



## HARRAN ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK DERGİSİ

*HARRAN UNIVERSITY JOURNAL of ENGINEERING*

e-ISSN: 2528-8733 (ONLINE)

URL: <http://dergipark.gov.tr/humder>

---

### Hidrolik Türbinlerde Kavitasyon ve Karakaya Hidroelektrik Santralinde Kavitasyon Olayının İncelenmesi

*Investigation Of Cavitation Event in Hydraulic Turbines and Cavitation in Karakaya Hydroelectric Power Plant*

*Yazar (Author): Cuma ÇETİNER<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> ORCID ID: 0000-0002-5105-5699

Bu makaleye şu şekilde atıfta bulunabilirsiniz (To cite to this article): Çetiner C. “Hidrolik Türbinlerde Kavitasyon ve Karakaya Hidroelektrik Santralinde Kavitasyon Olayının İncelenmesi”, *Harran Üniversitesi Mühendislik Dergisi*, 6(Özel Sayı): 01-10, (2021).

Erişim linki (To link to this article): <http://dergipark.gov.tr/humder/archive>



## Hidrolik Türbinlerde Kaviteasyon ve Karakaya Hidroelektrik Santralinde Kaviteasyon Olayının İncelenmesi

Cuma ÇETİNER<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>Harran Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 63050, Haliliye/ŞANLIURFA

### Öz

Bu çalışmada, hidrolik türbinlerde verim kaybına neden olan kaviteasyon olayı ve Karakaya barajındaki kaviteasyonu önlemek için iyileştirme imkanları araştırılmıştır. Türbinin salyangoz seviyesine göre hesaplama yapılmış ve kaviteasyon sınırlarında çalışılıp çalışmadığı analiz edilmiştir. Hesaplama sonucuna göre Karakaya hidroelektrik santralindeki (HES) türbinlerin kaviteasyonla çalıştığı anlaşılmıştır. Karakaya barajındaki Francis tipi türbinlerinde kaviteasyon olayının azalması için minimum çıkış su seviyesinin ( $H_s$ ), salyangoz orta ekseninden 5.54 m yüksekte olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

### Makale Bilgisi

Başvuru: 22/12/2021  
Yayın: 01/11/2021

### Anahtar Kelimeler

Kaviteasyon,  
Karakaya Barajı  
Hidrolik Türbin  
Hidrolik Düşü  
Basınç Farkı

### Keywords

Cavitation  
Karakaya Dam  
Hydraulic Turbine  
Hydraulic Head  
Pressure Difference

## Investigation Of Cavitation Event in Hydraulic Turbines and Cavitation in Karakaya Hydroelectric Power Plant

### Abstract

In this study, the cavitation that caused loss of efficiency in hydraulic turbines and the improvement possibilities to prevent cavitation in Karakaya dam were investigated. Calculation was made according to the snail level of the turbine and it was analyzed whether it was working at the cavitation limits. According to the results of the calculation, it was understood that the turbines in the Karakaya hydroelectric power plant (HEPP) operate by cavitation. It was concluded that the minimum leaving water level ( $H_s$ ) should be 5.54 m higher than the snail center axis in order to reduce cavitation in Francis type turbines at Karakaya dam.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Kaviteasyon, metal yüzeyler içerisindeki sıvının hız-basınç ilişkisine bağlı olarak ani fiziksel faz değişimi sonucu meydana gelen kabarcıkların, metal yüzeylerde oluşturduğu etkiye denir. Suyun metal yüzeyler ile temas ettiği noktalarda ani basınç değişimlerinden meydana gelmekte ve daha çok su türbinlerinde rastlanmaktadır. Kaviteasyonla uzun süre çalışan türbin kanatları süngerimsi bir hal alarak yüzeylerinden parçaların kopmasına neden olur. Türbinlerdeki bu oluşum verim kaybına ve sistemin rehabilite edilmesi ihtiyacını doğurmaktadır.

\* Cuma ÇETİNER, [ccetiner@harran.edu.tr](mailto:ccetiner@harran.edu.tr)

Bu çalışma, 05-06 Kasım 2020 tarihlerinde gerçekleştirilen GAPYENEV Uluslararası Yenilenebilir Enerji ve Enerji Verimliliği Kongresi'nde sözlü bildiri olarak sunulmuştur.

Kavitasyon, metal yüzeyler üzerindeki akışkanlardan kaynaklanan basınç ve hız değişim parametrelerine bağlı olarak gelişir [1]. Bernoulli prensibine göre bir düzenek içerisinde kesit daralması veya metal yüzey üzerinden geçen akışkanın hızının artması akışkan basıncının düşmesine ve buna bağlı olarak da buharlaşma sıcaklığının düşmesine neden olmaktadır. Buharlaşma sıcaklığının azalması ile sistemde düşük sıcaklıklarda soğuk kaynama olayı meydana gelmekte ve içerisinde su buharı ile hava bulunan kavitasyon kabarcıkları oluşmaktadır. Soğuk kaynama ile oluşumu hızlanan baloncuklar yüzeylerde temas ettiği çok küçük bir alanda kısa zaman diliminde aniden patlayarak küçük metal parçacıklarının kopmasına neden olmaktadır[2]. Gemi pervanelerinde, pompalarda ve daha çok enerji üretiminde kullanılan hidrolik türbinlerde performans kayıpları nedeniyle enerji maliyetlerinin yükselmesine sebep olur [3,4].

