

SU TÜRBNİ TESTLERİ İÇİN DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI

BERAT ÇAĞRI KAVURMACI

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TEMMUZ 2015
ANKARA**

Fen Bilimleri Enstitü onayı

Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilim Dalı Başkanı

Berat Çağrı KAVURMACI tarafından hazırlanan SU TÜRBİNİ TESTLERİ İÇİN DENEY DÜZENEGİ TASARIMI adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Selin ARADAĞ
Tez Danışmanı

Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU
Tez Danışmanı

Tez Jüri Üyeleri

Başkan: Prof. Dr. Ünver KAYNAK _____
Üye : Doç. Dr. Selin ARADAĞ _____
Üye : Yrd. Doç. Dr. Nilay SEZER UZOL _____
Üye : Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU _____
Üye : Doç. Dr. M. Metin YAVUZ _____

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada orijinal olmayan her türlü kaynağa eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Berat Çağrı KAVURMACI

Üniversitesi	: TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Enstitüsü	: Fen Bilimleri
Anabilim Dalı	: Makine Mühendisliği
Birinci Tez Danışmanı	: Doç. Dr. Selin ARADAĞ
İkinci Tez Danışmanı	: Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU
Tez Türü ve Tarihi	: Yüksek Lisans – Temmuz 2015

Berat Çağrı KAVURMACI

SU TÜRBİNİ TESTLERİ İÇİN DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI

ÖZET

Gün geçtikçe insanlığın enerji ihtiyacı artmaktadır. Bununla beraber, doğal tahribat yaratmaktan kaçınmak ve sürdürülebilir bir yaşam biçimi oluşturmak amacıyla yenilenebilir enerjinin önemi giderek artmaktadır. Bu bağlamda, hidrolik enerji; yenilenebilir olması, yüksek verimli üretim sağlayabilmesi, geniş bir talep aralığında üretime cevap verebilmesi, düşük işletme maliyetleri, devreye alma ve devreden çıkarma sürelerinin kısa oluşu gibi yönleriyle oldukça öne çıkmaktadır. Ne var ki hidrolik enerji üretiminde yüksek verim, ancak ve ancak tasarımın en iyi hale getirilmesiyle yakalanabilir. Bunu başarabilmek için deneysel metotlardan yararlanılabilir. Türbin testleri, belirli standartlara tabi test merkezlerinde yapılabilmektedir. Türkiye’de, bu özellikleri taşıyan bir test merkezi bulunmamaktadır. Bu ihtiyaca binaen TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi’nde Kalkınma Bakanlığı desteğiyle bir su türbini test merkezi kurulmaya başlanmıştır. Bu tezin konusu, bahsedilen test merkezi bünyesinde, Francis tipi su türbinlerinin test edilebilmesi amacıyla bir deney düzeneği tasarlanmasıdır. Bu deney düzeneği uluslararası standartlara uygun olarak tasarlanmıştır. Deney düzeneğinde, türbinlerin, debi, düşü, güç, tork ve verimlilik gibi karakteristik değerleri ölçülerek performans analizleri yapılacaktır. Ayrıca; türbin üzerinde cebren bir kavitasyon oluşturulacak, gözlenerek incelenecektir. Tasarlanmış olan düzenek, model türbinleri, 205 m düşü, 2,5 m³/s debi, 2400 rpm dönüş hızı ve 2000 kW türbin gücü değerlerine kadar test edebilmektedir. Bu noktada tasarlanan düzenek, dünyadaki emsallerine göre daha yüksek bir kapasiteyle test yapabilecek olup gerek ulusal gerek uluslararası ölçekte katma değer yaratacaktır.

Anahtar Kelimeler: Francis türbini, su türbini, deney düzeneği, türbin tasarımı, kavitasyon, model testi

University : TOBB Economics and Technology University
Institute : Institute of Natural and Applied Sciences
Science Programme : Mechanical Engineering
First Supervisor : Assoc. Prof. Selin ARADAĞ
Second Supervisor : Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU
Degree Awarded and Date : M.Sc. – July 2015

Berat Çağrı KAVURMACI

DESIGN OF A TEST RIG FOR HYDRAULIC TURBINES

ABSTRACT

The humanity's need for energy is rising up day by day. Besides, in order to avoid natural destruction and to create a sustainable life style, the importance of renewable energy is increasing. In this regard, hydraulic energy steps forward with being a renewable energy source, providing high efficient manufacturing, satisfying a huge range of production, low operating costs and short time of start-up and cut-out processes. However, high efficiency values can only be achieved by providing better design. In this sense, experimental methods should be used in order to optimize the turbine design. Turbine tests can only be performed in certain test centers which are liable to specific standards. In Turkey, there is no such test center which fulfils these requirements. As a consequence of this need, a hydraulic turbine test center is being constructed in TOBB University of Economics and Technology with the support of Ministry of Development. The context of this thesis is the design of an experimental test set up for Francis turbines in the forenamed test center. This center is designed according to the international standards. The performance analysis of hydraulic turbines will be performed by measuring specific values such as flow rate, head, power, torque and efficiency. Besides, cavitation will be formed by compulsorily on the turbine, which will be examined and evaluated. The mentioned test set up is capable of performing model tests with a head of 205 m. and a flow rate of 2,5 m³/s, up to 2400 rpm and 2000 kW power. In this point, the designed experimental set up will perform higher capacity rather than its compeers in the world and provide added value in national and international means.

Key Words: Francis turbine, hydraulic turbine, test rig, turbine design, cavitation, model test

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca beni yardımlarından ve desteklerinden mahrum bırakmayan, tecrübeleri ile bana yol gösteren, yaşadığım güçlükleri anlayışla karşılayarak bana destek olan değerli hocalarım Doç. Dr. Selin Aradağ Çelebioğlu ve Dr. Kutay Çelebioğlu'na içtenlikle teşekkür ederim.

Tez jürisi üyeleri; Prof. Dr. Ünver Kaynak, Doç. Dr. M. Metin Yavuz ve Yrd. Doç. Dr. Nilay Sezer Uzol'a zaman ayırıp tezimi değerlendirdikleri ve jürimde buldukları için teşekkür ederim.

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne, sağladığı araştırma olanakları ve eğitimim esnasında yararlandığım personel bursu için teşekkür ederim.

Aynı ofisi paylaştığım arkadaşlarım Fatma Zeynep Aytaç, Hasan Akın, İbrahim Yılmaz ve Alev Elikalfa'ya zor zamanlarımda yanımda oldukları için minnettar olduğumu belirtir, çalışmalarım sırasında gösterdikleri yardımlar için teşekkür ederim.

Arkadaşlarım, Cansu Akoğlan, Furkan Aytaç, Cenk Özer ve Gözde Özer'e ihtiyacım olan her an yanımda oldukları ve bu süreçte karşılığını asla veremeyeceğim içten yardımlarını benden esirgemedikleri için çok teşekkür ederim.

Doğduğum günden beri bütün fedakârlığıyla yanımda olan babam Nahit Kavurmacı'ya, çok sevdiğim biricik kardeşim Berna Kavurmacı'ya ve erken yaşta kaybettiğim, çok özlediğim, annem merhume Gülderen Kavurmacı'ya teşekkür ederim.

Son olarak sabrını ve sevgisini tüketmeyi başaramadığım sevgili eşim Nihan Kavurmacı'ya, hayattaki her türlü zorluğu ve güzelliği onunla paylaşabildiğim için sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOL LİSTESİ	xii
1. GİRİŞ	1
1.1 Hidroenerji	1
1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı	3
2. LİTERATÜR TARAMASI	6
2.1 Su Türbinleri	6
2.1.1 Türbin Parametreleri	7
2.1.2 Türbin Tipleri	10
2.1.3 Türbinlerin Çalışma Koşulları	13
2.1.4 Hidrolik Benzerlik	16
2.2 Türbin Testi	20
2.2.1 Garanti Edilen Özellikler	22
2.2.2 Test Merkezi Örnekleri	23
3. DENEY DÜZENEGİ TASARIMI	27
3.1 Test Merkezi	27
3.2 Test Düzenegi	29
3.2.1 Yüksek Düşü Tankı	31
3.2.2 Düşük Düşü Tankı	33
3.2.3 Model Türbin ve Jeneratör	35
3.2.4 Debimetre Kalibrasyon Sistemi	36
3.2.5 Pompalar	40
3.2.6 Vanalar ve Borular	41
3.3 Ölçüm cihazları	41
3.3.1 Debi Ölçümü	42
3.3.2 Basınç Ölçümü	44

3.3.3	Tork Ölçümü	45
3.3.4	Hız Ölçümü	45
3.3.5	Suyun Fiziki Özelliklerinin Ölçümü.....	46
3.4	Hidrolik Tasarım	46
4.	MODEL TÜRBİN.....	50
4.1	Model Türbin Tasarımı	51
4.1.1	Yardımcı Parçalar	52
4.1.2	Çark.....	53
4.2	Ölçüm ve Kontrol	56
4.2.1	Boyutsal Analiz	56
4.2.2	Yüzey Kalitesi	64
5.	TESTLERİN UYGULANIŞI	68
5.1	Açık Çevrim ve Performans Testi	69
5.2	Kapalı Çevrim ve Kaviteasyon Testi.....	73
5.3	Kalibrasyon Çevrimi ve Debimetrenin Kalibrasyonu	75
5.4	Benzetim ve Hesaplama.....	77
6.	DEĞERLENDİRME.....	80
	KAYNAKLAR.....	83
	ÖZGEÇMİŞ.....	87

