T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİDROLİK TÜRBİNLERİN KANAT YÜZEYLERİNDE KAVİTASYON OLAYININ İNCELENMESİ

Mehmet Ergün GÖGEBAKAN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

T.C.
HARRAN ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

HİDROLİK TÜRBİNLERİN KANAT YÜZEYLERİNDE KAVİTASYON OLAYININ İNCELENMESİ

Mehmet Ergün GÖGEBAKAN

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ŞANLIURFA
2019

Dr. Öğr. Üyesi Cuma ÇETİNER danışmanlığında, Mehmet Ergün GÖGEBAKAN'ın hazırladığı **"Hidrolik Türbinlerin Kanat Yüzeylerinde Kavitasyon Olayının İncelenmesi"** konulu bu çalışma 04/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

İmza

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Cuma ÇETİNER .....

Üye : Doç. Dr. Bülent AKTAŞ .....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Nesrin İLGİN BEYAZIT .....

Bu Tezin Makina Mühendisliği Anabilim Dalında Yapıldığını ve Enstitümüz Kurallarına Göre Düzenlendiğini Onaylarım.

Doç. Dr. İsmail HİLALİ
Enstitü Müdürü

Not: Bu tezde kullanılan özgün ve başka kaynaktan yapılan bildirişlerin, çizelge, şekil ve fotoğrafların kaynak gösterilmeden kullanımı 5846 sayılı Fikir ve Sanat Eserleri Kanundaki hükümlere tabidir.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
ŞEKİLLER DİZİNİ iv
ÇİZELGELER DİZİNİ vi
SİMGELER DİZİNİ vii
1. GİRİŞ 1
1.1. Kavitasyon 2
1.2. Kavitasyon Olayının Başlangıcı 6
1.3. Kavitasyonun Sık Yaşandığı Alanlar 7
1.3.1. Hidrolik türbinlerde kavitasyon 8
1.3.1.1. Hidrolik türbinlerde olası kavitasyon bölgeleri 10
1.3.2. Pompalarda kavitasyon 12
1.4. Fiziksel Görünüşlerine Göre Kavitasyon Tipleri 15
1.4.1. Uç ve gövde girdap kavitasyonu 15
1.4.1.1. Kabarcık kavitasyonu 17
1.4.1.2. Tabaka kavitasyonu 18
1.4.1.3. Bulut kavitasyonu 18
1.4.1.4. Kök kavitasyonu 19
1.5. Kavitasyon Nedeniyle Meydana Gelen Olumsuzluklar 20
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR 22
3. MATERYAL ve YÖNTEMLER 25
3.1. Kavitasyon kontrolü 27
3.1.1. Kavitasyon gözlem ve muayenesi 27
3.2. Hidrolik türbinlerde kavitasyon oluşumuna tesir eden faktörler 28
3.3. Kavitasyon bölgesinin onarımı 36
3.3.1. Kaynaklı onarım ile kavitasyon tahribatı onarım metodu 37
3.3.2. Suni malzemelerle kavitasyon tahribatı onarım metodu 39
3.4. Kavitasyon olayı tahtibatı sonucu malzeme ağırlığının ölçülmesi 40
4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA 41
4.1. Keban Hidroelektrik Santrali Türbinlerinde Kavitasyon Olayının İncelenmesi 42
4.2. Kesikköprü Hidroelektrik Santralı Türbinlerinde Kavitasyon Olayının İncelenmesi 47
4.3. Karakaya Hidroelektrik Santralinde Kavitasyon Olayının İncelenmesi 52
4.4. Hill Chart Proğramı ve Vibrasyon Testi Yardımıyla Francis Tipi Bir Hidrolik Türbinin Farklı Düşü Değerlerinde Kavitasyon Oluşumunun İncelenmesi 55
4.4.1. Vibrasyon testi 64
4.5. Türbin Kanadında Kavitasyon Olayının Giderilmesi 69
4.5.1. Kaynak ve test işlemleri 70
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER 76
5.1. Sonuçlar 76
5.2. Öneriler 79
KAYNAKLAR 80
ÖZGEÇMİŞ 82

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

HİDROLİK TÜRBİNLEN KANAT YÜZEYLERİNDE KAVİTASYON OLAYINRİIN İNCELENMESİ

Mehmet Ergün GÖGEBAKAN

Harran Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Cuma ÇETİNER
Yıl:2019, Sayfa: 82

Suyun metal yüzeyler ile temas ettiği noktalarda ani basınç değişimlerinden kaynaklı meydana gelen ve aşınma olarak tanımladığımız kavitasyon olayına daha çok su türbinlerinde, santrifüj pompalarda, gemi pervanelerinde ve keskin dönüşlerin görüldüğü akışkan borularda rastlanmaktadır. İstenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkan bu oluşum, sistemlerde verim kayıplarına neden olur. Uzun süre kavitasyon altında çalışılması durumunda malzeme yüzeyinin çok hızlı bir şekilde yıpranarak süngerimsi bir hal alması ve sonrasında parçalanmasından dolayı zaman zaman tüm sistemin rehabilite edilmesine de neden olmaktadır. Bu çalışmada kavitasyon olayının en fazla gözlendiği alanlardan biri olan hidrolik türbinlerdeki kavitasyon oluşumuna ayrıntılı bir şekilde yer verilmiştir. Ülkemizde daha çok Karakaya, Keban ve Gökçekaya Hidroelektrik Santralleri (HES) olmak üzere birçok santralde kavitasyon problemine karşılaşılmaktadır. Çalışmamızda Keban, Kesikköprü, Karakaya HES ve bir adet dikey Francis tipi türbinin farklı yük ve hidrolik düşü değerleri altında çalıştırılması durumunda veriler alınmıştır. Bu veriler ile özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri karakteristik eğrisinde incelenmiştir. Bu santrallerin hangi şartlar altında çalıştırılması durumunda kavitasyona maruz kaldıkları tespit edilerek meydana gelebilecek verim kayıplarını azaltmak için yapılması gerekenler araştırılmıştır. Ayrıca metal yüzeylerde, sıvı basınç farklılıklarından kaynaklanan kavitasyon oluşumunun nedenleri, meydana geliş biçimleri, kavitasyon çeşitleri ve sıklıkla görüldüğü alanlar inceleyerek kavitasyonu engellemenin veya en aza indirmenin çözüm yolları araştırılmıştır. Özellikle yüksek düşülerdeki HES'lerdeki türbinlerde görülen kavitasyon olayına karşı ne tür çalışmaların yapıldığı ve çalışmalar sırasında hangi yollara başvurulduğu incelenmiş ve yeni çözüm yolları ortaya konmuştur.

ANAHTAR KELİMELER: Kavitasyon, türbin, basınç farkı, metal yüzeyler, hidrolik düşü.

ABSTRACT

MSc Thesis

INVESTIGATION OF THE CAVITATION EVENT ON THE WING SURFACES OF HYDRAULIC TURBINES

Mehmet Ergün GÖGEBAKAN

Harran University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering

Advisor: Assist Prof. Cuma ÇETİNER
Year: 2019, Page: 82

It is possible to encounter the cavitation event which is defined as the abrasion of the water due to sudden pressure changes at the points where the water comes into contact with the metal surfaces in the water turbines, the centrifugal pumps the ship propellers and the fluid pipes where sharp turns are seen. This formation, which is seen as an unwanted situation, causes loss of efficiency in the systems. When working under a long time cavitation, the surface of the material can become very spongy and then disintegrate, which may cause the whole system to be rehabilitated from time to time. In this study, the formation of cavitation in hydraulic turbines, which is one of the most observed areas of cavitation, is given in detail. In our country, cavitation problem is frequently encountered in many power plants such as Karakaya, Keban and Gökçekaya Hydroelectric Power Plants (HEPP). In this study, when Keban, Kesikköprü, Karakaya HEPP and one Francis turbine are operated under different load and hydraulic head values, the data obtained are examined in the specific speed-cavitation coefficient limit value characteristic curve. The conditions under which HEPPs are operated are determined by cavitation and the necessary actions to reduce the yield losses are investigated. In addition, the reasons of formation of cavitations caused by liquid pressure differences on metal surfaces, the types of occurrence, types of cavitation and frequently seen areas were investigated and the ways to prevent or minimize the formation of cavitation were investigated. Specifically, the studies carried out in the turbines found in the hydroelectric power plants with high head have been investigated and the new ways of solution have been examined.

KEY WORDS: Cavitation, turbine, pressure difference, metal surfaces, hydraulic head.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması aşamasında engin bilgi birikimini bizlerle paylaşan danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Cuma ÇETİNER ve Prof.Dr. Refet KARADAĞ'a teknik desteklerinden dolayı Karakaya HES ve Birecik- Nizip HES mühendislerine, öneri ve eleştirilerinden dolayı Makine Mühendisi Sayın Bekir TÜLÜ, Selahattin TOPÇUOĞLU ve Ömer BOZKURT'a, ayrıca bu çalışmanın her aşamasında desteklerini esirgemeyen kıymetli aileme teşekkürü borç bilirim.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1.1. Baloncuk oluşumu ... 3
Şekil 1.2. Baloncuğun yüzeyde meydana getirdiği etki ... 3
Şekil 1.3. Çark kanatlarından kavitasyonlu bölgeler ... 4
Şekil 1.4. Herhangi bir maddenin faz diyagramı ... 4
Şekil 1.5. Sırt kavitasyon ... 5
Şekil 1.6. Yüz kavitasyonu ... 5
Şekil 1.7. Küçük hücum açılı kanat kesiti üzerinde kavitasyon oluşumu ... 6
Şekil 1.8. Hidroelektrik santralinde elektrik üretim aşamasında izlenen yol ... 9
Şekil 1.9. Dikey eksenli Francis türbin ... 10
Şekil 1.10. Hidrolik türbin çarkları ... 10
Şekil 1.11. Kaplan tipi türbinde olası kavitasyon bölgeleri ... 11
Şekil 1.12. Kaplan tipi türbin kanadı üzerinde olası kavitasyon bölgeleri ... 11
Şekil 1.13. Popmaları Yerleşim şekline göre NPSH değerinin hesaplanması ... 13
Şekil 1.14. Pompa çarkındaki basınç dağılımı ... 14
Şekil 1.15. Pompa çarkında meydan gelen kavitasyon sonucu hasar oluşumu ... 15
Şekil 1.16. Uç girdap kavitasyonu ... 16
Şekil 1.17. Göbek girdap kavitasyonu ... 17
Şekil 1.18. Kabarcık kavitasyon ... 17
Şekil 1.19. Tabaka kavitasyonu ... 18
Şekil 1.20. Bulut kavitasyonu ... 19
Şekil 1.21. Kök kavitasyonu ... 19
Şekil 1.22. Bir pervane kanadında kavitasyonun neden olduğu aşınma örneği ... 21
Şekil 3.1. Debimetre ... 25
Şekil 3.2. Çıkış suyu seviye göstergesi ... 26
Şekil 3.3. Takometre –devir sensörü ... 26
Şekil 3.4. Francis türbin çarklarında kavitasyon olayına en çok maruz kalan bölgeler ... 31
Şekil 3.5. Francis tipi türbin basit şeması ... 34
Şekil 3.6. Francis türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri karakteristik eğrisi ... 34
Şekil 4.1. Maksimum göl seviyesinde kavitasyon olayı ... 45
Şekil 4.2. Nominal göl seviyesinde kavitasyon olayı ... 46
Şekil 4.3. Minimum göl seviyesinde kavitasyon olayı ... 46
Şekil 4.4. Kritik göl seviyesinde kavitasyon olayı ... 47
Şekil 4.5.Özgül devir sayısı ve kavitasyon katsayısına göre kavitasyon şiddetinin incelenmesi ... 49
Şekil 4.6. 39.63 m net hidrolik düşü altında çalışan sistemin kavitasyon bölgesindeki yeri ... 51
Şekil 4.7. Karakaya HES'e ait uydu görüntüsü ... 54
Şekil 4.8. Karakaya HES'te kavitasyonu önlemek için ihtiyaç duyulan setin görünümü ... 55
Şekil 4.9. Emme yüksekliği:7.35 m(Net düşü: 41.37 m) Francis Tipi türbin verimlilik değeri ... 56
Şekil 4.10. Emme yüksekliği: 5.35 m (Net düşü: 43.42 m) Francis Tipi türbin verimlilik değeri ... 57
Şekil 4.11. Emme yüksekliği: 3.35 m (Net düşü: 45.45m) Francis Tipi türbin verimlilik değeri ... 58
Şekil 4.12. Emme yüksekliği: 1.35 m (Net düşü: 47.48 m) Francis Tipi türbin verimlilik değeri ... 59
Şekil 4.13. 41.37 m net hidrolik düşüde çalışan Francis Tipi türbinin kavitasyon bölgesindeki yeri ... 60
Şekil 4.14. 47.48 m net hidrolik düşüde çalışan Francis Tipi türbinin kavitasyon bölgesindeki yeri ... 63
Şekil 4.15. Vibrasyon ölçümünde kullanılan ekipmanlar ... 65
Şekil 4.16. Vibrasyon ölçümünde akış şeması ... 66
Şekil 4.17. Generatör üst hol yönü vibrasyon grafiği ... 68
Şekil 4.18 .Generatör üst su yönü vibrasyon grafiği ... 68
Şekil 4.19. Emme yüksekliği:7.35 m(Net düşü:40.44 m) Francis Tipi türbin verimlilik değeri ... 69
Şekil 4.20. Francis tipi türbin çark kanatlarında sıklıkla karşılaşılan kavitasyon bölgeleri ... 70
Şekil 4.21. Çark kanadındaki kavitasyonlu bölgeler ... 71
Şekil 4.22. Penetran testi yapılan çark kanadındaki görünüm ... 72

Şekil 4.23. Çark kanadına uygulana kaynak işlemi 74
Şekil 4.24. Kaynak işlemi sonrası kanat yüzeyinin taşlanması 75
Şekil 4.25. Çark kanadının taşlama sonrası görünümü 75

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa No

Çizelge 3.1. Suyun sıcaklık (°C) –Buhar basıncı (mss) ilişkisi 29
Çizelge 3.2. Francis tipi hidrolik türbin özgül devir sayılarına karşılık gelen Thoma kavitasyon katsayıları sınır değerleri tablosu 32
Çizelge 4.1. Keban HES Francis tipi türbinlerin %100 optimum yükle çalışmaları durumunda bazı karakteristik değerler 43
Çizelge 4.2. Kesikköprü HES karakteristik değerleri 48
Çizelge 4.3. 39.63 m net net hidrolik düşü altında 1 ünite çalışırken ölçülen değerler 50
Çizelge 4.4. Kesikköprü HES Francis türbinleri düşü-yük-kavitasyon limitleri (Başeşme, 2003). 52
Çizelge 4.5. Karakaya HES karakteristik değerleri 53
Çizelge 4.6. Çıkış Su Seviyesi Değişimine Göre Türbin Verimi 63
Çizelge 4.7.Makine kalite değerlendirme tablosu 67
Çizelge 4.8. Generatör üst yatak vibrasyon ölçüm değerleri 67
Çizelge 4.9. Her bir paso işlemi için ölçülen değerler 73

SİMGELER DİZİNİ

ρ	Yoğunluk (kg/m^3)
h	Yükseklik (m)
kPa	Kilopascal
MW	Megawatt
σ_t	Kavitasyon olayının sınır değeri, boyutsuz (birimsiz) Thoma katsayısı
σ_{kr}	Kavitasyon olayının üst sınır değeri, kritik Thoma katsayısı
H_a	Tesisin bulunduğu yerdeki atmosfer basıncı (mss)
H_v	Suyun buharlaşma basıncı (mss)
H_s	Türbin emme yüksekliği (m)
H_n	Nominal net hidrolik düşü (m)
C_p	Boyutsuz basınç katsayısı
Q	Debi (m^3/sn)
N	Güç (BG)
D_2	Türbin rotorunun çıkış çapı (m)
P	Basınç (mss)
P_{atm}	Atmosfer basıncı (atm)
P_m	Mutlak basınç (atm)
T	Sıcaklık (ºC)
Z	Yükseklik farkı (m)
n	Yüksüz türbin devri (dev/dk)
n_s	Özgül hız (dev/dk)
v	Ortalama hız (m/sn)
γ	Suyun yoğunluğu (kg/m^3)
g	Yerçekimi ivmesi (m/sn^2)
η	Verim
R	Çap (mm)
k	Kayıplar katsayısı
K	Malzeme cinsine göre sabit katsayı
W	Malzemenin ağırlığı (kg)
w	Türbin rotorunun açısal hızı
U_2	Çevresel hız katsayısı
ΔP_e	Emiş hattı direnç kayıpları (m)
h_e	Emiş derinliği (m)
GWH	Gigawatt saat

1. GİRİŞ

Kavitasyonun tarihçesine bakıldığında ilk izlerinin 18.yüzyıla kadar uzandığı görülebilmektedir. Bu alanda ilk çalışmaları yapan İsviçreli bilim adamı Euler, 1754 yılında yayımladığı bir makalede o dönemki su çarklarında meydana gelen aşınmalara dikkat çekerek ortaya çıkan performans kayıplarına neden olan kavitasyon kavramını dile getirmiştir. Kavitasyon olayı ile ilgili ilk çalışmalar Toricelli, Euler ve Newton tarafından tanımlanmıştır (Carlton, 2007).

Kavitasyon, mühendisliğin birçok dalında istenmeyen bir oluşum olup metal yüzeyler üzerindeki akışkanlardan kaynaklanan basınç ve hız değişim parametrelerine bağlı olarak meydana gelen her makine veya sistemde karşı karşıya kalınan bir metal aşınması olayıdır.

Gemi pervaneleri, pompalar ve daha çok enerji üretiminde önemli bir paya sahip olan devasa boyutlardaki hidrolik türbin makinelerinde görülen kavitasyon, performans kayıplarına bağlı olarak enerji maliyetlerinin yükselmesine sebep olur.

Hidrolik sistemlerde karşımıza çıkan kavitasyon, makinelerin verimliliğini önemli ölçüde düşürdüğü gibi kullanım ömürlerini de azaltır. Bu sebeplerle kavitasyon olayının önüne geçmek veya minimum düzeyde tutulabilmek için makinelerin çalışacağı alanlar göz önüne alınarak tasarım yapılmalıdır, ayrıca bu olayın yaşanabileceği bölgelerde aşınmaya ve ani basınç değişimlerine karşı dayanıklı malzeme seçilmesine ve yine uygun yüzey kalitesinin belirlenmesi gibi koşulları göz önüne alıp üretimi yapılan makinelerin optimum çalışma değerlerinde çalıştırılmasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Bu parametrelerin herhangi birini görmezden gelinmesi durumunda sıvı ile temas halindeki yüzeylerde kavitasyon olayı kaçınılmaz olup geri dönüşümü mümkün olmayan sonuçlarla karşılaşmamıza neden olmaktadır.

Bu çalışmamızda ülkemizde bulunan hidroelektrik santrallerinde yaşanan kavitasyon olaylarının meydana geliş nedenleri araştırılarak kavitasyon oluşumunu ve kavitasyondan kaynaklı ortaya çıkan hasarları minimum düzeye indirme amaçlanmıştır.

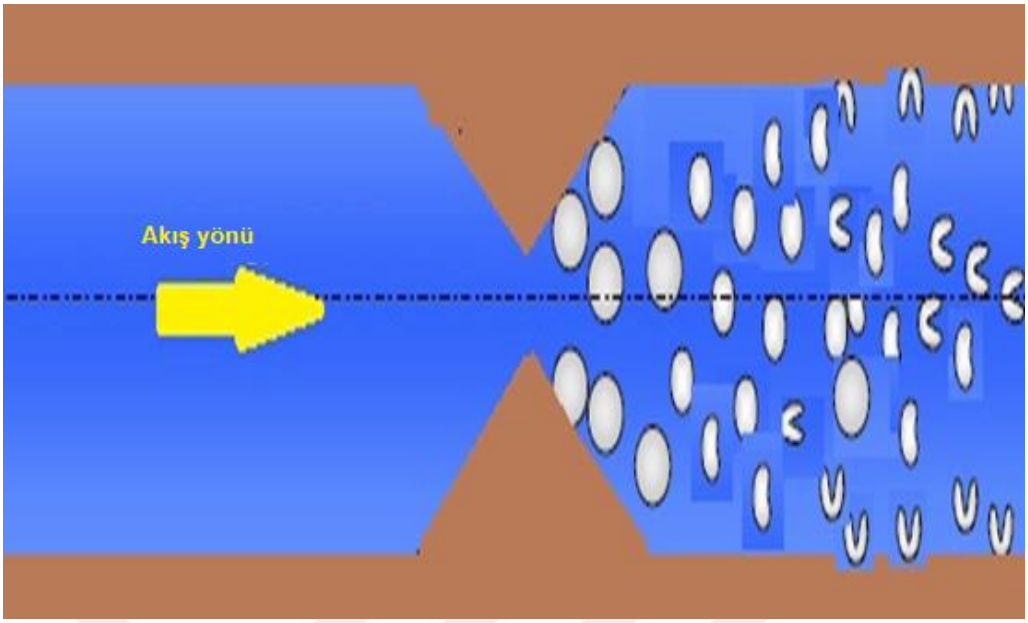
1.1. Kavitasyon

Kavitasyon, metal yüzeyler içerisinde ki sıvının hız-basınç ilişkisine bağlı olarak ani fiziksel faz değişimi sonucu meydana gelen kabarcıkların, metal yüzeylerde oluşturduğu etkiye denir.

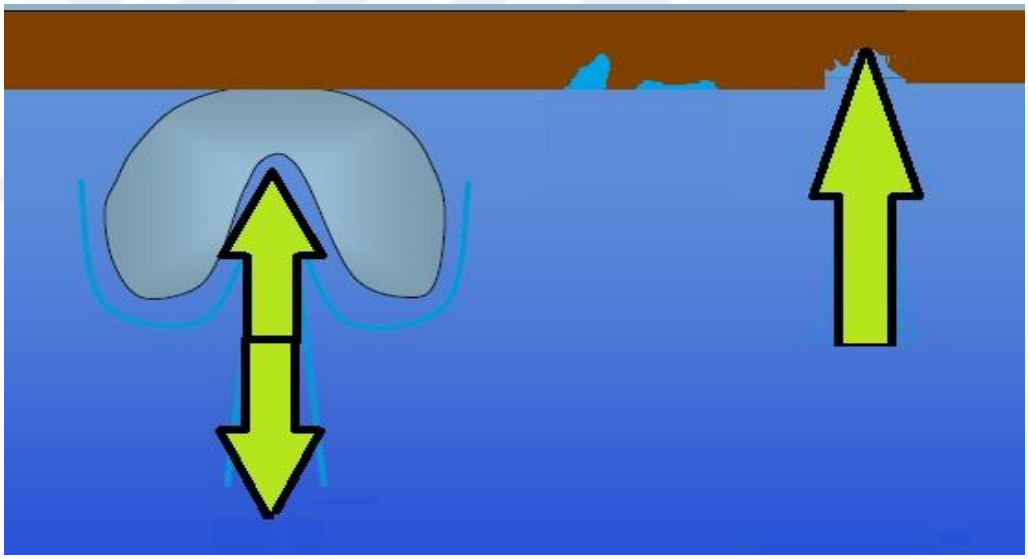
Bernoulli prensibine göre bir düzenek içerisindeki kesit daralması veya başka bir nedenden dolayı metal yüzey üzerinden geçen akışkanın hızının artması akışkan basıncının düşmesine neden olmaktadır. Buna bağlı olarak buharlaşma sıcaklığının düşmesi sonucu ortaya çıkarmaktadır. Buharlaşma sıcaklığının azalması ile sistemde çok daha düşük sıcaklıklarda soğuk kaynama olayı dediğimiz durum meydana gelmektedir. Bu sebeple içerisi su buharı ve hava dolu olan kavitasyon kabarcıkları oluşmaktadır. Soğuk kaynama ile oluşumu hızlanan baloncuklar yüzeylerde temas ettiği noktalarda çok küçük bir alanda kısa zaman dilimi içerisinde aniden patlayarak mikrometrik büyüklükte metal parçacıklarının kopmasına neden olmaktadır. Bu küçük aşınmaların aynı noktalarda üst üste birikmesi sonucunda yüzeylerde derin çukurcuklar meydana gelmektedir.

Metal yüzeydeki kavitasyon hasarı, su ile temas halindeki yüzey pürüzlülüğüne, çalışma saatine, malzemenin tasarımına ve malzeme yapısına bağlı olarak değişiklik gösterir (Jahanni, 2011).

Bu küçük aşınmaların aynı noktalarda üst üste birikmesi sonucunda ise Şekil 1.1. ve Şekil 1.2‘de görüldüğü gibi yüzeylerde derin çukurcuklar meydana gelmektedir. Şekil 1.3.’te ise türbin çark kanadında su kabarcıklarının oluşturduğu aşınmış kavitasyon yüzeyi örneği gösterilmiştir.



Şekil 1.1. Baloncuk oluşumu

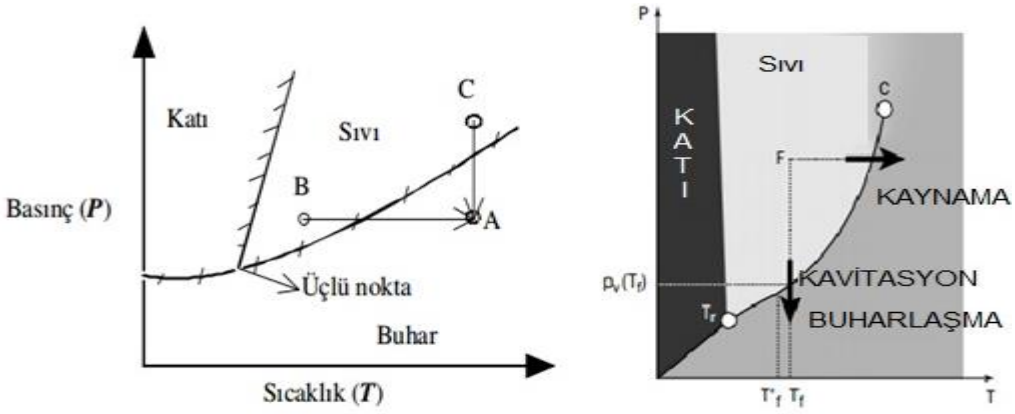


Şekil 1.2. Baloncuğun yüzeyde meydana getirdiği etki



Şekil 1.3. Çark kanatlarından kavitasyonlu bölgeler

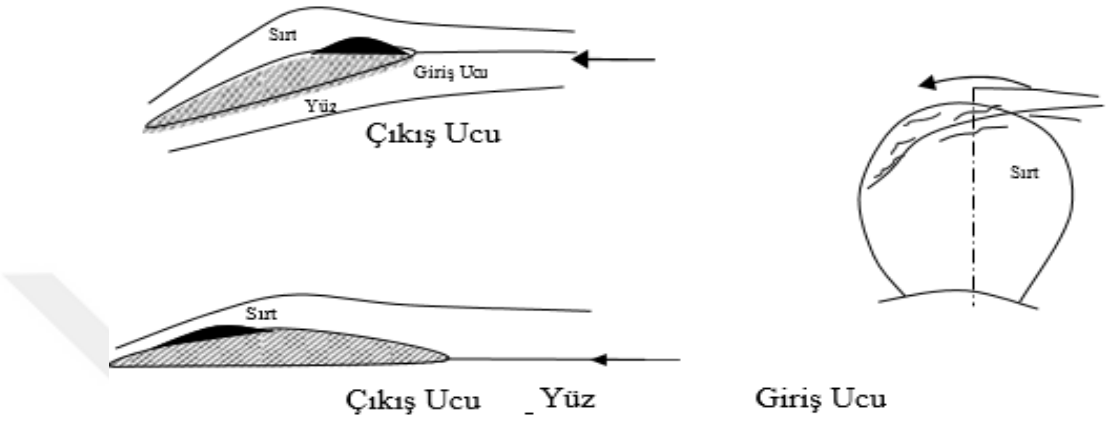
Aşağıda Şekil 1.4.'de gösterilen faz diyagramına göre B ve C noktasında sıvı halde bulunan maddenin sıcaklığının artırılması veya basıncın azaltılması ile buhar fazına geçmesi sağlanabilir. Burada sıcaklığın artırılması durumunda B noktasından A noktasına gelmesiyle kaynama gerçekleşir, basıncın azaltılması durumunda ise C noktasından A noktasına gelmesiyle kavitasyon olayı meydana gelir.