Hidrolik sistemlerde karımıza çıkan kavitasyon, makinelerin verimliliğini önemli ölçüde düşürdüğü gibi kullanım ömürlerini de azaltır. Bu sebeplerle kavitasyon olayının önüne geçmek veya minimum düzeyde tutulabilmek için makinelerin çalışacağı alanlar göz önüne alınarak tasarım yapılmalıdır. Bu olayın yaşanabileceği bölgelerde aşınmaya ve ani basınç değişimlerine karşı dayanıklı malzeme seçilmelidir. Uygun yüzey kalitesinin belirlenerek üretimi yapılan makinelerin optimum çalışma sınırlarında çalıştırılmasına dikkat edilmesi gerekir [5]. Bu parametrelerin herhangi biri ihmal edildiğinde kavitasyon olayı gerçekleşir ve geri dönüşümü mümkün olmayan sonuçlarla karşılaşılır. Metal yüzeydeki kavitasyon hasarı, su ile temas halindeki yüzeyin pürüzlülüğüne, çalışma saatine, malzemenin tasarımına ve malzeme yapısına bağlı olarak değişiklik gösterir [6,7].

Kavitasyonun konusunda ilk çalışmaları yapan Euler, 1754 yılında yayımladığı bir makalede o dönemki su çarklarında meydana gelen aşınmalara dikkat çekerek ortaya çıkan performans kayıplarına neden olan kavitasyon kavramını dile getirmiştir. Kavitasyon olayı ile ilgili ilk çalışmalar Toricelli, Euler ve Newton tarafından tanımlanmıştır [8]. Kavitasyon sayısının hesaplanması konusunda en geniş çalışmaları ise Thoma ve Leroux 1923-1925 yılları arasında yapmışlardır.

Francis tipi hidrolik türbinlerin kısmi yük altında çalışması durumunda emme borusundaki akış düzensizliklerinden kaynaklı oluşan vortex titreşimlere ve düşük basınçlı frekans dalgalanmalarına neden olmaktadır. Paragbhai, oluşan yüksek titreşimlerin online titreşim izleme sisteminin analizi ile döner girdap oluşumunu belirlemesi konusunda çalışma yapmıştır [9]. Yapılan bu çalışmada, türbin kılavuz yatağına monteli eddy-current tip yer değişimi sensörlerinden elde edilen izafi shaft titreşimlerine ait trend, FFT ve orbit grafiklerinin analizi, belirli kısmî yüklerde devir hızının yaklaşık %27'si hızla dönen girdap halatını açıkça ortaya koymaktadır.

Bilgisayar alanındaki tasarım yöntemlerindeki HAD (hesaplamalı akışkanlar mekaniği) gelişmeler ile birlikte, Navier Stokes eşitliklerine dayanan kavitasyon modelleri ortaya çıkmıştır. HAD tekniklerindeki gelişmelere paralel olarak son yıllarda Dynaflow, Ansys gibi programlar ile kavitasyonlu akış modellemesi çalışmaları yapılmaya başlanmıştır [10,11].

Yamamoto, Francis tipi türbinde kavitasyon hızı ve türbin verimlilik kayıplarını farklı korelasyon şartları altında simule etmiş ve farklı sonuçlara ulaşılmıştır. Yapılan çalışma sonucunda elde ettiği sayısal verilere dayanarak Francis türbindeki kavitasyon hızının; akış hızı, sıcaklık ve türbin emme yüksekliği ne bağlı olarak değiştiği sonucuna ulaşmıştır. Bununla birlikte türbinlerin kısmi yük ve aşırı yüklerde çalıştırılması durumunda verim kayıplarının daha fazla arttığını belirtilmiştir [12].

Escalera, hidrolik santrallerde kullanılan türbinler ve pompalar için kavitasyon oluşumu konusunda testler yapmış ve makinelerde oluşan kavitasyon tiplerini araştırmıştır [13]. Avellan, kavitasyon sonucu yüzeylerde oluşan aşınmaya göre sınıflandırmalar yaparak kavitasyondan kaynaklı meydana gelen kayıpları incelemiştir. Özellikle türbinleri ilk montaj aşamasındaki uygun kurulum seviyesinin ( $H_s$ ) belirlenmesinin kavitasyon için önemini göstermiştir [14].