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Test için minimum değerler ve tasarlanan düzeneğin değerleri[10]	4
Çizelge 2.1. Türbin tipleri çalışma aralığı [17]	11
Çizelge 2.2. EPFL Hidrolik Makine Laboratuvarı Test Kapasitesi[21]	24
Çizelge 3.1. Açık çevrim durumunda hidrolik kayıplar	48
Çizelge 3.2. Kapalı çevrim durumunda hidrolik kayıplar	49
Çizelge 4.1. Türbin boyutları için maksimum sapma değerleri[10]	63
Çizelge 5.1. Three Gorges HES ve Keban HES türbin özellikleri[38][39]	77
Çizelge 5.2. Three Gorges HES çalışma noktaları	78
Çizelge 5.3. Keban HES çalışma noktaları	78
Çizelge 5.4. Test edilecek çalışma noktaları	79

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Hidroelektrik Santral	6
Şekil 2.2. Türbin kesiti	8
Şekil 2.3. Francis türbini	12
Şekil 2.4. Çark kanadının girişinde ve çıkışında hızlar	14
Şekil 2.5. Çark kesiti	16
Şekil 2.6. Performans test düzeneği	21
Şekil 2.7. Kavitasyon test düzeneği	22
Şekil 2.8. EPFL Hidrolik Makine Laboratuvarı[21]	24
Şekil 2.9. Voith Morgan Smith Türbin Laboratuvarı	25
Şekil 2.10. Voith Morgan Smith Laboratuvarı test düzeneği	26
Şekil 3.1. Tezgâhlar	28
Şekil 3.2. Su türbinleri test laboratuvarı yerleşimi	29
Şekil 3.3. Su türbinleri test düzeneği	30
Şekil 3.4. Yüksek düşü tankı	32
Şekil 3.5. Düşük düşü tankı	34
Şekil 3.6. Model türbin ve jeneratör	35
Şekil 3.7. Kalibrasyon Sistemi	37
Şekil 3.8. Kalibrasyon tankı	38
Şekil 3.9. Ayırıcı ve lüle	39
Şekil 3.10. Pompalar	40
Şekil 3.11. Elektromanyetik debimetre	42
Şekil 3.12. Debimetrenin sistemdeki konumu	43
Şekil 3.13. Tork ölçüm mekanizması	45
Şekil 3.14. Deney düzeneği hidrolik modeli	47
Şekil 4.1. Salyangoz, hız ringleri ve sabit kanatlar	52
Şekil 4.2. Ayar kanadı	53
Şekil 4.3. Model türbin çark kanadı	54
Şekil 4.4. Model çark taç ve bilezik	55
Şekil 4.5. Model çark kanatlar	55

Şekil 4.6. Model çark montaj kesiti	56
Şekil 4.7. Salyangoz ve hız ringi ölçümü.....	57
Şekil 4.8. Sabit kanatlar	58
Şekil 4.9. Ayar kanatları	58
Şekil 4.10. Emme borusu	59
Şekil 4.11. Sızdırmazlık elemanları ölçümü	60
Şekil 4.12. Çark için ölçüm noktaları	61
Şekil 4.13. Çark kanadı ölçümü	62
Şekil 4.14. Dalgalılık ve pürüzlülük	64
Şekil 4.15. Özgül hızı 20 ila 40 olan Francis türbinleri için \bar{R}_a değerleri[35]	65
Şekil 4.16. Özgül hızı 40 ila 70 olan Francis türbinleri için \bar{R}_a değerleri[35]	66
Şekil 4.17. Francis türbinlerinin hidrolik düzgünlüğü için \bar{R}_a sınır değerleri[35].....	67
Şekil 5.1. Açık çevrim	70
Şekil 5.2. Kapalı çevrim.....	73
Şekil 5.3. Kalibrasyon çevrimi	76

KISALTMALAR

Kısaltmalar	Açıklama
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
CMM	Coordinate Measuring Machine
HAD	Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HES	Hidroelektrik Santral
NPSE	Net Positive Suction Energy
EPFL	Ecole Polytechnique Federale de Lausanne
TGÇN	Three Gorges Çalışma Noktası
KÇN	Keban Çalışma Noktası

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama
a_2	Çark kanadı çıkış genişliği
b_0	Ayar kanadı yüksekliği
D	Çark referans çapı
E	Özgül enerji
f	Frekans
g	Yerçekimi ivmesi
H	Düşü
M	Moment
n	Çarkın dönme hızı
N_{QE}	Özgül hız
N_{ED}	Hız faktörü
p	Basınç
p_{abs}	Mutlak basınç
P_h	Hidrolik güç
P_m	Mekanik çark gücü
P_{ED}	Güç faktörü
P_{nD}	Güç katsayısı
P_i	Çark kanadı giriş aralığı
R_a	Yüzey pürüzlülüğü
Q	Debi
Q_{ED}	Debi faktörü
r	Yarıçap
T_m	Çark torku
T	Çark kanadı maksimum kalınlığı
T'	Sabit kanat maksimum kalınlığı
T''	Ayar kanadı maksimum kalınlığı
u	Çark kanadının çevresel hızı
U	Yüzey dalga uzunluğu
v	Akış hız vektörü

w	Dönel koordinat sisteminde akış hız vektörü
X	Yüzey dalga yüksekliği
α	Akış açısı
β	Bağıl akış açısı
δ	Bağıl ölçeklenebilir kayıp
η_h	Hidrolik verim
ρ	Su yoğunluğu
σ	Thoma sayısı
ν	Kinematik viskozite
ω	Açısal hız

1. GİRİŞ

İnsanlığın enerji ihtiyacı; küresel nüfus artışı ve gelişip yaygınlaşan teknolojiyle beraber gün geçtikçe artmaktadır. Bu bağlamda, enerji üretim faaliyetleri giderek önem kazanmaktadır. Ne var ki, başta fosil yakıt kullanımı olmak üzere birçok enerji üretim metodu hem doğaya zarar vermekte hem de kullanıldıkça tükenen kaynaklara dayanmaktadır. Bu noktada; yenilenebilir enerji üretim yöntemleri, sürdürülebilir bir yaşam biçimi oluşturmak açısından kaçınılmaz hale gelmektedir.

1.1 Hidroenerji

Akan suyun taşıdığı mekanik enerjiden elde edilen elektrik enerjisine hidroelektrik enerji denir. İnsanlık tarihinde, yenilenebilir kaynaklardan elektrik üretimini mümkün kılan ilk yöntemdir. Bunun yanı sıra, hâlen, yenilenebilir enerji kaynakları içinde, yüksek ölçekte (100 TWh/yıl) enerji üretim kapasitesine sahip santraller kurabilmeyi mümkün kılan tek enerji kaynağıdır[1].

Hidroelektrik enerji santralleri; izafeten yüksek yatırım maliyetlerine sahiptirler. Ancak; gerek uzun kullanım ömürleri gerekse oldukça düşük işletme maliyetleri göz önüne alındığında fazlasıyla ekonomik yatırımlar olduğu görülür. Bir elektrik santralinin kullanım ömrü boyunca ürettiği enerjinin, kurulum, bakım ve yakıt temini gibi sebeplerden dolayı harcadığı enerjiye oranına enerji geri kazanım oranı adı verilir. Hidroelektrik enerji, bütün enerji türleri arasında, en yüksek enerji geri kazanım oranına sahip olanıdır[2].

Hidroelektrik enerji üretiminde, üretim kapasitesi kolaylıkla ayarlanabilir. Üretime başlama, durdurma ve üretim miktarını değiştirme süreleri oldukça kısadır. Bu noktada, gün içinde değişen enerji ihtiyacına en kolay cevap verebilecek enerji üretim biçimidir[3].

Hidroelektrik enerji santralleri oldukça geniş bir enerji talebi aralığına karşılık verebilirler. Dünyanın en büyük hidroelektrik santrali 22,5 GW kurulu güce ve yıllık

100 TWh enerji üretim kapasitesine sahip olan Three Gorges HES'tir[4]. Ülkemizde ise 2,4 GW kurulu güce ve 8,9 TWh yıllık enerji üretim kapasitesine sahip olan Atatürk Barajı HES[5], en büyük HES olarak hizmet vermektedir. Bu bağlamda, hem küresel hem de ulusal ölçekte, büyük miktarlarda enerji ihtiyacını karşılamak ve buna binaen kalkınmak amacıyla yapılan yatırımlar söz konusu olduğunda hidroelektrik enerji göz ardı edilememektedir.

Dünyada üretilen elektrik enerjisinin %20'sini hidroelektrik enerji oluşturmaktadır[6]. Ancak, oldukça büyük miktarda potansiyel hâlen kullanıma açılmamıştır. 2009 yılı itibariyle, küresel ölçekte, hidroelektrik enerji için teknik üretim kapasitesi potansiyeli, yıllık 14576 TWh olarak tahmin edilmektedir. Üretim miktarı ise 3551 TWh olarak ölçülmüştür[1]. Aynı şekilde, teknik kurulu güç potansiyeli 3721 GW, mevcut toplam kurulu güç ise 926 GW olarak belirlenmiştir[1]. Değerlendirilmemiş potansiyel, Afrika ve Asya kıtalarında yoğunlaşmaktadır.

Türkiye'de ise, 2012 yılı itibariyle, toplam kurulu gücün %38,6'sı hidroelektrik kaynaklıdır. Ayrıca, 2012 yılındaki toplam elektrik üretiminin %26,9'u hidroelektrik santrallerde yapılmıştır[7]. Bununla beraber, ülkemizin sahip olduğu iklim ve coğrafi yapı düşünüldüğünde, hâlen kullanıma sunulmayan önemli bir potansiyel vardır. 2009 yılı itibariyle, Türkiye'nin hidroelektrik kurulu gücü 14,5 GW olarak kayıtlara geçmiştir. Ayrıca, inşa halinde olan kurulu güç 8,6 GW, planlanan ise 22,7 GW olarak tahmin edilmektedir. Ülkemizin yıllık hidroelektrik brüt potansiyeli 433 TWh, teknik potansiyeli 216 TWh ve ekonomik potansiyeli ise 170 TWh olarak tahmin edilmektedir. Ortalama üretim miktarı ise yıllık 36 TWh civarındadır[8].

