

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FRANCIS TİPİ HİDROLİK**  
**TÜRBİNLERDE KAVİTASYONUN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mücahit SAV**

**Enstitü No: 00120101**

**Anabilim Dalı: Makine Mühendisliği**

**Programı: Enerji**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Aydın ÇITLAK**

**ELAZIĞ-2010**

**T.C.**  
**FIRAT ÜNİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**FRANCIS TİPİ HİDROLİK**  
**TÜRBİNLERDE KAVİTASYONUN ETKİSİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Mücahit SAV**

**Enstitü No: 00120101**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: Temmuz 2010**  
**Tezin Savunulduğu Tarih : Temmuz 2010**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Aydın ÇITLAK**

**Diğer Jüri Üyeleri: Doç. Dr. Haydar EREN**  
**Doç. Dr. Ahmet BAYLAR**

**TEMMUZ-2010**

## ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında, hidroelektrik santrallerde Francis tipi hidrolik türbinlerde meydana gelen kavitasyon olayı detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Kavitasyon olayının türbinlerde meydana getirdiği zararlı etkiler kapsamlı bir şekilde araştırılarak, bu olayı önleyici tedbirlerin alınması geniş olarak ele alınmıştır.

Yüksek lisans eğitimimde danışmanlığımı üstlenerek tezimin hazırlanmasında değerli yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Yrd. Doç. Dr. Aydın ÇITLAK'a, teknik desteklerinden dolayı Keban HES'de Makine Başmühendisi sayın Kenan İNALLI başta olmak üzere tüm santral mühendislerine, Karakaya HES'de İşletme Müdür Yardımcısı sayın Hacı ÇİNİK başta olmak üzere tüm santral mühendislerine, Atatürk HES'de Makine Mühendisi sayın Mehmet KEMİKLİ başta olmak üzere tüm santral mühendislerine ve ETKB-EÜAŞ Genel Müdürlüğü çalışanlarına teşekkürü borç bilirim.

**Mücahit SAV**

**Temmuz-2010**

## İÇİNDEKİLER

|                                                      | <u>Sayfa No</u> |
|------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>ÖNSÖZ .....</b>                                   | <b>III</b>      |
| <b>İÇİNDEKİLER .....</b>                             | <b>IV</b>       |
| <b>ÖZET .....</b>                                    | <b>VII</b>      |
| <b>SUMMARY .....</b>                                 | <b>VIII</b>     |
| <b>ŞEKİLLER DİZİNİ .....</b>                         | <b>IX</b>       |
| <b>TABLolar (ÇİZELGELER) LİSTESİ .....</b>           | <b>X</b>        |
| <b>RESİMLER LİSTESİ .....</b>                        | <b>XI</b>       |
| <b>SEMBOLLER LİSTESİ . ....</b>                      | <b>XIII</b>     |
| <b>1. GİRİŞ.....</b>                                 | <b>1</b>        |
| <b>2. GENEL BİLGİLER.....</b>                        | <b>4</b>        |
| 2.1. Hidroelektrik Santral Tesisleri.....            | 4               |
| 2.1.1. Hidrolik Türbinler.....                       | 5               |
| 2.1.1.1. Francis Tipi Hidrolik Türbinler.....        | 6               |
| 2.1.1.2. Kaplan Tipi Hidrolik Türbinler.....         | 8               |
| 2.1.1.3. Pelton Tipi Hidrolik Türbinler.....         | 8               |
| 2.1.1.4. Mitchel-Banki Tipi Türbinler.....           | 9               |
| 2.2. Hidroelektrik Santral Türbin Sorunları.....     | 9               |
| <b>3. YÜKSEK BASINÇ TÜRBİNLERİNDE MEYDANA GELEN</b>  |                 |
| <b>KAVİTASYON OLAYI.....</b>                         | <b>11</b>       |
| 3.1. Kavitasyon Olayı ile İlgili Genel Bilgiler..... | 11              |
| 3.2. Kavitasyon Olayının Tanımı.....                 | 13              |
| 3.3. Kavitasyon Olayının Zararlı Etkileri.....       | 16              |
| 3.4. Kavitasyon Olayına Etki Eden Etkenler.....      | 17              |
| 3.4.1. Tahrik Suyunun Fiziksel Özellikleri.....      | 17              |

|                                                                                         |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.4.1.1. Suyun Sıcaklığı.....                                                           | 17        |
| 3.4.1.2. Su içinde bulunabilecek gaz, buhar veya hava miktarları.....                   | 17        |
| 3.4.1.3. Su içinde bulunan kimyasal maddelerin miktarları.....                          | 18        |
| 3.4.1.4. Su içinde bulunabilecek katı yabancı madde miktarları.....                     | 18        |
| 3.4.2. Türbin Konstrüktif Özellikleri.....                                              | 19        |
| 3.4.2.1. Türbin Rotoru Çapının Etkisi.....                                              | 19        |
| 3.4.2.2. Rotor Kanat Formu ve Çıkış Açısının Etkisi.....                                | 19        |
| 3.4.2.3. Kanat Yüzeylerinin Pürüzlülük Derecesi.....                                    | 20        |
| 3.4.2.4. Kullanılan Malzemenin Mekaniksel ve Kimyasal Özellikleri.....                  | 20        |
| 3.4.2.5. Özgül Hız.....                                                                 | 21        |
| 3.4.2.6. Net Hidrolik Düşü, Debi ve Devir Sayısı.....                                   | 22        |
| 3.4.3. Atmosfer Basıncı.....                                                            | 22        |
| 3.4.4. İşletme Şartlarının Değişmesi.....                                               | 22        |
| 3.4.4.1. Hidrolik Düşünün Değişmesi.....                                                | 23        |
| 3.4.4.2. Türbin Yükündeki Değişmeler.....                                               | 25        |
| 3.5. Kavitasyon olayını önleyici önlemler ve kavitasyon olayından kaçınma çareleri..... | 26        |
| 3.6. Kavitasyon olayının gözetimi için metotlar.....                                    | 27        |
| 3.6.1. Tıreşim ve Gürültü Seslerinin Ölçülmesi.....                                     | 28        |
| 3.6.2. Stroboskopik Araştırma Metodu.....                                               | 28        |
| 3.6.3. Türbin Çalışma Karakteristiklerindeki Değişimlerin İncelenmesi.....              | 28        |
| 3.6.4. Kavitasyon Olayı Tahribatı Sonucu Kaybolan Malzeme Ağırlığının Ölçülmesi.....    | 28        |
| 3.7. Kavitasyon olayı sınırının tespit edilmesi.....                                    | 29        |
| <b>4. KAVİTASYON OLAYI YÖNÜNDEN KEBAN HES İLE İLGİLİ</b>                                |           |
| <b>SAYISAL ÖRNEKLER.....</b>                                                            | <b>36</b> |
| 4.1 Keban HES.....                                                                      | 36        |

|           |                                                                                                                    |           |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.      | Kesikköprü HES.....                                                                                                | 37        |
| 4.3.      | Hirfanlı HES.....                                                                                                  | 38        |
| <b>5.</b> | <b>KAVİTASYON OLAYI TAHRİBATLARININ ONARILMASI</b>                                                                 |           |
|           | <b>METOTLARI VE ONARIMDA DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR.....</b>                                                         | <b>39</b> |
| 5.1.      | Kaynak Dolgu Usulü ile Kaviteasyon Olayı Tahribatlarının Onarılması.....                                           | 39        |
| 5.1.1.    | Kaynak Dolgu Usulü ile Kaviteasyon Tahribatı Onarımı Yapılırken<br>Dikkat Edilmesi Gereken Genel Kurallar.....     | 42        |
| 5.1.2.    | Kaviteasyon Tahribatı Onarımında Kullanılacak Kaynak Elektrotlarının<br>Sahip Olması Gereken Genel Özellikler..... | 44        |
| 5.2.      | Suni Malzeme Dolgu veya Sıvama Metodu ile Kaviteasyon Olayı<br>Tahribatlarının Onarılması.....                     | 45        |
| <b>6.</b> | <b>KAYNAK DOLGU VE SUNİ MALZEME DOLGUSU İLE YAPILAN</b>                                                            |           |
|           | <b>BAZI HES UYGULAMALARI.....</b>                                                                                  | <b>49</b> |
| 6.1.      | Kaynak Dolgu Usulü ile Kaviteasyon Onarımı, KEBAN HES.....                                                         | 49        |
| 6.2.      | Kaynak Dolgu Usulü ile Kaviteasyon Onarımı, KARAKAYA HES.....                                                      | 53        |
| 6.3.      | Suni Malzeme Dolgu veya Sıvama Metodunun KARAKAYA HES’de<br>Kullanılması.....                                      | 56        |
| 6.4.      | Kaviteasyon Olayının ATATÜRK HES’de İncelenmesi.....                                                               | 63        |
| <b>7.</b> | <b>SONUÇ.....</b>                                                                                                  | <b>67</b> |
|           | <b>KAYNAKLAR.....</b>                                                                                              | <b>69</b> |
|           | <b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>                                                                                               | <b>71</b> |

## ÖZET

### Yüksek Lisans Tezi

## FRANCIS TİPİ HİDROLİK TÜRBİNLERDE KAVİTASYONUN ETKİSİ

Kavitasyon olayına su türbinlerinde, santrifüj pompalarda, gemi pervanelerinde, boru donanımlarındaki vana ve dirseklerde ve tekniğin daha bir çok sahasında da rastlamak mümkündür.

Kavitasyonla çalışan herhangi bir türbinin veriminde bir miktar düşme olur. Ancak, kavitasyon olayının önemi; kavitasyonla çalışan bir türbinin yalnız veriminin düşmesinden değil, kavitasyon olayı tahribatına maruz kalan malzemenin çok süratli bir şekilde yıpranarak süngerleşmesinden ve parçalanmasından ileri gelmektedir. Su türbinlerinin konstrüksiyonlarında dikkat edilecek başlıca noktalardan biri, herhangi bir işletme durumunda su türbininin kavitasyon sınırı içine düşmemesi için gerekli bütün tedbirleri almaktır.

Francis tipi hidrolik türbinlerde meydana gelen kavitasyon olayı Türkiye’de başta Sarıyar, Gökçekaya, Karakaya, Keban Hidroelektrik santralleri (HES) olmak üzere birçok santralde görülmektedir. Bu çalışmada Fırat Havzasında bulunan Karakaya ve Keban HES’lerde meydana gelen yoğun kavitasyon olayı ayrıntılı olarak incelenmekte, Atatürk HES türbinlerinin kavitasyonsuzluk durumu irdelenmekte ve 20-30 senelik hidroelektrik santrallerde, kavitasyon olayını azaltabilmek ve türbinlerden çok daha iyi verim almak için yapılması gerekenler anlatılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Hidrolik türbin, kavitasyon, türbin verimliliği, Francis türbin

## SUMMARY

### EFFECTS OF CAVITATION IN FRANCIS TYPE HIDROLIC TURBINES

Possible to meet in water turbines, centrifuge pumps, ship fans, valve and elbow which are on the pipe installation and several technical area else to cavitation.

A quantity decline happens in efficiency of any turbine which has been working with cavitation. However, it is not only the reason that why cavitation is important, if equipment is being exposed to cavitation's damage, the equipment will be calcify and fragmented quickly because of the cavitation. One of the chief point is in the water turbine's constrictions, in any working position, take measures for not being under of the cavitation's limit of water turbines.

The cavitation problem in Francis turbines is seen in many power plants in Turkey, especially at Sarıyar, Gökçekaya, Karakaya, and Keban Hydro-electric Power Plants (HEPPs). With this study intensive cavitation problem at Karakaya and Keban HEPPs on River Euphrates and Atatürk HEPP with no cavitation is investigated and the actions in order to reduce the cavitations in old power plants and to maximize the turbine efficiency are evaluated.

**Key words:** Hydraulic turbine, cavitation, turbine efficiency, Francis turbine

## ŞEKİLLER LİSTESİ

### Sayfa No

|                 |                                                                                                                                        |           |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Şekil 1.</b> | Hidroelektrik Santral Tesisleri Prensip Şeması.....                                                                                    | <b>4</b>  |
| <b>Şekil 2.</b> | Hidroelektrik Santral Görünümü.....                                                                                                    | <b>5</b>  |
| <b>Şekil 3.</b> | Francis tipi hidrolik türbinlerde üst ve alt gövdelere tespit edilmiş olan rotor kanatlarının kesin kaynak işlemlerinin yapılması..... | <b>7</b>  |
| <b>Şekil 4.</b> | Hidrolik bir türbin rotoru kanadının arka yüzeyinde kavitasyon olayının meydana gelişi.....                                            | <b>14</b> |
| <b>Şekil 5.</b> | Francis tipi hidrolik türbinlere ait kavitasyon katsayılarının sınır değerleri özgül hıza bağlı olarak gösterilişi.....                | <b>23</b> |
| <b>Şekil 6.</b> | Francis tipi bir hidrolik türbine ait düşü-yük-özgül su sarfıyatı karakteristik eğriler.....                                           | <b>24</b> |
| <b>Şekil 7.</b> | Francis tipi bir hidrolik türbinin basit şeması.....                                                                                   | <b>31</b> |

## TABLÖLAR LİSTESİ

### Sayfa No

|                 |                                                                                                   |           |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Tablo 1.</b> | Tahrik suyu sıcaklığına bağlı olarak suyun buharlaşma basıncının değişimi.....                    | <b>18</b> |
| <b>Tablo 2.</b> | Thoma kavitasyon katsayıları sınır değerleri.....                                                 | <b>21</b> |
| <b>Tablo 3.</b> | Keban HES türbinlerinin %100 optimum yükle çalışmaları esnasında bazı karakteristik değerler..... | <b>37</b> |

## RESİMLER LİSTESİ

|                                                                                                    | <u>Sayfa No</u> |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|
| <b>Resim 1.</b> Türbinlerde kavitasyon olayı-Gökçekaya HES.....                                    | 15              |
| <b>Resim 2.</b> Türbin çarklarının kavitasyona uğramış hali-Gökçekaya HES.....                     | 15              |
| <b>Resim 3.</b> Türbin çark kanatları kavitasyon çalışması.....                                    | 40              |
| <b>Resim 4.</b> Türbin çark kanatları kaynak çalışması.....                                        | 41              |
| <b>Resim 5.</b> Türbin çark kanatları kaynak çalışması.....                                        | 42              |
| <b>Resim 6.</b> Keban HES revizyon öncesi çark kanatlarını son durumu.....                         | 50              |
| <b>Resim 7.</b> Keban HES’de hasarlı çark kanadının işaretlenmesi.....                             | 50              |
| <b>Resim 8.</b> Keban HES çark kaynağı.....                                                        | 51              |
| <b>Resim 9.</b> Keban HES çark kaynağı.....                                                        | 51              |
| <b>Resim 10.</b> Keban HES çark kaynağı.....                                                       | 51              |
| <b>Resim 11.</b> Keban HES çark taşlanması.....                                                    | 51              |
| <b>Resim 12.</b> Keban HES çark görüntüsü.....                                                     | 51              |
| <b>Resim 13.</b> Karakaya HES revizyon öncesi türbin kepinin görünüşü.....                         | 54              |
| <b>Resim 14.</b> Karakaya HES türbin çarkının kavitasyona uğramış hali.....                        | 54              |
| <b>Resim 15.</b> Karakaya HES çark kanatlarının kaynağı.....                                       | 55              |
| <b>Resim 16.</b> Karakaya HES çark kanatlarının taşlaması.....                                     | 55              |
| <b>Resim 17.</b> Karakaya HES türbin kepinin kavitasyon çalışması sonrasındaki şekli.....          | 56              |
| <b>Resim 18.</b> Karakaya HES bakım personeline çarkın taşlanması.....                             | 57              |
| <b>Resim 19.</b> Karakaya HES üzerinde oyuklar oluşmuş, taşlanmış çark yüzeyinden bir görünüş..... | 57              |
| <b>Resim 20.</b> Karakaya HES-dilimlenmiş çark kanadı.....                                         | 58              |
| <b>Resim 21.</b> Karakaya HES- tinerle temizleme aşamasından bir görünüş.....                      | 59              |
| <b>Resim 22.</b> Karakaya HES- tinerle temizlenmiş çarktan görünüş.....                            | 59              |
| <b>Resim 23.</b> Karakaya HES- çukur bölgeye tutunmuş Locktite 7219 dolgu malzemesinin             |                 |

|                                                                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| görünüşü.....                                                                                                                  | 60 |
| <b>Resim 24.</b> Karakaya HES-kavitasyona maruz kalmış, küçük ve derinliği az oyukların gri renkli macun ile doldurulması..... | 60 |
| <b>Resim 25.</b> Atatürk HES-kavitasyonsuz türbin çark kanatları.....                                                          | 64 |
| <b>Resim 26.</b> Atatürk HES-kavitasyonsuz türbin çark kanatları.....                                                          | 64 |
| <b>Resim 27.</b> Atatürk HES-kavitasyona uğramış türbin çark kanat aralıkları.....                                             | 65 |
| <b>Resim 28.</b> Atatürk HES-kavitasyona uğramış türbin çark kanat aralıkları.....                                             | 65 |
| <b>Resim 29.</b> Atatürk HES-kavitasyona uğramış türbin kepi.....                                                              | 66 |
| <b>Resim 30.</b> Atatürk HES-kavitasyona uğramış türbin kepi.....                                                              | 66 |

## SEMBOLLER DİZİNİ

|                                                                     |                                            |
|---------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>Q</b>                                                            | : Debi                                     |
| <b>F</b>                                                            | : Kesit alanı                              |
| <b>N</b>                                                            | : Güç                                      |
| <b>N<sub>n</sub></b>                                                | : En yüksek verim noktasındaki türbin gücü |
| <b>C</b>                                                            | : Sesin sudaki hızı                        |
| <b>C<sub>u</sub></b>                                                | : Gerçek hız                               |
| <b>D</b>                                                            | : Yol                                      |
| <b>D<sub>1</sub></b>                                                | : Türbin rotorunun giriş çapı              |
| <b>D<sub>2</sub></b>                                                | : Türbin rotorunun çıkış çapı              |
| <b>H<sub>n</sub></b>                                                | : Türbinin net düşüşü                      |
| <b>H<sub>g</sub></b>                                                | : Tesisin düşüşü                           |
| <b>H<sub>b</sub></b>                                                | : Tesisin brüt hidrolik düşüşü             |
| <b>H<sub>r</sub></b>                                                | : Nominal düşü                             |
| <b>H<sub>w</sub></b>                                                | : Kayıp düşü                               |
| <b>H<sub>s</sub></b>                                                | : Türbinin emme yüksekliği                 |
| <b>H<sub>e</sub></b>                                                | : Faydalı net hidrolik düşü                |
| <b>H<sub>v</sub></b>                                                | : Suyun buharlaşma basıncı                 |
| <b>H<sub>a</sub></b>                                                | : Atmosfer basıncı                         |
| <b>h<sub>d</sub></b>                                                | : Buharlaşma basıncı                       |
| <b>h<sub>k</sub></b>                                                | : Akışkan basıncı                          |
| <b>P</b>                                                            | : Basınç                                   |
| <b>p<sub>i</sub></b>                                                | : İlk (başlangıçtaki) basınç               |
| <b>p<sub>f</sub></b>                                                | : Son basınç                               |
| <b>p<sub>m max</sub><sup>+</sup>, p<sub>m min</sub><sup>-</sup></b> | : Maksimum / Minimum geçici basınçlar      |
| <b>p<sub>i</sub></b>                                                | : Türbin giriş basıncı                     |
| <b>p<sub>o</sub></b>                                                | : Türbin çıkış basıncı                     |
| <b>P<sub>at</sub></b>                                               | : Atmosfer basıncı                         |
| <b>P<sub>k</sub></b>                                                | : Akışkan basıncı                          |

|               |                                                      |
|---------------|------------------------------------------------------|
| $P_d$         | : Akışkanın buharlaşma basıncı                       |
| $T$           | : Zaman                                              |
| $T$           | : Sıcaklık                                           |
| $Z$           | : Yükseklik farkı                                    |
| $c_p$         | : Suyun özgül ısısı                                  |
| $m$           | : Çıkış kaybının emme borusunda geri kazanılan kısmı |
| $n$           | : Dönme hızı, devir, Yüksüz türbin devri             |
| $n_s$         | : özgül hız                                          |
| $v$           | : Ortalama hız                                       |
| $\bar{V}$     | : Suyun özgül hacmi                                  |
| $\gamma$      | : Suyun yoğunluğu                                    |
| $g$           | : Yerçekimi ivmesi                                   |
| $\zeta$       | : Kayıplar katsayısı                                 |
| $\eta$        | : Verim                                              |
| $\rho$        | : Suyun yoğunluğu                                    |
| $\rho Q$      | : Kütleli akış oranı                                 |
| $r$           | : Dönüş yarıçapı                                     |
| $R$           | : Çap                                                |
| $\sigma_k$    | : Kaviteasyon katsayısı                              |
| $\sigma_t$    | : Thoma katsayısı                                    |
| $\sigma_{kr}$ | : Kritik Thoma katsayısı                             |
| $k$           | : Kayıplar katsayısı                                 |
| $K$           | : Malzeme cinsine göre sabit katsayı                 |
| $W$           | : Malzemenin ağırlığı                                |
| $w$           | : Türbin rotorunun açısal hızı                       |
| $U_2$         | : Çevresel hız katsayısı                             |

## 1. GİRİŞ

Kavitasyon; su zerreciklerinin çok büyük bir hızla malzeme yüzeyine çarpması ile meydana gelen büyük gürültülü darbelerin malzemenin yüzeyini süngerleştirerek tahrip etme olayıdır. Kavitasyon olayına su türbinlerinde, santrifüj pompalarda, gemi pervanelerinde, boru donanımlarındaki vana ve dirseklerde ve daha değişik alanlarda rastlamak mümkündür. Kavitasyonla çalışan herhangi bir türbinin veriminde bir miktar düşme olur. Ancak, kavitasyon olayının önemi; kavitasyonla çalışan bir türbinin yalnız veriminin düşmesinden değil, kavitasyon olayı tahribatına maruz kalan malzemenin çok süratli bir şekilde yıpranarak süngerleşmesinden ve parçalanmasından ileri gelmektedir. Su türbinlerinin konstrüksiyonlarında dikkat edilecek başlıca noktalardan biri, herhangi bir işletme durumunda su türbininin kavitasyon sınırı içine düşmemesi için gerekli bütün tedbirleri almaktır.