Şekil 1.4. Herhangi bir maddenin faz diyagramı

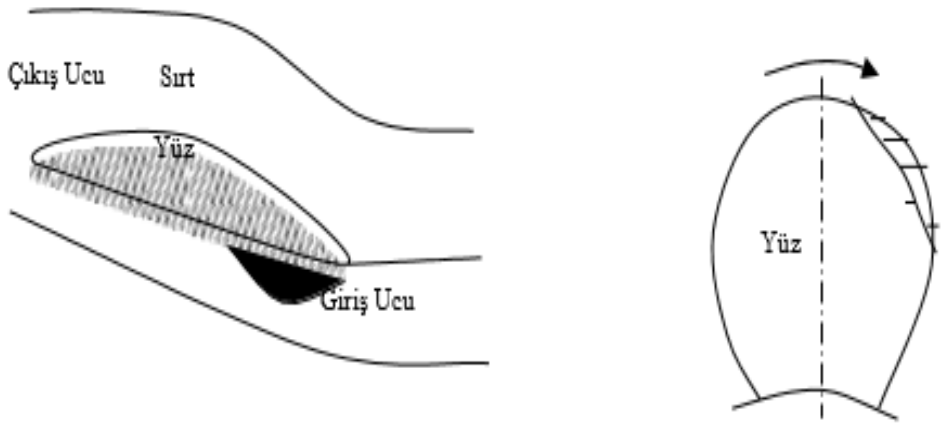
Kavitasyon kanat yüzeyinde meydana geliş biçimine göre, sırt ve yüz kavitasyonu olmak üzere ikiye ayrılır.

Sırt kavitasyonu: Gemi pervanelerdeki kanat kesitlerinin kanat uç civarındaki profilin sıfıra yakın hücum açılarında çalıştırılması halinde, kesitin çıkış ucu yakınlarında aşınma meydana getiren bir kavitasyon türüdür. Bu kavitasyon meydana geliş biçimi Şekil 1.5.'te verildiği gibidir (Ekinci ve ark., 2005).



Şekil 1.5. Sırt kavitasyon

Yüz kavitasyonu: Gemi pervane kanat kesitlerinin negatif hücum açılarında çalıştırılması halinde bu kesitlerin giriş ucu civarında meydana gelen bir kavitasyon türüdür. Bu kavitasyon meydana geliş biçimi Şekil 1.6.'da verildiği gibidir (Ekinci ve ark., 2005).

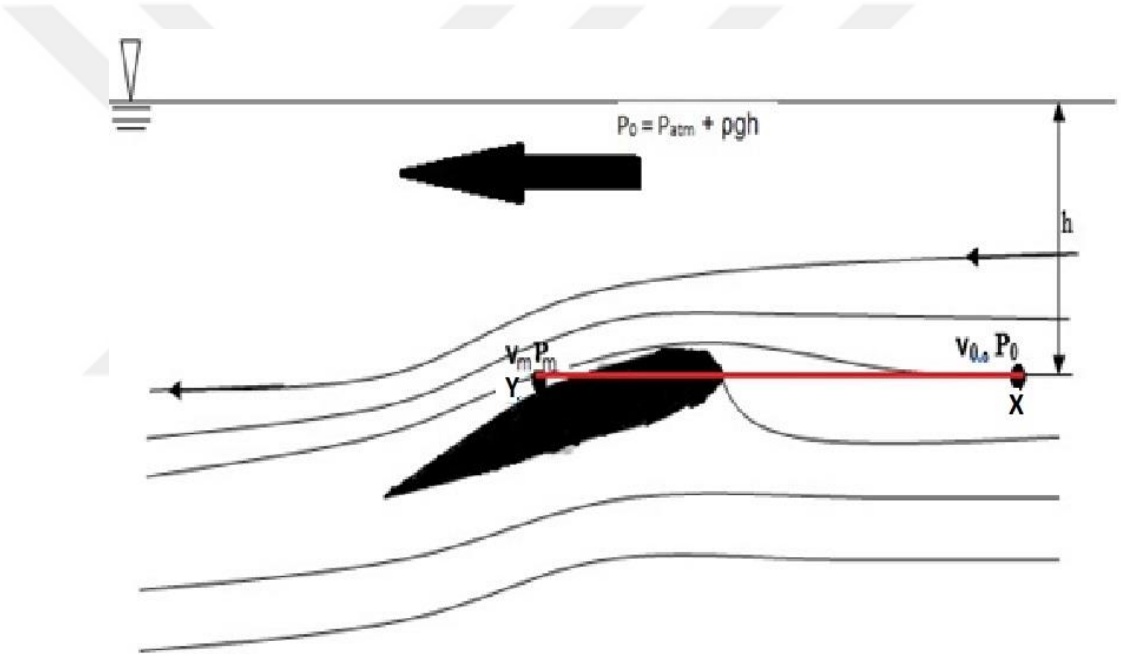


Şekil 1.6. Yüz kavitasyonu

1.2. Kavitasyon Olayının Başlangıcı

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

Şekil 1.7.'de gösterildiği gibi, bir pervane kanadının yüzeyinde bulunan Y noktasında kavitasyon olayının yaşanıp yaşanmayacağını bu noktadaki basınç ile akışkanın o andaki buharlaşma basınç değeri arasında ilişki yardımı ile belirlenebilir.



Şekil 1.7. Küçük hücum açılı kanat kesiti üzerinde kavitasyon oluşumu

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

X ve Y noktaları arasındaki Bernoulli denkleminin yazılması ile Denklem (1.1)'de elde edilir.

$$P_m + \frac{1}{2}\rho V_m^2 = P_0 + \frac{1}{2}\rho V_0^2 \quad (1.1)$$

Eşitliğe göre hızlar ve basınçlar bir tarafta toplanıp, iki tarafı da akışkan dinamik basıncına $(^1/_2\ \rho V_0^2)$ bölünmesi ile Denklem (1.2)'de verilen boyutsuz basınç katsayısı C_p yi elde ederiz.

$$C_p = \frac{P_m - P_0}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} = 1 - \frac{V_m^2}{V_0^2} \quad (1.2)$$

Yukarıda açıklandığı gibi, Y noktasında bir kavitasyon olayı ile karşılaşılmaması için, bu noktadaki basınç değerinin suyun buharlaşma basınç değerinden (P_v) büyük olması koşulunu sağlamalıdır. $P_m > P_V$1.2 eşitsizliğini önce (1) ile çarpıp ve her iki tarafa da (P_0) eklenirse ve sonra da her iki taraf akışkanın dinamik basıncı $(^1/_2\ \rho V_0^2)$ ile bölünürse Denklem (1.3) elde edilir.

$$-C_p = \frac{P_0 - P_m}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} < \frac{P_0 - P_v}{\frac{1}{2}\rho V_0^2} = \sigma \quad (1.3)$$

İfadesi elde edilir. Burada, sağ taraftaki ifadeye kavitasyon sayısı (σ) denilir. Dolayısıyla Y noktasında kavitasyonun olmaması için $-C_p < \sigma$ şartının sağlanması gerekir.

1.3. Kavitasyonun Sık Yaşandığı Alanlar

Sıvı içerisinde hareket halinde bulunan mekanik parçaların tamamı, akışların düzensiz bir yapıda olmasından kaynaklı az miktarda olsa kavitasyona maruz kalır. Bunun sonucunda makinelerde vibrasyon ve bir miktar verim kayıpları oluşturur.

Bu yüzden tüm kriterleri bir araya getirerek optimum çalışma aralığı elde etmek amacıyla kavitasyon oluşumunu önlemek için birçok çalışma yapılmıştır. Büyük çaplı çok pahalı çözümler üretilmiş ama hiçbir zaman kavitasyon olumunu tamamen ortadan kaldırmak söz konusu olmamıştır. Bu yüzden kavitasyonu

tamamen önlemek yerine çok daha akılcı çözümler üreterek gerektiğinde sistemin bir miktar kavitasyon sınırları içerisinde çalışmasına müsaade etmek dahi iyi bir seçenek olabilmektedir (Başeşme, 2003).

Kavitasyon olayının en sık yaşandığı ve en büyük zararları verdiği alanlar şüphesiz hidrolik türbinler, pompalar ve gemi pervaneleridir.

1.3.1. Hidrolik türbinlerde kavitasyon

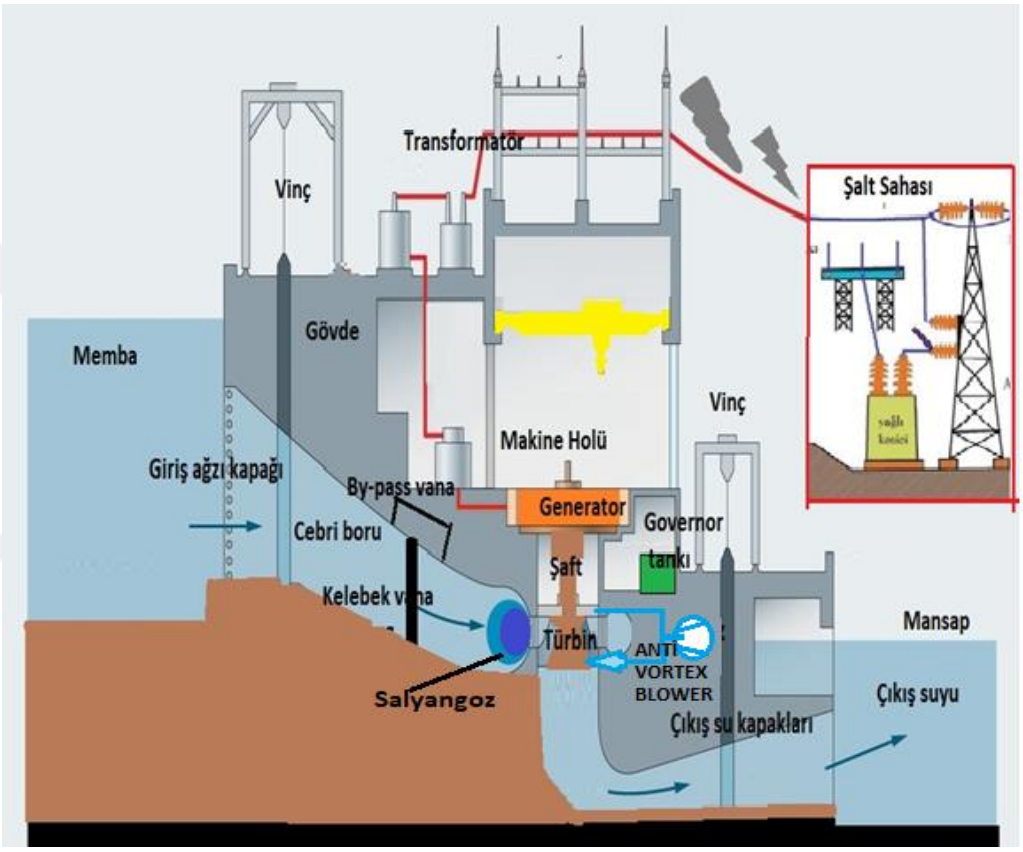
Kavitasyon olayının en bariz gözlendiği ve bulunduğu sisteme en büyük kayıpların yaşanmasına neden olduğu alan şüphesiz hidrolik türbinlerdir. Hidrolik türbinlerin tasarımına bağlı olarak; Türbin çapı, sabit ve ayar kanatlarının form yapısı, kanatların gelen su miktarına göre açıklığı, debi, düşü ve türbinlerin çalışma devri kavitasyon olayını etkilemektedir. Hidrolik türbinlerde kavitasyon olayı daha çok ani basınç değişimlerinin yaşandığı çark ve ayar kanatlarının birleşim noktaları ve yüzey kısımlarında meydana gelir (Avellan, 2004).

Özellikle kavitasyon sonucu çark yüzeylerinde oluşan derin çukurlar önlem alınmaması durumunda önce parça kopmalarına daha sonra ise vibrasyon ve aşırı gürültüye neden olur. Zamanla kullanılamaz bir hal alan çarklar türbinde aşırı bir verim kaybının yaşanmasına daha ileriki aşamada ise türbinin kullanılamaz bir hal almasına neden olur, bir süre sonra da türbin çarklarının yenisi ile değiştirilmesi gibi uzun ve meşakkatli bir rehabilitasyon süreci ile karşı karşıya kalınır.

Çarkın özelliklerine göre 3-12 ay gibi bir zaman dilimi içerisinde tamamlanabilen bu rehabilitasyon süreci her anlamda bulunduğu işletmelere büyük kayıpların ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Ülkemizdeki hidroelektrik santrallerimizde de sık sık karşılaştığımız bu olay gerek yanlış tasarlanmış çarkların kullanılması gerek kavitasyon sorunun çözümü konusundaki bilgi eksikliğinden kaynaklı yanlış uygulamalar büyük ekonomik ve zaman kayıplara neden olmaktadır.

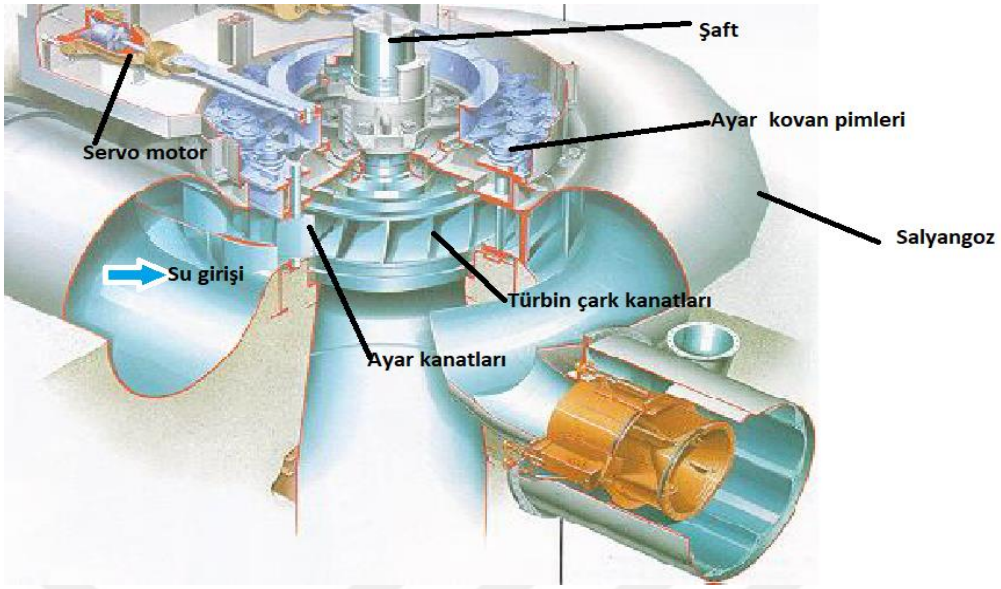
Hidroelektrik santrallerinde kavitasyon olayının daha çok yaşandığı türbinler Francis, Kaplan ve Pelton tipi türbinlerdir. Santralin düşüsü, debi, coğrafik koşullar ve diğer koşullar göz önüne alınarak türbin seçimi yapılır (Avellan, 2004).

Şekil 1.8.'de kavitasyon olayının görüldüğü bir hidroelektrik santralinde elektrik üretim aşaması gösterilmiştir.



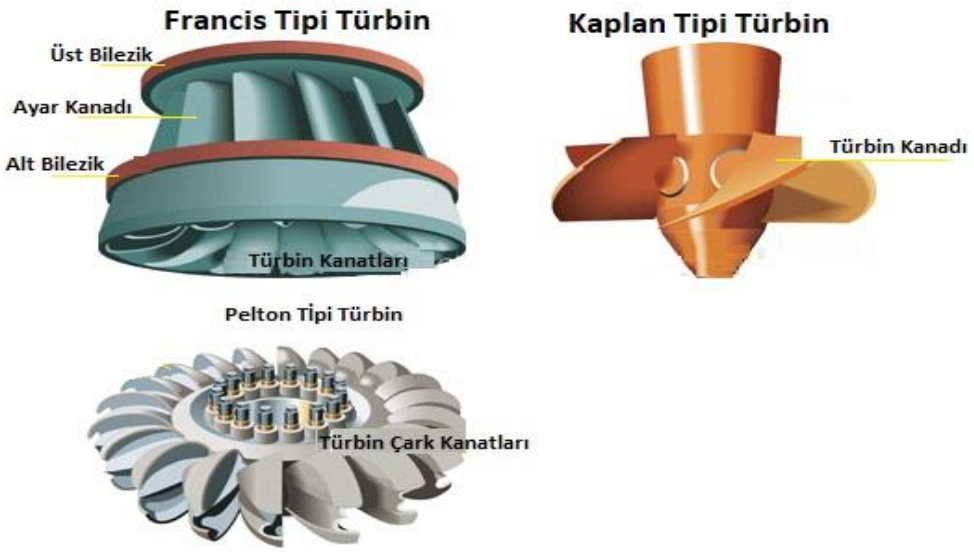
Şekil 1.8. Hidroelektrik santralinde elektrik üretim aşamasında izlenen yol

Şekil 1.9.'da kavitasyon olayının en sık görüldüğü Francis tipi bir hidrolik türbine ait suyun giriş ve çıkışı sırasında izlediği yol gösterilmiştir.



Şekil 1.9. Dikey eksenli Francis türbin

Şekil 1.10.'da kavitasyon olayının sıklıkla yaşandığı hidrolik türbin çark kanatlarına ait örnekler verilmiştir.

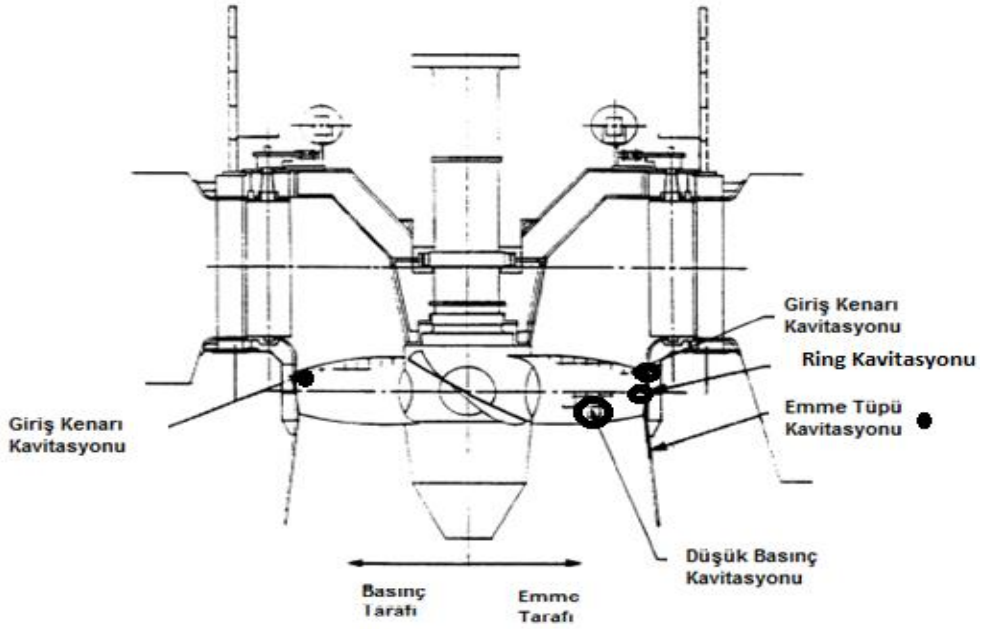


Şekil 1.10. Hidrolik türbin çarkları

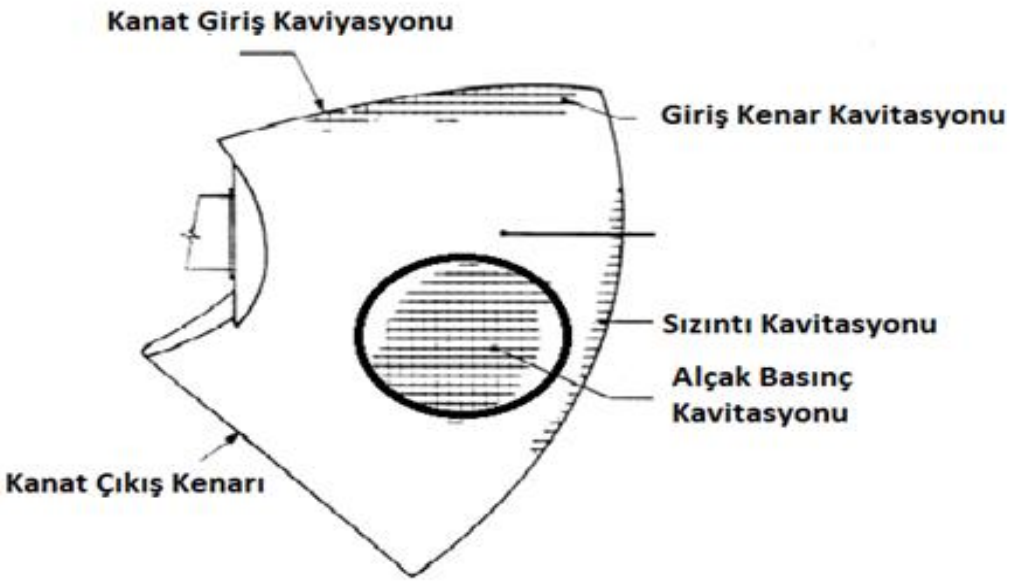
1.3.1.1. Hidrolik türbinlerde olası kavitasyon bölgeleri

Suyun türbine giriş yaptığı ve türbin kanadının su ile karşılaştığı ilk noktada giriş kenarı kavitasyonu oluşmaktadır. Türbin kanadının emme borusuna yakın olan

alt kısmında basınç çok düşük olduğundan bu bölgede düşük basınç kavitasyonu oluşmaktadır. Şekil 1.1.'de Kaplan tipi hidrolik türbin çark kanadında kavitasyon olayın sıklıkla görüldüğü bölgeler ve Şekil 1.12.'de çark kanat yüzeyinde hangi tür kavitasyonun meydana geleceği gösterilmiştir (Escalera ve ark., 2004).



Şekil 1.11. Kaplan tipi türbinde olası kavitasyon bölgeleri



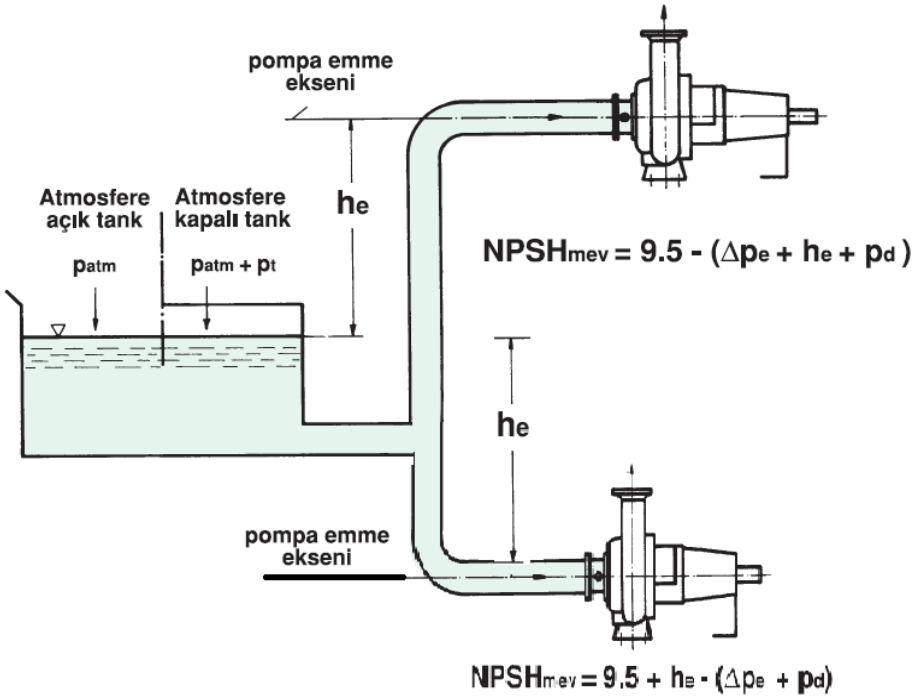
Şekil 1.12. Kaplan tipi türbin kanadı üzerinde olası kavitasyon bölgeleri

1.3.2. Pompalarda kavitasyon

Kavitasyon aslında termodinamik açıdan incelendiğinde hal değişimi sonucu ortaya çıkan ve bunun etkisiyle yüzeylerde tahribata neden olan bir tür aşınma çeşidir. Pompalarda meydan gelen kavitasyonun oluşumu türbinlerde meydan gelen kavitasyondan farklıdır.

Pompaların kavitasyon etkisi altında çalışması sırasında hidrolik performans kayıpları ile birlikte bu durumdan kaynaklı kararsızlıklar ortaya çıkmaktadır. Pompalarda kavitasyon oluşum riskini minimum düzeye indirmek için pompaların seçiminde ve emiş şartları belirlenerek yerleşim planının ona göre yapılması daha doğru olacaktır. Diğer bir husus ise performans eğrilerinin alt kısımlarında gösterilen pompanın net pozitif emme basıncı diye isimlendirilen NPSH karakteristiğidir. NPSH aynı zamanda pompanın ön görülen işletme değerinde kavitasyonsuz ve verimli çalışması için pompanın emiş ağzında ki asgari nominal su basınç değeridir (Nurşen, 2011).

Şekil 1.13.'te pompanın emme ekseninin konumuna göre NPSH değerinin nasıl hesaplanması gerektiği Denklem (1.4)'de gösterilmiştir.