Bahsedildiği üzere, hidroelektrik enerji; yenilenebilir olması, ekonomik olması, yüksek verimli üretim sağlayabilmesi, tek bir santral ile yıllık 100 TWh gibi yüksek miktarda enerji talebine cevap verebilmesi, düşük işletme maliyetleri, devreye alma ve devreden çıkarma sürelerinin kısa oluşu gibi yönleriyle oldukça öne çıkmaktadır. Gerek küresel gerekse ulusal bazda; mevcut kullanılmamış potansiyel dikkate alınırsa, uzun yıllar boyunca gözden düşmeyecek bir enerji üretim yöntemidir. Lakin

hidroelektrik enerji üretiminde yüksek verim, ancak ve ancak tasarımın en iyileştirilmesiyle yakalanabilir.

Bir hidroelektrik santralde kullanılan türbin, o HES'in mevsimsel debisi, düşüsü, konumlandığı rakım gibi teknik birçok özelliği göz önünde bulundurularak üretilir. Bu noktada, her bir türbin kullanıldığı HES'e mahsustur ve kendine özel bir tasarım gerektirir. Gelişen teknolojiyle birlikte, türbin tasarımı, büyük ölçüde bilgisayarlı yöntemler kullanılarak yapılmaktadır.

Tasarım sürecinde, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanımı büyük paya sahiptir[9]. HAD yöntemlerinin tercih edilmesinin en önemli sebebi; incelenmek istenen tasarımla alakalı her durumun hızlı ve ucuz bir biçimde modellenerek hesaplanabilmesidir. Ancak, bu yöntemlerde elde edilen sonuçların doğrulanması için deneysel yöntemlere başvurulmaktadır. Bu bağlamda; gerek tasarımların iyileştirilmesi, gerekse ticari bir mal olan türbinin sahip olduğu performansın incelenmesi amacıyla, türbinler teste tabi tutulur.

1.2 Tezin Amacı ve Kapsamı

Hidrolik türbinlerin deneysel incelemeleri, *IEC 60193 Hidrolik türbinler, depolama pompaları ve pompa türbinleri - Kabul model deneyleri* standardı[10] tarafından, net bir şekilde belirlenmiş ve detaylıca açıklanmış bir metotla yapılır. Deneyler, bu iş için kurulmuş test merkezlerinde gerçekleştirilirler. Bu bağlamda, test merkezleri, belirtilen standardın gerektirdiği özellikleri taşımalıdır.

Türkiye, elektriğinin büyük bir kısmını hidroelektrik santraller vasıtasıyla üretmektedir. Ayrıca, ülkemizde hâlen kullanıma açılmamış önemli bir hidroelektrik enerji potansiyeli mevcuttur. Bu bağlamda, gerek hali hazırda faaliyette olan santrallerin rehabilitasyon işlemlerinin gerçekleşmesi için gerekse yeni yapılacak olan HES'lerde kullanılacak türbinlerin tasarımı için, türbin testi ihtiyacı bulunmaktadır. Bahsedilen testler ülkemizde yapılamamaktadır. Bu nedenle, hidrolik türbinlerin tasarım ve testlerinin ülkemizde gerçekleştirilmesini sağlamak amacıyla,

2012 yılında, Kalkınma Bakanlığı desteği ile TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi bünyesinde bir Su Türbini Tasarım ve Testleri Merkezi kurulmuştur.

Bu tez çalışmasında, bahsedilen merkez dâhilinde türbin testlerini yapacak olan deney düzeneğinin tasarımı yapılmıştır[11]. Düzeneğin hidrolik modellemesi yapılmış ve çalışma esnasında oluşacak kayıplar hesaplanarak test kapasitesi belirlenmiştir[12]. Ayrıca, düzenek üzerine yerleştirilen ölçüm cihazları seçilmiş ve konumlandırılmıştır. Daha sonra, düzenekte test edilecek model türbinin üretim yöntemi belirlenmiş ve testlerin uygulanış biçimi ortaya konulmuştur. Üretilen modellerin boyutsal kontrolü için bir prosedür belirlenmiştir.

IEC 60193 standardı uyarınca, deney düzeneği test esnasında belirli minimum değerleri sağlamaya mecburdur. Tasarlanan düzenek, bu değerleri sağlamaktadır. Standart tarafından istenen minimum değerler ve tasarlanan düzeneğin sağlayabildiği değerler Çizelge 1.1’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 1.1. Test için minimum değerler ve tasarlanan düzeneğin değerleri[10]

	Radyal (Francis)	Eksenel (Kaplan)	Serbest Püskürtmeli (Pelton)	Tasarlanan düzenek (Francis)
Reynolds Sayısı, Re	4×10^6	4×10^6	2×10^6	53×10^6
Özgül Enerji, E (J/kg)	100	30	500	2000
Referans Çap / Kepçe Genişliği (m)	0,25	0,30	0,08	0,65

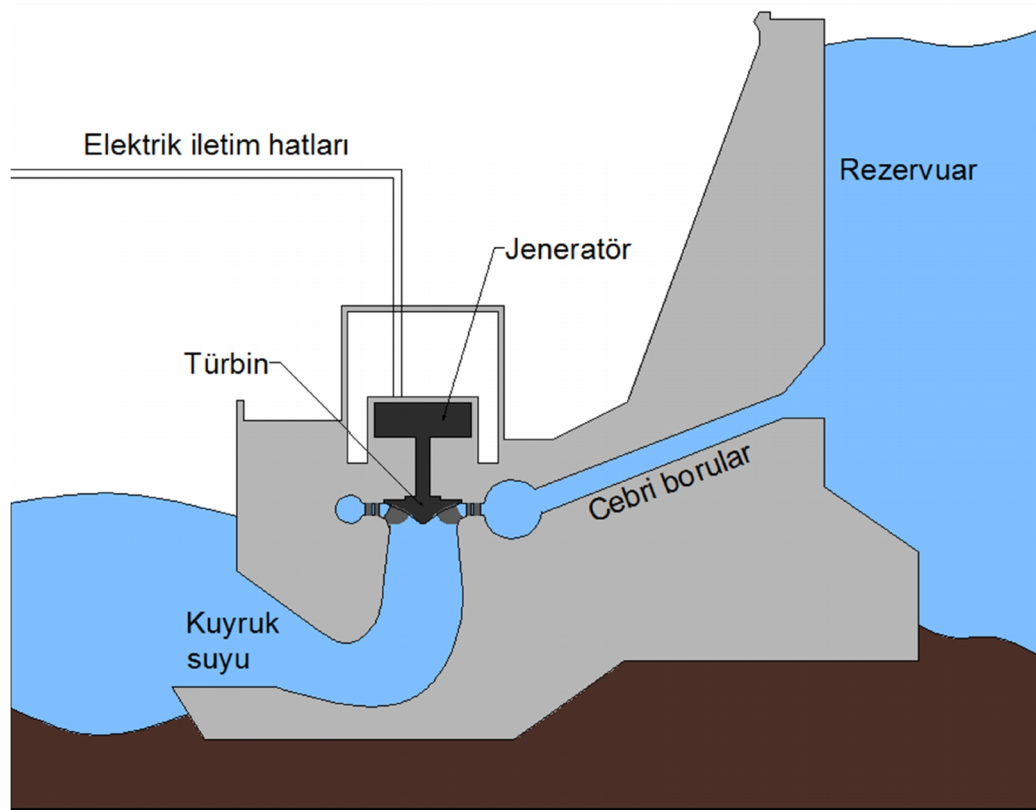
Tasarlanan düzenekte Francis tipi türbinler test edilecektir. Düzenek 205 m düşü, 2,5 m³/s debi, 2000 kW türbin gücü ve 2400 rpm dönüş hızı limit değerleri altında model türbin testi yapabilmektedir. Düzenek, iki adet 80 m düşü ve 1 m³/s debi tasarım değerlerine sahip pompa vasıtasıyla çalıştırılmaktadır. Pompalar, değişken devirli olup 1500 kW gücünde frekans kontrollü birer motor ile döndürülür.

Tasarlanan düzenek ve model IEC 60193 standardında belirtilen özellikleri taşımaktadır. Düzenekte kullanılan parçaların seçimi, tasarımı ve boyutlarının belirlenmesi, standardın isterleri göz önünde bulundurularak yapılmıştır. Kullanılan ölçüm cihazları ve bunların kalibrasyon metotları, belirtilen standarda uygun olacak şekilde seçilmiştir. Test yöntemi ve hesaplamalar yine aynı standartta açıklandığı şekilde ortaya konmuştur.

2. LİTERATÜR TARAMASI

2.1 Su Türbinleri

Hidroelektrik santraller, genel olarak, yüksek bir rakımda depolanmış bir suyun taşıdığı mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çevirirler. Su türbini ise, suyun taşıdığı mekanik enerjiyi sudan devralmaya yarayan parçadır. Şekil 2.1’de bir hidroelektrik santralin şematik gösterimi yapılmıştır. Yüksek bir seviyede bulunan rezervuarda biriken su cebri borular vasıtasıyla türbine ulaştırılır. Türbinden geçen su, taşıdığı mekanik enerjiyi türbine devrederek, kuyruk suyu çıkışından sistemi terk eder. Türbin, mili döndürmek suretiyle bu enerjiyi jeneratöre aktarır. Jeneratör ise bu enerjiyi elektrik enerjisine çevirerek iletim hattına verir[3].



Şekil 2.1. Hidroelektrik Santral

Su türbinleri, HES'lerin verimliliğinin belirlenmesinde en büyük rolü oynar. Bu noktada, bir HES'in en kritik parçasıdır. Bu bağlamda, yerleştirileceği HES'e uygun olarak tasarlanmalıdır.