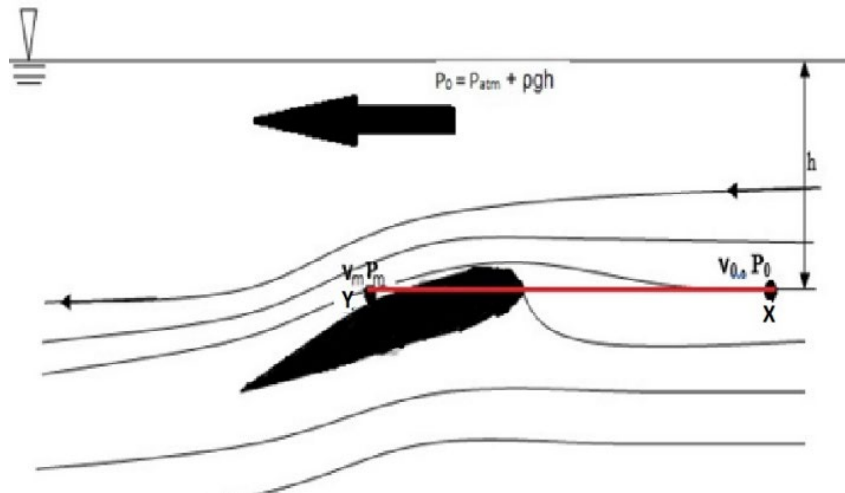
Karakaya HES’te kavitasyona maruz kalmış bir türbinin çark kanatlarına seramik yapılı dolgu malzemeleri kullanıldı. Bu çalışmanın, Cr-Ni alaşımlı kaynak dolgu yöntemiyle yapılan çalışmalardan daha başarılı sonuçlar verdiğini belirtmiştir [15].

Bu çalışmada, hidroelektrik santrallerinde yaşanan kavitasyon olaylarının meydana geliş nedenleri araştırılmıştır. Çalışmaya örnek olarak, önemli bir enerji üretim payına sahip olan Karakaya HES’de kavitasyon olayının türbinlerin hangi şartlar altında oluştuğu incelenmiş ve elde edilen bulgulara göre kavitasyon sınırlarında çalışıp çalışmadığı analiz edilmiştir.

## 1.2. Kavitasyon Olayının Başlangıcı

Akışkan içerisinde bulunan herhangi bir yüzeyde kavitasyon olayının görülmemesi için sıvı içinde bulunan metal yüzeyin üzerindeki bir noktanın basınç değeri, akışkanın buharlaşma basıncına eşit veya büyük olma koşulunu taşıması gerekir.

Şekil 1’de gösterildiği gibi, bir pervane kanadının yüzeyinde bulunan Y noktasında kavitasyon olayının yaşanıp yaşanmayacağını bu noktadaki basınç ile akışkanın o andaki buharlaşma basınç değeri arasında ilişki yardımı ile belirlenebilir.



Şekil 1. Küçük hücum açılı kanat kesiti üzerinde kavitasyon oluşumu

X ve Y noktaları sıvı yüzeyinden yaklaşık aynı uzaklıkta viskoz olmayan iki boyutlu bir akış içerisinde olsun. Y noktası kesit yüzey kısmına yakın bir nokta, X ise aynı akım çizgisi üzerinde ve kesitten etkilenmeyecek kadar yeterli uzaklıkta bir nokta olsun. X deki mutlak basınç  $P_0$  ve akım hızı  $V_0$ , Y deki mutlak basınç  $P_m$  ve akım hızı  $V_m$  dir. X ve Y noktaları arasındaki Bernoulli eşitliklerinin yazılması ile eşitlik 1. elde edilir.

$$P_m + \frac{1}{2}\rho V_m^2 = P_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 \quad 1$$

Bu eşitliğe göre hızlar ve basınçlar bir tarafa toplanıp, iki tarafı da akışkan dinamik basıncına ( $\frac{1}{2}\rho V_0^2$ ) bölünmesiyle eşitlik 2’de verilen boyutsuz basınç katsayısı  $C_p$  elde edilir.

$$C_p = \frac{P_m - P_0}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} = 1 - \frac{V_m^2}{V_0^2} \quad 2$$

Yukarıda açıklandığı gibi, Y noktasında bir kavitasyon olayı ile karşılaşılması için, bu noktadaki basınç değerinin suyun buharlaşma basınç değerinden ( $P_v$ ) büyük olması koşulunu sağlamalıdır.  $P_m > P_v$  2 eşitsizliğini önce (-1) ile çarpıp ve her iki tarafa da ( $P_0$ ) eklenirse ve sonra da her iki taraf akışkanın dinamik basıncı ( $\frac{1}{2}\rho V_0^2$ ) ile bölünürse eşitlik 3 elde edilir.

$$-C_p = \frac{P_0 - P_m}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} < \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} = \sigma \quad 3$$

Burada, sağ taraftaki ifadeye kavitasyon sayısı ( $\sigma$ ) denilir. Dolayısıyla Y noktasında kavitasyonun olmaması için  $-C_p < \sigma$  şartının sağlanması gerekir [16].

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM (MATERYAL AND METHOD)

Akış etkisinde çalışan metal yüzeylerin kavitasyona maruz kalıp kalmayacağını anlık olarak belirlemek oldukça zordur. Şekil 2 de görüldüğü gibi Francis tipi türbinlerden geçen suyun debisini belirlemek için debi metre, çıkış su seviye göstergesi ve türbin devir sayısını ölçmek için takometre sensörü kullanılır. Ölçümlerde elde edilen değerler, Thoma kavitasyon prensibine göre hesaplanarak sistemin kavitasyon etkisi altında çalışıp çalışmadığı Francis türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri karakteristik eğrisinde incenilir.