Şekil 1.13. Popmaları Yerleşim şekline göre NPSH değerinin hesaplanması

$NPSH_{mev}$: net pozitif emme yüksekliği
Δp_e : emiş hattı direnç kayıpları
h_e :emiş derinliği
p_d : akışkan buharlaşma basıncı
p_t : ön basınç
patm : atmosfer basıncı (9.5 m olarak Kabul edilebilir)

$$NPSH_{mev} : 9.5 \pm h_e - (\Delta p_e + p_d) \quad (1.4)$$

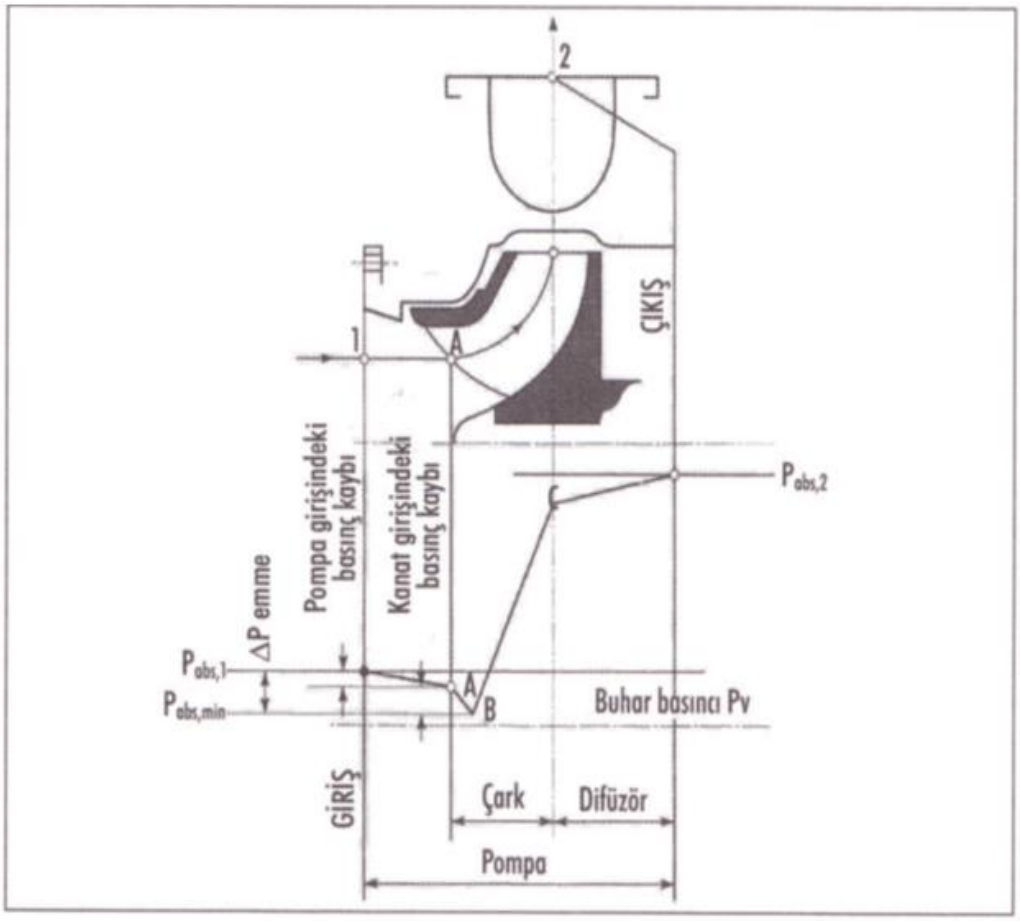
Kavitasyonun meydana gelmemesi için ;

$NPSHP_{mev} > NPSHP$ olmalıdır.

Pompalar da kavitasyon oluşumuna aşağıdaki etkenler verilebilir.

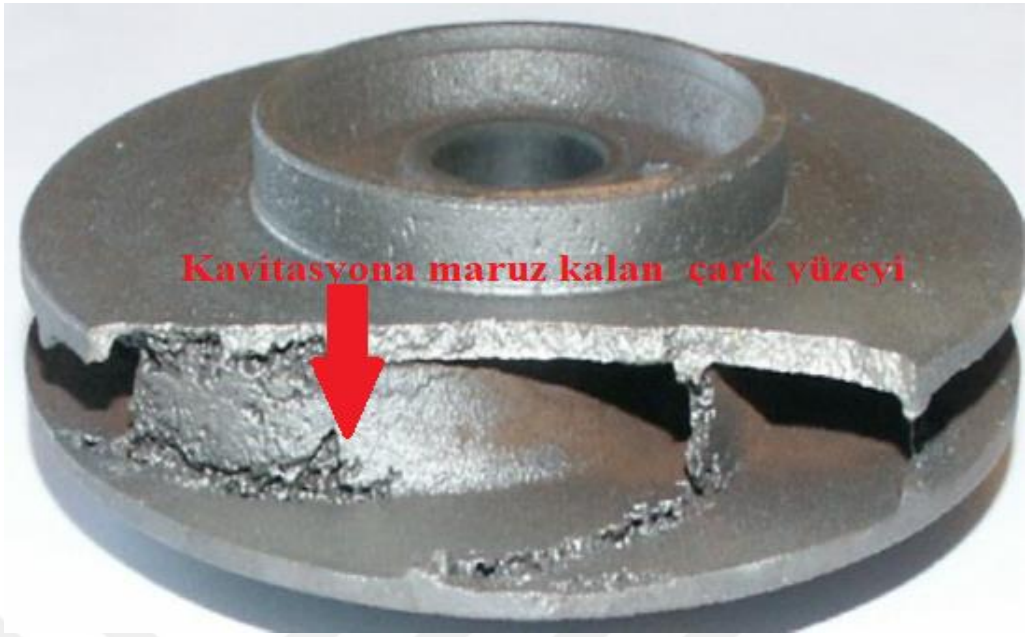
- Pompanın emme haznesindeki düşük basınç ve emme borusu yük kayıplarının fazla olması kavitasyonu kolaylaştırır.
- Pompanın aşırı ani dur-kalk yapmasından kaynaklı kavitasyon oluşabilir.
- Pompadan geçen akışkan sıcaklığının artması buharlaşma basıncını da artıracağından kavitasyon riskini artırır.

Şekil 1.14.'te pompa çark kanadı içerisindeki basınç dağılımına ait şekli verilmiştir.



Şekil 1.14. Pompa çarkındaki basınç dağılımı

Şekil 1.15.'te pompaya ait çark kanadında meydana gelen kavitasyonun ilerlemesiyle parça kopması sonucunda kullanılamaz hale gelen çark örneği gösterilmiştir.



Şekil 1.15. Pompa çarkında meydan gelen kavitasyon sonucu hasar oluşumu

1.4. Fiziksel Görünüşlerine Göre Kavitasyon Tipleri

Kanat yüzeyinde kavitasyonun meydana geliş biçimine göre farklı fiziksel görünüşler ortaya çıkmaktadır.

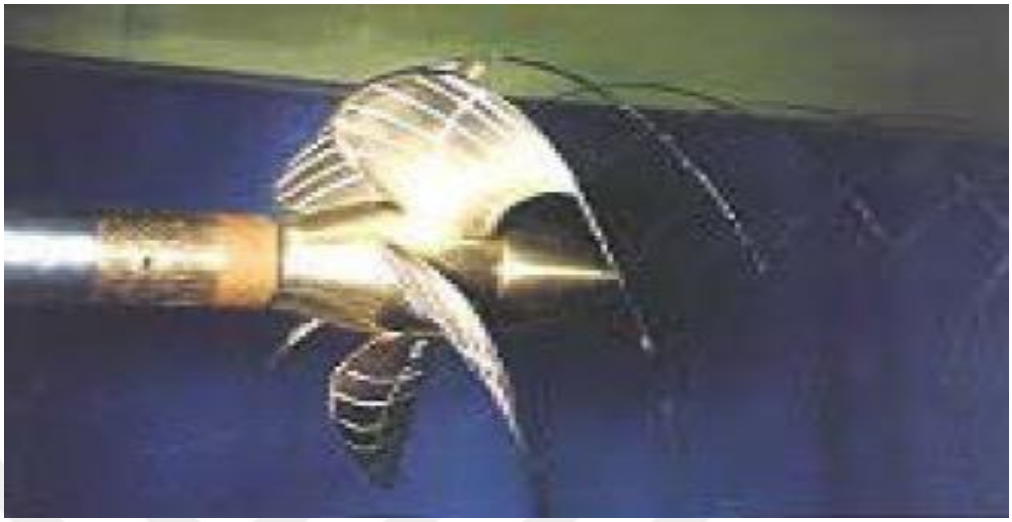
1.4.1. Uç ve gövde girdap kavitasyonu

Pervane kanatlarının farklı noktalarında meydana gelen basınç dağılımından kaynaklı kanat uçlarındaki akım çizgileri koparak girdap oluşturur. Meydana gelen bu girdaplardan dolayı su zerrelerinin dönme hızı yükselir ve bu bölgede yer alan sıvının basıncı akışkanının buharlaşma basınç değerinin altına düşer, bu durum soğuk kaynama meydana getirerek kovitasyon oluşumuna yol açar (Başeşme, 2003).

a. Uç girdap kavitasyonu

Çoğunlukla ilk gözlenen kavitasyon çeşididir. Şekil 1.16'da görüldüğü gibi ilk hareket halinde kanat ucunun gerisinde bir helis şeklinde oluşan ve devir sayısının yükseltilmesi ile meydana gelmiş olan helisin, kanat ucuna yaklaşması sonucunda

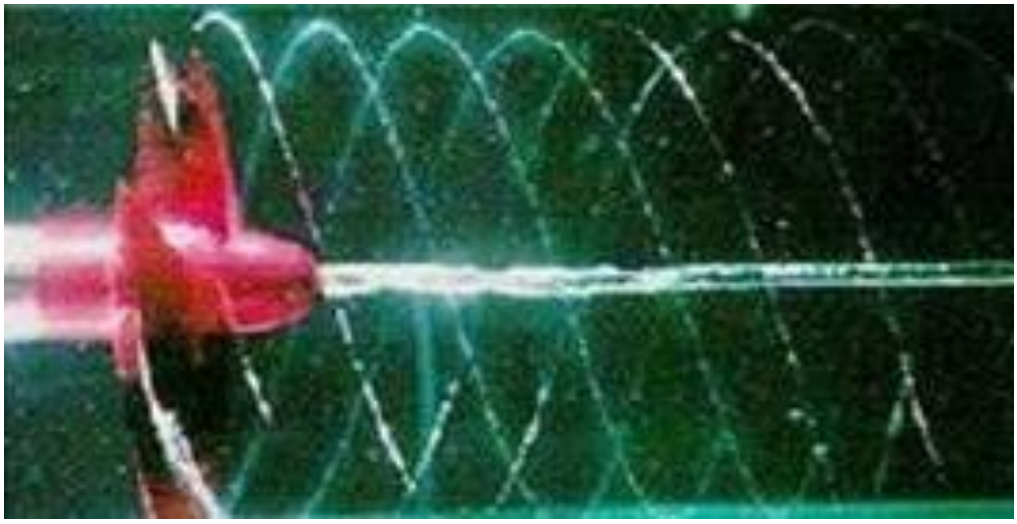
kanat ucunun bir parçası gibi tutturulmuş halde görüldüğü kavitasyon türüdür (Ekinci ve ark., 2005).



Şekil 1.16. Uç girdap kavitasyonu

b. Göbek girdap kavitasyonu

Gemi pervane kanatlarında sıklıkla karşılaşılan bir kavitasyon türü olan göbek girdap kavitasyonu her bir pervane kanadının kök kısmından göbeğe doğru saçılan ve akış içindeki moleküller arasındaki bağı bozan zayıf bölgeleri oluşturan kavitasyon çekirdekleri nedeni ile oluşur. Bu tür kavitasyon oluşumundan korunmak için, pervane kanatlarına veya dümene, pervane göbek finleri konulabilir. Aksi durumda bu kavitasyon türü pervane arkasındaki dümene de zarar verir ve bu sistemin tamamen zarar görmesine neden olur. Şekil 1.17'de gemi pervane kanatlarında meydana gelen göbek girdap kavitasyon örneği verilmiştir (Ekinci ve ark., 2005).

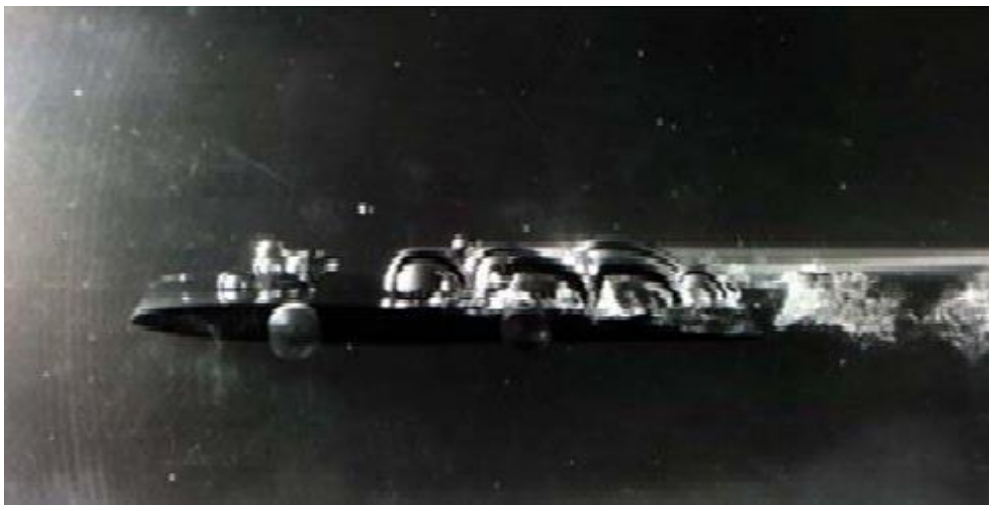


Şekil 1.17. Göbek girdap kavitasyonu

1.4.1.1. Kabarcık kavitasyonu

İlk olarak 1948 yılında Knapp ve Hollander tarafından silindir gövdeli küresel bir başlık üzerinde kavitasyon oluşumu incelenirken ani basınç düşümünü olduğu yüzey alanında karşılaşılan bir kavitasyon türüdür (Şekil 1.18.).

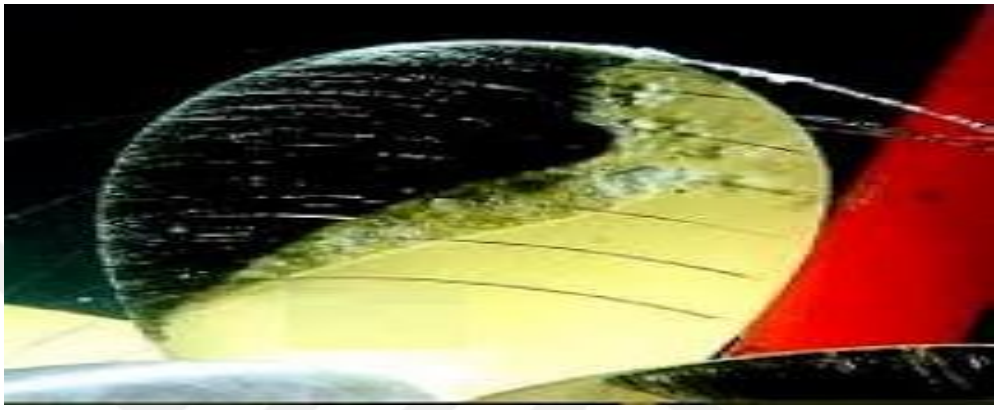
Kabarcık kavitasyonu daha çok kanat üzerindeki basıncın en düşük görüldüğü alanlarda oluşur. Bu tür kavitasyonun oluşumunda kanat kesit kalınlığı ve sehim etkilidir. (G.Kuiper, 2010).



Şekil 1.18. Kabarcık kavitasyon

1.4.1.2. Tabaka kavitasyonu

Pervane kanadının giriş uç kısmında başlayıp çıkış uç kısmına doğru genişleyen ve çoğunlukla kanat sırt kısmındaki yüzeyde bazen de kanat yüzeyinde ortaya çıkan kavitasyon çeşididir (Kuiper, 2012). Şekil 1.19.'da meydana gelen bir tabaka kavitasyon örneği verilmiştir.



Şekil 1.19. Tabaka kavitasyonu

1.4.1.3. Bulut kavitasyonu

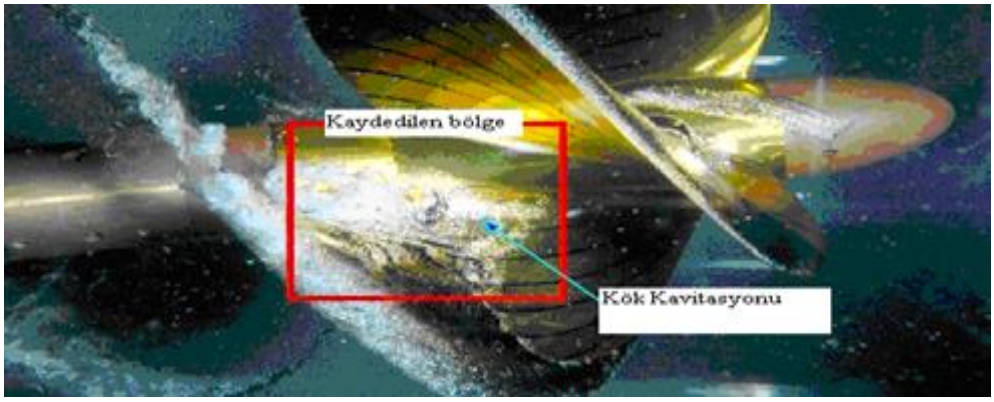
Çok kısa süreli olarak ortaya çıktığından geçici tabaka kavitasyonu olarakta bilinen bu kavitasyon türü, tabaka kavitasyonunun ilerlemesi ile bulut görünümlü çok küçük kabarcıklar halinde tabakanın çıkış kısmında görülen bir kavitasyon çeşididir (Şekil 1.20). Oluşumları biraz geç fark edilebilir (Kuiper, 2012).



Şekil 1.20. Bulut kavitasyonu

1.4.1.4. Kök kavitasyonu

Çoğunlukla pervane kanadının birleşim noktasında ortaya çıkan bu kavitasyon çeşidi ile çok az karşılaşılır. Aşırı yük altındaki yüksek hızlı pervanelerde gözlenebilir. Bu kavitasyon türüne maruz kalan yüzeylerdeki hasar diğer türlerin bıraktığı etkiden daha fazladır. Kök kavitasyonuna uğramış bir pervane kanadına ait görüntü Şekil 1.21.'de verilmiştir (Carlton, 2007).



Şekil 1.21. Kök kavitasyonu

1.5. Kavitasyon Nedeniyle Meydana Gelen Olumsuzluklar

Kavitasyon olayı, Francis, Pelton ve Kaplan tipi hidrolik türbinlerde, gemi pervanelerinde, santrifüj tipi pompalarda, vanalarda ve ani akış hızı değişimi gözlenen bir çok alanda gözlenir.

Kavitasyon olayının görüldüğü makinalarda verim kayıpları meydan gelir. Ancak kavitasyonun asıl etkisi, tahribatlara maruz kalan malzemenin hızlı bir şekilde süngerleşmesi ve sonunda ani parça kopmaları meydana gelmesi ile makinanın ömrünün çok daha kısa bir zaman diliminde tamamlamasına neden olmasıdır (Başeşme, 2003).

Kavitasyon oluşumu aşağıdaki olumsuzluklara neden olabilir:

a. Erozyon (aşınma)

Kavitasyon olayının gözlendiği yerlerde malzeme yüzeyinde ilk anlarda karıncalanmalar ve küçük çaplı oyukcuklar oluşmaktadır. Meydana gelen bu küçük aşınmalar, kavitasyondan dolayı zamanla büyüyerek derinleşmekte ve malzeme yüzeylerinde süngerimsi bir yapıya daha sonrasında ise aşınan parçanın kopmasına neden olmaktadır.

b. Performans kaybı

Kavitasyondan kaynaklı meydana gelen vuruntu ve darbelerle ortaya çıkan salınımlar enerji absorbe ettiği için güç kaybına neden olur. Ancak kavitasyon olayının etkisi zamanla hissedildiği için anlık kayıplar hemen ortaya çıkmamaktadır. Özellikle hidrolik türbinlerde meydan gelen kavitasyon olayının etkisinin belirlenmesi yıllar alabilmektedir. Yapılan çalışmalar sonucu türbinlerdeki kavitasyon revizyonun sonucunda türbin verimlerinin yaklaşık %1-2 arasında değişen verim kayıpları ortaya çıkmaktadır (Başeşme, 2003).

c. Vibrasyon-titreşim

Yüzeylerde meydana gelen aşınma ve parça kopmaları çalışmakta olan makine sisteminin büyük bir kısmında salınımlar meydana getirir.

d. Gürültü

Kavitasyon olayının görüldüğü bölgelerde meydana gelen aşınma ve titreşimler sonucunda ise ortamın tamamında istenmeyen gürültüler oluşur.

Şekil 1.22.'de uzun süre kavitasyona maruz kalması sonucu yüzeyinde aşınmalar meydana gelmiş pervane kanadı örneği gösterilmiştir.



Şekil 1.22. Bir pervane kanadında kavitasyonun neden olduğu aşınma örneği

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Bilimsel literatürde kavitasyon olayı ile ilgili 19 yy. sonlarından günümüze kadar birçok çalışma yapılmıştır. İlk olarak gemi pervanelerinde meydan geldiği gözlenen kavitasyonun olumsuz etkilerini ayrıntılı bir şekilde araştıran ve ilk kavitasyon tünelini inşa eden Parson (1893) olmuştur. Kavitasyon sayısının hesaplanması konusunda en geniş çalışmaları ise Thoma ve Leroux 1923-1925 yılları arasında yapmışlardır.

1990'lı yılların başında, bligisayar alanındaki tasarım yöntemlerindeki (HAD) gelişmeler ile birlikte, Navier Stokes denklemlerine dayanan kavitasyon modelleri ortaya çıkmıştır. Ayrıca bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ile birlikte HAD tekniklerindeki gelişmelere paralel olarak son yıllarda Dynaflow, Ansys gibi programlar ile kavitasyonlu akış modellemesi çalışmaları yapılmaya başlanmıştır.

Avellan (2004), Hidrolik santrallerde kullanılan türbinler ve pompalar için kavitasyon oluşumu konusunda testler yaparak makinelerde oluşun kavitasyon tiplerini araştırmıştır. Kavitasyon sonucu yüzeylerde oluşan aşınmaya göre sınıflandırmalar yaparak kavitasyondan kaynaklı meydan gelen kayıpları incelemiştir. Özellikle türbinleri ilk montaj aşamasındaki uygun kurulum seviyesinin (H_s) belirlenmesinin kavitasyon için önemini göstermiştir.

Carlton (2007), kavitasyon başlangıç noktasının aynı modeller ve koşullarda fakat farklı kavitasyon tünellerinde test edildiği deneyler yapmıştır. Kavitasyonun başlangıç değerleri ve türleri üzerinde etkili olan faktörlerin yüzey şekilleri ve viskozite etkilerinden kaynaklandığı sonucuna ulaşılmıştır.

Sav (2010), Keban ve Atatürk HES'de yer alan Francis tipi türbinlerde meydana gelen kavitasyon olaylarına karşı yapılan çalışmalar sırasında uygulanan yöntemler örneklerle açıklanmıştır. Türbin çark kanatlarının Cr-Ni alaşımlı çelik

malzemeden yapılması durumunda kavitasyon oluşumunun azaltılabileceğini belirtmiştir.

Kaya (2013), pompaların kavitasyonlu çalışma rejimleri altında kavitasyona neden olan karakteristikler deneysel olarak incelenmiş pompa çarklarının performans ve kavitasyon başlangıcı grafikleri oluşturulmuştur. Elde edilen veriler farklı kanat giriş kenar profillerinde (elips, parabolik, dairesel ve kör) kavitasyon sayısına bağlı debi karakteristikleri tüm debilerde parabolik profilin kör profile göre yaklaşık %20 lik bir üstünlüğü olduğu sonucuna varmıştır. Normalden %20 daha fazla debide ise bu farkın kapandığı görülmüştür. Bu durumun sebebi ise kanat giriş kenar profillerinin farklı yapılarda olmasından kaynaklı emme resirkülasyonlarının ortaya çıkması ve bunun akışı daha baskın bir hale getirmesi olarak ortaya koymuştur.

Paragbhai (2015), Francis tipi türbinde kavitasyon hızı ve türbin verimlilik kayıplarını farklı korelasyon şartları altında simule etmiş ve farklı sonuçlara ulaşmıştır. Yaptığı çalışma sonucunda elde ettiği sayısal verilere dayanarak Francis türbindeki kavitasyon hızının; akış hızı, sıcaklık ve türbin emme yüksekliği ne bağlı olarak değiştiği sonucuna ulaşmıştır, bununla birlikte türbinlerin kısmi yük ve aşırı yüklerde çalıştırılması durumunda verim kayıplarının daha fazla arttığını belirtmiştir.

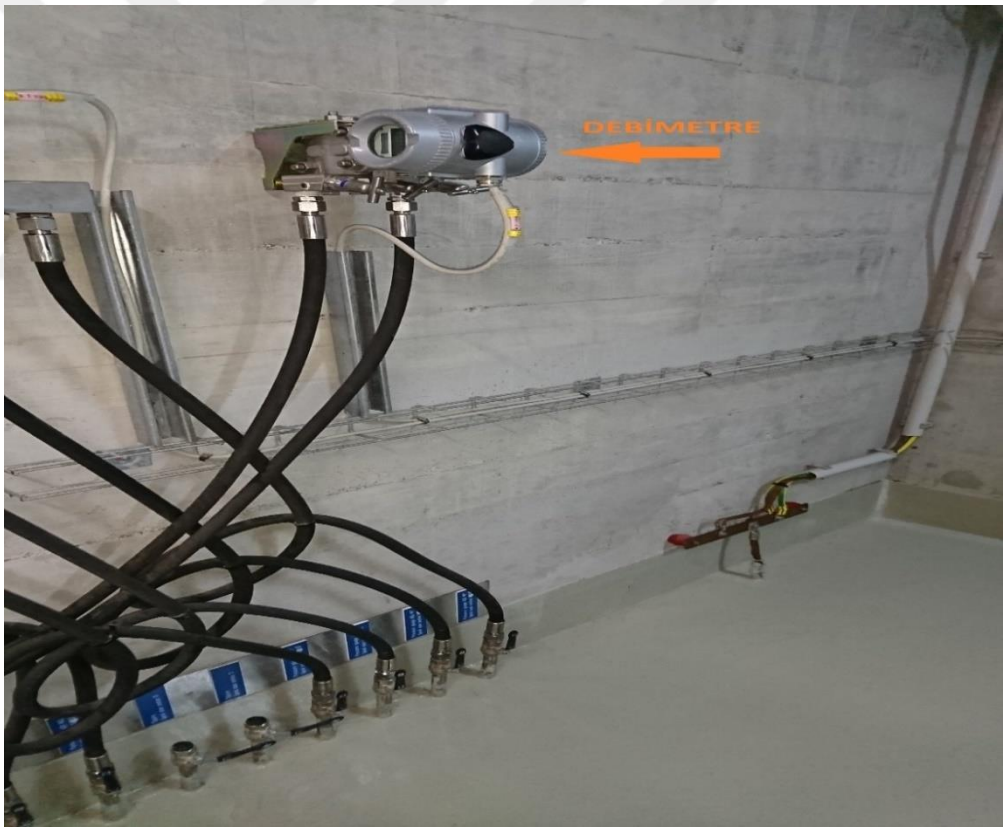
Keleş (2016), pompa çark malzemesi nikel alüminyum bronz olan malzeme yüzeyine sürtünme karıştırma proses işlemi uygulanarak bu yöntemin kavitasyon direncine etkisini incelemiştir. Sürtünmeli kaynak proses yöntemiyle malzemede daha homojen bir yapı oluştuğunu, malzeme direncinin artığını ve kavitasyon direncini artırmak için kabul edilebilir iyileşmenin paso sayısının artmasıyla artığını ortaya koymuştur.

Yamamoto ve ark. (2017), Hidrolik türbinlerde farklı kısmi yüklemeler sonucu oluşan kanat yüzeylerinde görülen girdap kavitasyonunu gözlemleyebilmek için ayar kanadı içerisine kamera yerleştirilerek kanatlar arası girdabın oluşumunu görüntülenmiştir. Türbinlerin çalışma şartları altındaki Thoma kavitasyon değerini hesaplamıştır.

