (18)	Ünite Verimi (%) (19)	Türbin Verimi (%) (20)			
			Statik	Hız Düşüsü (m) (3)	Statik	Hız Düşüsü (m) (4)					Ölçülen Türbin Verimi (%) (9)	Ölçülen Net Düşü (m) (14)	Ölçülen Ünite Debişi (m ³ /s) (15)					Ölçülen Türbin Verimi (%) (16)		
Kapatma Kontrolü																				
Test0a.out	0.00	1442.68	1443.01	1443.01	1367.92	1367.92	75.09	74.76	75.09	74.76	75.09	74.76	75.09	74.76	75.09	74.76	75.09			
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	97.3%	74.15	74.69	30.60	44.90	80.60	31.34	85.9%	86.5%	88.7%
Kapatma Kontrolü																				
Test0c.out	0.07	1442.71	1442.71	1442.71	1368.12	1368.12	74.59	74.59	74.59	74.59	74.59	74.59	74.59	74.59	74.59	74.59	74.59	74.59	74.59	74.59

Burada;

1. Ayar kanadı (servomotor) açıklığı (%).
2. Memba su seviyesi (m).
3. Türbin girişindeki muslukların statik düşüsü, türbin girişindeki EMS basınç transdüseri ile ölçülmüştür (m).
4. Türbin giriş musluklarındaki hız düşüsü, türbin deşarjı ve en kesit alanı kullanılarak hesaplanmıştır (m) $V^2/2g$ (8)
5. Türbin girişindeki musluklardaki enerji çizgisi (m) = (3) + (4).
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) = (6) + (7).

9.Generatör Gücü, santraldeki çok fonksiyonlu ölçüm cihazı kullanılarak ölçülmüştür (MW).

10.Türbin deşarjı (m^3/s) $Q = (K_1)\Delta P^{K_2}$ (1.29), eşitliği kullanılarak hesaplanmıştır; burada ' ΔP ' Winter-Kennedy diferansiyel basıncı (kPa) olup EMS sistemiyle ölçülmüştür. Akış sabiti ' K_1 ' boya seyreltme debi ölçümlerine göre belirlenmiştir.

11.Benzer makinelerin performans garantilerinden alınan generatör verimi değeri (%)

12.Türbin Net düşüsü (m) = (5) - (8)

13.Türbin Brüt düşüsü (m) = (2) - (6)

14.Düzeltilmiş Generatör Gücü,

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

formülü kullanılarak hesaplanmıştır

15.Düzeltilmiş Türbin Debisi,

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

formülü kullanılarak hesaplanmıştır

16.Düzeltilmiş Net Düşü (m), Hrated

17.Brüt Düşüye Göre Düzeltilmiş Generatör Gücü

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

formülü kullanılarak hesaplanmıştır

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

$$Santral\ verimi = \frac{(9)}{\rho g(13)(10)}$$

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

$$Ünite\ verimi = \frac{(9)}{\rho g(12)(10)} \quad (6)$$

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

$$Türbin\ Verimi = \frac{(19)}{(11)} \quad (7)$$

Generatör Verimi: Testler sırasında maksimum generatör çıkış gücünün 73.18 m net düşü altında 40,9 MW olduğu görülmüştür. Santral tasarım net düşü değeri olan 80,6 m uyarlandığında, generatör çıkış gücünün 47,28 MW olduğu hesaplanmıştır. Aşağıdaki formül kullanılarak generatör kayıpları ve şaft milindeki aktif güç hesaplanmıştır.

$$P_{şaft} = P_{gen} + P_{kayıp} \quad (15)$$

Buna göre;

$$P_{kayıp} = AP_{gen}^2 + BP_{gen} + C$$

Burada A, B, C santral kurulumunda elde edilmiş olan verim eğrisinden elde edilen sabitler olup, $A = -4,167 \times 10^{-4}$, $B = 8,583 \times 10^{-2}$, $C = 93,9$ dir. Buna göre, testlerde ölçülen %98,2 verimlilik bir generatöre göre, türbin çıkış gücü yani şafttaki aktif güç 48,34 MW olur.