Şekil 2. Debimetre, Çıkış suyu seviye göstergesi, Takometre –Devir sensör

### 2.1. Özgül Hız

Hidrolik türbinin tipi ve seçimi için kullanılan özgül hız, kavitasyon olayının sınırının belirlenmesi için son derece önemli parametredir. Kavitasyon konusunda önemli araştırmaları bulunan Thoma'ya göre hidrolik türbinin hızı (devir sayısı) arttırıldığında kavitasyon katsayısı da artmaktadır. Eşitlik 4'de özgül devir sayısını etkileyen faktörler belirtilmiştir.

$$ns = \frac{n}{H_n} \sqrt{\frac{N}{H_n}} = \frac{n N^{1/2}}{H_n^{5/4}} \quad 4$$

Burada, ( $H_n$ ) Bir hidrolik türbine gelen akışkanın net düşüsü (m), (n) Dakikadaki devir sayısı (dev/dk), (N) Güç (BG) dir.

Tablo 1'de Türbinlerin özgül devir sayılarına karşılık gelen Thoma kavitasyon katsayıları sınır değerleri çizelge halinde verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan devir sayılarına karşılık gelen Thoma kavitasyon katsayı değerine bu çizelgede iterasyon yöntemi kullanılarak ulaşabilir.

**Tablo 1.** Francis tipi hidrolik türbin özgül devir sayılarına karşılık gelen Thoma kavitezyon katsayıları sınır değerleri çizelgesi[7].

Özgül devir sayısı (ns)	50	80	100	200	300	360	400	500
Thoma kavitezyon katsayısı ( $\sigma_{kr}$ )	0.03	0.045	0.05	0.11	0.20	0.28	0.35	0.46

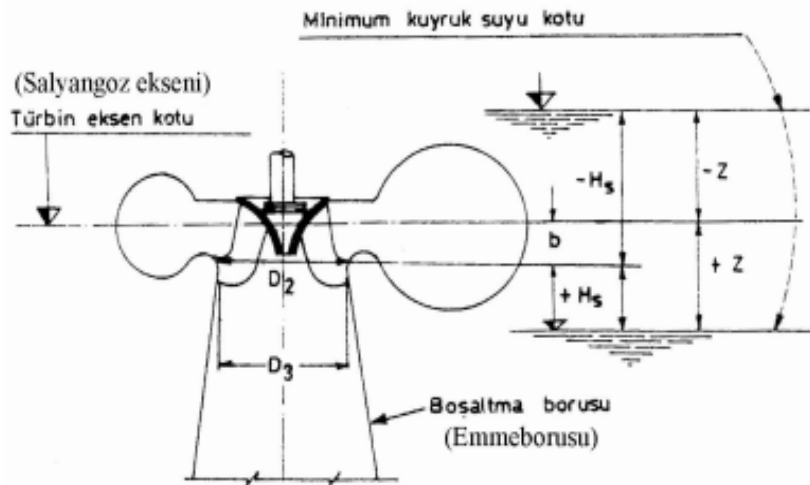
## 2.2. Thoma Kavitezyon Katsayısı

Hidrolik türbinlerde sıklıkla yaşanan kavitezyonun oluşumunun nedenlerinin belirlenmesi için bu güne kadar yapılan araştırmaların öncülüğünü Thoma yapmıştır. Thoma prensibine göre kavitezyon olayı sınırı aşağıdaki eşitlikte gösterildiği gibidir [7].

$$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} \geq \sigma_{kr} \quad 5$$

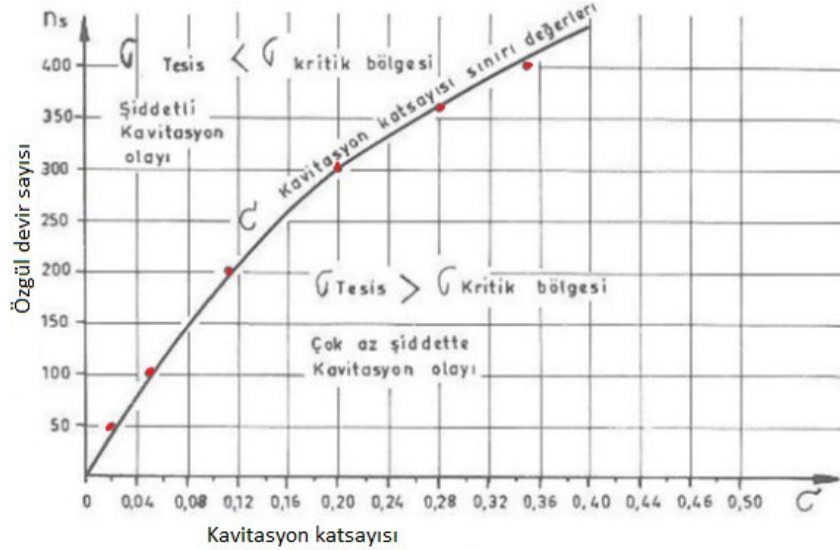
5 nolu eşitlikte,  $\sigma_t$  Kavitezyon olayının sınır değeri, birimsiz Thoma katsayısını, ( $\sigma_{kr}$ ) Kritik Thoma katsayısı (Kavitezyon olayının üst sınır değeri), ( $H_a$ ) Tesisin atmosfer basıncı (mSS), ( $H_v$ ) Akışkan buharlaşma basıncını (mSS), ( $H_s$ ) Türbin emme yüksekliğini (m), ( $H_n$ ) Nominal net hidrolik düşüşünü (m) göstermektedir.