2.1.1 Türbin Parametreleri

Bir hidroelektrik santralde kullanılacak türbinin belirlenmesi kapsamlı bir süreçtir. Öncelikle kullanılacak türbin tipinin baraj tarafından belirlenen çalışma özelliklerine göre seçilmesi gerekir. Daha sonra bu türbin, bahsedilen özellikler göz önüne alınarak tasarlanır ve üretilir. Üretilen türbinlerin testleri, yine türbinin çalışma koşulları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilir[13].

IEC 60193 standardı uyarınca, türbin testi detaylıca açıklanmış bir yöntemle yapılmalıdır. Bu bağlamda, esas türbin ve model türbin arasındaki benzerlik kurularak model türbin ölçülerinin belirlenmesi, model türbinin performans ve kavitezyon analizleri, model türbinden elde edilen veri kullanılarak esas türbinin performans ve kavitezyon davranışlarının anlaşılabilmesi için belirli terimler ve parametreler tanımlanarak kullanılmaktadır. Türbin parametreleri, bir türbinin çalışması ile ilgili gerekli bütün bilgileri kapsar.

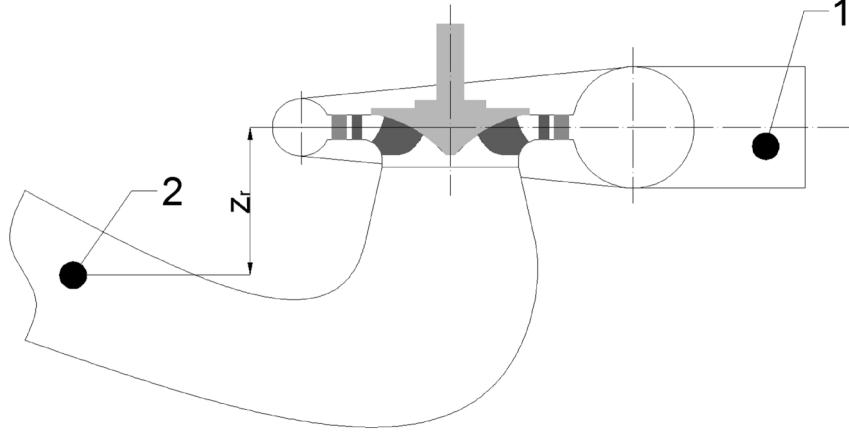
2.1.1.1 Debi ve Özgül Ağırlık

Bir su türbininden, birim zamanda, hacimsel olarak geçen su miktarına debi adı verilir[14]. Debi, Q ile gösterilir. Özgül ağırlık ise bir m^3 suyun kg cinsinden ağırlığıdır, ρ ile gösterilir.

2.1.1.2 Özgül Enerji, Düşü ve NPSE

Özgül enerji, suyun birim kütesinin sahip olduğu mekanik enerjinin, türbinin giriş ve çıkış noktaları arasındaki farkıdır. E ile gösterilir. Düşü, H , ise suyun birim ağırlığının sahip olduğu mekanik enerjinin, türbinin giriş ve çıkış noktaları arasındaki farkıdır. Özgül enerji ve düşü Şekil 2.2'de gösterilen noktalardaki mutlak su basıncına bağlı olarak, Denklem 2.1'de gösterildiği gibi hesaplanır.

Emmedeki net pozitif enerji (NPSE) ise, Şekil 2.2’de ve Denklem 2.2’de gösterildiği gibi hesaplanır, denklemde gözükten p_{va} suyun buhar basıncıdır[15].



Şekil 2.2. Türbin kesiti

$$E = gH = \frac{p_{abs1} - p_{abs2}}{\rho} + \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \quad (2.1)$$

$$NPSE = \frac{p_{abs2} - p_{va}}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} - g z_r \quad (2.2)$$

2.1.1.3 Güç, Hidrolik Verimlilik ve Tork

Bir türbinin birim zamanda sudan çektiği enerji, türbinin hidrolik gücünü gösterir. Hidrolik güç, P_h , denklem 2.3’te gösterildiği gibi hesaplanır[10].

$$P_h = \rho g H Q \quad (2.3)$$

Mekanik çark gücü, P_m , ise türbinin sudan elde ettiği güçtür. Bu güç belirlenirken, yataklama kaynaklı kayıplar hesaba katılmaz. Mekanik çark gücünün hidrolik güce oranı hidrolik verimliliği verir. Hidrolik verimlilik, η_h , ve mekanik çark gücü Denklem 2.4’te gösterildiği gibidir[10].

$$P_m = \rho g H Q \eta_h \quad (2.4)$$

Denklem 2.5 ve 2.6'da ise mekanik çark gücünün boyutsuz olarak ifadeleri gösterilmiştir. Güç faktörü, P_{ED} , Denklem 2.5'te; Güç katsayısı, P_{nD} , ise Denklem 2.6'da gösterildiği gibidir[10].

$$P_{ED} = \frac{P_m}{\rho D^2 E^{1,5}} \quad (2.5)$$

$$P_{nD} = \frac{P_m}{\rho n^3 D^5} \quad (2.6)$$

Çark torku, T_m , ise çarkın torkunu gösterir. Yataklama kayıpları göz önüne alınmadan belirlenen torktur. Denklem 2.7'de gösterildiği gibidir[10].

$$T_m = \frac{P_m}{2\pi n} \quad (2.7)$$

2.1.1.4 Dönüş Hızı ve Özgül Hız

Dönüş hızı, türbin çarkının bir saniyede yaptığı devir sayısıdır. n ile gösterilir. Türbinler çalıştıkları süre boyunca sabit bir devir sayısında dönerler. Bu devir sayısı, Denklem 2.8'de gösterildiği üzere, şebeke frekansı, f , ve jeneratörün kutup sayısına göre belirlenir[3].

$$n = \frac{2 * f}{\text{kutup sayısı}} \quad (2.8)$$

Özgül hız ise, bir türbinin 1 m düşü altında 1 kW güç üretebilmesi için ihtiyaç duyduğu dönüş hızını gösteren boyutsuz bir büyüklüktür. Özgül hız, N_{QE} , Denklem 2.9'da gösterildiği şekilde hesaplanır[10].

$$N_{QE} = \frac{nQ^{0,5}}{E^{0,75}} \quad (2.9)$$

2.1.1.5 Reynolds ve Thoma sayıları

Reynolds ve Thoma sayıları, türbinlerin tasarım ve analizinde önemli yer tutan boyutsuz parametrelerdir. Reynolds sayısı, akışın üzerindeki atalet etkilerine bağlı kuvvetlerin viskoz etkilere bağlı kuvvetlere oranıdır. Türbinlerin hidrolik performansının belirlenmesinde rol oynar. Denklem 2.10'da gösterildiği şekilde hesaplanır. Bu denklemdeki v değeri kinematik viskoziteye karşılık gelir. Thoma sayısı ise türbinlerin kavitasyon karakteristiklerinin ortaya konmasında kullanılır. Denklem 2.11'de gösterilmiştir[10].

$$Re = \frac{\pi D^2 n}{\nu} \quad (2.10)$$

$$\sigma = \frac{NPSE}{E} \quad (2.11)$$

2.1.2 Türbin Tipleri

Bir su türbininin asli görevi mekanik enerjiyi sudan devralmaktır. Bu durum, farklı fiziksel etkileşimler vasıtasıyla gerçekleşebilir. Bu bağlamda, su türbinleri, temel çalışma prensipleri uyarınca üst basınç türbinleri ve serbest püskürtmeli türbinler olmak üzere iki başlık altında incelenebilir[16].

- *Üst Basınç Türbinleri:* Türbin çarkının, basınçlı ve kapalı bir akış yolu içinde, tamamen suyla kaplı olduğu türbin biçimidir. Suyun, kanat yüzeylerine uyguladığı yüksek basınç vasıtasıyla döner. Rezervuardan gelen su, çarka ulaştığında, taşıdığı mekanik enerjinin büyük bir kısmı basınç formundadır. Akan su, çark boyunca basıncını kaybeder. Çarktan ayrılan suyun basıncı oldukça düşüktür. Bu vesileyle, su, üzerinde bulunan mekanik enerjiyi çarka aktarmış olur. Francis ve Kaplan tipi türbinler, bu türbin türünün başlıca örnekleridir.
- *Serbest Püskürtmeli Türbinler:* Açık ortamda bulunan türbin çarkının üzerinde yer alan kanatlara, hızla püskürtülen suyun çarpması vasıtasıyla

döndürülen türbin biçimidir. Rezervuardan gelen su, çarka ulaştığında, taşıdığı mekanik enerjinin büyük bir kısmı hız formundadır. Hızla püsküren su taşıdığı momentumu çarka aktarır. Bu şekilde, mekanik enerji, sudan çarka iletilir. Bu tip türbinlerin en yaygın görülen örneği Pelton türbinidir.

Bir HES'e yerleştirilecek türbinin seçiminde en etkili veri özgül hız verisidir. Kullanılacak türbin; barajın sağlayacağı debi ve düşü verileri göz önüne alınarak belirlenen özgül hız değerlerine göre seçilir. Çizelge 2.1'de en sık tercih edilen üç türbin türü olan Francis, Kaplan ve Pelton tipi türbinler için çalışma aralıkları gösterilmiştir.

