

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**BİR FRANCİS TÜRBİN PERFORMANSININ, HESAPLAMALI
AKIŞKANLAR DİNAMİĞİ VE SAHA VERİMLİLİK ÖLÇÜMLERİYLE
İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yağmur Tuğba ÜNAL

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selin ARADAĞ

TEMMUZ 2020

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, alıntı yapılan kaynaklara eksiksiz atıf yapıldığını, referansların tam olarak belirtildiğini ve ayrıca bu tezin TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlandığını bildiririm.

Yağmur Tuğba ÜNAL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİR FRANCİS TÜRBİN PERFORMANSININ, HESAPLAMALI AKIŞKANLAR DİNAMIĞI VE SAHA VERİMLİLİK ÖLÇÜMLERİYLE İNCELENMESİ

Yağmur Tuğba ÜNAL

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selin ARADAĞ

Tarih: Temmuz 2020

Hidroelektrik santrallerde elde edilen elektrik enerjisi, öncelikle akan suyun enerjisinin hidrolik türbin yardımıyla mekanik enerjiye çevrilmesi sonrasında jeneratör yardımıyla bu mekanik enerjisinin elektrik enerjisine dönüştürülmesiyle elde edilir. Hidrolik türbinler ile ilgili literatüre bakıldığında Francis tipi, Kaplan tipi ve Pelton tipi başta olmak üzere çeşitli hidrolik türbin tipleri bulunduğu görülür. Debi, düşü ve enerji üretim büyüklüğü gibi santral çalışma koşulları belirlendikten sonra bu değerlere uygun türbin tipi seçilir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan türbinler Francis tipi türbinlerdir. Karmaşık kanat geometrisi olan çark, Francis tipi türbinlerdeki en önemli parçadır. Suyu yönlendirebilmesi ve istenen performans değerini sağlaması açısından çark kanatları dönüşlü ve değişken üç boyutlu bir profile sahiptir. Karmaşık yapıdaki çark kanadı profili ve genelde bu profillerin şirketlerin gizli bilgisi olması, bu profillere erişimi kısıtlar. Teknik resim verilerinden ise çarkın tüm geometrisi elde edilemez. Dolayısıyla, hidroelektrik santrallerde yapılacak olan rehabilitasyon çalışmalarında mevcut çark, tarama yardımıyla tersine mühendislik yapılarak çark geometrisi elde edilmeye çalışılır. Bunun yanında, geometri elde edildikten sonra meridyonel görünüm, kanat açılarının dağılımı ve

kanat kalınlık dağılımları gibi kanat tasarım değişkenlerinin de elde edilmesi gerekir. Bu parametreler elde edildikten sonra ortaya çıkan kanat yapısıyla Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) ile doğrulama analizlerinin de yapılması gerekmektedir. Bu alışmada, Altınkaya Hidroelektrik Santralinde, Romer Absolute Arm portatif lazer tarayıcı ile sahada trbın parçalarının taranması, 3 boyutlu nokta bulutunun elde edilmesi, bu nokta bulutundan katı modellerin elde edilmesi, çark ve diğer aksamaların matematiksel modelinin oluşturulması, tüm türbine ait kararlı ve kararsız HAD analizlerinin yapılması, verim tepe diyagramı ile diğer çalışma özelliklerinin belirlenmesi ilk aşaması olarak belirlenmiş ve bu işlemler sırasıyla gerçekleştirilmiştir. Daha sonra saha verim ölümü yapılarak, yapılan bu lmler Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemiyle elde edilen sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Sayısal yöntemlerle elde edilen tepe diyagramı ile saha ölümleri karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Francis tipi su türbini, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Tersine Mühendislik

ABSTRACT

Master of Science

INVESTIGATION OF A FRANCIS TURBINE PERFORMANCE USING CFD AND SITE EFFICIENCY MEASUREMENTS

Yağmur Tuğba ÜNAL

TOBB University of Economics and Technology
Institute of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Science Programme

Supervisor: Prof. Dr. Selin ARADAĞ

Date: July 2020

The mechanical energy is converted into electrical energy with the help of a generator, after converting the energy of the flowing water into mechanical energy with the help of a hydraulic turbine in hydroelectric power plants. The turbine type that is mostly used is Francis type turbines. The runner with its complex blade geometry is the most important part of Francis turbines. The runner blades have a rotating and variable three-dimensional profile to direct the water and provide desired performance. The complicated runner blade profile and the fact that these profiles are confidential information of companies, restrict access to these profiles. The full geometry of the runner cannot be obtained from technical drawing data. Therefore, in rehabilitation works to be carried out in hydroelectric power plants, the existing runner is reverse engineered with the help of laser scanning. In addition, after obtaining geometry, blade design variables such as meridional profile, distribution of blade angles and blade thickness distribution should be obtained. After these parameters are acquired, verification analysis should also be made with Computational Fluid Dynamics (CFD) with the blade structure that was formed. In this thesis, in Altinkaya Hydroelectric Power Plant, turbine parts are scanned in the

field with the help of laser scanning, obtaining a 3D point cloud. Forming solid models from this point cloud, creating the mathematical model of the runner and other parts, making steady and unsteady CFD analysis of the whole turbine, with the Hill chart diagram are the other parts of the process utilized in this work. Site efficiency measurements were made, and these measurements were compared with the results obtained by the Computational Fluid Dynamics (CFD) method. The Hill chart obtained by numerical methods were compared with site measurements.

Keywords: Francis type water turbine, Computational Fluid Dynamics, Reverse Engineering



TEŞEKKÜR

Yaptığım çalışmalarda yaptıkları yardımlar ve bana kattıkları bilgiler için danışman hocalarım Prof. Dr. Selin ARADAĞ ve Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU'na teşekkür ederim.

Tez jürisi üyeleri Dr. Öğr. Üyesi Sıtkı USLU ve Dr. Öğr. Üyesi Ülkü Ece AYLI İNCE hocalarıma zaman ayırıp tezimi değerlendirdikleri ve jürimde buldukları için teşekkür ederim.

Tez yazım sürecinde destekleriyle yanımda olan ofis arkadaşlarım Fevzi BÜYÜKSOLAK, Burak ALTINTAŞ, Kübra Asena GELİŞLİ ve Özgür ÇÖLLÜ'ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca desteklerini hiç esirgemeyen, ellerinden geleni yapıp benim yanımda olan annem Yücel ÜNAL ve babam Fahrettin ÜNAL'a çok teşekkür ederim. Güzel günlerin yanı sıra zor günlerimizde de birlikte olduğumuz kardeşlerim Ahmet Yasin ÜNAL ve Duru ÜNAL'a, eşim Melih ŞAHAN'a çok teşekkür ederim.

Tez çalışmalarımı tamamladığım TOBB ETÜ Su Türbini Tasarım ve Test Merkezi altyapısının oluşturulmasındaki maddi desteği sebebiyle, Kalkınma Bakanlığı'na teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasında sağladığı burs ile katkıda bulunan TOBB ETÜ'ye ve 113G109 no'lu TÜBİTAK projesine teşekkür ediyorum.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xvii
KISALTMALAR	xviii
SEMBOL LİSTESİ	xix
1. GİRİŞ	1
1.2. Literatür Araştırması.....	1
1.2.1. Francis tipi su türbinleri.....	6
2. TERSİNE MÜHENDİSLİK	9
2.1. Tarama İşlemi.....	10
2.2. Türbin Parçalarının Geometrilerinin Hazırlanması	12
3. HAD ANALİZİ VE SAHA VERİMLİLİK ÖLÇÜMÜ	21
3.1. Korunum Denklemleri	21
3.2. Türbülans Modeli	22
3.3. Ayırıklaştırma Yöntemi ve Adveksiyon Şeması	23
3.4. Sınır Koşulları	23
3.5. Sayısal Çözüm Ağı	24
3.5.1. Çözüm ağı üretimi	24
3.5.2. Çözüm ağı bağlantısı	28
3.6. Simülasyon Yöntemi	28
4. SONUÇLAR	33
4.1. Kararlı Hal Analizi	33
4.1.1. Salyangoz ve sabit kanat HAD sonuçları.....	34
4.1.2. Ayar kanadı HAD sonuçları.....	35
4.1.3. Çark HAD sonuçları	37
4.1.4. Emme borusu HAD sonuçları	38
4.1.5. Tüm türbin kararlı HAD sonuçları	40
4.2. Zamana Bağlı HAD Sonuçları	53
4.2.1. Zamana bağlı hidrolik özelliklerin değerlendirilmesi.....	56
4.2.1.1.Salyangoz	62
4.2.1.2.Ayar Kanadı	63
4.2.1.3.Çark.....	66
4.2.1.4.Emme Borusu	69
5. DEĞERLENDİRME	75
KAYNAKLAR	79
ÖZGEÇMİŞ	82

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1: Francis türbini bileşenleri.	7
Şekil 2.1: Tarama sonucunda elde edilen çark nokta bulutu.	10
Şekil 2.2: Tarama sonucunda elde edilen ayar kanadı nokta bulutu.	11
Şekil 2.3: Tarama sonucunda elde edilen sabit kanat nokta bulutu.	12
Şekil 2.4: Rout ve R.	13
Şekil 2.5: Salyangoz katı modeli.	14
Şekil 2.6: Ayar kanadı katı modeli.	14
Şekil 2.7: a) Tarama b) Tersine Mühendislik c) Üst üste binmiş kanatlar.	16
Şekil 2.8: Emme borusu katı modeli.	18
Şekil 2.9: Çark çıkışı ile emme borusu girişi arasındaki konik yapı.	18
Şekil 2.10: Altinkaya HES'in tüm türbin görünümü.	19
Şekil 3.1: Salyangoz ve sabit kanat çözüm ağı.	25
Şekil 3.2: Çark çözüm ağı.	26
Şekil 3.3: Emme borusu çözüm ağı.	26
Şekil 3.4: Türbin bileşenlerine ait çözüm ağı çalışması.	27
Şekil 3.5: Altinkaya HES ilk kurulduğundaki Debi – Güç grafiği [30].	31
Şekil 4.1: Altinkaya HES tepe diyagramı.	34
Şekil 4.2: Salyangoz çıkışında meridyonel ve çevresel hız dağılımları.	35
Şekil 4.3: Salyangoz orta kesitinde basınç dağılımı.	35
Şekil 4.4: 18° ayar kanadı açıklığında a) hız vektörleri b) basınç konturları.	36
Şekil 4.5: Çark basınç dağılımı.	37
Şekil 4.6: Çark kanadının a) üzerindeki akış çizgileri b) hız vektörleri c) basınç dağılımı.	38
Şekil 4.7: Emme borusu düzlemleri.	39
Şekil 4.8: Emme borusu basınç dağılımı a) düzlem 1 b) düzlem 2 c) düzlem 3.	40
Şekil 4.9: Emme borusu akış çizgileri a) yandan görünüm b) üstten görünüm.	40
Şekil 4.10: Tepe diyagramı için HAD değerleri.	41
Şekil 4.11: Altinkaya HES için en yüksek verim ve garanti sonuçlar tepe diyagramı.	42
Şekil 4.12: Türbin çalışma aralığı.	43
Şekil 4.13: 116 m düşü için farklı ayar kanadı açıklıklarında Thoma sayısı dağılımı a) 20.9° b) 22° c) 20° d) 18° e) 14° f) 10°.	45
Şekil 4.14: 116 m düşü için kanadın farklı konumlarında Thoma sayısı dağılımı ve saha fotoğrafları.	46
Şekil 4.15: 116 m düşü ve 20.9° ayar kanadı açıklığında çarkın basınç dağılımı.	47
Şekil 4.16: 116 m düşü ve 20.9° ayar kanadı açıklığında akış çizgileri ve hız vektörleri.	47
Şekil 4.17: %99 yükleme için taçtan bileziğe çevresel hız dağılımı.	48
Şekil 4.18: %99 yükleme için taçtan bileziğe meridyonel hız dağılımı.	48
Şekil 4.19: %99 yükleme için emme borusu hız eğrileri.	49
Şekil 4.20: 116 m için yükleme verim eğrisi.	50
Şekil 4.21: Farklı düşülerde üretilen güç verim eğrileri.	51
Şekil 4.22: Farklı düşülerde üretilen güç debi eğrileri.	51

Şekil 4.23: 116 m için debi verim grafiği ile tasarım noktası ve en yüksek verim noktası.....	52
Şekil 4.24: 116 m’de farklı ayar kanadı açıklıkları için basınç dağılımı a)10° b)14° c)18° d)20° e)20.9° f)22°.....	53
Şekil 4.25: Zamana bağlı analizlerin noktaları.	55
Şekil 4.26: Emme borusu gözlem noktaları.	56
Şekil 4.27: Salyangoz gözlem noktaları.	57
Şekil 4.28: Çark gözlem noktaları.	57
Şekil 4.29: Zamana bağlı verim ve tork dalgalanması.	58
Şekil 4.30: 116 m düşü ve 20.9° açıklıkta çarktaki iki nokta için basınç dalgalanmaları.	59
Şekil 4.31: 116 m düşü ve 20.9° açıklıkta ayar kanadında basınç dalgalanması.	60
Şekil 4.32: 116 m düşü ve 20.9° açıklıkta salyangozda basınç dalgalanması.	60
Şekil 4.33: 116 m düşü ve 20.9° açıklıkta emme borusunda basınç dalgalanması.	61
Şekil 4.34: Salyangoz için FFT analizi.	63
Şekil 4.35: Ayar kanadı için FFT analizi.	64
Şekil 4.36: Sabit kanat ile ayar kanadı arasındaki basınç değişimi.	65
Şekil 4.37: Türbin basınç dağılımı.	65
Şekil 4.38: Çark basınç tarafı FFT analizi.	67
Şekil 4.39: Çark emme tarafı FFT analizi.	68
Şekil 4.40: Kanatlar arası girdap yapısı (t=1.8 s).	69
Şekil 4.41: Kanatlar arası girdabın tamir edildiğini gösteren saha görseli.	69
Şekil 4.42: Emme borusu FFT analizi.	71
Şekil 4.43: Tasarım noktasında emme borusu hız dağılımı ve girdap yapısı.	71
Şekil 4.44: Tasarım noktasında emme borusu basınç dağılımı.	72
Şekil 4.45: a) kararlı halde b) kararsız halde çark için mutlak basınç dağılımları.	73
Şekil 4.46: a) kararlı halde b) kararsız halde salyangoz için mutlak basınç dağılımları.	73
Şekil 5.1: Altınkaya HES için HAD çalışmaları süreç diyagramı.	75

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Altınkaya HES türbin teknik özellikleri.	9
Çizelge 2.2: Salyangoz ölçüleri.	13
Çizelge 2.3: Tersine mühendislik ile tarama kanatlarının arasındaki fark.	17
Çizelge 3.1: Türbin bileşenlerinin çözüm ağı bilgileri.	28
Çizelge 3.2: En Yüksek Verim Değerinde Performans Test Sonuçları.	31
Çizelge 4.1: Garanti noktalar ve en yüksek verim noktası değerleri.	42
Çizelge 4.2: HAD ile Altınkaya türbin performans değerleri.	49
Çizelge 4.3: Geçiş frekansları.	62
Çizelge 4.4: Kararlı hal ve zamana bağlı durumların performans karşılaştırması.	72

KISALTMALAR

IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
TOBB ETÜ	: Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
TÜBİTAK	: Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu
MİLHES	: Hidroelektrik Santral Bileşenlerinin Yerli Olarak Tasarımı ve Üretimi
HES	: Hidroelektrik Santrali
CAD	: Bilgisayar Destekli Tasarım (Computer Aided Design)
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
FFT	: Hızlı Fourier Dönüşümü
RANS	: Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes
GGI	: Genel Ağ Arayüzü
SC	: Salyangoz
GV	: Ayar Kanadı
PS	: Çark Basınç Tarafı
SS	: Çark Emme Tarafı
DT	: Emme Borusu

SEMBOL LİSTESİ

Simgeler

Açıklama

EH_i	Eğrilik hattı üzerindeki noktanın konumu
x_i^{eh}	Eğrilik hattı üzerindeki noktanın x koordinatı
x_i^b	Basınç yüzeyi üzerindeki noktanın x koordinatı
x_i^e	Emme yüzeyi üzerindeki noktanın x koordinatı
y_i^{eh}	Eğrilik hattı üzerindeki noktanın y koordinatı
y_i^b	Basınç yüzeyi üzerindeki noktanın y koordinatı
y_i^e	Emme yüzeyi üzerindeki noktanın y koordinatı
z_i^{eh}	Eğrilik hattı üzerindeki noktanın z koordinatı
z_i^b	Basınç yüzeyi üzerindeki noktanın z koordinatı
z_i^e	Emme yüzeyi üzerindeki noktanın z koordinatı
ρ	yoğunluk
C_p	Geri kazanım oranı
P_{in}	Giriş basıncı
P_{out}	Çıkış basıncı
P_v	Buhar basıncı
P_{atm}	Atmosfer basıncı
σ_c	Thoma sayısı (lokal)
σ_p	Saha Thoma sayısı

1. GİRİŞ

1.1. Tezin Amacı

Türkiye’de yaygın olarak kullanılan su türbini tipi Francis tipi türbindir. Çeşitli debi, düşü değerlerinde çalışan bu türbinlerde zamana bağlı olarak hasarlar oluşabilmektedir. Bazı durumlarda türbinin yenilenmesi gerekmektedir. Bu yenilenme işleminin gerçekleştirilebilmesi için öncelikle mevcut türbinin durumunun belirlenmesi gerekmektedir. Türbin içerisindeki akış alanının analizi ile akışta düzensizlikler ve problemler hakkında fikir edinilebilir. Bu analizlerin gerçekleştirilebilmesi için Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılır. Bunun için türbinin bilgisayar ortamına geçirilmesi gerekir. Türbine ait salyangoz ve emme borusu gibi kısımlar santralden elde edilen teknik resimlerle katı modeli oluşturularak bilgisayar ortamına aktarılırken; çark kanadı, ayar kanadı ve sabit kanat gibi kısımların teknik resimler kullanılarak 3 boyutlu modellerinin oluşturulması her zaman mümkün değildir. Teknik resimlerle 3 boyutlu modelleri elde edilemeyen türbin parçalarının tarama işlemi yapılarak tersine mühendislik ile nokta bulutları elde edilir. Bu nokta bulutları kullanılarak katı modelleri elde edilen kanatlar, HAD yöntemiyle yapılan analizlerde kullanılabilir hale gelmiş olur. Bu sayede mevcut durumla ilgili bilgiler elde edilir.

Bu tez kapsamında, Samsun ilinde bulunan Altınkaya Hidroelektrik Santrali (HES)’nin mevcut durum değerlendirilmesini HAD yöntemiyle yapmak ve bu yöntem ile elde edilen sonuçların saha verimlilik ölçümleriyle doğrulamak amaçtır. Ayrıca türbinin, mevsimsel değişimlere bağlı olarak türbinin zarar görmeden çalışmaya devam edebileceği aralığı belirlemektir. Kararlı ve kararsız hal analizlerinin yapılarak türbin verimliliği gibi türbine ait çeşitli bilgiler elde edilmek istenmektedir.

1.2. Literatür Araştırması

Francis tipi türbinler hakkında bilgi edinilmesi açısından çeşitli tez, makale ve bildiriiden yararlanılmıştır. Aşağıda yararlanılan bu yazıların bazıları sunulmaktadır.

Türbinlerin model testinin, HAD yöntemine göre daha fazla para ve zaman gerektirdiği bilinmektedir. HAD yöntemi, mevcut durum için uygun simülasyonlar yapıldığında çok daha hızlı sonuçlar gösterebilir. Doğru sınır koşullarının ayarlanması bir husustur. Jain vd. [1] yaptıkları çalışmada, sınır koşulu olarak verilen basınç giriş ve basınç çıkış sınır koşullarının kullanan sayısal simülasyonlarda yakınsamadığını görmüşlerdir. Kütleli debi giriş sınır koşulu, toplam basınç çıkış sınırı koşulu olarak verildiğinde elde edilen sonucun daha sağlıklı olduğunu görmüşlerdir. Sonuçlarına göre, bu sınır koşulları Francis türbinin HAD analizi için diğer sınır koşullarından daha uygundur.

Yao vd. [2], çark çıkışındaki akış hızını azaltarak, çark çıkış çapının arttırılabileceğini bulmuştur. Bu, türbin performansının artırılmasına yardımcı olur. Kanat profilleri, negatif akış olaylarından kaçınmak için dikkatle düzenlenmelidir. HAD yöntemi optimum olanı bulmaya yardımcı olabilir.

Choi vd. [3], HAD yaklaşımlarının bir Francis türbininin mevcut durumunu anlamaya yardımcı olabileceğini belirtmiştir. HAD yöntemleri kullanılarak birkaç farklı tasarım araştırılabilir ve model testi için en iyi tasarım üretilebilir. Onlar 500 kW güç üretimine sahip Francis türbinleri için, yaptıkları çalışmada nihai tasarım ve model test sonuçlarının HAD sonuçları ile yaklaşık olarak aynı olduğunu görmüşlerdir. HAD yaklaşımının bir Francis türbin tasarımı için kullanılabileceği ve türbin performansını iyileştirirken maliyet ve zaman açısından etkili bir sisteme sahip olduğu gösterilmiştir.

Bir türbinin çalışma aralığını araştırmak için kararlı durum HAD analizi yapılır. Kararlı durum sonuçları doğrultusunda, türbinin tepe diyagramı elde edilir. Öte yandan, türbinler her zaman aynı sabit koşullarda çalışmaz, başlangıç koşulları gibi zamana bağlı akış özellikleri sıklıkla gözlenir. Bu süre zarfında, türbin içindeki akış kararsızdır. Bu kararsızlığın etkisini gözlemlemek için zamana bağlı HAD analizi yapılmalıdır. Nicolle ve arkadaşları [4], başlangıç koşulu sırasında yaklaşık 40 saniye boyunca bir Francis türbinini simüle etmiş ve ana akış fiziğini gözlemlemiştir.

Günümüz şartlarında toplumun elektrik ihtiyacını karşılamak için, su türbinleri tasarlandıkları debi ve düşü değerlerinden farklı değerlerde çalıştırılmaktadır. Bu sebeple türbinin boş kalma süresini minimuma indirerek türbinin daha hızlı çalışması istenmektedir. Trivedi vd. [5] yaptıkları çalışmada, bu hızlı hareketlerin türbinin ayar kanatlarında yorulmaya neden olduğunu göstermektedir. Akışın kararlı hale

gelinceye kadarki durumunu incelemek adına zamana bağılı analizlerin yapılarak ani durum değişikliklerinde türbinin zarar görmesini engellemek mümkündür. Ayar kanatlarının hareketleriyle türbin çarkına zarar verecek ani değişikliklerin önüne geçilebileceğini göstermişlerdir.

Türbin içerisindeki akışta su her zaman tertemiz değildir. Kum taneleri gibi küçük parçalar suyun içinde bulunmaktadır. Bu kum taneleri ayar kanadının alt ve üst boşluklarında aşınmaya neden olarak buradaki açıklıkları genişletirler ve daha fazla sızıntı meydana gelir. Koirala vd. [6] yaptıkları çalışmada, bu aşınmalara dikkat edilmesi gerektiğini göz önüne getirirken, bu açıklıkların hesaplamalı yöntemlerle Francis türbin performansı üzerine etkisini tartışmışlardır. Boşlukların artması, ayar kanadının aşınmasına, kaçakların fazlaşmasına ve türbin performansının düşmesine neden olmaktadır.

Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi, hidrolik türbinlerin tasarımında ve geliştirilmesinde önemli bir role sahiptir. 2014 yılında Norveç'te kurulan Francis-99 atölyesinde yapılan model türbin testlerinin kısmi yükleme, en iyi verimlilik noktası ve aşırı yükleme noktaları incelenmiştir. Trivedi vd. [7] yaptıkları çalışmada, geliştirdikleri fonksiyon ile gerçekleştirdikleri simülasyonların sonuçları çark kanadı yükünün güvenilir olarak tahmin edildiğini göstermiştir.

Bir türbinde meydana gelen arıza, tesisin kapalı kalmasına neden olur ve santralin gelir kaybetmesine neden olur. Dorji ve Ghomashchi [8] yaptıkları çalışmada, literatürde bahsedilen dört ana arıza tipini (kavitasyon, erozyon, yorulma, yanlış kurulumdan kaynaklı malzeme arızası) Tala Hidroelektrik Santrali üzerinde incelemişlerdir. Bu arıza tipleri için farklı türbin parçalarında hasar görme olasılığı daha yüksek olanlarla ilgili bilgi vermişlerdir. Bununla birlikte, bu arızaları azaltmaya yönelik önerilerde bulunmuşlardır.

Günümüzde akışkan – yapı etkileşim mekanizmalarına ilişkin anlayışın eksik olduğunu düşünen Müller vd. [9] yaptıkları çalışmada, makine içerisinde kararsız akışın periyodik mekanik yüklerin türbin şaftını nasıl zorladığını ortaya koymuşlardır. Bu amaçla, çark çıkışındaki akış alanı Laser Doppler velosimetresi ve yüksek hızlı görselleştirme ile incelenmiş ve bu sonuçlar emme borusu konisinde eşzamanlı olarak ölçülen basınç salınımları ve türbin şaftı üzerindeki mekanik tork ile karşılaştırılmıştır.

Francis türbinlerin küçültülmüş ölçekli modelleri ile prototipleri arasında mekanik davranış açısından her zaman benzerlik bulunmadığı için Valentin vd. [10] yaptıkları çalışmada, Francis türbin modellerinin mekanik davranışı için bir aktarım yöntemi sunmuşlar ve sonuçları gerçek boyuttaki prototip ile karşılaştırmışlardır. Çarkın model davranışını, farklı çalışma koşullarında stres ve tahmini yorulma ömrü için hem model hem de prototip için karşılaştırmışlardır.

Francis türbinleri, çıkış güçlerini şebekeye göre ayarladıkları için çoğu zaman tasarım noktası dışında çalışırlar. Bu sebeple, bu durumlar için kararsız çalışma noktalarının analiz edilmesi ve belirlenmesi oldukça önemlidir. Presas vd. [11], bir Francis türbin üzerinde yapılan deneysel testler sırasında elde edilen kararsız çalışma noktalarını ve bu kararsızlıkların temel özelliklerinin analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Azalan ölçekli model ile Laboratory for Hydraulic Machines'de elde edilen önceki araştırmalarla benzerliklerin olduğunu tespit etmişlerdir.

Kubo vd. [12] yaptıkları çalışmada, yüksek özgül hıza sahip bir Francis türbinin rehabilitasyonu için HAD yöntemi kullanmışlardır. Rehabilitasyon için türbinin salyangoz, sabit kanat, ayar kanadı, çark ve emme borusu dirsek kısmını incelemişlerdir. Asıl amaç tüm çalışma aralığında, düşük gürültü seviyesi ve yüksek kavitasyon performansı ile türbinin verimliliğini artırmaktır. Yeni türbinin saha testleri yapılarak, mevcut türbine kıyasla yeni türbinin verimlilik, üretilen güç ve titreşim ve gürültü açısından daha iyi bir performansa sahip olduğunu görmüşlerdir.

Rodriguez vd. [13], yüksek yük koşullarında çalıştırılan orta düşü seviyeli Francis model türbinin çift fazlı HAD analizlerini gerçekleştirmişlerdir. Girdap kararsızlık bölgesi ölçülmüş ve model ölçeğinde sayısal simülasyonları sunulmuştur. Model test ölçümleri ve görseller, emme borusu konisinde bulunan iki dönüştürücü arasındaki basınç sinyali fazını analiz ederek emme borusunun doğal frekansını bulmuştur.

Kamal vd. [14] yaptıkları çalışmada, Francis türbin üzerinde HAD analizleri gerçekleştirmişler, aynı zamanda deneysel araştırma yaparak bu sonuçları karşılaştırmışlardır. Francis türbin için en yüksek doğruluk 1300 rpm'de gerçekleşmiştir. Yaptıkları çalışma sonucunda deneysel yaklaşımın oldukça maliyetli olduğu; HAD yönteminin ise model test maliyetini düşürerek zamandan tasarruf edilmesine, bunun da maliyet etkin analizi sağlayarak hidroelektrik geliştirmelerin uygulamasının kolaylaşacağı sonucuna ulaşmışlardır.

Krappel vd. [15], Francis türbinlerin kısmi yük koşullarında çalışmasını incelemişlerdir. Bu durum türbinde ve özellikle emme borusunda yüksek dalgalanmalara ve dinamik yüklere neden olmaktadır. Akış, türbülanslı bir yapıya sahip olduğunda, akışı ve difüzördeki kayıpları doğru tahmin etmek oldukça zordur. Yapılan çalışmada, bu akışın önemli ölçüde daha iyi sayısal tahmininin elde edilmesi amaçlanmıştır.

Shukla vd. [16], deneysel olarak test edilen türbinin 3 boyutlu analizini yapmış ve prototip türbinin özelliklerini yaptıkları çalışmada gerçek çalışma rejimlerinde tahmin etmişlerdir. Bu çalışmada HAD sonuçları ile deneysel sonuçların doğrulanması amaçlanmıştır. Çalışma koşulları, gerçek prototip türbinin kurulacağı yer ile uyumlu olan çalışmada, makine içindeki akış yapısı analiz edilerek tasarımdaki iyileştirmelerin kapsamı gösterilmiştir. HAD yöntemi ile elde ettikleri sonuçlarla deneysel sonuçların birbirine çok yakın olduğu görülmüş ve HAD yönteminin güvenilir olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Tiwari ve diğerlerinin [17], 48 m düşüde prototip Francis türbinin tam performans özelliklerinin optimum çalışma rejiminin belirlenmesi ve türbinin farklı bileşenleri için yük kaybının belirlenmesi olarak iki amaçları bulunmaktadır. Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemi kullanılarak dört farklı yükleme işlemi için kararlı hal analizleri yapılmıştır. Türbinin yüksek hız değerlerinde çalışmasının, düşük hız değerlerinde çalışmasına göre daha zararlı olduğunu, çalışma aralığının genişletilmesi isteniyorsa tasarım dışı noktalarda performans iyileştirmesinin yapılması gerektiği sonucu elde edilmiştir. HAD sonuçları ile deneysel sonuçlar karşılaştırılarak uyumlu sonuçların elde edildiği görülmüştür.

Tong vd. [18], HAD analizleri ve laboratuvar testleri ile 700 m düşülü bir Francis türbin tasarlamışlardır. Tasarlanan süper yüksek düşülü Francis türbin performansını, sayısal ve deneysel yaklaşımlarla çeşitli debi değerleri için incelemişlerdir. Tasarım esnasında akışı incelemeyi kolaylaştırdığı için HAD yönteminin etkili bir araç olduğunu kanıtlamışlardır. Büyük çaplı türbin yerine (1:3.7) ölçekli modelini kullanmışlardır.

Gohil ve Saini [19] yaptıkları çalışmada, bir Francis türbininde sıcaklık, emme yüksekliği ve akış hızının kavitasyon üzerindeki etkisini CFX kodu kullanarak sayısal olarak incelemişlerdir. Görselleştirme tekniği yardımıyla sayısal yöntemi doğrulamak için deneysel araştırma yapılmıştır. Elde edilen sayısal veriler (sıcaklık,

emme yüksekliği, akış hızı) kullanılarak Francis türbininde verimlilik kaybı ve kavitasyon oranı için korelasyon geliştirmişlerdir. Bu korelasyon yardımıyla, performansın bozulma oranı ve kavitasyon altında çark yüzeyine zarar verme olasılığı tahmin edilebilir.