Eşitlik 5’de verilen kavitezyon olayı sınır değeri ( $\sigma$ ), türbin emme yüksekliği ( $H_s$ ) ve nominal net hidrolik düşüş ( $H_n$ ) değerlerinden daha çok etkilenir. Buna göre, salyangoz orta ekseninin çıkış suyu seviyesinin yukarısında olduğu durumdaki türbinlerde, emme yüksekliğinin ( $H_s$ ) azalması (çıkan su miktarının artması) kavitezyon şiddetinin azalmasını sağlar. Aynı şekilde salyangoz orta ekseninin çıkış suyu seviyesinin altında olduğu durumdaki türbinlerde, emme yüksekliğinin ( $H_s$ ) artması kavitezyon şiddetinin azalmasına neden olur. Ancak  $H_s$  değerinin büyümesi türbinin düşük yük ile çalıştırılması ile mümkün olsada bu istenmeyen bir durumdur. Bunun yerine  $H_s$  değerini artırmak için türbinlerden atılan su miktarını artırmak gerekir bu ise çalışan türbin sayısını artırmakla mümkündür. Hidrolik düşüşün ( $H_n$ ) değerinin azalması da kavitezyon şiddetinin azalmasını sağlar.  $H_n$  küçülmesi ise ancak baraj göl seviyesinin azalmasıyla mümkündür. Ayrıca türbinlerin mümkün olduğunca optimum değerlere yakın aralıkta çalıştırılmasına dikkat etmek gerekir. En önemli hususlardan birisi de hidrolik türbinin imalatı öncesinde  $H_s$  nin uygun seçilmesidir. Türbin emme yüksekliğine ( $H_s$ ) ait görüntü Şekil 3.’te verildiği gibidir [7].



Şekil 3. Francis tipi türbin basit şeması

Thoma' ya göre de  $\sigma_{\text{tesis}} \geq \sigma_{\text{kritik}}$  olduğunda kavitasyonsuz çalışmanın sınır şartıdır. Şekil 4'de türbinlerin çalışma koşulları göre kavitasyon olayının meydana gelip gelmeyeceğinin belirlenmesinde sıklıkla kullanılan Francis türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri karakteristik eğrisi verilmiştir.



Şekil 4. Francis türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri karakteristik eğrisi [7].

Bir hidrolik türbine ait kavitasyon katsayısı ( $\sigma_{\text{tesis}}$ ) sınır değeri, kavitasyon katsayısı kritik ( $\sigma_{\text{kritik}}$ ) değerinden daha büyük olmalıdır.

### 2.3. Net Hidrolik Düşü, Debi ve Türbin Devir Sayısı

Net hidrolik düşü ( $H_n$ ), debi ( $Q$ ) ve türbin devir sayısından ( $n$ ) herhangi birinin artması durumunda akışkanın akım hızı da artar. Hızın ani bir değişimle artması akış ile temas eden türbin kanatlarının birleşim noktalarında ve sırt yüzeylerinde basınç dalgalarının ani bir şekilde artmasına neden olur. Net hidrolik düşünün fazla olması birim metre küp sudan elde edilecek gücü artırır. Ancak türbinden atılan (debinin) çıkış suyunun fazla olması emme yüksekliğini artıracığı için faydalı fakat su sarfiyatı için kötü bir durumdur. Bu yüzden kavitasyon oluşumunu minimize etmek için türbinlerin tasarlanması ve sahaya montajı esnasında bu üç değeri optimum bir noktada buluşturacak şekilde yapılmasına dikkat etmek gerekir.

### 2.4. Karakaya Hidroelektrik Santrali

Karakaya HES Diyarbakır ili Çüngüş İlçesi sınırlarında bulunan ve 1987 yılında üretime geçen Türkiye'nin en önemli enerji tesislerinden biridir. Fırat Nehri üzerinde yer alan santral 6 adet Francis tipi türbinden oluşup 1800 MW kurulu gücü ile Türkiye'nin 2. büyük hidroelektrik santralidir. Kullanılan bu türbinlerin her birisi 408.000 BG gücünde, 150 d/dak hızdadır. Çark çapı 5150 mm olup, debisi 233 m<sup>3</sup>/sn'dir. Türbinler su soğutmalı klavuz yataklar ile yataklanmış olup, yataklar kendiliğinden yağlamalıdır. Verimi 0.92 olan türbinin çark ağırlığı 75 ton, shaft ağırlığı ise 100 tondur. Net düşü yüksekliği ise 144 metredir. Yıllık elektrik üretimi yağış miktarına bağlı olarak 5.000-9.000 GWH arasında değişmektedir. Karakaya HES ülkemizde yer alan santraller içerisinde kavitasyon etkisinin en çok yaşandığı işletmelerin başında gelmektedir. Her bir türbin ortalama 3 yıl ara ile kavitasyondan dolayı revizyona ihtiyaç duymaktadır[16].