Yurdumuzdaki hidroelektrik santrallerinde, kavitasyonun çok olduğu türbin çarklarında şablon kullanılmadan periyodik olarak yüzey kaplama yapılmaktadır. Çark veriminin en önemli parametrelerinden biri olan orijinal çark biçimi zamanla onlarca kez yüzey kaplamasından dolayı verimin daha düşük olduğu başka bir biçime dönüşebilir. Sarıyar, Gökçekaya, Karakaya, Keban v.b. hidroelektrik santralleri (HES) güçlü aşınmaya maruz kalan santrallerdendir ve her 2–3 senede bir türbin çarkları ve labirentlerde ciddi oranda yüzey kaplaması yapılmaktadır. Tecrübelerle göre kavitasyon etkisi ile yapılan yüzey kaplamaların 50 senede bu tip bir türbinin verimini % 2 düşürdüğü söylenebilir [1].

Yüksek basınç türbinlerinde meydana gelen kavitasyon olayı ile ilgili olarak, birçok Avrupa ülkesinde 100 yıla yakın bir zamandan beri yurdumuzda ise 30 yılı aşkın bir zamandan beri pek çok araştırma ve çalışma yapılmıştır. Bugün, hidrolik türbinlerin imalatı ile uğraşan birçok firmanın hidrolik laboratuvarları ile İsviçre, Fransa, Almanya, İngiltere ve A.B.D. gibi ileri sanayi ülkelerindeki teknik üniversite ve türbin imalatçı firmalarının hidrolik laboratuvarlarında araştırmalar ve deneyler yapılmakta ve kavitasyon olayının daha çok aydınlığa kavuşturulması için gayretler sarf edilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre kavitasyon olayına tesir eden etkenlerin her biri için, bu etkenleri önleyici önlemlerin tespit edilmesine çalışılmaktadır. Bu araştırma çalışmalarına paralel olarak kavitasyon olayının başlangıcı ile şiddetinin formüllerle tespiti ve kavitasyon olayı tahribatına karşı dayanıklı malzemelerin geliştirilmesi sahalarında birçok ilerlemeler kaydedilmiş bulunmaktadır.

Yurdumuzda da hidroelektrik santrallerimizdeki bu sorun üzerine birçok araştırma, inceleme ve çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; 2007 yılı içerisinde Enerji Bakanlığı – Elektrik Üretim A.Ş. (EÜAŞ) Genel Müdürlüğü tarafından bazı hidroelektrik santrallerinde verim artış analizleri yaptırılmıştır. Bunun için İspanyol Socoin şirketi tarafından Türkiye’de hidroelektrik santrallerde yapılan türbinler için fizibilite çalışmaları yapılarak türbin çarkları detaylıca incelenmiştir [2].

Türkiye’de yapılan diğer teknik ve akademik çalışmalar ise şu şekilde özetlenebilir: Hidayet Başeşme 1970 yılında “hidrolik türbinlerde kavitasyon olayı tahribatı ve tamirleri” adlı bir çalışma yapmış ve bu çalışmasını yayınlamıştır. (Hidayet Başeşme, Hirfanlı 1970 TEK - Hirfanlı ve Kesikköprü HES İşletme Müdürlüğü Eğitim Komitesi Yayın No.3) Ayrıca; “Francis tipi hidrolik türbinlerde meydana gelen kavitasyon, girdap (vorteks) ve vibrasyon olayları ile bu olayların doğurduğu sorunlar” (Hidayet Başeşme - TEK Hidrolik Santraller Daire Başkanlığı Yayın No: 32, Ocak 1977) adlı bir çalışması da mevcuttur. Bunun yanı sıra kavitasyon olayının yoğun yaşandığı Gökçekaya ve Keban HES’ de “Keban ve Gökçekaya Hidroelektrik Santrallerine ait türbin/generatör üniteleri üzerinde yapılmış olan testler ve ölçmeler” olarak adlandırılan bir çalışma EÜAŞ Genel Müdürlüğü/Hidrolik Santraller Dairesi Başkanlığınca yapılmıştır.

Son yıllarda; kavitasyon olayı sonucu aşınan türbin çarklarının tamiri için yapılan harcamaların çok fazla olduğu düşünülerek, Gökçekaya HES ve Karakaya HES teknik elemanlarınca ‘**Suni Malzeme Dolgu veya Sıvama Metodu**’ kullanılarak kaynak dolgu yerine özellikle epoksi reçinelerin kullanılması ile bakım onarım maliyetlerinin çok daha aşağıya çekilmesi düşünülmüştür.

Bu tez çalışmasında; hidroelektrik santrallerde kullanılan özellikle Francis tipi hidrolik türbinlerde meydana gelen kavitasyon olayının oluşumu irdelenerek, Fırat havzasında bulunan büyük santrallerimizden Keban, Karakaya ve Atatürk hidroelektrik santralleri ayrıntılı olarak incelenmiş olup, kavitasyonun türbinlerde meydana getirdiği zararlı etkiler kapsamlı araştırılarak, bu olayı önleyici tedbirlerin alınması geniş olarak ele alınmıştır.

Kavitasyon olayını ele alan uluslararası ve ulusal kaynaklardan yararlanarak, dünyada ve Türkiye’de yapılan çalışmalar ele alınmış, özellikle Fırat havzası üzerinde bulunan Türkiye’nin en büyük 3 santrali olan Keban, Karakaya ve Atatürk HES’lerde mevcut türbin çarkları incelenmiştir. Kavitasyon olayının yoğun olarak meydana geldiği Keban ve Karakaya hidroelektrik santrallerinde, kavitasyon için yapılan revizyon çalışmaları, revizyon öncesi ve

revizyon sonrası olarak ayrıntılarıyla ele alınmıştır. Böylece uzun yıllardır kavitasyon çalışmaları yapılan santrallerde; kavitasyonun meydana getirdiği zararlar, türbin arklarındaki aşınmalar ve aşınmaların dereceleri, türbin aksamına verilen hasarlar, resimleriyle ve grafikleriyle birlikte ele alınıp yeni çözüm yolları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

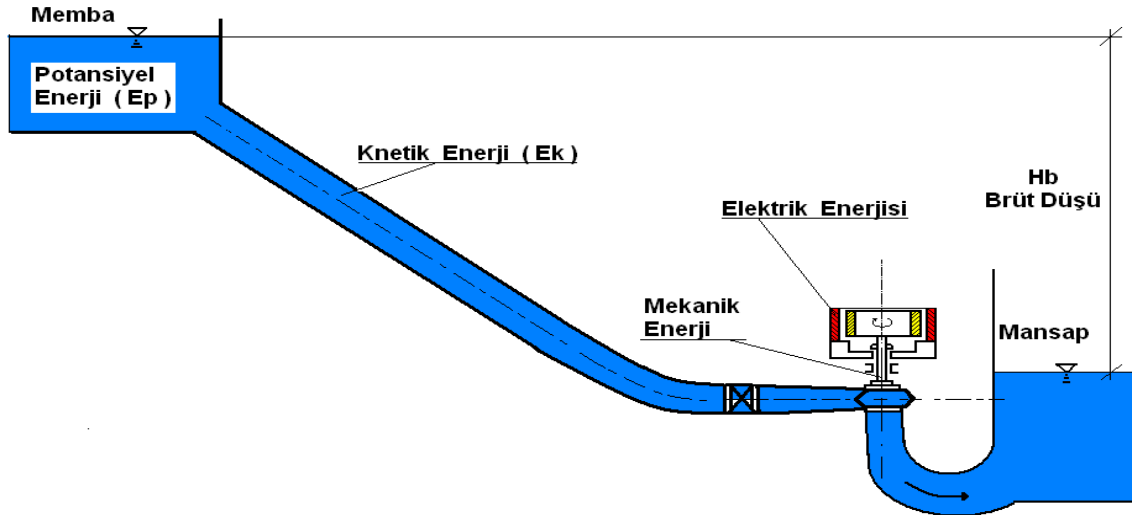
## **2. GENEL BİLGİLER**

### **2.1. HİDROELEKTRİK SANTRAL TESİSLERİ**

Bir hidroelektrik santral tesisinde türbinlerin tahriki ve elektrik enerjisi üretimi için kullanılan suyun kaynaktan alınarak türbinlere kadar sevk edildiği su alma yapısı, su iletim kanalı,

çökeltme havuzları, su iletim tüneli (basınçsız tünel), denge bacası, yükleme havuzu, enerji tüneli (basınçlı tünel), cebri boru, vs. gibi suyun geçtiği yollar vardır [3].

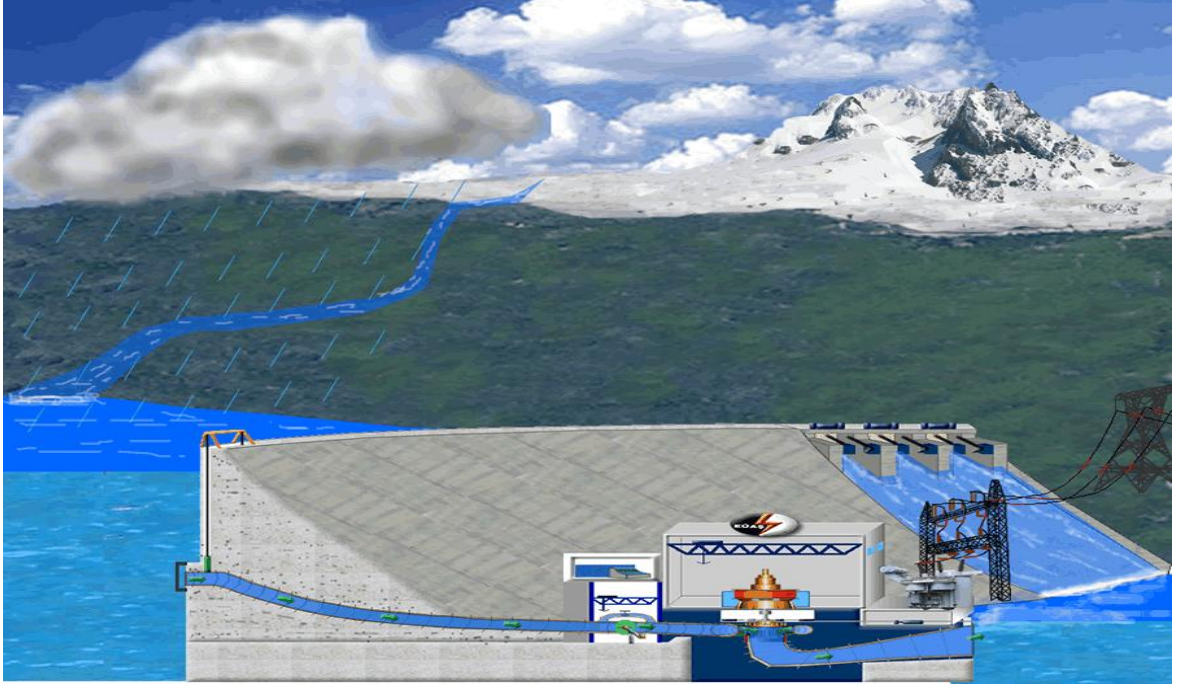
Santral tesislerine göre; belirli bir yükseklikteki barajlarda ya da yükleme havuzlarında depolanmış durumda bulunan su, burada durgun vaziyette iken yükseklikle doğru orantılı olarak bir potansiyel enerjiye sahiptir. Söz konusu su kütleinin, kuvvet tüneli ve cebri borular vasıtasıyla türbin çarkına doğru hareket ettirilmesi sonucu hareket halindeki su kütlesi, hareket hızının büyüklüğü oranında bir hareket enerjisine yani kinetik enerjiye sahip olacaktır. Suyun hidrolik akım enerjisi (kinetik enerjisi + basınç enerjisi), hidrolik santraldeki su türbinlerini belirli bir devirde döndürerek türbin şaftında mekanik enerjiye (dönü enerjisine) dönüşmektedir. Türbin milinde meydana gelen mekanik enerji ise generatör rotorunu döndürerek, generatör stator sargılarında elektrik enerjisi' ne dönüşmektedir.



Şekil-1

#### Şekil 1. Hidroelektrik Santralde Enerji Üretim Prensip Şeması

Generatörlerde elde edilen elektrik enerjisi, gerilim (voltaj) değeri generatör çıkışında bulunan güç transformatörleri (güç trafoları) vasıtasıyla uygun yüksek gerilim değerine dönüştürüldükten sonra, yaygın olarak kullanılan 34,5 kV, 154 kV ve 380 kV gibi gerilim değerleriyle yüksek gerilim hatları üzerinden uzak yerlere nakledilerek tüketicilere ulaştırılmaktadır [3].



**Şekil 2.** Hidroelektrik santralinin görünümü

### **2.1.1. Hidrolik Türbinler**

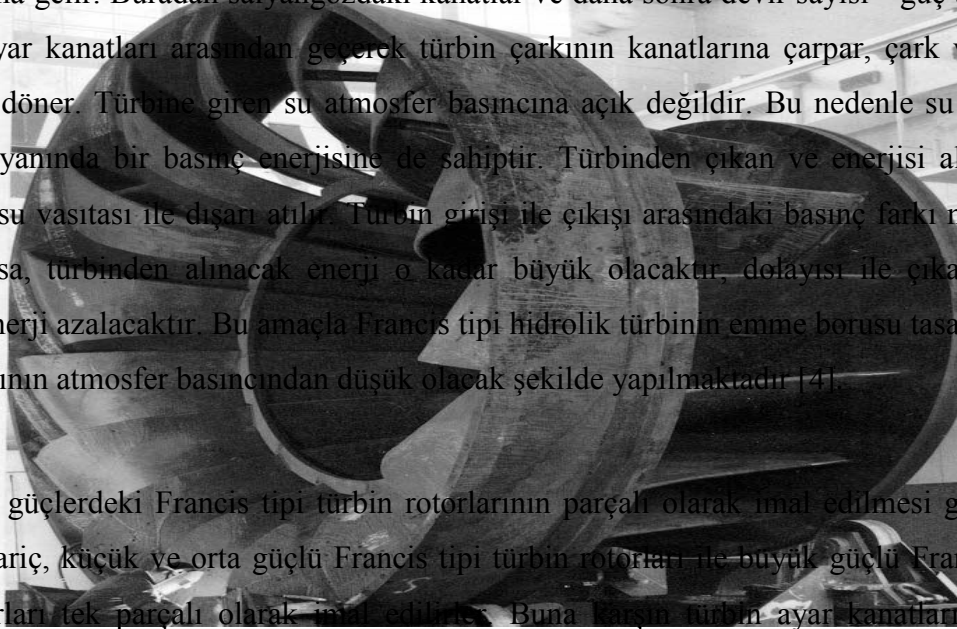
Hidrolik türbinler, suyun hidrolik akım enerjisini devamlı olarak döner çarklar (rotorlar) yardımı ile mekanik enerjiye çeviren döner (dinamik) hidrolik makinelerdir. Hidrolik makineler su türbinleri (hidrolik türbinler) ve su çarkları olmak üzere ikiye ayrılırlar.

Hidrolik türbinlerde türbin rotoru kanatlarının aralıklarından geçirilen suyun basınç enerjisi ile hız enerjisi, dönen türbin rotorunun kanatlarının aralıklarında mekanik enerjiye dönüşürler. Su çarklarında ise, suyun mevcut olan potansiyel enerjisi, suyun çark kepçelerine dolması ve ağırlık tesiri ile çarkı döndürmesi suretiyle mekanik enerjiye dönüşür [4].

#### **2.1.1.1. Francis tipi hidrolik türbinler**

Francis türbinleri 2 m ile 600 m hidrolik düşümler arasında ve 2 – 600.000 kW güçler için imal edilmektedirler. Günümüzde gücü 800.000 kW olan Francis tipi hidrolik türbinler imal edilmiş bulunmaktadır. Francis tipi hidrolik türbinler küçük güçlü santrallerde yatay eksenli, büyük güçlü santrallerde ise dikey eksenli olarak imal edilirler. Francis tipi hidrolik türbinler eksen durumuna göre, yatay eksenli ve düşey eksenli Francis tipi hidrolik türbinler olarak gruplandırılır [3].

Francis tipi türbinde cebri borular vasıtası ile iletilen su türbine girmeden önce, cebri borunun ucunda, suyun türbin çarkına her yönden eşit basınçta girmesini sağlayan ‘salyangoz’ adı verilen kısma gelir. Buradan salyangozdaki kanatlar ve daha sonra devir sayısı – güç ayarının yapıldığı ayar kanatları arasından geçerek türbin çarkının kanatlarına çarpar, çark ve buna bağlı kütle döner. Türbine giren su atmosfer basıncına açık değildir. Bu nedenle su hareket enerjisinin yanında bir basınç enerjisine de sahiptir. Türbinden çıkan ve enerjisi alınan su emme borusu vasıtası ile dışarı atılır. Türbin girişi ile çıkışı arasındaki basınç farkı ne kadar büyük olursa, türbinden alınacak enerji o kadar büyük olacaktır, dolayısı ile çıkan suyla kaybolan enerji azalacaktır. Bu amaçla Francis tipi hidrolik türbinin emme borusu tasarımında boru basıncının atmosfer basıncından düşük olacak şekilde yapılmaktadır [4].



Çok büyük güçlerdeki Francis tipi türbin rotorlarının parçalı olarak imal edilmesi gibi özel durumlar hariç, küçük ve orta güçlü Francis tipi türbin rotorları ile büyük güçlü Francis tipi türbin rotorları tek parçalı olarak imal edilirler. Buna karşın türbin ayar kanatları ve hız çemberi gibi su akımını yönlendirici ve su debisini ayarlayıcı tertibatlar montaj ve ayar kolaylıklarının sağlanması amacı ile parçalı olarak imal edilirler [3].

Türbin rotoru kanatları ile türbin ayar kanatlarının arasından geçen su basıncında bir rezonans ve titreşim (basınç dalgalanması) meydana gelmemesi için genellikle türbin rotorunun kanat sayısı tek sayı olarak ve türbin ayar kanatlarının sayısı ise çift sayı olarak seçilirler. Türbin rotoru kanatlarının aralıklarında her hangi bir tıkanma meydana gelmemesi ve tehlikeli bir durumun doğmaması için rotor kanatlarının çıkış kenarları arasındaki en dar aralığının, su giriş ızgaralarının aralıklarından daha geniş olması gerekir.

**Şekil 3.** Francis tipi türbinlerde üst ve alt gövdelere tespit edilmiş olan rotor kanatlarının kesin kaynak işlemlerinin yapılması [3].

İyi bir hidrolik akım ve yüksek bir mukavemet (dayanıklılık) sağlanabilmesi için yüksek hidrolik düşülerde kullanılan büyük güçlü ve yüksek özgül devir sayılı türbin rotorlarının kanatları hidrodinamik kesitli olarak çelik dökümden imal edilirler. Böyle büyük güçlü ve yüksek özgül devir sayılı Francis tipi türbin rotorları, ya alt ve üst gövde ile kanatlar ile birlikte çelik dökümden dökülürler veya alt ve üst gövdeler ayrı ve kanatlar ayrı olarak imal edildikten sonra kanatlar gövdelere kaynak edilmek suretiyle kaynak konstrüksiyonlu olarak imal edilirler.

100 m gibi düşük hidrolik düşülere kadar kullanılan küçük ve orta güçlü Francis tipi türbin rotorları yüksek kaliteli gri dökümden de imal edilebilirler. Ancak daha yüksek hidrolik düşülerde kullanılan küçük ve orta güçlü Francis tipi türbin rotorları ile her düşüde çalışan büyük güçlü Francis tipi türbin rotorlarının yüksek kaliteli çelik dökümden imal edilmeleri şarttır [3].

#### **2.1.1.2. Kaplan Tipi Hidrolik Türbinler**

Kaplan tipi hidrolik türbinler 1912 yılında Prof. Viktor KAPLAN tarafından geliştirilerek bugünkü anlamda modernleştirilmişlerdir. Kaplan tipi hidrolik türbinler de 2 m ile 60 m hidrolik düşüler ve 2 kW ile 200.000 kW güçler arasında imal edilmektedirler. Günümüzde ise gücü 500.000 kW olan Kaplan tipi türbinler imal edilmiş bulunmaktadır.

Kaplan tipi türbinler yapılış şekillerine göre; Rotor kanatları sabit olan pervane tipi hidrolik türbinler ve rotor kanatları ayarlanabilen Kaplan tipi hidrolik türbinler olmak üzere ikiye ayrılabilir. Sabit kanatlı Kaplan tipi türbin rotorlarına “**uskur tipi Kaplan türbinler**” adı da verilmektedir. Kaplan tipi hidrolik türbinler düşük hidrolik düşülerde ve genellikle nehir tipi hidrolik santrallarda kullanılırlar. Ancak, nehirlerin taşıdığı su debileri mevsimlere göre çok değişir. Su debilerinin çok değişmesi halinde, türbini en iyi verimle çalıştırabilmek için rotor kanatlarının açılarının da değiştirilmesi gerekir. Bu gibi durumlarda uskur tipi Kaplan

türbinleri rotorları kullanışlı değildirler.