Usta (2018), gemi pervanelerinde meydana gelebilecek kavitasyonu tahmin edebilmek için belirli pervane akış şartlarını HAD ile modelleyerek gemi pervaneleri çevresinde kavitasyonlu akış analizleri gerçekleştirerek pervane etrafında oluşacak aşınmayı tahmin edecek bir sayısal model geliştirmiştir.

3. MATERYAL ve YÖNTEMLER

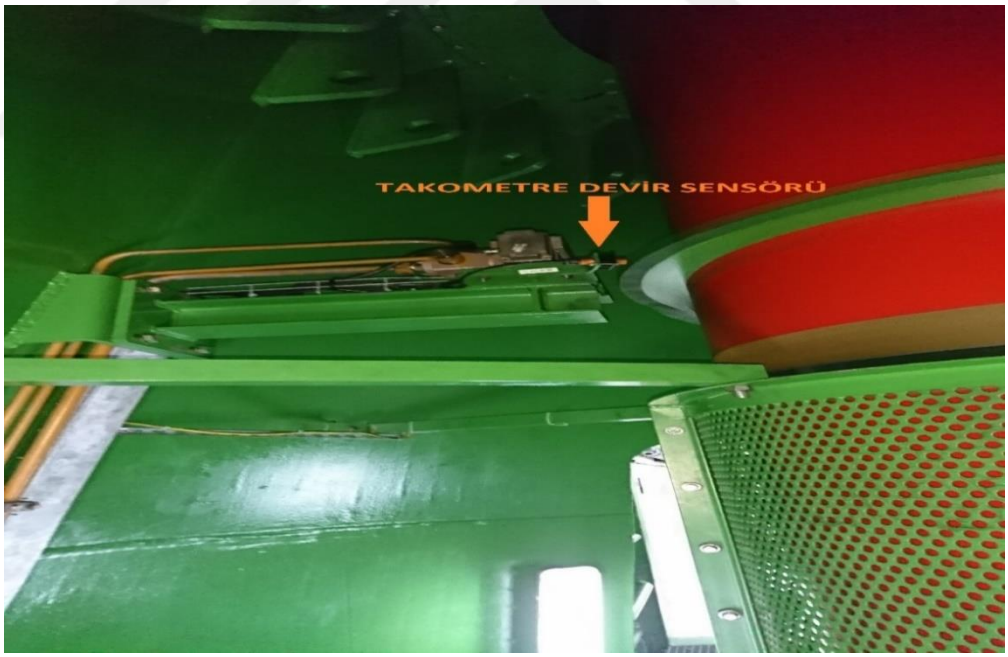
Akış etkisinde çalışan metal yüzeylerin kavitasyona maruz kalıp kalmayacağını anlık olarak belirlemek oldukça zordur. Çalışmamızda Francis tipi türbinlerden geçen suyun debisini belirlemek için bir örneği Şekil 3.1.'de gösterilen debi metre, çıkış su seviyesini belirlemek için Şekil 3.2.'de verilen seviye göstergesi, türbin devir sayısıyını ölçmek için Şekil 3.3.'te gösterilen takometre sensörü kullanılmıştır. Ölçümlerde elde edilen değerler, Thoma kavitasyon prensibine göre hesaplanarak sistemin kavitasyon etkisi altında çalışıp çalışmadığı Francis türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri karakteristik eğrisinde incelenmiştir.



Şekil 3.1. Debimetre



Şekil 3.2. Çıkış suyu seviye göstergesi



Şekil 3.3. Takometre –devir sensörü

3.1. Kavitasyon kontrolü

Hidrolik türbinlerde kavitasyon olayı sonucu meydana gelen tahribatı geciktirmek, tamamen olmasa da kısmen önlemek için çeşitli yöntemler uygulanmaktadır. Bu yöntemler aşağıda sıralanmamıştır.

- Türbini mansap (çıkış suyu) kotundan daha aşağı kotta inşa etmek.
- Türbin devir sayısı ile hidrolik düşüyü tasarım kriterlerine uygun olmak kaydıyla çok büyük seçmemek.
- Çıkış suyu kotu yukarda değilse, türbin kotunu aşağıda tutmak için çıkış suyu önüne set çekmek ve dolayısıyla su seviyesini yükseltmek. Setin minimum yüksekliğini, yalnız 1 türbinin çalışması durumunu ile işletmede bulunan tüm türbinlerin maksimum düzeyde çalışması durumundaki su seviyesi ile aynı olacak şekilde tasarlanması daha faydalı olacaktır.
- Türbin çarkında kullanılan malzemeyi korozyona dayanıklı yüksek Cr-Ni alaşımlı paslanmaz çelikten imal etmek veya yüzeyini kaplamak (Sav, 2010).
- Türbin işletme değerlerine ve eğrilerine dikkat ederek kavitasyonsuz bölgede çalışmak.
- Mümkün mertebe nominal düşü ve nominal yükle çalışmak.
- Nominal yük altında çalışmak zorunda kalındığında emme borusunu açık havayla irtibatlandırmaktır (Grekula ve ark., 2001).

3.1.1. Kavitasyon gözlem ve muayenesi

Gözle kontrol ve muayene türbin bakımın önemli bir parçasıdır. Yeni türbinlerin çalışmaları boyunca sık ve periyodik olarak kontrollerinin yapılması son derece önemli bir konudur. Kanserle mücadelede erken teşhis ne kadar önemli ve kurtarıcı ise, kavitasyonla mücadelede tahribatın başlangıcının erken evrelerde tespiti de o derece önemlidir.

Kavitasyon hasarlarını en aza indirgemek için oyukların ve hasarların meydana geliş sebeplerini ortaya çıkarmak gerekir bu da çarklar, sabit kanatlar, salyangoz ve

emme borusunu da kapsayacak şekilde ayrıntılı bir inceleme sonucunda ortaya çıkarılabilir. Hidrolik türbinlerde meydana gelen tahribatların kavitasyon olayından kaynaklanıp kaynaklanmadığını çeşitli metotlar kullanarak tayin edebiliriz. Bunların başlıcaları aşağıda belirtilmiştir:

a. Titreşim ve gürültü ölçümü**:** Kavitasyon olayının doğurduğu gürültü ve titreşimlerin ölçümleri için çok hassas "gürültü ve vibrasyon analiz cihazları" kullanılmaktadır. Ölçümü ve sonucun yorumu eğitimli ve ehliyetli kişilerce yapılır (Başeşme, 2003).

b. Stroboskopik araştırma metodu**:** Kavitasyon oluşumunun meydana geldiği noktaların belirlenmesinde kullanılan bilinen en hassas yöntemdir. Bu yöntem sayesinde kavitasyonun oluşum noktaları ve kavitasyondan kaynaklı aşınma miktarları hesaplanabilir. Daha çok türbin imalatı yapan büyük firmaların laboratuvarlarında kullanılmaktadır.

c. Türbinin çalışma eğrisindeki değişimlerin incelenmesi**:** Mühendislik açısından bu yöntem çok önemlidir. Kavitasyon olayının meydana getirdiği hasarlar sonucu hidrolik türbinin debi, güç ve verim karakteristik eğrilerinde düşmeler olur. Daha çok ilerlemiş kavitasyon olayının sonucunda ortaya çıkacak olan bu değişimler sonucu eğrilerde meydana gelecek azalma ve sapmalar bizlere kavitasyon olayının büyüklüğü hakkında daha sağlıklı fikirler yürütmemize yardımcı olacaktır. Hassas ve doğru inceleme yapmak için türbinin ilk karakteristik eğrilerinin mevcut olması gerekir (Başeşme, 2003).

3.2. Hidrolik türbinlerde kavitasyon oluşumuna tesir eden faktörler

Türbinlerinin su ile etkileşimi kavitasyon oluşumunda çok büyük rol oynamaktadır.Günümüzde türbin imalatı yapan firmaların hidrolik laboratuvarlarında yapılan incelemeler sonucunda kavitasyon olayının meydana gelmesine etki eden birçok unsur tespit edilmiştir. Bu veriler neticesinde kavitasyona tesir eden etkenlerin her biri için nedenlerin ortaya çıkarılması, kavitasyon şiddetinin formülize edilmesi

ve kavitasyon oluşumunu minimize etmek için çok daha dayanıklı malzemelerin seçilmesi konusunda büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Hidrolik türbinlerde kavitasyon oluşumuna tesir eden etkenler ve ilişkileri aşağıda sıralanmıştır (Sav, 2010).

a. Suyun sıcaklığı

Kavitasyon olayının başlangıcını bir soğuk kaynama olayı olarak tanımladığımız için suyun sıcaklığı arttıkça buharlaşma daha kolay ve hızlı olacağından kavitasyon riski artacaktır. Aşağıdaki Çizelge 3.1.'de su sıcaklığına göre suyun buharlaşma basıncı değişimi gösterilmiştir.

Çizelge 3.1. Suyun sıcaklık (°C) –Buhar basıncı (mss) ilişkisi

Suyun sıcaklığı	Suyun buharlaşma basıncı (H_v)			Suyun sıcaklığı	Suyun buharlaşma basıncı (H_v)		
°C	(*Bar*)	(*mSS*)	(*FeetSS*)	°C	(*Bar*)	(*mSS*)	(*FeetSS*)
0	0.006 11	0.0623	0.205	19	0.021 96	0.2239	0.736
1	0.006 56	0.0669	0.220	20	0.023 37	0.2383	0.783
2	0.007 05	0.0719	0.236	21	0.024 86	0.2535	0.833
3	0.007 57	0.0772	0.254	22	0.026 43	0.2695	0.886
4	0.008 13	0.0829	0.272	23	0.028 08	0.2863	0.941
5	0.008 72	0.0889	0.292	24	0.029 82	0.3041	0.999
6	0.009 35	0.0953	0.313	25	0.031 67	0.3229	1.061
7	0.010 01	0.1021	0.335	26	0.033 60	0.3426	1.126
8	0.010 72	0.1093	0.359	27	0.035 64	0.3634	1.195
9	0.011 47	1.1170	0.384	28	0.037 79	0.3853	1.267
10	0.012 27	0.1251	0.411	29	0.040 04	0.4083	1.342
11	0.013 12	0.1337	0.440	30	0.042 41	0.4325	1.421
12	0.014 02	0.1420	0.470	31	0.044 91	0.4579	1.505
13	0.014 97	0.1526	0.502	32	0.047 53	0.4847	1.593
14	0.015 97	0.1629	0.535	33	0.050 29	0.5128	1.685
15	0.017 04	0.1737	0.571	34	0.053 18	0.5423	1.782
16	0.018 17	0.1853	0.609	35	0.056 22	0.5733	1.884
17	0.019 36	0.1975	0.650				
18	0.020 62	0.2103	0.691				

b. Su içerisindeki kimyasal maddeler

Türbin tahrik sıvısının içinde bulunan kimyasalların oranı artıkça kavitasyon olayının meydana gelme riski artacaktır. Korozyona uğrayan kanat yüzeyleri pürüzlü

olacağı için hidrolik akım çizgilerinin hızlı bir şekilde değişmesine neden olacaktır (Başeşme, 2003).

c. Suyun taşıdığı yabancı madde miktarı

Tahrik sıvısının içinde taşıdığı kum, çakıl, agrega vb. gibi katı cisimlerin miktarı arttıkça kavitasyon olayının olma riski artmaktadır.

d. Türbinin yapısal ve tasarımsal özellikleri

Tasarlanan türbin rotorunun çapının büyümesi çevresel hızın artmasına neden olur. Çevresel hızın artması durumu hidrolik akım basıncının düşmesine sebep olacak ve bu durum kavitasyon oluşumunu kolaylaştıracaktır. Türbin rotorunun kanat formu ve çıkış açısı da kavitasyon olayına etki etmektedir. Hidrolik akışkan kanat yüzeylerine sürtünerek yol aldığından hidrolik akımın çizgilerinin bozulmaması ve küçük türbülansların oluşmaması için kanat yüzeylerinin son derece pürüzsüz olması çok önemlidir. Türbin imalatında kullanılan malzeme korozyon ve erozyon tahribatlarına karşı dayanıklılığa etki ettiğinden malzeme seçimi de son derece önemlidir. Bünyelerinde % 13'ten fazla krom bulunduran Cr-Ni alaşımlı malzeme tercih edilmesi tahribatın etkisini azaltmada önemli rol oynamaktadır. Ancak türbinin tamamını Cr-Ni alaşımlı malzemelerden üretmek pek ekonomik bir yaklaşım değildir. Bunun yerine kanat formlarına göre kavitasyon olayının daha sık görüldüğü türbin çark ve ayar kanatlarının yüzeylerinde Cr-Ni alaşımlı malzemelerin tercih edilmesi daha uygun olacaktır. Bu duruma en iyi örneği kanat yapısında Cr-Ni alaşımı bulundurmayan ve hemen her yıl türbin çark kantlarında revizyon çalışması yapılan Karakaya HES ve türbin çark kanat malzemesi G-X5CrNi13.4 olan ve neredeyse hiç büyük çaplı kavitasyon olayının yaşanmadığı Atatürk HES örnek verilebilir (Başeşme, 2003).

G-X5CrNi13.4 malzemenin 25 °C altındaki özellikleri;

Poisson's oranı : 27-0.30

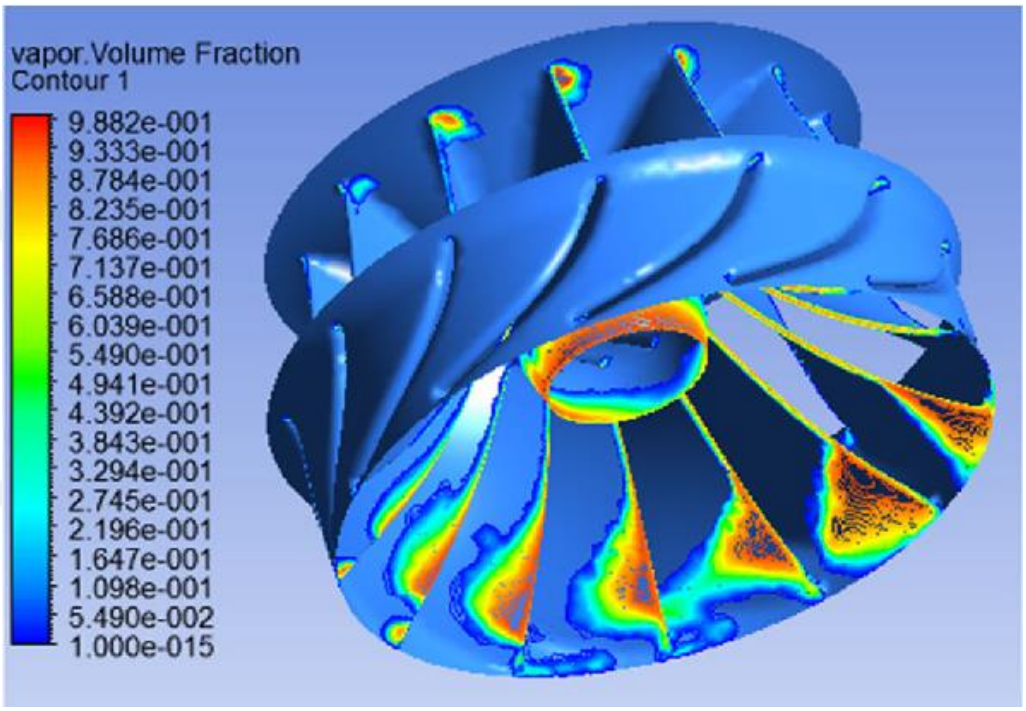
Elastik modul (GPa) : 190-210

Gerilme direnci (Mpa) : 1158

Akma dayanımı (Mpa) : 1034

Sertlik değeri (HRC) : 335

Aşağıdaki Şekil 3.4.'te Francis tipi türbinin kanat yüzeylerinde sıklıkla meydana gelen kavitasyon oluşum bölgeleri gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Francis türbin çarklarında kavitasyon olayına en çok maruz kalan bölgeler

e. Özgül hız

Hidrolik türbinin tipi ve seçimi için kullanılan özgül hız, kavitasyon olayının sınırının belirlenmesi için son derece önemli parametredir. Kavitasyon konusunda önemli araştırmaları bulunan Prof. Dr. Thoma'ya göre hidrolik türbinin hızı (devir sayısı) arttırıldığında kavitasyon katsayısı da artmaktadır. Denklem (3.1)'de özgül devir sayısını etkileyen faktörler belirtilmiştir (Başeşme, 2010).

$$n_s = \frac{n}{H_n}\sqrt{\frac{N}{\sqrt{H_n}}} = \frac{nN^{1/2}}{H_n{}^{5/4}} \quad (3.1)$$

H_n=Bir hidrolik türbine gelen akışkanın net düşüsü (m)
n = Dakikada ki devir sayısı (dev/dk)
N =Güç (BG)

Denklem 3.1'de H_n nominal net düşüyü, n dakikadaki devi sayısını N ise gücünü göstermektedir. Buradaki gücün beygir gücü cinsinden olmasına dikkat etmek gerekir.

Çizelge 3.2.'de Türbinlerin özgül devir sayılarına karşılık gelen Thoma kavitasyon katsayıları sınır değerleri tablo halinde verilmiştir. Hesaplamalarda kullanılan devir sayılarına karşılık gelen Thoma kavitasyon katsayı değerine bu tabloda iterasyon yöntemi kullanılarak ulaşabiliriz.

Çizelge 3.2. Francis tipi hidrolik türbin özgül devir sayılarına karşılık gelen Thoma kavitasyon katsayıları sınır değerleri tablosu

Özgül devir sayısı (n_s)	50	80	100	200	300	360	400	500
Thoma''kavitasyon'' katsayısı (σ_{kr})	0.03	0.045	0.05	0.11	0.20	0.28	0.35	0.46

f. Thoma kavitasyon katsayısı

Hidrolik türbinlerde sıklıkla yaşanan kavitasyonun oluşumunun nedenlerinin belirlenmesi için bu güne kadar yapılan araştırmaların öncülüğünü Prof. Dr. Thoma yapmıştır. Thoma prensibine göre kavitasyon olayı sınırı Denklem (3.2)'de verilmiştir.

$$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} \geq \sigma_{kr} \quad (3.2)$$

σ_t = Kavitasyon olayının sınır değeri, boyutsuz (birimsiz) Thoma katsayısı

σ_{kr} = Kritik Thoma katsayısı (Kavitasyon olayının üst sınır değeri)

H_a = Tesisin atmosfer basıncı (mSS)

H_v = Akışkan buharlaşma basıncı (mSS)

H_s = Türbin emme yüksekliği (m)

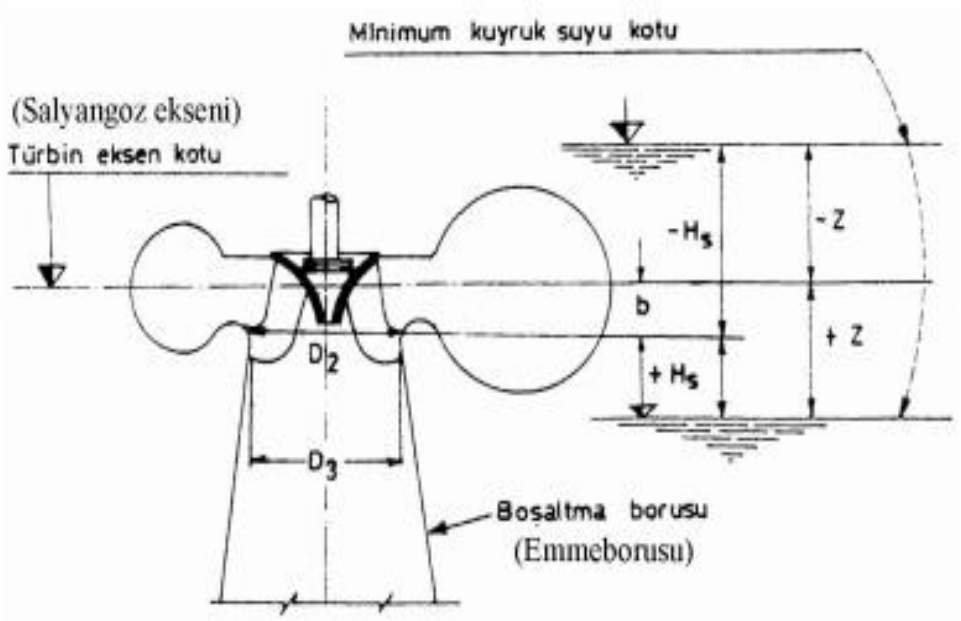
H_n = Nominal net hidrolik düşü (m)

Denklem (3.2)'de verilen Kavitasyon olayı sınır değeri (σ_t) , türbin emme yüksekliği (H_s) ve nominal net hidrolik düşü (H_n) değerlerinden daha çok etkilenir. Buna göre, salyangoz orta ekseninin çıkış suyu seviyesinin yukarısında olduğu durumdaki türbinlerde, emme yüksekliğinin (H_s) azalması (çıkan su miktarının artması) kavitasyon şiddetinin azalmasına neden olur. Aynı şekilde salyangoz orta ekseninin çıkış suyu seviyesinin altında olduğu durumdaki türbinlerde, emme yüksekliğinin (H_s) artması kavitasyon şiddetinin azalmasına neden olur. Ancak H_s değerinin büyümesi türbinin düşük yük ile çalıştırılması ile mümkündür fakat bu istenmeyen bir durumdur. Bunun yerine H_s değerini artırmak için işletmede mümkün mertebe türbinlerden atılan su miktarını artırmak gerekir bu ise çalışan türbin sayısını artırmakla mümkün olan bir durumdur.

Hidrolik düşünün (H_n) değerinin azalması da kavitasyon şiddetinin azalmasına neden olur. H_n küçülmesi ise ancak baraj göl seviyesinin azalmasıyla mümkündür.

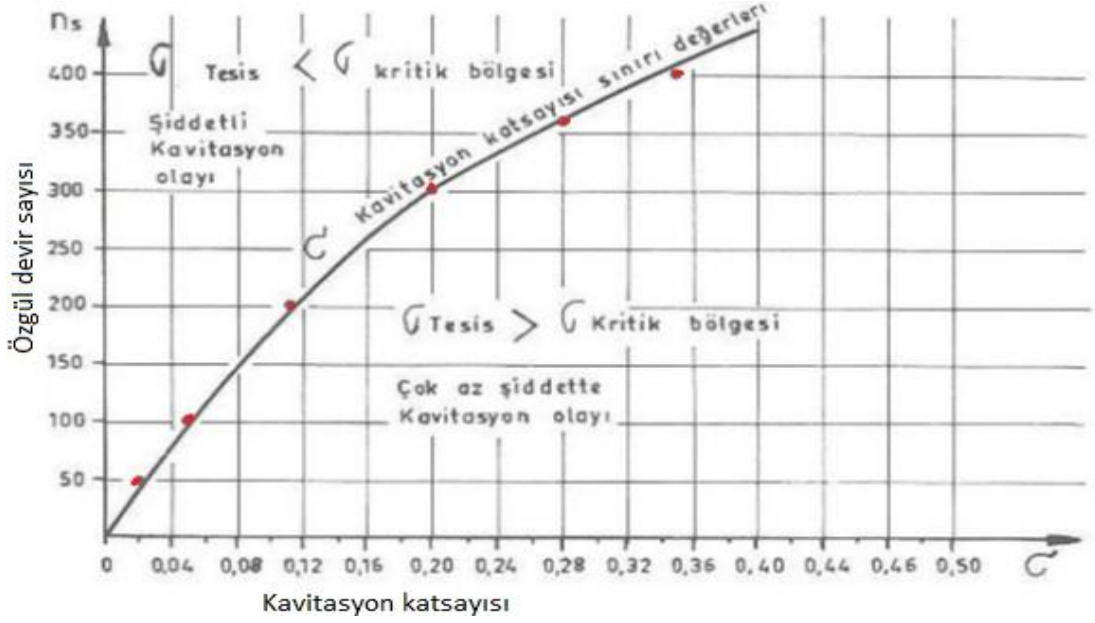
En önemli konu hidrolik türbinin imalatı öncesinde H_s nin uygun seçilmesidir. Ayrıca türbinlerin mümkün olduğunca optimum değerlere yakın aralıkta çalıştırılması dikkat etmek gerekir. Türbin emme yüksekliğine (H_s) ait görüntü Şekil 3.5.'te verildiği gibidir (Başeşme, 2003).

Prof. Dr. Thoma' ya göre de $\sigma_{tesis} \geq \sigma_{kritik}$ olduğunda kavitasyonsuz çalışmanın sınır şartıdır.



Şekil 3.5. Francis tipi türbin basit şeması

Şekil 3.6.'da türbinlerin çalışma koşulları göre kavitasyon olayının meydana gelip gelmeyeceğinin belirlenmesinde sıklıkla kullandığımız Francis türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri karakteristik eğrisi verilmiştir.



Şekil 3.6. Francis türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri karakteristik eğrisi

Bir hidrolik türbine ait kavitasyon katsayısı sınır değeri, kavitasyon katsayısı kritik değerinden daha büyük olmalıdır.

g. Net Hidrolik düşü, debi ve türbin devir sayısı

Net hidrolik düşü, debi ve türbin devir sayısından birinin artması durumunda akışkanın akım hızı artar. Hızın ani bir değişimle artması ise akış ile temas eden türbin kanatlarının birleşim noktalarında ve sırt yüzeylerinde basınç dalgalarının ani bir şekilde artmasına neden olur. Net hidrolik düşünün fazla olması birim metreküp sudan elde edilecek gücü artıracağı için istenen bir durumdur. Ancak türbinden atılan (debinin) çıkış suyun fazla olması emme yüksekliğini artıracağı için iyi su sarfiyatı için kötü bir durumdur. Bu yüzden kavitasyon oluşumunu minimize etmek için türbinlerin tasarlanması ve sahaya montajı sırasında bu üç değeri optimum bir noktada buluşturacak şekilde yapılmasına dikkat etmek gerekir.

h. Tesisin bulunduğu yerin atmosfer basıncı

Bir yerin rakım arttıkça o yerdeki atmosfer basıncı düşer ve bu durum suyun buharlaşmasını kolaylaştırır. Hidrolik santral tesisinin bulunduğu yerin rakımının yüksek olması o noktadaki (H_a) değerini düşürür bu ise σ_t değerini azaltır ve kavitasyon oluşumunu artırır.

i. İşletme şartlarının değişmesi

Hidrolik santrallerde en çok dikkat etmesi gereken nokta türbinleri optimum değerlerde çalışma şartlarının sağlanmasıdır.

Santrallerin memba kısmında bulunan su seviyesi yıl içerisindeki yağış miktarına bağlı olarak sürekli değişiklik gösterir. Bazı yıllarda bu seviyenin istenilen düzeyin altında kalması sonucu türbinler kavitasyon sınırların altında çalıştırılsa kavitasyon sonucu meydana gelen zarar daha fazla oluşması kaçınılmaz bir hal alır.

Benzer şekilde türbinin aşırı yük veya çok düşük yüklerde çalıştırılmasıda kavitasyon oluşum riskini artıracaktır.

3.3. Kavitasyon bölgesinin onarımı

Hidrolik türbinlerde meydana gelen tahribatların muayene ve kontrolünden sonra kavitasyon sebebiyle tahrip olmuş bölgelerin onarımıyla ilgili önce bir plan hazırlanmalıdır. Kaynaklı işlem ve yüzey temizliği için bir prosedür hazırlanmalı ve en uygun yöntem ve yaklaşımlar burada belirtilerek uygulama öncesi hazırlık yapılmalıdır. Türbinlerde oluşan kavitasyonun azaltılabilmesi için genel olarak iki yöntem tercih edilir. Bunlardan birisi, kavitasyon nedeni ile süngerimsi yapıya bürünen yüzeyin temizlenip, oluşan boşluklara Cr-Ni alaşımlı elektrotlarla kaynak yapıp ve yüzeylerin taşlanıp pürüzsüz bir hale getirilmesidir. Daha az tercih edilen diğer yöntem ise özel suni malzemelerle doldurulması yöntemidir.

