

Araştırma Makalesi

Hidroelektrik Santrallerde Türbin-Jeneratör Yatak Arızaları Sonucu Oluşan Mekanik Titreşimler ve Çözüm Yöntemleri

Gökhan Kahraman^{1,*} 

Gönderim: 21.04.2025

Kabul: 28.08.2025

¹Munzur Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği, Tunceli, Türkiye;
gokhankahraman@munzur.edu.tr

*Sorumlu yazar

Özet: Günümüzde imal edilmekte olan hidrolik türbinlerin güçlerinin ve boyutlarının çok artmış olması ciddi bir mekanik titreşim ve şaft salınımı problemini de beraberinde getirmektedir. Bilinmektedir ki mekanik titreşime (vibrasyon olayı) maruz kalan bir makine devamlı olarak çekme, basma, eğme, burma, kesme gibi değişken mekanik baskılarla sürekli olarak zorlanmaktadır. Hidrolik türbinlerin bu tür titreşim ve salınımlara maruz kalmaları işletme güvenliğini ve işletmede kalma süresini önemli derecede azaltmaktadır. Bu çalışmada, bir hidroelektrik santrale ait Francis tipi türbinde yatak boşluğunun müsaade edilen sınırları aşması neticesinde meydana gelen, mekanik titreşimler (vibrasyon olayı) ve şaft salınımları arızası incelenmiştir. Türbin – Jeneratör yataklarına tekrar ayar yapıldıktan sonra oluşan şaft salınımları, arıza durumunda oluşan şaft salınımları ile kıyaslanmıştır. Sonuç olarak arıza sonrası hidrolik türbin yataklarının ölçüleri kabul edilen standartlara getirildikten sonra mekanik titreşimler ve şaft salınımları normal seviyelere gelmiştir. Mekanik titreşimden kaynaklı arızalar ve aşırı şaft salınımı sonucu oluşacak yatak sürtmesi gibi büyük arızalar engellenmiştir.

Anahtar Kelimeler: mekanik titreşim; şaft salınımı; hidroelektrik

Research Article

Mechanical Vibrations of Turbine-Generator Bearing Malfunctions in Hydroelectric Power Plants and Solution Methods

Abstract: The fact that the power and dimensions of hydraulic turbines manufactured today have increased significantly also brings about a serious mechanical vibration and shaft oscillation problem. It is known that a machine exposed to mechanical vibration (vibration event) is constantly strained by variable mechanical stresses such as pulling, pressing, bending, twisting, and shearing. The exposure of hydraulic turbines to such vibrations and oscillations significantly reduces operational safety and operating time. In this study, mechanical vibration (vibration event) and shaft oscillation failures that occurred as a result of the bearing clearance exceeding the permitted limits in a Francis type turbine belonging to a hydroelectric power plant were investigated. The shaft oscillations that occurred after the turbine-generator bearings were re-adjusted were compared with the shaft oscillations that occurred in the event of a failure. As a result, after the dimensions of the hydraulic turbine bearings were brought to the accepted standards after the failure, mechanical vibrations and shaft oscillations returned to normal levels. Failures caused by mechanical vibration and major failures such as bearing friction that would occur as a result of excessive shaft oscillations were prevented.