#### **2.1.1.3. Pelton Tipi Hidrolik Türbinler**

Bu tip türbinler 1880 yılında Amerika'lı mühendis Pelton tarafından keşfedilmiş ve gelişmeleri günümüze kadar devam etmiştir. Pelton tipi hidrolik türbinler çok yüksek hidrolik düşüler ve küçük su debileri için kullanılmaktadırlar.

Pelton tipi hidrolik türbinlerde düze memesinden fışkıran su, Pelton çarkının çevresindeki kepçelere teğetsel olarak çarpar. Bu çarpma ile suyun hız enerjisi (kinetik enerjisi) mekanik işe dönüşmüş olur ve türbin rotoru döner. Türbin rotorunun çevresindeki kepçelere suyun çarptırılması bir veya birkaç Pelton lülesi ile yaptırılabilir. Genellikle küçük güçlü Pelton tipi hidrolik türbinlerin 1 veya 2 lülesi olmasına karşın büyük güçlü Pelton tipi hidrolik türbinlerin 4 veya 6 adet lülesi bulunur.

Pelton tipi hidrolik türbinler 60 – 2000 m hidrolik düşüler arasında ve 2 – 200.000 kW arasındaki güçler için imal edilmektedirler. Günümüzde 300.000kW gücünde Pelton tipi hidrolik türbinler imal edilmiş bulunmaktadır.

#### **2.1.1.4. Mitchel-Banki tipi Su Türbinleri**

Özel ve çok basit bir türbin tipi olmakla beraber Michelle-Banki tipi türbinler de serbest püskürtmeli hidrolik türbinler sınıfına dahil edilebilirler. Bu tip türbinler 1903 yılında Avusturyalı mühendis M.MICHELL tarafından keşfedilmiş ve 1917 yılında da Macar Prof. D.BANKI tarafından geliştirilmiştir.

Mitchel-Banki tipi hidrolik türbinler 750 kW'a kadar küçük su güçleri için ve 1 m'den 300 m'ye kadar düşülerdeki 0,02 m<sup>3</sup>/s'den 7 m<sup>3</sup>/s'ye kadar küçük su debileri için ve genellikle köy değirmenlerinde, köy elektriklenmesine yönelik çok küçük hidrolik santrallerde, orman içi köylerindeki kereste biçme atölyelerinin tahrikinde, tarım işletmelerinin aydınlatma ve ısıtılmasında köylerdeki küçük atölyelerin iş tezgâhlarının işletilmesinde kullanılmaktadırlar.

Mitchel-Banki tipi özel türbinler; su giriş borusu, su debisi ayar kanatları, türbin rotoru, türbin rotoru şaft yatakları, türbin kapağı ve emme borusu gibi parçalardan meydana gelmektedir. Su debisi ayar kanatları, küçük ve basit bir hız regülâtörü vasıtasıyla ayarlanabildiği gibi el ile de

ayarlanabilir. 0,60 nominal debiye kadar, daha küçük debilerde çalışma esnasında Mitchel-Banki tipi türbinlerin verimleri küçük güçlü Francis tipi türbinlerin veriminden daha büyük olmaktadır. Maksimum verimleri % 80 civarındadır. Nominal debiden sonra da küçük güçlü Francis tipi türbinlerin verimleri Mitchel-Banki tipi özel türbinlerin veriminden daha büyük olmaktadır. Bu duruma göre üzerinde küçük güçlü bir hidroelektrik santral tesis edilecek olan bir küçük akarsuyun debisi, senenin çok büyük bir bölümünde nominal debiden daha aşağı değerlerde ise küçük hidroelektrik santrallerde küçük güçlü Francis tipi türbin kullanılması yerine Mitchel-Banki tipi özel türbinin kullanılması daha uygun olacaktır.

## **2.2. HİDROELEKTRİK SANTRAL TÜRBİN SORUNLARI**

Türkiye’de mevcut hidroelektrik santrallerin çoğu Enerji Bakanlığı’na bağlı olan Elektrik Üretim Anonim Şirketi (EÜAŞ) Genel Müdürlüğü tarafından işletilmektedir. Özel firmalar tarafından işletilen santraller nispeten daha yeni santrallerdir. EÜAŞ Genel Müdürlüğü verilerine göre santrallerin devreye alınış tarihleri 1956’dan başlayıp günümüze kadar sürmektedir. Kamu tarafından kurulan ve işletilen santraller 40-50 yıllık santraller olması nedeniyle rehabilitasyon gerektiren santrallerdir.

Türkiye’de hidroelektrik santrallerde rehabilitasyon çalışmaları ise yeni yeni başlamıştır. Keban HES, rehabilitasyon çalışmasının başlatıldığı ilk santrallerden biridir. Santraller eskidikçe rehabilitasyon ve yenileme çalışmaları da artacaktır.

Rehabilitasyon projelerinde de en önemli kısmı türbin teçhizatları almıştır. Türbin teçhizatlarının değiştirilmesi uzun zaman ve fazla maliyet gerektirdiğinden, santrallerde türbin verimlilik saha ölçümleri yapılarak, ünitelerin daha verimli çalıştırılması araştırmalarına gidilmiştir.

Türkiye’de bazı hidroelektrik santral türbinlerinde yüksek oranda aşınma olayı (kavitasyon) görülmektedir. Sarıyar, Karakaya, Keban v.b. hidroelektrik santralleri güçlü aşınmaya maruz kalan santrallerdendir ve her 2-3 senede bir türbin çarkları ve labirentlerde ciddi oranda yüzey kaplaması yapılmaktadır. Çark veriminin en önemli parametrelerinden biri olan orijinal çark biçimi zamanla onlarca kez yüzey kaplamasından dolayı verimin daha düşük (örneğin  $\pm$  % 1) olduğu başka bir biçime dönüşebilmektedir. Su türbinlerinin orijinal biçimlerinde dikkat edilecek başlıca noktalardan biri, herhangi bir işletme durumunda su türbini kavitasyon sınırı içine düşmemesi için gerekli bütün tedbirleri almaktır. Su türbinlerinin içersindeki hidrolik

akım şekilleri, çarklar imal edilmeden önce tam olarak bilinmediği için bu sahada çalışan proje tasarlayan mühendisler eskiden beri çözülmesi zor olan bir sorunla karşı karşıyadırlar. Francis tipi hidrolik türbinlerde meydana gelen kavitasyon olayı ile ilgili olarak birçok Avrupa ülkelerinde 100 yıla yakın bir zamandan beri, yurdumuzda ise 20 yılı aşkın bir zamandan beri hidrolik türbinlerin işletmeciliğinden elde edilen tecrübelerle göre önemli çalışmalar yapılmaktadır [1].

### **3. YÜKSEK BASINÇ TÜRBİNLERİNDE MEYDANA GELEN KAVİTASYON OLAYI**

#### **3.1. KAVİTASYON OLAYI İLE İLGİLİ GENEL BİLGİLER**

Hidrolik türbinlerin konstrüksiyonlarının, tekniğin bu günkü gelişmiş olan imkânları sayesinde, kavitasyonsuz bir işletmeyi mümkün kılacak bir şekilde yapılması imkân dahilinde bulunmaktadır. Fakat teknik bakımdan kusursuz sayılabilecek olan böyle bir çözüm yolu, hidrolik türbinin ve hidroelektrik santral tesislerinin ekonomik bakımdan çok pahalıya mal olmasına sebep olur. Bu sebeptir ki, hidrolik türbinlerin imalatçıları, makinelerini kavitasyon olayı tehlikesine karşı yeter derecede emin, yeter derecede de ucuza imal etmek yolunu tercih ederler. Keza, hidrolik türbinlerin işletmecileri de, makinelerini ucuza alarak belirli kavitasyon olayı limitleri içinde çalıştırmak ve meydana gelecek kavitasyon olayı tahribatlarını belirli zaman periyotları içinde tamir etmek yolunu tercih ederler [3,6].

Hidrolik türbinlerin gerek imalatçıları ve gerekse işletmecileri, kavitasyon olayının aksine, makinelerinde vibrasyon (titreşim) olayı meydana gelmesini hiç istemezler. Zira vibrasyon olayının, türbinin ve türbinin tahrik ettiği generatörün neresinde, ne zaman ve ne gibi bir hasar yapacağını önceden kestirmek mümkün değildir. Fakat tekniğin bugünkü gelişmiş olan imkânlarına rağmen bugüne kadar hiç vibrasyonsuz olarak çalışabilecek bir makine imal

etmek mümkün olamamıştır. Bu sebeptendir ki, bugün için gerek hidrolik türbinlerin imalatçıları ve gerekse işletmecileri tarafından yapılması gereken ve yapılan yegâne iş, hidrolik türbinin en az ve kabul edilebilir bir vibrasyonla çalıştırılması için gerekli şartların oluşturulmasıdır.

Hidrolik türbinlerin emme borularında meydana gelen vorteks olayı, hem hidrolik türbinin rotorunda kavitasyon olayı ve hem de komple türbin-generatör ünitesinin döner kütlelerinde vibrasyon olayı meydana gelmesine sebebiyet verdiği için çok büyük bir önem arz etmektedir [6]. Son yıllarda imal edilen hidrolik türbinlerin güçlerinin ve döner kütlelerinin çapları ile birlikte toplam shaft boylarının çok büyümüş olması, bu tip türbinlerde vorteks olayının önemini bir kat daha artırmış bulunmaktadır.

Kavitasyon olayına su türbinlerinde, santrifüj pompalarda, gemi pervanelerinde, boru donanımlarındaki vana ve dirseklerde ve tekniğin daha bir çok sahasında rastlamak mümkündür. Kavitasyonla çalışan herhangi bir makinenin veriminde bir miktar düşme olur. Ancak, kavitasyon olayının önemi, kavitasyonla çalışan bir makinenin yalnız veriminin düşmesinden değil, kavitasyon olayı tahribatına maruz kalan malzemenin çok süratli bir şekilde yıpranarak süngerleşmesinden ve parçalanmasından ileri gelmektedir [3].

Su türbinlerinin ve santrifüj pompaların konstrüksiyonlarında dikkat edilecek başlıca noktalardan biri, her hangi bir işletme durumunda su türbini ve santrifüj pompanın kavitasyon sınırı içine düşmemesi için gerekli bütün tedbirleri almaktır. Ekonomik bir su türbini imal etme düşüncesiyle, makine boyutlarının, devir sayısı ve çevresel hızlarla santrifüj kuvvetlerden doğabilecek aşırı gerilmelerin müsaadesi nispetinde küçük tutulması gerekmektedir. Bir su türbininde hızın yükselmesi nispetinde makine boyutlarının küçültülebilmesi ve ekonomik bir makine imal edilebilmesi imkânına mukabil, hız fazlaştıkça kavitasyon olayının tehlikesi artmaktadır. Bu bakımdan optimum bir hıza karşın optimum bir kavitasyon olayı tehlikesini kabullenmek ve buna göre hidrolik türbin için önceden bir kavitasyon katsayısı seçmek zorunlu olmaktadır.

Su türbinlerinin içersindeki hidrolik akım şekilleri, makineler imal edilmeden evvel tam olarak bilinmediği için bu sahada çalışan konstrüktör mühendisler eskiden beri çözülmesi zor olan bir sorun karşısında kalmışlardır. Hidrolik akım ortamının içinde teşekkül eden vakumlu hacimciklerin içersindeki su zerreciklerinin ses hızının bazen altında bazen de üstündeki hızlarla ve başka başka hidrolik akım kanunlarına uyarak hareket etmeleri de kavitasyon olayı sorununun çözümünü bir hayli güçleştirmektedir. Bu bakımdan mühendislik görüş açısına

göre, kavitasyon olayı sorununun tamamen çözümlenmesi için gerekli, uzun ve çok pahalı çalışmalar yerine, ekonomik etkenler göz önüne alınarak, kavitasyon olayına tesir eden etkenlere karşı önlem almak ve gerektiğinde kavitasyon sınırına yaklaşarak çok büyük bir tehlike teşkil etmeyecek şekilde belirli bir kavitasyon olayı ile çalışmak daha isabetli bir yol olarak gözükmektedir [3].

### 3.2. KAVİTASYON OLAYININ TARİFİ

Hidrolik bir türbinin ayar kanatları arasında veya rotor kanatları arasında hareket halinde bulunan akımın, herhangi bir bölgesindeki akış hızının her hangi bir nedenle artması ve hızın arttığı bu bölgedeki basıncın suyun buharlaşma basıncı değerine kadar düşmesi, bu bölgelerdeki suyun buharlaşmasına ve yer yer içi doymuş su buharı ile dolu olan vakumlu hacimciklerin teşekkül etmesine sebep olur. Basıncın çok düştüğü yerlerde suyun buharlaşması ile teşekkül eden ve içi doymuş su buharı ile dolu olan bu vakumlu hacimciklerin genel akışkan hareketine uyarak genişip-büzülmesi ve ani olarak ortadan kalkması esnasında su zerreciklerinin çok büyük bir hızla malzeme yüzeyine çarpması sonucu meydana gelen büyük gürültülü darbelerin malzemenin yüzeyini süngerleştirerek tahrip etmesi olayına “Kavitasyon olayı” adı verilmektedir [7].

Gerçekten, bir akışkan akımı ortamının her hangi bir yerindeki basınç, akışkanının buharlaşma basıncına kadar düşecek olursa, basıncın düştüğü bu yerdeki akışkan buharlaşacak ve akışkan akımı içerisinde içi dolmuş su buharı ile dolu olan çok düşük basınçlı (vakumlu) hacimcikler meydana gelecektir. Meydana gelen düşük basınçlı hacimciklerin içerisinde bulunan su zerrecikleri, vakumlu hacimciklerin etrafındaki yüksek basınçlı akışkanın dalgalanmasına uyarak basıncın azalıp-çoğalması ve vakumlu hacimciklerin sık sık ve süratle büzülüp-genleşmeleri ve yer değiştirmeleri ve birleşip-ayrılmaları yüzünden, malzeme üzerine ses hızına yakın bir hızla çarpacaklardır. Sıvının buharlaşması-yoğunlaşması çevrimi saniyede 300-400 kez olmakta ve lokal olarak 4000 bar’a kadar ani basınç yükselmeleri meydana gelmektedir. Vakumlu hacimciklerin su zerreciklerinin ses hızına yakın bir hızla ve milyonlarca defa malzeme üzerine çarpmaları sonunda malzeme yüzeyinde önce bir karıncılaşma, pürüzlenme ve daha sonrada küçük, küçük oyukçuklar meydana gelecektir. Malzeme yüzeyinde meydana gelen bu küçük oyukçuklar aynı olay nedeni ile

zamanla büyüyüp derinleşecekler ve bir müddet sonrada malzeme adeta süngerleşecektir. Malzemenin süngerleşen kısımları zayıflayacağı için koparak yok olacak ve kavitasyon olayı tahribatı bu şekilde ilerleyip gidecektir.

Kavitasyon olayı; genellikle, türbinin nominal yükünün veya herhangi bir hidrolik düşüdeki optimum yükünün çok altında ve çok üstünde çalıştırılması esnasında meydana gelmektedir. Esasen, türbinin nominal yükünün veya herhangi bir hidrolik düşüdeki optimum yükünün çok altındaki yüklerle çalıştırılması esnasında, emme borusunun başlangıcındaki eksen bölgesinde meydana gelen "vorteks olayı" da, hem kavitasyon olayının şiddetini artırmakta, hem türbin emme borusunun ve türbinin verimini kötüleştirmekte ve hem de türbin rotoruna radyal ve eksenel yönlerde etkiyen hidrolik kuvvetlerin dengesini bozduğu için komple türbin/jeneratör şaftının titreşim ve salınım yapmasına sebebiyet vermektedir [8].

$P_k$  = Akışkan basıncı,

$P_d$  = Akışkanın buharlaşma basıncı,

$H_s$  = Türbin emme yüksekliği,

$H_e$  = Faydalı net hidrolik düşü,

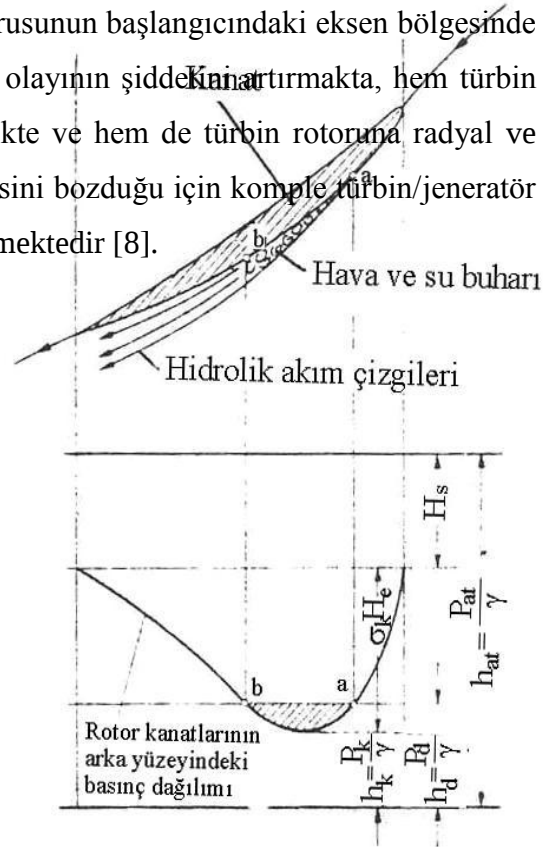
$\sigma_k$  = Kavitasyon katsayısı,

$P_{at}$  = Atmosfer basıncı,

$h_{at}$  = Atmosfer basıncı =  $P_{at} / \gamma$  (mSS),

$h_d$  = Buharlaşma basıncı =  $P_d / \gamma$  (mSS),

$h_k$  = Akışkan basıncı =  $P_k / \gamma$  (mSS),



**Şekil 4.** Hidrolik bir türbin rotoru kanadının arka yüzeyinde kavitasyon olayının meydana gelişi.



**Resim 1.** Kavitasyon Olayı [9].



**Resim 2.** Gökçekaya HES-türbin çarklarının kavitasyona uğramış hali [9] .

### **3.3. KAVİTASYON OLAYININ ZARARLI ETKİLERİ**

Kavitasyon olayının meydana gelmesi sonucu řu zararlı etkiler görülebilmektedir: [3,10]

- i. Türbin ayar kanatları arasında ve türbin rotoru kanatları arasında çok düşük basınçlı (vakumlu) hacimcikler meydana gelmesi ile enine kesit daraldığı için debi azalmakta ve dolayısıyla da güç düşmektedir.
- ii. Kavitasyon olayı sonucu meydana gelen vurunu ve darbelerle salınımlar bir enerji yuttuğı için güç kaybı olmakta ve türbin randımanı % 10 - % 20 kadar azalmaktadır.
- iii. Kavitasyon olayı tahribatına uğrayan yerlerde malzeme yüzeyi önce parlaklaşıp pürüzlenmekte daha sonrada malzeme yüzeyinde küçük pek çok oyukçuklar meydana gelmektedir. Bu küçük oyukçuklar, yine kavitasyon olayı nedeni ile zamanla büyüyerek derinleşmekte ve belirli bir işletme süresi sonunda da malzeme yüzeyi adeta süngerleşmektedir. Yüzeydeki süngerleşme miktarı arttıkça malzeme koparak yok olmakta ve kavitasyon olayının tahribatı ilerleyip gitmektedir.
- iv. Kavitasyon olayının meydana gelmesi sonucu türbin rotorunu dengelenmemiş radyal hidrolik kuvvetler etkilediğı için türbin rotoru ile birlikte komple türbin-generatör şaftında titreşimler ve salınımlar meydana gelmektedir. Meydana gelen bu titreşimler ile salınımlar, türbin-generatör ünitesinin klavuz yataklarının bozularak kullanılmaz hale gelmesine ve hatta türbin-generatör ünitesinin taşıyıcı yatak köprüsü ayaklarının oynamasına ve bu yüzden türbin-generatör ünitesinin komple döner kütesinin dengesinin bozulmasına neden olabilmektedir.
- v. Kavitasyon olayı nedeni ile türbin emme borusunun verimi çok kötüleşmektedir. Kavitasyon olayı, genellikle türbinin nominal yükünün veya herhangi bir hidrolik düşüdeki optimum yükünün çok altında ve çok üstünde çalıştırılması esnasında meydana gelmektedir. Esasen, türbinin nominal yükünün veya herhangi bir hidrolik düşüdeki optimum yükünün çok altındaki yüklerde çalıştırılması esnasında emme borusunun başlangıcındaki eksen bölgesinde meydana gelen “vorteks olayı” da hem kavitasyon olayının şiddetini artırmakta ve hem türbin emme borusunun ve türbinin verimini kötüleştirmekte ve hem de

türbin rotoruna teğetsel ve eksenel yönlerde etkiyen hidrolik kuvvetlerin dengesini bozduğu için komple türbin-generator şaftının titreşim ve salınım yapmasına neden olmaktadır.

### **3.4. KAVİTASYON OLAYINA ETKİ EDEN ETKENLER**

Hidrolik laboratuvarlarda yapılan araştırma çalışmaları sonunda elde edilen tecrübelerle göre aşağıda kaydedilen maddelerin, her birinin ayrı ayrı veya bir kaçının bir arada, kavitasyon olayının meydana gelmesine tesir eden etkenler oldukları tespit edilmiş bulunmaktadır. Kavitasyon olayına tesir eden çeşitli etkenleri şu şekilde sıralayabiliriz [3,11,12].

#### **3.4.1. Tahrik suyunun Fiziksel Özellikleri**

##### **3.4.1.1. Suyun sıcaklığı**

Hidrolik bir türbinin hidrolik akım ortamını teşkil eden tahrik suyunun sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, kavitasyon olayı o derece kolay başlayabilmektedir. Zira hidrolik akım ortamını teşkil eden tahrik suyunun sıcaklığının yüksek olması buharlaşma basıncına tesir etmektedir ve su sıcaklığı yükseldikçe buharlaşma kolaylaşmaktadır. Aşağıda Tablo-1’de tahrik suyu sıcaklığına bağlı olarak suyun buharlaşma basıncının değiştiği gösterilmiş bulunmaktadır.