Kavitasyon hasarlarının tamirine başlamadan önce uygulanacak tamir metotlarına karar verilmelidir. Aşağıda bazı metotlar belirtilmiştir.

- Hasarlanan bölgenin kaynakla dolgusunun yapılması
- Hasarlanan bölgeye aynı malzemeden materyalle kaynaklı birleştirme yapılması
- Hasarlı bölgeler üzerinde kaynak plakaları kullanılması
- Hasarlı bölgenin olduğu kanadın ya da parçanın komple kesilerek yeni parçanın oraya kaynak edilmesi

Yukarıda bahsedilen metotlar arasında en yaygın ve başarılı sonuçlar veren metot hasarlanan bölgenin kaynakla doldurulması yöntemidir. Buna karşın hasarlı bölgenin formu verilmiş başka yeni bir malzemeyle değiştirilmesi işlemi çok şiddetli hasarlarda (kanatta delik oluşması, ciddi malzeme kaybı vb.) düşünülmelidir. Bu metodun uygulaması oldukça pahalıdır (William, 1989).

3.3.1. Kaynaklı onarım ile kavitasyon tahribatı onarım metodu

Hidrolik türbinlerde kaynaklı onarım kavitasyon bölgesinin onarımı için başarılı ve etkili bir yöntemdir. Kaynaklı tamir prosesi boyunca aşağıdaki adımlar takip edilir:

- Tam boyutsal ölçü kontrolü
- Uygulama yapılacak bölgede yüzey hazırlığı
- Ön ısıtma
- Kaynak uygulaması
- Kaynak birleşim bölgesinde temizlik ve kontur taşlaması
- Kaynak muayenesi
- Son ölçü kontrolü

Yukarıda bahsedilen adımlara ek olarak işlemlere başlamadan önce kaynak yapılacak türbin çarkının kimyasal yapısının bilinmesi gerekir. Uygulama sırasında takip edeceğimiz kaynak prosedürü tamamen malzeme türüne göre şekillenecektir.

Eğer malzemenin kimyasal yapısı bilinmiyorsa analiz yapılarak öğrenilmelidir. Aksi takdirde kaynak yapılan kanat veya çark yüzeylerinde geri dönüşümü mümkün olmayan form bozuklukları meydana gelmesi sonuçları ile karşı karşıya kalabiliriz.

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.

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 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 kullanılmalıdır (William,1989).

a. Kaynak Dolgu Usulü ile Kavitasyon Tahribatı Onarımı Yapılırken Dikkat Edilmesi Gereken Genel Kurallar

- Kifayetsiz bir birleştirme, yani nüfuziyetsizlik meydana gelmesinden kaçınmak
- Cüruf kalıntılarını engellemek.
- Kaynak dikişinde gözenek teşekkülüne meydan vermemek gerekir.
- Kaynak dikişlerinde kılcal çatlak meydana gelmesini önlemek
- Kaynak dikişinin taşmasına engel olmak.
- Kaynak işlemine başlamadan önce kaynak elektrotlarını 100-120 °C arasında ısıtarak elektrotu örtü maddesi içindeki nemi almak
- Kaynak yapılacak olan türbin rotorunu özel elektrik sobaları vasıtasıyla 120-150 °C arasında bir ön ısıtmaya tabi tutmak

b. Kavitasyon Tahribatı Onarımında Kullanılacak Kaynak Elektrotlarının Sahip Olması Gereken Genel Özellikler

- Çok düşük akım şiddetlerinde ve düşük sıcaklık derecelerinde eriyebilmelidir.
- İyi bir tutuşma kabiliyetine sahip olmalıdır.
- Örtüsü, yüksek ark sıcaklığında buharlaşma dolayısıyla bozulmayan iyi bir etki kabiliyetine sahip olmalıdır.
- Kaynak işleminden hemen sonra dikiş örtüsünün teşkil ettiği cüruf kolayca kalkabilmelidir.
- Bünyesinde korozyon olayı ile kavitasyon olayı tahribatlarına karşı dayanıklı olan Cr-Ni-Mo veya Cr-Ni-Mn gibi katkı maddelerinden uygun miktarlar

bulunmalıdır.

Hidrolik türbinlerde kaynak dolgu metodu ile onarımı yapılmış olan kavitasyon olayının görüldüğü bölgelerin, kaynak ile dolgu işlemi yapıldıktan sonra yüksek kesme hızlarına sahip olan özel zımpara taşları ile taşlanmak suretiyle yüzeylerin pürüzsüz bir görünüme getirilmesi gerekir. Bu işlemleri yaparken kaynak dolgusu yapılmış olan bölgelerin taşlanması esnasında orijinalliğinin kanat formunun bozulmaması için özel bir hassasiyet gösterilmedir (William, 1989).

3.3.2. Suni malzemelerle kavitasyon tahribatı onarım metodu

Hidroelektrik santrallerinin kurulmuş olduğu nehir sularının içermiş oldukları bazı kimyasal maddeler makina teçhizatlarında yüzeylerinde ileri derecede korozyon etkisi oluşturabilmektedir. Oluşan korozyonlar zamanla kanat yüzeylerini pürüzlü bir yapıya büründürür ve hidrolik akım çizgilerini değiştir. Bu durum ise kavitasyon oluşumunu hızlandırır. Bu nedenle tahrik suyundan kaynaklı korozyon oluşumunu engellemek ve maliyeti azalmak için kavitasyona uğramış küçük çaplı bölgeleri korumak için su ile temas halindeki yüzeyler suni malzemeler kullanılarak kaplanılmaktadır. Bu malzemelerin içeriğinde kuvarz kumu ve zımpara tozu olan polyamine-polyamid epoxy reçineleri bulunur.

Kavitasyondan kaynaklı aşınmış yüzeylerin tamiratında kullanılan bu malzemeler; 90°C‘ye kadar sıcaklığa dayanıklıdır, aynı zamanda elastikiyet özellikleri de oldukça iyidir. Bu malzemelerin içeriği, kullanılacağı alandaki suyun kimyasal farklılığından dolayı değişkenlik gösterebilir. Bu yöntemden daha iyi bir sonuç almak işlem yapılacak yüzeylere küçük metal talaş parçaları veya ince kum taneleri püskürterek temizlenmesi gerekir.

Ülkemizde Fırat nehri üzerinde bulunan Karakaya HES’te de bu yöntem geçmiş dönemlerde kullanılmış ama suni malzemelerin etkisi ancak birkaç yıl görülmüştür.

3.4. Kavitasyon olayı tahtibatı sonucu malzeme ağırlığının ölçülmesi

Kavitasyona maruz kalmış yüzeylerdeki aşınma miktarını ölçmek için en pratik yöntem meydana gelen boşluklar bal mumu veya macun ile doldurularak sıvanır bir süre sonra oyuklardaki bal mumu veya macun çıkarılarak hacimler tespit edilerek yüzeylerden aşınarak kaybolan malzeme miktarı hesaplanabilir.

Yine meydana gelen aşınma miktarını hesaplamak için bazı ampirik formüller de kullanılmaktadır. Örneğin NEMA standartlarına göre Francis hidrolik tipi bir türbinde 8000 fiili çalışma saati sonunda kaybolabilecek kabul edilebilir malzeme miktarı Denklem (3.3) yoluyla hesaplanır (Sav, 2010).

$$W = K.D_2^2 \text{ (kg veya g)} \quad (3.3)$$

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 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 çap)

Meydana gelen aşınma miktarını dahi iyi irdelemek için bu iki yöntem kullanılarak aradaki ağırlık farkı karşılaştırılarak kavitasyonun ilerleyişi hakkında fikirler elde edilebilir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI ve TARTIŞMA

Mekanik sistemlerde akışkan ile temas halinde olan yüzeylerin kavitasyona maruz kalıp kalmadığını eğer bu yüzeyler kavitasyona maruz kalıyorsa meydana gelen etkileri kısa süreli zaman dilimleri içerisinde gözlemlemek pek mümkün olmamaktadır.

Kavitasyon olayına maruz kalan metal yüzeyler üzerindeki en büyük etki hidroelektrik santraller de enerji üretiminin önemli bir parçası olan türbin çark kanatlarıdır. Türbin çark kanatlarından birim zamanda geçen su miktarı, türbin devir sayısı, çarkın malzeme yapısı, suyun çarka giriş ve çıkış hızları gibi birçok faktör kavitasyon oluşum hızını etkilemektedir.

Kavitasyon etkisi altında çalışan çark kanat yüzeylerinde ilk olarak parlaklaşma ve pürüzlenme daha sonra çok küçük boyutlarda oyulmalar meydana gelir. Bu küçük oyukçuklar kavitasyon etkisiyle zamanla büyüyerek derinleşmekte ve belirli işletme saati sonrasında malzeme yüzeyini süngerimsi bir yapıya büründürmektedir. Çark yüzeyindeki süngerleşmeninin artmasıyla yüzeyde malzeme kopmaları meydana gelmektedir. Kopan bu parçalar çok küçük halde olduğu için bu aşınmaları anlık olarak tespit etmek mümkün değildir. Kavitasyon sonucu meydana gelen aşınmaları daha net bir şekilde görebilmek için türbinlerin çalışma şartlarına bağlı olarak 8000-12000 işletme saati aralığında çalıştırılması gerekmektedir. Ancak bu kadar uzun süre beklemek yerine türbinlerin çalışma parametreleri göz önüne alınarak kavitasyon sınırları içerisinde çalışıp çalışmadığı Thoma prensibine göre hesaplanarak elde edilen sonuçlara göre önlemler almak daha akılcı bir çözüm yolu olacaktır.

Çalışmamızın bu bölümünde ülkemizde önemli bir enerji üretim payına sahip olan Keban, Kesikköprü ve Karakaya HES'lerde kavitasyon olayının türbinlerin hangi şartlar altında çalıştırıldığı durumunda meydana geldiği incelenmiş ve elde

edilen bulgulara göre kavitasyon sınırları içerisinde çalışıp çalışmadığı analiz edilmiştir. Ayrıca bir Francis türbinin farklı düşü ve debi değerlerinde çalışması durumunda kavitasyon altında çalışıp çalışmadığı ve türbinin verimindeki değişimler Hill Cart programında incelenerek elde edilen sonuçlar analiz edilmiştir.

4.1. Keban Hidroelektrik Santrali Türbinlerinde Kavitasyon Olayının İncelenmesi

Keban HES Elazığ'ın Keban ilçesinde Fırat Nehri üzerinde yer alıp ülkemizin 3. büyük hidroelektrik santrali'dir. Santral 8 adet dikey Francis tipi türbin ile toplam 1330 MW kurulu güce sahiptir.

Çalışmamızın bu kısmında Keban HES'e ait Francis tipi türbinlerin %100 optimum yükle çalışmaları durumunda ölçülen veriler göz önüne alınarak, türbinlerin bu çalışma koşullarına göre kavitasyon katsayı değerleri ayrı ayrı hesaplanıp elde edilen sayısal değerler Çizelge 4.1'de verilmiştir. Bu verilere göre türbin çark kanatlarında kavitasyon olayının meydana gelip gelmeyeceği ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Çizelge 4.1. Keban HES Francis tipi türbinlerin %100 optimum yükle çalışmaları durumunda bazı karakteristik değerler

Karakteristik değerlerin adı ve açıklaması	Formül/Simge	Maksimum göl seviyesi	Nominal göl seviyesi	Minimum göl seviyesi	Kritik Minimum göl seviyesi
Net hidrolik düşü	H_n (m)	154	146	118	85
Debi	Q (m^3/sn)	128.46	135.32	145.9	119.2
Türbin gücü	N (MW)	183.1	183.3	158.9	89.9
Türbin devir sayısı	n (dev/dk)	166.7 dev/dk=17.45 rad/san			
Türbin özgül devir sayısı	$n_s = \frac{n}{H_n}\sqrt{\frac{N}{\sqrt{H_n}}}$	152.364	164.257	197.862	224.264
Türbin rotor çıkış çapı	D_2(m)	4.38			
Çevresel hız katsayısı	$U_{ze} = \frac{w.D_2}{2\sqrt{2gH_n}}$	0.695	0.718	0.797	0.938
Santral çıkış su seviyesi	(m)	689.61	689.65	689.71	689.54
Türbin salyangoz orta ekseni	Z(m)	689.5			
Türbinlerin bulunduğu konuma göre atmosfer basıncı-suyun buharlaşma basıncı	$H_a - H_m$(m) $H_a = 10.33 - \frac{Z}{900}$ Su sıcaklığı ≈ 15°C (H_v = 0.17mSS)	≈9.39			
Kavitasyon katsayısı	$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n}$	0.0617	0.0657	0.0813	0.111
Türbin emme yüksekliği	H_s(m)	0.11	0.15	0.21	0.04

$$n_s = \frac{n}{H_n}\sqrt{\frac{N}{\sqrt{H_n}}} = \frac{166.7}{154}\sqrt{\frac{245541.15}{\sqrt{154}}} = 152.364 \text{ dev/dk}$$

Şekil 3.6.' ya göre Francis tipi türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri

$\sigma_{kr} = 0.081$ olarak bulunur

$H_a = 10.33 - \frac{Z}{900} = 10.33 - \frac{689.61}{900} = 9.564$ mSS

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

Türbin ait verilen değerlerdeki emme yüksekliği 0.11 m olarak ölçüldüğüne göre;

$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} = \frac{9.564 - 0.17 - 0.11}{154} =$ $\sigma_t = 0.0617$ değeri elde edilir.

Ölçülen bu değerlere göre;

$\sigma_t \geq \sigma_{kritik}$

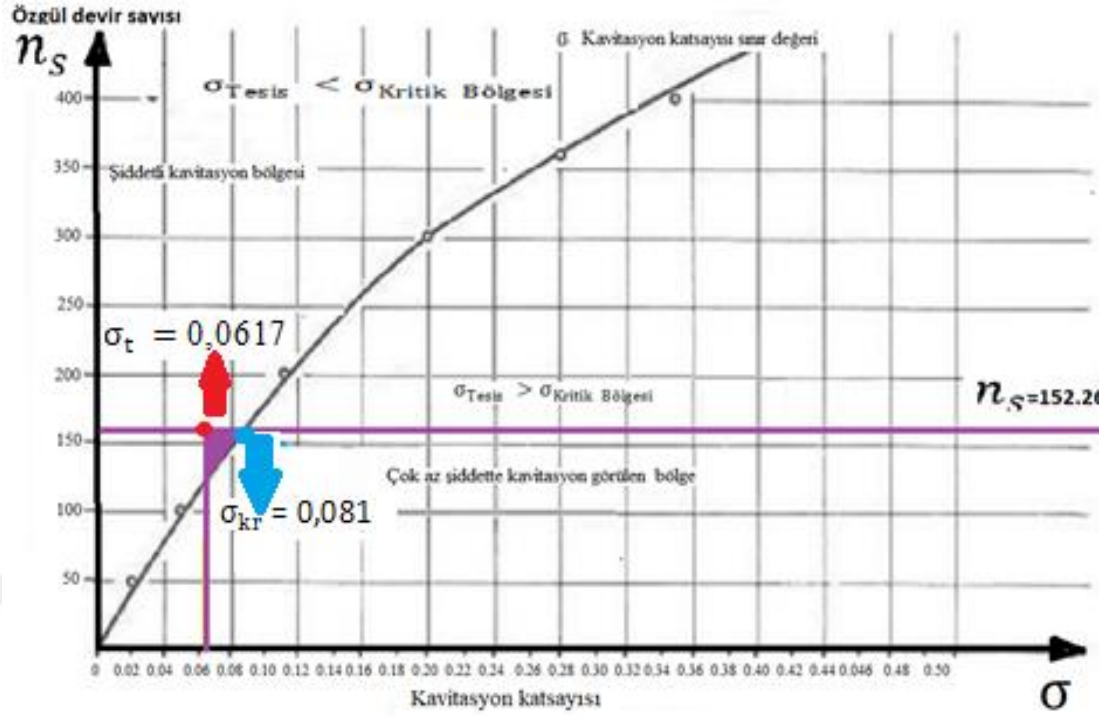
koşulu sağlanmamıştır.

Türbinlerin bu değerlerde çalışması durumunda çarkaların kavitasyona maruz kalacağı sonucuna ulaşmış olduk

Çizelge 4.1.'de hesaplanmış olan kavitasyon katsayıları, 4 türbinin birlikte optimum yüklerde çalışması anındaki değerlerdir. Türbinlerin birinin veya birkaçının devre dışı kalması ya da ideal yükün altında çalışması durumunda aynı hidrolik düşüde hesaplanan kavitasyon katsayı değerlerini kritik kavitasyon katsayı değerine yaklaştırır. Bu durum da ise kavitasyon oluşum riski artar.

Çizelge 4.1.'de elde edilen veriler sonucunda göl seviyesinin maksimum, minimum, nominal ve kritik kodlarda çalışılması durumunda hesaplanan türbin özgül devir sayısına göre kavitasyon bölgesinde çalışıldığı sonucuna ulaşabiliriz.

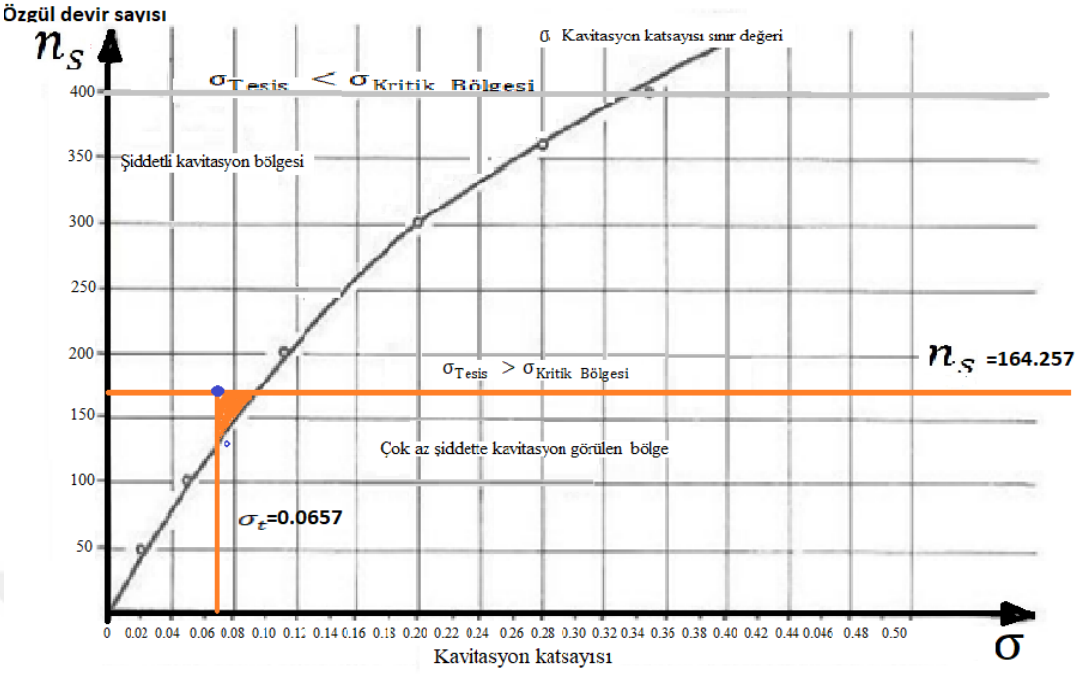
Keban HES'te 4 adet Francis tipi türbinin maksimum göl seviyesinde çalışması durumunda ölçülen karakteristik değerlere göre kavitasyon katsayısı 0.0617 olarak hesaplanmıştır. Bu verilere göre Şekil 4.1.'de türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri karakteristik eğrisi elde edilmiş ve türbinlerin sınır değerlerini aşarak kavitasyon bölgesinde çalıştığı görülmüştür.



Şekil 4.1. Maksimum göl seviyesinde kavitasyon olayı

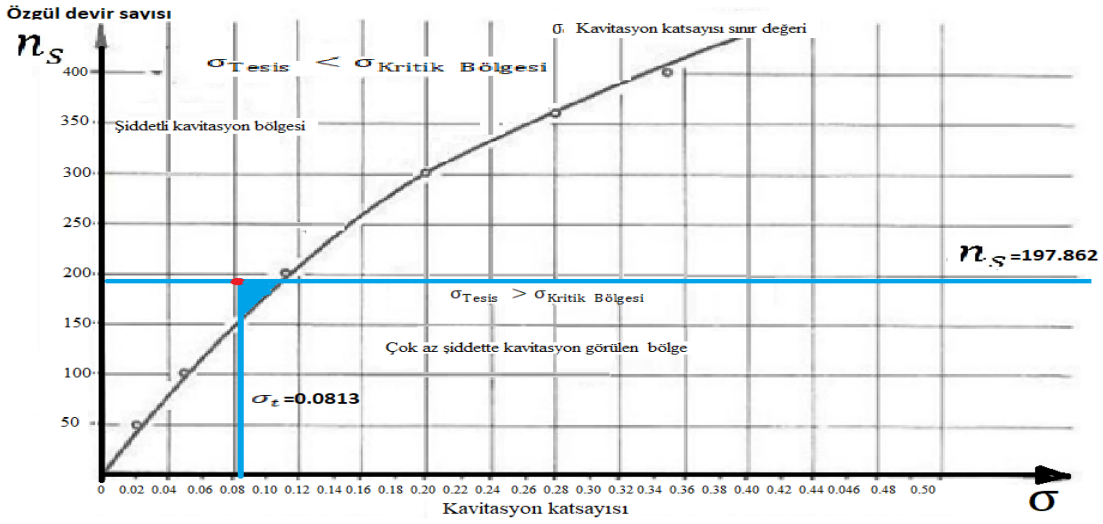
Benzer şekilde bu türbinlerin nominal göl seviyesinde çalışması durumunda elde edilen grafik Şekil 4.2'de, minimum göl seviyesinde çalışması durumunda elde edilen grafik Şekil 4.3.'te ve kritik göl seviyesinde çalışması durumunda elde edilen grafik Şekil 4.4.'te verilmiştir. Bu verilere göre net hidrolik düşü azalmasına rağmen özgül devir sayısındaki artışın daha fazla olmasından kaynaklı kavitasyon şiddetinin gittikçe arttığı görülmüştür.

Şekil 4.2.'de türbinin nominal göl seviyesinde çalıştırılması sonucu ortaya çıkan bu grafiğe göre türbinin nominal seviyede çalıştırılması durumunda tesisin Thoma kavitasyon sayı değerinin kritik kavitasyon sayı değerinde büyük olduğu ve türbinin kavitasyon bölgesinde çalıştığı sonucu ortaya çıkmıştır.



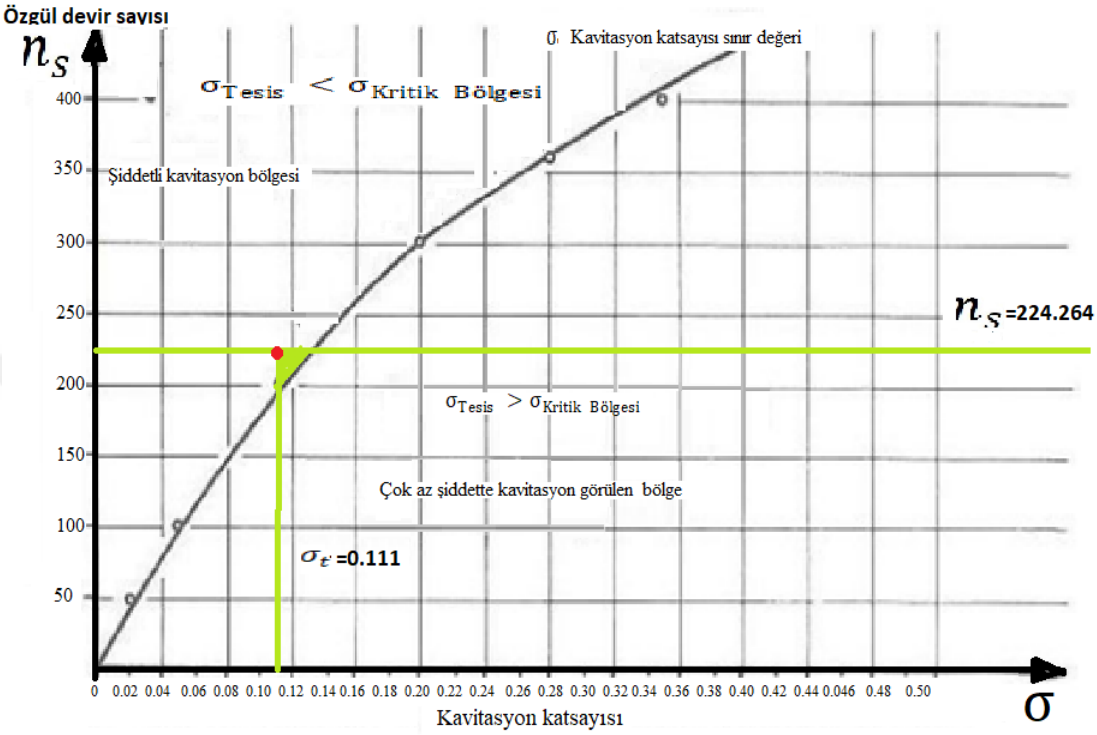
Şekil 4.2. Nominal göl seviyesinde kavitasyon olayı

Şekil 4.3.'de türbinin minimum göl seviyesinde çalıştırılması durumunda özgül devir sayısının 197.862 olduğu ve türbinin net düşüsünün bu seviyede tutulması halinde çark yüzeylerinde kavitasyon olayının yaşanacağı görülmektedir.



Şekil 4.3. Minimum göl seviyesinde kavitasyon olayı

Şekil 4.4.'de türbinin kritik göl seviyesinde çalıştırılması durumunda özgül devir sayısının 224.264 olduğu ve bu değerde türbinlerin çalıştırılması durumunda türbin çarklarında kavitasyon olayı yaşanacağı görülmektedir.



Şekil 4.4. Kritik göl seviyesinde kavitasyon olayı

Burada türbinlerin maksimum göl seviyesinde dahi çalışmasına rağmen kavitasyona maruz kalmalarındaki en önemli etken çıkış su seviyesinin düşük kalmasıdır.