Kim vd. [20] yaptıkları çalışmada, bir Francis türbinin çarkında hidrolik performans ve iç akış özellikleri üzerindeki tıkanma etkisini incelemişlerdir. Bir Francis türbinde, türbin tasarımını doğrulamak için model hazırlandığında kanatlar incelendiği ve üretimi zorlaştığı için farklı kanat kalınlıklarını ve performans özelliklerini araştırmak için tıkanma etkisini incelemişlerdir. Tıkanma etkisinin Francis türbin model tasarımını önemli ölçüde etkilediğini doğrulamışlardır.

1.2.1. Francis tipi su türbinleri

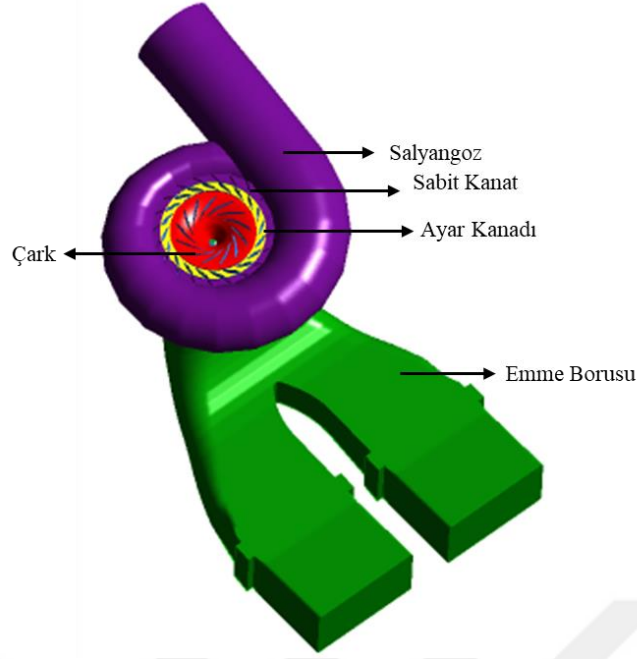
Hidrolik makineler akışkanın enerjisini kullanarak elektrik enerjisi üretirler. Türbindeki akışkanın enerjisi, türbin şaftı yardımıyla mekanik enerjiye dönüştürülür. Generatör yardımıyla da bu dönme hareketi elektrik enerjisine çevrilir.

Türbine su kaynağı sağlayan kaynak rezervuarı seviyesi ile türbinden dışarı bırakılan suyu alan rezervuar (kuyruk suyu) seviyesi arasındaki fark hidrolik düşü olarak tanımlanır [21]. Bu düşü değerine göre çeşitli hidrolik türbin çeşitleri vardır. Pelton, Kaplan, Francis tipi türbinler bunlardan bazılarıdır.

Günümüzde en yaygın olan türbin tipi Francis türbin tipidir. 700 m'ye kadar geniş düşü aralığına sahip Francis türbinler, 800 MW'a kadar güç üretebilirler. Francis tipi türbinlerde en önemli kısım çarktır.

Francis tipi türbinlerde çark kanadı kanadın üst yüzeyinde taca alt yüzeyinde bileziğe sabitlenmiştir. Bu çark kanadına güç ve sertlik sağlar. Çark ve çarkın bağlı olduğu şaft, türbinin dönen parçalarını oluşturur. Kanadın meridyonel profiline bakıldığında, su çarka radyal yönde girer ve eksenel yönde ayrılır. Bu tip türbinlere radyal-eksenel türbinler denir.

Francis türbinler 5 kısımdan oluşmaktadır. Dışarıdan içeriye doğru: salyangoz, sabit kanatlar, ayar kanatları, çark, emme borusu.



Şekil 1.1: Francis türbini bileşenleri.

Barajdan ya da rezervuardan gelen yüksek basınçlı su ilk olarak salyangoz ile karşılaşır. Su basıncıyla oluşan yükü taşıyabilmek için salyangozun kesit alanı daireseldir ve giderek daralmaktadır. Giderek daralan kesitin amacı yüksek basıncı hıza dönüştürmektir. Salyangoz çevresel yöndeki hızı düzgün tutmaya yarar. Bu sayede akış, çark kanatlarına düzgün bir şekilde çarpabilecektir. Salyangoz, akışın sabit kanatlara girerken aynı çevresel hız dağılımına sahip olmasına yardımcı olur.

Sabit kanatlara gelen akış, hidrolik kayıpları azaltmak adına pozisyonlarını daimî olarak koruyan sabit kanatlarca yönlendirilir ve ayar kanadına uygun bir açıyla girmesi sağlanır.

Açıları değiştirilebilen ayar kanatları, çark girişinde akışın gerekli hız yönünü sağlamak için tasarlanmıştır. Bu kanatların hareket edebilmesi debiyi ve debiye bağlı olarak üretilen gücü etkilediği için türbinin verimini artırmaktadır.

Ayar kanatlarından sonra su çarka ulaşır. 3 boyutlu ve dönüşlü kanat profili olan çark, Francis türbinlerinde en önemli kısımdır. Akış radyal şekilde çarka girer, çarktan aksel olarak ayrılır. Bu dönme işlemi sırasında suyun potansiyel enerjisi mekanik enerjiye dönüşür. Burada, bağlı olan şaft yardımıyla jeneratörler mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirmektedir.

Çarktan sonra suyun gittiği kısım emme borusu olarak adlandırılır. Çarktan çıkan suyun hızı fazla ve basıncı düşüktür. Bu suyun hızının azaltılıp basıncını yükseltmek adına emme borusunun kesit alanı çıkışa doğru artmaktadır. Bu, kavitasyonun önlenmesi ve kayıpların azaltılması açısından önemlidir.



2. TERSİNE MÜHENDİSLİK

Altınkaya HES Samsun'un Bafra ilçesinde Kızılırmak üzerinde bulunmaktadır. Dört özdeş üniteden oluşmaktadır. Bu üniteler düşey eksenli Francis türbinleridir. Her türbin, 168.2 m³/s nominal debide, 116 m nominal net düşüde 180 MW enerji üretim kapasitesine sahiptir.

Altınkaya HES'e ait türbininin mevcut teknik özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1 : Altınkaya HES türbin teknik özellikleri.

Net Düşü	116 m
Debi	168.2 m ³ /s
Dönme Hızı	166.7 dev/dk
Sabit Kanat Sayısı	20
Ayar Kanadı Sayısı	20
Çark Kanadı Sayısı	13

Tez kapsamında bu HES'e ait durum değerlendirilmesinin yapılabilmesi için, yani HAD analizlerinin yapılabilmesi için, türbinin tüm bileşenlerinin CAD modellerinin teknik resimler ve lazer tarama verileri kullanılarak oluşturulması gerekmektedir.

Çark kanadı gibi değişken profilli yapıların katı modelinin elde edilmesi için teknik resimler yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple, sabit kanatlar, ayar kanatları ve çark kanatları, üç boyutlu tarama cihazı kullanılarak hassas bir şekilde taranır. Bu işlem sırasında Geomagic Design X yazılımı tarama kolundan gelen verileri işlemek için kullanılmıştır. Burada elde edilen kanatlara ait nokta bulutları işlenerek katı modeller ya da yüzeyler elde edilir. Elde edilen veriler CAD yazılımına aktarılır.

20-22 Mart 2019 tarihlerinde santrale gidilerek çark kanadı, ayar kanadı ve sabit kanadın tarama işlemi gerçekleştirilmiştir. Salyangoz ve emme borusunun ise sahadan alınan teknik resimler yardımıyla üç boyutlu katı modelleri oluşturulmuştur.

2.1.Tarama İşlemi

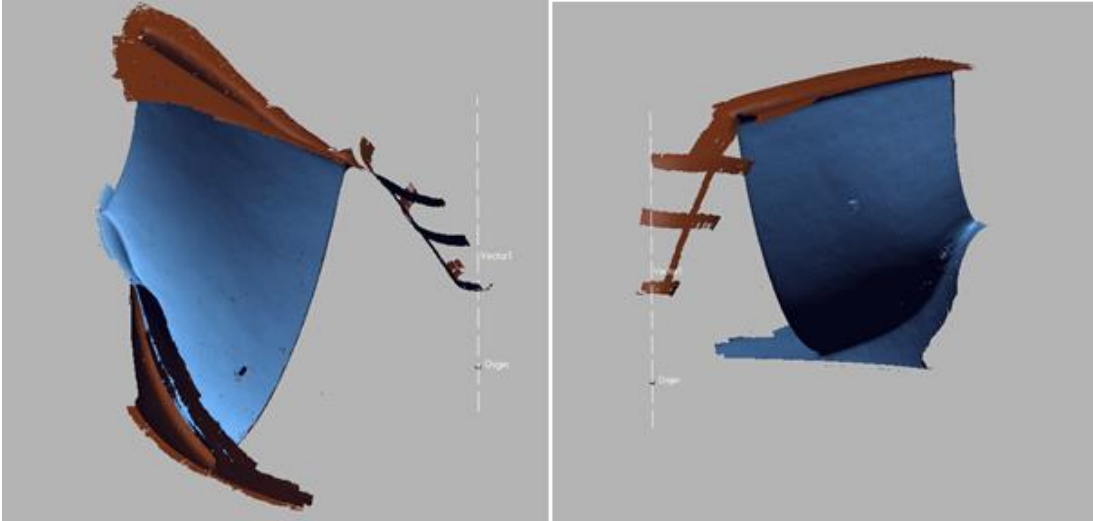
Tarama işlemi Romer Absolute Arm tarama cihazıyla yerinde gerçekleştirilir. Tarama cihazının konumu, kanadın tüm ıslak yüzeylerini görecektir şekilde ayarlanmalıdır. Ancak Altınkaya gibi büyük kanatlara sahip türbinlerde bu ayarlama her zaman yapılamaz. Bu sebeple kanat üzerine yeri değiştirilmeyecek referans bloklar konulur. Bu sayede tarama cihazının yeri değiştiğinde, o referans blok üzerinden nokta bulutları hizalanarak birleştirilebilecektir.

Tarama işlemi gerçekleştirildikten sonra elde edilen verilerin düzenlenmesi gerekmektedir. Bunun sebebi, tarama işlemi sırasında aynı bölge birden fazla sefer taranmış olabilir. O bölgedeki nokta sayısının fazla olması yüzey oluşturulurken ya da profil kesiti alınırken sağlıklı veri alınmasını engellemektedir.

2.1.1. Çarkın Taranması

Çark kanatları türbin dönme merkezine göre simetrik yapıdadır. Bu sayede tüm çarkı taramak yerine sadece bir kanadın tarama işleminin yapılması yeterlidir. Kanadın ıslak yüzeyleri ile taç ve bilezik eğrilerinin taranması ile elde edilen kanattan dönme merkezine göre kanadın çoğaltılmasıyla çarkın tamamı elde edilir.

Çarkın taranmasıyla elde edilen nokta bulutu Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1: Tarama sonucunda elde edilen çark nokta bulutu.

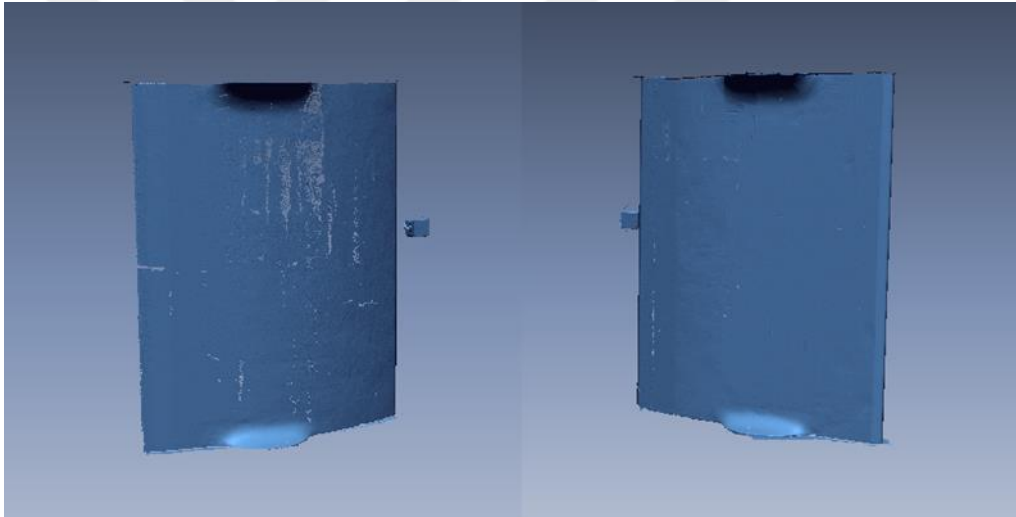
Burada elde edilen tüm veriler, kullanılan referans bloğun yazılım içerisinde hizalanarak birleştirilmesiyle elde edilmiştir. Tüm tarama verilerinin birleştirilmesiyle elde edilen kanatta toplamda 100 milyona yakın nokta

bulunmaktadır. Performansı etkilemesi sebebiyle veri kaybı olmayacak şekilde nokta sayısı azaltılarak 29 milyon nokta kalması sağlanmıştır. Bu hali daha sonra CAD modeli oluşturulması için CAD yazılımına aktarılır. CAD programı olarak SolidWorks kullanılmıştır.

2.1.2. Ayar Kanadının Taranması

Bir Francis türbindeki ayar kanadı, türbin dönme merkezine göre simetrik yapıdadır. Ayar kanadı, çarktan farklı olarak kanadın üst yüzeyinden alt yüzeyine doğru inildikçe profili değişmez. Bu sayede tüm kanadın taranabileceği gibi, kanat profilini gösterecek şekilde sadece bir kısmı da taranabilir.

Altinkaya HES’de ayar kanatlarından biri üzerine referans blok konularak iki konumda taranmıştır. Şekil 2.2’de tarama işlemi sonucunda elde edilen nokta bulutları gösterilmektedir.

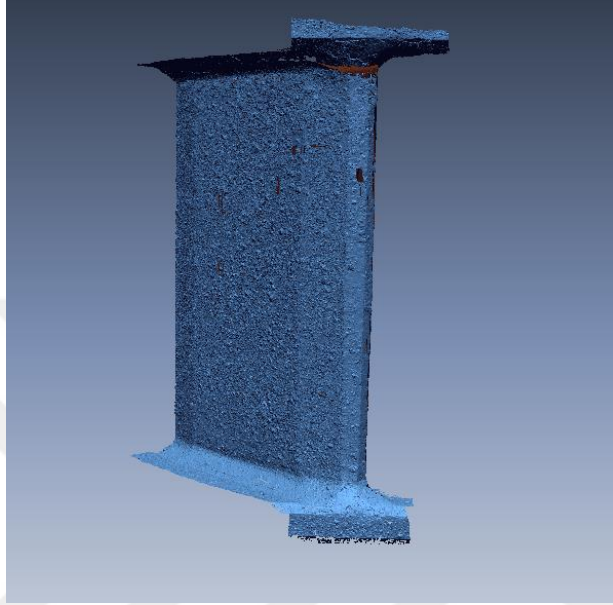


Şekil 2.2: Tarama sonucunda elde edilen ayar kanadı nokta bulutu.

Elde edilen bu nokta bulutunda tarama merkezinin kayık olması sebebiyle kanadın orta kesidinden alınacak olan profil düz bir şekilde alınamamaktadır. Bu sebeple taramadan elde edilen nokta bulutunda ayar kanadının orta düzlemini elde etmek için aşınma aynalarının orta düzlemi kullanılmıştır. Ayrıca flanşların merkezlerinden ayar kanadının dönme merkezi de elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen bu profil CAD programına yüklenerek katı model haline getirilir.

2.1.3. Sabit Kanadın Taranması

Sabit kanat da ayar kanadı ile benzer yapıdadır. Ayar kanadından farkı hareket edememesidir. Yine bu kanat taraması için de kanadın tamamının taranabileceği gibi profili elde edecek kadarki kesitinin taranması yeterlidir. Şekil 2.3'te sabit kanadın nokta bulutu gösterilmektedir.



Şekil 2.3: Tarama sonucunda elde edilen sabit kanat nokta bulutu.

Tarama işlemi sonucunda elde edilen kesit profili CAD programına yüklenerek katı model haline getirilir.

2.2. Türbin Parçalarının Geometrilerinin Hazırlanması

Sabit kanat, ayar kanadı ve çarka ait nokta bulutları işlendikten sonra SolidWorks programında katı modelleri ya da yüzey modelleri kullanılarak bu parçaların analizlere uygun hale getirilmesi sağlanır.

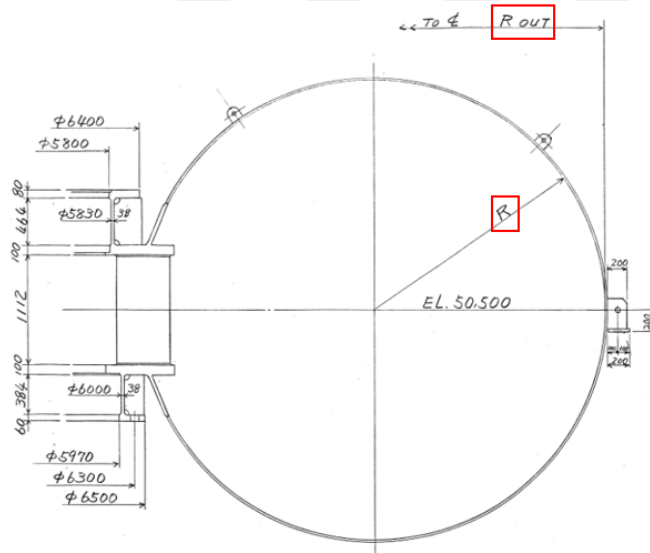
2.2.1. Salyangoz ve Sabit Kanatlar

Salyangozda kesit alanı akış yönünde azalmaktadır. Dairesel kesitli bu bölümlerin ölçüleri sahadan alınan teknik çizimler sayesinde bilinmektedir. Bu sayede salyangoz, bu çizimler kullanılarak SolidWorks programında katı model haline getirilmiştir. Salyangoz 19 farklı kesitin birleştirilmesiyle oluşur. Her bölüme ait ölçüler Çizelge 2.2'de verilmiştir.

Çizelge 2.2: Salyangoz ölçüleri.

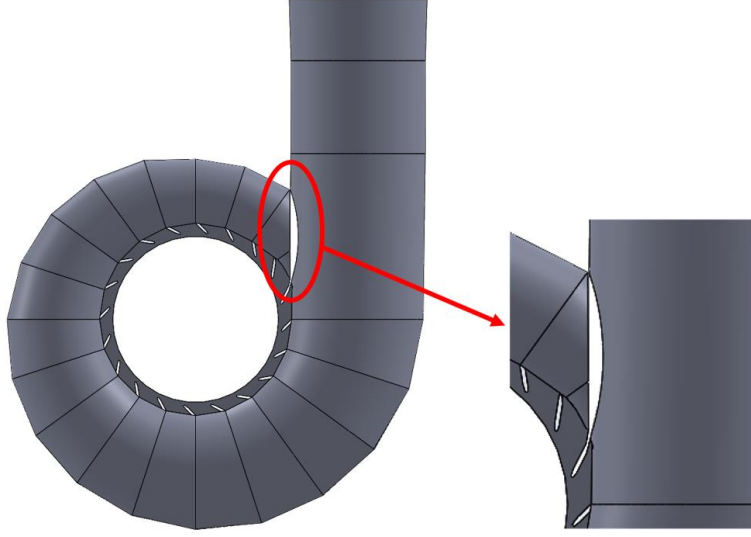
No.	R _{out} (mm)	R (mm)	No.	R _{out} (mm)	R (mm)
1	7845	2315	11	6495	1660
2	7733	2260	12	6327	1580
3	7610	2200	13	6148	1495
4	7487	2140	14	5957	1405
5	7364	2080	15	5754	1310
6	7230	2015	16	5515	1200
7	7096	1950	17	5515	1200
8	6952	1880	18	5515	1200
9	6807	1810	19	5572	1200
10	6651	1735			

Burada R_{out} ve R'nin ne olduğu Şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4: Rout ve R.

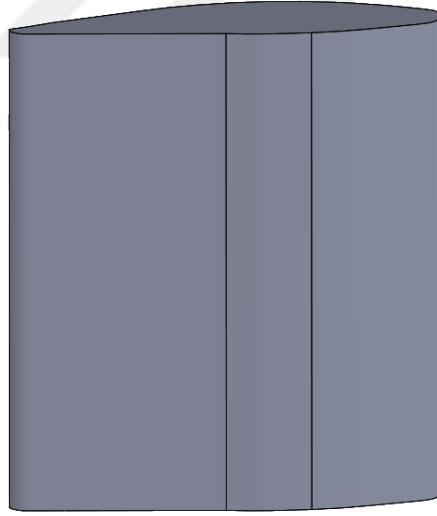
Nokta bulutu yardımıyla kanat profili elde edilen sabit kanadın katı modeli teknik çizimdeki yüksekliğe göre oluşturulmuştur. Türbin analizleri gerçekleştirilirken suyun geçtiği yerlerdeki durum inceleneceği için sabit kanadın etrafındaki akış bölgesi modellenmiştir. Konumları ve açıları ömürleri boyunca herhangi bir değişikliğe uğramadığı için sabit kanatların akış alanları salyangoz çıkışına Şekil 2.5'teki gibi yerleştirilmiştir. Çizelge 2.2'de ve Şekil 2.4'te verilen değerlerle oluşturulan salyangoz katı modeli Şekil 2.5'te verilmiştir. Şekil 2.5'te ayrıca salyangoz girişiyle salyangoz çıkışındaki akışların karışmasını önleyen yapı da gösterilmektedir.



Şekil 2.5: Salyangoz katı modeli.

2.2.2. Ayar Kanatları

Nokta bulutu yardımıyla kanat profili elde edilen ayar kanadının boyu teknik çizimlerde bulunarak katı model haline getirilmiştir. Ayar kanadının katı model hali Şekil 2.6’da verilmiştir.



Şekil 2.6: Ayar kanadı katı modeli.

Hareketli bir parça olan ayar kanadını analizlerde kullanılabilir hale getirmek için ANSYS BladeGen programı kullanılır. Bladegen yazılımı içerisinde meridyonel profil tanımlaması yapılır. Meridyonel profil, kanadın radyal-eksenel koordinat sistemindeki görüntüsünü vermektedir. BladeGen ayrıca HAD analizlerinde kullanılacak kanadın tanımlanmasına ve kanat giriş-çıkışının tanımlanmasında kullanılır [22].

Altinkaya HES’de ayar kanadı simetrik bir görüntüye sahip değildir. Bu sebeple öncelikle kanadın duruşunun tanımlanması gerekmektedir. Bunun için öncelikle kanat boyunca kanadın türbin dönme eksenine göre açıları bilinmelidir. Bu açılar sarma açısı (teta) ve metal açısı (beta)dır. Kanadın eğiklik üzerinden tanımlanan teta açısı, silindirik koordinatlarda kanadın hücum kenarından kuyruk kenarına doğru konumunu gösteren açıdır. Beta açısı ise yine kanadın eğiklik hattı üzerinden tanımlanan kanadın büküm açısıdır. Açılarının tanımlanması sırasında eğiklik hattının uzunluğu bilinmelidir.

Ayar kanadının eğrilik hattı tanımlanırken kanadın başlangıç ve bitiş noktalarının arasına eş aralıklarla düz çizgiler çizilerek bu çizgilerin orta noktaları alınmıştır. Bu orta noktaların birleşiminden eğrilik hattı ve açı değerleri elde edilmiştir. Ayrıca bu noktalar kullanılarak kanadın kalınlığı da aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$x_i^{eh} = \frac{x_i^b + x_i^e}{2} \quad (2.1)$$

$$y_i^{eh} = \frac{y_i^b + y_i^e}{2} \quad (2.2)$$

$$z_i^{eh} = \frac{z_i^b + z_i^e}{2} \quad (2.3)$$

$$EH_i = \sqrt{(x_i^{eh})^2 + (y_i^{eh})^2 + (z_i^{eh})^2} \quad (2.4)$$

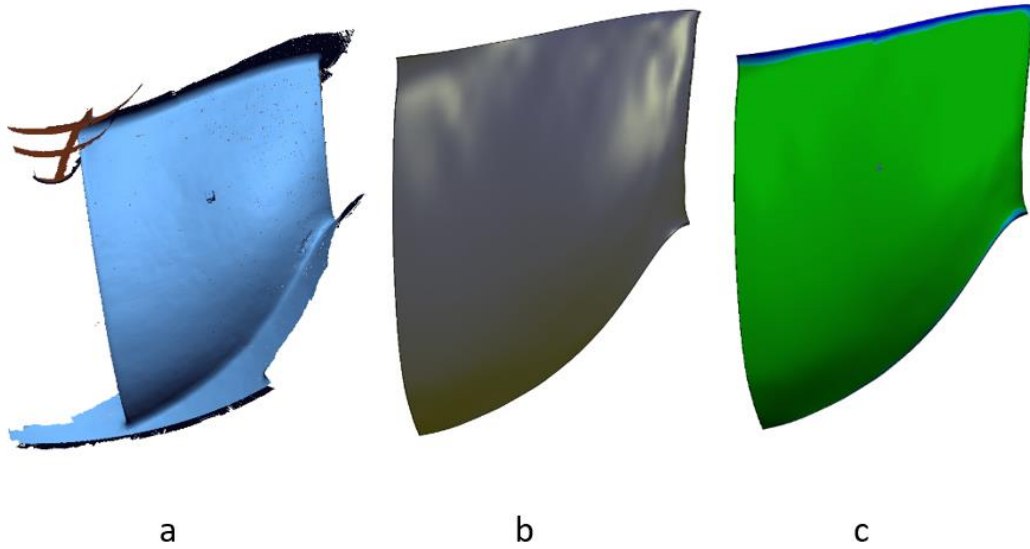
Elde edilen değerler meridyonel uzunluğun boyutsuzlaştırılmış haliyle BladeGen’e aktarılırlar. BladeGen’deki kanat ile tarama verisinden profil kesiti alınıp katı modeli oluşturulan kanat karşılaştırılırlar. Aynı kanatlar elde edildikten sonra ayar kanadı analizler yapılabilir hale gelir.

2.2.3. Çark

Altinkaya HES’e ait çarkın tarama işlemi sonucunda elde edilen verilerle kanadın yüzey modeli oluşturulmuştur. Daha sonra BaldeGen’de meridyonel profil üzerinde tanımlanan açıklıklar SolidWorks programına aktarılmıştır. Aktarılan bu çizgi ile kanadın kesilmesi sağlanmıştır. Buradan kanadın o açıklıktaki kesiti elde edilmiştir. Bu kesit XY düzlemine yansıtılarak 2 boyutlu hale getirilmiştir. Başlangıç ve bitiş noktalarının arasına eş aralıklarla çemberler çizilmiş, bu eğrilerin orta noktaları kullanılarak o kanadın yarı çap ve teta açıları elde edilmiştir. Daha sonra bu noktalar Z eksenini boyunca uzatılarak z koordinatları elde edilmiştir. Bu noktalar kanadın o

bölgedeki kesitinin eğrilik hattını vermektedir. Bu işlem, kanadın taç kısmından başlayıp bilezik kısmına kadar 10 farklı açıklık için yapılmıştır. Bu kesitlerde elde edilen değerler BladeGen yazılımına aktarılarak çark kanadının matematiksel modelinin oluşturulması sağlanmıştır.

Oluşturulan bu çarkın sahadaki çarka ait olduğunu belirlemek için IEC 60193'te [23] uyulması gereken bazı noktalar vardır. Burada, tarama verisinden elde edilen çark ile tersine mühendislik ile matematiksel modeli oluşturulan çarkın bu standarda göre örtüşmesi gerekmektedir. Bu sayede yapılan analizlerin sonuçlarına güvenilebilir. Şekil 2.7'de tarama verisinden elde edilen çark ile tersine mühendislik yapılan çarkın üst üste yerleştirilmiş hali gösterilmektedir.



Şekil 2.7: a) Tarama b) Tersine Mühendislik c) Üst üste binmiş kanatlar.

IEC 60193'e göre, model ve prototip türbinler arasındaki geometrik benzerlik için izin verilen sapmalar açıklanmıştır. İzin verilen bu değerler için, tersine mühendislik ile elde edilen çark kanadıyla tarama verisi ile elde edilmiş çark kanadının karşılaştırması Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3: Tersine mühendislik ile tarama kanatlarının arasındaki fark.

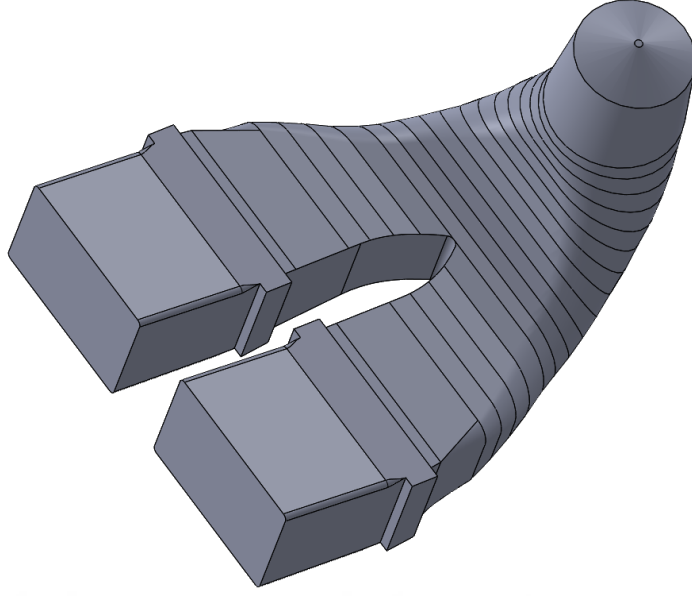
	Yer	İki Kanat Arasındaki Fark (mm)	Olabilir Tolerans (mm)
	Eğim	0.92	8.7
	Yüzey	7.3	8.7
Yüzey	Bilezik Kenarı Farkı	6.5	8.7
	Taç Kenarı Farkı	7.2	8.7
Giriş Kenarı	Giriş Taç Tarafı	3.75	4.35
	Giriş Bilezik Tarafı	4	4.35
Çıkış Kenarı	Çıkış Bilezik Tarafı	4.35	4.35
	Çıkış Taç Tarafı	4.2	4.35

Çizelge 2.3'ten anlaşılacağı gibi türm değerler izin verilen tolerans değerlerinde olduğu için bu kanatlar standarda uygun şekilde benzerdir. Bu durumda türbin hakkında bilgi edinebilmek, performans değerlerini inceleyebilmek için tersine mühendislik ile elde edilen kanat kullanılabilir.

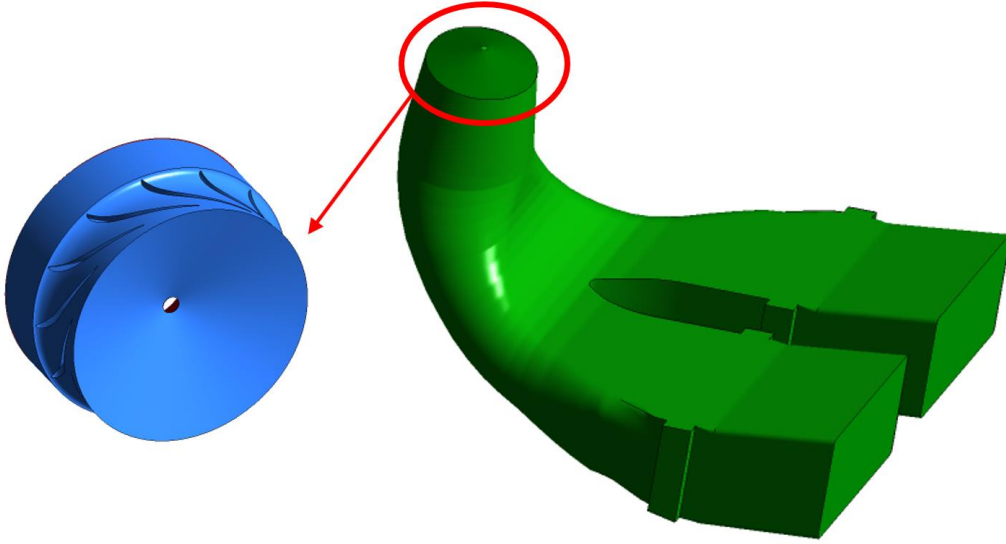
2.2.4. Emme Borusu

Emme borusu, saha içerisinde sabit bulunan oldukça büyük bir yapıdır. Koni, dirsek ve difüzörden oluşan Altınkaya HES emme borusu, dirsekten sonra orta kısmında bulunan sütun ile suyu iki tarafa bölerek çıkarmaktadır.