##### **3.4.1.2. Su içinde bulunabilecek gaz, buhar veya hava miktarları**

Tahrik suyunun içinde bulunabilecek olan gaz, buhar veya hava miktarları arttıkça kavitasyon olayının meydana gelmesi kolaylaşmaktadır. Bilhassa hidrolik düşüsü az ve debisi ile emme yüksekliği fazla olan Francis türbinlerinin tahrik suyunun içindeki hava miktarı arttıkça kavitasyon olayı çekirdeklerinin büzülüp-genleşme hızı arttığı için, kavitasyon olayının meydana gelme hızı ile zararlı tesirleri fazlalaşmaktadır.

**Tablo 1.** Tahrik suyu sıcaklığına bağlı olarak suyun buharlaşma basıncının değişimi.

| Su sıcaklığı<br>°C | Buharlaşma basıncı<br>( $H_v$ ) mSS | Su sıcaklığı<br>°C | Buharlaşma basıncı<br>( $H_v$ ) mSS |
|--------------------|-------------------------------------|--------------------|-------------------------------------|
| 0                  | 0.0623                              | 19                 | 0.2239                              |
| 1                  | 0.0669                              | 20                 | 0.2383                              |
| 2                  | 0.0719                              | 21                 | 0.2535                              |
| 3                  | 0.0772                              | 22                 | 0.2695                              |
| 4                  | 0.0829                              | 23                 | 0.2863                              |
| 5                  | 0.0889                              | 24                 | 0.3041                              |
| 6                  | 0.0953                              | 25                 | 0.3229                              |
| 7                  | 0.1021                              | 26                 | 0.3426                              |
| 8                  | 0.1093                              | 27                 | 0.3634                              |
| 9                  | 0.1170                              | 28                 | 0.3853                              |
| 10                 | 0.1251                              | 29                 | 0.4083                              |
| 11                 | 0.1337                              | 30                 | 0.4325                              |
| 12                 | 0.1429                              | 31                 | 0.4579                              |
| 13                 | 0.1526                              | 32                 | 0.4847                              |
| 14                 | 0.1629                              | 33                 | 0.5128                              |
| 15                 | 0.1737                              | 34                 | 0.5423                              |
| 16                 | 0.1853                              | 35                 | 0.5733                              |
| 17                 | 0.1975                              | 50                 | 1.257                               |
| 18                 | 0.2103                              | 60                 | 2.031                               |

mSS= metre su sütunu (m)

#### 3.4.1.3. Su içinde bulunan kimyasal maddelerin miktarları

Tahrik suyunun içinde bulunabilecek olan ve malzemeleri korozyon tahribatına uğratma özelliği yüksek olan kimyasal maddelerin miktarları arttıkça kavitasyon olayının meydana gelmesi kolaylaşacaktır. Zira korozyona uğrayan malzeme yüzeyi pürüzlenmektedir ve pürüzlü yüzey üzerine sürtünerek akan hidrolik akım çizgileri daha kolay bozulabilmektedir.

#### 3.4.1.4. Su içinde bulunabilecek katı yabancı madde miktarları

Su içinde bulunabilecek kum, çakıl, çamur vs. gibi katı yabancı maddelerin miktarları arttıkça kavitasyon olayının meydana gelmesi kolaylaşmaktadır. Zira su içinde bulunabilecek katı yabancı maddeler hidrolik akımın bozulmasına ve hidrolik akım ortamı içinde türbülansların ve çok düşük basınçlı hacimciklerin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Su içinde bulunabilecek katı yabancı maddelerin etrafındaki hidrolik akım çizgilerinin bozulması ile bu katı yabancı maddeler, meydana gelen vakumlu hacimciklerin nüvesini teşkil etmektedirler. Bu sebeptendir ki tahrik suyunun içinde bulunabilecek katı yabancı maddeler “kavitasyon olayı

çekirdeği” olarak nitelendirilmektedir.

### 3.4.2. Türbinin konstrüktif özellikleri

Francis tipi bir hidrolik türbinin konstrüktif özelliklerinin kavitasyon olayının meydana gelmesi üzerine büyük etkileri olmaktadır. Francis tipi bir hidrolik türbinin konstrüktif özelliklerini aşağıdaki şekilde sıralayabiliriz:

#### 3.4.2.1. Türbin rotoru çapının etkisi

Türbin rotorun çapı büyüdükçe çevresel hız artmaktadır. Çevresel hızın artması hidrolik akımın basıncının düşmesine, kavitasyon olayı çekirdeklerinin daha kolay oluşmasına zemin hazırlamaktadır. Francis tipi bir hidrolik türbin rotorunun çıkışındaki çevresel hız kat sayısının ifadesini, hidrolik düşü ve türbin rotoru çıkış çapına bağlı olarak aşağıdaki şekilde yazabiliriz:

$$U_2 = \frac{W.D_2}{2\sqrt{2gH}} \quad (3.1)$$

$W$  = Türbin rotorunun açısal hızı (rd/s)

$D_2$  = Türbin rotoru çıkışındaki çap (m)

$H$  = Hidrolik düşü (m)

$U_2$  = Çevresel hız katsayısı

$g$  = Yer Çekimi İvmesi (m/s<sup>2</sup>)

#### 3.4.2.2. Rotor kanat formu ve çıkış açısının etkisi

Türbinler imal edilmeden önce modeller üzerinde çalışarak optimum bir kanat şekli tespit edilmektedir. Türbin rotoru kanat formunu ve çıkış açısını sadece matematik yollardan tespit etmek mümkün olamamaktadır. Türbin rotorunun kanat formu ve çıkış açısı sadece matematik yollardan halletmek istendiğinde kanat çıkış açısı büyümektedir ve kavitasyon olayının meydana gelmesi için zemin hazırlanmış olmaktadır. Bu yüzden türbinler imal edilmeden önce optimum şartların tespit edilebilmesi için mutlaka model deneyleri yapılması gerekmektedir.

Ancak, imalat öncesi model deneyleri yapılmasına rağmen bilhassa büyük güçlü Francis

türbinlerinde modelden alınan sonuçları her zaman için ana makinede tutturmak mümkün olamamaktadır. Zira araştırma ve deneyler çok küçük bir model üzerinde yapıldığı için çok küçük olan model üzerinde tespit edilemeyen küçük anormallikler esas makinede çok büyük sorunların doğmasına neden olabilmektedir. Bu yüzden son zamanlarda imal edilen büyük güçlü Francis türbinleri işletmeye alındıklarında çok büyük hidrolik sorunlarla karşılaşıldığı ve bu sorunların sonradan alınan önlemlerle çözüme kavuşturulmaya çalışıldığı görülmektedir.

#### **3.4.2.3. Kanat yüzeylerinin pürüzlülük derecesi**

Kanat yüzeylerine sürtünerek yol almakta olan hidrolik akımın, pürüzlü yüzeylerle temas eden çizgileri parçalanarak bozulmakta ve küçük türbülanslar teşekkül etmektedir. Buna karşın temiz, düzgün ve parlak yüzeylerde hidrolik akım çizgileri bozulmamakta ve türbülanslar meydana gelmemektedir. Dolayısıyla temiz düzgün ve parlak yüzeylerde kavitasyon olayının meydana gelmesi zor, fakat pürüzlü yüzeylerde ise kolaydır. Yüzey pürüzlülük derecesi arttıkça da kavitasyon olayının meydana gelme ihtimali artmaktadır.

#### **3.4.2.4. Kullanılan malzemenin mekaniksel ve kimyasal özellikleri**

Hidrolik türbinlerin rotorlarının ve ayar kanatlarının imalinde kullanılan malzemeler korozyon ve erozyon tahribatlarına karşı ne kadar çok dayanıklı olurlarsa kavitasyon olayı tahribatına karşı da o derece dayanıklı olmaktadır. Bu sebeptendir ki bugün birçok ileri sanayi ülkelerinde değişik cins malzemelerin zamana bağlı olarak değişmekte olan kavitasyon olayı tahribatına dayanıklılık özelliklerinin tespitine çalışılmakta ve kavitasyon olayı tahribatına karşı en dayanıklı olan en ekonomik malzemenin tayini için büyük gayretler sarf edilmektedir.

Bugün için korozyon ve erozyon tahribatları ile kavitasyon olayı tahribatına karşı en dayanıklı olan malzemeler, bünyelerinde % 13'den fazla krom ihtiva eden Cr-Ni'li malzemelerdir. Ancak, büyük bir türbin rotorunun veya ayar kanatlarının tamamını Cr-Ni'li malzemelerden imal etmek oldukça pahalıya mal olmakta ve ekonomik görülmemektedir. Bu sebeptendir ki türbin rotorları kanatlarının sadece emme borusu tarafı yüzeylerinin kavitasyon olayı tahribatına en çok maruz kalan kısımlarının Cr-Ni'li malzeme ile kaplatılması ile yetinilmektedir.

Ayrıca, belirli bir işletme süresi sonunda kavitasyon onarımı yapılırken, kavitasyon

tahribatına uğrayan yüzeylerin Cr-Ni'li elektrotlarla kaynak dolgusu yapılarak kaplanması ve daha sonrada bu yüzeylerin taşlanarak perdahlanması daha ekonomik bir yol olarak görülmektedir.

### 3.4.2.5. Özgül hız

Hidrolik bir türbinin tipini tayin için kullanılmakta olan özgül hız, kavitasyon olayının sınırını tayin için de çok büyük bir rol oynamaktadır. Bir hidrolik türbinin nominal net hidrolik düşüşü ( $H_n$ ), dakikadaki devir sayısı ( $n$ ) ve gücü ( $N$ ) ise bu hidrolik türbine özgül hızın değeri;

$$n_s = \frac{n}{H_n} \cdot \frac{N}{\sqrt{H_n}} = \frac{n \cdot N^{0.5}}{H_n^{1.25}} \quad (3.2)$$

Prof. Dr. Thoma' nın çalışmaları göstermiştir ki, bir hidrolik türbinin ( $n_s$ ) özgül hızı arttıkça o türbinin kavitasyon katsayısı da artmakta ve kavitasyon kat sayısının sınır şartlarının altında kavitasyonsuz bir işletme mümkün olmaktadır.

Hidrolik türbinlere ait ( $n_s$ ) özgül devir sayıları ile bu özgül devir sayılarına tekabül eden Thoma kavitasyon katsayıları sınır değerleri Tablo.2'de şu şekilde verilmiştir.

**Tablo 2.** Thoma kavitasyon katsayıları-sınır değerleri.

| Özgül devir sayısı<br>( $n_s$ )                      | 50   | 80    | 100  | 200  | 300  | 360  | 400  | 500  |
|------------------------------------------------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|
| Thoma<br>"kavitasyon" katsayısı<br>( $\sigma_{kr}$ ) | 0.03 | 0.045 | 0.05 | 0.11 | 0.20 | 0.28 | 0.35 | 0.46 |

### 3.4.2.6. Net hidrolik düşü, debi ve devir sayısı ( $H_n$ , $Q$ , $n$ )

Bu üç büyüklükten herhangi birisinin değerinin artması, akışkan akımı hızının ve kanat sırtı üzerindeki basınç dalgalanmalarının ve depresyonun artmasına sebep olur. Özgül hızı aynı değerini muhafaza ettiği halde nominal net düşüşü daha büyük olacak bir Francis türbini imal edilse ( $\sigma_{kr}$ ) değerinin altına düşmek için ( $H_s$ ) emme yüksekliğinin çok küçültülmesi yani türbinin çıkış suyu seviyesinden çok aşağıda tesis edilmesi gerekir. Bu durum tesis masraflarını çok artırır. Bu sebeptendir ki ( $H_s$ ) emme yüksekliğini nominal net düşünün maksimum değeri ve özgül hıza bağlı olarak tayin etmek en ekonomik ve optimum bir çözüm yolu olmaktadır.

### 3.4.3. Atmosfer basıncı (tesisin bulunduğu yerin rakımı)

Bir hidrolik santral tesisinin bulunduğu yerin rakımı yükseldikçe o yerdeki atmosfer basıncı düşer. Atmosfer basıncı düştükçe de suyun buharlaşması kolaylaşır. Dolayısıyla atmosfer basıncının değeri yani tesisin bulunduğu yerin rakımının kavitasyon olayının meydana gelmesine tesir eden bir etken olarak göz önüne alınması gerekir. Bir hidrolik tesisin bulunduğu yerdeki atmosfer basıncına ( $H_a$ ) ve tesisin bulunduğu yerin rakımına ise ( $Z$ ) diyecek olursak;

$$H_a = 10,33 - (Z / 900) \text{ (mSS)} \quad (3.3)$$

ifadesi yazılır.

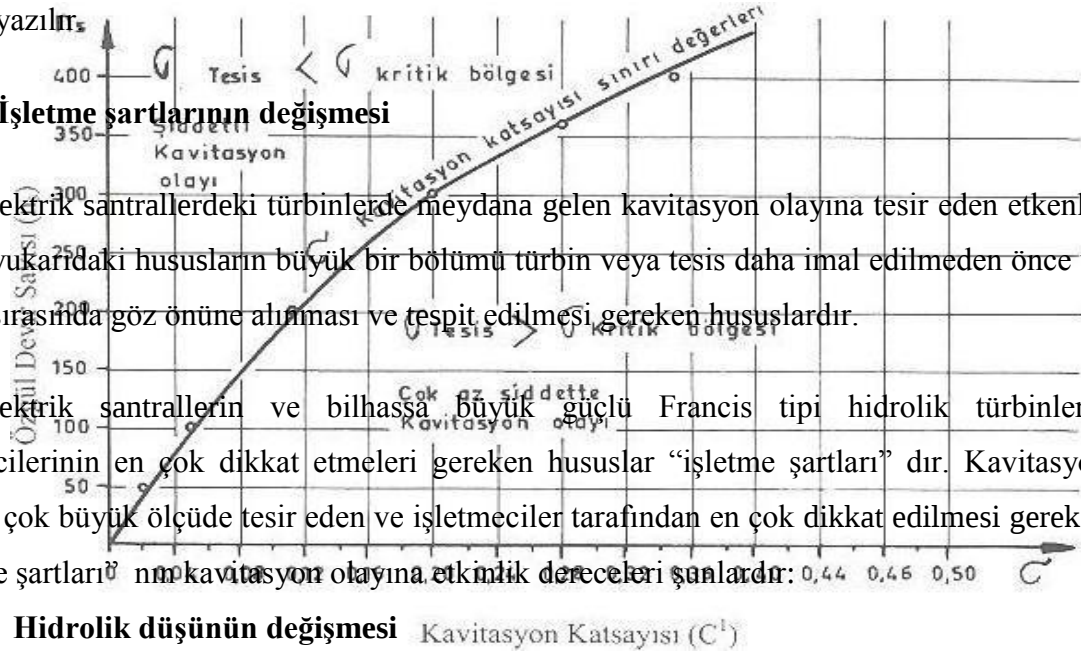
### 3.4.4. İşletme şartlarının değişmesi

Hidroelektrik santrallerdeki türbinlerde meydana gelen kavitasyon olayına tesir eden etkenler olarak yukarıdaki hususların büyük bir bölümü türbin veya tesis daha imal edilmeden önce ve imalat sırasında göz önüne alınması ve tespit edilmesi gereken hususlardır.

Hidroelektrik santrallerin ve bilhassa büyük güçlü Francis tipi hidrolik türbinlerin işletmecilerinin en çok dikkat etmeleri gereken hususlar “işletme şartları”dır. Kavitasyon olayına çok büyük ölçüde tesir eden ve işletmeciler tarafından en çok dikkat edilmesi gereken “işletme şartları”nın kavitasyon olayına etkinlik dereceleri şunlardır:

#### 3.4.4.1. Hidrolik düşünün değişmesi

Bilhassa barajlı (depolamalı) hidroelektrik santrallerde görülen bir durumdur. Baraj gölüne gelen yıllık veya mevsimlik su miktarlarının azalması, fakat buna karşın elektrik enerjisi gereksiniminin ve üretimlerinin artması sonucu baraj gölü seviyelerinde düşmeler olur. Baraj gölleri seviyelerinin azalması halinde hidrolik düşülerde de azalma meydana gelir. Hidrolik düşünün azalması halinde türbinin optimum yükü ve kavitasyonsuz veya çok kavitasyonlu çalışma sahaları değişir. Bu gibi durumlarda hidrolik türbin işletmecilerinin yapacağı en isabetli iş, makinelerini, mevcut düşü için en iyi verime isabet eden optimum yükte çalıştırmalarıdır.



**Şekil 5.** Francis tipi hidrolik türbinlere ait kavitasyon katsayılarının sınır değerleri özgül hıza bağlı olarak gösterilişi.

Bir hidrolik türbin, her hangi bir hidrolik düşüde en iyi verime isabet eden optimum yükle veya optimum yük sahasında çalıştırılacak olursa hem mevcut hidrolik düşü için en az kavitasyon olayı tahribatı ile ve hem de beher kWh enerji üretimi için en az su sarfiyatı ile çalışılmış olacaktır. Yani hem teknik bakımdan ve hem de ekonomik bakımdan en az sakınca ile çalışılmış olacaktır. Şekil 5’de Francis tipi hidrolik türbinler için çizilmiş olan “hidrolik düşü-yük-kavitasyon olayı şiddeti” ve “hidrolik düşü-yük-özgül su sarfiyatı” karakteristik eğrileri gösterilmiş bulunmaktadır.

Şekil 5’deki şartlarda  $H_2 > H_1 > H_n$ ’dır. Bu şeklin tetkikinden de görüleceği üzere hidrolik düşü azaldıkça mevcut hidrolik düşüde en iyi verimle çalışmaya isabet eden optimum yükler azalmakta ve fakat özgül su sarfiyatları fazlalaşmaktadır.

$$\text{Yani; } N_{2opt} > N_{1opt} > N_{nopt} > N'_{opt} > N''_{opt};$$

$$q_2 < q_1 < q_{nom} < q' < q''$$

olmaktadır ve hidrolik düşülere bağlı olarak, optimum yükle çalışma noktalarındaki kavitasyon olaylarının şiddeti de  $\sigma_2 < \sigma_1 < \sigma_{nom} < \sigma' < \sigma''$  olarak değişmektedir. Ayrıca şiddetli kavitasyon olayı ile çalışma bölgesinin alt ve üst sınırlarının yük limitleri de hidrolik düşü ile birlikte değişmektedir.

Özgöl Su Sarfıyatı ( $m^3/san$ )

Makinanın Yönü

**Şekil 6.** Francis tipi bir hidrolik türbine ait düşü-yük-özgül su sarfıyatı karakteristik eğrileri

$H_n$  = Nominal net hidrolik düşü türbinin dizayn düşüsü  $H_d$  değerini;

$N_n$  = Türbinin dizayn düşüsünde ve en yüksek verim noktasındaki gücü;

$H_2$  =  $(H_n+y)$  Değeri maksimum hidrolik düşü  $H_{max}$  değerini;

$H_n$  =  $(H_n-y)$  Değeri minimum hidrolik düşü  $H_{min}$  değerini;

$N_{2opt}$  = Maksimum hidrolik düşüdeki en yüksek verim noktasına isabet eden türbin gücü

$N''_{opt}$  = Minimum hidrolik düşüdeki en yüksek verim noktasına isabet eden türbin gücü

#### 3.4.4.2. Türbin yükündeki değişimler

Şekil 6’da verilen karakteristik eğrilerin türbin yükündeki değişimler yönünden incelemesi yapılırsa; Francis tipi bir hidrolik türbinin yükündeki değişimlerin kavitasyon olayına etkisini incelerken örneğin türbinin ( $H_{nom}$ ) hidrolik düşüsü ile çalıştığını kabul edelim: Şekil 5’deki karakteristik eğrilerin tetkikinden görüleceği üzere türbin ( $N_{nom}$ ) yükü ile çalışırken kavitasyon olayının şiddeti ( $\sigma_{nom}$ ) minimum olmakta; fakat buna karşın aynı hidrolik düşüde daha düşük yüklerle çalışılırken ise kavitasyon olayının şiddeti artmaktadır.

Belirli bir düşük yük sahasında da kavitasyon olayının şiddeti maksimum değerlere ulaştığı bu düşük yük sahasına “kritik yük sahası” veya “maksimum kavitasyon olayı ile çalışma sahası” adı verilmektedir. Kritik yük sahasındaki ( $\sigma_{max}$ ) kavitasyon şiddetine de “kritik kavitasyon şiddeti” veya “kritik kavitasyon katsayısı” adı verilmektedir.

Hidrolik düşünün nominal hidrolik düşüye nazaran artması veya azalması hallerinde de düşük yüklerde çalışma esnasındaki kavitasyon olayının şiddeti maksimum değerlere ulaşmakta

fakat buna karşın mevcut hidrolik düşüde en iyi verime isabet eden optimum yüklerle çalışılması esnasında ise kavitasyon olayının şiddeti o hidrolik düşü için minimum seviyeye inmektedir. Büyük güçlü Francis tipi hidrolik türbinlerde maksimum kavitasyonla çalışma sahası (Kritik yük sahası) optimum yükün takriben % 15 - % 50' ne isabet eden yükler arası saha olup kavitasyon olayı şiddetinin tepe noktası bu sınırlar içindeki yük sahasında meydana gelmektedir.

Francis tipi hidrolik bir türbin % 10-15 optimum yüklerle veya daha düşük yüklerle çalışırken meydana gelen kavitasyon olayının şiddeti % 15-% 50 optimum yükler arasında çalışma esnasında meydana gelen kavitasyon olayının şiddetinden daha düşük olmaktadır. Fakat buna karşın gerek aşırı yüklerle çalışma esnasında ve gerekse % 15 optimum yükten daha düşük yüklerde çalışma esnasındaki kavitasyon olaylarının şiddetleri ise optimum yüklerle çalışma esnasındaki kavitasyon olayının şiddetinden daha fazla olmaktadır.