4.2. Kesikköprü Hidroelektrik Santralı Türbinlerinde Kavitasyon Olayının İncelenmesi

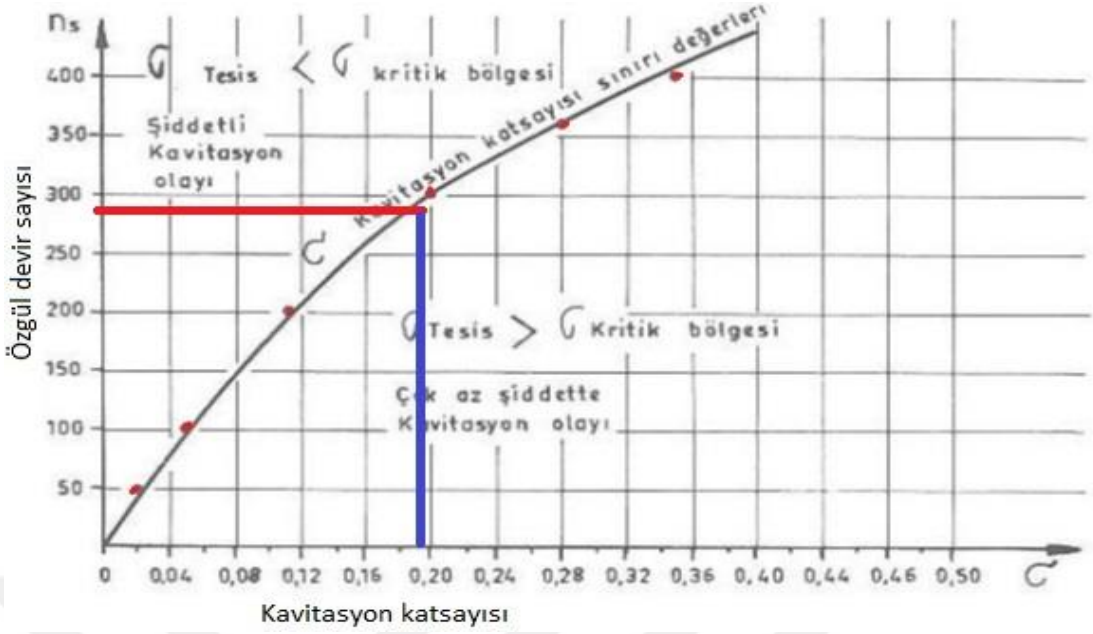
Kızılırmak nehri üzerinde yer alan Kesikköprü HES 2 adet Francis tip türbini ile toplam 76 MW kuru güce sahiptir. Çalışmamızın bu bölümünde işletmede bulunan türbinlerde hangi yükler altında ve düşülerde kavitasyon olayının yaşandığı incelenmiştir. Aşağıda Çizelge 4.2.'de Kesikköprü HES'e ait karakteristik değerler verilmiştir.

Çizelge 4.2. Kesikköprü HES karakteristik değerleri

Kesikköprü HES Karakteristik Değerler	
Akarsu	Kızılırmak
Minimum işletme seviyesi (Rakım)	772.48 m
Maksimum işletme seviyesi (Rakım)	785.55 m
Minimum işletme seviyesi su hacmi	31.107 bin m^3
Maksimum işletme seviyesi su hacmi	88.053 bin m^3
Elektrik üretimi için faydalı su	56.946 bin m^3
Göl alanı	6.5 km^2
Net hidrolik düşü (H_n)	39.63 m
Debi (Q)	122.50 m^3/san
Türbin gücü (N)	53.000 BG
Devir sayısı (n)	125 dev/dak
Salyangoz orta eksen seviyesi (Z)	745.00 m (Deniz seviyesinden yükseklik)

$$n_s = \frac{n}{H_n}\sqrt{\frac{N}{\sqrt{H_n}}} = \frac{125}{39.63}\sqrt{\frac{53000}{\sqrt{39.63}}} = 290 \text{ dev/dk}$$

Karakteristik değerlere göre özgül devir sayısı hesaplanan Kesikköprü HES'e ait kavitasyon sınır değerler eğrisi Şekil 4.5.'te verilmiştir.



Şekil 4.5.Özgül devir sayısı ve kavitasyon katsayısına göre kavitasyon şiddetinin incelenmesi

Şekil 3.6.'ya göre Francis tipi türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri; $\sigma_{kr} = 0.195$ olarak bulunur.

$$H_a = 10.33 - \frac{Z}{900} = 10.33 - \frac{745}{900} = 9.5 \text{ mSS}$$

T=15°C sıcaklık için suyun buharlaşma basıncı H_v= 0.17 mSS dir.
Türbin ait verilen değerlerdeki emme yüksekliğinin 1 m olarak kabul edilmesi durumunda;

$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} = \frac{9.5-0.17-1}{39.63} = 0.2102$ değeri elde edilir.

Verilen bu değerlere göre;

$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} \geq \sigma_{kritik}$ koşulu sağlanmış ve kavitasyon oluşumu söz konusu değerlerde oluşmadığı sonucuna ulaşabiliriz.

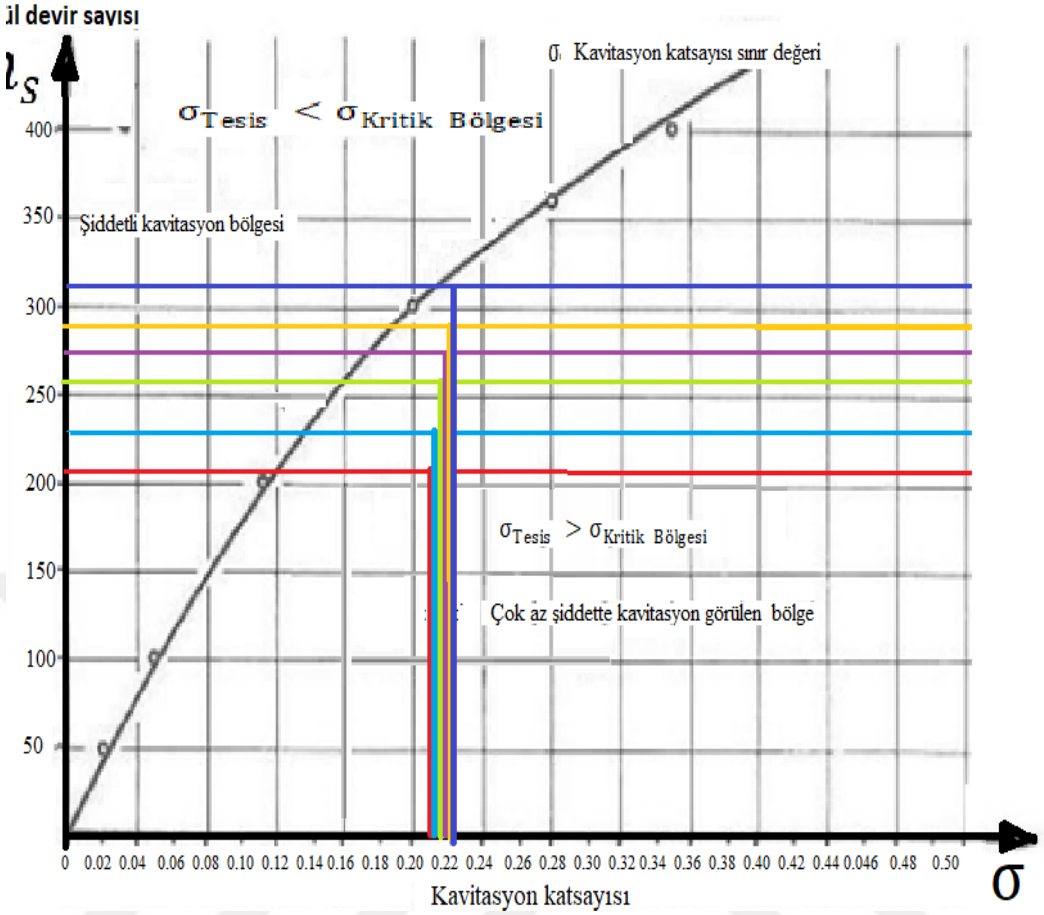
Yine verilen bu eşitlikler kullanılarak Kesikköprü hidroelektrik santraline ait Francis tipi türbinlerden farklı düşülerde ve çalışma şartlarında kavitasyon olayını başlama noktaları verilmiştir.

Kesikköprü HES'te 39.63 m net hidrolik düşü altında farklı yük altında 1 ünite çalışırken sistemin kavitasyon bölgesinde çalışıp çalışmadığı incelenmiş ve elde edilen Thoma kavitasyon katsayısına göre çalıştığı bölgeler Çizelge 4.3.'te gösterilmiştir. 39.63 m net hidrolik düşü altında, türbinlerin farklı emme yüksekliklerinde çalıştırılması sonucu elde edilen kavitasyon eğrisi Şekil 4.6.'da verildiği gibidir.

Yüklerin artırılması ile birlikte çıkış su seviyesi yükselerek salyangoz orta eksenine yaklaşmıştır. Bu durum da ise Thoma kavitasyon katsayısı kritik kavitasyon katsayısından daha büyük bir değere ulaşmıştır. Ancak yükün artış oranı çıkış su seviyesinin artış oranından daha fazla olduğu için kavitasyon sınırlarına yaklaştığı görülmüştür

Çizelge 4.3. 39.63 m net net hidrolik düşü altında 1 ünite çalışırken ölçülen değerler

Sıra	Yükler (MW)	Çıkış su seviyesi (m)	Emme yüksekliği (m)	Özgül devir sayısı (dev/dk)	Thoma katsayısı	Değerlendirme
1	20 MW	744.10	H_s=0.90	205.878	σ_t=0.213	Kavitasyon yok
2	25 MW	744.17	H_s=0.83	230.178	σ_t=0.214	Kavitasyon yok
3	30 MW	744.25	H_s=0.75	252.151	σ_t=0.216	Kavitasyon yok
4	35 MW	744.34	H_s=0.66	272.350	σ_t=0.219	Kavitasyon yok
5	40 MW	744.44	H_s=0.56	291.155	σ_t=0.221	Kavitasyon yok
6	42 MW	744.58	H_s=0.42	308.819	σ_t=0.225	Kavitasyon şiddeti az



Şekil 4.6. 39.63 m net hidrolik düşü altında çalışan sistemin kavitasyon bölgesindeki yeri

Çizelge 4.4.'te de görüldüğü üzere Kesikköprü HES Francis türbinlerinin net hidrolik düşülerin artması ile kavitasyon olayının başladığı ve kesildiği yük değerleri artmıştır. Bu verilere göre hidrolik türbinden alınan azami yükün artması ile çıkış su seviyesi yükselmekte aynı zamanda (H_s) emme yükseklik seviyesi azalmaktadır. (H_s) emme yüksekliğinin azalması ise kavitasyon katsayı değerini artırmaktadır. Bu durumda ise kritik kavitasyon katsayısından uzaklaşılmaktadır

Çizelge 4.4. Kesikköprü HES Francis türbinleri düşü-yük-kavitasyon limitleri (Başeşme, 2003).

Net Hidrolik Düşüler	Bir Türbinden Alınan Azami Yükler	Kavitasyonun Olayının Görülmeye Başladığı Yük	Kavitasyonun Olayının Kesildiği Yük Değerleri
26 m	24.1 MW	4.7 MW	16.6 MW
27 m	25.5 MW	5.0 MW	17.7 MW
28 m	27.2 MW	5.3 MW	18.8 MW
29 m	28.7MW	5.6 MW	19.8 MW
30 m	30.3 MW	6.0 MW	20.7MW
31 m	31.8 MW	6.4 MW	21.3 MW
32 m	33.4 MW	7.0 MW	21.9 MW
33 m	34.8 MW	7.4 MW	22.5 MW
34 m	36.2 MW	7.9 MW	23.1 MW
35 m	37.7 MW	8.4 MW	23.7 MW
36 m	39.2MW	8.9 MW	24.3 MW
37 m	40.7 MW	9.1 MW	25.1 MW
38 m	42.2 MW	9.4 MW	25.8 MW
39 m	43.3MW	9.6 MW	26.5 MW
40 m	44.8 MW	9.8 MW	27.3 MW

4.3. Karakaya Hidroelektrik Santralinde Kavitasyon Olayının İncelenmesi

Karakaya HES 1987 yılında üretime geçen ülkemizin en önemli enerji tesislerinden biridir. Fırat Nehri üzerinde yer alan santral 6 adet Francis tipi türbinden oluşup 1800 MW kurulu gücü ile Türkiye'nin 2. büyük hidroelektrik santrali'dir. Yağış miktarına bağlı olarak yıllık elektrik üretimi 5.000-9.000 GWH arasında değişkenlik gösterebilmektedir. Karakaya HES ülkemizde yer alan santraller içerisinde kavitasyon etkisinin en çok yaşandığı işletmelerin başında gelmektedir. Her bir türbin ortalama 12.000-15.000 saatlik çalışma süresi sonrasında kavitasyondan dolayı revizyona ihtiyaç duymaktadır. Bu çalışmada santralde yer alan Francis tipi türbinlerin %100 optimum yükle çalışmaları durumunda ölçülen değerlere göre kavitasyon olayının meydana gelip gelmeyeceği ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Aşağıda Çizelge 4.5.'te Karakaya HES'e ait türbin gücü, debi, maksimum ve minimum işletme seviyeleri net hidrolik düşü ve türbin devir sayıları gibi karakteristik değerler verilmiştir.

Çizelge 4.5. Karakaya HES karakteristik değerleri

Karakaya HES Karakteristik Değerleri	
Türbin gücü (Ne)	408.000 BG
Türbin debisi (Q)	233 m^3/san
Salyangoz ekseni (Z)	535.00 m (Deniz seviyesinden yükseklik)
Maksimum işletme seviyesi (Rakım)	693 m
Minimum işletme seviyesi (Rakım)	675 m
Maksimum işletme seviyesi su hacmi	9.242.000 m^3
Minimum işletme seviyesi su hacmi	4.888.890 m^3
Talvegden yüksekliği	158 m
Net hidrolik düşü (H_n)	144 m
Devir sayısı (n)	150 dev/dak

Tahrik suyu sıcaklığı 15 ºC kabul edildiğine göre:

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

Şekil 3.6'ya göre Francis tipi türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri;

$\sigma_{kr} = 0.105$ olarak bulunur

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

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

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

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

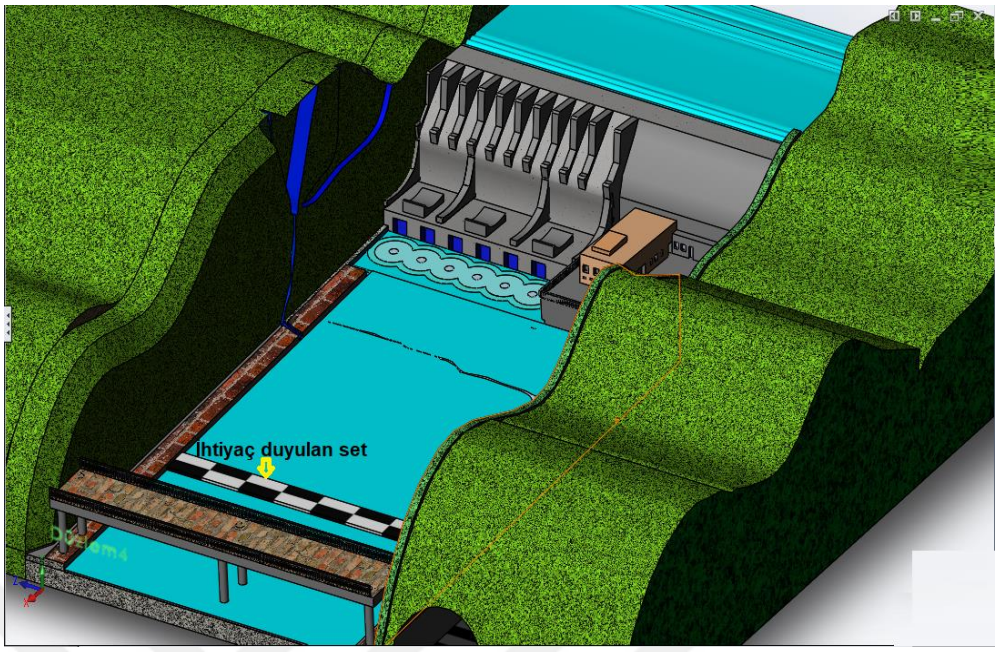
$$H_s \geq 5.54\text{m}$$

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

Bu santalde kavitasyondan kaynaklı meydan gelen problemleri minimum düzeyde tutabilmek için çıkış su seviyesini salyangoz orta ekseninden sürekli olarak 5.54 m daha yüksek olacak halde, Karakaya HES çıkış su yüzey alanının yaklaşık 43.000 m^2 olduğu ve santralden 440 m uzaklığında çıkış su genişliğinin en dar olduğu bir bölgede (yatırım maliyetini minimum düzeyde tutmak amacıyla) setin inşa edilmesi faydalı olacaktır. Şekil 4.7.'de Google Earth programı yardımıyla Karakaya HES'e ait uydu görüntüsü verilmiştir. Şekil 4.8.'de ise Solidworks programından faydalanılarak Karakaya HES'te kavitasyonu önlemek için ihtiyaç duyulan setin görünümü verilmiştir. Setin inşa edileceği bölgenin konumuna göre nehir yatağının yapısı incelenerek set üzerine küçük ebatlarda türbin yerleştirilip mini bir santralle üretime katkı sağlanabilir.



Şekil 4.7. Karakaya HES'e ait uydu görüntüsü



Şekil 4.8. Karakaya HES'te kavitasyonu önlemek için ihtiyaç duyulan setin görünümü

4.4. Hill Chart Proğramı ve Vibrasyon Testi Yardımıyla Francis Tipi Bir Hidrolik Türbinin Farklı Düşü Değerlerinde Kavitasyon Oluşumunun İncelenmesi

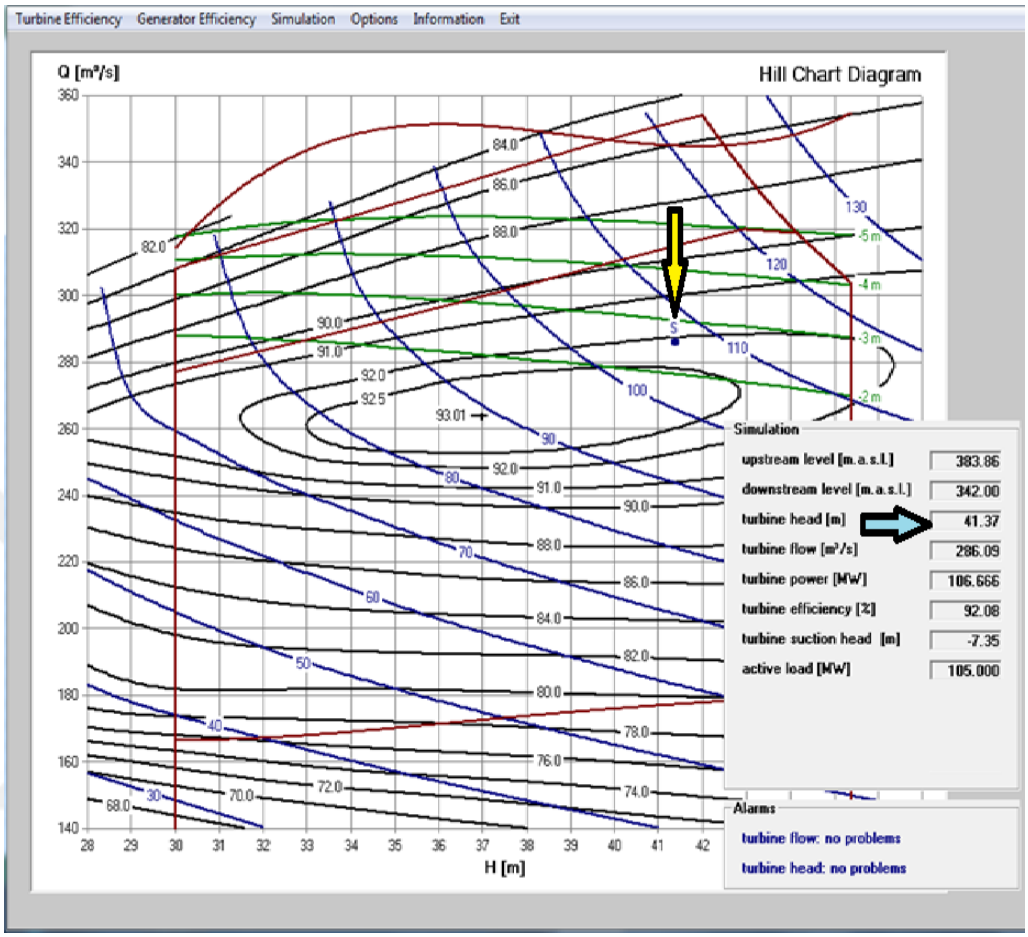
Hidrolik türbinlerde emme yüksekliğinin artması durumunda kavitasyon oluşumu minimum düzeye inmektedir, kavitasyon oluşumunun azalmasına ilaveten bu durum türbin veriminin artmasına da neden olmaktadır.

Aşağıda bir Francis tipi hidrolik türbinde çıkış su seviyesinin;

1. Adım emme yüksekliği = 7.35 m (Net düşü : 41.37 m)
2. Adım emme yüksekliği = 5.35 m (Net düşü : 43.42 m)
3. Adım emme yüksekliği = 3.35 m (Net düşü : 45.45m)
4. Adım emme yüksekliği = 1.35 m (Net düşü : 47.48 m)

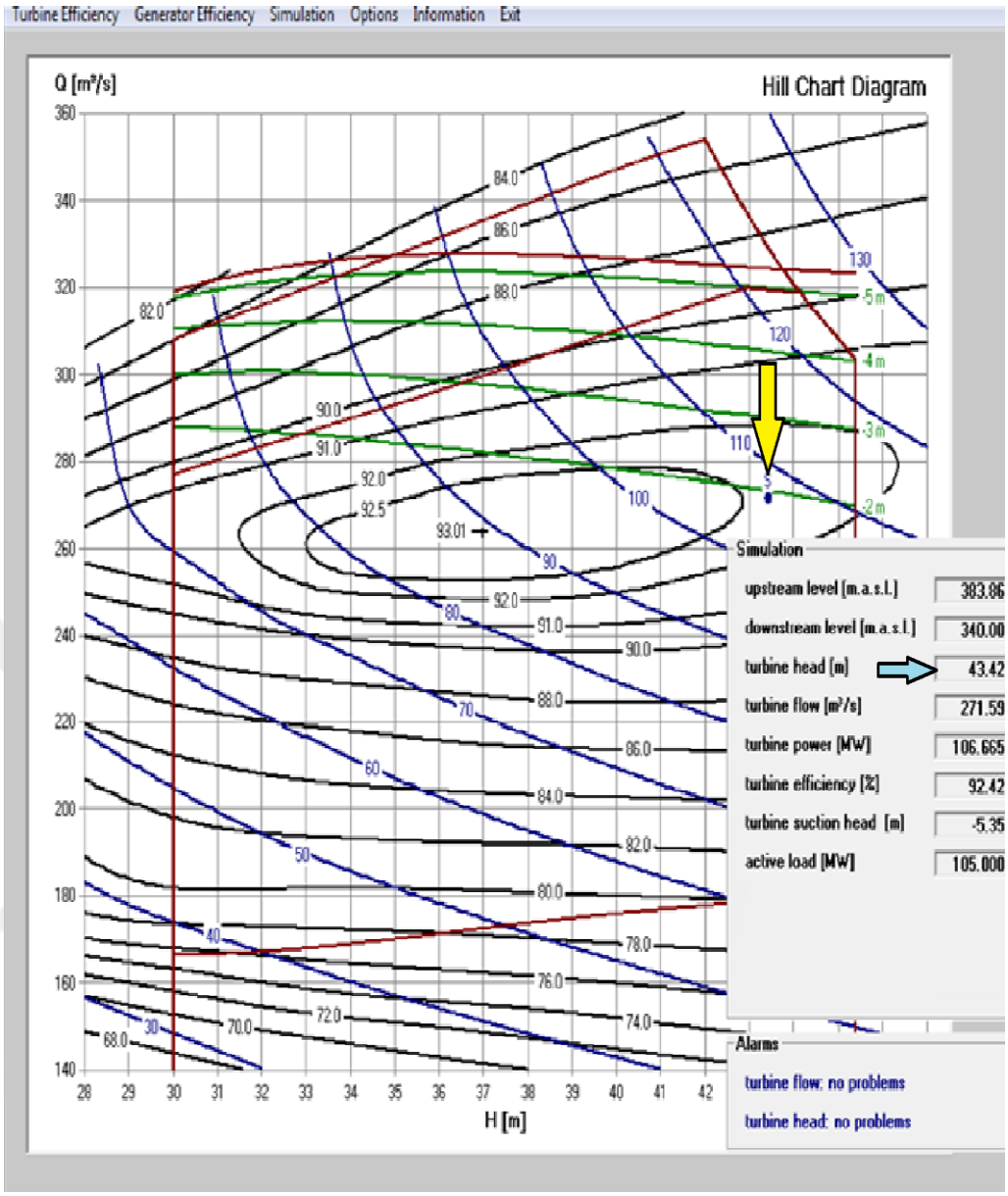
Şeklinde değiştirilmesi durumunda türbinin verimi ve kavitasyon altında çalışıp çalışmadığı Hill Chart diyagramı üzerinde uygulamalı olarak incelenmiş elde edilen

grafiklerde gösterilmiştir. Şekil 4.9.'da emme yüksekliği 7.35 m (Net düşü:41.37 m) olan Francis Tipi türbin verimlilik değeri verilmiştir.



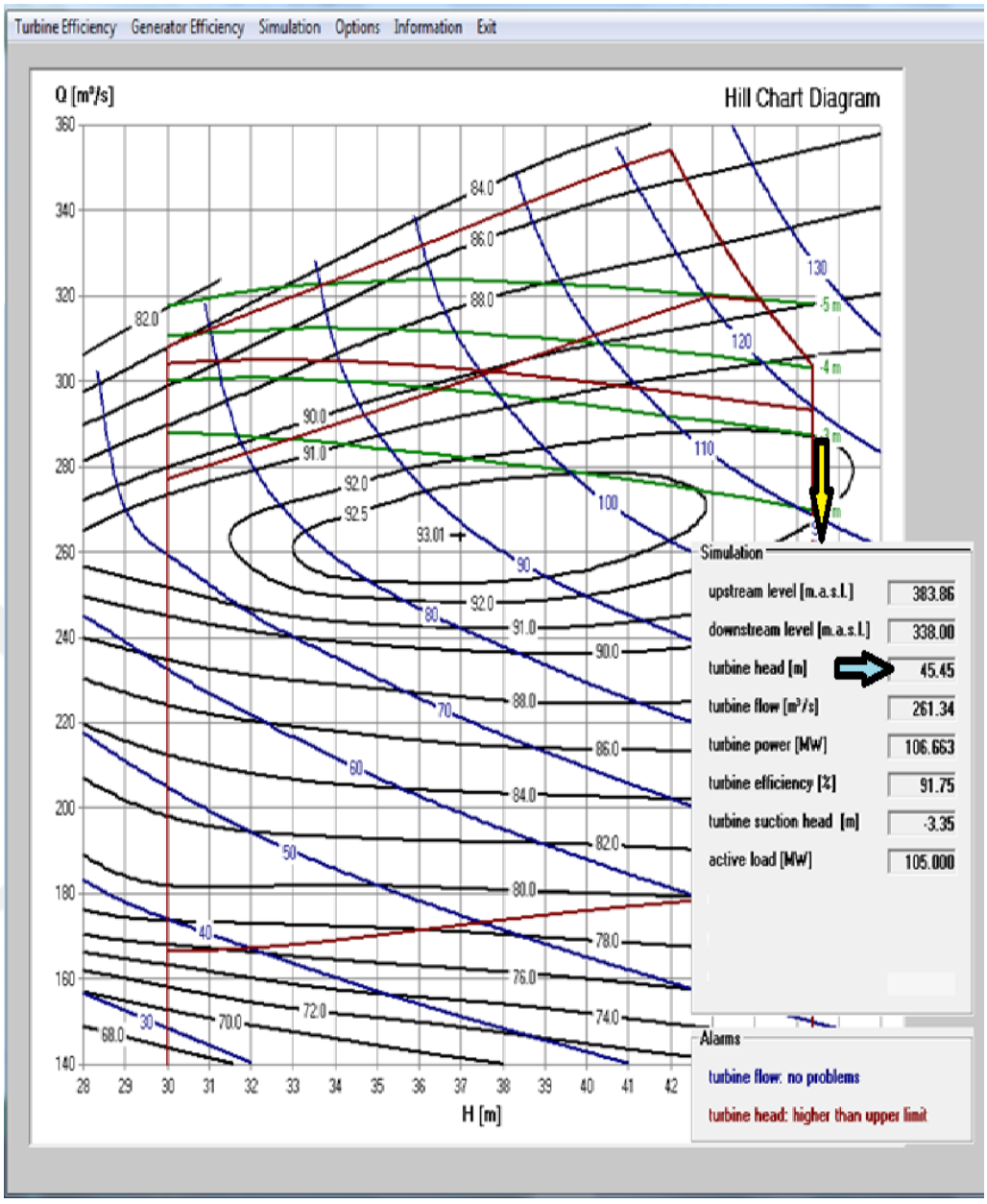
Şekil 4.9. Emme yüksekliği:7.35 m(Net düşü: 41.37 m) Francis Tipi türbin verimlilik değeri

Şekil 4.10.'da emme yüksekliği 5.35 m (Net düşü: 43.42 m) olan Francis tipi türbin verimlilik değeri verilmiştir.