Keywords: mechanical vibration; shaft oscillation; hydroelectric

1. Giriş

Enerji ekonomi ve teknoloji ile direk ilişkilidir. Ülkelerin enerji taleplerindeki artış kalkınmanın bir göstergesidir[1]. Dünyada, yenilenebilir ve yenilenemeyen çeşitli enerji kaynakları vardır. Yenilenebilir enerji kaynakları daha fazla çevre dostu olarak kabul edilir[2]. Dünya genelinde yenilenebilir enerji kaynağı olarak en fazla potansiyele hidroelektrik santraller sahiptir. Hidroelektrik santrallerin dünyadaki önemine paralel olarak, üretime hazır halde tutulması önem kazanmaktadır. Bu nedenle uzun süreler alan arızaları engellemek ya da en azından mümkün olduğunca azaltmak gerekmektedir. Hidroelektrik santrallerde türbin arızaları sadece tesisin çalışma süresini kısaltmakla kalmaz, aynı zamanda gelir kayıplarını da beraberinde getirir [3]. Bir hidrolik türbinin sabit kısımları ile dönen kısımlarında yapılan ölçümlerle tespit edilen mekanik titreşimler ve shaft salınımları oluşabilecek arızaları, oluşan arızaları ve bu arızaların hidrolik türbinin hangi kısmında meydana geldiğini anlamak açısından çok önemlidir. Hidroelektrik santrallerinde arıza tespiti ile ilgili birçok çalışmalar yapılmıştır [4-6]. Mohanta ve diğerleri, hidroelektrik santrallerde oluşan titreşimlerin nedenlerini ve ölçüm yöntemlerini araştırmışlardır [7]. Stack ve diğerleri, değişken makine hızlarında oluşan vibrasyonun makine yatakları üzerine etkisini araştırmışlardır ve değişken makine hızlarının vibrasyon şiddetinin artışında çok etkili olduğunu gözlemlemişlerdir[8]. Wei ve Zang, akışkan bir bölgedeki rastgele akış hareketinin etkisini tahmin etmek için kayma gerilimi taşıma (SST) modelini kullanarak ve katı bir bölgedeki salınım denklemlerini çözmek için Newmark yöntemini kullanarak, santralin bir bağlantı modelini geliştirmişlerdir [9]. Zhang, hidroelektrik santraller için üç boyutlu sonlu elemanlar modeli oluşturarak oluşan basınç dalgalanmalarının neden olduğu titreşimleri hesaplamak için doğrusal olmayan bir dinamik analiz yapmışlardır[10]. Feng and Chu, bir hidroelektrik santralin modellemesi üzerinde dinamik analiz yaparak yatak kısımlarındaki arızaları incelemişlerdir [11]. Zhang ve diğerleri, pompalı hidroenerji depolama santralindeki bir prototip geri dönüşümlü pompa türbininin titreşim performansı ve fiziksel kökenlerini deneysel olarak araştırmışlardır [12]. Wu ve diğerleri, bir geri dönüşümlü pompa türbininde oldukça karmaşık olan titreşim performansı ve bu titreşimlerin fiziksel kökenlerini araştırmışlardır [13]. Tavner, titreşimi azaltmak ve manyetik dengesizliği önlemek için eksantrikliği azaltmak gerektiğini belirtmiştir. Rotor üzerindeki dengesiz kütle, dinamik eksantrikliğe neden olduğu için shaftın taşıyıcı yatak üzerinde yer değişim miktarını etkilediğini ifade etmiştir [14]. Yang ve diğerleri, hidroelektrik santrallerde bulunan kılavuz yataklarda salınım olayını incelemişlerdir. Bu incelemeyi yaparlarken yatak lokmasının mutlak titreşimini, shaftın yatak içerisinde dönmesinden kaynaklanan titreşimi, yağ filmi kalınlığı, yağ filmi basıncı, yağ debisi ve yatak yükünü esas alarak yapmışlardır [15]. Chasalevris ve Dohnal, dönen shaftlardaki titreşimin sönümlendirilmesi için değişken geometri bir yatak tasarımı çalışması yapmışlardır. Bu çalışmada yatağın pasif hareketi ile yağ film kalınlığını kısmen artırarak meydana gelen titreşimi azaltıklarını ifade etmişlerdir [16].

Bu çalışma, Francis tipi türbinlerde kılavuz yatak boşluklarının artmasıyla oluşan mekanik titreşimleri ve bu titreşimlerin sistem güvenliği üzerindeki etkilerini deneysel veriler ışığında analiz etmektedir. Literatürde benzer çalışmalar bulunmakla birlikte, yüksek güçlü bir türbin-jeneratör sisteminde gerçek saha verileriyle yapılan bu çalışma, özellikle jeneratör tarafında gözlenen yüksek frekanslı titreşimlerin arıza tipine özgü ayırt edici bir karakteristiğe sahip olduğunu ortaya koymakta ve arıza giderilmesinde uygulanan ayar yönteminin sistematik etkilerini somutlaştırmaktadır.