Özellikle büyük güçlü Francis tipi hidrolik türbinlerin mevcut hidrolik düşüde en iyi verime isabet eden optimum yüklerle çalıştırılmaları gerekmektedir. Bu durum hem kavitasyon olayının ve hem de girdap (vorteks) olayının zararlı etkilerinden korunmak bakımından faydalı olduğu kadar özgül su sarfiyatının artırılmaması bakımından (Şekil.6) yani ekonomik çalışma bakımından da faydalı ve zorunlu olup, Francis tipi hidrolik türbin işletmecilerin en çok dikkat edecekleri hususlardan biridir.

Ancak, hem kavitasyon olayının zararlı tesirlerinden korunmak ve hem de özgül su sarfiyatın artırılmaması ve ekonomik olmayan bir işletme yapılmaması bakımından Francis tipi hidrolik türbinlerin % 15 optimum yükten daha düşük yüklerle de çalıştırılmamaları ve % 75 - % 100 optimum yükler arasında çalıştırılmaları en isabetli bir işletme tarzı olmaktadır.

### **3.5. KAVİTASYON OLAYINI ÖNLEYİCİ ÖNLEMLER VE KAVİTASYON OLAYINDAN KAÇINMA ÇARELERİ**

Bir hidrolik türbinde meydana gelecek olan kavitasyon olayını tamamen değilse bile kısmen önlemek ve kavitasyon olayı tahribatını geciktirmek için çeşitli çarelerin varlığı bilinen bir husustur. Kavitasyon olayını önleyici önlemlerle kavitasyon olayından kaçınma çarelerini kısaca şunlardır [3,13,14].

- i. Türbini derinde ve çıkış suyu seviyesinden daha aşağıda tesis etmek,

- ii. Özgöl hızı küçük seçmek ve türbin devir sayısı ( $n$ ) ile hidrolik düşü ( $H$ ) değerlerini çok büyük tutmamak,
- iii. Şayet çıkış suyu kanalı yanlış inşa edilmişse çıkış suyunun önüne net düşüden ve güçten kaybetmeyecek şekilde set çekmek ve çıkış suyu seviyesini kabartmak,
- iv. Türbinlerde rotor kanatlarının emme borusu tarafı yüzeylerini kavitasyon ve korozyon olayları tahribatlarına karşı dayanıklı olan yüksek Cr-Ni alaşımlı malzemelerle kaplamak,
- v. Türbinleri kavitasyon sahası içinde çalıştırmamak. Bunun için türbinleri mümkün mertebe nominal düşüde nominal yük ile çalıştırmak,
- vi. Türbinleri minimum hidrolik düşülerin altındaki kritik düşülerde çalıştırmamak,
- vii. Bilhassa barajlı hidroelektrik santrallerindeki göl seviyelerinin değişmesi ile hidrolik düşünün değişmesine paralel olarak türbinlerin mevcut hidrolik düşüde en iyi verime isabet eden optimum yük ile çalıştırmak,
- viii. Nominal yük altında çalışmak mecburiyetinde kaldığı zamanlarda da türbin emme borusunu açık hava ile irtibatlandırmak,
- ix. Kavitasyon olayını önlemek için alınan bütün önlemleri ve başvuru alan bütün çarelere rağmen meydana gelen kavitasyon olayı tahribatını onarıırken çok dikkatli olmak ve kavitasyon onarımı yapıyorum diye malzemenin kavitasyon olayı tahribatına karşı dayanıklılığını azaltmamak ve rotor kanatlarını formlarını bozmamak,

Bunun için:

- i. Kaynak dolgu usulü ile yapılan kavitasyon tahribatı onarımlarında özellikle sınır bölgelerindeki (Kaynak elektrodu malzemesi ile ana malzemenin birleştiği bölgelerdeki) malzeme bünyesinin yanmaması ve kaynak ameliyesi esnasında aşırı bölgesel sıcaklık yükselmeleri meydana gelmemesi için gerekli her türlü önlemlerin alınması,
- ii. Veya bugün birçok batı ülkelerinde çok geniş bir tatbikat sahası bulmuş

olan ve kavitasyon, korozyon, erozyon tahribatlarına karşı çok dayanıklı olan ICOSIT cinsi veya diğer bir cins termo-plastik malzemelerle kavitasyon olayı tahribatına maruz olan malzeme yüzeylerini belirli zaman periyotları ile kaplanması gerekmektedir. (Bu konu bölüm 5.2. ve 6.3.'de ayrıntılı şekilde ele alınacaktır.)

### **3.6. KAVİTASYON OLAYININ GÖZETİMİ İÇİN METOTLAR**

Hidrolik türbinlerde meydana gelen kavitasyon olayının ve kavitasyon olayının zararları etkileri ile tahribat miktarlarının gözetim ve tayini için çeşitli metotlar geliştirilmiş bulunmaktadır [14].

#### **3.6.1. Titreşim ve gürültü seslerinin ölçülmesi**

Kavitasyon olayı etkisi altında çalışan bir türbinde gürültü ve titreşimler meydana gelmektedir. Kavitasyon olayının doğurduğu gürültü ve titreşimlerin ölçülmesi için çeşitli firmalar tarafından değişik tiplerde “gürültü ve vibrasyon ölçü ve analiz” cihazları geliştirilmiştir. Çok hassas ve özel ölçü aletlerine ihtiyaç gösteren bir metottur. İleri sanayi ülkelerinde yaygın biçimde kullanılmaktadır.

#### **3.6.2. Stroboskopik araştırma metodu**

Model hidrolik türbinler üzerinde yapılan araştırmalar esnasında kullanılan bir gözetim ve bulgu metodudur. Bilinen en hassas metottur. Stroboskopik araştırma metodu ile model türbin üzerinde hangi çalışma şartlarında model türbinin neresinde, ne miktarda kavitasyon olayı meydana geleceğini tespit etmek imkan dahilinde bulunmaktadır. Sonrada hidrolik ve geometrik benzerlik kanunlarına göre ana türbinde hangi çalışma şartlarında, ne miktarda kavitasyon olayı meydana geleceği hesap edilerek bulunmaktadır. Ancak bilhassa çok büyük güçlü türbinlerde model çalışmaları esnasında olumlu sonuçlara ulaşmak her zaman için mümkün olamamaktadır. Stroboskopik araştırma metodu sadece bazı türbin imalatçısı firmaların hidrolik laboratuvarlarında tatbik edilen bir metottur.

#### **3.6.3. Türbinin çalışma karakteristiklerindeki değişimlerin incelenmesi**

Mühendislik yönünden bu metot büyük önem ifade eder. Kavitasyon olayı tahribatı dolayısıyla hidrolik türbinin debi, güç ve verim karakteristik eğrilerinde düşmeler meydana gelir. Hidrolik türbinin tecrübe ve deneylere dayanılarak tespit edilecek debi, güç ve verim

karakteristik eğrileri çizilecek olursa ilerlemiş kavitasyon olayı tahribatı mevcut olması halinde, bu eğrilerde meydana gelecek düşme veya sapmalar kavitasyon olayının şiddetini karakterize edecektir. Ancak böyle bir inceleme ve karşılaştırma yapabilmek için türbinin ilk karakteristik eğrilerinin mevcut olması gerekmektedir.

#### **3.6.4. Kavitasyon olayı tahribatı sonucu kaybolan malzeme ağırlığının ölçülmesi**

Bu metoda göre; kavitasyon olayı tahribatına uğradığı için süngerleşmiş ve oyulmuş yüzeylere bal mumu veya macun sıvanmakta ve sıvanan bal mumu veya macun' un hacmi tespit edildikten sonra da, kavitasyon olayı tahribatı yüzünden kaybolan malzeme ağırlığı hesap edilmektedir. Çok pratik bir metottur. “Hidrolik Makineler ve Kavitasyon Beynelmilel Araştırma Komisyonu” gibi kuruluşlar, kavitasyon olayı tahribatı nedeni ile hidrolik türbinlerde kaybolabilecek kabul edilebilir malzeme miktarını ampirik formüllerle tespit etmiştir. Hatta bu hususta bazı standartlar da geliştirilmiştir. Örneğin NEMA standartlarına göre Francis tipi bir hidrolik türbinde 8000 fiili işletme saati sonunda kaybolabilecek kabul edilebilir malzeme miktarı aşağıda verilen ampirik formülden hesaplanmaktadır:

$$W = K.D_2^2 \quad (\text{kg veya g}) \quad (3.4)$$

$W$  = 8000 fiili işletme saati sonunda kavitasyon olayı tahribatı nedeni ile kaybolacak kabul edilebilir malzeme ağırlığı (kg veya g)

$K$  = Türbin rotorunun yapıldığı malzeme cinsine göre değişen sabit bir katsayı.

Düşük alaşımlı malzemeler için  $K = 1,0$  yüksek

Cr-Ni alaşımlı malzemeler için  $K = 0,5$  vs. gibi

$D_2$  = Türbin rotoru çıkış çapı (emme borusu tarafındaki çapı )

Kavitasyon olayı tahribatına uğramış olan bir hidrolik türbin rotorunun kanatları üzerine bal mumu veya macun sıvanmak suretiyle tespit edilen kaybolmuş malzeme ağırlığı ile yukarıdaki eşitlikle (3.4) hesaplanarak bulunacak kabul edilebilir ağırlık arasındaki fark kavitasyon olayı tahribatının ilerleyiş seyri hakkında bir fikir vermek için çok önemli bir olanak sağlamaktadır.

### **3.7. KAVİTASYON OLAYI SINIRININ TESPİT EDİLMESİ**

Kaplan tipi ve Francis tipi hidrolik türbinlerdeki kavitasyon olayının sınırının tayini için bugüne kadar pek çok araştırma çalışmaları yapılmıştır. Bu araştırma çalışmalarının öncülüğünü Prof. Thoma yapmış olduğundan elde edilen sonuçlar bu isme izafeten anılmaktadır.

Prof. Thoma'ya göre Francis veya Kaplan tipi hidrolik türbinlerde meydana gelebilecek olay kavitasyon olayının sınır değeri;

$$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} \geq \sigma_{kritik} \quad (3.5)$$

$\sigma_t$  = Kavitasyon olayının sınır değeri; yani, boyutsuz (birimsiz) Thoma katsayısı

$\sigma_{kr}$  = Kavitasyon olayının üst sınır değeri; yani, kritik Thoma katsayısı

$H_a$  = Tesisin bulunduğu yerdeki atmosfer basıncı (mSS)

$H_v$  = Suyun buharlaşma basıncı (mSS)

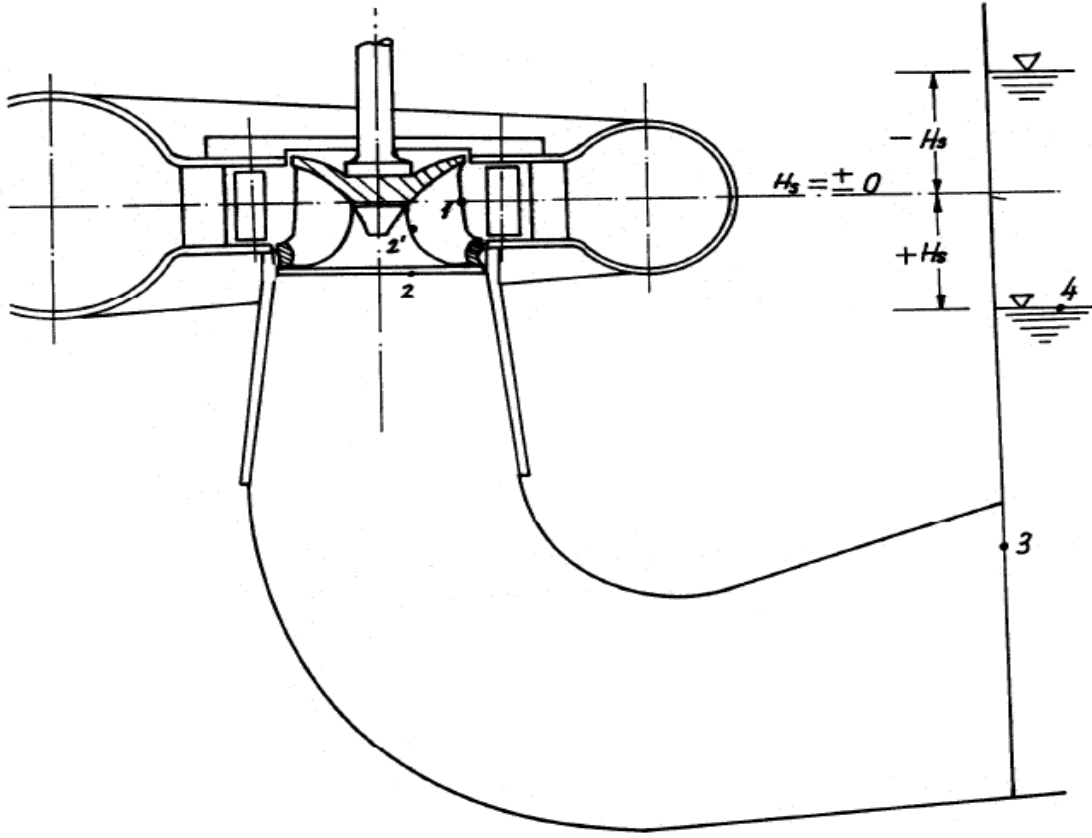
$H_s$  = Türbin emme yüksekliği (Şekil.6)

$H_n$  = Nominal net hidrolik düşü

Yukarıdaki eşitliğin tetkikinde görüleceği üzere ( $\sigma_t$ ) değerinin büyümesi için ya ( $H_s$ ) değerinin küçülmesi veya ( $H_n$ ) değerinin küçülmesi gerekmektedir. Tatbikatta, ( $H_s$ ) değerinin büyümesi türbinin düşük yük ile çalıştırılması veya santral çıkış suyu kanalının yanlış inşa edilmesi ile mümkündür. ( $H_n$ ) değerinin küçülmesi ise baraj gölü seviyesinin çok düşmesi ile mümkündür. ( $H_s$ ) değerinin küçülmesi kavitasyon olayının şiddetinin azalmasına, fakat buna karşın ( $H_n$ ) değerinin azalması ise kavitasyon olayının şiddetinin artmasına neden olur [1,3].

Şekil 7' de basit prensip şeması görülen Francis tipi bir hidrolik türbin tesisatının (2) noktası ile (4) noktası arasında enerji sakınımı prensibine uyarak enerji denklemini tatbik edecek olursak;

$$mgh_2 + m \cdot \frac{V_2^2}{2g} + P_2 \cdot V_2 = mgh_4 + m \cdot \frac{V_4^2}{2g} + P_4 \cdot V_4 \quad (3.6)$$



**Şekil 7.** Francis tipi bir hidrolik türbinin basit şeması.

eşitliğinin her iki tarafının  $(mg)$ ' ye bölerek gerekli sadeleştirmeleri yapacak olursak;

$$h_2 + \frac{V_2^2}{g} + \frac{P_2}{\gamma} = h_4 + \frac{V_4^2}{2g} + \frac{P_4}{\gamma} + \sum_2^4 \zeta \quad (3.7)$$

$$h_2 - h_4 = H_s ; \frac{P_4}{\gamma} = H_a ; V_4 = 0 \quad (3.8)$$

$$\sum_2^4 \zeta = \zeta_{2-3} + \zeta_{3-4} = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{V_3^2}{2g} \quad (3.9)$$

$$\frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\gamma} = \frac{V_3^2}{2g} + \frac{P_3}{\gamma}$$

$$h_2 + \frac{\quad}{2g} + \frac{\quad}{\gamma} = h_3 + \frac{\quad}{2g} + \frac{\quad}{\gamma} + \zeta_{2-3} \quad (3.10)$$

$$\frac{P_3}{\gamma} - \frac{P_2}{\gamma} = \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} - \zeta_{2-3} \quad (3.11)$$

değerlerini yerine koyarsak türbin emme borusu verimi;

$$\eta_{eb} = \frac{\frac{P_3 - P_2}{\gamma}}{\frac{V_2^2 - V_3^2}{2g}} = 1 - \frac{\zeta_{2-3}}{\frac{V_2^2 - V_3^2}{2g}} \quad (3.12)$$

olarak bulunacaktır.

tekrar baş tarafa dönlüğünde;

$$h_2 - h_4 = H_s = \frac{V_4^2 - V_2^2}{2g} + \frac{P_4 - P_2}{\gamma} + \sum_2^4 \zeta$$

$$H_s = \frac{V_2^2}{2g} + H_a - \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_3^2}{2g} + \zeta_{2-3} \quad (3.13)$$

ifadesinden

( $\zeta_{2-3}$ ) kayıplarının değerinin ( $\eta_{eb}$ ) cinsinden yerine koyacak olursak;

$$\frac{P_2}{\gamma} = H_a - H_s - \frac{V_2^2}{2g} + \frac{V_3^2}{2g} + \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} - \eta_{eb} \cdot \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} \quad (3.14)$$

$$\frac{P_2}{\gamma} = H_a - H_s - \eta_{eb} \cdot \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} \quad (3.15)$$

Bu ifadede türbin emme borusunun başlangıcında negatif bir basınç (vakum) olduğu görülmektedir.

Kavitasyon olayında uzaklaşmak için  $V_2^2 - V_3^2 / 2g$  kayıp değerini ve  $(H_s)$  emme yüksekliğini küçültmek gerekmektedir. Ancak,  $(H_s)$  emme yüksekliğinin küçültülebilmesi için türbinin çok derine inşa edilmesi gerekir. Bu ise oldukça masraflı bir iştir.  $(\eta_{eb})$ ' nin küçültülmesi türbin emme borusunu kötüleştireceği için iktisadi değildir.

Suyun, türbin rotoru kanatlarını terk ettiği yer, yani, türbin rotoru kanatlarının çıkış tarafı uçları hidrolik akımın basıncının en düşük olduğu yerdir. En düşük basınçlı olan (2' noktasındaki) bu yerin basıncı (2) noktasındaki  $(P_2)$  basıncında  $(\Delta h)$  kadar daha düşük olsun;

$$\frac{P_{min}}{\gamma} = \frac{P_2 - \Delta h}{\gamma} \quad (3.16)$$

$$\Delta h = k \cdot \frac{W_2^2}{\gamma} \quad (3.17)$$

diyebiliriz ( $k$  = kayıplar katsayısı)

$$\begin{aligned} \frac{P_2}{\gamma} \text{ değerini yerine koyacak olursak;} \\ \frac{P_{min}}{\gamma} = H_a - H_s - \eta_{eb} \cdot \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} - k \cdot \frac{W_2^2}{2g} \end{aligned} \quad (3.18)$$

yazabiliriz.

Kavitasyon olayının meydana gelmesi için  $P_{min} / \gamma > H_v$  olmalıdır. Bu durumda bir hidrolik türbin için sınır şartımız;

$$H_a - H_s - \eta_{eb} \cdot \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} - k \cdot \frac{W_2^2}{2g} > H_v \quad (3.19)$$

$$H_a - H_s - H_v > k \cdot \frac{W_2^2}{2g} + \eta_{eb} \cdot \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g} \quad (3.20)$$

olmalıdır.

$(H_a - H_s - H_v)$  değerine bir hidrolik tesisin “Net pozitif emme yüksekliği-NPSH” adı verilir. Yukarıdaki (3.20) denkleminin her iki tarafını  $H_n$  ile bölecek olursak, ifadeyi boyutsuz bir hale getiririz;

$$\frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} > k. \frac{W_2^2}{2g \cdot H_n} + \eta_{eb} \cdot \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g \cdot H_n} \quad (3.21)$$

denklemin 2. tarafına kritik kavitasyon katsayısı adı verilir. Yani;

$$\sigma_{kr} = k. \frac{W_2^2}{2g \cdot H_n} + \eta_{eb} \cdot \frac{V_2^2 - V_3^2}{2g \cdot H_n}$$

1. tarafına da bir hidrolik tesisin Thoma katsayısı adı verilir. Yani;

$$\frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} = \sigma_{tesis}$$

(3.21) denklemindeki  $k/2gH_n$  değerini  $K$  ile gösterecek ve  $V_2 = V_3$  kabul edecek olursak;

$$(H_a - H_v - H_s) / H_n > K \cdot W_2^2$$

$$K \cdot W_2^2 = \sigma_{kritik} \text{ yani;}$$

$$\sigma_{tesis} \geq \sigma_{kritik}$$

olduğu görülecektir.

$\sigma_t \geq \sigma_{kr}$  kavitasyonsuz çalışabilmek için sınır şartıdır. En önemli konu hidrolik türbinin imalatı öncesinde  $(H_s)$  nin uygun seçilmesi ve işletmesi esnasında da  $(H_s)$  nin büyümemesi ve kavitasyon olayı tehlikesinin artmaması için türbinin düşük yüklerde çalıştırılmaması işidir. Bilindiği gibi bir hidrolik türbin düşük yerlerde çalıştırılacak olursa santral çıkış suyu seviyesi azalacak ve  $(H_s)$  emme yüksekliği büyüyecektir. Böyle çalışma rejimleri esnasında da kavitasyon olayının şiddeti artacaktır.

Bir hidroelektrik santral tesisinin faydalı nominal hidrolik düşüşü  $H_n (m)$  tahrik suyunun buharlaşma basıncı  $H_a = P_{at}/\gamma (m)$  olduğuna göre Prof. Dr. Thoma'ya göre; kavitasyonsuz olarak çalışabilmenin sınır şartı aşağıdaki eşitlikteki gibidir:

$$H_s \leq H_a - H_v - \sigma_{kr} \cdot H_n \quad (3.22)$$

Prof. Dr. Thoma' ya göre bu ifadedeki ( $H_s$ ) emme yüksekliğinin değeri ( $H_a - H_v - \sigma_{kr} \cdot H_n$ ) den küçük olduğu sürece türbinde kavitasyon olayı meydana gelmeyecektir.