Çizelge 2.1. Türbin tipleri çalışma aralığı [17]

	Pelton	Francis	Kaplan
Özgül Hız (rad)	0,05 – 0,4	0,4 – 2,2	1,8 – 5,0
Düşü (m)	100 - 1770	20 - 900	6 - 70
Maksimum Güç (MW)	500	800	300
Optimum Verim (%)	90	95	94

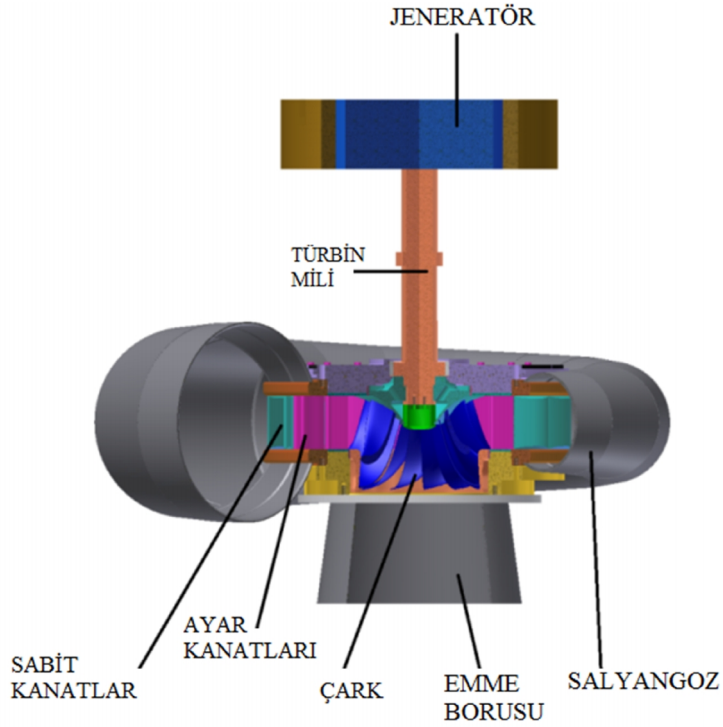
2.1.2.1 Francis Türbini

Francis tipi türbin, J.B. Francis vd. tarafından 1848 yılında, Lowell, ABD'de geliştirilmiştir[18]. Bu tip türbinde, çarka radyal yönden giren su, çarkı aksenal yönde terk eder. Günümüzde kullanılan Francis türbinleri, hâlen bu prensibe bağlı olarak çalışır.

Uzun yıllardır geliştirilmekte olan, Francis tipi türbinler geniş bir çalışma aralığında yüksek verim sağlayabilmektedir. Ünite başına 800 MW güç üretebilirler[19]. Dolayısıyla gerek küçük gerekse büyük hidroelektrik santrallerde rahatlıkla kullanılabilirler. Bu türbinler, güvenilir ve olgunlaştırılmış bir teknolojiye sahiptir. Tasarım ve üretim süreçleri uzun zamandır geliştirilmektedir. Bakım ve tamir

gereksinimleri, montaj ve devreye alınma yöntemleri belirlenmiştir. Çalışma şartları, enerji üretimini başlatmak, durdurmak ve ayarlamak için kullanılan çeşitli sistemler üretilmiştir. Bu sebeplerden ötürü, Francis tipi türbinler, barajlarda sıklıkla kullanılmaya devam etmektedir.

Francis türbinleri 5 ana parçadan oluşur. Bunlar; salyangoz, sabit kanatlar, ayar kanatları, çark ve emme borusu olarak sıralanır. Şekil 2.3'te bir Francis türbini gösterilmiştir.



Şekil 2.3. Francis türbini

Salyangoz, cebri borudan gelen suyun çarka her açıdan eşit ve türdeş bir hız profiliyle girmesinde önemli bir rol oynar. Bu bağlamda, gelen basınçlı suyu sabit kanatlara düzgün bir biçimde dağıtmakla görevlidir. Bunun gerçekleşmesi için salyangoz boyunca suyun debi miktarının düzgün bir şekilde azalması gerekir. Bu noktada, suyun sabit kanatlara giriş açısını ve hızını sabit tutmak adına, salyangoz daralan bir profil gösterecek şekilde tasarlanır[20].

Sabit kanatların temel amacı, salyangozun üst ve alt yarısının basınç etkisiyle birbirinden ayrılmasını önleyerek yapısal dayanımı sağlamaktır[20]. Ancak, akışın bozularak büyük hidrolik kayıplara uğramadan ayar kanatlarına ulaşması konusunda da önemli rol oynarlar. Bu bağlamda kanat profilleri akışın gerektirdiği şekilde belirlenir.

Ayar kanatları, suyun çarka gereken açıyla girmesini sağlayan parçalardır. Üzerlerine yerleştirilmiş bir mil vasıtasıyla eksenlenmiş yapılardır. Bu mil ekseninde dönerek, türbine giren debi miktarını kontrol ederler. Bu bağlamda, türbinin çalıştırılma durdurulma ve üretilen gücün ayarlanması gibi kontrol fonksiyonlarını yerine getiren elemandır[20].

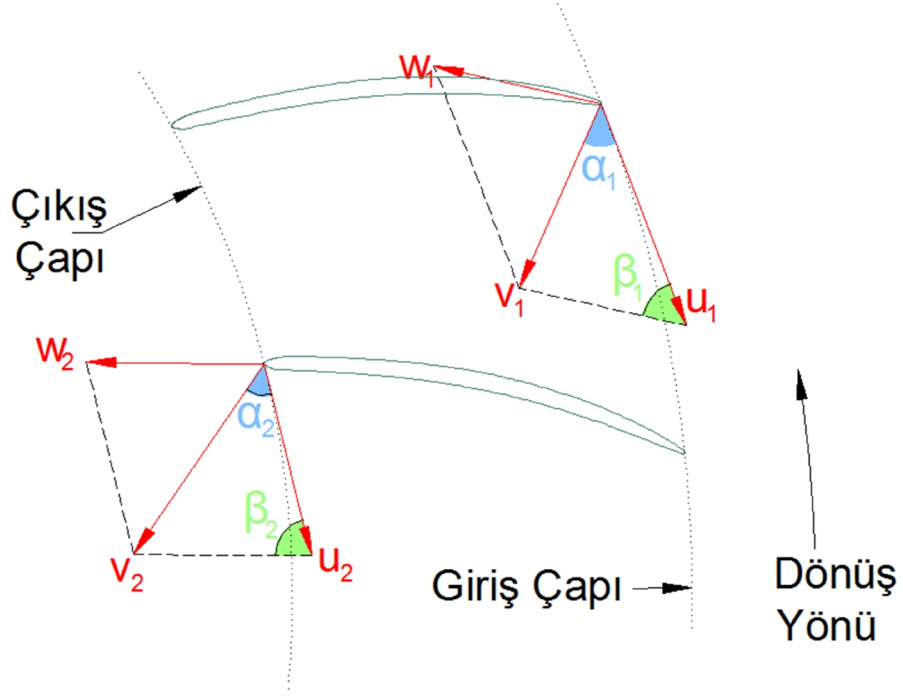
Çark, basınçlı suyun enerjisini alarak dönen türbin elemanıdır. Bir türbindeki en kritik elemanı çarktır. Türbinin verimliliğini temel olarak çark belirler. Sudan aldığı enerjiyi, üzerine bağlı mil vasıtasıyla jeneratöre aktararak, türbinin enerji üretim görevini yerine getirmesini sağlar[13].

Emme borusu çarktan çıkan suyu kuyruk suyuna ulaştırır. Su, emme borusundan geçerken, emme borusunun genişleyen profili sayesinde fazlasıyla yavaşlar. Bu vesileyle, su üzerindeki hız kaynaklı enerji basınç yaratır. Emme borusunun bir işlevi de suyun çarktan hızlı bir biçimde atılmasını engelleyerek o hızın kaynağı olan enerjinin çarkta kalmasını sağlamaktır[13].

2.1.3 Türbinlerin Çalışma Koşulları

Türbine gelen suyun taşıdığı mekanik enerji, akış ile dönen çark kanatları arasındaki etkileşim vasıtasıyla türbin miline iletilir. Bu enerji geçişini incelemek amacıyla, suyun momentum değişimi incelenebilir. Bu amaçla, çarka giren ve çıkan suyun hızına bakılır. Hız bileşenleri hesaplanırken, suyun sabit bir devir sayısı ile dönen çarka göre gösterdiği bağıl hareket göz önüne alınabilir. Bu yöntem, *hız üçgenleri* olarak ta isimlendirilir[13].

Şekil 2.4'te çark kanadının giriş ve çıkışındaki hız vektörleri gösterilmiştir. v vektörü suyun akış hızını göstermektedir. v_r radyal hız bileşenini v_u ise çevresel hız bileşenini göstermektedir. u vektörü, kanadın çevresel hızını w vektörü ise akışın kanada göre gösterdiği bağıl hızını temsil etmektedir. ω dönüş hızını, r ise dönme eksenine olan uzaklığı gösterir.