Altınkaya HES emme borusunun akış alanı, sahadan alınan teknik çizimler kullanılarak SolidWorks programında katı model haline getirilmiştir. Şekil 2.8'de emme borusunun katı modeli görülmektedir. Çark çıkışı ile emme borusu giriş arasındaki alanı doldurmak, o bölgedeki akışı inceleyebilmek için koni eklenmiştir (Şekil 2.9).



Şekil 2.8: Emme borusu katı modeli.



Şekil 2.9: Çark çıkışı ile emme borusu girişi arasındaki konik yapı.

Sonuç olarak, türbine ait tüm bileşenler (salyangoz, sabit kanatlar, ayar kanatları, çark ve emme borusu) CAD formatında elde edilmiştir. Sabit kanatlar ile hareketli kanatların geometrileri tarama işleminde elde edilen verilerle oluşturulurken, salyangoz ve emme borusu sahadan alınan teknik çizimler kullanılarak oluşturulmuştur. Türbin içerisindeki en önemli parça çark olduğu için, standartlara uygun olarak örtüşen kanatlar elde edilene kadar karşılaştırma işlemi devam etmiştir. Şekil 2.10'da Altinkaya HES'e ait akış alanı modellenmiştir.



Şekil 2.10: Altınkaya HES'in tüm türbin görünümü.



3. HAD ANALİZİ VE SAHA VERİMLİLİK ÖLÇÜMÜ

116 m net düşü, 168.2 m³/s debi, ile çalışıp 180 MW güç üreten 20 sabit kanat, 20 ayar kanadı ve 13 çark kanadından oluşan Altınkaya HES Francis tipi bir türbindir. Analizin yapılacağı alan, sabit kanatlı salyangoz, ayar kanadı, çark ve emme borusundan oluşmaktadır. Salyangoz, sabit kanat ve emme borusunu oluşturmak için SolidWorks programı kullanılmıştır. Çark ve ayar kanadı geometrilerini elde etmek için 3 boyutlu dönen parçaları tasarlamakta kullanılan BladeGen programı kullanılmıştır. Sıkıştırılamaz 3 boyutlu akışı çözmek için HAD analizlerinde Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. Simülasyonlar ANSYS CFX v18.2 [22] kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.1. Korunum Denklemleri

Bir su türbinindeki sıkıştırılamaz, üç boyutlu, zamandan bağımsız ve türbülanslı bir akış için kullanılan denklemler aşağıdaki gibidir.

Sistem içerisinde seçilen çok küçük kontrol hacminin ölçüleri dx, dy ve dz olsun. Bu kontrol hacmine ait süreklilik denklemi Denklem 3.1'deki gibidir.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

Akışın zamandan bağımsız ve sıkıştırılamaz olduğu kabul edilirse süreklilik denklemi Denklem 3.2'deki gibi olur.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.2)$$

Aynı kontrol hacmindeki momentum değişimi ise kontrol hacmi üzerindeki viskoz kuvvetlerin, basınç gradyanlerinin ve dış kuvvetlerin etkilerinin toplanılmasıyla elde edilir (Denklem 3.3).

$$\rho \left(\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} + F_i \quad (3.3)$$

HAD analizleri gerçekleştirilirken türbülansın türbin üzerine olan etkilerinin gözlemleyebilmek için kullanılan çeşitli yöntemlerin en yaygını Reynolds Ortalamalı Navier Stokes (RANS) yöntemidir. Analizlerde kullanılan RANS denklemleri Denklem 3.4'te verilmiştir.

$$\rho \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) + F_i \quad (3.4)$$

3.2. Türbülans Modeli

Akışın hareket halindeki düzensizliği türbülans olarak adlandırılır. Oldukça karmaşık bir yapıda olması çözümünü zorlaştırmaktadır. Bu yüzden bu akışın modellenerek çözülmesi gerekmektedir.

Türbin içerisindeki türbülanslı akış, ani değişikliklerin ve kararsız değerlerin ayrıştırıldığı Reynolds Ortalamalı Navier-Stokes (RANS) denklemleri ile simüle edilmiştir.

Denklem 3.4'teki $\overline{u'_i u'_j}$ terimi Reynolds-stress'i ifade etmektedir. Bu terim ile birlikte hız bileşenleri basınç ve kayma gerilmeleri ile on adet bilinmeyen bulunmaktadır. Ancak süreklilik denklemi ve Navier-Stokes denklemleri ile denklem sayısı dörtte kalmaktadır. Denklemlerin sistemi çözebilir hale getirebilmek için türbülans modeli kullanılarak kayma gerilmeleri modellenir ve denklem sistemi kapalı hale getirilir [24].

Analiz işlemleri gerçekleştirilmeden önce sisteme uygun türbülans modeli belirlenmelidir. Literatür araştırmasına göre k-ε türbülans modeli türbin tasarımı ve optimizasyonu gibi konularda pratik uygulamalardaki sağlamlığı sebebiyle tercih edilmektedir [25]. Bu sebeple, Altınkaya HES'in analizleri sırasında iki denklemlilik k-ε türbülans modeli kullanılmıştır. k türbülansın kinetik enerjisini temsil ederken, ε ise türbülans yitimini ifade etmektedir.

3.3. Ayrıklaştırma Yöntemi ve Adveksiyon Şeması

Momentum, kütle ve ısı transferi süreçlerini tanımlayan denklemler Navier-Stokes denklemleri olarak adlandırılır. Genel analitik çözümü olmayan bu denklemlerin çözümü sayısal olarak ayrıklaştırma ile çözebilmek mümkündür. Ek denklem ihtiyacı olan bu çözümlerde çeşitli türbülans modelleri kullanılmaktadır.

HAD kodlarında kullanılan çeşitli çözüm yöntemleri bulunmaktadır. CFX'in dayandığı en yaygın kullanılanı ise sonlu hacimler yöntemidir [26]. Bu yöntemde birbirine bağlı kontrol hacimleri için korunum denklemleri incelenir. Bu sayede her kontrol haciminde bir cebirsel ifade elde edilmiş olur. Bu amaçla adveksiyon şemalarından yararlanılır [27].

Analizler gerçekleştirilirken kullanılan upwind, yüksek mertebeden upwind ve yüksek çözünürlük gibi çeşitli adveksiyon şemaları kullanılır. Türbin bileşenleri için, daha hızlı sonuç elde edebilmek adına kaba çözüm ağı kullanılmıştır. Çarkın tasarım zaman aralığını azaltmak için ilk analizlerde k-ε türbülans modelinde kaba çözüm ağ yapısı ve upwind adveksiyon şeması tercih edilmiştir. Çözüm ağ yapısı iyileştirildiğinde, çarktaki akış ayrılmalarını gözlemleyebilmek için k-ε ve SST türbülans modelleri kullanılmıştır. İyi ağ yapısı için yüksek çözünürlüklü adveksiyon şeması tercih edilmiştir.

3.4. Sınır Koşulları

Türbine ait bileşenlerin bireysel analizleri gerçekleştirilirken kullanılan sınır koşulu girişte toplam basınç, çıkışta ise kütleli debidir. Giriş koşulu olarak verilen toplam basıncın hesabı net düşünün basınca çevrilmesiyle elde edilmiştir (Denklem 3.5). Referans basınç değeri sıfır alınmıştır. Duvar sınır koşulu olarak ise düzgün, kaymaz duvar sınır koşulu kullanılmıştır.

$$P_{top,in} = \rho gH + P_{atm} \quad (3.5)$$

Salyangoz girişindeki sınır koşulu, cebri borudan gelen akışın salyangoz girişine dik açıyla geldiği kabul edilerek oluşturulmuştur. Ayar kanatlarına giren akışın tanımı, sabit kanatlardan çıkan akışın koordinatları girilerek tanımlanmıştır. Aynı şekilde çarka giren akışın tanımını yapmak için ayar kanadından çıkan akışın koordinatları kullanılmıştır. Ayrıca çarkın dönüş yönü ve dönüş hızı tanımı da yapılmıştır. Koni ile

birleştirilmiş emme borusunda ise giriş kısmı, çarktan çıkan akışın koordinatlarına göre tanımlanmıştır. Çıkış koşulu ise emme borusunun çıkışının bulunduğu seviyeye göre hesaplanmıştır.

Altınkaya HES'e ait tam türbin analizlerinde ise giriş koşulu olarak salyangoz girişine net düşü ve emme borusunun seviyesinin oluşturduğu basınç değeri verilirken, çıkışına ise çıkış koşulu olarak yine emme borusunda olduğu gibi çıkışının bulunduğu seviyedeki basınç değeri verilmiştir.

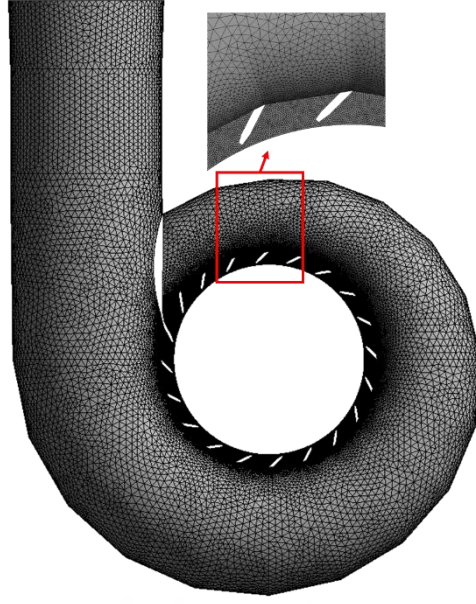
3.5.Sayısal Çözüm Ağı

3.5.1. Çözüm ağı üretimi

HAD analizleri yapılırken çeşitli ağ yapıları kullanılabilir. Ancak bu işlemi gerçekleştirirken dikkat edilmesi gereken nokta maliyet ve zamandır. Sonuçların doğru ve güvenilir olabilmesi açısından çeşitli ağ yapıları oluşturularak optimum çözüm ağı yapısı seçilerek tüm türbin için kullanılmalıdır.

Çözüm ağı yapısının kalitesi ile doğru orantılı olarak yakınsamalar hızlı gerçekleşir ve sonuçlar çözüm ağından bağımsız hale gelerek doğruluğun artmasına yardımcı olur.

Altınkaya HES'e ait akış alanını oluşturan kısımlar sırasıyla salyangoz, sabit kanatlar, ayar kanatları, çark ve emme borusudur. Türbinin akış alanı salyangoz girişinden emme borusuna kadar olan kısmı kapsamaktadır. Çark ve ayar kanadı ağ yapıları için ANSYS TurboGrid [28], salyangoz ve sabit kanatlar ile emme borusunda ANSYS CFX-Mesh kullanılmıştır. Her bir türbin bileşeni için ayrı olarak çözüm ağı çalışması yapılmıştır. Ayrı olarak yapılan bu çalışmalarda belirli bir parametredeki değişimin eleman sayısına göre ilişkisine bakılır. Belirlenen parametredeki değişimin bir eleman miktarından sonra değişim göstermiyor ise küçük olan eleman sayısı tercih edilerek tüm türbin analizlerine devam edilir. Aşağıda türbin bileşenlerine ait çözüm ağı yapıları gösterilmektedir.



Şekil 3.1: Salyangoz ve sabit kanat çözüm ağı.

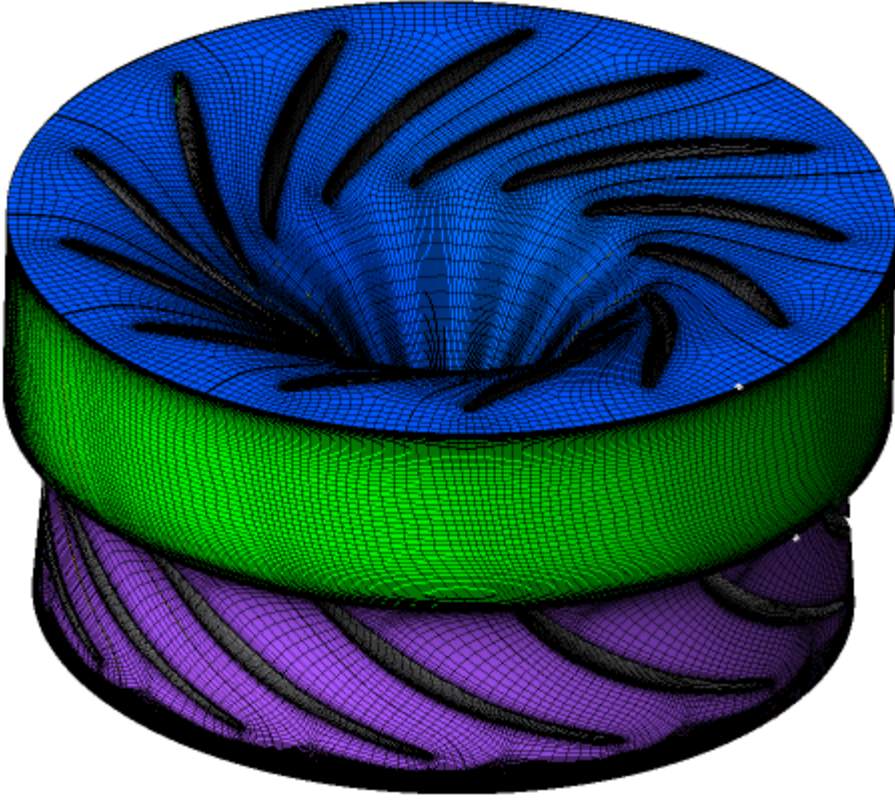
Salyangoz ve sabit kanatlar için çözüm ağı, karmaşık geometrisinden dolayı yapısal olmayan dörtyüzlü elemanlar kullanılarak CFX-Mesh kullanılarak oluşturulmuştur. Yapılan çözüm ağı çalışmasında salyangozun verim değeri ile sabit kanattan çıkan akışın çıkış açısına bakılmıştır (Şekil 3.4 (a)). Sabit kanatlara gelindikçe elemanlar sıklaştırılarak kanatların çevresindeki akışın daha kolay incelenmesi sağlanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda 9399052 eleman sayılı dörtyüzlü eleman kullanılarak salyangoza ait çözüm ağı elde edilmiştir.

Ayar kanatları için çözüm ağı TurboGrid kullanılarak oluşturulmuştur. TurboGrid, altı yüzlü çözüm ağı üreterek karmaşık yapıdaki kanat geometrilerindeki akışı incelemeyi kolaylaştırır. Ayar kanadı çıkış açısı dikkate alınarak çözüm ağı yapılmıştır (Şekil 3.4 (b)). Yapılan çalışma sonucunda 4940160 eleman sayısı toplamda 20 ayar kanadı için seçilmiştir.

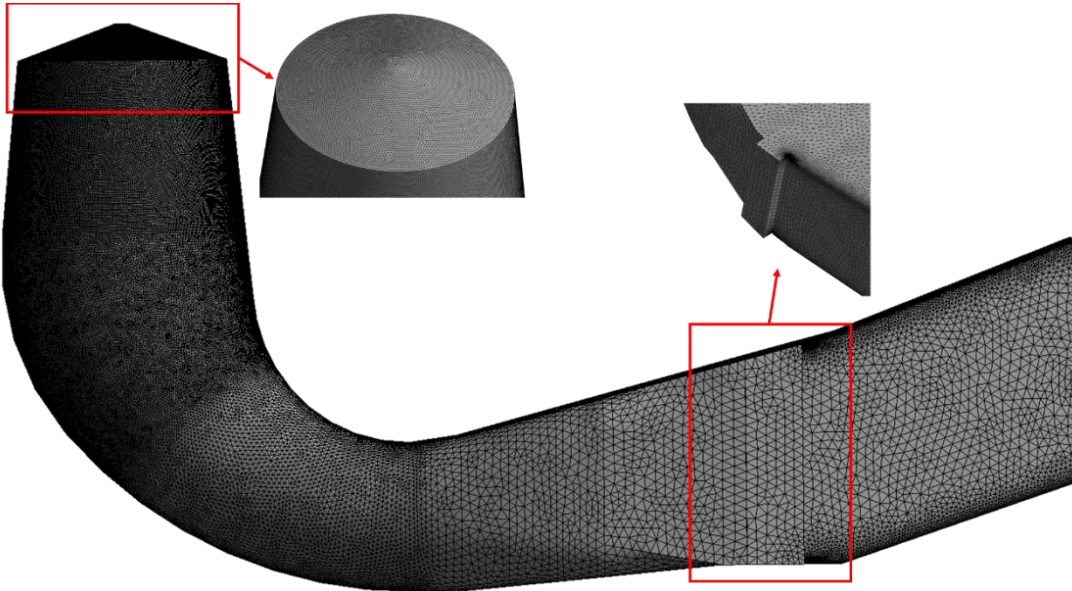
Çarkın çözüm ağı gerçekleştirilirken yine TurboGrid kullanılmıştır. Altı yüzlü elemanlarla yapılan çalışmada çark verimine bakılarak işlem yapılmıştır (Şekil 3.4 (c)). 13 çark kanadı için 6479616 eleman kullanılmıştır. Şekil 3.2'de çarkın ağ yapısı görülmektedir.

Emme borusu için dört yüzlü elemanlar kullanılarak çözüm ağı oluşturulmuştur. Basınç geri kazanım oranına bakılarak çözüm ağı çalışması gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.4 (d)). Çark çıkışındaki akışı inceleyebilmek için emme borusu girişindeki bölgede

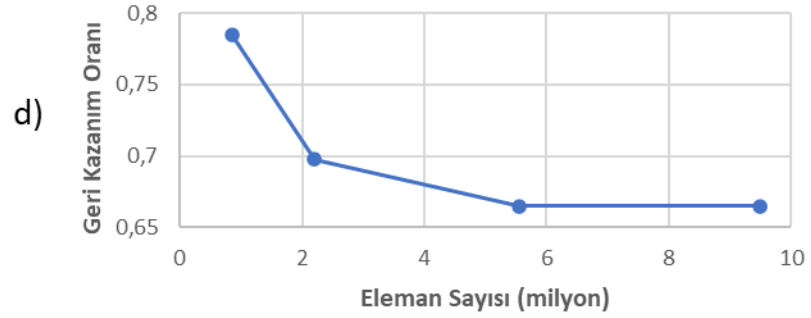
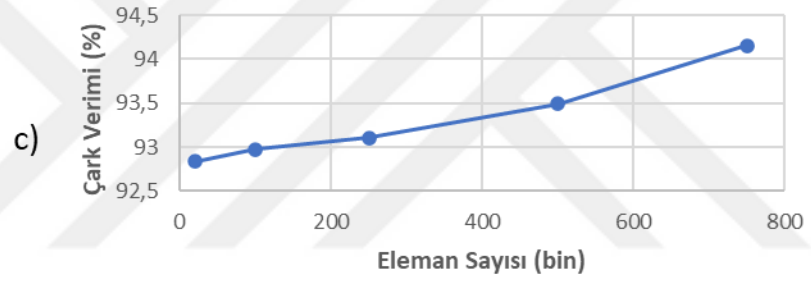
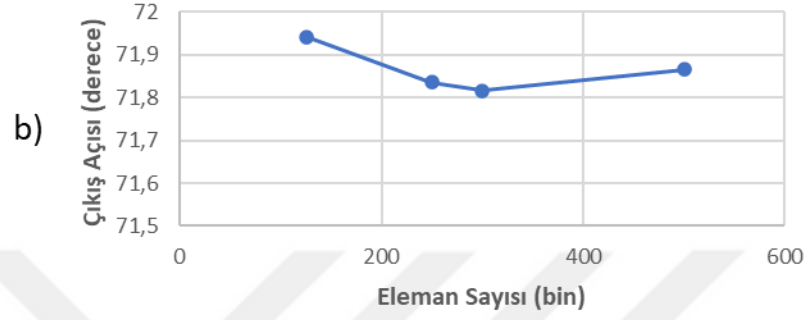
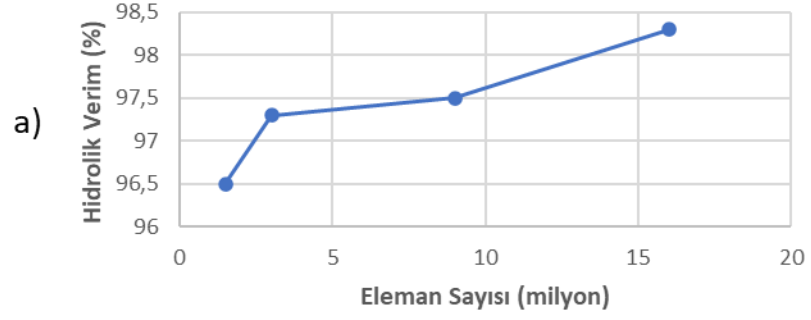
eleman sayıları artırılıp sıklaştırılmıştır. Emme borusu çözüm ağında 5534364 eleman bulunmaktadır. Şekil 3.3'te emme borusu çözüm ağı gösterilmektedir.



Şekil 3.2: Çark çözüm ağı.



Şekil 3.3: Emme borusu çözüm ağı.



Şekil 3.4: Türbin bileşenlerine ait çözüm ağı çalışması.

Tüm türbin için kullanılan çözüm ağının eleman sayıları ve toplamı Çizelge 3.1’de gösterilmektedir.

Çizelge 3.1: Türbin bileşenlerinin çözüm ağı bilgileri.

	Eleman Tipi	Eleman Sayısı
Salyangoz + Sabit Kanatlar	Dört yüzlü	9399052
Ayar Kanatları	Altı yüzlü	4940160
Çark	Altı yüzlü	6479616
Emme Borusu	Dört yüzlü	5534364
Toplam		26353192

Türbine ait parçaların ayrı ayrı incelenmesiyle çözüm ağı eleman sayıları belirlenmiştir. Elde edilen çözüm ağları ile bundan sonraki analizler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 3.1’de de görüldüğü gibi toplamda 26 milyondan fazla eleman kullanılmıştır.

3.5.2. Çözüm ağı bağlantısı

Çizelge 3.1’de görüldüğü üzere her bir bileşen için farklı eleman tipi kullanılmıştır. Ancak bu bileşenleri birbirine bağlayan bir bağlantı olması gerekmektedir.

Salyangoz ve sabit kanattan sonra gelen ayar kanatları arasındaki geçişi sağlamak için ANSYS CFX bu yüzeyler arasını Genel Ağ Arayüzü (GGI) ile bağlar. Kararlı hal analizlerinde ayar kanadından çarka geçen akışı inceleyebilmek için bu iki bileşen arasına donmuş rotor arayüzü tanımlanmıştır. Ayar kanadı donmuş kısım, çark ise dönen kısımdır. Burada çerçeve değiştiğinde uygun denklem dönüşümleri yapar. Aynı şekilde çark ile emme borusu arasına da donmuş rotor tanımlanmıştır. Burada ise yine çark dönen kısım iken emme borusu donmuş kısımdır. Kararsız hal analizlerinde ise donmuş rotor yerine zamana bağlı rotor-stator arayüzü kullanılmıştır.

3.6. Simülasyon Yöntemi

Bu tez kapsamında kararlı hal analizleri ile zamana bağlı analizler gerçekleştirilmiştir. Tüm simülasyonlar ANSYS CFX 18.2 kullanılarak yapılmıştır.

Altınkaya HES’e ait çalışma aralığının belirlenmesi açısından verilen tasarım değerleri dışında çeşitli noktalarda analizler gerçekleştirilmiştir. Verilen nominal (116 m), minimum (96.5 m) ve maksimum (132.7 m) düşü değerlerini kapsayacak

bir aralık belirlenmiştir. Bu değerleri kapsayacak şekilde 90, 96.5, 106, 116, 126, 136 m düşü değerleri ile; 10°, 14°, 18°, 20° ve 22° ayar kanadı açıklıklarında toplamda 30 farklı çalışma noktasında kararlı hal analizleri gerçekleştirilmiştir. Burada giriş sınır koşulu olarak salyangoz girişine toplam basınç, emme borusu çıkışına ise statik basınç tanımlanmıştır. Pürüzsüz duvar tanımının yanında, adveksiyon şeması yüksek çözünürlük olarak analizler gerçekleştirilmiştir.

Türbinin zamana bağlı hareketlerini incelemek için gerçekleştirilen analizlerde ise verilen nominal, minimum ve maksimum düşü değerlerinde 20.9°, 15.25° ve 20.65° ayar kanadı açıklıklarında toplamda 3 adet analiz gerçekleştirilmiştir. İkinci dereceden geri Euler zamana bağlı şema olarak kullanılmıştır. Zaman adımı olarak 0.0019996 s kullanılmıştır, bu süre çarkın 2° dönüş yapması için geçen süredir. Çark 5 tur attığında geçen süre 1.8 s'dir. Analizler çarkın 5 turluk hareketini incelemiştir.

Türbine ait HAD analizleri gerçekleştirilirken tüm analizler için dokuz adet 12 çekirdekli HP Proliant DL380p Gen8 düğümünden oluşan ETU Hidro demet bilgisayarı kullanılmıştır. Yani tüm simülasyonlar 108 çekirdek kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kararlı hal simülasyonlarının her biri 7-8 saat sürmektedir. Bu da 30 adet simülasyonun bitmesi 9-10 gün sürmüş demektir. Zamana bağlı durumu incelemek için öncelikle başlangıç koşulu verebilmek için 3 adet analizin kararlı hal analizleri gerçekleştirilmiştir. Yaklaşık 3 gün süren bu analizlerden sonra elde edilen sonuçlar başlangıç koşulu olarak tanımlanmıştır. Bu başlangıç değeri ile çarkın 5 tur atarkenki zamana bağlı analizlerinin her biri yaklaşık 45 saat sürmüştür. Kararsız hal analizlerinin bitmesi için geçen süre yaklaşık 5 gündür. Böylelikle tez için gerekli sonuçları elde etmek 15-20 gün sürmüştür.

3.7.Saha Verimlilik Ölçümü

Bir hidroelektrik santralin kurulduğu ilk günden yıllar sonrasına kadar ilk zamanlardaki gibi çalışması mümkün değildir. Zaman içerisinde akan suyun da etkisiyle türbin parçalarında hasarlar meydana gelir. Bunda akan suyun içerisindeki maddeler ile kavitasyon gibi faktörler etkilidir. Bu durumdan en çok etkilenen kısım ise çarktır. Suyun enerjisini kullanarak asıl enerji üretiminin gerçekleştiği çarkta yılların etkisinin yanında tasarım da iyi yapılmamışsa kavitasyondan kaynaklı aşınmalar meydana gelir. Bu durumda çarka bakım ve onarım yapılması gerekmektedir. Bu işlemler de çark geometrisinin ilk tasarımdan farklı olmasına

sebepler olur. Ayrıca çark haricinde türbinin diğer bileşenlerinde de hasarlar ve kayıplar meydana gelmektedir. Zaman içerisinde çark gibi diğer parçalarında görevini ilk zamanlardaki gibi gerçekleştirip gerçekleştirmediğini anlamak için saha verimlilik ölçümleri yapılır.

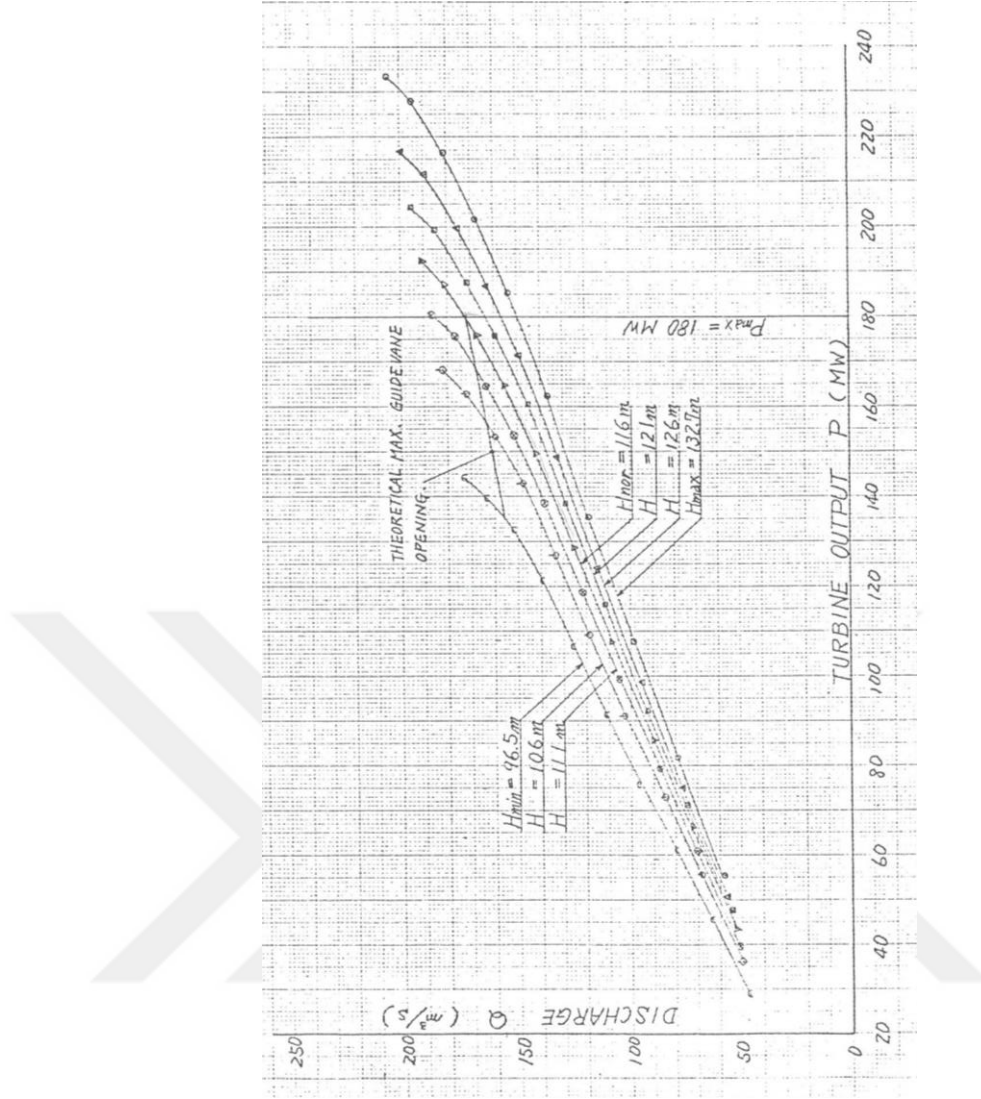
Saha gezisinde görülmüştür ki türbin-generatör üniteleri fonksiyonlarını hala yerine getirmektedir ve genel olarak iyi bir durumdadır. Ancak türbin verimi enerji üretiminin en yüksek olduğu durumlarda oldukça düşüktür. Kanatlar üzerindeki bozulmalar türbin verimini olumsuz etkilemektedir. Normalde 180 MW enerji üretecek şekilde tasarlanan türbinde üretilen enerji miktarı 150-165 MW arasındadır. Üniteler, kontrolü sağlanan mekanik problemlerin varlığında güvenilir bir şekilde çalışmaktadır [29].