## **4. KAVİTASYON OLAYI YÖNÜNDEN BAZI HES'LER İLE İLGİLİ SAYISAL ÖRNEKLER**

### **4.1. KEBAN HES**

Aşağıda verilen tabloda; Keban hidroelektrik santralindeki Francis tipi hidrolik türbinler için

kavitasyon olayı yönünden bazı sayısal değerler ile “hidrolik düşü-özü su sarfıyatı-güç” karakteristik eğrileri verilerek, bu eğriler üzerinden “şiddetli kavitasyon olayı ile çalışma bölgeleri” belirtilecektir. Ayrıca kavitasyon olayı yönünden, bu santralımıza ait Francis tipi türbinlerle ilgili sayısal değerler verilecektir [3,6].

Keban hidroelektrik santralındaki Francis tipi hidrolik türbinlerin, maksimum net hidrolik düşü, nominal net hidrolik düşü, normal minimum net düşü ve kritik minimum net düşüde ve bu hidrolik düşülerde en iyi verimlere isabet eden optimum yüklerle (% 100 yükle) çalışmaları esnasındaki kavitasyon olayını karakterize edecek olan bazı sayısal bilgiler tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3’ de verilen ( $\sigma_t$ ) değerleri, türbinlerden 4 tanesinin aynı anda optimum yükleri ile çalışmaları esnasındaki optimum kavitasyon katsayılarıdır. Türbinlerden bir tanesinin veya bir kaçının devrede olmaması veya optimum yükten daha düşük yüklerle çalışmaları halinde aynı hidrolik düşüdeki kavitasyon katsayısı ( $\sigma_t$ ) nin değerleri düşer ve kavitasyon olayının şiddeti artar. Örneğin baraj gölü seviyesi 825,00 m iken türbin-generatör ünitesinden sadece 2 tanesi çalışsın ve santral çıkış suyu seviyesi 685,00 m olsun. 825,00 m göl kotundaki brüt hidrolik düşü 825,00 – 685,00 = 140,00 m’ dir. Ancak tahrik suyunun cebri boruya girişinden türbini terk edişine kadar sürtünme ve yön değıştirme kayıpları olacaktır. Bu kayıpların mertebesinin 5,00 m su sütunu olduğunu kabul edelim. Net hidrolik düşümüz 140,00 – 5,00 = 135,00 m olacaktır. Bu duruma göre 825,00 m göl kotunda santral çıkış su seviyesi 685,00 m olacak şekilde iki ünite ile çalışılacak olursa bu çalışma rejimine ait kavitasyon kat sayısı;

$$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} ; H_s = 689,50 - 685 = 4,50 \text{ m}$$

$$\sigma_t = 4,50 / 135 = 0,034 \text{ olacaktır.}$$

Yani, böyle bir çalışma rejimi için tesise ait kavitasyon kat sayısının değeri, kritik kavitasyon kat sayısı değeriine yaklaşıacak ve dolayısıyla da kavitasyon olayının şiddeti ile zararlı tesirlerinin etkisi artacaktır.

**Tablo 3.** Keban HES % 100 optimum yükle çalışmaları esnasında bazı

karakteristik değerler.

| Karakteristik değerin adı ve açıklaması | İşareti                                                       | Birimi    | Maksi göl seviyesi                             | Nominal göl seviyesi | Normal min.göl seviyesi | Kritik min. göl seviyesi |
|-----------------------------------------|---------------------------------------------------------------|-----------|------------------------------------------------|----------------------|-------------------------|--------------------------|
| Net hidrolik düşü                       | $H_n$                                                         | $M$       | 154,0                                          | 145,0                | 118,0                   | 85,0                     |
| Türbin debisi                           | $Q$                                                           | $m^3/san$ | 128,46                                         | 135,32               | 145,9                   | 119,2                    |
| Türbin gücü                             | $N$                                                           | $MW$      | 183,1                                          | 183,3                | 158,9                   | 89,9                     |
| Devir sayısı                            | $n$                                                           | $Dev/dak$ | 166,7 $dev/dak = 17,45 \text{ rd/san}$ (sabit) |                      |                         |                          |
| Özgül devir sayısı                      | $n_s = \frac{n}{H_n} \cdot \sqrt{\frac{N}{H_n}}$              |           | 153                                            | 166                  | 198                     | 228                      |
| Tür.rot.çıkış çapı                      | $D_2$                                                         | $M$       | 4,38 (sabit)                                   |                      |                         |                          |
| Çevresel. hız katsayısı                 | $U_{ze} = \frac{\omega \cdot D_2}{2 \cdot \sqrt{2gH_n}}$      |           | 0,695                                          | 0,718                | 0,797                   | 0,938                    |
| %100 yükdeki debi katsayısı             | $\varphi_{ze} = \frac{Q}{\pi \cdot R_2^2 \cdot \sqrt{2gH_n}}$ |           | 0,155                                          | 0,169                | 0,202                   | 0,194                    |
| Sant. çıkış su sev.                     | -                                                             | $M$       | 689,61                                         | 689,65               | 689,71                  | 689,54                   |
| Tür.rot.Salyangoz orta eksen            | $Z$                                                           | $M$       | 689,50 (sabit)                                 |                      |                         |                          |
| Atm.basıncı-suyun buharlaşma basıncı    | $H_a - H_v$                                                   | $M$       | 9,06 m (takriben sabit)                        |                      |                         |                          |
| Kavitasyon katsayısı                    | $\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n}$                      |           | 0,0596                                         | 0,0635               | 0,0786                  | 0,107                    |
| Emme yüksekliği                         | $H_s$                                                         | $M$       | -0,11                                          | -0,15                | -0,21                   | -0,04                    |

#### 4.2. KESİKKÖPRÜ HES

Kesikköprü HES'deki türbinlerin beherinin gücü 39,63 m net hidrolik düşüde 53 000 BG, debisi 122,50 m<sup>3</sup>/san ve devir sayıları 125 dev/dak'dır. Türbin rotoru ve salyangoz orta eksen kotu 745,00 m ve tahrik suyu sıcaklığı 15°C kabul edildiğine göre:

- Türbinlerin özgül devir sayısı ( $n_s$ ),
- Tesisin bulunduğu yerdeki atmosfer basıncını ( $H_a$ ),
- Tahrik suyunun buharlaşma basıncını ( $H_v$ ),
- Türbinlerin Thoma kavitasyon katsayısını ( $\sigma$ ) ve
- Emme yüksekliklerini ( $H_s$ )

Net hidrolik düşü,  $H_n = 39,63$  m, Türbin gücü,  $N_e = 53\ 000$  BG, Türbin debisi  $Q = 122,50$  m<sup>3</sup>/s Devir sayısı,  $n = 125$  dev/dak Salyangoz eksen,  $Z = 745,00$  m olduğundan;

$n_s = 300$  için kavitasyon olayının sınır (kritik) değeri  $\sigma_{kr} = 0,20$  olduğundan  $H_a = 9,50$  mSS

$t = 15^\circ\text{C}$  için  $H_v = 0,17$  mSS olarak alındığında,  $\sigma_t = 0,21$  olur.

Bu durumda  $\sigma_t > \sigma_{kr}$  olmakla beraber,  $\sigma_t$ 'nin değeri kritik  $\sigma_{kr}$  değerine çok yakın olduğu için türbinde kavitasyon olayı vardır.

### 4.3. HİRFANLI HES

#### Nominal net düşüdeki karakteristik değerler;

Nominal net hidrolik düşü,  $H_n = 60$  m

Nominal güç,  $N_e = 44000$  BG

Devir sayısı,  $n = 187,5$  dev/dak

Nominal debi,  $Q = 61,5$  m<sup>3</sup>/s

Özgül devir sayısı,  $n_s = 228$

Türbin rotoru ve salyangoz orta eksen kotu,  $Z = 785,10$  m

Emme yükseklikleri ile kavitasyon katsayıları:

-Bir ünite nom. Yüklü iken.....:  $H_{s1} = 1,65$  m  $\rightarrow \sigma_{t1} = 0,14$

-İki ünite nom. Yüklü iken.....:  $H_{s1} = 0,50$  m  $\rightarrow \sigma_{t2} = 0,13$

-Üç ünite nom. Yüklü iken.....:  $H_{s1} = 0,10$  m  $\rightarrow \sigma_{t3} = 0,156$

Tesisin bulunduğu yerdeki atm basıncı;  $H_a = 9,45$  mSS

Tahrik suyunun 15 °C deki buharlaşma basıncı;  $H_v = 0,17$  mSS

Hirfanlı HES' ne ait çıkış suyu seviyeleri çoğu kez değişebilmektedir. Bu yüzden kaydedilen karakteristik değerler de değişebilmekte ve türbinler kavitasyon olayına maruz kalabilmektedirler. Bunun için tatbikatta Kesikköprü barajına ait göl seviyesini optimum seviyede tutmak için azami gayretin sarfedilmesi gerekmektedir.

### 5. KAVİTASYON TAHRİBATLARININ ONARILMASI VE DİKKAT EDİLECEK HUSUSLAR

Hidrolik türbinlerin kavitasyon olayı tahribatına maruz kalmadan işletilmeleri en çok arzu edilen bir husus olmakla beraber, özellikle Francis tipi hidrolik türbinlerde zamanla mutlaka kavitasyon olayı tahribatı meydana gelecektir [10]. Hidrolik türbinlerde zamanla meydana gelen bu kavitasyon olayı tahribatlarının onarılması için bugün başlıca iki metot kullanılmakta olduğu hususuna yukarıda kısaca değinilmişti. Bu metotlardan bir tanesi, kavitasyon olayı tahribatı ile süngerimsi bir hal almış malzeme yüzeylerinin temizlenerek yüksek Cr-Ni alaşımlı kaynak elektrotları ile doldurulması metodudur. İkincisi ise, kavitasyon olayı tahribatına uğradığı için üzerinde oyukçuklar açılmış ve süngerleşmiş malzeme yüzeylerinin temizlendikten sonra bazı özel suni malzemelerle sıvanarak doldurulması metodudur.

### **5.1. Kaynak Dolgu Usulü ile Tahribatlarının Onarılması**

Alışlagelmiş bir onarım türüdür. Bazı hallerde kavitasyon olayının meydana gelmesi büyük ölçüde tahrik suyunun fiziksel özellikleri ile türbinin konstrüktif özelliklerine bağlı olabilir. Böyle hallerde kavitasyon olayı tahribatının kaynak dolgu usulü ile onarılması zorunlu olur.

Ancak, kavitasyon olayı tahribatının meydana gelmesinde hidrolik akım ortamını teşkil eden tahrik suyunun korozyon yapma etkisi veya değişik cins malzemeler arasında meydana gelebilen elektrokimyasal olaylar büyük rol oynamakta ise bu takdirde de suni malzemelerle kavitasyon tahribatı onarım metodunun tatbik edilmesi gerekmektedir.

Hidrolik türbinlerdeki kavitasyon tahribatlarının kaynak dolgu ile onarılabilmesi için, önce kavitasyon tahribatına maruz kalarak süngerleşmiş olan malzeme yüzeylerinin temizlenmesi gerekir. Temizleme işlemleri esnasında kristalleri ufalanan ve kırılma tehlikesi olan karburandumlu zımpara taşları kullanılmamalıdır.

Kavitasyon tahribatına uğramış yüzeylerin basınçlı hava ile tahrikli taşlama motorları vasıtasıyla taşlanmak suretiyle temizlenmesi için yüksek kesme hızlarına sahip uygun plastik zımpara taşlarının kullanılması gerekir. Kavitasyon tahribatına uğramış olan bölgelerin uygun zımpara taşları ile taşlanması ve süngerleşmiş malzemenin temizlenerek kaynak dolgu yapılacak yüzeyin hazırlanması esnasında girintili çıkıntılı bütün kısımlar düzgün bir çevre ile çevrilecek şekilde taşlanmalıdır. Keza, kaynak dolgu yapılmak üzere taşlanmış olan kısımların her tarafındaki derinlik mümkün mertebe eşit olmalıdır. Bu hususlara dikkat edilmeden yapılacak kaynak dolgu onarımından iyi bir sonuç almak mümkün değildir.



**Resim 3.** Türbin çark kanatları kavitasyon çalışması [15].

Yukarıda kaydedilen prensiplere dikkat edilerek taşlanmış ve kaynak dolgu yapılmaya hazır hale getirilmiş yüzeylerin, önce kenar kısımlarına, kimyasal terkip bakımından ana malzemeye en yakın olan bir kaynak elektrodu ile bir veya iki sıra kaynak dikişi çekilir. Daha sonra da geri kalan kısımlar, bünyelerinde uygun miktarlarda Cr-Ni-Mn veya Cr-Ni-Mo bulunan ve korozyon tahribatı ve kavitasyon olayı tahribatına karşı dayanıklı olan kaynak elektrotları ile kaynak dolgu yapılmak suretiyle doldurulur.



**Resim 4.** Türbin çark kanatları kaynak çalışması.

Kaynak dikişlerinin boyu ve elektrot hareket yönü yanlış seçildiği takdirde kaynak dikişlerinin başlangıç noktaları ile bitim noktaları arasındaki sıcaklık farkı çok yükselir. Bu durum hem malzemenin bünyesel gerilmelerinin artmasına ve malzemenin çatlamasına ve hem de sıcaklığın en çok yükseldiği noktalarda malzeme bünyesinin yanmasına sebep olacaktır. Bu yüzden, kaynak dikişleri hiç ara verilmeden bir elektrot tamamen eritilinceye kadar devam ettirilmemeli ve kaynak dikişlerinin boyları kısa tutulmalıdır. Ayrıca, kaynak elektrotunun hareket yönü kenardan sınır bölgeye doğru değil, bilakis sınır bölgeye çekilen kenar dolgu kaynak kordonundan kenara doğru seçilmelidir.

Kaynak dolgu usulü ile kavitasyon tahribatı onarım yaparken sınır bölgelerin kimyasal yapı bakımından ana malzemeye en yakın özellikte olan bir kaynak elektrotu ile (büyük güçlü Francis tipi türbinlerin rotor malzemelerine genel olarak Böhler POX SPE tipi veya benzeri olan düşük alaşımlı elektrotlar kimyasal yapı bakımından yakınlık göstermektedirler) kenar dolgu kordonu çekilmesinin faydalarını kısaca şu şekilde sıralayabiliriz:



**Resim 5.** Türbin çark kanatları kaynak çalışması.

Düşük alaşımlı kaynak elektrotları veya benzeri olan kaynak elektrotları ile kavitasyon tahribatına uğramış bölgelerin sınırlarına kordon dikişi çekilirken malzeme akışı çok ince damlalı olur ve kaynak malzemesi ile ana malzeme birbirine çok iyi sarar. Dolayısıyla kaynak dikişleri düz, çentiksiz ve boşluksuz olarak yapılabilir. Bu tip kaynak elektrotları ile bütün pozisyonlarda kaynak dikişi çekilebilir. Cr-Ni'li elektrotlarla kaynak dolgu dikişleri yapılırken, sınır bölgelerinde ana malzemeye temas olmayacağı için, ana malzeme yanmaz. Ana malzeme ile kaynak malzemesi arasındaki sınır kısmında, yani geçiş bölgesinde elektrokimyasal olayların önüne geçilmesi imkân dahilinde girer.

#### **5.1.1. Kaynak Dolgu Usulü ile Kavitasyon Tahribatı Onarımı Yapılırken Dikkat Edilmesi Gereken Genel Kurallar**

- i. Eksik birleştirme, yani nüfuziyetsizlik meydana gelmesinden kaçınmak; esas metal ile kaynak metalinin tam olarak birleşmelerini temin için en uygun elektrot cinsini seçmek ve en uygun akım şiddetinde en uygun ark boyu ile kaynak yapmak,

- ii. Malzeme bünyesinin yanmasına mani olmak; bunun için çok yüksek akım şiddeti ile çalışmamak.
- iii. Cüruf kalıntılarına mani olmak; cüruf kalıntısı elektrot örtüsünden ileri gelir. Çok pasolu kaynak dikişlerinde bir pasodan diğerine geçerken, kaynakçı cürufu iyice temizlemezse iki paso arasında cüruf kalır ve bu cüruf kalıntıları kaynak dikişinin mukavemetini azaltır.
- iv. Kaynak dikişinde gözenek teşekkülüne meydan vermemek; bunun için de düşük akım şiddeti ile çalışmamak, uygun elektrot cinsini seçmek, çok uzun ve çok kısa ark boyları ile kaynak yapmamak ve kaynak yerini çok temiz tutmak gerekir.
- v. Kaynak dikişlerinde kılcal çatlak meydana gelmesini önlemek; kılcal çatlaklar genel olarak mevzii bünyesel gerilmelerin çok yüksek olmasından ileri gelir. Kaynak yerinde veya kanatların rotorun alt ve üst gövdelerine birleştiği yerlerde kılcal çatlak meydana gelmemesi için çok soğuk ve hava cereyanı çok olan yerlerde kaynak yapmamak ve kaynak yerleri ile ısınan yerleri su ile veya başka bir vasıta ile ani olarak soğutmaktan kaçınmak.
- vi. Kaynak dikişinin taşmasına mani olmak; elektrik kaynağında taşma genellikle kaynakçının el hareketlerinin yanlış olmasından ve elektrot tutuş açısının uygun seçilmemesinden ileri gelir.
- vii. Kaynak işlemine başlamadan önce kaynak elektrotlarını 100-120 °C arasında ısıtarak elektrot örtü maddesi içindeki rutubeti yok etmek ve kaynak işlemi bitinceye kadar elektrotları sıcak tutmak.
- viii. Kaynak yapılacak olan türbin rotorunu özel elektrik sobaları vasıtasıyla 120-150 °C arasında bir ön ısıtmaya tabi tutmak ve onarım işlemi bitinceye kadar rotor sıcaklığını sabit tutmak [6,8].

#### **5.1.2. Kaviteasyon Tahribatı Onarımında Kullanılacak Kaynak Elektrotlarının Sahip Olması Gereken Genel Özellikler**

Kavitasyon olayı tahribatlarının kaynak dolgu usulü ile onarılmasında genellikle Oerlikon - E106 kaynak elektrotları ile Oerlikon INOX C kaynak elektrotları veya Böhler A7 ve AN kaynak elektrotları kullanılmakta ve kaynak kaidelerine dikkat edildiği takdirde iyi neticeler alınmaktadır. Elektrotların sahip olması gereken özellikler şöyledir:

- i. Çok düşük akım şiddetlerinde ve düşük sıcaklık derecelerinde eriyebilmelidir.
- ii. İyi bir tutuşma kabiliyetine sahip olmalıdır.
- iii. Örtüsü, yüksek ark sıcaklığında buharlaşma dolayısıyla bozulmayan iyi bir etki kabiliyetine sahip olmalıdır.
- iv. Muntazam ve sıçrama yapmayan bir erime özelliğine sahip olmalıdır.
- v. Kaynak işleminden hemen sonra dikiş örtüsünün teşkil ettiği cüruf kolayca kalkabilmelidir.
- vi. Gözeneksiz bir kaynak dikişi temin edilebilme imkânına sahip olmalıdır.
- vii. Bünyesinde korozyon olayı ile kavitasyon olayı tahribatlarına karşı dayanıklı olan **Cr-Ni-Mo** veya **Cr-Ni-Mn** gibi katkı maddelerinden uygun miktarlar bulunmalıdır.
- viii. Çatlamaya karşı emniyetli ve sünek bir kaynak dikişine elverişli olmalıdır [6], [8].

Hidrolik türbinlerde kaynak dolgu ile onarımı yapılmış olan kavitasyon olayı bölgelerinin, kaynak dolgu işleminden sonra yüksek devir sayıları ve yüksek kesme hızlarına sahip olan özel plastik zımpara taşları ile taşlanmak suretiyle perdahlanması ve yüzeylerin pürüzsüz hale getirilmesi gerekir. Kaynak dolgu yapılmış olan bölgelerin taşlanması esnasında orijinal kanat formunun bozulmaması için özel itina gösterilmelidir. Aksi takdirde hidrolik akım ve hidrolik balans bozulabilir ve türbin rotoruna dengelenmemiş radyal hidrolik kuvvetler etkileyebilir. Bu durum türbin/generatör ünitesinin kılavuz yataklarının bozulmasına sebebiyet verebilir.

## 5.2. Suni Malzeme Dolgu veya Sıvama Metodu ile Kavite Tahrifatının Onarılması

Hidrolik türbinlerdeki kavite olayı tahrifatı, pek çok hallerde malzemede meydana gelen korozyon olayının bir neticesi olarak ortaya çıkar. Öyle nehir ve akarsular vardır ki, bünyelerinde içerdikleri bazı kimyasal maddeler hidrolik makinenin malzemesinde aşırı derecede korozyon olayı tahrifatına sebep olabilirler. Bir hidrolik türbinin rotorunun veya ayar kanadının korozyona uğraması neticesinde malzeme yüzeyi pürüzlenir, hidrolik akım bozulur ve kavite olayının meydana gelmesi kolaylaşır. Bu sebeptendir ki, hem tahrik suyunun korozyon yaptırma özelliğinden sakınmak ve hem de kavite tahrifatına uğramış bölgeleri tamir etmek maksadı ile bazı özel suni malzemelerin kullanılması yoluna gidilmektedir.

Hidrolik türbinlerde meydana gelen kavite olayı tahrifatlarının onarımı için Batı Avrupa ülkelerinde geniş çapta kullanılan özel suni malzemeler: genellikle bünyelerinde dolgu maddesi olarak kuvarz unu ve zımpara tozu ihtiva eden polyamine-polyamide sert epoxy reçinelerinden imal edilmektedirler. Kavite olayı tahrifatlarının onarımlarında kullanılan bu özel suni malzemelerin özellikleri, imal eden firmalara göre değişmekle beraber genel olarak 70-95 °C arasındaki sıcaklıklara tahammül edebilmekte ve elastikiyet modülleri ise oldukça yüksektir [8].