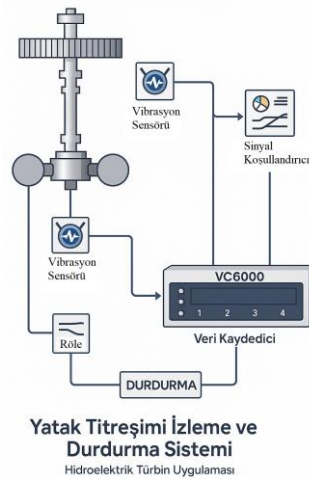
2. Materyal ve Metot

Hidroelektrik santrallerde, özellikle Francis tipi türbinlerde mekanik titreşimlere neden olan etkenler, dinamik dengesizlikler, manyetik dengesizlikler ve hidrolik dengesizlikler olarak tanımlanır. Dinamik dengesizlikler, türbin-jeneratör ünitelerinin dönen kısımlarında oluşan dinamik dengesizlik veya yatak ayarlarının bozulması sonucu meydana gelen shaft salınımları sonucu oluşurlar. Manyetik dengesizlikler, rotor ve stator arasındaki hava boşluklarının eşit olmaması veya rotor kutuplarında meydana gelen gerilim düşümleri nedeni ile oluşurlar. Hidrolik dengesizlikler, aşırı kaviteasyon ve vorteks olayı sonucu veya hidroelektrik santralin yanlış projelendirilmesinden kaynaklanır.

2.1. Hidroelektrik Santrallerde Mekanik Titreşimlere Neden Olan Dengesizlik Etkenleri

Mekanik titreşimlere maruz kalan makine parçaları hızlı bir şekilde yorulurlar. Bu yorulma sonucunda en kritik kısımlarından hiç beklenmedik bir anda çatlaklar başlar ve bu çatlaklar ilerleyerek kopmalara neden olabilir. Bu olay hidrolik türbin-jeneratör ünitelerinin uzun süreler elektrik üretememesine neden olur. Ayrıca büyük işçilik ve malzeme maliyetlerine yol açar. Genel olarak kabul edilebilir sınırların üzerinde titreşime maruz kalan hidrolik türbin-jeneratör ünitelerinde meydana gelebilecek arızalar aşağıda maddeler halinde verilmektedir.

- Türbin-Jeneratör shaftı zamanla elastik veya plastik (kalıcı olmayan veya kalıcı olan) şekil değişikliklerine uğrayabilir.
 - Türbin-Jeneratör ünitelerinin komple döner kütesini taşıyan taşıyıcı köprü zamanla elastik veya plastik şekil değişikliklerine uğrayabilir.
 - Taşıyıcı yataklar ve kılavuz yataklar büyük hasarlar görebilir.
 - Jeneratör rotor kutuplarının bağlantı yerleri çatlayabilir, jeneratör rotorlarının ızalasyonları hasar görebilir, ızalasyonların hasar görmesi sonucu oluşabilecek kısa devreler manyetik dengesizliklere neden olur.
 - Jeneratör soğutma radyatörleri bağlantı boruları kaynaklı bölgelerden çatlayabilir. Çatlak yerlerden kaçan su jeneratör stator sargılarını kısa devre yaparak patlatabilir.
 - Taşıyıcı yatak ve kılavuz yatak yağı soğutma serpantinlerinin boruları çatlayabilir. Bu durumda soğutma suyu yatak yağına karışarak yataklara zarar verebilir.
 - Türbin ayar kanat muyluları veya türbin ayar kanatlarının emniyet pimleri çatlayabilir ve kırılırlar.
- Türbin-Jeneratör ünitelerinde kılavuz yatak titreşimlerini izlemek ve oluşabilecek arızaları tespit edebilmek için kurulan sensörlerin şematik gösterimi şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Türbin-jeneratör kılavuz yatakları ve sensörlerin şematik gösterimi

Şekil 1’de görülen şematik gösterim, türbin-jeneratör setlerinde erken arıza tespiti ve koruma sağlamak amacıyla kurulmuş titreşim izleme sistemidir. Kılavuz yataklara yerleştirilen sensörler sayesinde sistemin mekanik durumu sürekli izlenir ve gerektiğinde otomatik olarak durdurma gerçekleştirilir. Bu

tür sistemler, özellikle enerji üretim santrallerinde makine güvenliği ve sürekliliği açısından kritik öneme sahiptir.