Santralin kontrol ve koruma ekipmanlarının kullanım ömrü 20-30 yıl arasında değişmektedir. Altınkaya Hidroelektrik Santrali ise 32 yıldan fazla süredir çalışmakta olduğu için bakım ve onarım malzemeleri kullanım ömürlerini çoktan tamamlamıştır. Uzun süredir çalışmakta olan bu santralin mevcut durumunu anlamak için saha verimlilik ölçümü yapılması gerekmektedir. Bu amaçla Hatch firması tarafından Altınkaya'nın 1. ünitesine gerçek zamanlı debi ve verimlilik gözlem sistemi (Efficiency Monitoring System (EMS)) kurulmuştur. Verimin gözlenmesi hesaplanan debi ve gözlenen düşü değerine bağlı olarak bulunmaktadır.

Ünite üzerine kurulan sistem yardımıyla ünite üzerindeki tüm kayıpların kaynağı belirlenebilir ve etkileri ölçülerek enerji denetimi yapılır. Bu sistem yardımıyla yapılan testlerde tek ünite çalıştırılarak elde edilen en yüksek verim değeri %92.6 olarak ölçülmüştür.

Santral ilk kurulduğundaki üretilen güç – debi grafiği Şekil 3.5'teki gibidir.

Çizelge 3.2'de tek ünite çalıştırıldığında maksimum verim değerinde elde edilen sonuçlar görülmektedir.



Şekil 3.5: Altinkaya HES ilk kurulduğundaki Debi – Güç grafiği [30].

Çizelge 3.2: En Yüksek Verim Değerinde Performans Test Sonuçları.

Türbin Verimi (%)	92.60
Üretilen Güç (Normalize) (MW)	152.41
Debi (Normalize) (m ³ /s)	148.24
Net Düşü (Normalize) (m)	116.00
Ortalama Ölçülen Net Düşü (m)	114.29

Bu test sırasında ortalama net düşü 114.29 m civarındadır. Ölçülen net düşü değerleri 116 m'lik nominal net düşüye göre normalize edilmiştir [29].



4. SONUÇLAR

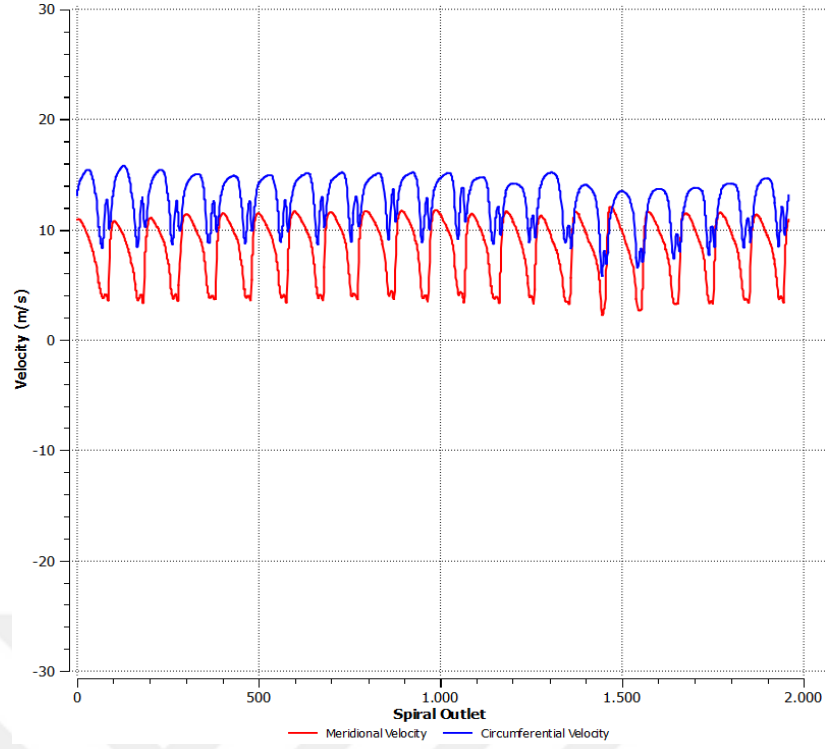
Altinkaya HES için analizler gerçekleştirilene kadar önce saha ziyareti gerçekleştirilip sabit kanat, ayar kanadı ve çark için tarama işlemi gerçekleştirildi. Sahadan elde edilen teknik resimler doğrultusunda salyangoz ve emme borusunun akış alanları modellendi. Tarama verilerinden elde edilen nokta bulutları ile sabit kanat, ayar kanadı ve çark modellendi. Daha sonra çözüm ağı çalışmaları yapılarak türbine ait HAD analizleri gerçekleştirildi. Aşağıda kararlı hal ve zamana bağlı analizlerin sonuçları verilmiştir.

Türbinin üretici tarafından belirlenen minimum, nominal ve maksimum değerleri Şekil 4.1'de gösterilen kırmızı, yeşil ve açık mavi noktalardır. Burada açık mavi nokta minimum olarak adlandırılmıştır ve net düşü değeri 96.5 m, debi 151.7 m³/s, üretilen güç ise 139 MW'tır. Yeşil nokta türbinin tasarım noktası (nominal) olup 116 m net düşü, 168.2 m³/s debi ve 180 MW üretilen gücü vardır. Kırmızı ile gösterilen nokta ise maksimum olarak adlandırılıp, 132.7 m net düşü, 147.7 m³/s debi ve 180 MW üretilen gücü vardır. Şekil 4.1'de siyah çizgiler yüzde verimi, mavi çizgiler derece olarak ayar kanadı açıklığını göstermektedir.

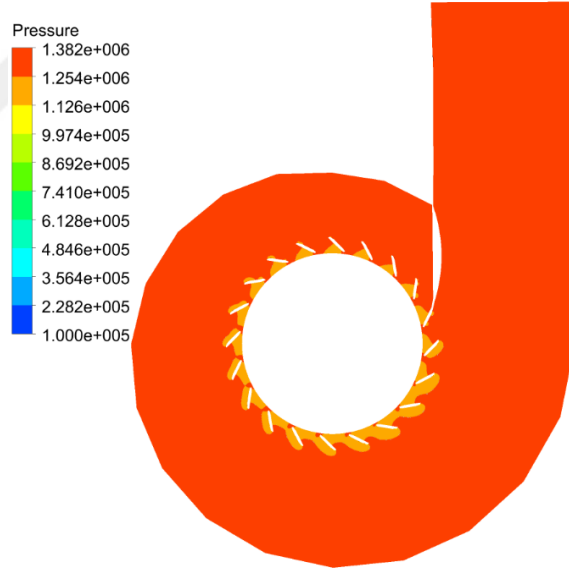
4.1. Kararlı Hal Analizi

Tez kapsamında yapılacak çalışmada, mevcut durumda kurulu ve çalışır haldeki Altinkaya Hidroelektrik Santrali'nin performans değerleriyle Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği yöntemiyle elde edilen sonuçlar yardımıyla türbin hakkında bilgi edinilmesi amaçlanmaktadır.

Türbinin çalışma aralığını öğrenebilmek amacıyla 90 m'lik düşü değerinden 136 m'lik düşü değerine kadar altı farklı düşü ve 10°'den 22°'ye kadar beş farklı ayar kanadı açıklığında 30 çalışma noktası için kararlı hal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu noktalar Şekil 4.1'de mavi noktalar ile gösterilmiştir. Bu noktalardaki debi, net düşü ve verim değerlerinden Altinkaya HES'e ait tepe diyagramı elde edilmiştir.



Şekil 4.2: Salyangoz çıkışında meridyonel ve çevresel hız dağılımları.

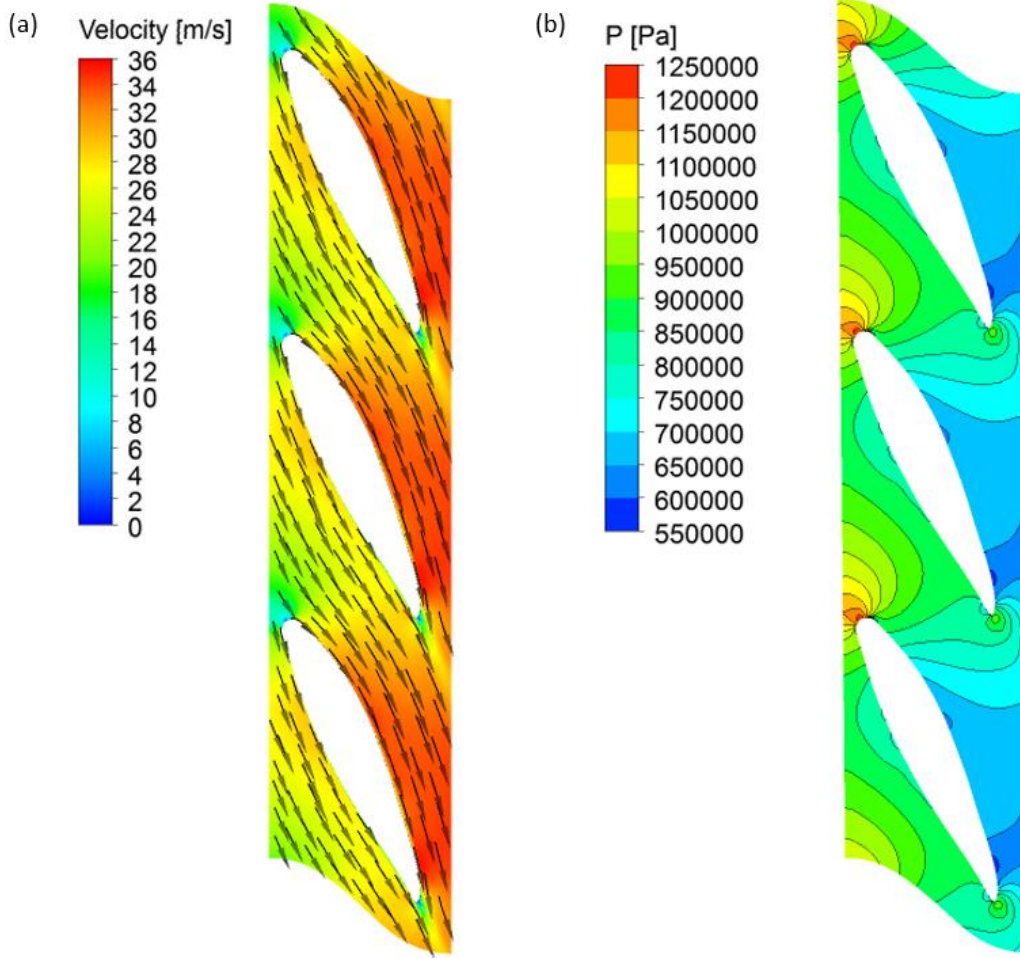


Şekil 4.3: Salyangoz orta kesitinde basınç dağılımı.

4.1.2. Ayar kanadı HAD sonuçları

Türbin içerisinde bir ayar kanadının en önemli görevi debiyi ayarlamaktır. Ayrıca kayıpları en aza indirecek açıklık ile suyu çarka aktarmaktır. Optimum ayar kanadı açıklığını bulmak için tüm türbin kullanılarak çözüm ağı çalışması yapılması gerekmektedir. Bu amaçla çözüm ağı çalışması 18° ayar kanadı açıklığında

gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.4'te ayar kanadının 18° açıklığı için hız vektörleri ile basınç konturları görülmektedir. Basınç hücum kenarından kuyruk kenarına doğru azalma görülmektedir. Bu da hızın hücum kenarından kuyruk kenarına doğru arttığını gösterir. Ayrıca basınç konturuna bakıldığında durma noktası ayar kanadının tam orta noktasından geçmemektedir. Ayrıca bir geri yüklenme olmaktadır. Bu durum tasarım noktasında 18° 'nin ayar kanadının optimum açıklığı olmadığını göstermektedir.



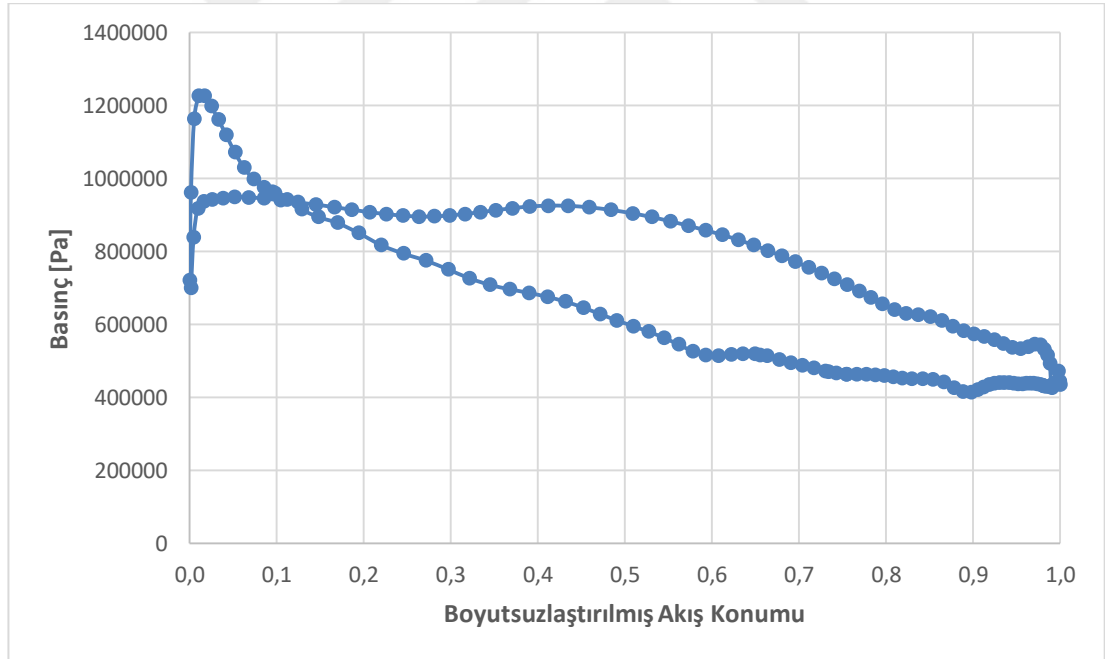
Şekil 4.4: 18° ayar kanadı açıklığında a) hız vektörleri b) basınç konturları.

18° ayar kanadı açıklığı kullanılarak yapılan analizlerde ayar kanadı çıkış açısı 71.8° olarak ölçülmüştür. Bu değer çarkın çözüm ağı çalışmalarında kullanılmıştır. Yani çark giriş açısı 71.8° olarak girilmiştir.

4.1.3. Çark HAD sonuçları

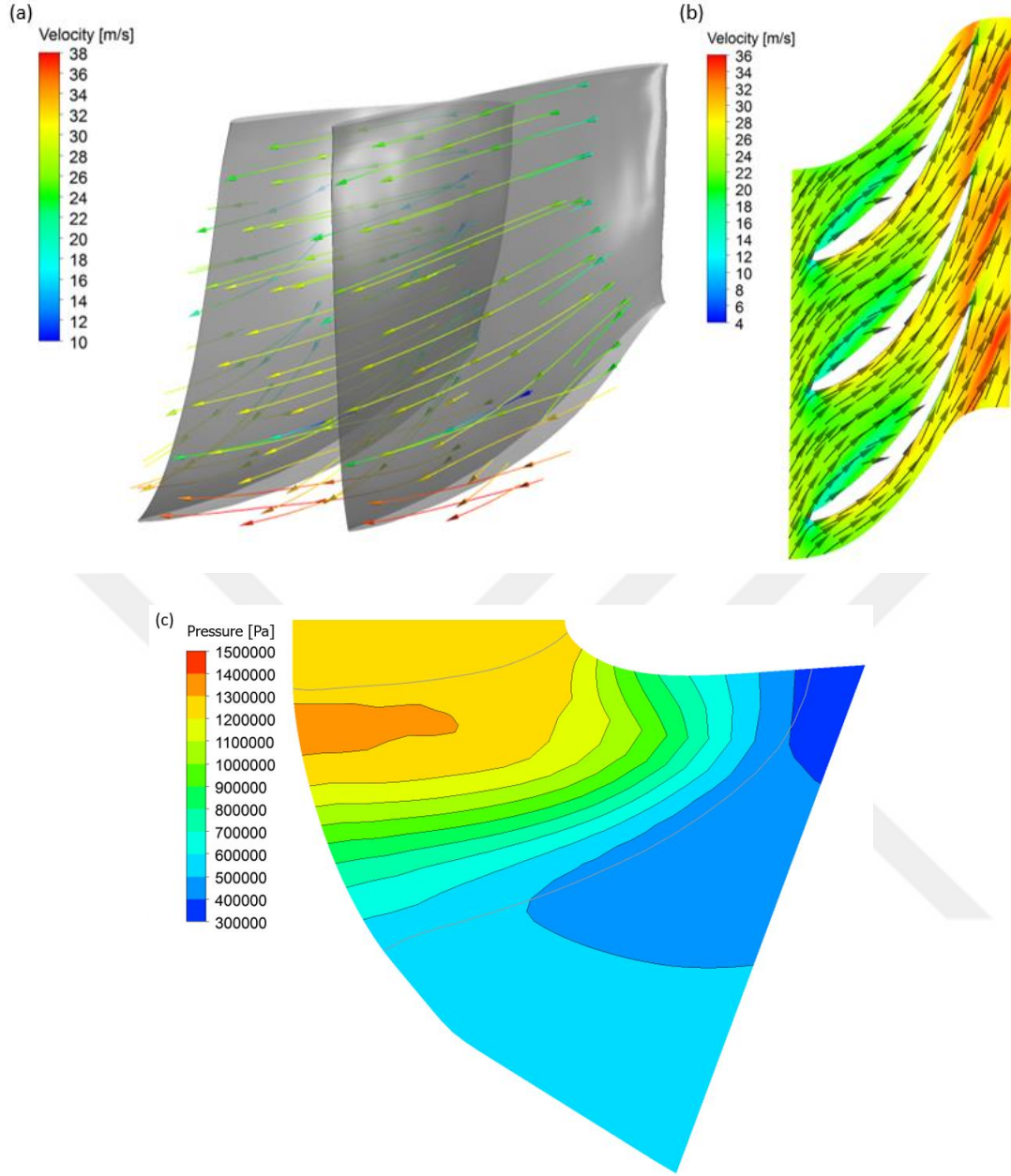
Çark, güç üretiminin gerçekleştiği yer olduğu için türbinin ana bileşenidir. Hidrolik kayıplardaki etkisi de büyük olduğu için türbinin toplam verimliliğini de etkilemektedir. Çark için giriş açısı 71.8° olarak belirlenmişti. Yapılan analizler sonucunda çark çıkış açısının 0.83° olduğu görülmüştür. Çıkış açısının 0° 'ye bu kadar yakın olması, çark girişinde oluşan dolaşımın neredeyse tamamının kullanıldığı ve sudaki hidrolik enerjinin neredeyse tamamının kullanıldığı anlamına gelmektedir. Öte yandan çark çıkışında suyun tüm enerjisi kullanılmamış olursa bu emme borusundaki girdap olaylarını engelleyebilir.

Şekil 4.5'te çarkın basınç dağılımı görülmektedir. Çark kanadında basma yüzeyi ile emme yüzeyi arasındaki basınç farkı ne kadar fazla olursa üretilen güç de o kadar fazla olur demektir. Ancak burada çark girişinde emme tarafındaki basınç değerinin basınç tarafındaki basınç değerinden fazla olduğu görülmektedir. Bu da çarkın güç üretme yeteneğinin azaldığını göstermektedir.



Şekil 4.5: Çark basınç dağılımı.

Çark kanadı boyunca olan akışı anlamak için Şekil 4.6'da birtakım konturlar verilmiştir. Burada kanat boyunca akış çizgileri, hız vektörleri ve kanat üzerindeki basınç dağılımı gösterilmiştir.



Şekil 4.6: Çark kanadının a) üzerindeki akış çizgileri b) hız vektörleri c) basınç dağılımı.

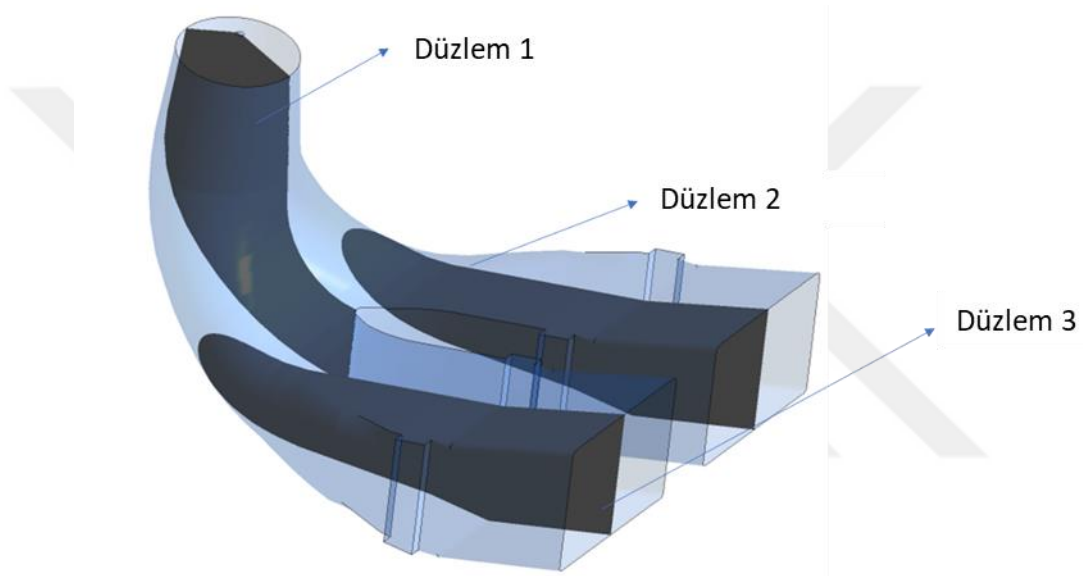
4.1.4. Emme borusu HAD sonuçları

Altinkaya HES'in emme borusunun akış davranışı hız vektörleri, basınç konturları ve basınç geri kazanım faktörü incelenmiştir. Basınç geri kazanım faktörü (C_p), Denklem 4.1'deki gibi hesaplanmaktadır.

$$C_p = \frac{P_{out} - P_{in}}{\frac{\rho V^2}{2}} \quad (4.1)$$

Burada P_{out} emme borusu çıkış basıncını, P_{in} emme borusu giriş basıncını ve V emme borusu giriş hızını ifade etmektedir. Bir diğer önemli nokta ise akışın dirseğe varmadan önceki hız değerleridir. Dirsek bölgesindeki kayıpları azaltmak için hız değerlerinin mümkün olduğunca düşürülmesi gerekmektedir.

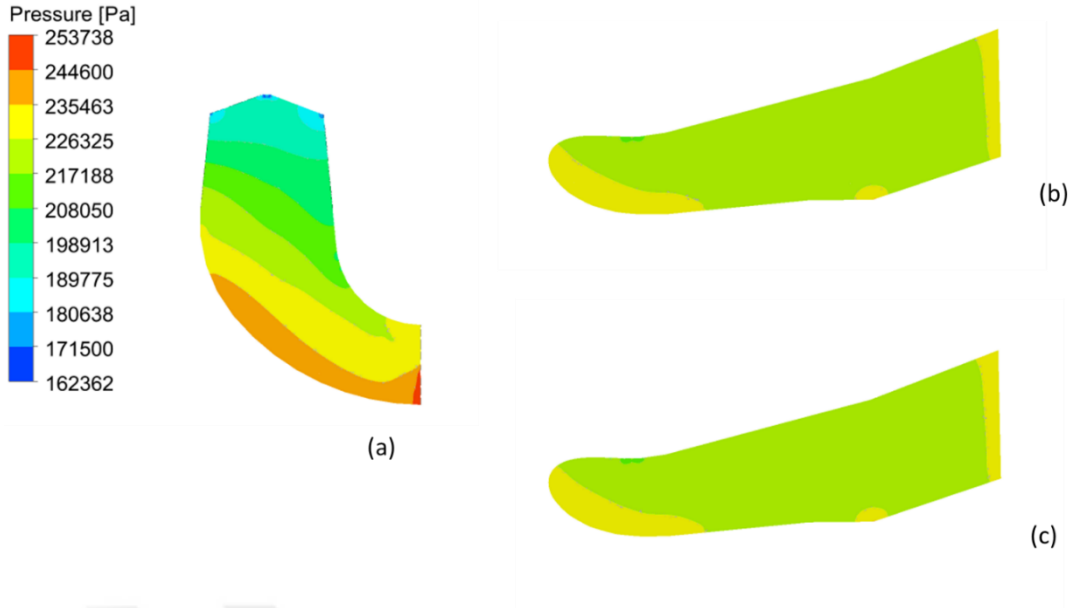
Altinkaya'da emme borusunun iki adet difüzörü vardır. Dirsek çıkışında orta kısmındaki sütun emme borusunun çıkışını ikiye bölmektedir. İki çıkışı olması sebebiyle emme borusu 3 düzlem üzerinde incelenmiştir. Bu düzlemler Şekil 4.7'de gösterilmiştir. Düzlem 2 ve Düzlem 3, Düzlem 1'den (orta düzlem) eşit mesafe uzaklıktır.



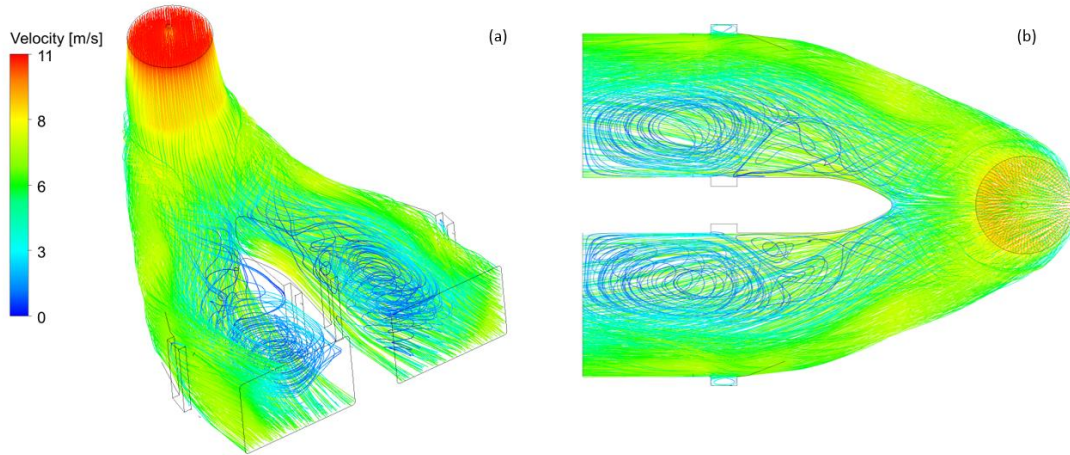
Şekil 4.7: Emme borusu düzlemleri.

Emme borusundaki basınç değişimi Şekil 4.8'de gösterilmektedir. Basınç çıkışa doğru artmaktadır. Bu durum emme borusunun amacına uygun davrandığının göstergesidir. Şekil 4.8 (b) ve (c)'e bakıldığında, her iki difüzörün de benzer akış topolojisine ve simetrik basınç dağılımına sahip olduğu görülmektedir.

Şekil 4.9'da emme borusunun hız akış çizgileri görülmektedir. Çarkın çıkış açısı nedeniyle, suyun çarkı terk ettiği ve emme borusuna girdap yapısıyla girdiği bilinmektedir. Bu girdap dirsekte parçalanır. Daha sonra akış emme borusunun çıkışında iki girdap olarak gözlenir (Şekil 4.9 (b)).



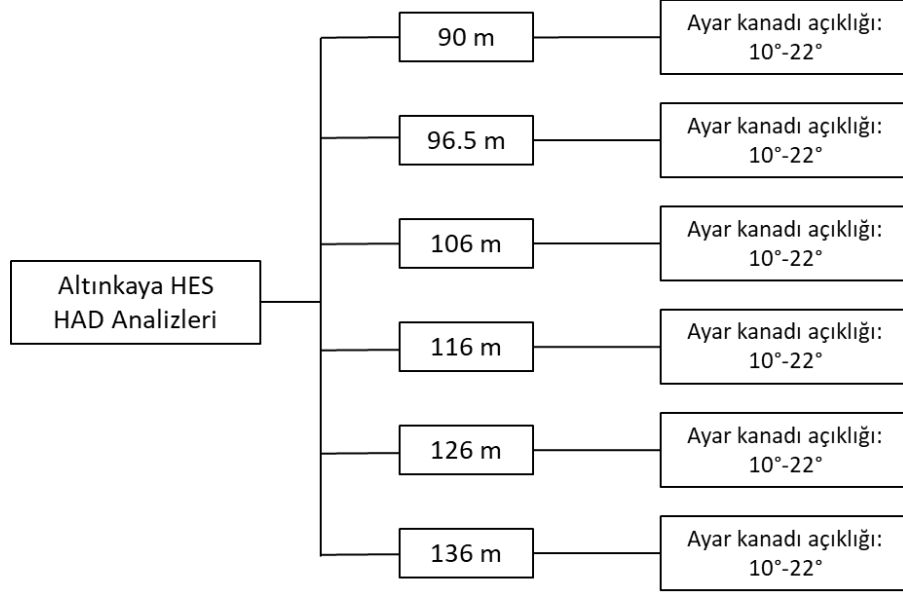
Şekil 4.8: Emme borusu basınç dağılımı a) düzlem 1 b) düzlem 2 c) düzlem 3.



Şekil 4.9: Emme borusu akış çizgileri a) yandan görünüm b) üstten görünüm.