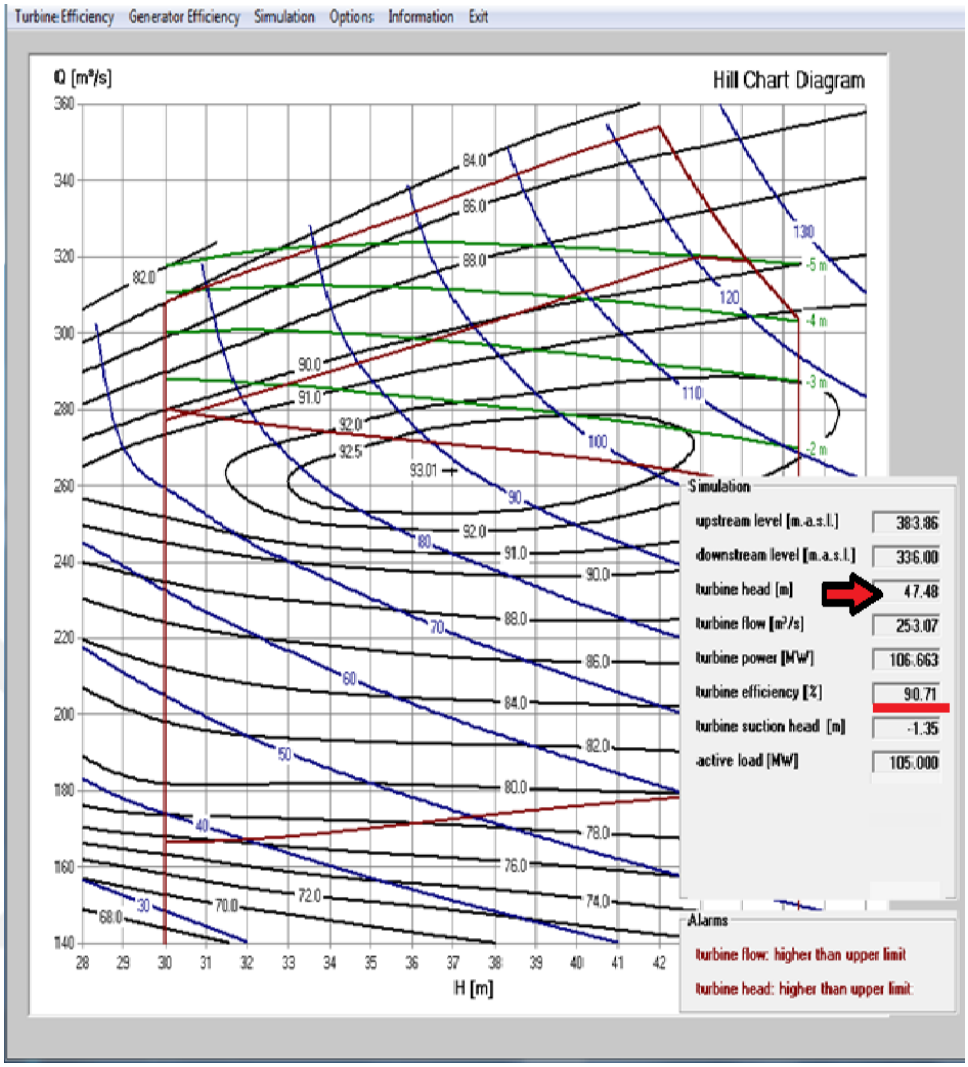
Şekil 4.10. Emme yüksekliği: 5.35 m (Net düşü: 43.42 m) Francis Tipi türbin verimlilik değeri

Şekil 4.11.'de emme yüksekliği 3.35 m (Net düşü: 45.45 m) olan Francis tipi türbin verimlilik değeri verilmiştir.



Şekil 4.11. Emme yüksekliği: 3.35 m (Net düşü: 45.45m) Francis Tipi türbin verimlilik değeri

Şekil 4.12'de emme yüksekliği 1.35 m (Net düşü: 47.48 m) olan Francis tipi türbin verimlilik değeri verilmiştir.



Şekil 4.12. Emme yüksekliği: 1.35 m (Net düşü: 47.48 m) Francis Tipi türbin verimlilik değeri

Hill Chart diyagramlarındaki kırmızı renkli çizgilerin kesişim noktaları arasında kalan alan türbinlerin çalışma aralıklarını, mavi renkli çizgiler MW cinsinden türbin gücünü ve siyah renkli halka şeklindeki çizgiler türbinlerin verim aralıklarını göstermektedir.

1.adım için:

$$n_s = \frac{n}{H_n}\sqrt{\frac{N}{\sqrt{H_n}}} = \frac{107}{41.37}\sqrt{\frac{143041.46}{\sqrt{41.37}}} = 385.707$$

Şekil 3.6. veya Çizelge 3.2.'ye göre Francis tipi türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri;

$\sigma_{kr} = 0.318$ olarak bulunur

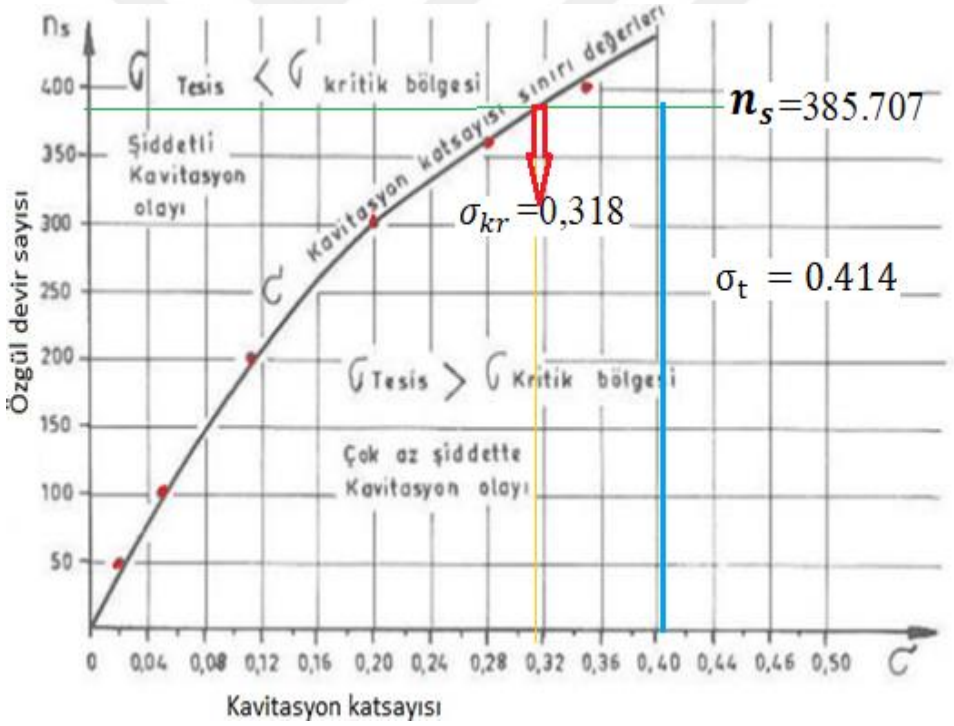
$$H_a = 10.33 - \frac{Z}{900} = 10.33 - \frac{335}{900} = 9.958 \text{ mSS}$$

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

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

$$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} = \frac{9.958 - 0.17 - (-7.35)}{41.37} = 0.414$$

Şekil 4.13.'te emme yüksekliği 7.35 m (Net düşü:41.37 m) olan Francis tipi türbinin kavitasyona maruz kalmadığı görülmüştür.



Şekil 4.13. 41.37 m net hidrolik düşüde çalışan Francis Tipi türbinin kavitasyon bölgesindeki yeri

$\sigma_t = 0.414 \geq \sigma_{kr} = 0.318$ eşitsizliği olduğundan türbinin 1. Adımdaki koşullar altında çalıştırılması durumunda kavitasyona maruz kalmayacağını böylece şekil 4.13'de de teyit etmiş oluruz.

2.adım için:

$$n_s = \frac{\mathrm{n}}{\mathrm{H_n}} \sqrt{\frac{\mathrm{N}}{\sqrt{\mathrm{H_n}}}} = \frac{107}{43.42} \sqrt{\frac{143041.46}{\sqrt{43.42}}} = 363.080$$

Şekil 3.6. veya Çizelge 3.2'ye göre Francis tipi türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri;

σ_{kr} = 0.285 olarak bulunur

$$H_a = 10.33 - \frac{Z}{900} = 10.33 - \frac{335}{900} = 9.958 \text{ mSS}$$

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

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

$$\sigma_\mathrm{t} = \frac{\mathrm{H_a} - \mathrm{H_v} - \mathrm{H_s}}{\mathrm{H_n}} = \frac{9.958 - 0.17 - (-5.35)}{43.42} = 0.348$$

$\sigma_\mathrm{t} \geq \sigma_{\mathrm{kritik}}$ olduğu için türbin kavitasyona maruz kalmamaktadır.

3.adım için:

$$\mathrm{n_s} = \frac{\mathrm{n}}{\mathrm{H_n}} \sqrt{\frac{\mathrm{N}}{\sqrt{\mathrm{H_n}}}} = \frac{107}{45.45} \sqrt{\frac{143041.46}{\sqrt{45.45}}} = 342.923$$

Şekil 3.6. veya Çizelge 3.2.'ye göre Francis tipi türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri;

$\sigma_{\mathrm{kr}} = 0.246$ olarak bulunur

$$H_a = 10.33 - \frac{Z}{900} = 10.33 - \frac{335}{900} = 9.958 \text{ mSS}$$

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

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

$$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} = \frac{9.958 - 0.17 - (-3.35)}{45.45} = 0.289$$

$\sigma_t \geq \sigma_{kritik}$ olduğu için türbin kavitasyona maruz kalmamaktadır.

4.adım için:

$$n_s = \frac{n}{H_n}\sqrt{\frac{N}{\sqrt{H_n}}} = \frac{107}{47.48}\sqrt{\frac{143037.44}{\sqrt{47.48}}} = 324.691$$

Şekil 3.6. veya Çizelge 3.2'ye göre Francis tipi türbine ait özgül hız-kavitasyon katsayısı sınır değeri;

$\sigma_{kr} = 0.238$ olarak bulunur

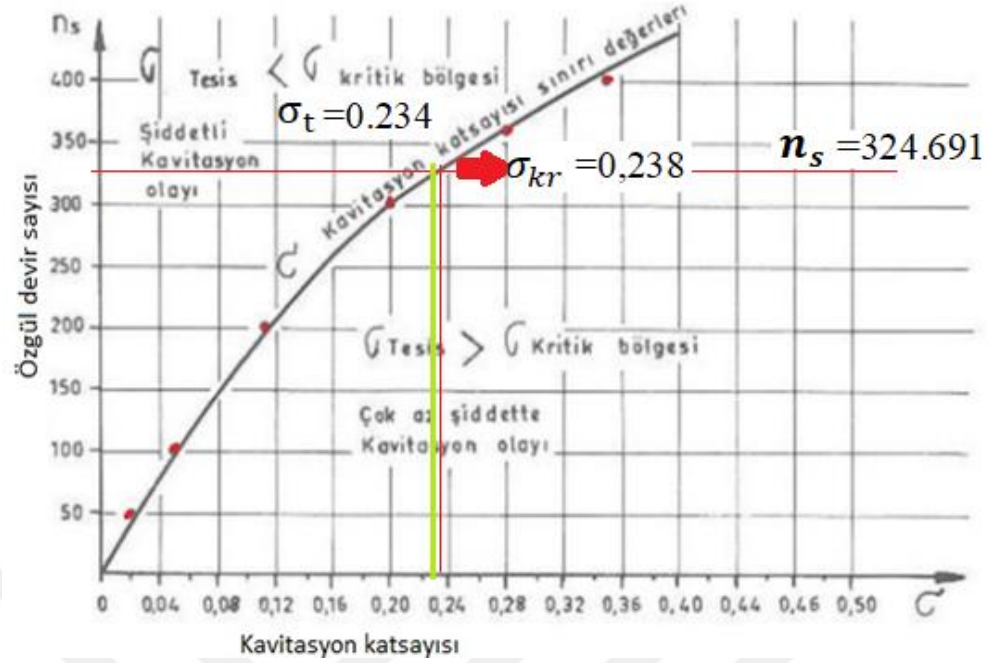
$H_a = 10.33 - \frac{Z}{900} = 10.33 - \frac{335}{900} = 9.958$ mSS

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

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

$$\sigma_t = \frac{H_a - H_v - H_s}{H_n} = \frac{9.958 - 0.17 - (-1.35)}{47.48} = 0.234$$

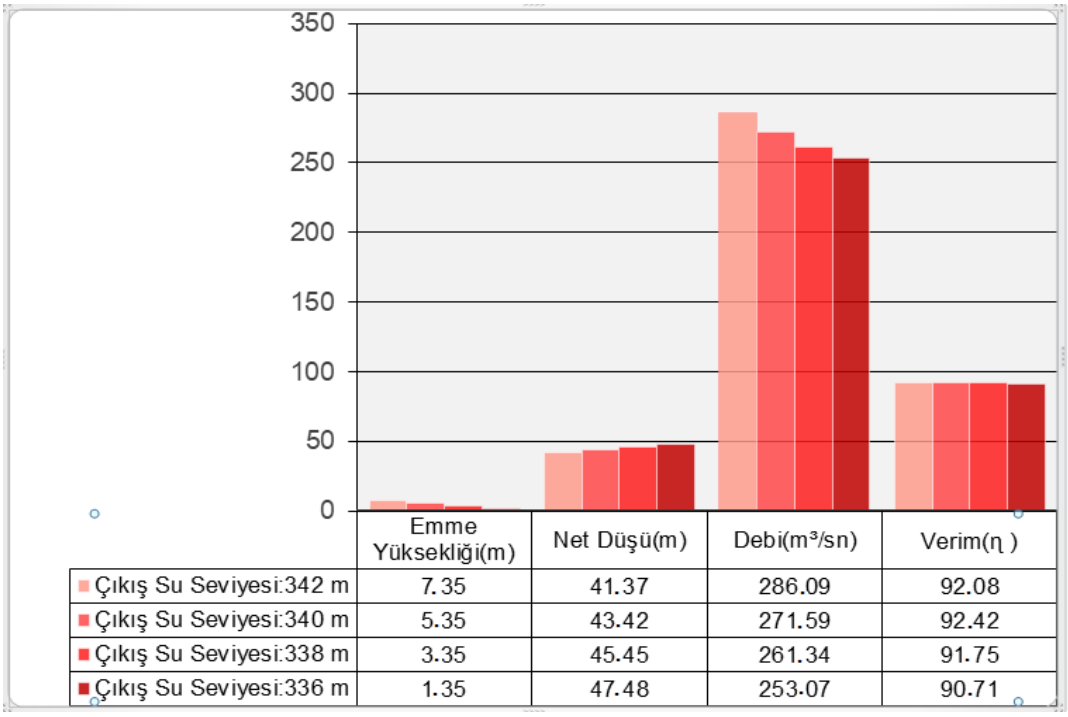
$\sigma_t = 0.234 \leq \sigma_{kr} = 0.238$ eşitsizliği olduğundan türbinin 4. Adımdaki koşullar altında çalıştırılması durumunda kavitasyona maruz kalacağı Şekil 4.14.'de de görüldüğü üzere aşikar bir durumdur.



Şekil 4.14. 47.48 m net hidrolik düşüde çalışan Francis Tipi türbinin kavitasyon bölgesindeki yeri

Yukarıda Hill Chart diyagramlarından elde edilen veriler ışığında Çizelge 4.6.' da ki grafiklere ulaşılmıştır.

Çizelge 4.6. Çıkış Su Seviyesi Değişimine Göre Türbin Verimi



	Emme Yüksekliği(m)	Net Düşü(m)	Debi(m³/sn)	Verim(η)
Çıkış Su Seviyesi:342 m	7.35	41.37	286.09	92.08
Çıkış Su Seviyesi:340 m	5.35	43.42	271.59	92.42
Çıkış Su Seviyesi:338 m	3.35	45.45	261.34	91.75
Çıkış Su Seviyesi:336 m	1.35	47.48	253.07	90.71

Bu grafiklere göre; 1. adımda türbin çıkış su seviyesinin 342 m den 340 m ye düşmesiyle emme yüksekliğinde de 2 m lik bir düşüş gözlenmiş buna rağmen net düşü değeri 2.05 m artmış ve bu durum türbin verimini de artırmıştır. 2. adımda türbin çıkış su seviyesi 340 m den 338 m ye düşmesiyle emme yüksekliğinde de 2 m lik bir düşüş gözlenmiş bu defa da net düşü değeri bir önceki adımın artış miktarına göre azalmış ve bu durum türbin verimini de azaltmıştır. Benzer şekilde 3. adımda ise türbin çıkış su seviyesi 338 m den 336 m ye düşmüş emme yüksekliğinde de 2.10 m lik bir düşüş gözlenmiş ve net düşü değeri bir önceki adım ile aynı artış miktarında artmış ancak emme yüksekliğindeki düşüşün daha yüksek olmasından kaynaklı verim yine düşmüştür. Çizelge 4.6.'da ki grafikleri incelediğimizde türbinin en yüksek verime çıkış su seviyesinin 340 m olduğu anda ulaşılmıştır.

Tüm bu veriler Hill Chart diyagramında incelendiğinde ise çıkış su seviyesi azaldıkça türbin kavitasyon şiddetin adım adım artığı görülmüş ve 336 m altında çalıştırılması durumunda ise aşırı derece kavitasyona maruz kaldığı görülmüş sistemin çalışamayacağı yönünde uyarı vermiştir. Şekil 4.9. ve Şekil 4.10.'da ki çalışma koşulları altındaki türbinin birim zamanda attığı su miktarının azalması nedeniyle emme yükseklikleri azalmış ve bu durum kavitasyon oluşumuna neden olmuştur.

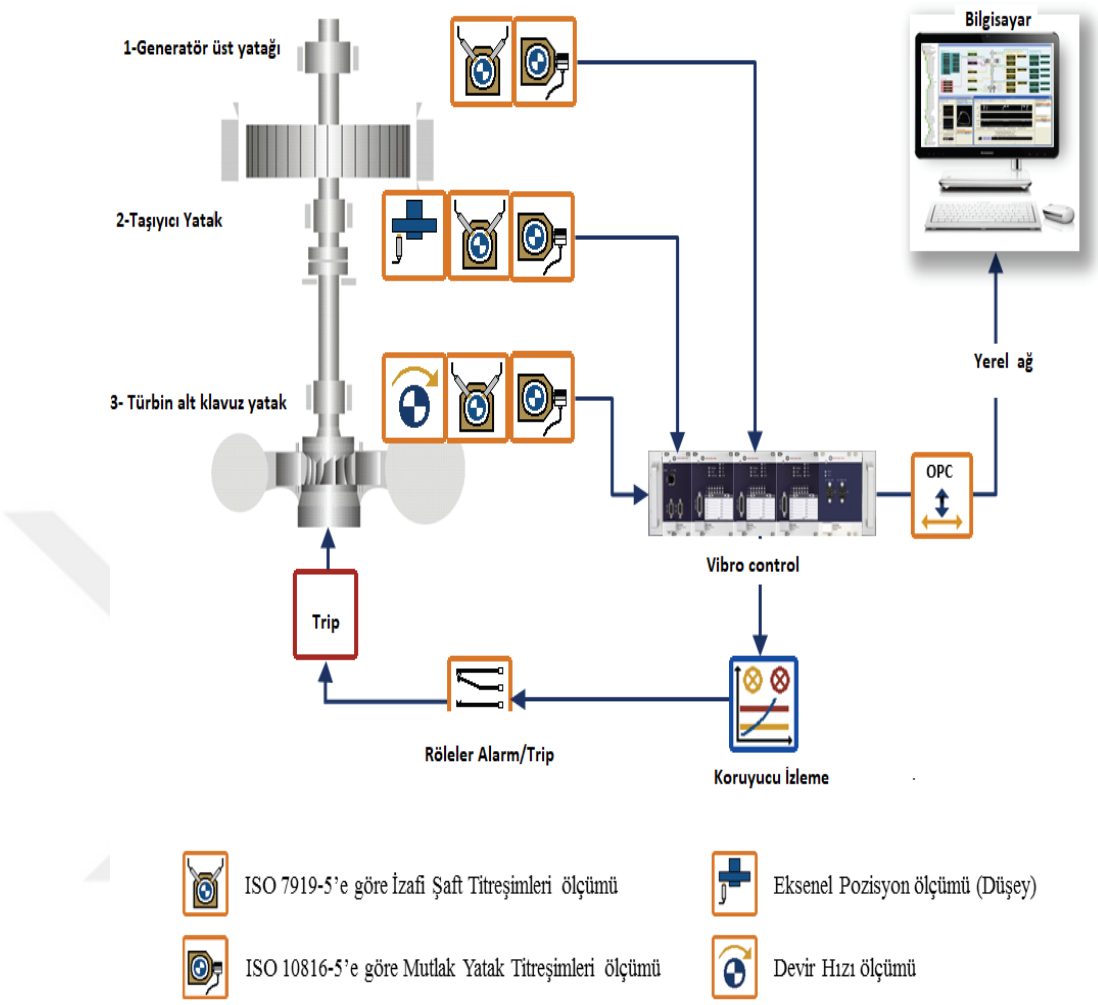
4.4.1. Vibrasyon testi

Sistemin kavitasyon etkisi altında çalışıp çalışmadığını belirlemenin diğer yoluda türbinin belirli noktalarında vibrasyon değerleri ölçülerek elde edilen verilere göre çıkarımda bulunmaktır. Çalışmamızın bu kısmında bir Francis türbinin taşıyıcı yataklarında vibrasyon ölçümü yapılarak kavitasyon etkisinde çalışıp çalışmadığı incelenmiştir. Şekil 4.15.'de vibrasyon ölçümünde kullanılan ekipmanlar verilmiştir.



Şekil 4.15. Vibrasyon ölçümünde kullanılan ekipmanlar

Makinelerde vibrasyon testi ile dalga formu ve FFT spektrum grafikleri analiz edilerek makinenin mevcut durumu hakkında bir fikir yürütülebilir. Hidrolik santrallerde vibrasyon analizi; izafi şaft titreşimi ölçümlerinde (Radyal yataklarda şaft ile yatak arasına monte edilen titreşim, yer değişimi sensörleri kullanılır.) ISO 7919-5 standardına göre, mutlak yatak titreşimi ölçümleri ise (ivme ya da hız ölçen ve makine bloğuna monte edilebilen sensörler kullanılır.) ISO 10816-5 standardına göre yapılmaktadır. Şekil 4.16.'da vibrasyon ölçümünde kullanılan sensörlere ait akış şeması gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Vibrasyon ölçümünde akış şeması

Aşağıda türbinin generatör, taşıyıcı yatak ve alt kılavuz yataklarında ölçümler titreşim hızı cinsinden etkin RMS (Overall RMS) değerleri olarak mm/san birimiyle ölçülerek frekans spektrumundan gösterilmiş ve makinenin çalışma kalite değer aralıkları verilmiştir. Çizelge 4.7.'de makine kalite değerlendirme tablosu gösterilmiştir.

Çizelge 4.7.Makine kalite değerlendirme tablosu

60 dev/dak - 1000 dev/dak Makine Grubu **Generatör Kısmı(1 No'lu ölçüm noktası)** Kalite Değerlendirmesi

✓ 0 – 2.5	mm/s	------	İyi	65	µm
✓ 2.5 – 4.0	mm/s	------	Yeterli	100	µm
✓ 4.0 – 6.4	mm/s	------	Yetersiz	160	µm
✓ 6.4 ve üstü	mm/s	------	Kabul Edilemez		

60 dev/dak - 1000 dev/dak Makine Grubu **Diğer Kısımlar (2 ve 3 No'lu ölçüm noktaları)** Kalite Değerlendirmesi

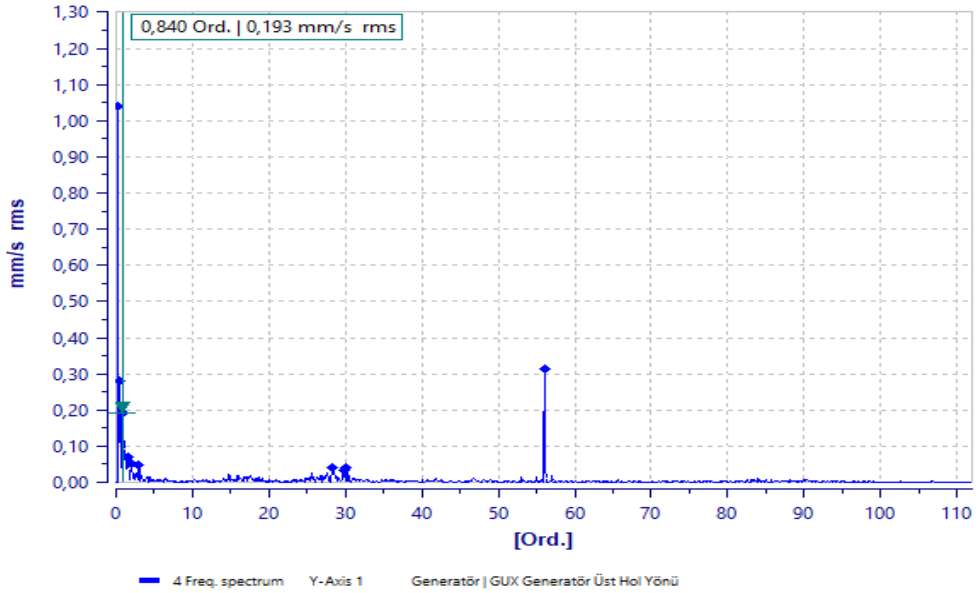
✓ 0 – 1.6	mm/s	------	İyi	30	µm
✓ 1.6 – 2.5	mm/s	------	Yeterli	50	µm
✓ 2.5 – 4.0	mm/s	------	Yetersiz	80	µm
✓ 4.0 ve üstü	mm/s	------	Kabul Edilemez		

Aşağıda türbinin 382.96 m kodunda 105 MW yük altında çalışması durumunda generatör üst yatağında ölçülen vibrasyon değereleri verilmiştir (Çizelge 4.8.).