Bazı tip sıcak tatbikli suni malzemeler 115 °C ila 120 °C arasında ısıtılmış vaziyette iken kavite tahrifatına uğramış malzeme yüzeylerine sıvanmakta ve muhit sıcaklığı olan 20 °C sıcaklığa kadar soğuduklarında emaye bir yüzey gibi pürüzsüz olarak sertleşmektedirler.

Bu metodun özellikleri şunlardır:

- i. Üç saat sonra sertleştikleri için malzeme üzerine sıvanma özellikleri kaybolur.
- ii. Min. kullanılma sıcaklığı +5 °C ve normal kullanılma sıcaklığı ise 20-25 °C dir.
- iii. Suni malzemenin her bir sıva tabakası kalınlığı 1,5-3 mm olarak yapılabilir.

- iv. Her bir sıva tabakasını tatbik etme süresi arası iki günden fazla olursa veya bir kat tam sertleşmeden diğer kat tatbik edilirse onarımdan başarı alınamaz.
- v. Bu tip suni malzemelere özel çabuk sertleştirme aktif maddesi ilave edildiğinde sıva tabakaları 30 dakika gibi kısa bir süre içinde sertleşebilirler. (Katalizör)
- vi. Bu tip suni malzemeyi meydana getiren elementler 20-25 °C sıcaklıktaki bir su banyosu içindeki bir kapta ısıtılmak suretiyle kullanılabilir hale getirilebilirler.
- vii. 1 mm kalınlığında 1 m<sup>2</sup> lik bir yüzeyin onarımı için 2-3 kg - ICOSIT 100 tipi suni malzeme veya 3 mm kalınlığında 1 m<sup>2</sup> lik bir yüzeyin onarımı için 8-10 kg ICOSIT 300 tipi suni malzeme kafi gelmektedir.
- viii. İş elbisesi veya ellere sürüldüğünde çözücü bir kimyasal madde ile silinebilmekte veya taze iken sabun ile yıkanıp temizlenebilmektedir.
- ix. Sağlığa zararlı hiç bir tesirleri yoktur.
- x. Kaynak elektrotlarına nazaran 5-6 kat ucuzdur.
- xi. Özel aktif maddelerinin katılıp karıştırılması ile +5 °C ila +20 °C sıcaklıklar arasında malzeme üzerine çok kolay bir şekilde sıvanabilirler.
- xii. Suni malzemelerle kavitasyon olayı tahribatının onarımının yapılabilmesi için evvela kavitasyon tahribatına uğradığı için süngerleşmiş olan malzeme yüzeylerinin, ince kum veya sivri uçlu ince metal talaşları püskürtmek suretiyle temizlenmesi gerekmektedir. Suni malzeme sıvanacak olan yüzeylerin pas, yağ, kir ve rutubetten tam olarak temizlenmesi zorunludur. Aksi takdirde suni malzeme sıvama metodu ile kavitasyon tahribatının onarımından başarılı bir netice almak mümkün değildir.

- xiii. Suni malzeme ile onarımı yapılacak olan kavitasyon tahribatına uğramış yüzeylerin ince kum püskürtmek suretiyle temizlenebilmesi için özel kum püskürtme aparatlarına ihtiyaç vardır. Ancak bu aparatlar çok komplike ve pahalı değildirler.
- xiv. İnce kuvarz kumu püskürtülmek suretiyle temizlenen malzeme yüzeylerinin, özel tarifelerine göre hazırlanan suni malzemenin ıspatula ile sıvanması suretiyle dolgusu yapılmakta ve pürüzsüz hale getirilmektedir.
- xv. Onarımı yapılan yüzeylere suni malzeme sıvanması esnasında herhangi bir klima tesisatına gerek duyulmamaktadır.
- xvi. Ancak, onarım yapılan yerlere +20 °C civarında kuru hava basılması onarım işleminin sıhhati bakımından çok faydalı olmaktadır. +20 °C civarındaki bu kuru hava, türbin emme borusu, salyangoz, ayar kanatları veya türbin rotoru kanatları gibi yerlerdeki çalışma mahallerinin önüne basit bir elektrik sobalı vantilatör yerleştirilmek suretiyle kolayca temin edilebilmektedir. Bu sıcak kuru havanın, onarım ameliyesi süresince ve suni malzemenin sertleşmesi sona erinceye kadar basılması çok faydalı olmaktadır.
- xvii. Aynı büyüklükteki bir kavitasyon tahribatı yüzeyinin sunî malzeme ile onarılması işi, alışlagelmiş olan kaynak dolgu usulüne nazaran, zaman bakımından 1/3'ü kadar bir zamanda yapılabilmekte ve fiyat bakımından ise kaynak dolgu ile onarımın 1/5'i ile 1/6' sı kadar bir masrafla gerçekleştirilebilmektedir [8].

Bu sebeptendir ki suni malzeme sıvanmak suretiyle kavitasyon olayı tahribatlarının onarılması metodu, bilhassa Batı Avrupa ülkelerinde alçak ve orta düşülü hidrolik türbinlerde ve türbo-pompalarda çok geniş bir tatbikat sahası bulmuş durumdadır.

## **6. KAYNAK VE SUNİ MALZEME DOLGUSU İLE YAPILAN BAZI HİDROELEKTRİK SANTRAL UYGULAMALARI**

### **6.1. Kaynak Dolgu Usulü ile Kaviteasyon Onarımı, KEBAN HES**

Keban HES, 1974 yılında ilk servise girmiştir. Santral; 4x157,5 + 4x175 olmak üzere toplam 1330 MW kurulu gücündedir. Türkiye'nin 3. büyük hidroelektrik santrali olan Keban Barajı, yıllık yaklaşık olarak 6.600.000.000 kWh enerji üretmektedir. Her sene kaviteasyon olayından dolayı 8 ünitelerden 2'si sırayla revizyona alınmaktadır [16]. Kullanılan bu türbinlerin her birisi 249.000 HP gücünde, 166,67 d/dak hızdadır. Çark çapı 4520 mm olup, debisi 135 m<sup>3</sup>/sn'dir. (maksimum düşüde) Türbinler su soğutmalı klavuz yataklar ile yataklanmış olup, yataklar kendiliğinden yağlamalıdır. Verimi 0,93 olan, türbinin çark ağırlığı (şaft ile birlikte, dönel ağırlık) 100 ton, net düşü yüksekliği ise 145 metredir [17].

Keban HES' de Ünite-2 30.04.2007 / 29.06.2007 tarihleri arasında revizyona alınmıştır. Ünitenin revizyon programı 45 günlük bir süre ile tespit edilmiş ancak belirlenen süre aşılmış ve 61 günde tamamlanmıştır. Türbin çarkında ve ayar kanatlarında meydana gelen

kavitasyonun giderilmesi için yapılacak çalışmalar personel dışı ihaleye verilmiş, ihale sonunda ihaleyi alan firma 2 kişilik bir kaynakçı ekibi ile çalışmaları sürdürmüşlerdir

Keban HES' de türbin çark kanatlarında meydana gelen kavitasyon çalışmalarını yapmak için aşağıdaki işlemler yapılmıştır:

- i. Personelin normal ortamda çalışmalarını sağlamak için ayar kanatları % 100 açıldı.
- ii. Emme borusuna iki kat iskele kuruldu.
- iii. Kaynak makinesi tesisatı, ısıtıcı ve hava hortumu çekildi.
- iv. Hasarlı aşınmış olan çark kanatları işaretlendi [18].



**Resim 6.** Keban HES Revizyon öncesi çark kanatlarını son durumu



**Resim 7.** Keban HES’ de hasarlı çark kanadının işaretlenmesi

- v. Çark kanat aralıklarında meydana gelen hasarlı ve aşınmış kısımlar yok oluncaya kadar karbon elektrotla eritildi. Eritilme sırasında kanat formunun bozulmamasına dikkat edildi.



**Resim 8.** Keban HES çark kaynağı

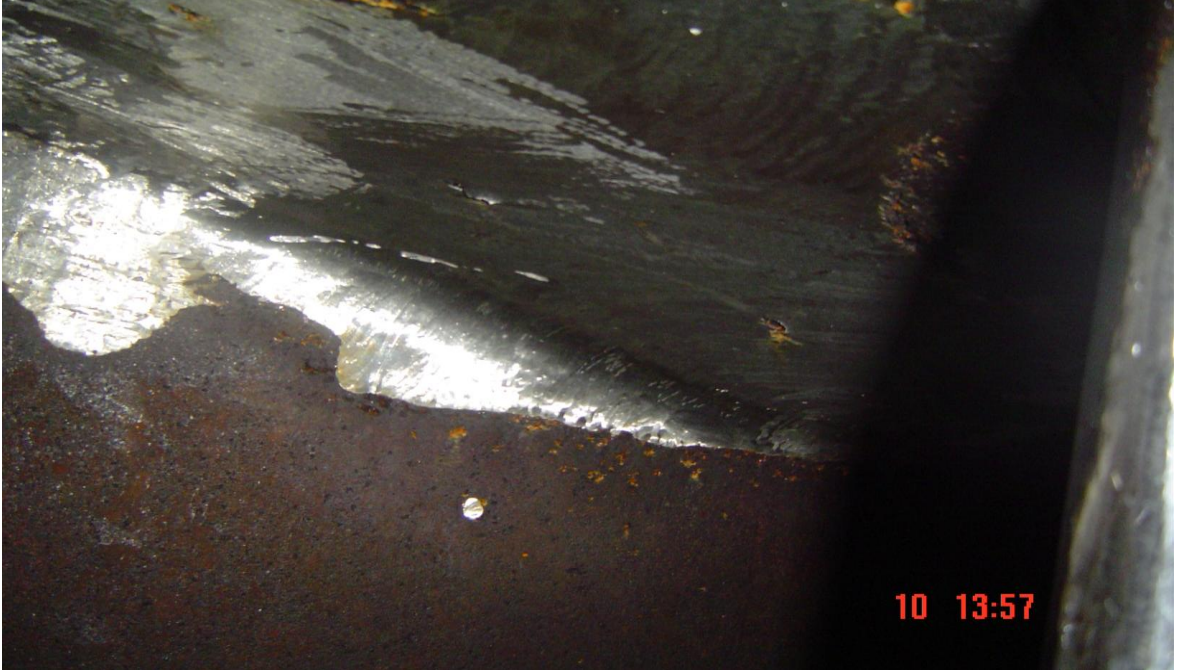


**Resim 9.** Keban HES çark kaynağı



**Resim 10.** Keban HES çark kaynağı

- vi. Eritilen kısımlar elektrotla belli bir miktar dolduruldu. Kaynak cürufları temizlenerek taşlandı. Normal dolgu yapıldıktan sonra dolguya 5-6 mm. kala ileride aynı hasara sebebiyet vermemek için paslanmaz çelik elektrotla doldurulup taşlanarak üst seviye 75 mm' lik zımpara taşı ile tesfiye edilip düzgün ve parlak yüzey elde edildi.



**Resim 11.** Keban HES çark taşlanması.



**Resim 12.** Keban HES çark görüntüsü

- vii. Kaynak işlemi yapılırken türbin çarkında herhangi bir deformasyona sebebiyet vermemek için fazla ısıtmadan yavaş yavaş yapıldı.
- viii. Bu işlemler kavitasyonlu yerlerde aynen tekrarlandı.

Ünite 2'nin kavitasyon ve dolayısıyla revizyon maliyetleri ise şöyle olmuştur:

|                                     |                 |
|-------------------------------------|-----------------|
| Malzeme giderleri toplamı           | : 11.205,25 TL  |
| İşçilik giderleri toplamı           | : 93.046,50 TL  |
| Kavitasyon çalışmaları ihale tutarı | : 10.620 TL     |
| Toplam revizyon maliyeti            | : 114.871,75 TL |

Keban HES' de söz konusu Revizyon fiili olarak 30.04.2007 günü 08.00 da başlamış, 29.06.2007 günü saat 15.50 de bitirilmiştir [18]. Bu süre içerisinde Ünite 1447,50 saat servis harici kalmıştır. Ortalama 160 MW' tan bu sürenin üretilmeyen enerji olarak karşılığı 231653,3 MW' dır. Üretilmeyen enerji 2009 yılı birim fiyatı 14-15 kr/kWh alınırsa; yaklaşık olarak 3 milyon TL olabilmektedir. Bu da ülke enerji arz güvenliği bakımından ciddi bir meblağdır.

## **6.2. Kaynak Dolgu Usulü ile Kavitasyon Onarımı, KARAKAYA HES**

Karakaya HES, Türkiye'de mevcut hidroelektrik santrallerimizden en çok kavitasyon tahribatı görenlerindendir. Santral 6\*300 MW olmak üzere toplam 1800 MW Kurulu gücü ve yıllık

yaklaşık olarak 7.500.000.000 kWh saat enerji üretimi ile Atatürk HES'den sonra en büyük 2. santraldir. 1987 yılında ilk üretime başlamıştır [16]. Türbin çark kanatlarında aşırı kavitasyon olayı görüldüğünden, her sene 2 ünite revizyon çalışmasına alınmaktadır. 6 ünitesi bulunan santralde dolayısıyla her ünite, 3 yıl aralıklarla kavitasyon için revizyona alınabilmektedir.

Karakaya Hidroelektrik Santralinde; 6 adet düşey eksenli Francis tipi türbin kullanılmıştır. 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 145 metredir [4].

Ünite-1 23.09.2008 / 28.11.2008 tarihleri arasında revizyona alınmıştır. Son revizyondan beri 22092,30 saat çalışmış durumdadır. Ünitenin revizyon programı 60 günlük bir süre ile tespit edilmiş, ancak belirlenen süre aşılmış 66 günde tamamlanmıştır. Türbin çarkında ve ayar kanatlarında meydana gelen kavitasyonun giderilmesi için yapılacak çalışmalar santral personeline yapılmıştır [15]. Karakaya HES' de kavitasyon öncesi çark durumu aşağıdaki resimlerde gösterilmektedir:



**Resim 13.** Karakaya HES Revizyon öncesi türbin kepinin görünüşü.





KARAKAYA

HES

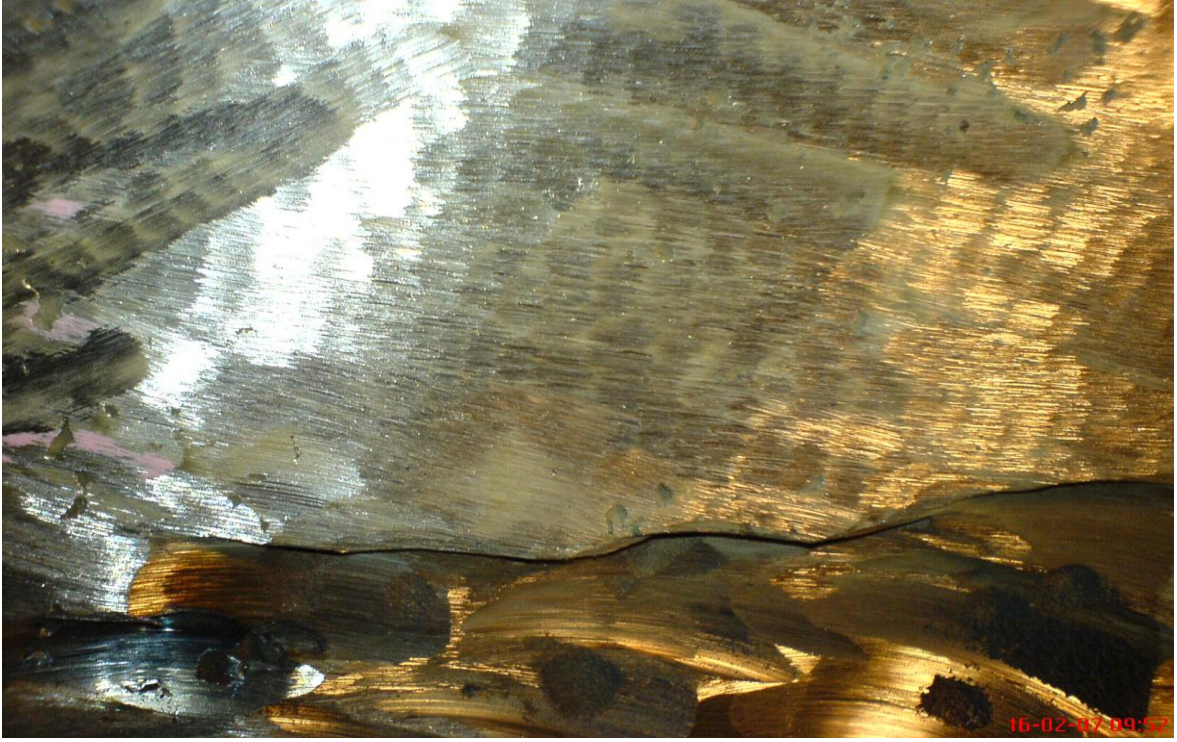
**Resim 14.** Karakaya HES türbin çarkının kavitasyona uğramış hali.

Karakaya HES’ de 14 adet türbin çarkı bulunmaktadır. Kavitasyonun fazla olması nedeniyle 12 kişilik bakım ekibi 2 ay boyunca çark kanatlarında Cr-Ni’li elektrotlarla kaynak ve taş çalışması yapmışlardır.



**Resim 15-16.** Karakaya HES çark kanatlarının kaynak ve taşlaması.

Karakaya HES’de, revizyona alınan ünite yaklaşık 1580 saat servis harici kalmıştır [15]. Her bir ünitenin kurulu gücü 300 MW olduğuna göre; bu sürenin üretilmeyen enerji olarak karşılığı yaklaşık 470.000 MW’ dır. Keban HES’de olduğu gibi, üretilmeyen enerji hesaplamasında, 2009 yılı birim fiyatı 14-15 kr/kWh alınırsa; üretimi yapılmayan enerji, yaklaşık olarak 6,5-7 milyon TL olmaktadır.



**Resim 17.** Karakaya HES türbin kepinin kavitasyon çalışması sonrasındaki şekli.

### **6.3. Suni Malzeme Dolgu veya Sıvama Metodunun Karakaya HES’de Kullanılması**

Türkiye çapındaki hidrolik santrallerde kavitasyon çalışmalarında bu güne kadar kaynak dolgu kullanılmıştır. Ancak, 06.09.2004 / 08.11.2004 tarihleri arasında Karakaya HES Ünite 1’ de yapılan kavitasyon çalışması esnasında, sadece bir çark kanadının kavitasyona en çok maruz kaldığı bölgede, aşınma önleyici ve koruyucu dolgu malzemesi tatbik edilmiştir. 18.01.2006 /21.01.2006 tarihleri arasında ünite 1 kelebek vanasında yapılan çalışmadan dolayı emme borusu açılıp türbin çarklarının kavitasyonu kontrol edilmiştir. Bu kontrollerde; Cr-Ni kaplama yapılan çark kanatlarının ve labirentinin kavitasyona uğradığı, aşınma önleyici kullanılan çark kanadının hiçbir kavitasyona uğramadığı, kullanılan dolgu malzemelerinin yerlerinde madde kayıplarının olmadığı, bunun aksine özel dolgu malzeme kullanılmayan yerlerin tekrar eski kavitasyonlu haline geldiği görülmüştür. Bunun üzerine Ünite 5’e ait olan kavitasyon çalışmalarında da tüm çark için aynı dolgu malzemelerinin kullanımı için Genel Müdürlükten özel izin alınmıştır [15].

Gerekli izinleri müteakiben 13.09.2006 / 02.11.2006 tarihleri arasında revizyona alınan Ünite 5’e ait çark kanatlarında kavitasyona uğramış tüm bölümlere aşınma önleyici dolgu malzemeleri tatbik edilmiş, akabinde türbin çarkı seramik boya ile kaplanmıştır. Çalışmanın

nasıl yapılacağını göstermek üzere Türk Henkel şirketinden iki mühendis gelerek, malzemelerin tatbikinin izahı yapıldıktan sonra, malzemelerin çarka tatbiki yapılmıştır. Yapılan işlemler şunlardır [15]:

- i. Çark yüzeyinde kavitasyon sonucu oluşmuş süngerleşmiş yapıların ortadan kaldırılması, oluşmuş derin oyuk yüzeylerdeki paslanmanın giderilmesi amacıyla çark yüzeyi taşlanmıştır.



**Resim 18.** Bakım personeline çarkın taşlanması **Resim 19.** Üzerinde oyuklar oluşmuş, taşlanmış çark yüzeyi

- ii. Dilimleme; Seramik dolgu ve boya malzemelerini tedarik eden firmanın yetkili mühendislerince, uygulanacak ürünlerin çark yüzeyine tutunabilirliklerinin artırılması amacıyla çark kanatlarının çizikler açılmak suretiyle dilimlenmesi gerektiği ifade edilmiş, bu çerçevede çark kanatlarında derinliği düşük çizikler, baklava dilimleri şeklinde spiral kesme taşı ile oluşturulmuştur.



**Resim 9.** Dilimlenmiş çark kanadı

**Resim 20.** Karakaya HES-dilimlenmiş çark kanadı.

- iii. Son yüzey temizleme; Çark ortam havasının çok nemli olmasından dolayı temizlenen bölümler kısa süre içinde tekrar paslanmakta, bunun da ileriki safhalarda uygulanacak olan aşınma önleyici dolgu malzemelerinin tutunabilirliğini azaltan bir etken olacağı tahmin edilmiştir. Pas tutmasını engellemek üzere yağlama yapılabileceği fikrinden, seramik boyanın yağlı yüzeye tutunamayacağı sebebiyle vazgeçilmiştir. Dolgu malzemelerinin ve seramik boyanın çark kanatlarına nüfusunu engelleyecek diğer kimyasallarında temizlik amaçlı kullanılmasının sakıncalı olması sebebiyle yüzey temizliği için yalnızca “yağsız selülozik tiner” kimyasalının kullanılması fikri uygun görülmüştür. Ortam uygun resimde havalandırılarak gaz maskesi takmış personel tarafından çark, ön tinerleme sonucu büyük paslardan arındırılmaya çalışılmıştır. Daha sonra çark kanatları son tinerlemenin ardından, bezle kurulanıp kuru hava altına tutulduktan sonra, ısıtıcılar çark kanatları üzerine yerleştirilmiştir.