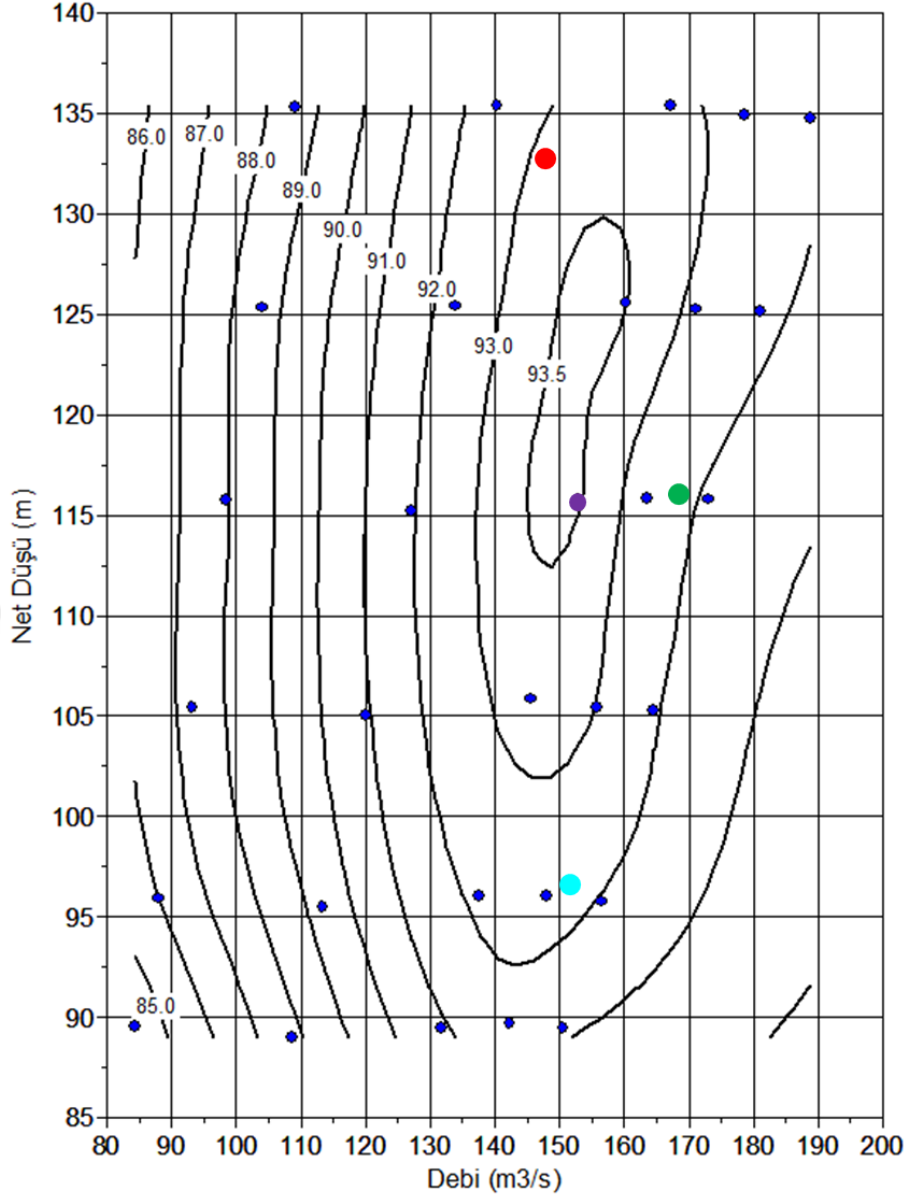
4.1.5. Tüm türbin kararlı HAD sonuçları

Her bir türbin bileşeni için çözüm ağından bağımsızlaştırma işlemi gerçekleştirildikten sonra tüm türbine ait analizler yapılmıştır. Mevcut türbinin debi-düşü çalışma karakteristiği araştırılmıştır. Her biri 26 milyon örgü ağına sahip farklı ayar kanadı açıklıkları ve düşü değerleri için 30 adet tüm türbin simülasyonu gerçekleştirildi. Bu simülasyonlarda tasarım noktasının dışında daha yüksek ve daha düşük debi-düşü değerleri incelenerek türbine ait geniş çalışma aralığı incelenebilir hale geldi. Bu simülasyonların sonucunda türbinin tepe diyagramı elde edildi. Şekil 4.10'da tepe diyagramı elde etmek için türbin çalışma aralıkları gösterilmiştir.



Şekil 4.10: Tepe diyagramı için HAD değerleri.

Şekil 4.11’de tepe diyagramı verilmiştir. Diyagramda siyah çizgiler ile verimlilik eğeğim çizgileri (η) görülmektedir. Bu grafikte yeşil ile gösterilen nokta HES’in tasarım noktasını göstermektedir. Mor ise simülasyonlar sonucunda elde edilen en yüksek verim değerini göstermektedir. Türbinin tasarım noktası tepe diyagramının ortasında ve bu noktadaki verimin en yüksek olması verimli bir türbin tasarımı olduğunu gösterir. Şekil 4.11’de görüldüğü üzere bu türbinde türbin tasarım noktası en yüksek verim değerine ulaşamamıştır. Eğer türbin, tasarım noktası dışında bir değerde çalıştırılacaksa verimliliği yüksek tutmak önemlidir. Ayrıca Şekil 4.11’de maksimum (kırmızı), nominal (yeşil) ve minimum (açık mavi) olarak adlandırılan garanti edilen noktaların da verim değerleri görülmektedir. Bu sonuçlar ve Çizelge 4.1’de verilen değerlere bakıldığında garanti edilen sonuçlar ile HAD analizleri sonucunda elde edilen sonuçların tutarlı olduğu görülmektedir.

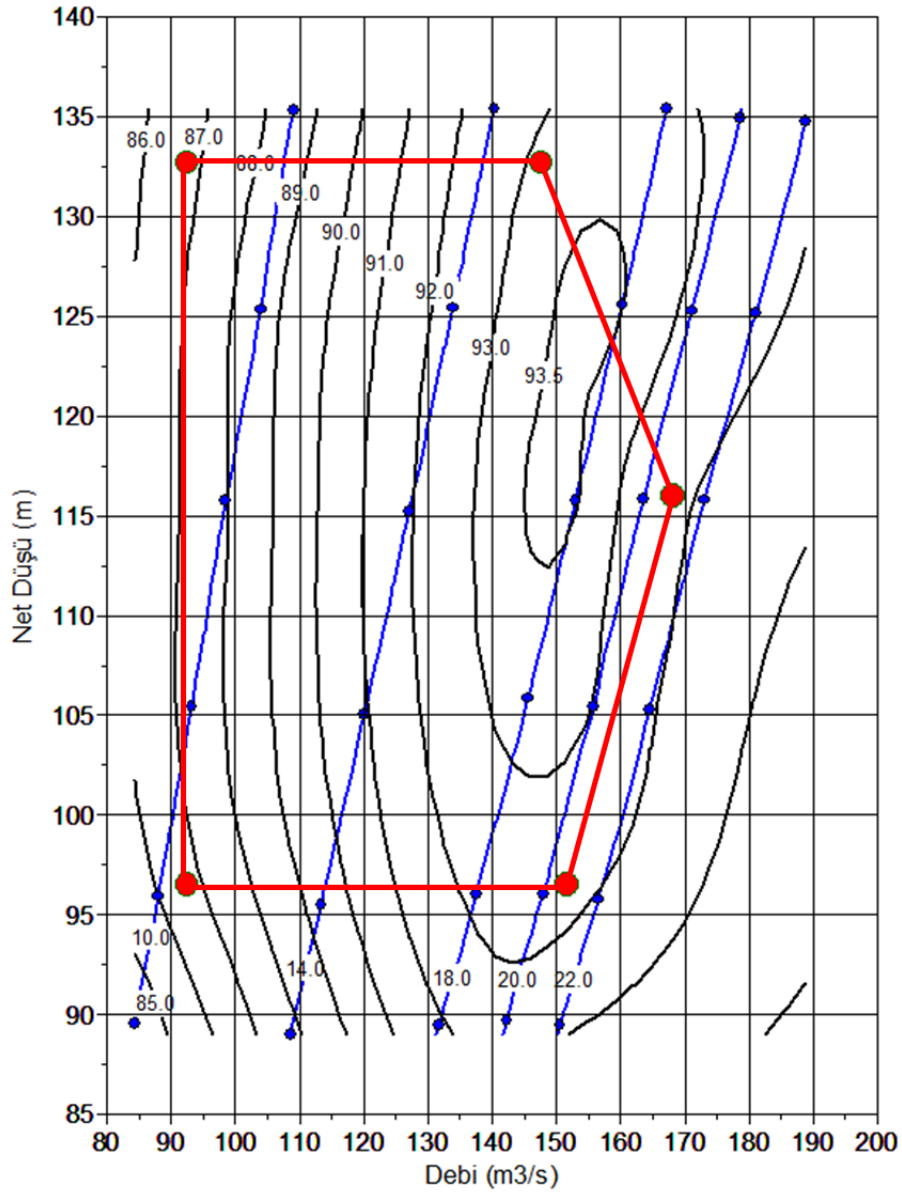


Şekil 4.11: Altınkaya HES için en yüksek verim ve garanti sonuçlar tepe diyagramı.

Çizelge 4.1: Garanti noktalar ve en yüksek verim noktası değerleri.

Sembol	Garantili Verim Değerleri (%)	HAD Verim Değerleri (%)
●	-	93.53
●	93.9	92.61
●	94.3	93.07
●	92.9	92.22

Türbine ait çalışma aralığı Şekil 4.12’de kırmızı ile gösterilen bölgedir. Şekil 4.1’de gösterilen tasarım noktasındaki verim değeri %92.61’dir. Türbinin belirlenen çalışma aralığında verim değerleri %86’dan fazladır.



Şekil 4.12: Türbin çalışma aralığı.

Yılın farklı zamanlarında baraj doluluk oranı değişiklik gösterdiği için bir türbin çalışma ömrü boyunca her zaman tasarım noktasında belirtildiği gibi aynı debi-düşü değerlerinde çalıştırılmaz. Bu sebeple türbin tasarım dışı noktalarda da çalıştırılır. Ancak bu çalışma koşulları türbine zarar verebilir. Bir türbine zarar verebilecek en tehlikeli durumlardan biri kavitasyondur. Kaviteasyon, akış içerisinde meydana gelen kabarcıklar olarak tanımlanabilir. Akış esnasında hızın artmasına bağlı olarak basınçtaki ani düşüş suyun soğuk kaynamasına ve bu sebeple kabarcıkların

oluşmasına neden olmaktadır. Bu kabarcıklar patladığında ise türbinde aşınma, verim düşümü, gürültü ve titreşim gibi çeşitli zararlı durumları beraberinde getirir. Bir türbinde güç üretimindeki en etkin role sahip çark aynı zamanda en çok kavitasyona maruz kalan kısımdır. Bu nedenle, türbin çarkında kavitasyon incelemeleri yapılır. Çark kanadı boyunca basınç dağılımı kullanılarak türbin çarkı için Thoma sayısı dağılımı elde edilir. Thoma sayısı boyutsuz kavitasyon sayısıdır. Denklem 4.2'deki şekilde yerel Thoma sayısı (σ_i) hesabı yapılır.

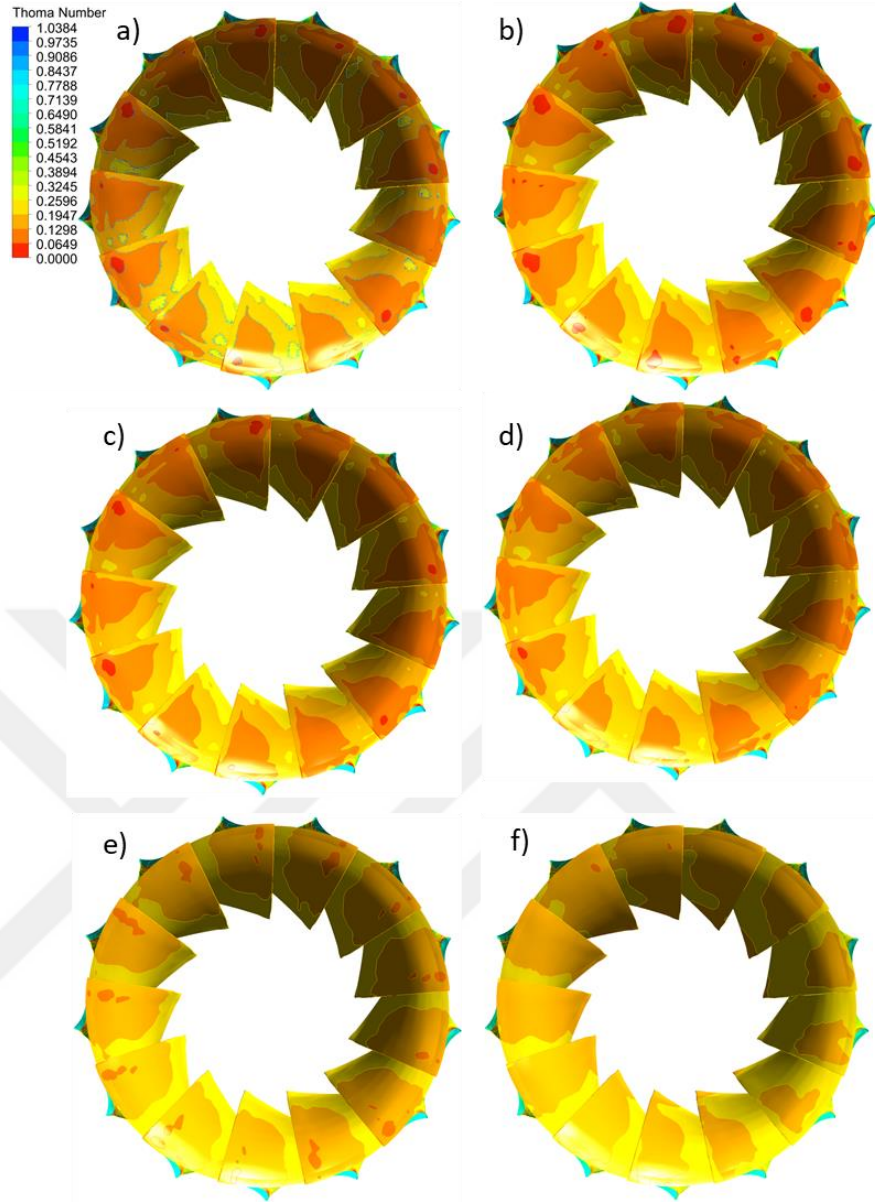
$$\sigma_i = \left(\frac{P_i - P_v}{\rho g} \right) x \left(\frac{1}{H_n} \right) \quad (4.2)$$

Türbine ait saha Thoma sayısı (σ_p) bulunurken Denklem 4.3 kullanılır.

$$\sigma_p = \frac{\left(\frac{P_i - P_v}{\rho g} \right) - Z_s}{H} \quad (4.3)$$

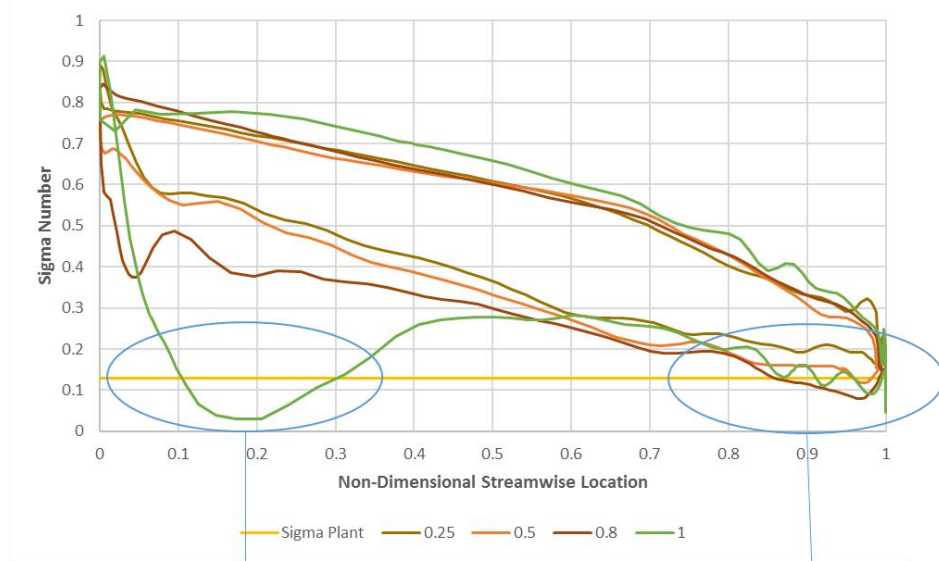
Herhangi bir noktadaki basınç buhar basıncına eşit olursa o noktada kavitasyon meydana gelir ($\sigma_i = \sigma_p$). Yerel Thoma sayısı, saha Thoma sayısından küçük olduğunda, kavitasyon kabarcıkları oluşmaya ve büyümeye başlar.

Altinkaya HES'de saha Thoma sayısı 0.1298 olarak hesaplanmıştır. Altinkaya HES'in bulunduğu Samsun'un buhar basıncı 4.5 kPa olarak belirlenmiştir. Çarkta kavitasyonun görselleştirilmesi için Şekil 4.13'te 116 m net düşüde farklı ayar kanadı açıklıkları için Thoma konturları çizilmiştir. Şekil 4.14'te tasarım noktası için, taçtan bileziğe doğru, kanadın farklı aralıklarında Thoma sayısı dağılımı verilmiştir. Kanatta hem basınç hem de emme yüzeyinde basınç değeri hücum kenarından kuyruk kenarına doğru azalmaktadır. Şekil 4.14'te ayrıca Thoma sayısının 0.1298'in altına indiği durumların saha görselleri de görülmektedir. %99 yükleme durumunda, kavitasyona maruz kalan bölge kanadın emme yüzeyinin yaklaşık %27'sini oluşturmaktadır.



Şekil 4.13: 116 m düşü için farklı ayar kanadı açıklıklarında Thoma sayısı dağılımı
a) 20.9° b) 22° c) 20° d) 18° e) 14° f) 10°.

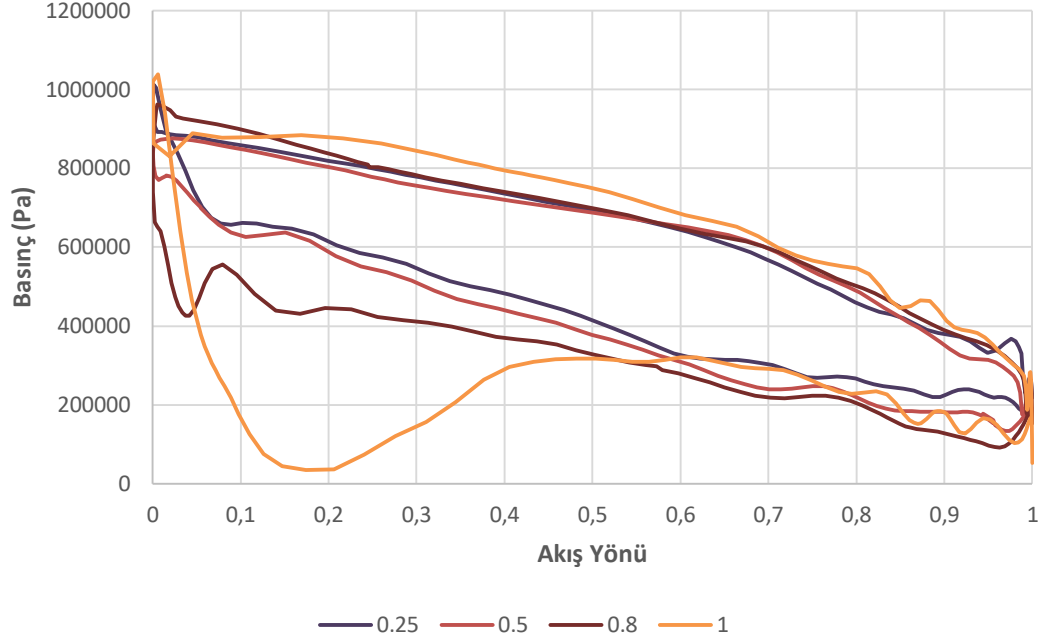
Saha ziyareti sırasında elde edilen fotoğraflarda kanat girişinin emme tarafı ile çark bandına yakın yerinde hafif kavitasyon görülmektedir. Ayrıca kanat çıkışında da yine kavitasyon görülmektedir. Bu görsellere HAD analizleri sonucunda da ulaşılmıştır.



Şekil 4.14: 116 m düşü için kanadın farklı konumlarında Thoma sayısı dağılımı ve saha fotoğrafları.

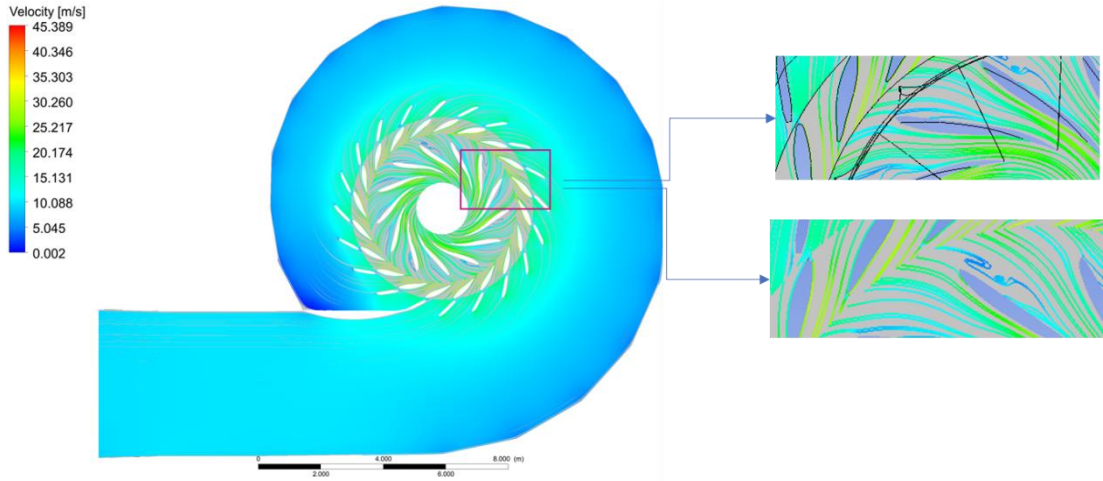
Hem basınç hem de emme yüzeyleri için hücum kenarından kuyruk kenarına kadar olan statik basınç yüklemeleri kavitasyon ve kanadın çalışma prensibi hakkında bilgi verir. Şekil 4.15'te tasarım noktası için basınç dağılımı gösterilmektedir.

Hidrolik enerji, çark içerisindeki basıncı azaltarak mekanik enerjiye dönüştürülür. Bu sayede suyun hidrolik enerjisi kullanılabilir. Şekil 4.14'te görüldüğü gibi basınç değerleri hücum kenarından kuyruk kenarına doğru düşer. Yerel basınç değerinin buhar basıncından küçük olduğu durumlarda kavitasyon gerçekleştiği bilinmektedir. Şekil 4.15'te görüldüğü gibi hücum kenarının yakınında, basınç değerlerinin buhar basıncının altına düştüğü durumda bilezikte kavitasyon meydana gelir.



Şekil 4.15: 116 m düşü ve 20.9° ayar kanadı açıklığında çarkın basınç dağılımı.

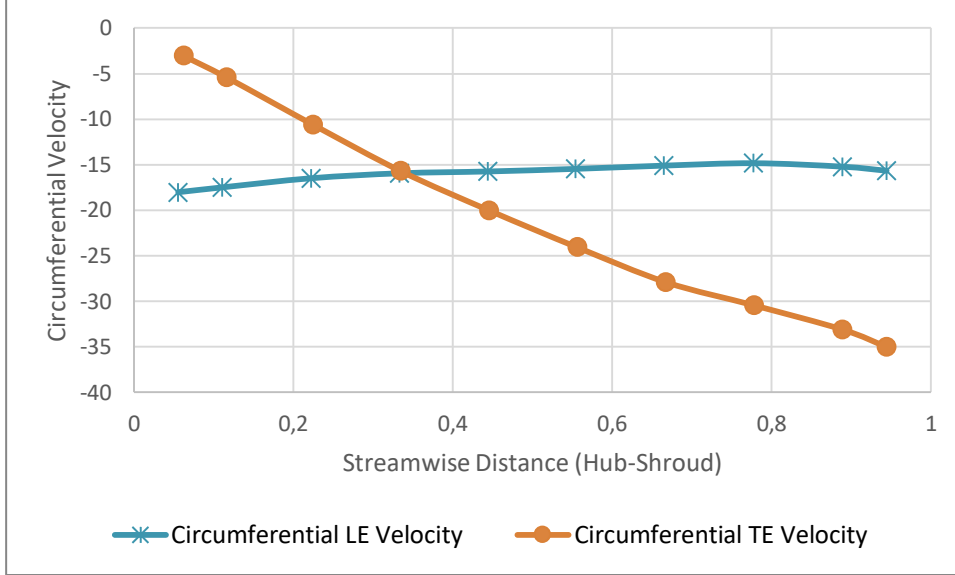
Şekil 4.16'da 116 m düşü ve 20.9° ayar kanadı açıklığı için akış çizgileri ve hız vektörleri gösterilmiştir. Kanadın basınç yüzeyinde, dikey yapılar ve ayrılmalar gözlemlenmektedir. Bu yapılar kanadın basınç yüzeyindeki basıncı azaltarak çarkın performansında düşüğe neden olur.



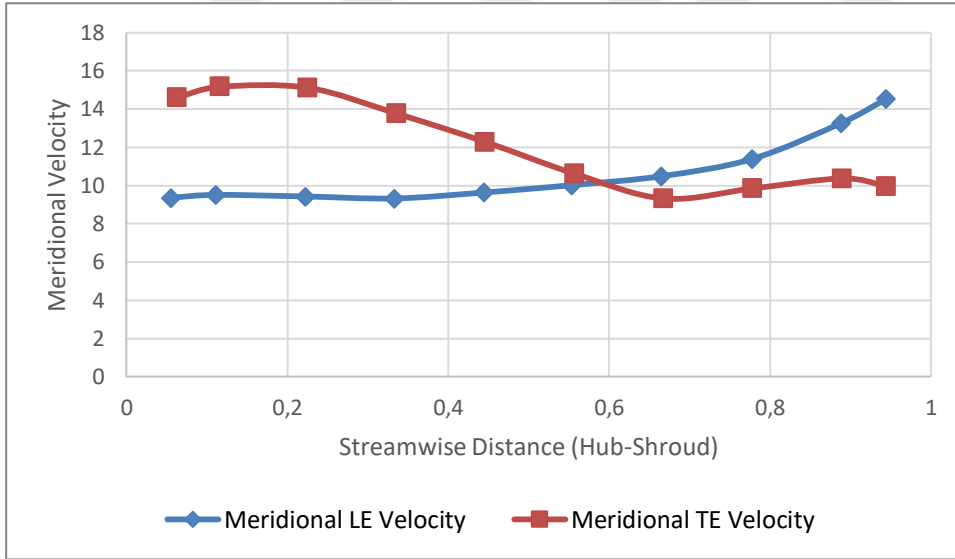
Şekil 4.16: 116 m düşü ve 20.9° ayar kanadı açıklığında akış çizgileri ve hız vektörleri.

Şekil 4.17 ve Şekil 4.18'de çark girişi ve çıkışı için taçtan bileziğe doğru çevresel hız ve meridyonel hız profilleri verilmiştir. Francis türbinlerde üretilen gücün fazla olması istenirse çarktaki dolaşımın maksimum olması ve çevresel kuyruk kenarı hız değerinin sıfır olması gerekmektedir. Altinkaya'da suyun hidrolik enerjisinin tam

olarak kullanılmadığı, bu sebeple çarkın güç üretim potansiyelinin tam olarak kullanılmadığı görülmektedir. Çark çıkışında su hala bir miktar hidrolik enerjiye sahiptir. Bu çarkın potansiyelinden düşük güç ürettiğini göstermektedir.



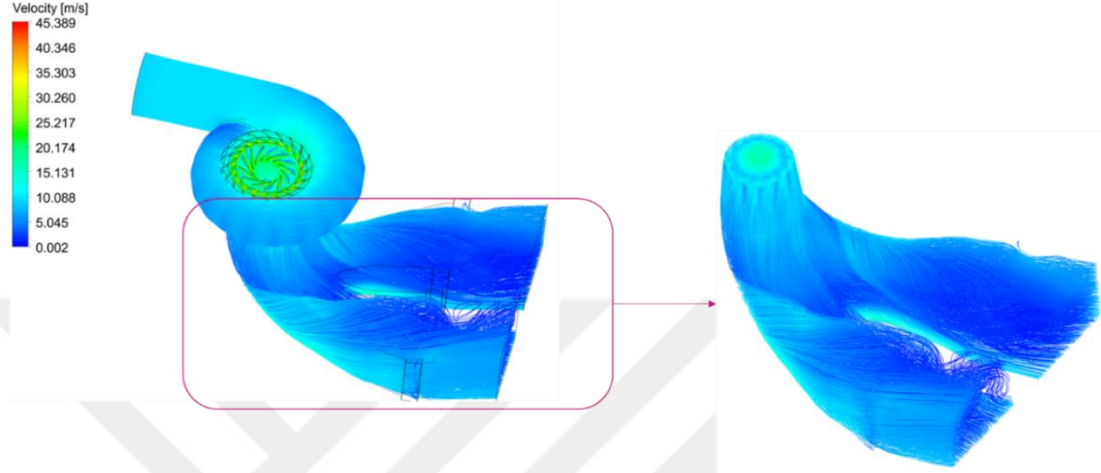
Şekil 4.17: %99 yükleme için taçtan bileziğe çevresel hız dağılımı.



Şekil 4.18: %99 yükleme için taçtan bileziğe meridyonel hız dağılımı.

Çark performansı incelenirken, hücum kenarındaki ve kuyruk kenarındaki meridyonel hız dağılımı, meridyonel profile paralel olmalıdır. Böylece düzgün debi dağılımı elde edilebilir. Şekil 4.18 incelendiğinde, çark boyunca neredeyse düzenli bir debi dağılımı görülmektedir.

Altinkaya HES’de kısmi yükleme durumlarında emme borusu ile çark arasında kavitasyon oluşmasını engellemek amacıyla dört boru ile doğal hava girişi yapılmaktadır. Bu sayede kavitasyonun olumsuz etkileri emme borusu üzerinde görülmektedir. Şekil 4.19’da 116 m düşü ve 20.9° ayar kanadı açıklığında hız akış çizgileri görülmektedir.



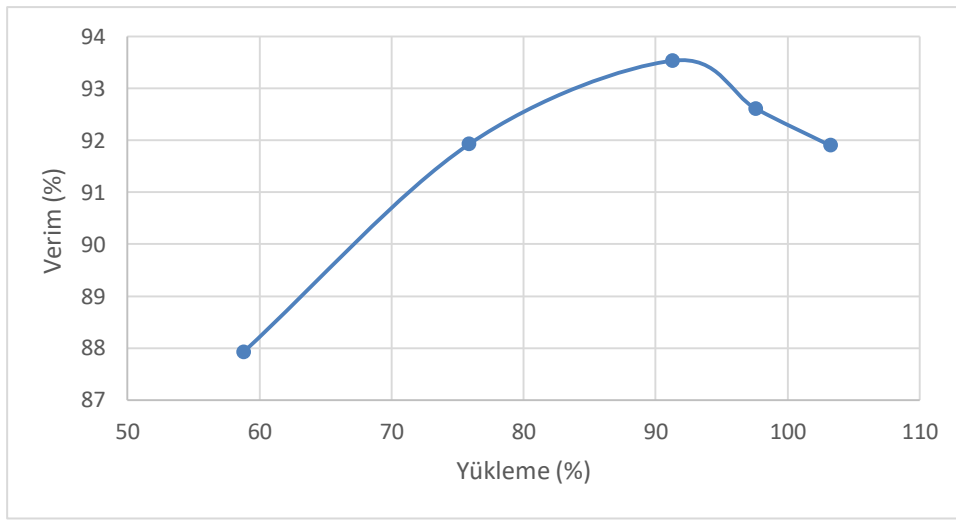
Şekil 4.19: %99 yükleme için emme borusu hız eğrileri.

Çizelge 4.2’de Altinkaya HES’e ait Francis tipi türbinin bileşen bazlı sonuçları verilmiştir. Sonuçlar Çizelge 4.1’de verilen değerler ile tutarlıdır. Maksimum verim değeri %93.07 olarak hesaplanmıştır. Günümüzde iyi tasarlanan bir türbinin verim değeri %96’yı bulabilmektedir. Bir türbin çarkının rehabilite edilerek iyileştirilmesi o türbine bazı avantajlar sağlar. Özellikle hücum kenarı kavitasyonunu ortadan kaldıracak bir tasarım türbin verimini artırırken türbin ömrünü de uzatır.

Çizelge 4.2: HAD ile Altinkaya türbin performans değerleri.