Türbin Verimi: Testlerde en yüksek türbin verim noktasına %80,42 ayar kanadı açıklığında, 54,64 m³/s, 73,68 m net düşüde ulaşılmıştır. Türbinin verimi bu noktada %91,9 olmuştur. Ayar kanatları %100 açıklıkta çalıştırıldığında türbin veriminde %2,6'lık bir düşüş olmaktadır. %51,07 ayar kanadı açıklığında ise türbinin pik verime göre %7,6'lık bir düşme olmaktadır. Ünite-3 test için hesaplanan parametrelere ait değerler ve boya seyreltme ve endeks testlerinin sonuçları Çizelge 4'te gösterilmiştir (ETKB ve diğerleri, 2020).

3.3. Bulguların Analizleri

Türbin testi 73,68 m ortalama net düşü değerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir test çalışmasında elde edilen türbin test sonuçları test kanununa göre yakınlık yasaları kullanılarak ölçülen gerçek net düşü değerinden 80,6 m nominal net düşü değerine normalleştirilmiştir. Testlerde en iyi değerlerde, ünite verimi %90,1 santral verimi %89 olarak hesaplanmıştır. 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. Alpaslan-1 HES'te ünite-3'te yapılan türbin saha performans testleri sonuçlarının özeti Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. Türbin saha performans testlerinin sonuçlarının özeti

	En İyi Verimde (Tek Ünite)	Maksimum Çıkış Gücünde
Türbin Verimi (%)	91,9	88,3
Kanat açıklığı (%)	80,42	99,22
Generatör Çıkış Gücü (MW)	40,56	47,28
Ünite Debisi (Normalleştirilmiş)	57,14	69,15
Ünite Debisi (Ortalama Ölçülen)	54,64	65,88
Net Düşü (normalleştirilmiş)	80,60	80,60
Net Düşü (Ortalama Ölçülen)	73,68	73,18
Generatör Verimi (%)	98,0	98,2
Ünite Verimi (%)	90,1	86,8
Santral Verimi (%)	89,0	85,3

Güç 80,6 m türbin nominal düşüsüne orantılandığında generatör çıkış gücü 47,28 MW olur. Bu, %98,2 oranındaki bir generatör verimine göre türbin çıkışı şaftındaki türbin çıkış gücünün 48,34 MW olduğu anlamına gelir. Düşü, nominal düşünün yaklaşık %10 altında olduğundan ve türbin de hala nominal gücüne ulaşabildiğinden, türbinde gelecekte kullanılacak ek güç bulunmaktadır ancak generatör ve diğer bileşenlerin yükseltilmesi gerekebilir.

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 tasarım pik performans değerinin yaklaşık %3,5 altında olduğunu göstermiştir. Santralin yıllık türbin kayıplarının yılda %0-0,15 arasında olması beklenir.

Performansındaki düşüş santrale ve hatta üniteye özgüdür. Bunun birçok bilinen veya bilinmeyen nedeni olmaktadır. Kavite hasarı, türbin çarkı kanadında kaynağa bağlı bozulma, su geçişlerindeki yüzey pürüzlülüğü ve türbin çarkı conta boşluğu gibi sebepler, performans düşüklüğünün nedeni olarak sunulabilir. Santral veriminin izlenmesiyle esas olarak ünite verimindeki uzun dönemde gerçekleşecek düşmenin takip edilmesi ve bakım ekibinin doğru karar almalarına yardımcı olması amaçlanmaktadır.

Su giriş ağzındaki kayıplar genel olarak ihmal edilir. Ancak giriş ızgarasında organik madde veya çöp birikintisi düşü kayıplarına neden olabilmektedir. Salyangoz giriş basıncı ölçülerek ve bu değer brüt düşü su seviyesi değeriyle karşılaştırılarak genel su geçiş kayıpları tespit edilebilir ve böylelikle zaman içinde oluşan toplam su geçişi düşü kayıpları izlenebilir. Yüzeyin durumu bozulursa sürtünme kayıplarının artması beklenebilir ancak cebri borunun iç yüzeyi eski haline geri döndürülürse %0,2 ila %0,8 oranında bir iyileşme sağlanabilir ancak bu ekonomik bir çözüm olmayabilir.

Emme borusu kayıpları genel olarak %1'in altında küçük oranlardadır. Ancak zaman içerisinde kayıplarda %0,3'lük bir artış olması beklenir. Emme borusundaki kayıplar türbin verimliliğini doğrudan etkilemektedir.

Her bir bileşenin yüzeyinin durumuna bağlı olarak yüzey bitirme iyileştirmeleriyle %0,7 ila %2,5 arasında bir verim artışı elde edilmesi beklenebilir. Sabit ring ve ayar kanatları modifiye edilir ya da türbin çarkı değiştirme projesi kapsamında daha yüksek verim sağlayacak bir hidrolik tasarım yapılırsa verimde %0,9 ila %2,8 arasında (türbin çarkı kazançları hariç) ek bir artış beklenebilir (ETBK ve diğerleri, 2020).