Hidroelektrik santrallerde Francis türbinine ait türbin ve jeneratör kılavuz yatakları şekil 2’de görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 2. a)Türbin kılavuz yatak, b)Jeneratör kılavuz yatak

Şekil 2’de görülen kılavuz yatakları, sistemin düzgün çalışması açısından kritik öneme sahiptir. Bu yataklarda zamanla oluşabilecek bazı arızalar, hem makine performansını düşürür hem de büyük hasar riskleri doğurur. En sık karşılaşılan sorunlardan biri, titreşim seviyelerinin artmasıdır. Milin hizasızlığı, rotorun dengesizliği veya yatak yüzeyinde oluşan aşınmalar bu titreşim artışına sebep olabilir. Ayrıca gevşemiş bağlantı elemanları da sisteme mekanik kararsızlık getirir. Titreşim artışı sadece gürültüye neden olmakla kalmaz, aynı zamanda yataklarda aşırı yüklenme ve yıpranma oluşturur.

Bir diğer önemli problem ise yatak yüzeyinde meydana gelen aşınma ve yağ filmi kaybıdır. Yağlama sistemindeki aksaklıklar, yağın yeterli olmaması veya kirli yağ kullanımı bu tür aşınmaları hızlandırabilir. Bu durumda mil ile yatak yüzeyi arasında doğrudan temas başlar ve bu, hem sıcaklık artışına hem de mekanik yüzeylerin zarar görmesine neden olur. Özellikle yüksek sıcaklık, yağ viskozitesinin düşmesine ve yatak malzemesinin yapısal olarak bozulmasına yol açabilir. Bu gibi durumlarda sıcaklık sensörleri önemli bir uyarı mekanizması sağlar. Ancak, sensörlerin kendisi de zamanla arızalanabilir; kablo kopmaları, kirlenme veya elektriksel arızalar sensörlerden alınan verilerin doğruluğunu etkileyebilir. Bu durumda sistemde var olan bir problemi tespit etmek mümkün olmayabilir ve koruma sistemleri devreye giremez.

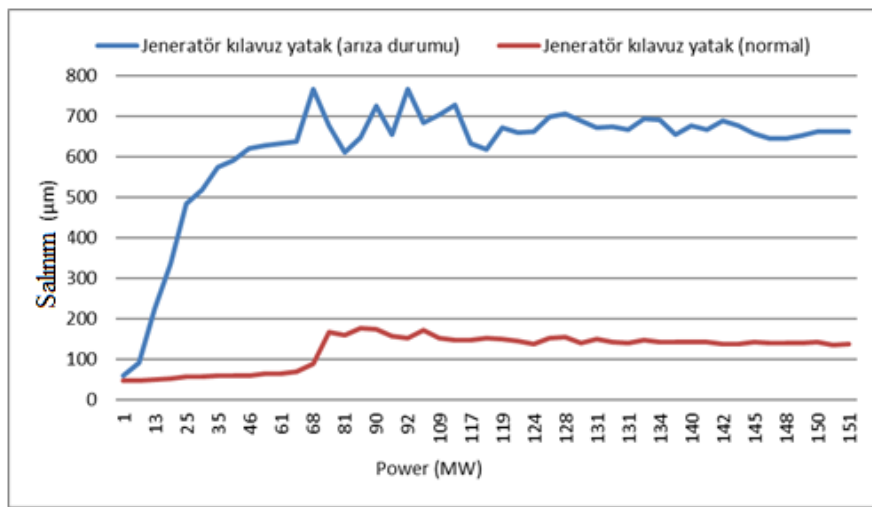
Bu arızaların önüne geçebilmek için düzenli ve planlı bakım faaliyetleri büyük önem taşır. Öncelikle, periyodik olarak yapılan titreşim analizleri sayesinde sistemde oluşabilecek mekanik problemler erken evrede tespit edilebilir. Bu analizler sırasında, özellikle rulman frekansları ve bu frekanslara ait harmonikler dikkatle değerlendirilir. Ayrıca, yağlama sisteminin kontrolü de oldukça önemlidir. Yağ içerisinde metal parçacıklarının bulunup bulunmadığı analiz edilir; yağın viskozitesi, nem oranı ve kirlilik durumu değerlendirilerek gerekirse yağ değişimi yapılır. Eğer yatak boşlukları standartların dışında ise shaftın diklik ayarı yapılarak yatak lokmaları standart yatak boşluklarına göre yeniden ayarlanır.