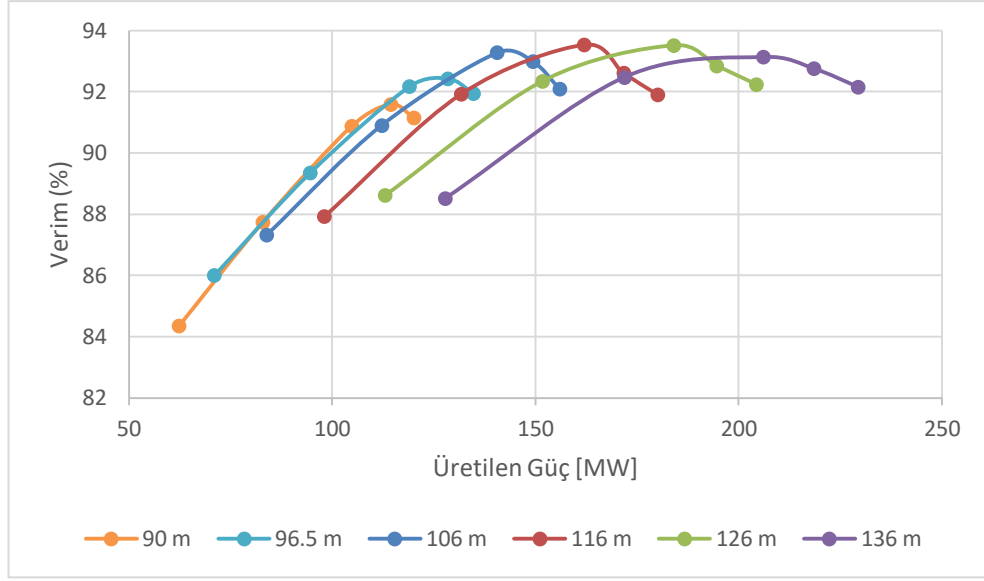
	Salyangoz & Sabit Kanatlar	Ayar Kanatları	Çark	Emme Borusu
Performans	Verim: %98.37	Verim: %99.985	Verim: %89.02	Cp: 0.665
ΔH (m)	2.27	0.02	110.35	2.17
Toplam Verim (%)	92.61			
Nominal Düşü (m)	115.12			
Nominal Debi (m ³ /s)	167.65			
Güç (MW)	174.81			

Türbin her zaman tasarım noktasındaki debi ve düşü değerlerinde çalıştırılmaz. Bunun baraj doluluk oranı, mevsimsel yağış ve elektrik ihtiyacı gibi çeşitli sebepleri vardır. Altinkaya HES için farklı çalışma koşullarının incelenmesi açısından 30 adet farklı düşü ve ayar kanadı açıklığı değerlerinde analiz gerçekleştirilmiş, bu analizlerden elde edilen sonuçlarla oluşturulan tepe diyagramı Şekil 4.12’de verilmiştir. Şekil 4.20’de tasarım düşüsü için yükleme verimlilik grafiği verilmiştir. Türbinde %94’ten sonraki yüklemelerde verimlilik düşmeye başlamıştır. Bir değer türbinin çalışma geçmişi ile uyumlu olup olmadığı kontrol etmek için çalışma karakteristiği ve yüklemeler araştırılmalıdır.



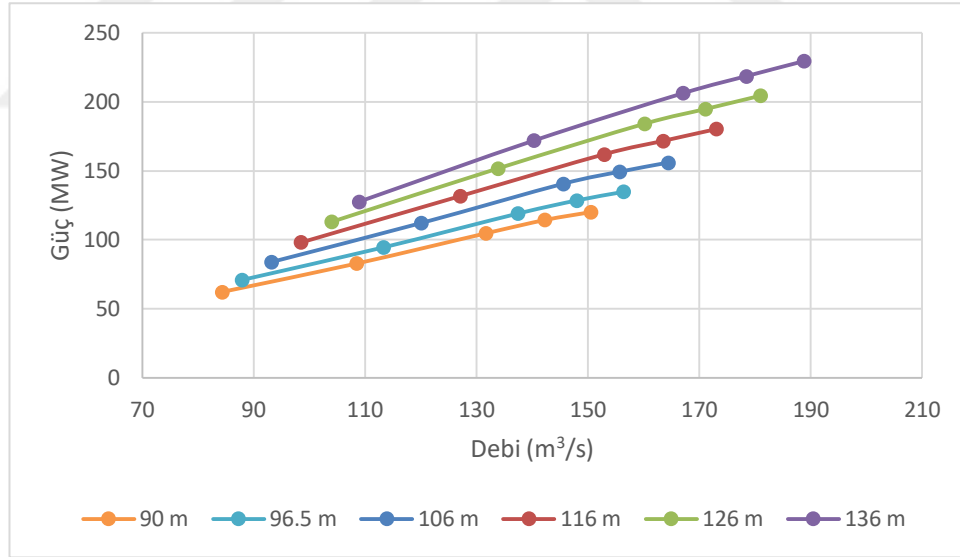
Şekil 4.20: 116 m için yükleme verim eğrisi.

Şekil 4.21’de farklı düşü değerleri için, türbin güç çıkışı ve verimlilik eğrileri gösterilmiştir. Düşü değeri değiştiğinde güç çıkışının eğimi aynı kalmaktadır. Şekilden de görüldüğü gibi, düşüyü artırmak üretilen güç miktarını da artırmaktadır. Bir noktadan sonra ise üretilen güç miktarı azalmaya başlar.



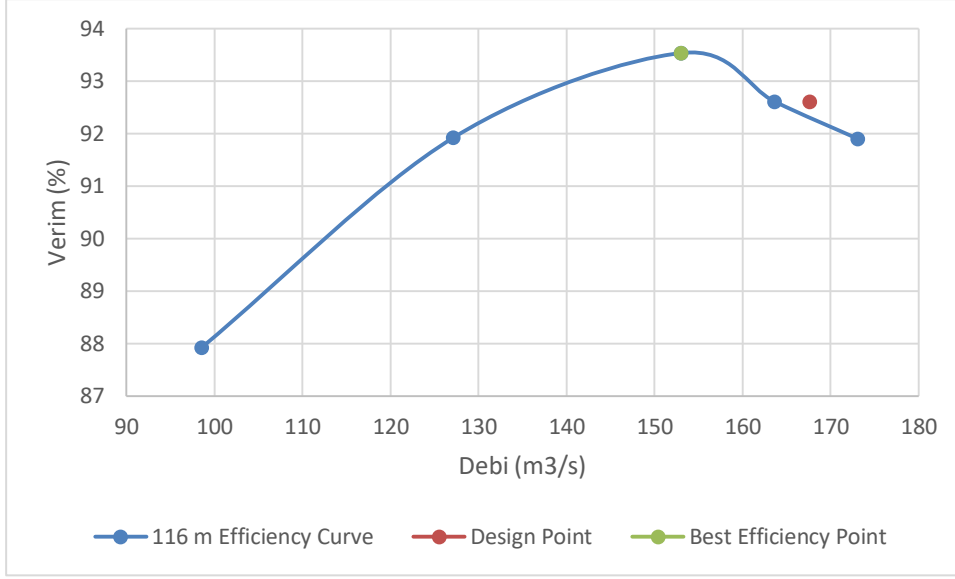
Şekil 4.21: Farklı düşülerde üretilen güç verim eğrileri.

Üretilen güç miktarının debiye göre değişimi Şekil 4.22'de verilmiştir. Debi, tasarım düşüsünün üzerine çıktıkça güç eğrilerinin eğimi azalır. Farklı düşü değerleri değişen debi değerlerinde benzer güç üretim şekilleri gösterir.



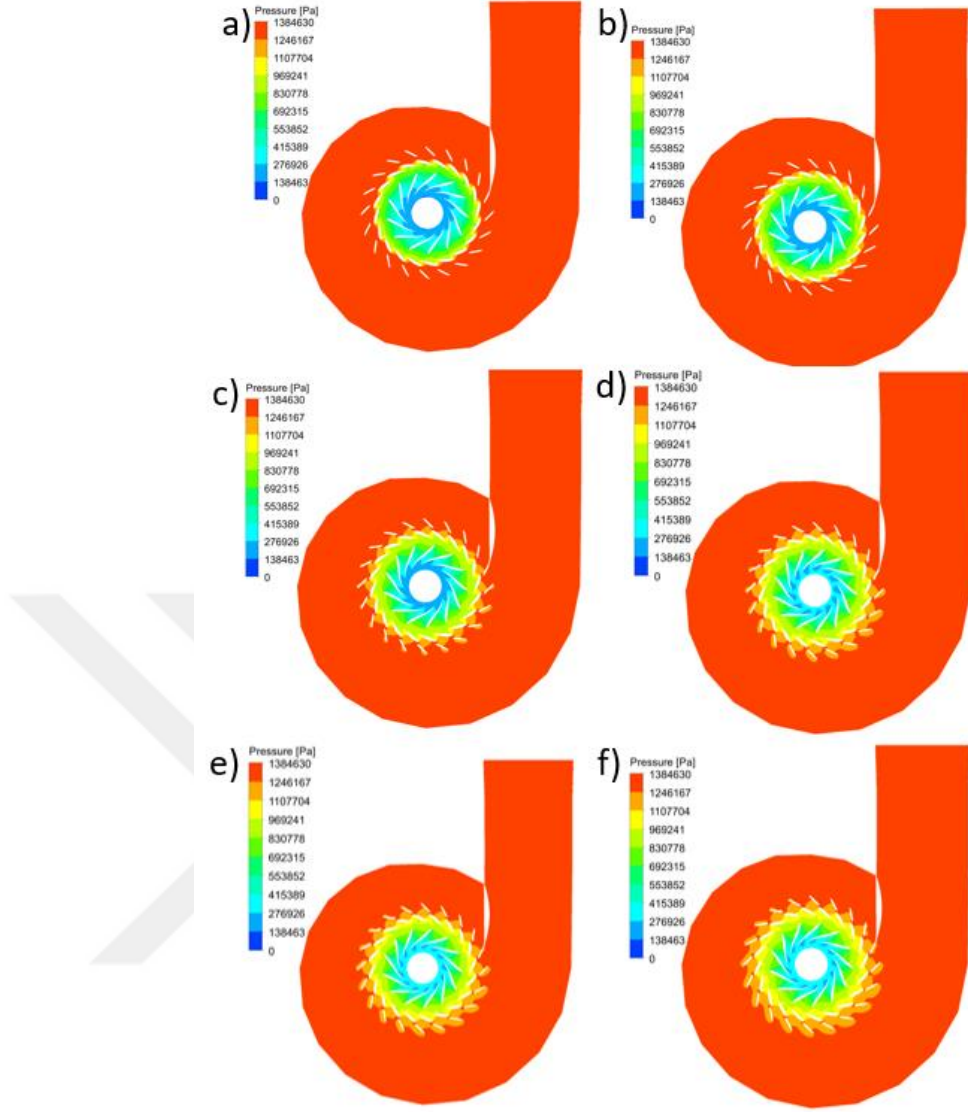
Şekil 4.22: Farklı düşülerde üretilen güç debi eğrileri.

Şekil 4.23'te verimlilik eğrisi gösterilmiştir. En yüksek verim, %93.53'lük değer ile 153.02 m³/s'lik debi ile yakalanmıştır. Tasarım noktasındaki verimlilik ise 167.65 m³/s'lik debi ile %92.61'dir.



Şekil 4.23: 116 m için debi verim grafiği ile tasarım noktası ve en yüksek verim noktası.

Salyangozdan çark çıkışına kadar olan bölümde, 116 m düşü ve farklı ayar kanadı açıklıkları için basınç dağılımı Şekil 4.24'te gösterilmektedir. Her bir durumdaki basınç değerlerini karşılaştırabilmek için basınç sınırları eşit tutulmuştur. Şekle göre, 10° ayar kanadı açıklığında, çark koni çıkışında düşük basınç bölgesi görülmüştür. Ayar kanadının optimum açıklığa getirilmesiyle bu düşük basınç bölgesi kaybolur.



Şekil 4.24: 116 m’de farklı ayar kanadı açıklıkları için basınç dağılımı a)10° b)14° c)18° d)20° e)20.9° f)22°.

4.2.Zamana Bağlı HAD Sonuçları

Tez kapsamında yapılan çalışmada kurulu bir santral olan Altınkaya Hidroelektrik Santrali’nin zamana göre değişen durumlarını incelemek için kararsız hal analizleri yapılmıştır. Burada türbinin tasarım noktası, kısmi yükleme ve aşırı yükleme noktalarındaki durumlarını incelemek için üç adet simülasyon gerçekleştirilmiştir.

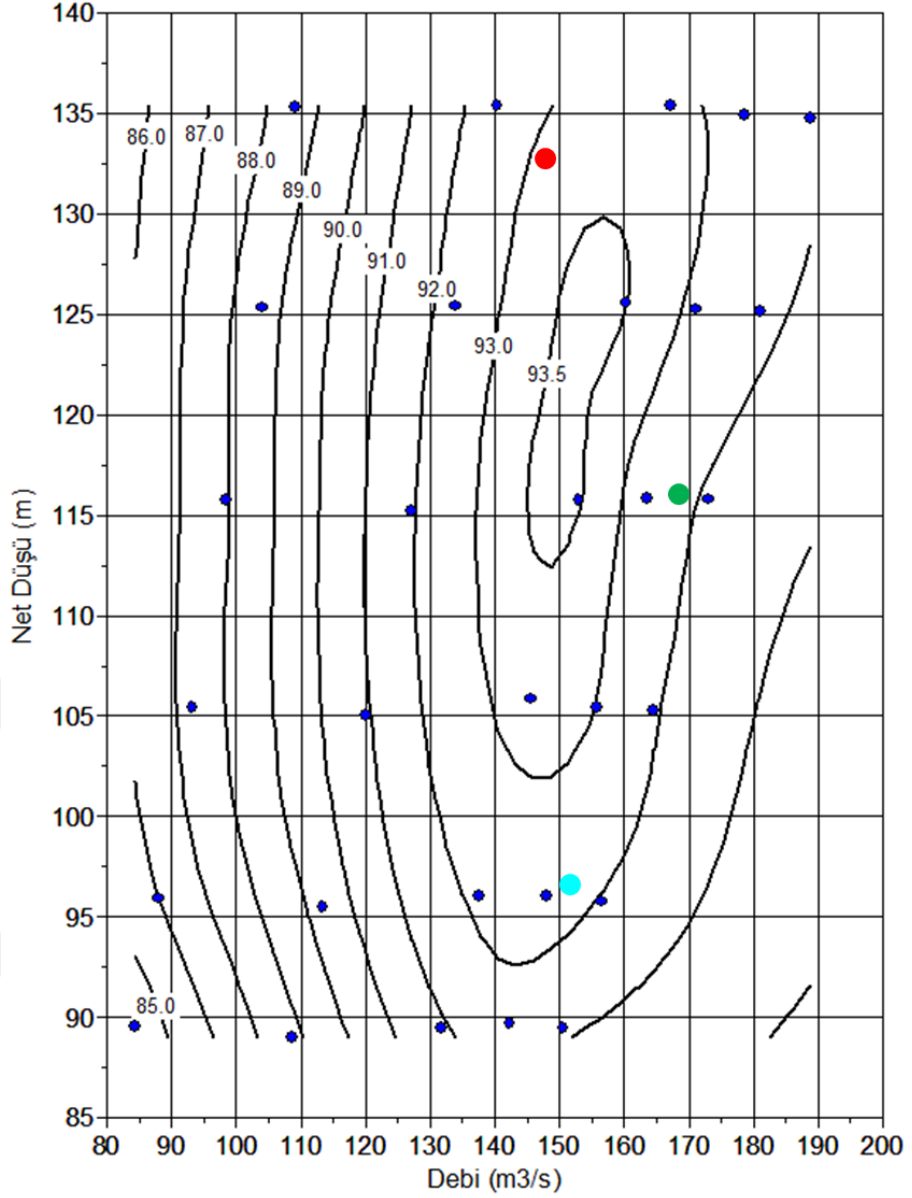
Bir türbinin zamanla değişen hidrolik özellikleri ve basınç titreşimlerini anlamak o türbinin rehabilitasyon sürecine teknik destek sağlar. Bu analizler ışığında türbinin kararlılığı ve titreşim durumları ile ilgili bilgi elde edilebilir, rotor-stator etkileşiminin

etkisi incelenebilir. Zamana bağlı analizler ile kararlı hal analizleri sonuçları karşılaştırılmıştır.

Hızlı Fourier Dönüşümü (FFT) kullanılarak türbin içindeki farklı konumlardaki gözlem noktalarından alınan basınç sinyalleri kullanılarak spektral analiz yapılmıştır. Elde edilen frekans ve genlik grafikleri, kısmi yüklü çalışması durumunda emme borusunda en büyük genlik frekansına sahip olduğunu göstermiştir. Bu bilgiler ile emme borusu içerisindeki akış ayrıntılı olarak incelenmiştir. Özellikle koninin içindeki akışın C_p 'yi ve tüm verimliliği önemli ölçüde etkilediği görülmüştür.

Kararlı hal analizleri yapıldığında türbin ile ilgili, türbin performansı, verimlilik, basınç dağılımı, kavitasyon ve bileşenlere göre hidrolik kayıplar hakkında bilgi edinilebilirken, zaman bağlı analizlerde von Karman girdabı, emme borusu girdabı gibi içindeki geçici olayların incelenmesi daha kolaydır.

Kararsız hal analizlerinde akışın karmaşık olması analiz süresini uzatarak maliyete sebep olmaktadır. Bu nedenle kararlı hal analizlerindeki gibi geniş çalışma aralığında analizlerin gerçekleştirilmesi çok uzun süreceği için teknik bilgilerde belirtilen nominal, maksimum ve minimum olarak adlandırılan noktalarda kararsız hal analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu üç nokta kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin sonucu Şekil 4.25'te görülmektedir.



Şekil 4.25: Zamana bağlı analizlerin noktaları.

Zamana bağlı analizler için zaman adımı 0.0019996 s olarak tanımlanmıştır. Bu değer çarkın 2° dönmesi için geçen süredir. Çarkın beş tam tur atana kadarki dilim analizlerde incelenmiştir.

Francis tipi türbinler, hücum kenarı kavitasyonu, gezer baloncuk kavitasyonu, emme borusu ve kanatlar arası girdap kavitasyonu (von Karman girdapları) gibi birçok farklı kavitasyon şekline maruz kalabilmektedirler. Bu kavitasyonlardan her biri hasarlara, gürültülere, titreşimlere ve çatlaklara sebep olabilirler. Bu ise türbinin verimini düşürmekle birlikte bakım maliyetlerini de artırmaktadır.

4.2.1. Zamana bağı hidrolik özelliklerin değerlendirilmesi

Basınç dalgalanmalarının zaman ve frekans özelliklerini inceleyebilmek için türbin üzerinde 21 yere ölçüm noktası yerleştirilmiştir. Von-Karman girdabını gözlemleyebilmek için salyangoz, sabit kanatlar ve ayar kanatları üzerine 7 nokta yerleştirilmiştir. Kanatlar arası girdap ve gezer baloncuk kavitasyonu ile hücum kenarı kavitasyonunu gözlemleyebilmek için çark kanadı üzerine 4 nokta çifti toplamda 8 nokta yerleştirilmiştir. Emme borusu girdabını gözlemleyebilmek için ise 6 nokta emme borusu içerisine yerleştirilmiştir. Bu gözlem noktaları Şekil 4.26-4.28 arasında gösterilmiştir.

Burada kısaltmalar aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

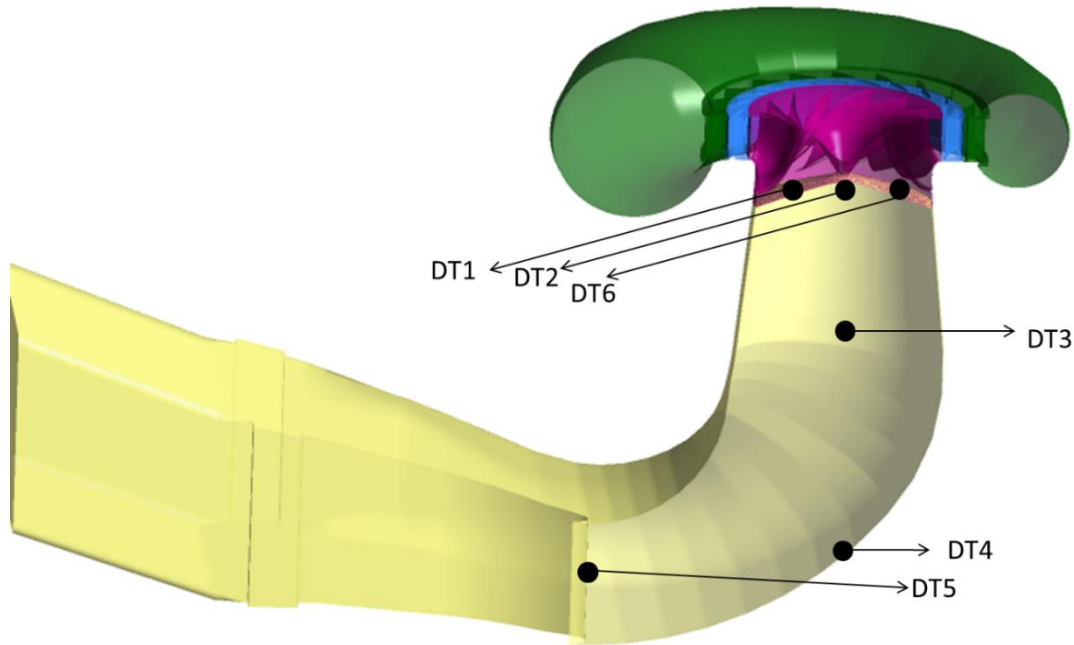
SC: Salyangoz

GV: Ayar kanadı

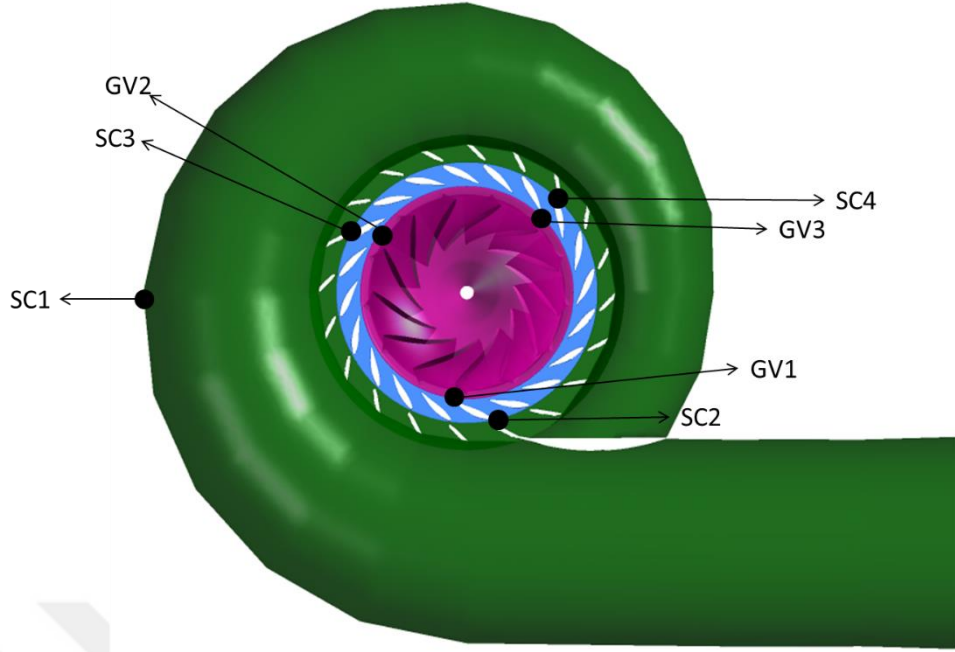
PS: Çark basın tarafı

SS: Çark emme tarafı

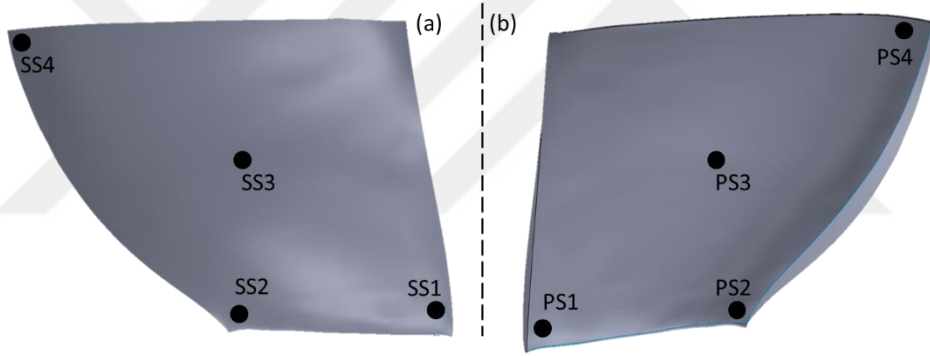
DT: Emme borusu



Şekil 4.26: Emme borusu gözlem noktaları.



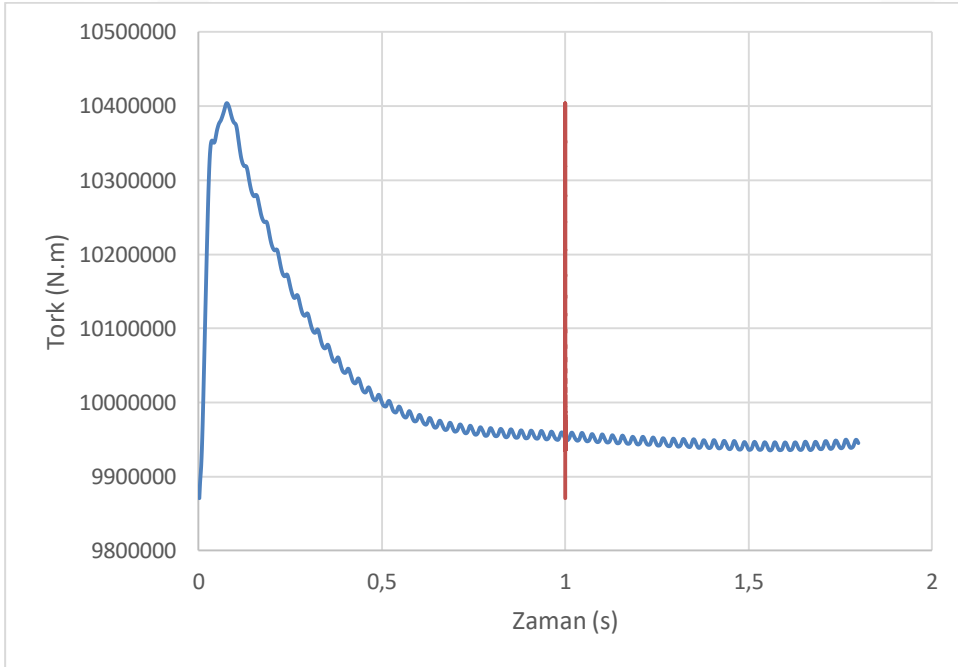
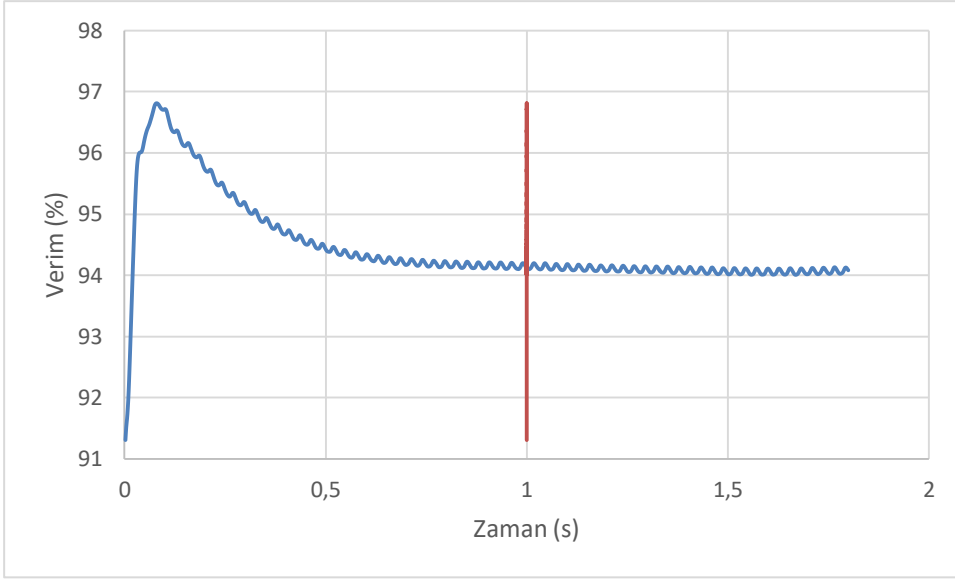
Şekil 4.27: Salyangoz gözlem noktaları.



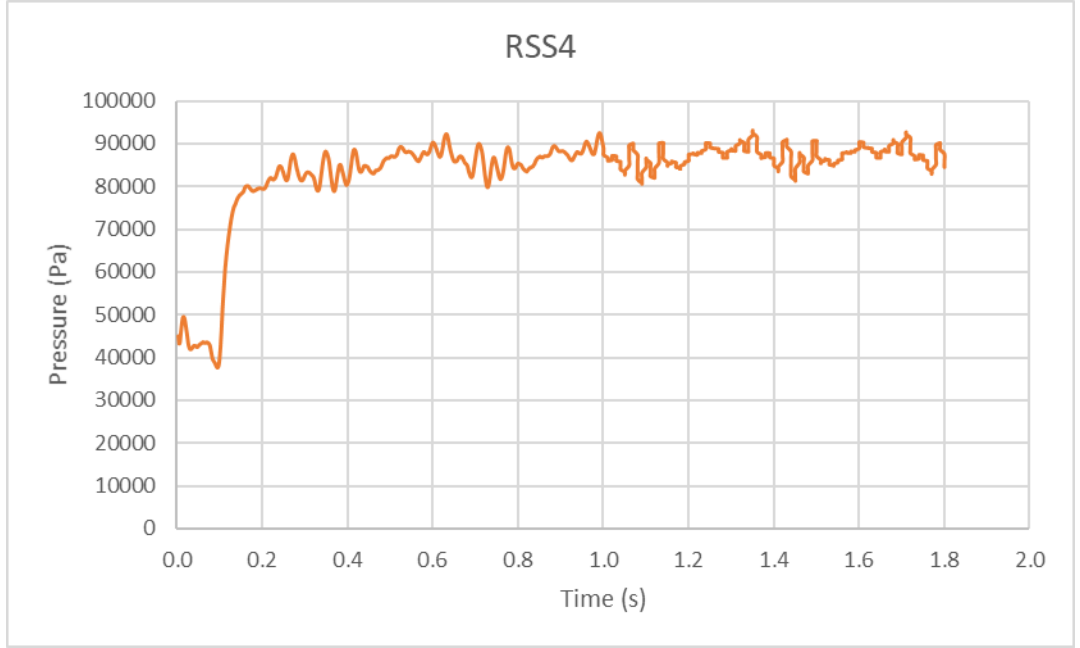
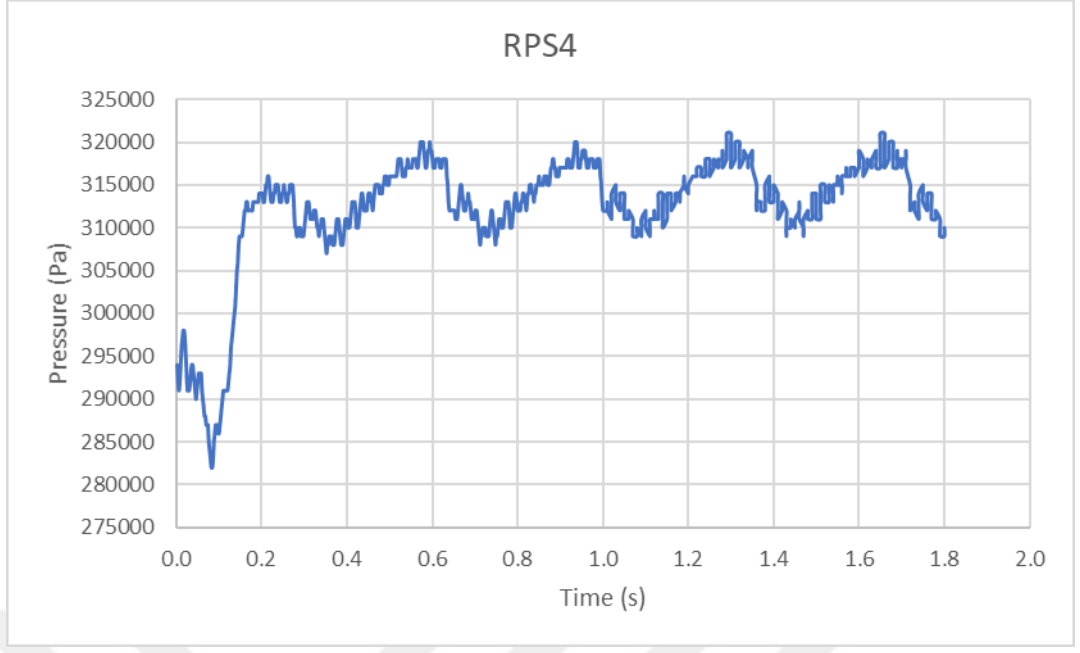
Şekil 4.28: Çark gözlem noktaları.