### 3.BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

Bu çalışmada santralde kurulan Francis tipi türbinlerin %100 optimum yükte çalışmaları durumunda ölçülen değerlere göre kavitasyon olayının meydana gelip gelmeyeceği ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Tablo 2.'de Karakaya HES'e ait türbin gücü, debi, maksimum ve minimum işletme seviyeleri net hidrolik düşü ve türbin devir sayıları gibi karakteristik değerler verilmiştir [17].

**Tablo 2.** Karakaya HES karakteristik değerleri

Karakaya barajı karakteristik değerleri	
Türbin gücü(N)	408 000 BG
Türbin debisi(Q)	233 m <sup>3</sup> sn-1
Salyangoz eksenini(Z)	535 m (Deniz Seviyesinden)
Max. İşletme seviyesi	693 m
Min. İşletme seviyesi	675 m
Max. İşletme su hacmi	9 242 000 m <sup>3</sup>
Min. İşletme su hacmi	4 888 890 m <sup>3</sup>
Talvegden yüksekliği	158 m
Net hidrolik düşü (Ha)	144 m
Devir sayısı(n)	150 dev dak-1

Tahrik suyu sıcaklığı 15 °C kabul edildiğine göre:

$$n_s = \frac{n}{H_n} \sqrt{\frac{N}{\sqrt{H_n}}} = \frac{150}{144} \sqrt{\frac{408.000}{\sqrt{144}}} = 192.074$$

Şekil 4'e göre Francis tipi türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri;

$\sigma_{kr} = 0.105$  olarak bulunur.

$$H_a = 10.33 - \frac{Z}{900} = 10.33 - \frac{535}{900} = 9.736 \text{ mSS}$$

T=15°C sıcaklık için suyun buharlaşma basıncı  $H_v = 0.17$  mSS dir.

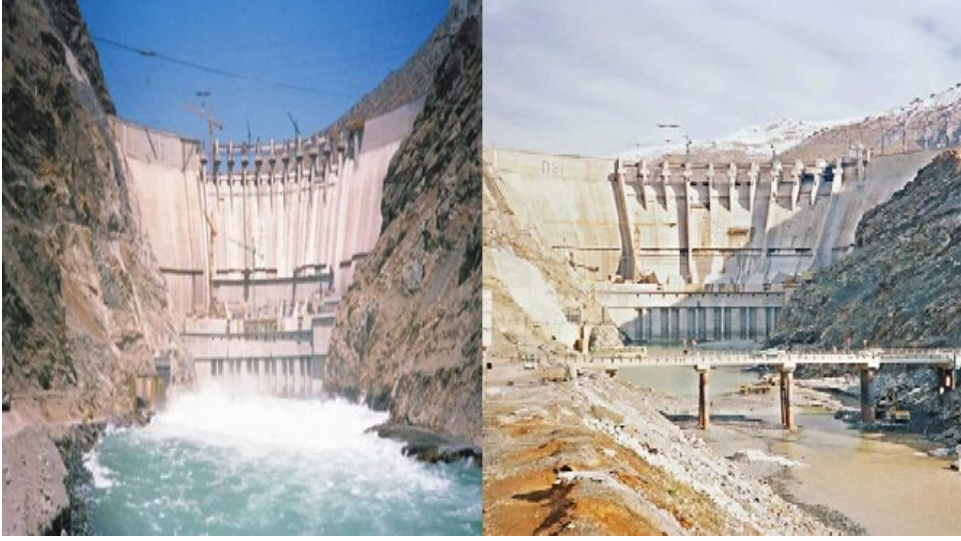
$$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} \geq \sigma_{kritik}$$

$$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} = \frac{9.736 - 0.17 - (-H_s)}{144} \geq 0.105$$

$$H_s \geq -5.54 \text{ m}$$

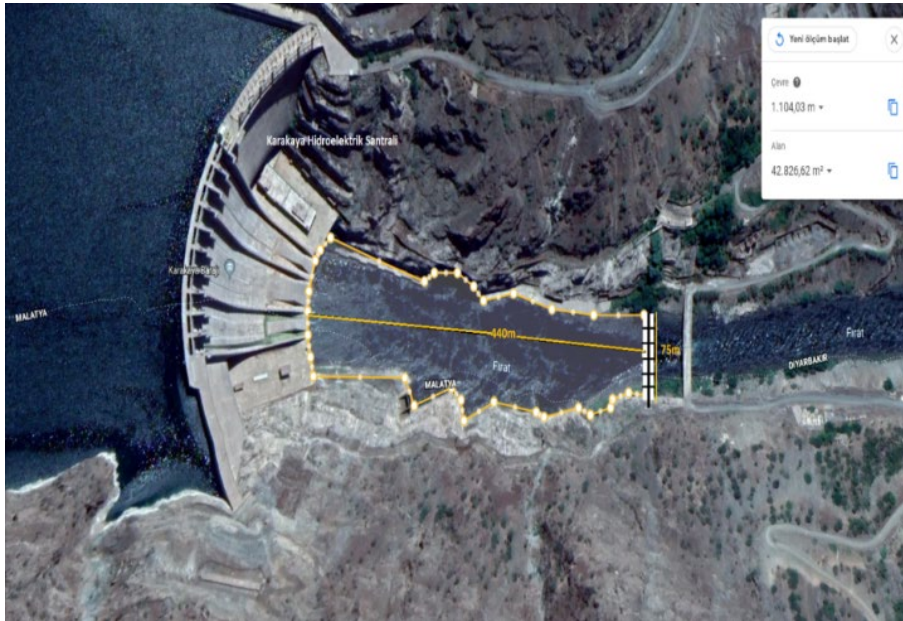
Karakaya Hidroelektrik santralinde (Şekil 5.) çıkış su seviyesinin ( $H_s$ ) salyangoz orta ekseninden -5.54 m den daha küçük olması durumunda kavitasyon olayının şiddeti artacaktır.