Şekil 2.4. Çark kanadının girişinde ve çıkışında hızlar

Akışın zamana bağlı olarak değişmediği ve çarkın sabit bir hız ile döndüğü kabul edildiğinde, açısal momentumun korunumu gereği, çarka etki eden toplam moment, M , ile giren ve çıkan akışın toplam açısal momentumlarının farkı birbirine eşittir. Bu durum Denklem 2.12'de ifade edilmiştir[13].

$$M = \rho Q (v_{1u} r_1 - v_{2u} r_2) \quad (2.12)$$

v_u çevresel hız bileşenleri, v hız vektörü cinsinden yazılırsa, Denklem 2.13'teki eşitlik elde edilir[13].

$$M = \rho Q (v_1 r_1 \cos \alpha_1 - v_2 r_2 \cos \alpha_2) \quad (2.13)$$

Mekanik ark gücü, moment ve açısal hıza bağlı olarak aşağıdaki Denklem 2.14'te gösterildiği gibi yazılabilir[13].

$$P_m = M\omega = \rho g H Q \eta_h \quad (2.14)$$

ark giriş ve çıkışındaki kanadın çevresel hızı aşağıdaki Denklem 2.15 ve 2.16'da gösterildiği gibidir[13].

$$u_1 = \omega r_1 \quad (2.15)$$

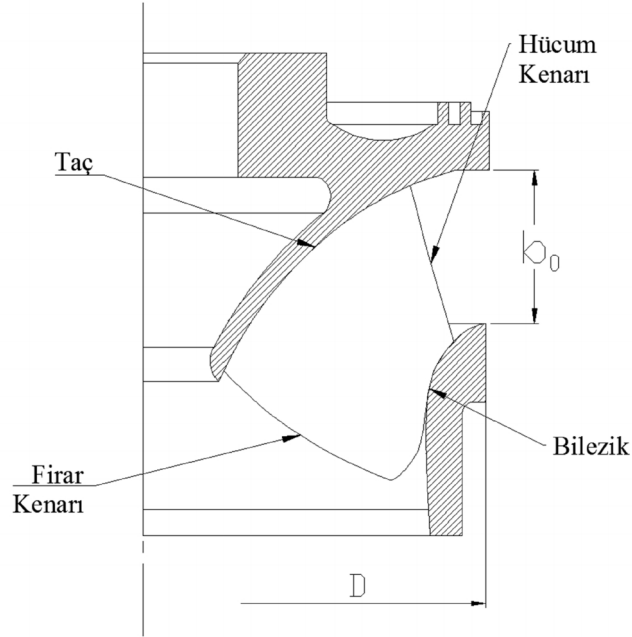
$$u_2 = \omega r_2 \quad (2.16)$$

Denklem 2.13'teki terimlerin yerine Denklem 2.14-2.16'daki karŐılıkları yazılırsa, aşağıdaki Denklem 2.17 elde edilir[13].

$$H\eta_h = \frac{u_1 v_1 \cos \alpha_1 - u_2 v_2 \cos \alpha_2}{g} \quad (2.17)$$

Ayrıca, Şekil 2.5'te gösterilmiŐ bir çark kesiti göz önüne alındığında, giriş noktası için Denklem 2.18 yazılabilir[13].

$$v_{1r} = \frac{Q}{\pi D b_0} \quad (2.18)$$



Şekil 2.5. Çark kesiti

2.1.4 Hidrolik Benzerlik

Farklı iki türbin arasında, hidrolik benzerliğin sağlanması, aşağıda belirtilen şartların yerine getirilmesiyle mümkün olur[10].

- İki türbin de geometrik olarak aynı şekli taşımalıdır. Bir türbin, diğerinin, düzgün bir oran kullanılarak küçültülmüş veya büyütülmüş hali olmalıdır. Bu duruma geometrik benzerlik adı verilir.
- Her iki türbin için de; akışı ve su ile türbin parçaları arasındaki etkileşimi tanımlayan oransal değerler eşit olmalıdır.

Bahsedilen oransal değerler; Reynolds, Euler, Thoma, Froude ve Weber sayılarıdır. İdeal durumda; bu boyutsuz sayıların, iki türbin için de aynı değeri taşıması gerekmektedir. Ancak, uygulamada, bu sayıların eşzamanlı olarak aynı olmasının sağlanması genelde mümkün olmamaktadır.

2.1.4.1 Türbin Çalışma Koşullarının Hidrolik Benzerliği

Geometrik benzerlik gösteren iki türbin içinde gerçekleşen akış için hız bileşenleri de aynı oranı gösteriyorsa, yani, hız üçgenleri de benzerse, bu iki türbinin hidrolik olarak benzer çalışma koşullarına sahip olduğu söylenebilir[13].

Geometrik olarak benzer iki türbin için aşağıdaki Denklem 2.19 yazılabilir.

$$\frac{D_{11}}{D_{12}} = \frac{D_{21}}{D_{22}} = \frac{b_{01}}{b_{02}} \quad (2.19)$$

Türbinlerin, hız üçgenleri benzerlik gösterdiğine göre, hız bileşenlerinin açıları her iki türbin için de aynıdır. Bu durum Denklem 2.20 ve 2.21 ifade edilmiştir.

$$\alpha_{11} = \alpha_{12} \quad (2.20)$$

$$\alpha_{21} = \alpha_{22} \quad (2.21)$$

İki türbin için de aynı noktalardan alınan hız bileşenleri, Denklem 2.22’de gösterildiği üzere, sabit bir oran ortaya koyar.

$$\frac{v_{i1}}{v_{i2}} = \frac{u_{i1}}{u_{i2}} = \frac{w_{i1}}{w_{i2}} \quad (2.22)$$

Açısal hız, dönüş hızı cinsinden yazıldığında ve Denklem 2.22’de gösterilen eşitlik göz önüne alındığında, aşağıdaki Denklem 2.23’te ifade edilen durumlar ortaya çıkar.

$$\frac{u_{11}}{u_{12}} = \frac{v_{11}}{v_{12}} = \frac{\pi D_1 n_1}{\pi D_2 n_2} = \frac{D_1 n_1}{D_2 n_2} = \frac{u_{21}}{u_{22}} = \frac{v_{21}}{v_{22}} \quad (2.23)$$

Denklem 2.17, H_1 düşüsü altında η_{h1} hidrolik verimi ile çalışan ve H_2 düşüsü altında η_{h2} hidrolik verimi ile çalışan iki türbin ele alındığı takdirde, Denklem 2.24 ve 2.25’te gösterildiği gibi yazılabilir.

$$gH_1 \eta_1 = (u_{11} v_{11} \cos \alpha_{11} - u_{21} v_{21} \cos \alpha_{21}) \quad (2.24)$$

$$gH_2\eta_2 = (u_{12}v_{12} \cos \alpha_{12} - u_{22}v_{22} \cos \alpha_{22}) \quad (2.25)$$

Denklem 2.24 ve 2.25'teki hız değerleri aşağıdaki Denklem 2.26-2.31'de gösterildiği gibi yazılabilir.

$$\cos \alpha_{11} = \cos \alpha_{12} \quad (2.26)$$

$$\cos \alpha_{21} = \cos \alpha_{22} \quad (2.27)$$

$$u_{12} = u_{11} \frac{D_2 n_2}{D_1 n_1} \quad (2.28)$$

$$u_{22} = u_{21} \frac{D_2 n_2}{D_1 n_1} \quad (2.29)$$

$$v_{12} = v_{11} \frac{D_2 n_2}{D_1 n_1} \quad (2.30)$$

$$v_{22} = v_{21} \frac{D_2 n_2}{D_1 n_1} \quad (2.31)$$

Elde edilen değerler, Denklem 2.25'te yerine konursa, aşağıdaki Denklem 2.32 ortaya çıkar.

$$gH_2\eta_2 = \left(\frac{D_2 n_2}{D_1 n_1} \right)^2 (u_{11}v_{11} \cos \alpha_{11} - u_{21}v_{21} \cos \alpha_{21}) \quad (2.32)$$

Denklem 2.32, Denklem 2.24'e bölüldüğünde, Denklem 2.33 elde edilir.

$$\frac{H_1 \eta_{h1}}{H_2 \eta_{h2}} = \left(\frac{D_1 n_1}{D_2 n_2} \right)^2 \quad (2.33)$$

Hidrolik olarak benzer çalışma koşullarına sahip iki türbinin hidrolik verimleri eşit kabul edilebilir. Bu duruma binaen Denklem 2.33 aşağıdaki gibi yazılır[13].

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{D_1 n_1}{D_2 n_2} \right)^2 \quad (2.34)$$

Denklem 2.18 ve Denklem 2.22 kullanılarak Denklem 2.35 yazılır.

$$\frac{v_{1r1}}{v_{1r2}} = \frac{Q_1 / \pi D_1 b_{01}}{Q_2 / \pi D_2 b_{02}} = \frac{Q_1 D_2 b_{02}}{Q_2 D_1 b_{01}} \quad (2.35)$$

Denklem 2.35'teki; b_0 değerleri yerine 2.19'daki b_0 değerleri, v_{1r} değerleri yerine 2.23'teki v_{1r} değerleri yazılırsa Denklem 2.36 ortaya çıkar.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1 D_1^3}{n_2 D_2^3} \quad (2.36)$$

Denklem 2.32 ve 2.34 birlikte kullanılırsa aşağıdaki Denklem 2.37 ve 2.38'e ulaşılır.

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{D_2}{D_1} \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \quad (2.37)$$

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2} \right)^2 \sqrt{\frac{H_1}{H_2}} \quad (2.38)$$

Denklem 2.37 ve 2.38'i sağlayacak şekilde çalışmakta olan iki türbinin, hidrolik olarak benzer çalışma koşullarına sahip olduğu kabul edilir[13].

Denklem 2.37 ve 2.38 kullanılarak, 1 m çapında ve 1 m düşü altında çalışan bir türbine hidrolik olarak benzer koşulda çalışacak türbinlerin göstermesi gereken özellikler aşağıdaki Denklem 2.39 ve 2.40'ta belirlenmiştir.

$$n'_1 = \frac{nD}{\sqrt{H}} \quad (2.39)$$

$$Q'_1 = \frac{Q}{D^2 \sqrt{H}} \quad (2.40)$$

Denklem 2.39 ve 2.40'ta verilen değerler boyutsuz hale getirilirse, aşağıda Denklem 2.41'de gösterilen hız faktörü ve Denklem 2.42'de gösterilen debi faktörü değerleri elde edilir[13].

$$n_{ED} = \frac{nD}{\sqrt{gH}} \quad (2.41)$$

$$Q_{ED} = \frac{Q}{D^2 \sqrt{gH}} \quad (2.42)$$

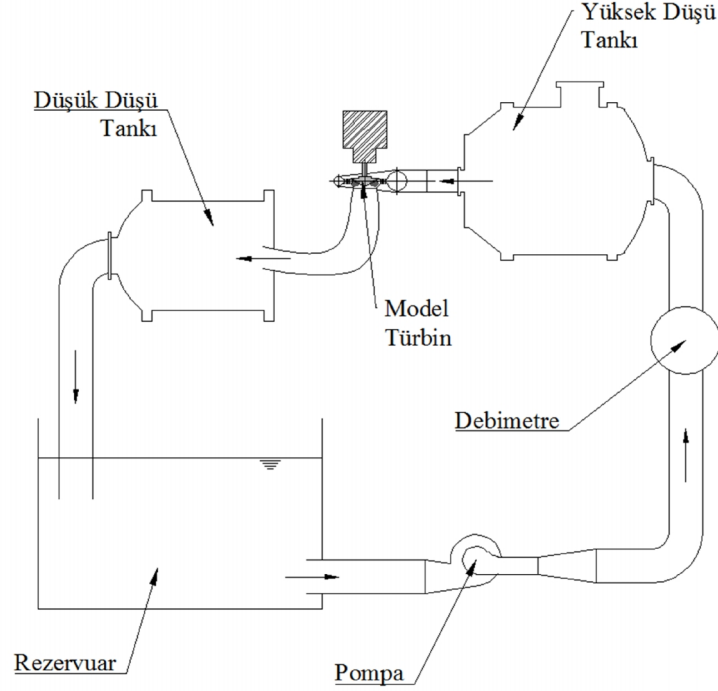
Sonuç olarak, aynı hız ve debi faktörüne sahip iki türbinin hidrolik olarak benzer çalışma koşullarına sahip olduğu söylenebilir.