Basınç seviyeleri her bir zaman adımı için kavitasyon üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu sebeple her bir noktadaki basınç sinyalleri kaydedilmiştir. Verimlilik ve tork dalgalanmaları, Altınkaya HES'in tasarım noktasına göre Şekil 4.29'da gösterilmektedir. Elde edilen sonuçlara göre, verim ve tork değerinde 1 saniyelik periyodik dalgalanmalar gözlenmektedir. Bu sebeple zamana bağlı analiz sonuçları incelenirken ilk 1 saniyelik kısım çıkarılarak değerlendirilmeler yapılmıştır.

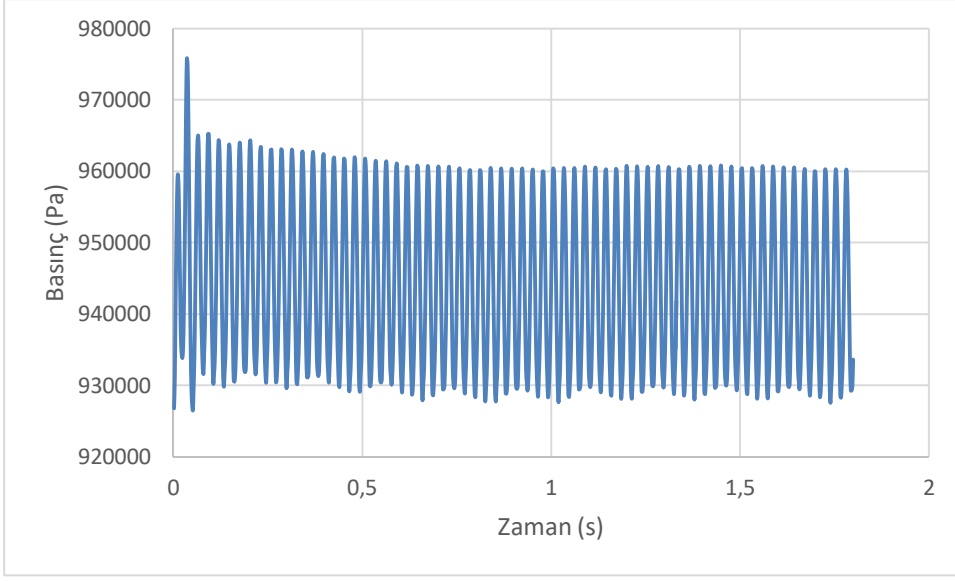
Şekil 4.29-4.33'te seçilen bazı noktalar için zamana bağlı basınç dağılımı verilmiştir.



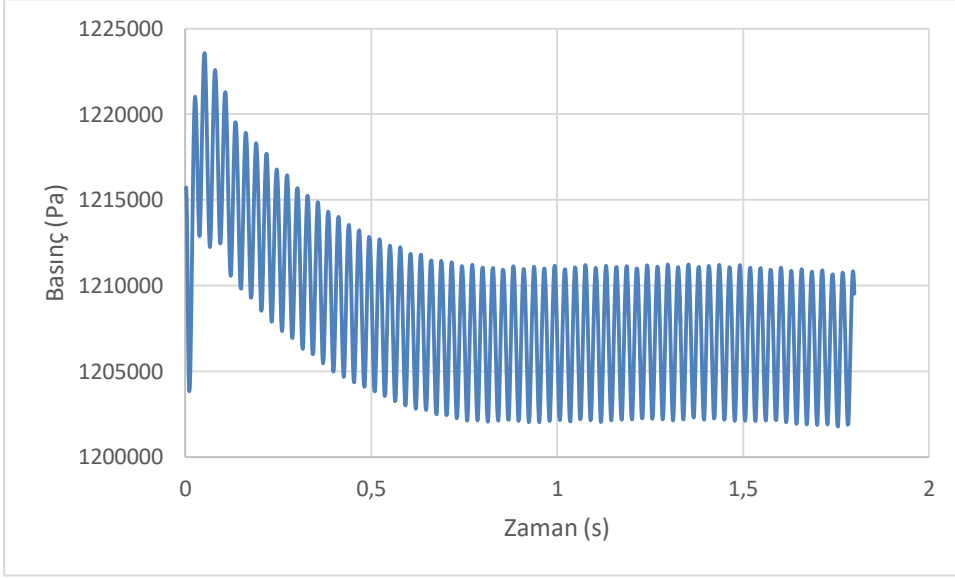
Şekil 4.29: Zamana bağlı verim ve tork dalgalanması.



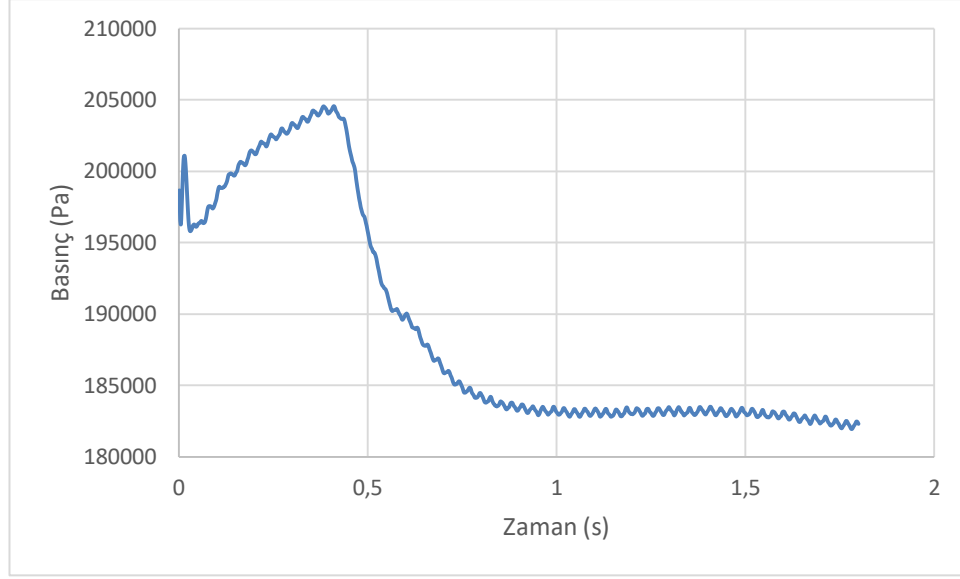
Şekil 4.30: 116 m düşü ve 20.9° açıklıkta çarptaki iki nokta için basınç dalgalanmaları.



Şekil 4.31: 116 m düşü ve 20.9° açıklıkta ayar kanadında basınç dalgalanması.



Şekil 4.32: 116 m düşü ve 20.9° açıklıkta salyangozda basınç dalgalanması.



Şekil 4.33: 116 m düşü ve 20.9° açıklıkta emme borusunda basınç dalgalanması.

MATLAB kodu kullanılarak, IEC 60193 standardı ve Denklem 4.4 ile basınç sinyalleri boyutsuz hale getirilir. Bu değerler kullanılarak, gözlem noktalarının zamana bağlı basınç dalgalanmaları FFT dönüşümü yapılarak frekans haline getirilir. FFT grafiklerinde y eksenini f_n ve x eksenini X_{rms} büyüklüklerini ifade eder.

$$PE = \frac{P - P_{ort}}{\rho g H} \quad (4.4)$$

$$f_n = \frac{f}{n} \quad (4.5)$$

$$X_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_1^N x_n^2}{N}} \quad (4.6)$$

FFT ile basınç sinyallerine modlar atanır. O noktanın yerini gösteren mod, noktanın bulunduğu bileşenin içindeki akış bozukluklarına veya kararsızlıklara işaret eder. Bu durum çark kanatları arasında veya kanatlar arasındaki bir girdap, emme borusundan kavitasyon ya da çarkın basit bir dönme etkisi olabilir. Çizelge 4.3'te kanatların geçiş frekansları gösterilmektedir.

Çizelge 4.3: Geçiş frekansları.

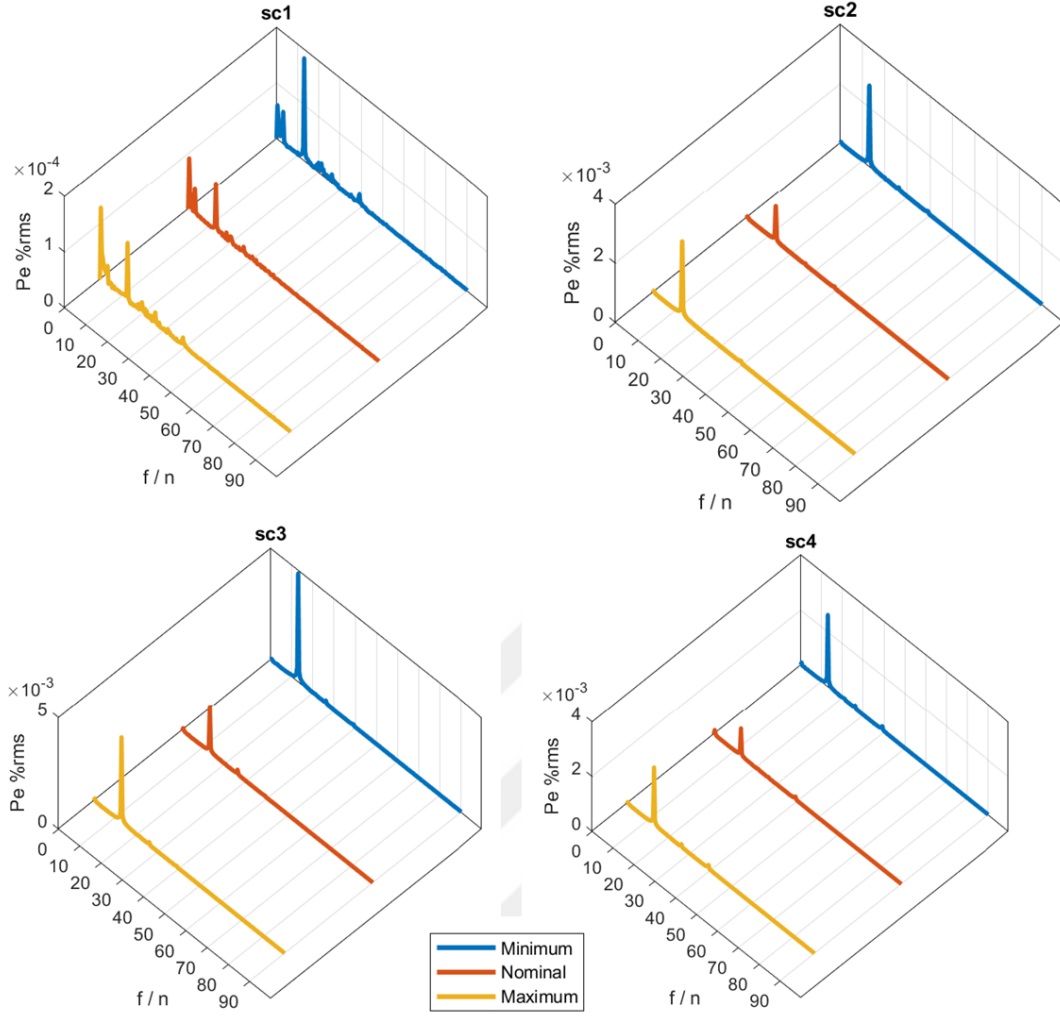
Geçiş Frekansları		
Sabit Kanat	Ayar Kanadı	Çark
20xn	20xn	13xn

Türbinin farklı bölgelerindeki farklı noktaların her biri için basınç dağılımları elde edilmiştir. Bu noktalar için FFT dönüşümü yapılmıştır. Spektral analizlerin sonuçları gözlem noktasının konumuna göre birleştirilmiştir. Bu sayede, güce bağlı olarak frekanslar ve büyüklük değişimi düzgün ve kolay bir şekilde gözlemlenebilir.

4.2.1.1.Salyangoz

Salyangoza ait 4 gözlem noktasının FFT grafikleri Şekil 4.34'te verilmiştir. Frekansın genliği oldukça küçüktür. SC1 gözlem noktası dışındaki baskın frekanslar, 13 f/n'de çarkın geçiş frekansı anlamına gelmektedir.

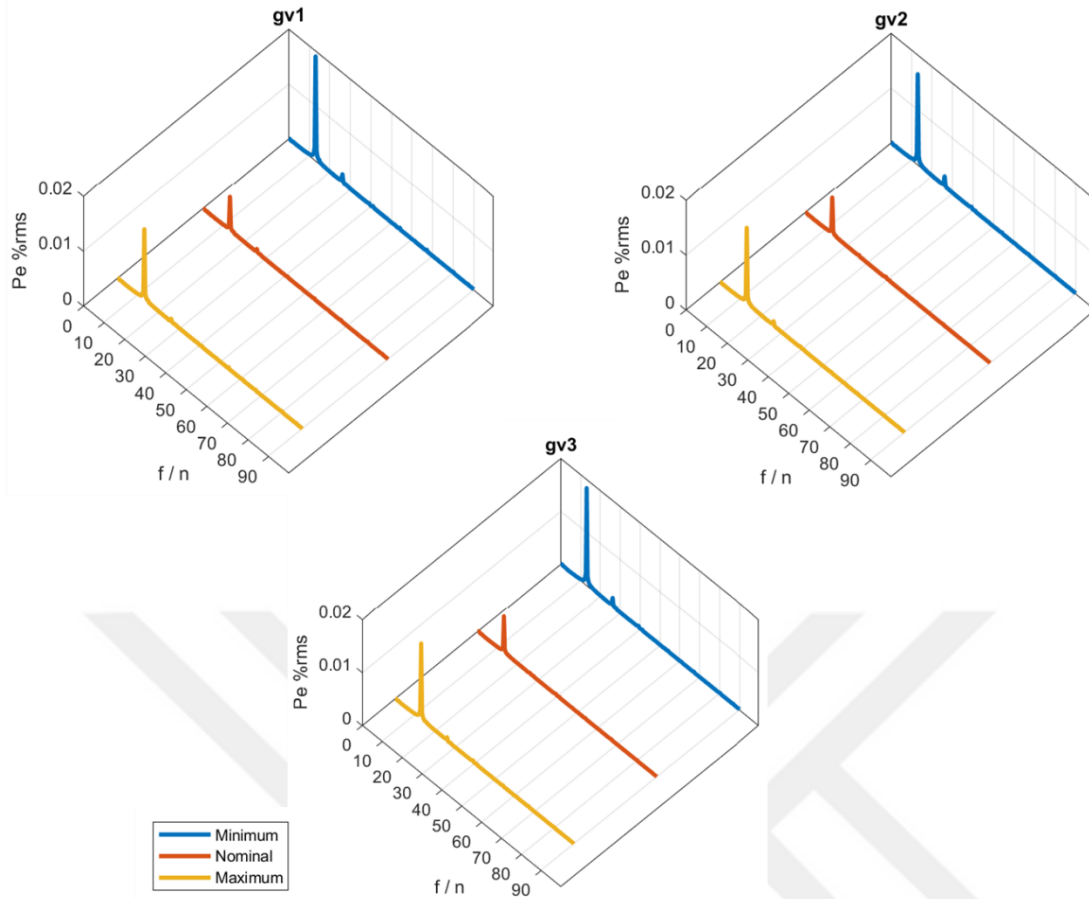
SC1 gözlem noktasındaki sinyalin düşük frekanslı bileşeni, emme borusu girdap etkisi ile açıklanabilir. Salyangoz, emme borusundan çok uzakta olduğundan frekansın büyüklüğü 10^{-3} - 10^{-4} aralığındadır, yani küçüktür. SC2 ila SC4 noktaları boyunca, çark ve veri noktası arasındaki mesafe daraldıkça çark geçiş frekansının büyüklüğü artar. SC1 ve SC2 noktaları karşılaştırıldığında, SC2 noktası çarka daha yakın olduğu için basınç genliği SC1'e göre daha büyüktür. SC2'de 13 f/n'de sadece bir dalgalanma gözlenir. İkincil dalgalanma gözlenmediği için akış ayrımı ya da girdaplar görülmez. Akış salyangoz girişinden çıkışına kadar düzgündür. SC3 ve SC4 noktalarında, çarkın harmonik frekansları 26 f/n ve 39 f/n gözlenir.



Şekil 4.34: Salyangoz için FFT analizi.

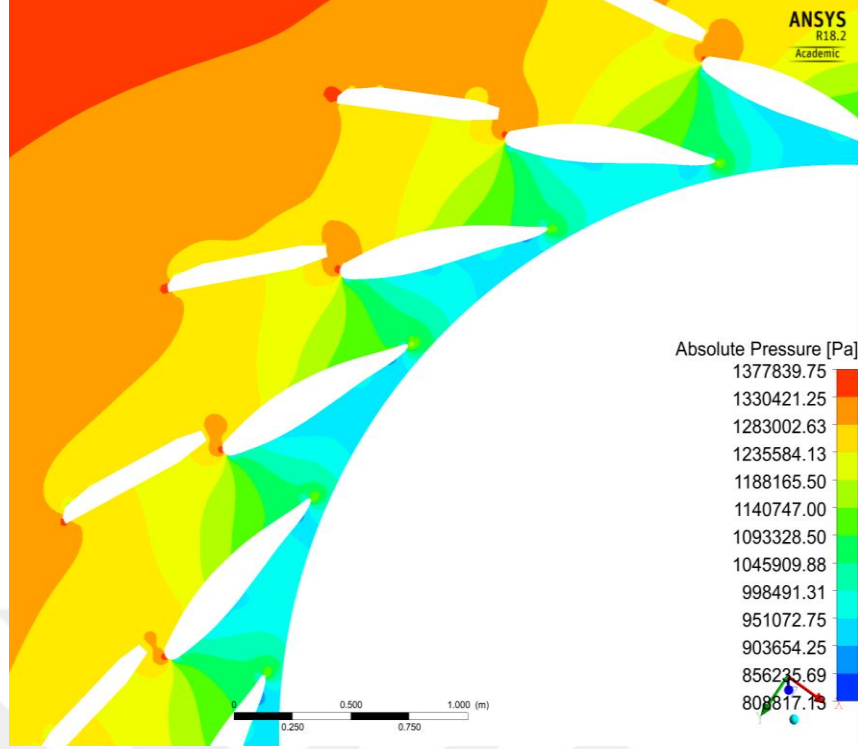
4.2.1.2. Ayar kanadı

Ayak kanadı noktalarının FFT grafikleri Şekil 4.35'te gösterilmektedir. Baskın frekanslar çark geçiş frekansı olan $13 f/n$ 'ye eşittir. Çarkın geçiş frekans büyüklüğü, ayar kanadındaki salyangoz alanından 100 kat daha fazladır. Ayar kanadının tüm konumları için, en yüksek genlik değeri minimum düşü değerinde ($96.5 m$) görülmüştür. Birincil ve ikincil dalgalanmalar, çark harmonik frekansına karşılık gelen $13 f/n$ ve $26 f/n$ ile uyumludur. Ayar kanadının akış alanında daha fazla moda ihtiyaç yoktur. Ayar kanadı etrafında gerçekleşen akışta ayrılmalar ya da girdaplar meydana gelmemektedir.



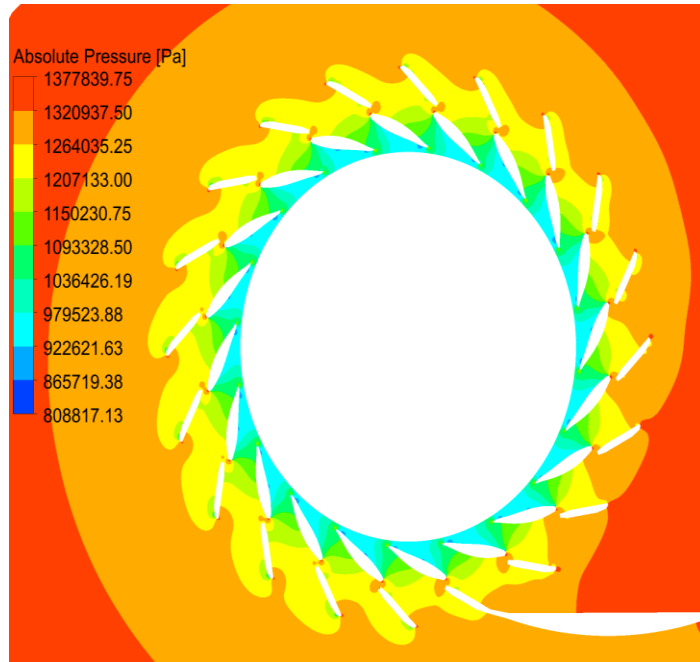
Şekil 4.35: Ayar kanadı için FFT analizi.

Şekil 4.36’da kararsız hal analizi için sabit kanat ile ayar kanadı arasındaki basınç dağılımı gösterilmiştir. Durma noktası ve düzgün akış bölgesi de Şekil 4.36’da görülmektedir. Bu düzgün akış alanı, çark harmonikleri yerine ikincil dalgalanmaların gözlenmemesinin nedenlerinden biri olabilir.



Şekil 4.36: Sabit kanat ile ayar kanadı arasındaki basınç değişimi.

Şekil 4.37’de salyangozdan çark çıkışına kadar basınç dağılımı gösterilmiştir. Basınç dağılımını incelendiğinde bileşenler arasında girdaba rastlanmamıştır. Ayrıca ayar kanadı çıkışında von Karman girdabı görülmemiştir. Basınç dağılımından hareketle türbin içerisinde basınç dağılımının dengeli olduğu görülmektedir.



Şekil 4.37: Türbin basınç dağılımı.

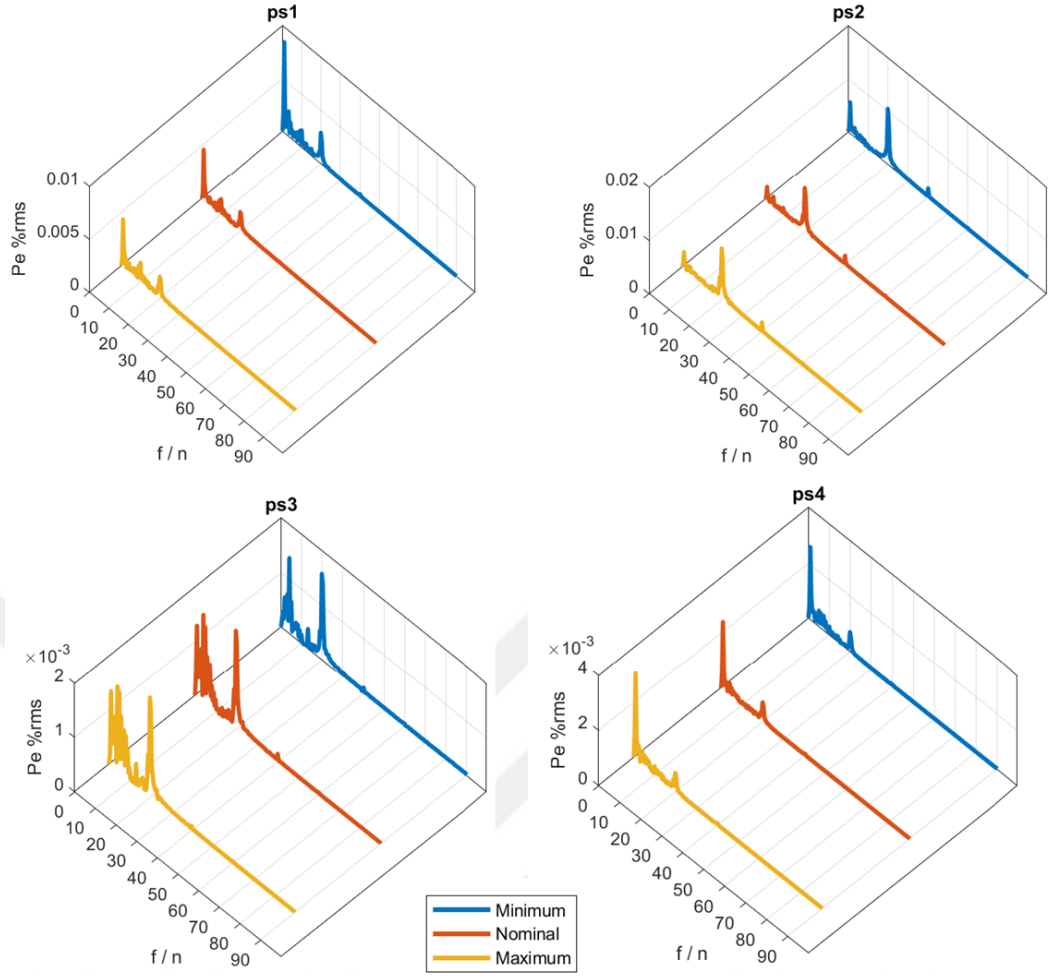
4.2.1.3.Çark

Çark incelendiğinde, Şekil 4.38’de gösterildiği gibi çarkın yaklaşık 1 f/n ve 13 f/n olmak üzere iki ana frekansı olduğu görülür. 13 f/n frekans, ayar kanadı geçiş frekansını temsil eder. IEC 60193 standardına göre, düşük frekans tipik olarak çarkın dönme frekansının 0.2 ile 0.3 katı arasında meydana gelir ve düşük frekans, emme borusu girdabını gösterir.

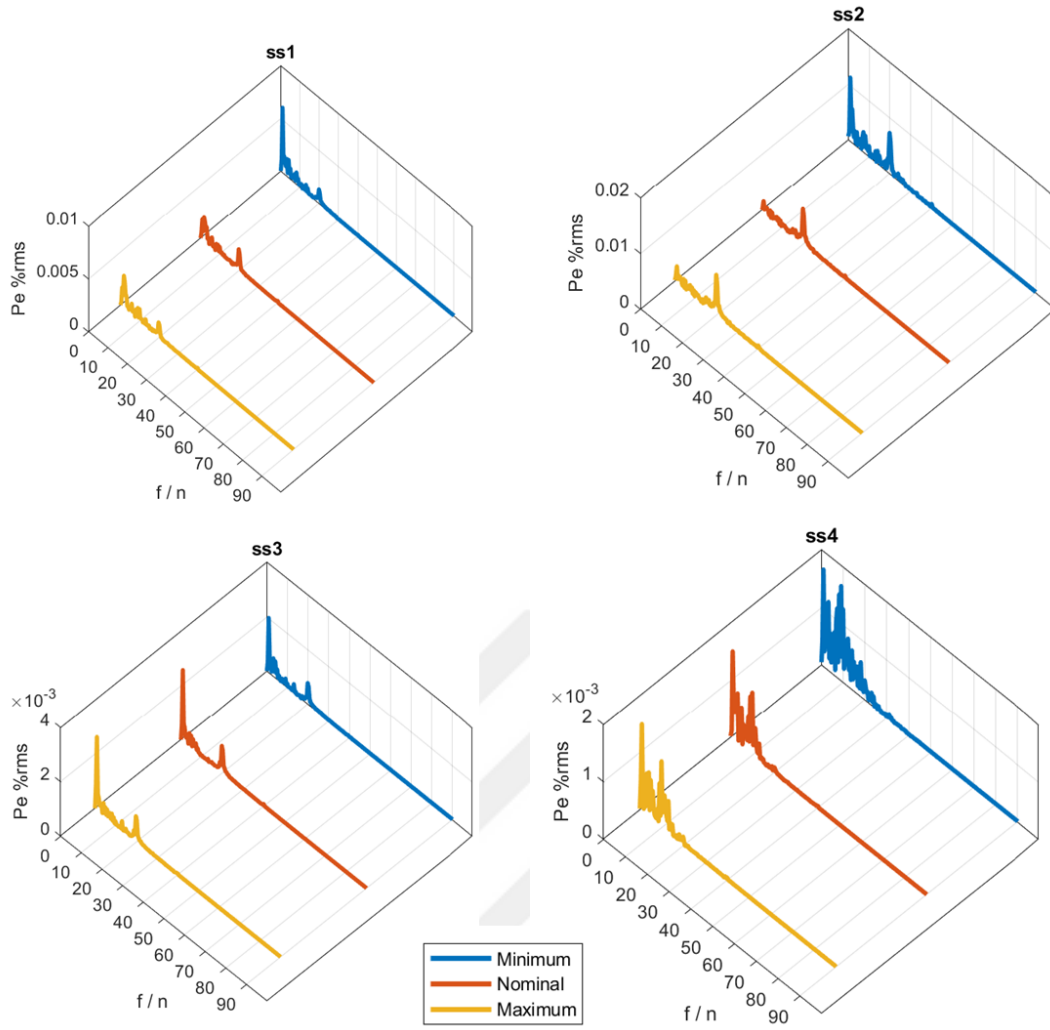
PS1 noktası incelendiğinde, türbin çarkında hücum kenarı kavitasyonunu gösteren akış alanında bir basınç dalgalanması ve birkaç küçük dalgalanma gözlenmiştir. PS2 noktasında, hücum kenarı kavitasyon etkileri devam etmektedir. PS3 noktasında, dalgalanmaların genliği azalır, bu da hücum kenarı kavitasyon bölgesinin etkisinin azaldığını gösterir. PS4 noktasındaki dalgalanmalar kuyruk kenarı kavitasyonu olarak yorumlanabilir.

SS4 ve PS4 noktaları incelendiğinde, çarkın kuyruk kenarında kanatlar arası girdabı gösteren akış alanlarında dalgalanma gözlenmiştir.

Saha gezisinde, kanat girişinin emme tarafında, çark bandına yakın kavitasyon ve kanat çıkışında daha hafif kavitasyon gözlenmiştir. FFT sonuçları zamana bağlı analizlerden elde edilmiştir, kararlı durum simülasyonlarından elde edilen Thoma konturları ile aynı yerleri işaret eder. Şekil 4.38 ve 4.39’da çarkın FFT analizleri görülmektedir.