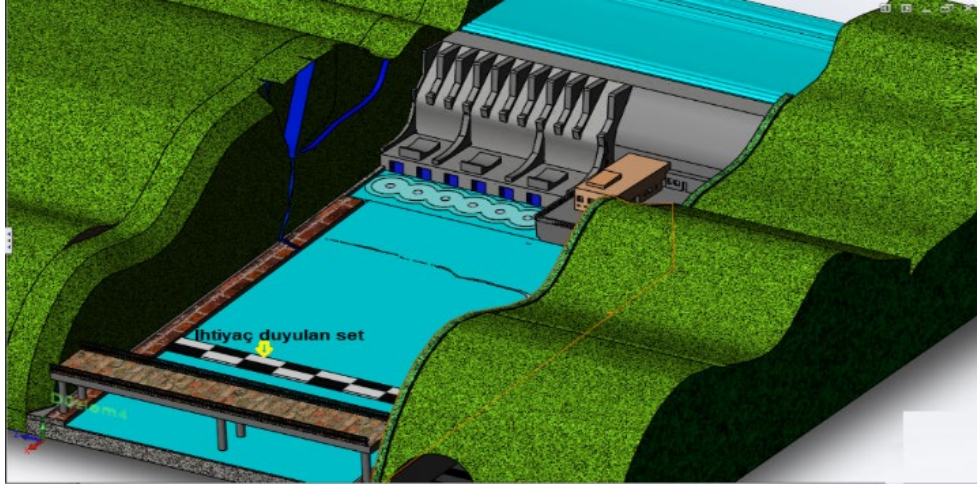


Şekil 5. Karakaya HES 'e ait görünüm

Bu santralde kavitasyondan kaynaklı meydana gelen problemleri minimum düzeyde tutabilmek için çıkış su seviyesini salyangoz orta ekseninden sürekli olarak 5.54 m daha yüksek olması gerekir. Bunun için Karakaya HES çıkış su yüzey alanının yaklaşık 43.000 m<sup>2</sup> olduğu ve santralden 440 m uzaklığında çıkış su genişliğinin en dar olduğu bir bölgede (yatırım maliyetini minimum düzeyde tutmak amacıyla) setin inşa edilmesi faydalı olur. Şekil 6'de Google Earth programı yardımıyla Karakaya HES'e ait uydu görüntüsü verilmiştir. Şekil 7'de ise Solidworks programından faydalanılarak Karakaya HES'te kavitasyonu önlemek için ihtiyaç duyulan setin görünümü verilmiştir. Setin inşa edileceği bölgenin konumuna göre nehir yatağının yapısı incelenerek set üzerine küçük ebatlarda türbin yerleştirilip mini bir santral ile üretime katkı sağlanabilir.



Şekil 6. Karakaya HES'e ait uydu görüntüsü



*Şekil 7. Karakaya HES'te kaviteasyonu önlemek için ihtiyaç duyulan setin görünümü*

Kaviteasyon olayının görüldüğü tüm teçhizatlarda aşınma ve kayıplardan dolayı sistem üzerinde birçok olumsuzluklar meydana gelmektedir. Bu olumsuzluklar; teçhizatlarda verim kayıplarının yaşanmasına, olayın sıklıkla yaşanması durumunda ise sistemin kullanılamaması ve bunların sonucunda ön görülemeyen büyük ekonomik kayıplar olarak karşımıza çıkmaktadır.

Hidrolik türbinlerin verimleri, kaviteasyon etkisiyle meydana gelen aşınmalardan kaynaklı yük, debi ve vorteks gibi durumlara bağlı olarak bir değişim gösterir. Yaklaşık 50 yıllık bir ömrü olan hidrolik türbinlerde meydana gelen kaviteasyon sonucu türbinlerde  $\approx$  %1-2 oranında verim kayıpları ortaya çıkmaktadır. Verimdeki her %1'lik kayıp milyonlarca lira zarara neden olmaktadır. Ayrıca her bir türbinin kaviteasyondan kaynaklı rehabilitasyonlar 30-50 gün arasında değiştiği için bu süre zarfında da enerji üretimi yapılamadığından türbinin üretim kapasitesine göre yüklü miktarda ekonomik kayıplar oluşmaktadır.