2.2 Türbin Testi

Bir türbinin, geometrik olarak ölçeklenmiş bir modelinin, türbinin performansını ölçmek amacıyla test edilmesine türbin testi adı verilir. Asıl olarak, üretilcek bir türbinin üretici firma ve üretim talebinde olan taraf arasında önceden anlaşılmış performans değerlerinin ölçülüp doğruluğunun kontrol edilmesi maksadıyla yapılır. Testler, bu iş için özel olarak tasarlanmış test düzeneklerinde gerçekleştirilir. Testlerin sonucunda model türbinden elde edilen veri kullanılarak esas türbinin belirlenen çalışma aralığında göstereceği performans ortaya konulur[10]. Sonuçların doğru olması için testlerde kullanılan model türbinin esas türbinle hidrolik benzerlik göstermesi gerekir. Temel olarak türbin testi performans ve kavitasyon testleri olmak üzere iki kısım altında incelenebilir.

Performans testinde, türbinin, kavitasyon gözlenmeyen koşullarda çalışması sağlanarak, debi, düşü, g ve devir gibi performansını belirleyecek verileri ölçülür. Daha sonra bu ölçülen değerlerden test edilen modelin çalışma aralığında gösterdiği verimlilik hesaplanır[13]. Buradan yola çıkarak esas türbinin performans verilerine ulaşılır. Bunun sonucunda, türbinde tasarım kaynaklı bir problem varsa ortaya konur ve gerekli tasarım iyileştirmeleri yapılır. Ayrıca, esas türbinin, bulunduğu çalışma koşulları altında, maksimum verimde işleyebilecek şekilde faaliyet göstermesi

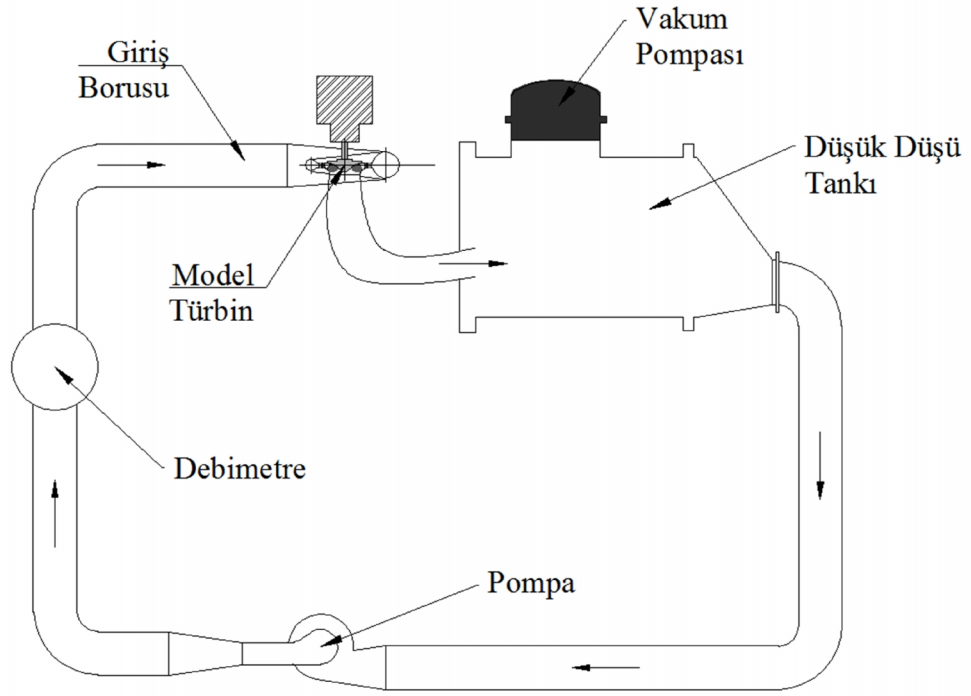
sağlanır. Performans testi, Şekil 2.6’da gösterilen düzenek benzeri bir düzenek kullanılarak yapılır.



Şekil 2.6. Performans test düzeneği

Performans testi esnasında; rezervuardan alınan su pompalar aracılığıyla basınçlandırılarak yüksek düşü tankına iletilir. Buradan model türbine geçen su, enerjisini bırakarak düşük düşü tankına ulaşır. Su, düşük düşü tankından tekrar rezervuara geçer. Bu esnada düzenek üzerinde yer alan ölçüm cihazları kullanılarak performansı belirleyen bahsedilen değerler ölçülür[13].

Kavitasyon testinde ise, cebren bir kavitasyon oluşturularak, model türbinde kavitasyonun oluşum biçimi ve performans üzerindeki etkileri incelenir ve kayıt altına alınır. Daha sonra, bunun esas türbindeki karşılığı belirlenir. Bu sayede, kavitasyonun olduğu çalışma sınırları tespit edilerek, esas türbin için güvenliği bir çalışma aralığı ortaya konur. Bu testte, performans testinde ölçülen değerlere ek olarak türbinin çıkış mutlak basıncı da ölçülür[13]. Test, Şekil 2.7’de gösterilen düzenek gibi bir düzende yapılabilir.



Şekil 2.7. Kaviteasyon test düzeneği

Kaviteasyon testi esnasında, su giriş borusundan, model türbine; oradan düşük düşü tankına, oradan ise pompaya gönderilir. Pompa ise suyu tekrar giriş borusuna iletmektedir, böylece kapalı devre tamamlanır. Bir vakum pompası kullanılarak, türbin çıkışındaki basınç düşürülür ve böylece bir kaviteasyon meydana getirilir. Bu esnada düzenek üzerinde yer alan ölçüm cihazları kullanılarak performansı belirleyen bahsedilen değerler ölçülür[13].

2.2.1 Garanti Edilen Özellikler

Model türbin testi kapsamında, türbinin hidrolik performansını gösteren, temel bazı özelliklerinin belirlenmesi garanti edilir[10]. Bu özellikler, güç, debi ve özgül enerji, verimlilik, ambalman hız ve hidrolik performansta kaviteasyon etkisidir. Verilen garanti, esas türbinin belirtilen özelliklerinin model türbinden elde edilen ölçümler aracılığıyla hesaplanmış değerlerini kapsar. Bu esnada, Francis tipi türbinler için, esas türbin ve model türbin arasındaki Reynolds sayıları farklılığı ölçüsünde bir

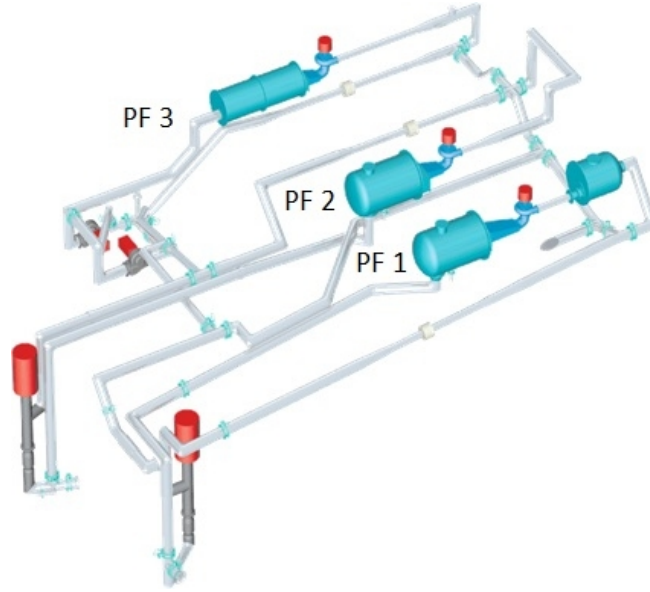
düzeltilme uygulanması gerekebilir. Garanti edilen özellikler, belirlenen çalışma aralığı dâhilinde seçilen çalışma noktalarının tümü için hesaplanır.

- *Güç:* Türbin çarkının mekanik gücüne karşılık gelen güç değeridir. Esas türbin için mekanik güç belirlenirken mekanik güç kayıpları göz önünde bulundurulur.
- *Debi ve özgül enerji:* Türbin belirlenen bir debi değerinde çalışırken ölçülen özgül enerji veya belirli bir özgül enerji değeri altında çalışırken ölçülen debidir.
- *Verimlilik:* Türbinin, mekanik gücünün hidrolik gücüne oranıdır.
- *Ambalman hızı:* Jeneratörün türbinden çektiği enerji 0'ken, türbin çarkının ulaşabileceği maksimum dönüş hızıdır.
- *Hidrolik performansa kaviteasyon etkisi:* Türbin üzerinde bir kaviteasyon oluşturularak, bu durumun, verimlilik, debi ve güç gibi performansı belirleyen parametreler üzerindeki etkisidir. Bu bağlamda, test edilen çalışma aralığı boyunca, kaviteasyonun performansı etkilemeye başladığı, kritik Thoma sayısı değeri belirlenir.