Trafo ve şalttaki kayıplar şiddet olarak nispeten düşüktür ve zaman içinde önemli bir ilerleme eğilimi göstermez. Bu iki sistem gerçek zamanlı olarak izlenerek genellikle yaklaşmakta olan sorunlar tespit edilir ve kaybı yakından izlemek yerine koruyucu bakım önlemleri uygulanır.

4. SONUÇ ve ÖNERİLER

Dünya geneli oluşan enerji talebinin karşılanması için birçok enerji kaynağı kullanılmaktadır. Hem artan enerji arzını karşılamak hem de enerji üretiminde çevre dostu kaynakları kullanmak temel strateji haline dönüşmüştür. Enerji verimliliği ve yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik üretimi enerji politikalarının geleceğini şekillendirmektedir. İlk yakıt olarak enerji verimliliğinin konumlandırılması politikasının etkin bir şekilde sürdürülebilir olması için mevcut enerji kaynaklarının üretimde etkin bir şekilde kullanımını gerektirmektedir.

Hidroelektrik santralleri, verimlilikleri yüksek olarak inşa edilen ve suyun hidrolik gücünün kullanarak elektrik üretilen tesisler olduğundan yenilenebilir enerji kaynaklı santraller olarak görülmektedir. Uzun yıllar çalışacak şekilde kurulumu yapılan bu tesislerde zamanla performans düşüşleri meydana gelmektedir. Bu düşüşler santralin ekonomik ömrünü etkilediği gibi enerji arzında da sorunlara sebep olabilmektedir. Bu nedenle santralin performansının anlık olarak takibi büyük önem taşımaktadır.

Santrallerde verim kayıpların gerçekleştiği birçok teçhizat bulunmaktadır. Ancak en büyük kayıplar her zaman için türbin ve türbin bileşenlerinde oluşmaktadır. Nitekim Alpaslan-1 HES'te yapılan testlerde görüldüğü üzere türbindeki verim değeri, tasarım değerine göre %3,5 gibi bir oranda düşmüşken, generatörün verim değeri tasarım değerine göre %0,1 düşmüştür. Bu nedenle türbin verimliliğini korumak, santral verimliliğini ve ekonomik ömrünü artırmanın en temel yoludur.

Türbinlerde gerçekleşen verim kayıpların birçok nedeni olabilmektedir. Özellikle kavite, vorteks, vibrasyon, tortu erozyonu, korozyon gibi olaylar verim kayıpların oluşmasındaki en büyük

sebeplerdendir. Yaşanan bu kayıpların önlenmesi mümkün olmamakla birlikte, bunların gelişim seyri izlenebilir ve oluşan hasarlara doğru müdahaleler zamanında yapılabilir.

Enerji santrallerinde türbin verimliliğinin izlenmesi her geçen gün yaygınlaşan bir olgudur. Santrallerin bütün ünitelerinde bu sistemin kurulumu, işletme açısından büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Diğer taraftan türbin verimliliğinin ölçülebildiği ve izlenebildiği oranda türbin ve bileşenlerine doğru müdahaleler yapılabilecek olması, sistemi değerli kılan bir başka unsurdur. Bu noktada en yaygın olarak kullanılan metot, bağlı bir debi ölçüm metodu olan Winter-Kennedy metodudur. Bu metodun kullanılması için santrallerin ilk kurulumunda gerekli alt yapı hazırlığı yapılmaktadır. Böylece verim izleme sistemine bu metot tanımlanarak santral, ünite, türbin verimliliği anlık olarak takip edilebilmektedir. Bu nedenle ülkemizdeki bütün santrallerin ünitelerinde bu metodu kullanarak bir verim izleme sistemi kurulmalı ve santrallerimizin performansı yakından takip edilmelidir.

5. KAYNAKÇA

Demirhan AY, (2006). Küçük Hidroelektrik Santrallerde Türbin Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul

Devlet Su İşleri (DSİ), (2020). Hidroelektrik Enerji, Yıllık Faaliyet Raporu, Ankara, s: 39-44.

Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ), (2020). Türkiye Elektrik Kurulu Güç ve Üretimi Bilgileri, Yıllık Faaliyet Raporu, Ankara, s: 19-23

Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ). (2022). “Hidroelektrik Santraller”, <https://www.euas.gov.tr/tr-TR/santraller> (Erişim Tarihi: 20.04.2022)

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETBK), Dünya Bankası, Hatcd Ltd., (2020). Elektrik Üretiminde Enerji Verimliliği-Alpaslan-1 HES Türbin Perf

GENSED. (2022). “TEİAŞ, 2022 Ocak Ayı Kurulu Güç Raporunu Açıkladı”, <https://www.gensed.org/basin/teias-2022-ocak-ayi-kurulu-guc-raporunu-yayinladi> (Erişim Tarihi: 20.04.2022)

Gezer, O. (2021). Verim İzleme Sistemi Kurulumu ve Operasyonlar. EÜAŞ IPA Eğitim Programı, 23 April 2021, Ankara, s: 2-30.

Goyal, R., Gandhi, B.K. (2018). Review of Hydrodynamics Instabilities in Francis Turbine During Offdesign and Transient Operations. *Renewable Energy Journal*, 116: 697-709

Gögebakan ME, (2019). Hidrolik Türbinlerin Kanat Yüzeylerinde Kavite Olayının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.Şanlıurfa.

Göğüş M, Köken M, Baykara A, (2013). Su Alma Yapılarında Girdap Oluşumu ve Önlenmesi için Gerekli Düzeneklerin Belirlenmesi, TÜBİTAK MAG Proje Raporu, Ankara, s: 12-19.

Köse F, 1996. Türbin Karakteristik Deneylemleri ile Kanat Verimliliğinin İyileştirilmesi için bir Francis Türbini Deneysel Kurulumu ve Araştırılması. Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Linguip. (2021). Francis Türbin Nedir, <https://www.linguip.com/blog/what-is-francis-turbine/> (Erişim Tarihi: 07.12.2021)

Mercan B, (2014). Orta Ölçekli Hidroelektrik Enerji Tesislerinin İncelenmesi için Örnek bir Çalışma-Bağışlı Regülatörü ve HES. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü, İstanbul

Özbek G, (2022). Hidroelektrik Santrallerinde Enerji Verimliliğine Türbinin Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bitlis.

- Özgören M, Köse F, Aksoy MH, Canlı E, Solmaz Ö, Doğan S, Yağmur S, 2012. Konya' da Yenilenebilir Enerji Kaynakları Malzeme Üretilebilirlik Araştırması-Su (Hidro) Enerji, Konya Sanayi Odası-Mevlana Kalkınma Ajansı Raporu, Konya, s: 6-43.
- Rüstemli S, Özbek G, 2022a. Türkiye'de Enerjinin Görünümüne Genel Bir Bakış. 3.Uluslararası Haliç Multidisipliner Bilimsel Araştırmalar Kongresi 12-13 Mart 2022, İstanbul, s: 264-281.
- Rüstemli S, Özbek G, 2022b. Dünyada Enerjinin Görünümüne Genel Bir Bakış. 3.Uluslararası Haliç Multidisipliner Bilimsel Araştırmalar Kongresi 12-13 Mart 2022, İstanbul, s: 651-662.
- Rüstemli S., Özbek,G. (2022c). “Hidroelektrik Santrallerinde Winter-Kennedy Metodu İle Debi Ölçümü ve Türbin Verimlilik Testleri”, Bakü Avrasya Üniversitesi 30. Kuruluş Yılı Münasebetiyle Uluslararası Bilimsel Araştırmalar Kongresi, 27-28 Nisan 2022, Bakü, Azerbaycan,
- Sav M, (2010). Francis Tipi Hidrolik Türbinlerde Kavitasyonun Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ
- Sargın Ş, (2006). Üretimden Tüketime Elektrik Enerji Sistemlerinde Meydana Gelen Kayıplar ve Giderilmesine Yönelik Çalışmalar. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Soral Ç, (2020). Türkiye'deki Enerji ve Enerji Verimliliği Çalışmalarının Tarihsel Değişim Süreci. Yüksek Lisans Tezi, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Osmaniye
- Thapa BS, Dahlhaug OG, 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
- Westermann J, (2021). Efficiency Improvement. EÜAŞ IPA Training Program, 25-26 March 2021, Ankara, s: 10-55
- Tuncer,A. (2021). Su Döngüsü ve Yeraltı Suları, <https://yunus.hacettepe.edu.tr/~alaettintuncer/docs/Su.pdf> (Erişim Tarihi: 11.11.2021)