Sensörlerin ve bağlantı kablolarının düzenli olarak kontrol edilmesi gerekir. Özellikle kablo bağlantı noktalarının gevşememesi, sensör yüzeylerinin temiz ve sağlam olması sağlanmalıdır. Gerekliğinde sensör kalibrasyonu yapılmalı, hatalı ölçüm riski ortadan kaldırılmalıdır. Bunun yanında, yatak yüzeylerinde olası sıcaklık odaklarının belirlenmesi için termal kameralarla kontroller yapılabilir. Bu sayede, daha arıza oluşmadan önce erken uyarı alınabilir. Son olarak, sistemin mekanik bütünlüğü açısından montaj civatalarının tork kontrolleri de ihmal edilmemelidir. Titreşim nedeniyle gevşemiş bir bağlantı, sistemin genel dengesini bozarak hem performansı düşürür hem de arıza riskini artırır.

3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde hidroelektrik santrallerde yatak arızası esnasında ve arıza giderildikten sonra güç üretimine göre titreşim grafikleri verilmektedir. Oluşturulan grafikler titreşim analizi yardımı ile arıza tespitinin nasıl yapılabileceğini net bir şekilde belirlemektedir. Bu değerler hali hazırda kurulu bir hidroelektrik santralinde 0-150 MW arasında sensörlerden gelen veriler yardımıyla elde edilmiştir. Ayrıca arızanın giderilmesi yatak ayarı ile mümkün olmuştur. Arızanın tespiti sonrasında, türbin-jeneratör şaftının aksel hizalaması lazer eksenleme cihazı ile yeniden ayarlanması yapılmıştır. Kılavuz yataklarda yağ boşlukları, üretici firmanın önerdiği tolerans aralığına göre mekanik masterlarla ölçülerek yeniden optimize edilerek yatak lokmaları sabitlendi.

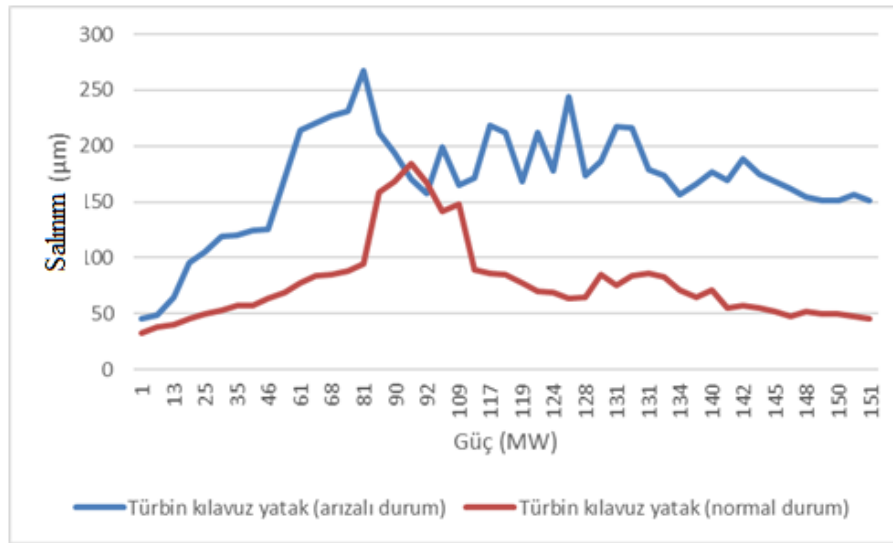
Şekil 3’de jeneratör kılavuz yatak bölgesinde ölçülen arıza öncesi ve arıza sonrası şaft salınımları görülmektedir.