Kaviteasyon olayına Türkiye'de daha çok Fırat nehri üzerinde yer alan Keban, Karakaya ve Atatürk HES'lerinde büyük düşülerde çalışan Francis tipi türbinlerde karşılaşılmaktadır. Karakaya ve Atatürk santrallerde bulunan türbinlerin herbiri yaklaşık 300 MW gücünde olduğu göz önünde bulundurulduğunda kaviteasyona uğrayan bu türbinlerdeki enerji kayıplarının boyutları daha net anlaşılabilir. Bu yüzden özellikle Karakaya HES'te kaviteasyon oluşumlarının nedenleri yerinde yapılacak incelemeler sonucu minimum seviyeye indirilebilir. Ayrıca kaviteasyon oluşumunu azaltmak için hidroelektrik santrallerindeki 1 türbin çalışması durumundaki çıkış su seviyesini 6 türbinin çalışması durumundaki çıkış su seviyesi ile aynı seviyede tutabilmek için mansap kısmına set çekilip su seviyesi yükseltilebilir. Bu setlere küçük çaplı türbinler yerleştirilerek daha fazla enerji üretimi sağlanabilir. Ayrıca santralde 6 adet türbini aynı anda üretime alarak çıkış su seviyesi yükseltilebilir kaviteasyon oluşumu minimum seviyeye indirilebilir.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada, Çizelge 2 de Karakaya HES'in karakteristik değerlerine göre yapılan hesaplamada Francis tipi türbinler %100 optimum yükte çalıştığında kaviteasyon etkisinde olduğu görüldü. Bu türbinlerde kaviteasyon olayının azalması için minimum çıkış su seviyesinin ( $H_c$ ) salyangoz orta ekseninden 5.54 m yüksek olması gerektiği sonucuna ulaşıldı. Bunun için Karakaya HES çıkış su yüzey alanının yaklaşık 43.000 m<sup>2</sup> olduğu ve santralden 440 m uzaklığında çıkış su genişliğinin en dar olduğu bölgede bir setin inşa edilmesi faydalı olur (Şekil 7). Set bölgesinin kot farkından faydalanarak kurulacak olan küçük bir türbin santrali, üretime katkı sağlayacaktır. Aksi halde kaviteasyona maruz kalacak olan kanat yüzeylerinde sık periyotlarla kaynak yapılacak veya epoksi reçinelerle aşınan kısımların doldurulacaktır. Bu ise toplamda daha fazla ekonomik ve zaman kayıplarını oluşturur. Ayrıca yıllık yağış miktarına göre değişen göl

seviyesini dikkate alarak türbinleri mevcut hidrolik düşü değerine göre optimum yükte çalıştırmak ve kritik düşülerin altında çalıştırmamak gerekir.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] J. Carlton, Marine Propellers and Propulsion, Elsevier Ltd, USA, 2007.
- [2] C. Brennen, Cavitation and Bubble Dynamics, p.16-20, Oxford University Press,1995.
- [3] R. Goyal, K. Bhupendra, Review of Hydrodynamics Instabilities in Francis Turbine During off Design and Transient Operations, Renewable Energy, V.116: (2018) 697-709.
- [4] G. Kuiper, New Development and Propeller Design, Journal of Hydrodynamic, V.22:(2010) 7-16.
- [5] X. Luo, B. Ji, A Review of Cavitation in Hydraulic Machinery, Journal of Hydrodynamic, 8(3): (2016) 335-358.
- [6] M. Jahanni, Cavitation Effects on Stability, Economic Life and Performance of Hydraulic Structures, İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology, M.Sc. Thesis, İstanbul 2011, (Basılmış).
- [7] R.E. Bensow, G. Bark, Hydrodynamic Mechanisms Controlling Cavitation Erosion, International Symposium on Cavitation No 148: (2012)-14-16 August, Singapore
- [8] H. Başşme ,. Hidroelektrik Santraller ve Hidroelektrik Santral Tesisleri, EÜAŞ, s.731, Ankara,2003.
- [9] G P. Paragbhai, Numerical Study of Cavitation in Francis Turbine of a Small Hydro Power Plant, Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 9: (2016) No.1, 357-365.
- [10] O. Usta, Gemi Pervanelerinde Kavitasyon ve Kavitasyon Erozyonu Modellemesi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü, Doktora Tezi, 2018, (Basılmış).
- [11] A. Sözen, S. Keçel, H. Yavuzcan, Francis Türbinlerinde Yönlendirme Kanat Açısının Çark Mukavemetine Ve Türbin Verimine Etkisi, Gazi Üniviversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, Cilt 29:(2014) No 2, 243-252.
- [12] K.Yamamoto, Experimental Evidence Of Inter-Blade Cavitation Vortex Development in Francis Turbines At Deep Part Load Condition, Experimental Fluids, 58: (2017) 142-156.
- [13] X. Escalera, Detection of Cavitation in Hydraulic Turbines, Mechanical Systems and Signal Processing V.20: (2006). 983-1007.
- [14] F. Avellan, Introduction to Cavitation in Hydraulic Machinery. The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics Timisoara, 2004, October 21-22, Romania.
- [15] M. Sav, Francis Tipi Hidrolik Türbinlerde Kavitasyonun Etkisi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 2010, (Basılmış).
- [16] S. Saçma, T. Eskikale, B.E. Orhon, Francis Türbinlerde Döner Girdap Halatının Titreşim Ölçümleriyle Belirlenmesi, Mühendis ve Makina Dergisi, cilt 59: (2018), sayı 691, 71-84
- [17] Enerji Atlası.Com (<https://www.enerjiatlası.com/hidroelektrik/karakaya-barajı.html>)