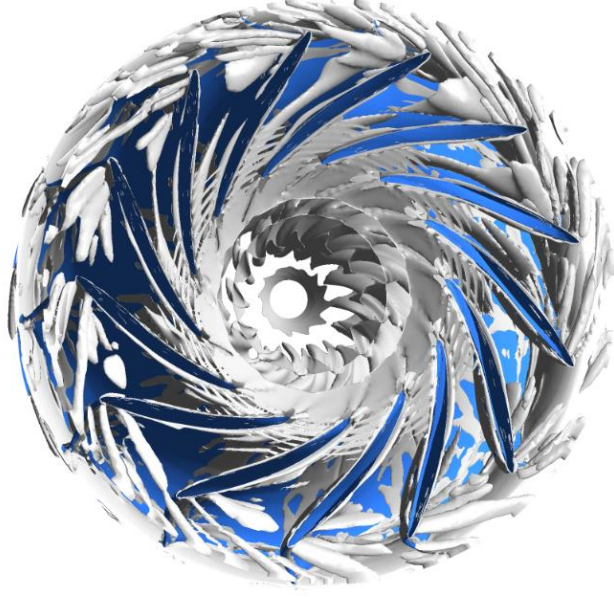
Şekil 4.38: Çark basınç tarafı FFT analizi.



Şekil 4.39: Çark emme tarafı FFT analizi.

Neredeyse tüm gözlem noktalarında kanatlar arası girdapların neden olduğu basınç dalgalanmalarının frekansı olduğu düşünülmektedir.

Şekil 4.40'ta çark kanatları arasında meydana gelen girdap öz bölgesi görülmektedir. Buradaki temel fikir, varsayılan girdap özünü bir akış yüzeyi ile çevrelemek ve bir girdap özünün varlığını doğrulamak için dönme davranışını görsel olarak gözlemlemektir. Bu, girdap eksenine etrafına sarılan kapalı bir başlangıç eğrisinde bir akış yüzeyinin birleştirilmesiyle elde edilir. Şekil 4.40 göz önüne alındığında, kanatlar arası girdap varsayımı doğrulanmış demektir. Ayrıca Şekil 4.41'de gösterildiği gibi çarkta kanatlar arası kavitasyonun meydana geldiği yer tamir edilmiştir. Bu bölgenin kavitasyona maruz kaldığının bir diğer göstergesidir.



Şekil 4.40: Kanatlar arası girdap yapısı ($t=1.8$ s).



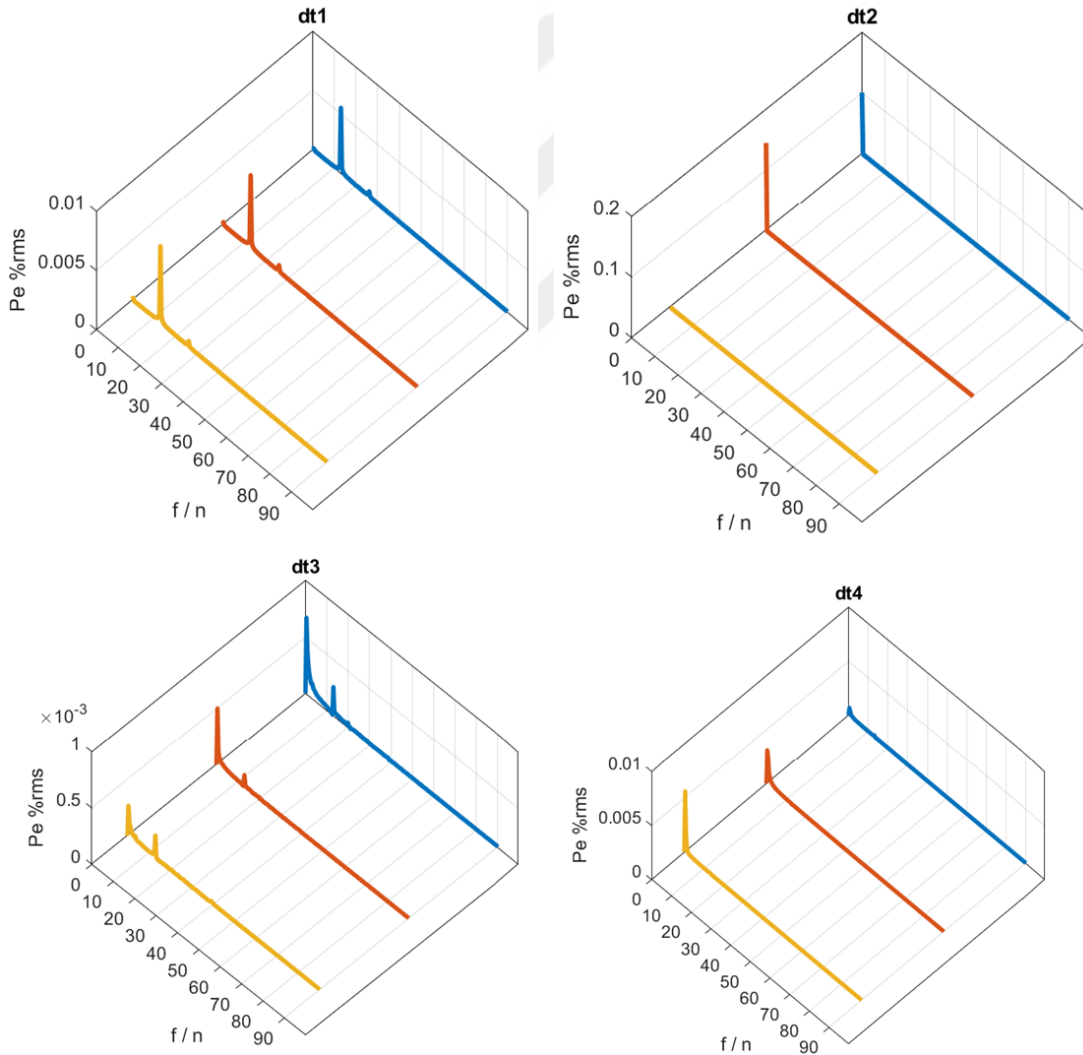
Şekil 4.41: Kanatlar arası girdabın tamir edildiğini gösteren saha görseli.

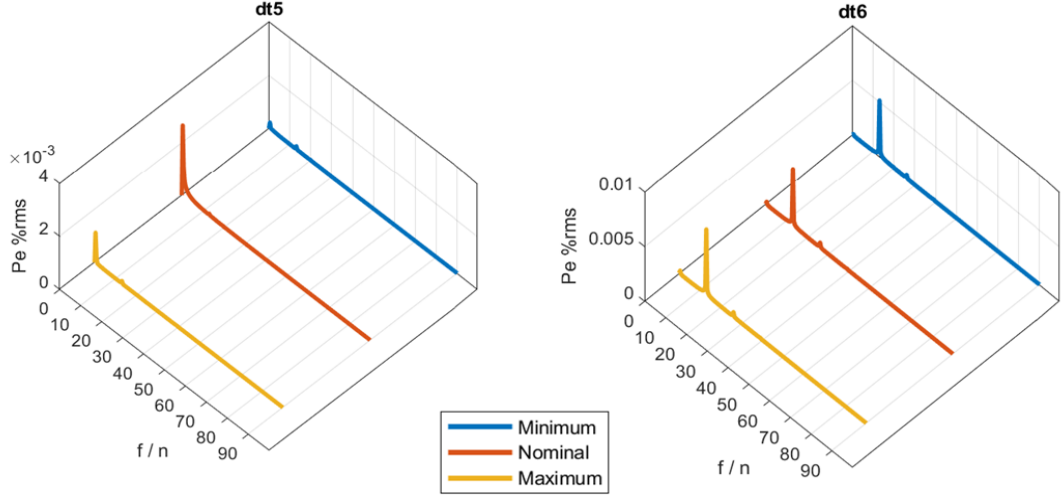
4.2.1.4.Emme borusu

Birçok çalışma, emme borusu girdap frekansının çark dönme frekansının 0.2-0.3 katına eşit olduğunu belirtmektedir. Girdap sicim hacmi, saha Thoma sayısının ve yükleme durumunun bir fonksiyonudur. Şekil 4.42'de emme borusunun çeşitli

noktalarındaki FFT analiz sonuçları görülmektedir. Ayrıca Şekil 4.42'de çark konisinin altında bulunan DT2 noktasında, en yüksek genliğe sahip baskın frekans, nominal durumda elde edilir.

Emme borusu duvarında bulunan DT1 gözlem noktası için, çark geçiş frekansı baskın frekans olarak görülebilir. DT3 ve DT4'te, emme borusu girdap etkisi kademeli olarak azalır. Emme borusu FFT analizi sonucunda emme borusu kavitasyonunu gösteren herhangi bir belirtiye rastlanmamıştır. Emme borusu kavitasyonu yüksek sese sebep olmaktadır. Ancak gerçekleştirilen saha gezisinde böyle bir sesle karşılaşılmamıştır. Bu durum da Altinkaya HES'de emme borusu kavitasyonunun görülmediği fikrini desteklemektedir.

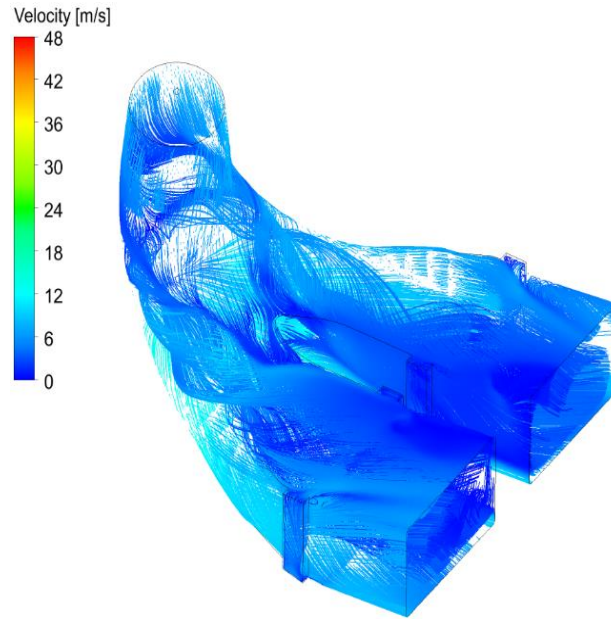




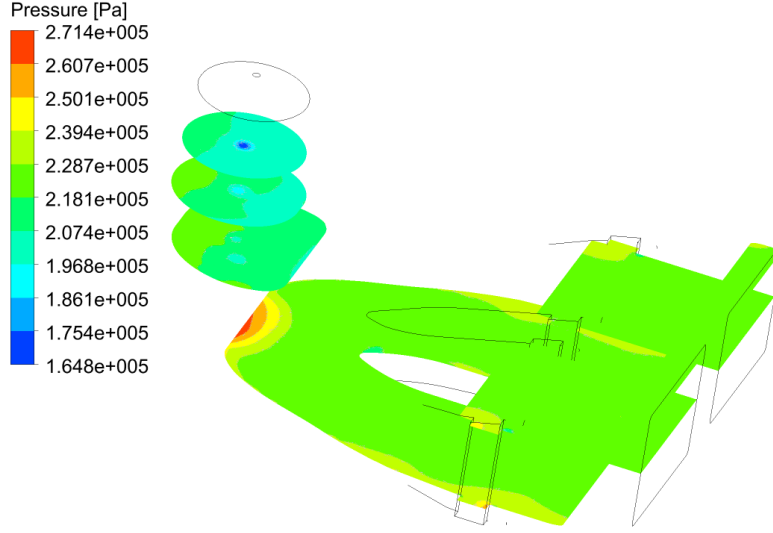
Şekil 4.42: Emme borusu FFT analizi.

Emme borusunun içindeki akış karakteristiği, türbinin verimliliğini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca hidroelektrik bir santralde meydana gelen titreşimin başlıca kaynaklarından biridir. Altınkaya’da su seviyesinin çarkın altında tutmak için emme borusuna basınçlı hava sokulur. Kısmi yükleme durumunda ise, kavitasyondan kaynaklı erozyonu en aza indirmek için doğal hava girişi yapılır.

Şekil 4.43 ve 4.44’te tasarım noktasındaki basınç konturları ve hız akış çizgileri gösterilmiştir. Bu durumda yaklaşık 172.132 kPa ile minimum basınç bölgesi gözlemlenir. Bu değer 200°C’deki buhar basıncından daha yüksek olduğu için kavitasyonun gerçekleşmediği söylenebilir.



Şekil 4.43: Tasarım noktasında emme borusu hız dağılımı ve girdap yapısı.



Şekil 4.44: Tasarım noktasında emme borusu basınç dağılımı.

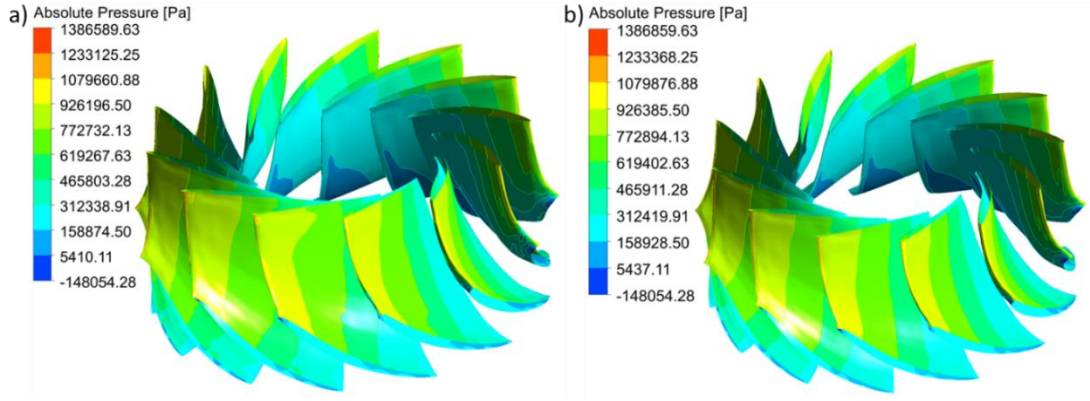
4.3. Kararlı ve Kararsız Hal Durumlarının Karşılaştırılması

Nominal, maksimum ve minimum olarak tanımlanan noktalarda verilen değerlere göre yapılan kararlı ve kararsız hal analizlerinden elde edilen performans değerleri Çizelge 4.4'te verilmiştir. Kararsız hal analizleri için performans değeri 1.8 s'de hesaplanmıştır.

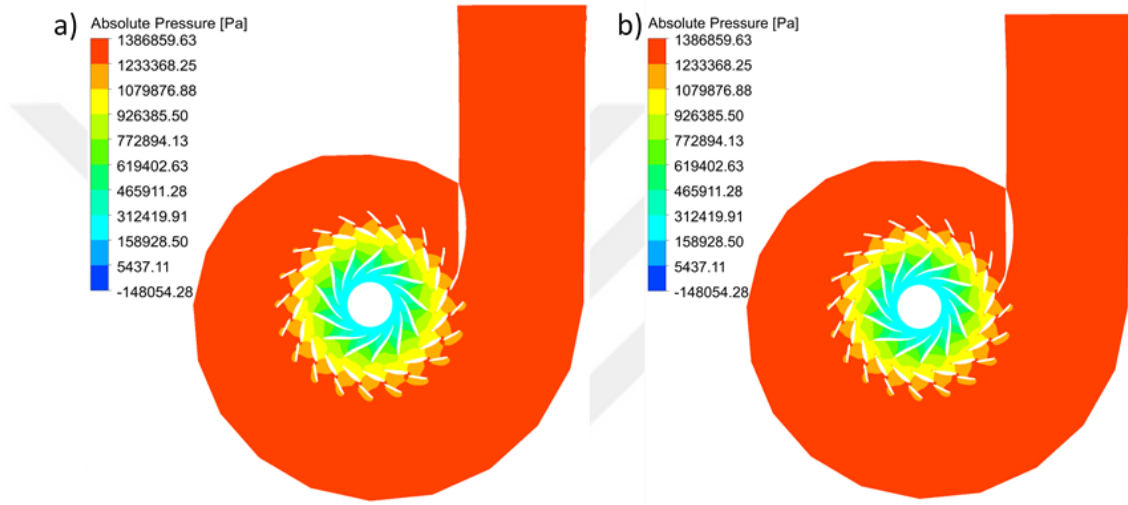
Çizelge 4.4: Kararlı hal ve zamana bağlı durumların performans karşılaştırması.

Durum No.	Düşü (m)	Ayar Kanadı Açıklığı (°)	Kararlı	Zamana Bağlı	Kararlı	Zamana Bağlı	Kararlı	Zamana Bağlı
			Güç (W)		Hacimsel Debi (m ³ /s)		Verim (%)	
Durum 1	96.5	20.65	130596006	129352000	150.435	149.496	92.22	93.82
Durum 2	116	20.9	174810782	173595000	167.65	163.929	92.61	94.0741
Durum 3	132.7	15.25	177166976	177726100	146.74	145.154	93.07	94.192

Sonuçlar incelendiğinde, zamana bağlı yapılan simülasyonların performans değerleri kararlı hal sonuçlarından daha yüksektir. Bu fark, ayar kanatları ile çark arasında ve çark ile emme borusu arasına tanımlanan transient rotor-stator arayüzünün kullanılmasından kaynaklıdır. Kararlı hal analizlerinde bunun yerine donmuş rotor-stator ara yüzü kullanılmıştı. Kararlı ve kararsız hal analizlerinde mutlak basınç değerleri karşılaştırması Şekil 4.45 ve 4.46'da verilmiştir.



Şekil 4.45: a) kararlı halde b) kararsız halde çark için mutlak basınç dağılımları.



Şekil 4.46: a) kararlı halde b) kararsız halde salyangoz için mutlak basınç dağılımları.

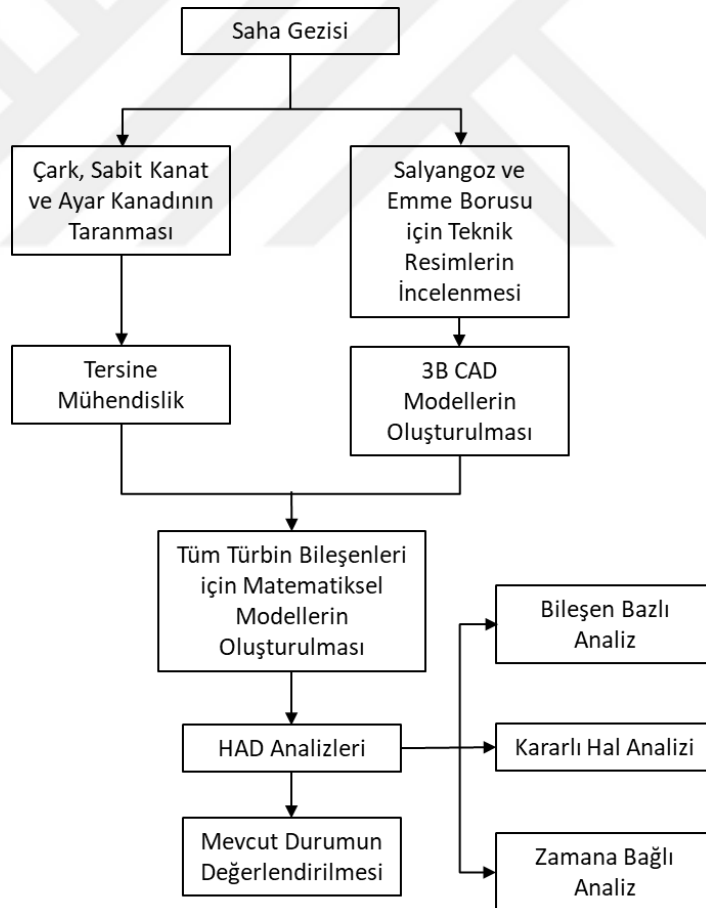
Şekiller incelendiğinde her iki durumda da basınç dağılımlarının birbirine benzediği görülmektedir.



5. DEĞERLENDİRME

Bu çalışmada 1988 yılında çalışmaya başlayan, Samsun'un Bafra ilçesinde bulunan, kaynağını Kızılırmak'tan alan, 4 adet dikey eksenli Francis türbinden oluşan Altınkaya Hidroelektrik Santrali'nin HAD analizlerinin gerçekleştirilerek sahada yapılan verimlilik ölçümü ile HAD sonuçlarının karşılaştırılması amaçlanmıştır. Yapılan HAD analizleri sonucunda türbin içindeki akış alanı incelenmiş ve akış alanı düzensizlikleri ve problemleri açısından değerlendirme yapılmıştır.

Saha gezisinden analizlerin bitimine kadar gerçekleştirilen işlemler Şekil 5.1'de süreç diyagramı olarak gösterilmiştir.



Şekil 5.1: Altınkaya HES için HAD çalışmaları süreç diyagramı.

Yapılan saha gezisi ve buradan elde edilen türbin bileşenlerinin tersine mühendisliği ve katı model oluşturulması işlemi ardından tüm bileşenlerin matematiksel modeli

oluşturulmuştur. Daha sonra bileşenlerin ayrı ayrı çözüm ağları oluşturularak tüm türbin analizine başlanmıştır.

Kararlı hal analizleri yapılarak türbinin performansı, verimliliği, basınç dağılımını, bileşenlerdeki hidrolik kayıpları ve kavitasyona maruz kalıp kalmadığı gibi pek çok konuda bilgi sahibi olunabilir.

Bu tez kapsamında yapılan kararlı hal analizlerinde türbinin çalışma aralığı, en yüksek verim noktası gibi konularda bilgi sahibi olundu. Mevcut durumda kurulu olan türbinin tasarım noktası 116 m net düşü ve 168.2 m³/s debidir. Bu parametreler ile üretilmesi istenen güç 180 MW'tır. Ayar kanatlarının optimum açıklığı bilinmediği için 90 m'den 136 m'ye, 10°'den 22°'ye kadar farklı düşü ve ayar kanadı açıklığı değerlerinde toplamda 30 adet tüm türbin analizi yapılarak türbine ait çalışma aralığı ve verim değerleri bulunarak tepe diyagramı oluşturulmuştur. Yapılan kararlı hal analizleri sonucunda tasarım noktasındaki verim değeri %92.61 olarak hesaplanmıştır. En yüksek verimin olduğu nokta ise %93.53'lük verim ile 115.74 m net düşü, 153.02 m³/s debi, 18° ayar kanadı açıklığında elde edilmiştir. En yüksek verim değeri tasarım noktasında değildir.

116 m net düşü ve 168.2 m³/s debi değerinin ideal ayar kanadı açıklığı ise 30 analiz sonucunda elde edilen tepe diyagramı üzerinde iteratif bir yolla 20.9° olarak bulunmuştur.

Zamana bağlı analizler yapılarak kavitasyondan kaynaklı verimde düşmeleri, basınç dalgalanmalarını gözlemlemek mümkün olmaktadır. Ancak zamana bağlı analizlerin maliyeti kararlı hal analizlerine oranla çok fazla olduğu için kararlı hal analizlerinde yapıldığı gibi tüm çalışma aralığında 30 adet analiz yapmak yerine tasarım noktası ve maksimum, minimum noktası olarak tanımlanan 3 noktada zamana bağlı analizler yapılarak, türbin hakkında bilgi edinilirken zamandan da tasarruf sağlanmıştır. Kararsız hal analizleri sonucunda elde edilen verilerle yapılan FFT dönüşümleri sayesinde salyangoz boyunca akışın düzgün olduğu, ayar kanadında akışta ayrılma olmadan ayar kanadı profilini takip ettiği, çarkta hücum kenarı kavitasyonu ve kuyruk kenarı kavitasyonu gibi kavitasyonların olabileceğini, emme borusunda girdap probleminin olmayabileceği gibi sonuçlara ulaşılmıştır. Sahadan da elde edilen bilgilerle kararsız hal analizleri sonucu elde edilen bu bilgiler doğrulanmıştır.

Ayrıca saha verimlilik ölçümü göstermiştir ki, türbin halihazırda kavitasyona maruz kalmasına rağmen en yüksek verim değerinde %92.6'lük bir verim ile çalışmaktadır. Tasarım noktasındaki verim değeri ile (%92.61) en yüksek verimi değerinin (%93.53) farklı noktalarda olması, türbin ilk kurulduğu zamanlardaki gibi çalışmadığını göstermektedir. Ayrıca saha verimlilik ölçümlerinden elde edilen en yüksek verim değeri (%92.6) de tasarım noktasında çıkmamış ve HAD analizlerinde elde edilen en yüksek verim değerinden düşük değerdedir. Literatüre bakıldığında HAD analizlerinde elde edilen sonuçlar saha değerlerine göre daha yüksek çıkmaktadır. Saha verimlilik ölçümünden elde edilen bir diğer sonuç ise türbinin ilk tasarlandığında üretmesi beklenen 180 MW değerine artık ulaşamadığıdır. Santralin normal çalışma süresinden daha uzun süredir çalışıyor olması istenen güç üretiminin ve verimin karşılanamamasına yol açar.



KAYNAKLAR

- [1] **S. Jain, R. P. Saini, and A. Kumar**, (2010), *CFD Approach for Prediction of Efficiency of Francis Turbine*, India
- [2] **Z. Yao, R. Xiao, F. Wang, and W. Yang**, (2015), Numerical Investigation of Cavitation Improvement for a Francis Turbine, *9th International Symposium on Cavitation (CAV2015)*.
- [3] **H. J. Choi, M. A. Zullah, H. W. Roh, P. S. Ha, S. Y. Oh, and Y. H. Lee**, (2013). CFD Validation of performance Improvement of a 500 kW Francis Turbine, *Renewable Energy 54 (2013)*, 101-123
- [4] **J. Nicolle, J. F. Morissette, and A. M. Giroux**, (2012), Transient CFD Simulation of a Francis Turbine Startup, *26th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems*.
- [5] **C. Trivedi, B. K. Gandhi, and M. Cervantes**, (2013), Effect of Transients on Francis Turbine Runner Life: a Review, *Journal of Hydraulic Research, 51(2)*, 121–132.
- [6] **R. Koirala, B. Zhu, and H. Neopane**, (2016), Effect of Guide Vane Clearance Gap on Francis Turbine Performance. *Energies, 9(4)*.
- [7] **C. Trivedi, M. Cervantes, and O. Dahlhaug**, (2016), Experimental and Numerical Studies of a High-Head Francis Turbine: A Review of the Francis-99 Test Case. *Energies, 9(2)*, 74.
- [8] **U. Dorji, and R. Ghomashchi**, (2014). Hydro turbine failure mechanisms: An overview. *Engineering Failure Analysis, 44*, 136–147.
- [9] **A. Müller, A. Favrel, C. Landry, F. Avellan**, (2017), Fluid–structure interaction mechanisms leading to dangerous power swings in Francis turbines at full load. *Journal of Fluids and Structures, 69*, 56–71.

- [10] **D. Valentín, A. Presas, C. Valero, M. Egusquiza, E. Egusquiza, J. Gomes, F. Avellan**, (2020), Transposition of the mechanical behavior from model to prototype of Francis turbines. *Renewable Energy*.
- [11] **A. Presas, D. Valentin, E. Egusquiza, C. Valero**, (2017), Detection and analysis of part load and full load instabilities in a real Francis turbine prototype. *Journal of Physics: Conference Series*, 813, 012038.
- [12] **K. Kubo, T. Nakashima, R. Shima, Y. Enomoto**, (2019), CFD-based rehabilitation for the high specific speed Francis turbine. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 240, 022054.
- [13] **D. Rodriguez, A. Rivetti, M. Angulo, C. Lucino, S. Liscia**, (2019), Francis turbine high load instabilities – Model test and CFD simulation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 240, 022053.
- [14] **M. N. bin Md. Kamal, K. S. bin Shaffee, M. S. bin Mohamad Sidik, A. R. Ab. Kadir, J. I. bin Mahmood**, (2019), Francis Turbine Analysis Between Computational Fluid Dynamics (CFD) and Experimental Methods. *Die Performance Deutscher Staatsanleihen*, 161–172.
- [15] **T. Krappel, S. Riedelbauch, R. Jester-Zuerker, A. Jung, B. Flurl, F. Unger, P. Galpin**, (2016), Turbulence Resolving Flow Simulations of a Francis Turbine in Part Load using Highly Parallel CFD Simulations. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 49, 062014.
- [16] **M. K. Shukla, R. Jain, V. Prasad, S. N. Shukla**, (2011), CFD Analysis of 3-D Flow for Francis Turbine. *MIT International Journal of Mechanical Engineering Vol. 1 No.2 Aug 2011, pp 93-100*.
- [17] **G. Tiwari, V. Prasad, S.N. Shukla, V. K. Patel**, (2020), Hydrodynamic analysis of a low head prototype Francis turbine for establishing an optimum operating regime using CFD. *Journal Of Mechanical Engineering And Sciences (JMES), Vol. 14, No. 2, 2020*.

- [18] **Z. Tong, H. Liu, J. Ma, S. Tong, Y. Zhou, Q. Chen, Y. Li**, (2020), Investigating the Performance of a Super High-head Francis Turbine under Variable Discharge Conditions Using Numerical and Experimental Approach. *Energies*, 13(15), 3868.
- [19] **P. P. Gohil, R. P. Saini**, (2015), Effect of temperature, suction head and flow velocity on cavitation in a Francis turbine of small hydro power plant. *Energy*, 93, 613–624.
- [20] **S. J. Kim, Y. S. Choi, Y. Cho, J. W. Choi, J. H. Kim**, (2018), Effect of Blade Thickness on the Hydraulic Performance of a Francis Hydro Turbine Model. *Renewable Energy*, Vol 134, 807-817.
- [21] **G. I. Krivchenko**, (1986), *Hydraulic Machines Turbines and Pumps*, Moscow: Mir Publishers.
- [22] ANSYS Inc. ANSYS CFX, User Manuel, *ANSYS CFX Release 18.2*, (2018).
- [23] IEC 60193, (1999). Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines – Model acceptance tests.
- [24] **H. Akın**, (2014). Su Türbini Tasarımı Amaçlı Sayısal Yöntemler Geliştirilmesi ve Uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, TOBB ETÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [25] **J. Wu, K. Shimmei, K. Tani, K. Nikura, J. Sato**, (2007). CFD-Based Design Optimization for Hydro Turbines. *Journal of Fluids Engineering*, 129(2), 159.
- [26] ANSYS Inc. ANSYS CFX Theory Guide, *ANSYS CFX Release 18.2*, (2018).
- [27] **J. H. Ferziger, and M. Perić**, (2002), Computational Methods for Fluid Dynamics.
- [28] ANSYS Inc. ANSYS CFX TurboGrid, *ANSYS CFX Release 18.2*, (2018).
- [29] Hatch, (2020). Energy Efficiency in Power Generation, *Final Report for Altinkaya HPP, H358793-Final-200-230-0001*
- [30] Altinkaya HES Teknik Raporu (2016), Altinkaya HES İşletme Müdürlüğü, Kasım 2016.

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Yağmur Tuğba ÜNAL
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 19.06.1995 - Ankara
E-posta : yagmurtuba9@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

Lisans : 2018, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği
Yüksek Lisans : 2020, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği

İŞ DENEYİMİ :

Yıl	Yer	Görev
2017	Arçelik Bulaşık Makinesi İşletmesi	Stajyer
2017	TUSAŞ Türk Havacılık ve Uzay Sanayii	Stajyer
2016	Türk Traktör	Stajyer

YABANCI DİL : İngilizce (İleri Düzeyde), Almanca (A2), Korece (2A)

SUNUMLAR VE YAYINLAR:

Unal, Y.T., Buyuksolak, F., Altintas, B., Celebioglu, K., Ayli, E., Ulucak, O., Aradag, S., (2020). Investigation of a Francis Turbine Performance Using CFD and Site Efficiency Measurements: 8th Eur. Conf. Ren. Energy Sys. 24-25 August 2020, Istanbul, Turkey.