Şekil 3. Arıza esnasında ve arıza giderildikten sonra jeneratör kılavuz yatak bölgesindeki şaft salınımları

Şekil 3’teki grafikte, jeneratör kılavuz yatağına ait titreşim değerlerinin güç üretimine bağlı olarak değişimi karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir; normal çalışma koşullarında titreşim değerleri düşük seviyelerde ve stabil bir seyir izlerken (yaklaşık 100-180 mikrometre aralığında), arıza durumunda güç arttıkça titreşim değerleri ani bir artışla 600-800 mikrometre seviyelerine kadar ulaşmakta ve bu seviyelerde sabitlenmektedir; bu durum, yatakta meydana gelen ciddi bir mekanik sorunun (örneğin hizasızlık, yatak aşınması veya yağlama yetersizliği) göstergesi olup, sistemin güvenli çalışmasını tehdit eden kritik bir arıza sinyalidir ve zamanında müdahale edilmediği takdirde jeneratör sisteminde daha büyük hasarlara yol açabilecek ciddi sonuçlar doğurabilir.

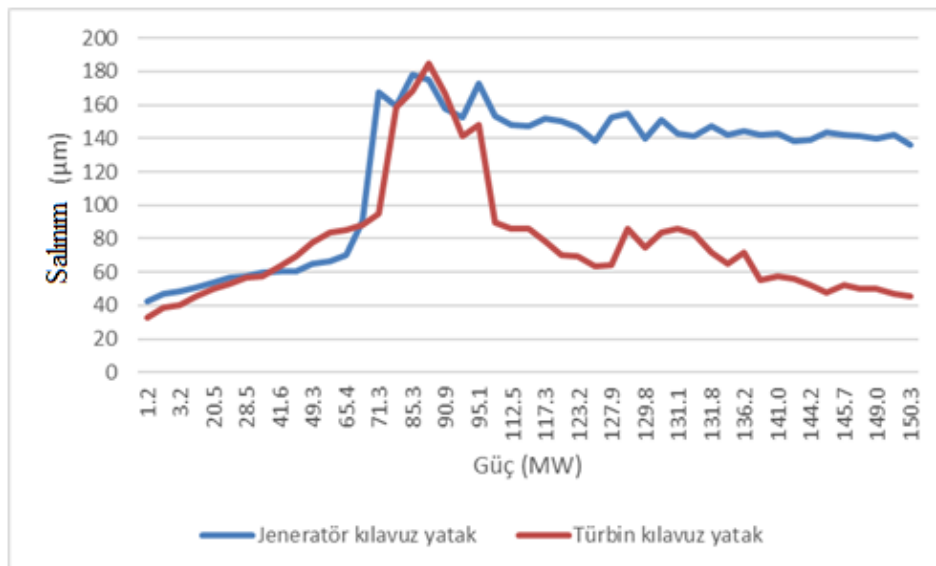
Şekil 4’de türbin kılavuz yatak bölgesinde ölçülen arıza öncesi ve arıza sonrası şaft salınımları görülmektedir.



Şekil 4. Arıza esnasında ve arıza giderildikten sonra türbin kılavuz yatak bölgesindeki şaft salınımları

Şekil 4'teki grafikte, türbin kılavuz yatak titreşim değerlerinin güç seviyesine bağlı olarak nasıl değiştiği görülmektedir. Normal durumda yatak titreşimlerinin kontrollü bir şekilde arttığı ve güç seviyesi ne olursa olsun 160 mikrometre sınırını aşmadığı görülmektedir. Buna karşılık arıza durumunda ise titreşim değerleri, özellikle 81-90 MW güç aralığında ani bir artışla 250 mikrometre seviyesine ulaşmakta, sonrasında ise güç artışına bağlı olarak düzensiz ve yüksek değerlerde seyretmektedir. Bu durum, türbin kılavuz yatağında oluşan olası bir mekanik arızanın (örneğin yatak hasarı, eksenel kaçıklık ya da yağlama eksikliği) göstergesi olup, bu seviyelerdeki titreşimler hem sistemin ömrünü kısaltabilir hem de beklenmedik duruşlara yol açabilecek ciddi riskler barındırmaktadır.