LX



**Resim 21.** Tinerle temizleme aşaması

**Resim 22.** Tinerle temizlenmiş çark

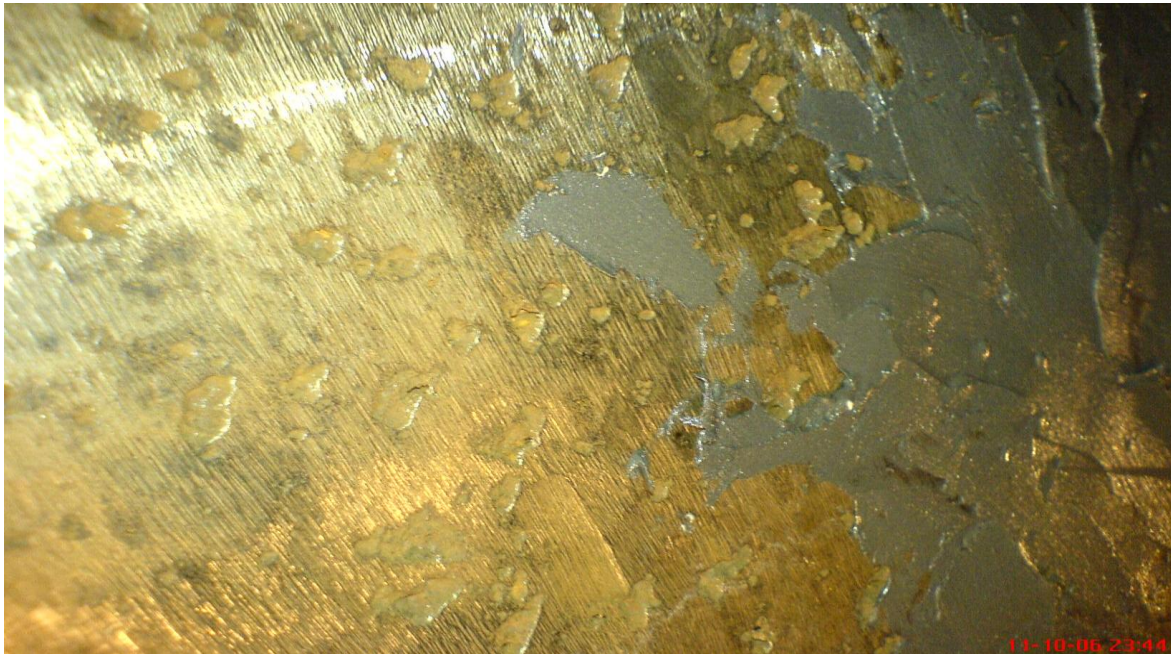
- iv. Çark Yüzeyinin Isıtılması; Aşınma önleyici dolgu malzemelerinin çarka kuvvetle tutunabilmesi ve istenilen biçimde katılaşması için çark yüzeyinin uygun sıcaklığa getirilmesi gereklidir. Çark kanatlarının tinerle temizlik aşamasından sonra tinerin ortamdan uzaklaştığından emin olunması müteakibinde, kanat üzerine ısıtıcılar yerleştirilerek çark kanadının ısıtılması gerçekleştirilmiştir. Firmanın ürünleri için uygun gördüğü uygulama sıcaklığı 20 – 23 °C dir.
- v. Dolgu malzemelerin tatbiki; Kavitasyon çalışmalarında kavite olmuş çarkta çukurları doldurmak üzere üç çeşit dolgu malzemesi kullanılmıştır. Her bir dolgu malzemesi kutusunun içinde reçine ve bu reçineye uygun sertleştirici bulunmaktadır. Reçineler ve sertleştiricileri, ikiye bir oranında, plastik karıştırıcı kullanılarak, temiz bir metal kare plaka üzerinde elle karıştırılarak, homojen uygun bir kıvama gelinceye kadar karıştırılır. Daha sonra karışım el veya “mala” ile kavite olmuş çukur bölgeye yerleştirilir. Uygun rulolar yardımıyla tüm çukura yaydırılan ilk kullanılan dolgu malzemesi olan **Loctite 7219**, tüm kavitasyon boyunca, derin ve geniş çukurları doldurmakta kullanılmıştır.



**Resim 23.** Çukur bölgeye tutunmuş Locktite 7219 dolgu malzemesinin görünüşü.

Büyük tanecikli bir yapıda olan Locktite 7219 kutusu açılıp reçinesi ve sertleştiricisi ile karışım hazırlandıktan sonra yarım saat içinde katılaşmaya gitmektedir. Bu sebeple homojen bir karışım eldesinden sonra vakit geçirilmeden kavitasyon sonucu oluşmuş derin çukurlara doldurulmalıdır. Sonra da karışımın üzerine kalın bir naylon tabakası konulup rulolar yardımıyla bu naylona baskı uygulanmalı ve kanadın formu bu bölgeye verilmelidir. İşlemler boyunca malzemelere ve uygulama noktalarına kesinlikle su ve nem temas etmemelidir.

- vi. “Wear Resistance Putty” Aşınma Önleyici Macunun Tatbiki; Gri renge sahip bu malzeme, Locktite 7219’a göre daha yumuşak, daha homojen ve daha kolay tatbik edilebilen bir yapı arz etmektedir. Aşınma önleyici macun kendisinden daha iri tanecikli olan Locktite 7219’ un girmesinin zor olduğu daha küçük deliklere, yarıklara ve çiziklerin üzerine, süngerleşmiş metalin iç kesimlerine daha kolay girebilmesi bakımından uygulanır. Sürülmesi ve tutunması daha kolaydır. 7219’ la birliktelik oluşturması ve uyuşması kimyasal açıdan mümkündür. Reçinesi ve sertleştiricisi ikiye bir oranında karıştırılan bu malzemenin, katılaşma süresi takribi 20 dakikadır. Bir diğer versiyonu “Superior Metal” ismiyle geçmektedir.



**Resim 24.** Karakaya HES-kavitasyona maruz kalmış, küçük ve derinliği az oyukların gri renkli macun ile doldurulması.

Aşınma önleyici dolgu macununun uygulanması esnasında, malzemeler öngörülenden daha fazla tüketilme yüzünden ve şirketin Türkiye ayağında yeteri miktarda ek malzeme bulunmaması nedeniyle, Henkel Türk şirketinin elinde bulunan “Superior Metal macun” ismindeki diğer ürün kullanılmak durumunda kalınmıştır. Bu ürünün “Wear Resistance Putty” e göre daha pahalı, suya nazaran kimyasal etkilere daha fazla mukavemetli bir malzeme olduğu şirket mühendislerince ifade edilmektedir.

**vii.** Kurulduğunda Seramik Yapıya Bürünen Boya- Locktite 7234’ün Tatbiki; Çark üzerinde kavitasyona uğramış ve oyuk haline gelmiş noktalar dolgu malzemeleri ile doldurulup her noktaya kanat formu verildikten sonra, tüm dolgu noktalarının kurumması beklenilmiş, ardından çark, Gri renkli Locktite 7234 aşınma önleyici boya ile boyanmıştır. Boyama için kaliteli ve telleri dökülmeyen boyacı fırçaları kullanılmıştır. İlk atılan boya 0,25 mm kalınlığında olup, bu ilk tabakanın kurummasının ardından ikinci boya tabakası atılmış ve böylece çark 0,5 mm Locktite 7234 ile boyanmıştır. Son boyanın atılmasından yaklaşık 24 saat sonra çarka su alınabileceği firma mühendisleri tarafından ifade edilmiştir.

**viii. Sonuç:** 2006 yılında Karakaya HES Ünite 5 için, dolgu malzemeleri kullanılarak yapılmış olan kavitasyon çalışmaları sırasında, diğer hidroelektrik santrallerde kullanılan Cr-Ni alaşımlı kaynak dolgu uygulanmasından vazgeçilmiş ve bu sayede kavitasyon çalışmalarının süresi önemli ölçüde azaltılmıştır. Diğer revizyon sürelerinden yaklaşık 28 gün daha önce tamamlanan bu revizyon ile birlikte Karakaya HES yaklaşık olarak 143.067 MW’lık fazla elektrik üretimi gerçekleştirmiştir.

Ayrıca, 2007 yılı ünite 5’te kaynak dolgu malzeme ile yapılan çalışmada 70 gün boyunca toplam 143.765,63 TL işçilik masrafları olmasına karşın 2006 yılında aynı ünite de suni malzeme kullanılarak yapılan dolgu çalışmasında 90.716,83 TL işçilik giderleri olmuştur.

Cr-Ni kaynak dolgu kullanılarak yapılan çalışmalarda, kanat aralarının dar olması sebebiyle, kaynak dolgu çok güç şartlarda yapılabilmekte ve kanatların iç bölgelerine

ulaşılmasında güçlük çekilmektedir. Seramik bazlı dolgu malzemesi uygulamasında ise bu güçlük ortadan kalkmaktadır.

Kaynak yapılan ortamın nemli, soğuk, kaygan ve havasız olmasından dolayı işçi sağlığı önemli derecede olumsuz yönde etkilenmekte ve bu olay iş kazalarına neden olabilmekte ve istenilen çalışma yeteri kadar gerçekleşmemektedir. Eğer kavite olmuş çark dolgu malzemeleri ile doldurulursa; çalışma süreleri kısılacağından ve kaynak sırasında çıkan kimyasal gazlar ortamda olmayacağı için çalışan personelin sağlık durumu daha iyi seviyede olacak ve ortaya çıkan iş verimi daha iyi bir seviyede gerçekleşecektir.

Bu tür çalışmalarla; ülkemizin enerjiye her geçen gün daha çok ihtiyacı olduğu bu günlerde, fazla üretimin önemi ve bununla birlikte arz güvenliği göz ardı edilemez bir gerçektir.

#### **6.4. Kavite Olayının Atatürk HES’de İncelenmesi**

Atatürk HES; 1992 yılında ilk servise girerek Türkiye’nin en büyük kapasiteli santrali olmuştur. Santral, 8\*300 MW olmak üzere toplam 2400 MW Kurulu gücündedir. Yıllık enerji üretimi yaklaşık olarak 8.100.000.000 kWh ‘dir [16].

Atatürk Hidroelektrik Santralinde 8 adet dikey eksenli Francis tipi türbin kullanılmıştır. Kullanılan bu türbinlerin her birisi 300 MW nominal gücünde (306-323,7 MW), 150 d/dak hızındadır. Çark çapı 5150 mm olup, nominal debi 218,3 m<sup>3</sup>/sn (maksimum debi 223.2 m<sup>3</sup>/sn) dir. Türbinler su soğutmalı klavuz yataklar (kaymalı yatak) ile yataklanmış olup, yataklar kendiliğinden yağlamalıdır. Verimi 0,96 olan türbinin çark ağırlığı 81 ton, şaft ağırlığı 100 ton, şaft çapı ise 2810 mm’ dir. Nominal düşü 151,2 m (maksimum 156,7 m) olup göl ve mansap seviyesine göre değişmektedir. Atatürk Hidroelektrik Santralinde iç ihtiyacı karşılamak için yatay eksenli küçük bir Francis tipi türbinde bulunmaktadır. Bu türbinin düşüsü 157 m, debisi 4,04 m<sup>3</sup>/sn, gücü 5750 kW, hızı ise 750 rpm’dir [19].

Atatürk HES türbin çark kanatları malzemesi G-X5CrNi13.4’tir (% 13 Cr-% 4 Ni) ve kavite olayı meydana gelmemektedir. Yüksek CrNi alaşımlı yapılan çark kanatlarında çok az aşınmalar meydana gelmekte olup, genelde kavite görülen bölgeler; çark kanatlarının bağlı olduğu gövdelerde, çark kanatları arasında ve türbin kepinde meydana

gelmektedir. Bu kısımların malzemesi çark kanatlarından farklı olarak GS-20Mn5 gibi aşınmaya dayanaksız malzemelerden yapılmıştır. Bunun nedeni ise yüksek türbin maliyetleridir. 8 ünitesi bulunan barajda şu ana kadar 2 ünitenin kavitasyona uğrayan bölgeleri tamamen CrNi’li saclarla kaplanmıştır. Diğer üniteler de zamanla yüksek CrNi alaşımlı saclarla kaplanacaktır. Kaviteasyon olayının görünmediğı türbin çark kanatlarının görünüşü aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir:





**Resim 25-26.** Atatürk HES Kavitasjonsuz türbin çark kanatları [20].

Aşınmaya uğramış türbin çark kanat aralıkları ve türbin kepinin görünüşü şu şekildedir:



**Resim 27.** Atatürk HES kavitasyona uğramış türbin çark kanat aralıkları.



**Resim 28.** Atatürk HES kavitasyona uğramış türbin çark kanat aralıkları.



**Resim 29.** Atatürk HES kavitasyona uğramış türbin kepi.



**Resim 30.** Atatürk HES kavitasyona uğramış türbin kepi.

## 7. SONUÇ

Uzun yıllardır kavitasyon çalışmaları yapılan santrallerde; kavitasyonun meydana getirdiği zararlar, türbin çarklarındaki aşınmalar ve aşınmaların dereceleri, türbin aksamına verilen hasarlar detaylı bir şekilde resimler ve şekiller kullanılarak bu tez çalışmasında gösterilmiştir.

Görüldüğü gibi, türbinlerin verimleri; başta kavitasyon ile oluşan deformasyon olmak üzere yüke, düşüye, debiye, vorteks ve moment gibi hidrolik akım olaylarına bağlı olarak hızlı bir değişim göstermektedir. Bu nedenlerle türbinlerin verim ve performansları diğer teçhizatlarınkine göre daha dikkatli bir şekilde, sürekli olarak takip edilmelidir. Türbin verimlilik testleri her on yılda bir, kavitasyon sorunu olan ve ağır aşınma tamirata geçiren ünitelerde daha sık periyotlarla, mümkünse onarımlar sonrasında yapılması uygun olacaktır.

30-40 yıllık ömre sahip olan hidrolik türbinlerde zamanla meydana gelen kavitasyon olayı sonucu santral ve türbin verimlerinin % 1-2 oranında düşmesiyle oluşan enerji kaybı ve bunun enerji arz güvenliğine olan etkileri günümüzde çok fazla kendini göstermektedir. Verimdeki her % 1'lik artış ile 8-10 milyon dolarlık net kazanç sağlamak mümkündür.

Tez çalışmasında ayrıntıları ile açıklanan hidroelektrik santrallerimizdeki kavitasyonun çok olduğu türbin çarklarında, şablon kullanılmadan periyodik olarak yüzey kaplama yapılmaktadır. Çark veriminin en önemli parametrelerinden biri olan orijinal çark biçimi zamanla onlarca kez yüzey kaplamasından dolayı verimin daha düşük olduğu başka bir biçime dönüşebilir. Kavitasyonun istenilmediği bir hidroelektrik santral kurmak için; türbin çark kanatlarının Cr-Ni alaşımlı paslanmaz çelikten üretilmesi gerekmektedir. Her santral türbininin en az 10-15 adet çark kanadı olacağı düşünülürse, bu tür bir çark imalatı için, santral yapım aşamasında maliyetlerin aşırı artacağı şüphesizdir. Bu yüzden imalatçılar komple Cr-Ni alaşımlı paslanmaz çelikten yapılmış çark kanadı imalinden uzak durmaktadırlar. Dolayısıyla; kavitasyona uğrayacak olan çark kanatlarının sık sık revizyona alınması, kaynak elektrotlarla veya epoksi reçinelerle aşınan ve delinen yerlerin doldurulması, taşlamaların yapılması ve böylece türbin teçhizatının rehabilitasyona alınması kaçınılmazdır. Türkiye’de hidrolik potansiyelin en fazla olduğu Fırat havzasında; Keban, Karakaya, Atatürk HES gibi çok büyük santrallerin yıllar içinde aşınan ve arızalanan teçhizatlarının rehabilite edilmesi ile mevcut üretim kapasitelerinin artırılması enerji arzımız açısından çok önemlidir. Yapılan çalışmalarda türbin verimliliğindeki kısmi iyileştirmelerle (kavitasyon tamirâtı gibi) ünitelerin optimum yüklerde çalıştırılmaları sağlanmaktadır. Ülkemizdeki büyük kapasiteli hidroelektrik santraller en az 20 yıllık ve daha eski santrallerdir. Yıllar öncesinin teknolojileri ile yapılan bu santrallerde, ilk çark tasarımlarının kötü oluşu (eski teknoloji), defalarca yüzey kaplaması yapılması yüzünden mevcut çark şeklinin bozulmuş olması gibi sebeplerinden dolayı haliyle, türbin çark verimleri günümüzde üretilen türbin çark verim değerlerinin altında olmaktadır.

## KAYNAKLAR

1. **EÜAŞ Hidroelektrik** Santrallerin Verimliliğinin Araştırılmasına Yönelik AR-GE Komisyonu Raporu, Ankara, 2004.
2. **EÜAŞ Genel Müdürlüğü Faaliyet Raporları**, 2007
3. **“Hidroelektrik Santraller ve Hidroelektrik Santral Tesisleri”** BAŞEŞME H., EÜAŞ Ankara, 2003.
4. **Karakaya HES** Oryantasyon Raporu - Sav M. 1999.
5. **Keban ve Karakaya HES** faaliyet raporları.
6. **“Hidrolik türbinlerde** kavitasyon olayı tahribatı ve tamirleri” BAŞEŞME H., Hirfanlı 1970 TEK.
7. **”Cavitation and Bubble Dynamics”** Brennen E.C.
8. **Eigenschaften der Wirbelzöpfe** im Saugrohr von Francis turbinen bei Teillast und Überlast. Von Günter Schlemmer, München 1973.  
Voith Forschung- und Konstruktion, Heft 21, Aufsatz 7, Sonderdruck 2140

9. **Gökçekaya HES** revizyon raporları.
10. “**Versuche an einer Francis-Modelturbine bei 650 m**” Ulith V.P.
11. **Vevey Engineering Horks Limited**, Vevey/Switzerland firmasının hidrolik laboratuvarlarında yapılan bazı araştırma çalışmalarına ait raporlar.
12. **Francisturbinen bei Teillast und Überlast** Von Dr. Ing. Habil. R. Dziallas, Heidenheira VDI - Berichte Nr. 75, 1964.
13. **General Description** of Turbine Efficiency Improvement Project Preliminary Report, Paris, 2004, Marc D., Waldura L.
14. **Keban ve Gökçekaya** Hidroelektrik Santrallerine ait türbin/generatör üniteleri üzerinde yapılmış olan testler ve ölçmeler.
15. **Karakaya HES** Kavitasyon çalışma raporları-revizyon raporları.
16. [www.euas.gov.tr](http://www.euas.gov.tr).
17. **Keban HES** Oryantasyon Raporu.
18. **Keban HES** Kavitasyon çalışma raporları-revizyon raporları.
19. **Atatürk HES** Oryantasyon Raporu.
20. **Atatürk HES** revizyon raporları.

## ÖZGEÇMİŞ

### ADRES

Mürsel Uluç Mah. 120.sok. Yuva Apt. İlker/Dikmen-Ankara

İş: (312) 2126930 Cep: (532) 7758142 Ev: (312) 4913866

E-mail: [mucahitsav@hotmail.com](mailto:mucahitsav@hotmail.com) [mucahitsav@gmail.com](mailto:mucahitsav@gmail.com)

### KİŞİSEL BİLGİLER

Doğum Yeri : Bingöl

Doğum Tarihi : 04.12.1975

Askerlik Durumu : 04/2004-10/2004 arasında kısa dönem er olarak

Medeni Durumu : Evli

### EĞİTİM

1986 – 1993 : Bingöl Anadolu Lisesi

1993 – 1997 : Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği  
Bölümü

2009- : F.Ü. Mühendislik Fakültesi **“Enerji”** bilim dalında yüksek lisans.

## İŞ DENEYİMİ

|           |                                                                                                                                                                                                                                          |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|           | Fırat havzasında; EÜAŞ <b>Karakaya HES</b> İşletme Müdürlüğünde Makine Bakım Mühendisi ve Başmühendisi,                                                                                                                                  |
| 1998–2006 | <b>Gaziantep-Karkamış HES’de</b> devreye alma ve işletme çalışmalarında, Diyarbakır-Dicle havzasında; <b>Kralkızı, Dicle ve Batman HES’ lerde</b> devreye alma ve işletme çalışmalarında, makine bakım mühendisi ve başmühendisi olarak, |
| 2006      | EÜAŞ Genel Müdürlüğü Hidrolik Santraller Dairesi Başkanlığı                                                                                                                                                                              |
| 2006-2007 | ETKB- Hukuk Müşavirliği Çeş Kepez (Uzan Ailesi) özel komisyonunda                                                                                                                                                                        |
| 2007-2009 | Enerji İşleri Genel Müdürlüğünde Görevli Şirketler Şube Müdürü                                                                                                                                                                           |
| 2009-     | EÜAŞ Genel Müdürlüğü Hidrolik Sant. Dai. Bşk.                                                                                                                                                                                            |

## PROJELER, YAYINLAR

Enerji konusu üzerine enerji ve çevre dergilerinde yayınlanmış birçok makalesi bulunmaktadır. Ayrıca, enerji kongrelerinde ve kongrelere ait bildiriler kitabında yayınları ve projeleri sunulmuştur.

## YABANCI DİL

İngilizce, Almanca