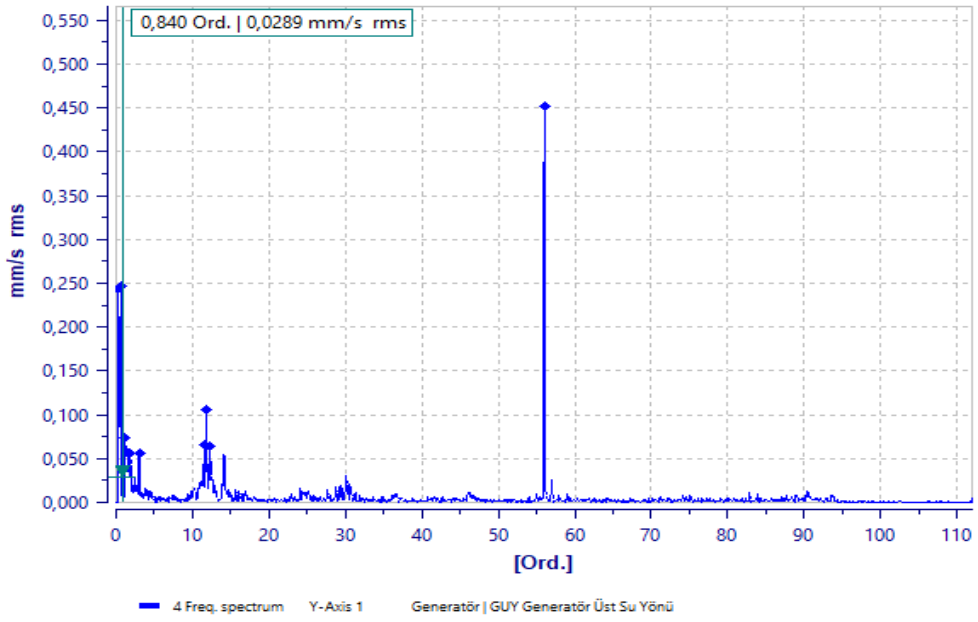
Çizelge 4.8. Generatör üst yatak vibrasyon ölçüm değerleri

Güç:105 MW	Machine: Generatör Üst Yatak	Dönüş Devri: 1,78 Hz
Göl Kotu:382,96 m		
Ölçüm Noktaları	Titreşim Genlik Değeri	Şaft Salınım (Displacement)
	mm/s rms	**µm peak to peak**
GUX Genaratör Üst Hol Yönü	**0.41**	**12.18**
GUY Genaratör Üst Su Yönü	**0.58**	**16,99**
GUZ Genaratör Üst Mil Yönü	**0.80**	

Yapılan ölçümlerde Şekil 4.17.'de generatör üst hol yönünde vibrasyon grafiği, Şekil 4.18.' de ise generatör üst su yönünde ki vibrasyon grafiği elde edilmiştir.

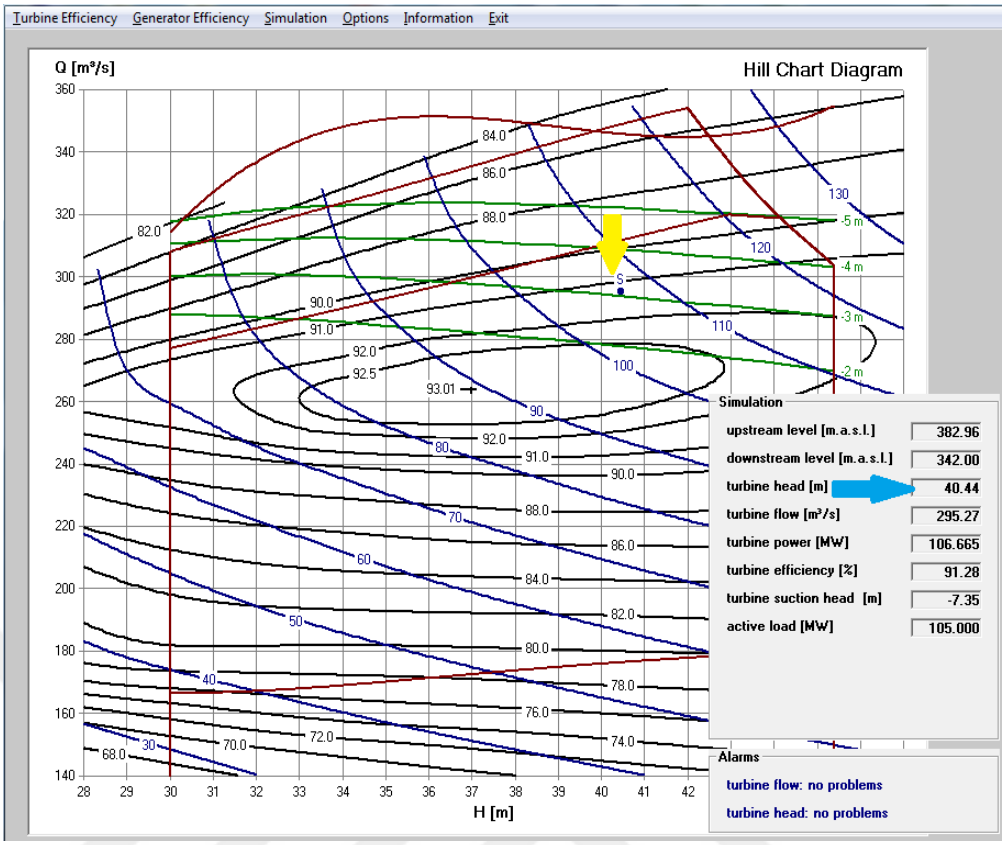


Şekil 4.17. Generatör üst hol yönü vibrasyon grafiği



Şekil 4.18 .Generatör üst su yönü vibrasyon grafiği

Vibrasyon testi sonucu elde edilen değerler incelendiğinde tüm değerlerin 0-2.5 mm/s den küçük olduğu ve makinenin iyi makine bölgesinde çalıştığı sonucuna ulaşılmıştır. Şekil 4.19.'da net düşüsü 40.44 m olan ve 105 MW güç altında çalışan Francis tipi türbinin Hillcard diağramı verilmiştir.



Şekil 4.19. Emme yüksekliği:7.35 m(Net düşü:40.44 m) Francis Tipi türbin verimlilik değeri

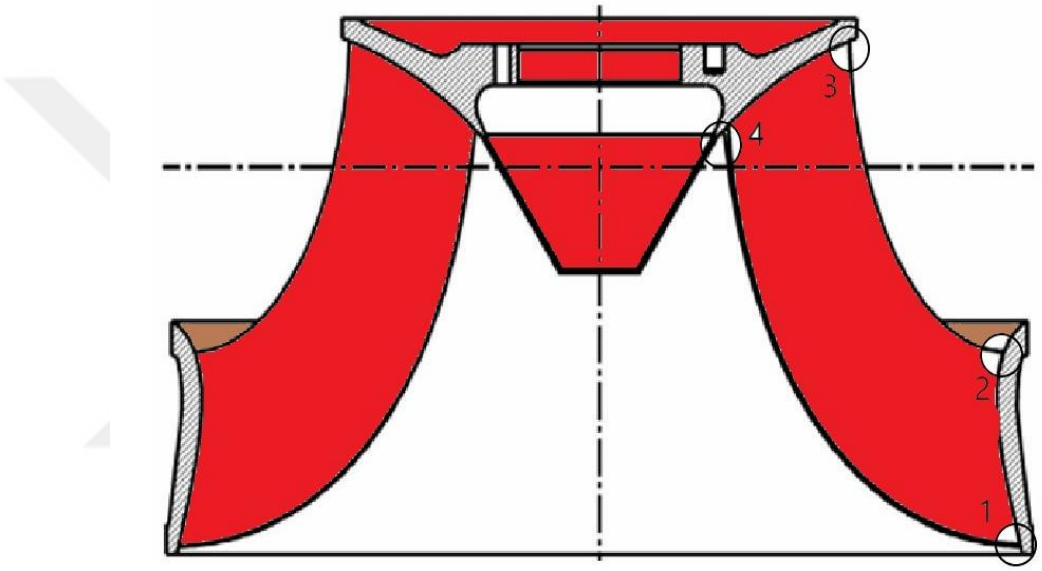
Vibrasyon değerlerinin ölçüldüğü çalışma şartlarında (Türbinin emme yüksekliği 7.35 m ve 105 MW yük altında) Hill chart diyagramındaki veriler de incelendiğinde her iki durumda da kavitasyon olayının yaşanmadığı böylelikle vibrasyon testi sonucunda ki verilerin Hill chart diyagramındaki sonucu doğruladığı görülmüş oldu.

4.5. Türbin Kanadında Kavitasyon Olayının Giderilmesi

Kavitasyon olayı kapalı ortamda hareket halindeki sıvının mutlak basıncının suyun buharlaşma basıncı ile aynı noktaya gelmesi ile ortaya çıkar. Bu noktadan itibaren buharlaşma ve kabarcık (baloncuk) oluşumu ile soğuk kaynama olayı başlar. Bu noktaya kritik basınç seviyesi diyebiliriz. Meydana gelen bu baloncuklar tekrar yüksek basınç noktasına ulaştıklarında baloncuklar aniden yoğuşur ve sonrasında bir nevi mikro düzeyde patlama sonucu büzüşme oluşur. Küçükte olsa bir vakum etkisi

ile çark yüzeylerinde parça kopmaları meydan gelir. Bu küçük kopmaların sürekli ve hızlı bir şekilde olması yüzeylerde derin çukurların oluşmasına (kavitasyon olayına) neden olur.

Bir Francis tipi türbin çark kanadı örneğinde kovitasyon sonucu oluşun oyukları giderilmesi için kaynak dolgu yöntemi kullanılarak yapılan işlemler aşağıda açıklanmıştır. Şekil 4.20.'de Francis tipi bir türbin çarkında kavitasyon olayının sık görüldüğü bölgeler verilmiştir.



Şekil 4.20. Francis tipi türbin çark kanatlarında sıklıkla karşılaşılan kavitasyon bölgeleri

4.5.1. Kaynak ve test işlemleri

Öncelikle kavitasyon olayının yaşandığı kanadın 3 ve 4 numaralı bölgelerde meydana gelen aşınma alanında oyma (yüzeydeki pürüz ve istenmeyen küçük küçük olan çukurların neden olduğu pürüzlerin giderilmesi) yapıldıktan sonra yüzeylerde manyetik ve penetran testleri yapılmıştır. Bu testler kavitasyon veya başka bir nedenden dolayı kanat yüzeyinde olası kılcal çatlakların tespit edilmesi ve varsa bu çatlakların derinliklerinin ölçülerek ilerleyen dönemlerde daha büyük problemlerin önüne geçmek amacıyla yapılır. 3 numaralı bölgedeki çukurun ilk ölçüleri:

Derinlik:3.70 mm

Uzunluk:16 mm

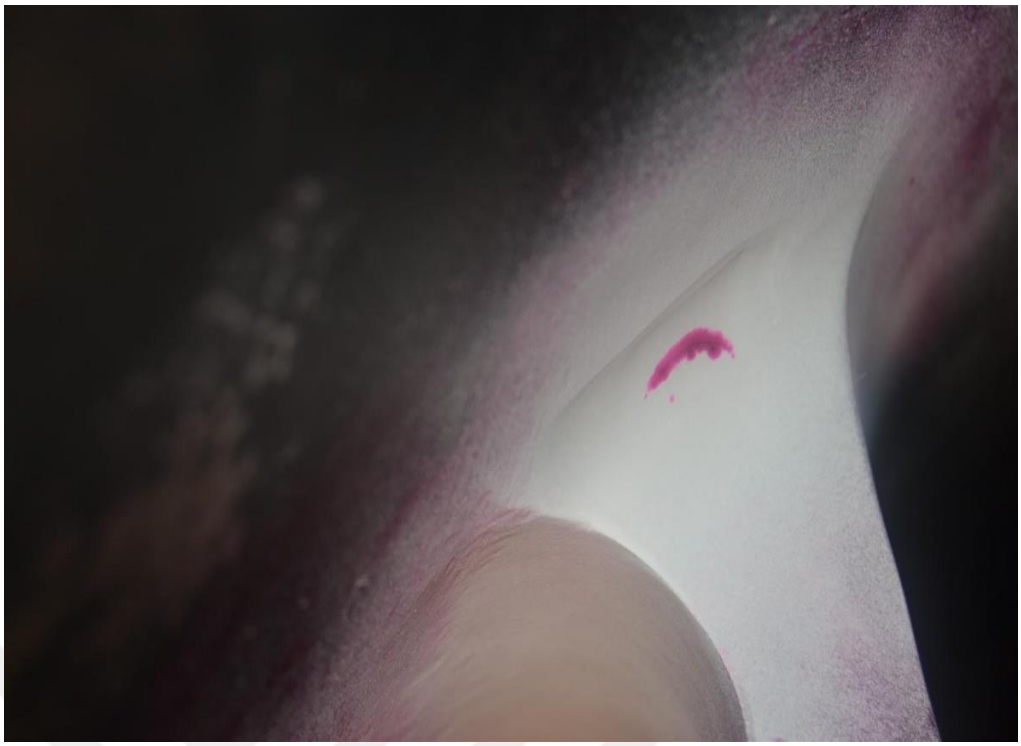
Çukurdaki çatlak: 0.15mm olarak ölçüldü

Şekil 4.21.'de kavitasyona maruz kalmış çark kanat örneği gösterilmiştir.



Şekil 4.21. Çark kanadındaki kavitasyonlu bölgeler

Şekil 4.22.'de kavitasyona maruz kalmış çark kanadının birleşim noktalarında çatlak kontrolü için yapılan penetran testi gösterilmiştir.



Şekil 4.22. Penetran testi yapılan çark kanadındaki görünüm

Yüzey tamamen pürüzsüz hale getirildikten sonra 35 dk süresince çark kanadının 150 ºC kadar ısıtılması işlemi ve yüzeye aşağıda belirtilmiş olan zamanlarda paso paso kaynak işlemi yapılmıştır (Çizelge 4.9.).

Çizelge 4.9. Her bir paso işlemi için ölçülen değerler

Paso Sırası	Zaman	Yüzey Sıcaklığı	Yapılan İşlem
1	16:55	140 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
2	16:58	143 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
3	16:59	134ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
4	17:02	150 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
5	17:03	140 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
6	17:07	143ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
7	17:10	145 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
8	17:12	150 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
9	17:15	148ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
10	17:18	145ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
11	17:21	138 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
12	17:24	140 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
13	17:27	141 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
14	17:30	136ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
15	17:34	142 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
16	17:38	133ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
17	17:40	148 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
18	17:43	135 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
19	17:48	149 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
20	17:53	146 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
21	18:00	142 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
22	18:06	148 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
23	18:09	147 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
24	18:13	149 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
25	18:15	145ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
26	18:17	147ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
27	18:19	148 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme
28	18:21	147 ºC	Kaynak paso ve çekiçleme

Kavitasyona maruz kalan bölgeye yapılan kaynak işlemi Şekil 4.23.'te gösterildiği gibidir.



Şekil 4.23. Çark kanadına uygulana kaynak işlemi

Kaynak işlemi bittikten sonra yüzey 150 ºC ye kadar ısıtıldı ve kanat yüzeylerine izolasyon işlemi yapılarak 48 saatlik soğumaya bırakıldı. Buradaki soğumanın yavaş yavaş olması dikkat edilmesi gereken önemli bir detaydır, aksi takdirde yüzeyde hızlı soğuma olması durumunda, yüzeylerde hızlı ve aşırı bir gerilme meydana gelir böylelikle üst üste binen kaynak pasolarında istenmeyen kaynak atmaları meydana gelir.

Çekiçleme işlemi: Dikkat edilme gereken diğer önemli bir nokta ise her pasodan sonra kaynak teli ile aynı malzeme kalitesine sahip çekiç kullanılmasıdır, aksi durumda çekiç ile yapılan her ezme işleminde yüzeyde çekiçten kalan cüruflar kaynağı kalitesiz bir duruma getirir.

Kaynak işlemi sonucu yüzeydeki cüruf ve pürüzlülükleri gidermek için çark kanadına yapılan taşlama işlemi Şekil 4.24.'te gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Kaynak işlemi sonrası kanat yüzeyinin taşlanması

Şekli 4.25.'te kavitasyondan etkilenen çark yüzeyine yapılan kaynak ve taşlama işlemi sonrası elde edilen görünüm verilmiştir.



Şekil 4.25. Çark kanadının taşlama sonrası görünümü

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmamızda büyük çaplı kavitasyon çalışmaları yapılan santrallerde kavitasyonun meydana getirdiği zararlar, türbin çak kanatlarındaki aşınmalar ve pompalarda meydana gelen kavitasyon olayların oluşum nedenleri detaylı bir şekilde açıklanmaya çalışılmıştır.

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

Hidrolik türbinlerin verimleri, kavitasyon ektisiyle meydana gelen aşınmalardan kaynaklı yük, debi ve vorteks gibi durumlara bağlı olarak bir değişim gösterir. Yaklaşık 50 yıllık bir ömrü olan hidrolik türbinlerde meydana gelen kavitasyon sonucu türbinlerde ≈ %1-2 oranında verim kayıpları ortaya çıkmaktadır. Verimdeki her %1‘lik kayıp milyonlarca lira zarara neden olmaktadır. Ayrıca her bir türbinin kavitasyondan kaynaklı rehabilitasyonlar 30-50 gün arasında değiştiği için bu süre zarfında da enerji üretimi yapılamadığından türbinin üretim kapasitesine göre yüklü miktarda ekonomik kayıplar oluşmaktadır. Bu kapsamda yapılan çalışmalarımızda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır;

1) Keban Hidroelektrik Santralinde 4 adet Francis tipi türbinin maksimum, nominal, minimum ve kritik göl seviyelerinde çalışması durumunda net hidrolik düşülerin azalmasına rağmen özgül devir sayısının daha fazla artması ve çıkış su seviyesinin düşmesiyle türbinin kavitasyon şiddetinini artarak devam ettiği görülmüşütür.

2) Kesik köprü hidroelektrik santralinde 1 ünite 39.63 m net hidrolik düşü altında çalışırken yüklerin artmasıyla çıkış su seviyesi giderek salyangoz orta eksenine yaklaşacak şekilde yükselmiştir. Ancak yükün artış oranı çıkış su seviyesinin artış oranından daha fazla olduğu için kavitasyon sınırlarına yaklaştığı görülmüştür. Örneğin Türbin 42 MW yük altında çalışırken türbinden daha fazla su çıkışı olduğu için çıkış su seviyesi yükselmiş ve salyangoz orta eksenine daha da yaklaştığı görülmüş bu durumda ise Thoma kavitasyon katsayısını artırmıştır. Ancak bu artış 40 MW ta çalışırken ki özgül devir sayısındaki artıştan daha düşük olduğu için 42 MW da çalışırken kavitasyon sınırına daha fazla yaklaştığı görülmüş ve kavitasyon riski artmıştır.

3) Kesik köprü hidroelektrik santralinde çıkış su seviyesi yükseldikçe emme yüksekliğinin azalması, çıkış su seviyesinin salyangoz ana eksen kotundan daha düşük olmasından kaynaklıdır. Bu ise türbinin ilk montaj sırasındaki deniz seviyesi kodundan kaynaklı olup bazı santrallerde ise çıkış su seviyesi salyangoz ana eksenin yukarısında kalacak şekilde projelendirilmiştir, böyle durumda ise emme yüksekliği çıkış su seviyesinin artması ile artar ve kavitasyonun meydana gelme ihtimali azalmış olur.

4) Karakaya Hidroelektrik santralinde ki Francis tipi türbinlerin %100 optimum yükte çalışmaları durumunda türbinlerin kavitasyon etkisinde çalıştığı kavitasyon olayının azalması için ise minimum çıkış su seviyesinin (H_s) salyangoz orta ekseninden 5.54 m yüksek olması gerektiği sonucuna ulaşılmıştır.

Hidrolik türbinlerde kavitasyondan kaynaklı şu zararlı etkiler ortaya çıkmaktadır;

1) Türbine ait ayar kanatları ve rotor kanatları arasında kavitasyona sebep olan düşük basınçlı hacimcikler nedeni ile enine kesit daraldığı için birim zamanda geçen su azalmakta ve bu durum üretim gücünü düşürmektedir.

2) Kavitasyon olayının meydana gelmesinden kaynaklı türbin ve generatör

şaftında, türbin rotorunda, türbin yataklarında salınımlar ve vibrasyonlar meyda getirmektedir.Meydana gelen bu vibrasyonlar zamanla türbine ait klavuz yatkların bozulmasına ve kullanılamaz bir hale gelmesine neden olmaktadır.

Kavitasyon olayını minimum düzeye indirmek için aşağıdaki kıstaslara dikkat etmek gerekir;

1) Hidroelektrik santral tesislerinin ilk yapım aşamasında türbin salyangoz orta ekseninin, olabildiğince derinde ve çıkış su seviyesinin altında olacak şekilde yerleştirilmesine dikkat etmek gerekir.

2) Yapımı uzun yıllar önce tamamlanmış ve çıkış su kanalı yanlış inşa edilmiş santrallerdeki çıkış suyunun önüne net düşüden ve güçten kayıplar oluşturmayacak şekilde çıkış suyunun atıldığı noktadan belirli bir mesafeden sonra set çekerek çıkış su seviyesi yükseltilmelidir.

3) Türbinin devir sayısını ve net hidrolik düşü değerlerini büyük, özgül devir sayısını düşük tutmak gerekir.

4) Türbin çark kanatlarının kavitasyon ve korazyon olaylarına karşı dayanıklılık gösteren yüksek Cr-Ni alaşım içeren paslanmaz çelikten imal edilmesi gerekir. Aksi durumda kavitasyona maruz kalacak olan kanat yüzeylerinde sık periyotlarla kaynak yapılacak veya epoksi reçinelerle aşınan kısımların doldurulacaktır. Bu ise toplamda daha fazla ekonomik ve zaman kayıpları oluşturacaktır.

5) Türbinleri kavitasyon sınırları içerisinde çalıştırmamak bunun için olabildiğince nominal yük altında nominal düşüde çalıştırmak gerekir.

6) Göl seviyesinin değişmesine bağlı olarak türbinleri mevcut hidrolik düşü değerine göre en iyi verimde çalışması gereken optimum yükte çalıştırmak ve kritik düşelerin altında çalıştırmamak gerekir.

7) Türbini nominal yük altında çalıştırmak zorunda kalındığında emme borusunu açık hava ile irtibatlandırmak gerekir.

8) Herşeye rağmane meydan gelen kavitasyon sonucu oluşan aşınmaları gidermek için yapılan revizyonlarda kanatların formunu bozmamak gerekir.

5.2. Öneriler

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

KAYNAKLAR

AVELLAN, F., 2004. Introduction to Cavitation in Hydraulic Machinery. The 6th International Conference on Hydraulic Machinery and Hydrodynamics, October 21 – 22, Timisoara, s:11-22.

BAŞEŞME, H., 2003. Hidroelektrik Santraller ve Hidroelektrik Santral Tesisleri. Elektrik Üretin Anonim Şirketi, Ankara, 716s.

CARLTON, J., 2007. Marine propellers and propulsion, Elsevier Ltd, USA, 533s.

CHOI, K. J., JAYAPRAKASH, A., and CHAHINE, G. L. (2012). Scaling of cavitation erosion progression with cavitation intensity and cavitation source, Wear, Vol.278-279, p.53–61.

ÇAKIR V., 2016. Sualtı Akıntı Türbin Kanatlarına Uygun Süperkavitasyon Yapan Hidrofoil Kesitlerinin Hidrodinamik Performanslarının Sayısal Olarak İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul, 71s.

EKINCI, S., ve ÇELEBI, U.B., 2005. Gemi Pervanelerinde Kavitasyon. Gemi Mühendisliği ve Sanayimiz Sempozyumu, 24-25 Aralık, İstanbul, s.11-16.

ESCALERA, X., EGUSQUIZAA, E., FARHATB, M., and COUSSIRATA, M. 2004. Detection of Cavitation in Hydraulic Turbines, Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006), Spain, 983–1007p

GREKULA, M., and BARK, G.2001. Experimental Study of Cavitation in a Kaplan Model Turbine Chalmers University of Technology, Göteborg, 1-8p.

JAHANNI, M., 2011. Cavitation Effects on Stability, Economic Life and Performance of Hydraulic Structures, İstanbul Technical University, Institute of Science and Technology, M.Sc. Thesis, İstanbul, 121p.

KAYA, M., 2013. Pompalarda Kavitasyon ve Öngörme Yöntemleri, VIII. Pompa ve Vana Kongresi,2-4 Mayıs,Cilt I, İstanbul, s.1-12.

KELEŞ, H., 2016. Pompa Çarkı Malzemesi Nikel Alüminyum Bronza Uygulanan Sürtünme Karıştırma Prosesinin Malzemenin Kavitasyon Direncine Etkisi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Trabzon, 133s.

KHURANA, S., and SINGH, H., 2012.Effect of Cavitation on Hydraulic Turbines-A Review International Journal of Current Engineering and Technology ISSN 2277 – 4106, Baddi, 172-176p.

KUIPER, G,. 2012. Sheet Cavitation, Cavitation in Ship Propulsion. 36-44 p

MROWEC, S., WERBER, T., and ZASTAWNIK, M., 2004. The mechanism of high temprerature sulphur corrosion of nicel chromium alloys. School of Mining and Metallurgy, Cracow, 47-58p.

NURŞEN, C.E., 2011. Santrifüj Pompalarda Kavitasyon Problemi ve Maksimum Emme Yüksekliği (MEY) Hesabı. VII. Pompa ve Vana Kongresi, 28-30 Nisan İstanbul, s.1-6

PARAGBHAI G.P., 2015. Study of cavitation in Francis turbine for small hydro power plants, Indian Institute of Tecnology Roorkee, Alternate Hydro Energy Centre, İndia, 1-8 p.

SAV, M., 2010. Francis Tipi Hidrolik Türbinlerde Kavitasyonun Etkisi, Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Elazığ, 71s.

SAÇMA, S., ESKİKALE, T., ve ORHON, B. E., 2018. Francis Türbinlerde Döner Girdap Halatının Titreşim Ölçümleriyle Belirlenmesi, Mühendis ve Makina Dergisi, Cilt 59, Sayı 691, Ankara, s.71-84,

WILLIAM, D., 1989. Turbine Repair, Facilities Engineering Branch Engineering Division Denver Office Denver, Colorado, 63p.

YAMAMOTO, K., MULLER, A., FAVREL, A., and LANDRY, C. 2017. Experimental evidence of inter-blade cavitation vortex development in Francis turbines at deep part load condition, Laboratory of Hydraulic Machines Lausanne, p.1-14

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı **:** Mehmet Ergün GÖGEBAKAN

Uyruğu **:** T.C.

Doğum Yeri ve Tarihi **:** GAZİANTEP/KARKAMIŞ 07.10.1987

Telefon **:** 0536 684 22 77

e-mail **:** ergungogebakan@hotmail.com

EĞİTİM

Derece	**Adı, İlçe, İl**	**Bitirme Yılı**
Lisans	: Karadeniz Teknik Üniversitesi, Merkez, Trabzon	2012
Yüksek Lisans	: Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Haliliye, Şanlıurfa	2019

İŞ DENEYİMİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
2012-2013	Mennan Manika Ltd. Şti.	Tasarım-Üretim Mühendisi
2013-2015	Şireci Tekstil A.Ş.	Makine Bakım Mühendisi
2015-2018	EÜAŞ Karakaya HES	Makine Bakım Mühendisi
2018-halen	EÜAŞ Birecik-Nizip HES	Makine Bakım Mühendisi

UZMANLIK ALANI : ENERJİ

YABANCI DİLLER : İNGİLİZCE