Francis türbininde gerçekleşen yatak arızası sonrasında türbin-jeneratör kılavuz yataklarındaki şaft salınım değerleri ölçülerek şekil 5'deki grafikte gösterilmiştir.



Şekil 5. Yatak arızası giderildikten sonra üretilen güce göre türbin ve jeneratör kılavuz yatak şaft salınımları

Şekil 5'teki grafikte yatak arızası giderildikten sonra türbin-jeneratör yataklarında oluşan titreşimin üretilen güce göre değişimi görülmektedir. Başlangıçta (1,2 MW ile yaklaşık 80 MW arası) her iki yatakta da titreşim seviyeleri normal sınırlar içerisinde, birbirine yakın şekilde artarak ilerlemektedir. Ancak 80 MW gücünden sonra, titreşim değerlerinde keskin bir artış gözleniyor. Her iki yatakta da yaklaşık

90 μm 'den 160 μm 'ye kadar çıkan bir sıçrama söz konusu. Bu durum 90 MW civarında şiddeti en üst seviyeye çıkan kavitasyon olayının etkisini göstermektedir. Kavitasyon olayı hidrolik türbinlerin doğasında bulunan kaçınılmazı mümkün olmayan bazı önlemlerle etkisinin azaltılabileceği bir olaydır. Bu pik noktasının ardından, türbin-jeneratör kılavuz yataklarındaki titreşim değerlerinde belirgin bir düşüş yaşanmaktadır. Bu, yapılan müdahalenin etkili olduğunu ve türbin kılavuz yatağındaki arızanın başarıyla giderildiğini göstermektedir. Türbin kılavuz yatağındaki arıza başarılı bir şekilde giderilmiş; titreşim değerleri belirgin şekilde düşmüş ve stabil hale gelmiştir. Grafik, bakım öncesi ve sonrası sistem davranışını net şekilde ortaya koymakta ve yapılan müdahalenin etkisini göstermektedir. Bu durumun kontrolü için sabit parçalar üzerinden alınan ölçümler yoluyla hidroelektrik makinaların titreşimlerinin değerlendirilmesi ISO 10816-5 uluslararası standardına göre yorumlanmaktadır.

4. Sonuç ve Tartışma

Bu çalışmada, 150 MW gücünde Francis tipi bir hidroelektrik türbin-jeneratör ünitesinde, kılavuz yatak ayar bozulmalarının mekanik titreşimler üzerindeki etkisi deneysel olarak incelenmiştir. Arıza durumunda, özellikle kavitasyon etkisinin de katkısıyla yatak boşluklarında meydana gelen artış nedeniyle şaft yeterince desteklenememiş ve bu durum ciddi salınımlara neden olmuştur. Yapılan ölçümler sonucunda, jeneratör kılavuz yataklarında 600–800 μm , türbin kılavuz yataklarında ise 250 μm seviyelerine ulaşan şaft salınımları tespit edilmiştir. Bu değerler, yağ filmi stabilitesinin bozulmasına ve yatak yüzeylerinde sürtünmeye bağlı hasarların oluşmasına neden olabilecek düzeydedir.

Yapılan müdahalede, türbin ve jeneratör kılavuz yataklarına ait dönme boşlukları üretici tolerans aralıklarına göre yeniden ayarlanmış ve şaft merkezleme işlemi lazer eksenleme cihazları ile hassas şekilde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, vibrasyon analiz verileri eşliğinde dinamik takip yapılarak müdahale adımları optimize edilmiştir. Bu yöntem, klasik bakım prosedürlerine kıyasla daha sistematik ve veri odaklı bir yaklaşım sunarak çalışmanın özgün katkısını oluşturmaktadır.

Arıza sonrası yapılan ayarlamalarla birlikte, jeneratör tarafındaki şaft salınımı %80, türbin tarafındaki salınım ise %70 oranında azaltılarak güvenli sınırlar içerisine çekilmiştir. Bu sonuçlar, kılavuz yatak arızalarının erken tespiti ve zamanında müdahalesinin sistem güvenliği, işletme süresi ve bakım maliyetleri açısından kritik öneme sahip olduğunu göstermektedir. Çalışma, büyük güçteki hidroelektrik türbinlerde arıza sonrası iyileştirme sürecine dair pratik ve ölçülebilir bir çözüm önermesi açısından literatüre katkı sağlamaktadır.

Teşekkür

International Journal of Pure and Applied Sciences dergisinin hakemlerine ve dergi kurullarına harcadıkları emekten dolayı teşekkür ederim.

Çıkar Çatışması

Yazar bu makaleyle ilgili herhangi bir çıkar çatışması olmadığını bildirir.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazar, çalışmanın tüm süreçlerinde *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin bilimsel, etik ve atıf kurallarına uyduklarını beyan etmiştir.

Referanslar

- [1] M. K. Padhy and R. P. Saini, "A review on silt erosion in hydro turbines," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 12, no. 7, pp. 1974–1987, 2009.
- [2] V. S. Singh and S. K. Singal, "Operation of hydro power plants-a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 610–619, 2017.
- [3] U. Dorji and R. Ghomashchi, "Hydro turbine failure mechanisms: An overview," *Engineering Failure Analysis*, vol. 44, pp. 136–147, 2014.

- [4] A. Barbour and W. T. Thomson, "Finite element study of rotor slot designs with respect to current monitoring for detecting static airgap eccentricity in squirrel-cage induction motors," in *IAS'97. Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting*, vol. 1, Oct. 1997, pp. 112–119.
- [5] S. Nandi, H. A. Toliyat, and X. Li, "Condition monitoring and fault diagnosis of electrical motors-a review," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, pp. 719–729, 2005.
- [6] D. Basak, A. Tiwari, and S. P. Das, "Fault diagnosis and condition monitoring of electrical machines-a review," in *Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT 2006)*, Mumbai, India, 2006, pp. 3061–3066.
- [7] R. K. Mohanta, T. R. Chelliah, S. Allamsetty, A. Akula, and R. Ghosh, "Sources of vibration and their treatment in hydro power stations," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 20, pp. 637–648, 2017.
- [8] J. R. Stack, T. G. Habetler, and R. G. Harley, "Effects of machine speed on the development and detection of rolling element bearing faults," *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 1, pp. 19–21, 2003.
- [9] S. Wei and L. Zhang, "Vibration analysis of hydropower house based on fluid-structure coupling numerical method," *Water Science and Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 75–84, 2010.
- [10] C. H. Zhang and Y. L. Zhang, "Nonlinear dynamic analysis of the Three Gorge Project powerhouse excited by pressure fluctuation," *Journal of Zhejiang University–Science A*, vol. 10, no. 9, pp. 1231–1240, 2009.
- [11] F. Feng and F. Chu, "Dynamic analysis of a hydraulic turbine unit," *Mechanics of Structures and Machines*, vol. 29, pp. 505–531, 2001.
- [12] Y. Zhang, X. Zheng, J. Li, and X. Du, "Experimental study on the vibrational performance and its physical origins of a prototype reversible pump turbine in the pumped hydro energy storage power station," *Renewable Energy*, vol. 130, pp. 667–676, 2019.
- [13] Y. Wu, S. Li, S. Liu, H. S. Dou, and Z. Qian, *Vibration of Hydraulic Machinery*. Springer Netherlands, 2013.
- [14] P. J. Tavner, "Review of condition monitoring of rotating electrical machines," *IET Electric Power Applications*, vol. 2, pp. 215–247, 2008.
- [15] S. H. Yang, C. Kim, and Y. B. Lee, "Experimental study on the characteristics of pad fluttering in a tilting pad journal bearing," *Tribology International*, vol. 39, pp. 686–694, 2006.
- [16] A. Chasalevris and F. Dohnal, "A journal bearing with variable geometry for the suppression of vibrations in rotating shafts: Simulation, design, construction and experiment," *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 52, pp. 506–528, 2015.