2.2.2 Test Merkezi Örnekleri

2.2.2.1 EPFL Hidrolik Makine Laboratuvarı [21]

İsviçre'nin Lozan şehrinde bulunan EPFL bünyesinde faaliyet göstermektedir. Laboratuvarda IEC 60193 standardına uygun olarak işleyen 3 adet test düzeneği bulunmaktadır. Düzenekler Şekil 2.8'de gösterildiği gibidir.



Şekil 2.8. EPFL Hidrolik Makine Laboratuvarı[21]

Düzenekler birbirinden bağımsız bir şekilde aynı anda çalışabilmekte ve test yapabilmektedir. Düzeneklerin test kapasiteleri Çizelge 2.2’de belirtildiği gibidir.

Çizelge 2.2. EPFL Hidrolik Makine Laboratuvarı Test Kapasitesi[21]

	PF 1	PF 2	PF 3
Debi (m³/s)	1,4	1,4	1,4
Düşü (m)	100	120	100
Türbin Gücü (kW)	300	300	300
Pompa Gücü (kW)	900	1000	2 x 400
Dönüş Hız (rpm)	1500	2500	2500

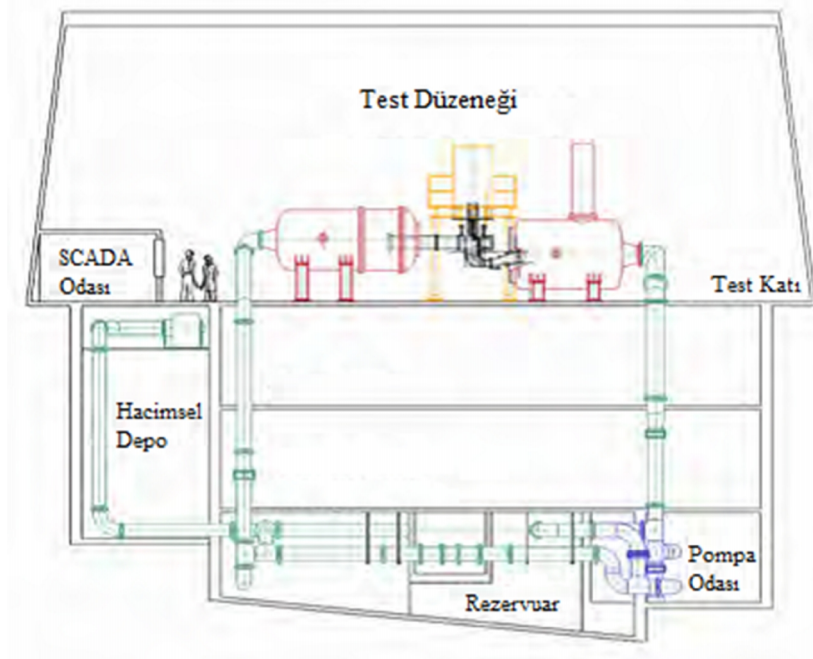
2.2.2.2 Voith S. Morgan Smith Memorial Su Türbini Laboratuvarı [22]

1973 yılında, ABD’nin York şehrinde, VOITH firması tarafından kurulmuştur. İki adet 370’er kW gücünde pompa vasıtasıyla çalışmaktadır. Yapılacak model testinin

gerektirdiđi debi ve dūřu deđerlerine gōre, pompalar, paralel veya seri bađlanabilmektedir. Bu bađlamda, test merkezinin deney kapasitesi ařađıda gōsterildiđi gibidir.

- 131 m dūřu ($0,28 \text{ m}^3/\text{s}$ debi geçebilir)
- $1,6 \text{ m}^3/\text{s}$ debi (49 m dūřu elde edilebilir)
- 450 kW gū
- 2000 rpm devir

Test merkezi 4 kattan oluřmaktadır. En alt katta 570 m^3 kapasiteli bir rezervuar ve servis pompaları yer alır. řekil 2.9'da test dūzeneđinin yerleřimi gōsterilmiřtir.

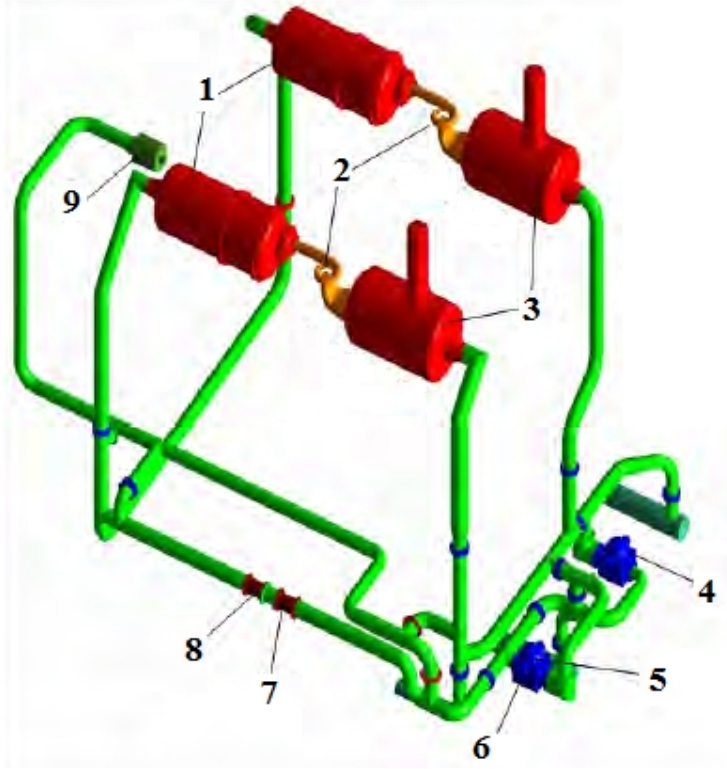


řekil 2.9. Voith Morgan Smith Tūrbın Laboratuvarı[22]

şekil 2.9.'da gōzūken hacimsel depo, debimetre kalibrasyonu için kullanılmaktadır. Hacimsel deponun ūst kısmına yerleştirilen bir akış ayırıcı mekanizma vasıtasıyla, kalibrasyon işlemi esnasında, su hacimsel depoya aktarılmaktadır.

Test düzeneği; hem açık hem de kapalı çevrim yapabilecek şekilde çalışabilme yeteneğine sahiptir. Bu bağlamda, talep edilen performans ve kavitasyon testlerini yapabilmektedir. Kavitasyon testlerinin yapılabilmesi için, düşük düşü tankı üzerine bir adet vakum pompası yerleştirilmiştir. Bu pompa aracılığıyla model türbin çıkış basıncı 14 kPA'ya kadar düşürülebilmektedir.

Morgan Smith Laboratuvarında, aynı pompalar tarafından çalıştırılan iki adet test düzeneği vardır. Şekil 2.10'da test düzenekleri gösterilmiştir. Test düzeneklerinin elemanları; yüksek düşü tankı(1), model türbin(2), düşük düşü tankı(3), pompalar(4,5), basınç kontrol vanası(6), debimetreler(7,8) ve ayırıcıdan(9) ibarettir.



Şekil 2.10. Voith Morgan Smith Laboratuvarı test düzeneği[22]

3. DENEY DÜZENEĞİ TASARIMI

3.1 Test Merkezi

Tasarlanan deney düzeneği, TOBB ETÜ Söğütözü kampüsünde yer alan TOBB ETÜ Su Türbini Tasarım ve Test Merkezi bünyesinde bulunan Su Türbinleri Test Laboratuvarı içerisine kurulmaktadır. Merkez; türbin ve model tasarlamak, üretmek ve test etmek görevleriyle oluşturulmuş üç birimden oluşmaktadır.

Tasarım biriminde; Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) yöntemleri kullanılarak türbin tasarımı yapılmaktadır. Ayrıca, tasarlanan türbinlerin yapısal analizleri gerçekleştirilmekte ve üretime hazır hale getirilebilmeleri için teknik çizimleri oluşturulmaktadır. Bunun yanı sıra parametrik tasarım ve optimizasyon çalışmaları da yapılmaktadır. Ek olarak tasarım birimi, deney düzeneğinde test edilecek model türbinlerin tasarımını da gerçekleştirmektedir. Yapılan bilgisayarlı analizler, tasarım laboratuvarı bünyesinde bulunan 108 çekirdekli küme bilgisayar yardımıyla gerçekleşmektedir.

Analizler, ANSYS CFX[23] programı vasıtasıyla yapılmaktadır. Tasarlanan türbin elemanlarının üretilebilmesi için oluşturulan üç boyutlu modeller CATIA V6[24] programında oluşturulmuştur.

Üretim birimi; hazır haldeki üç boyutlu modelleri bünyesindeki tezgâhları kullanarak üretmekle görevlidir. Bu birimde bir adet DMU 65 monoBLOCK 5 eksenli freze[25] ve bir adet NTX 2000 torna[26] olmak üzere iki adet bilgisayar kontrollü tezgâh (CNC) bulunmaktadır. Ayrıca, bu birimde CATIA V6[24] programı vasıtasıyla, üretilecek üç boyutlu modeller, bilgisayar destekli üretim (CAM) yöntemine hazır hale getirilmektedir. Bunu dışında, bu birime yerleştirilecek bir adet Hexagon DEA GLOBAL[27] koordinat ölçüm cihazı (CMM) aracılığıyla, üretilen parçaların, boyut, yüzey pürüzlülüğü ve tolerans gibi değerleri ölçülecek ve parçaların testlerde kullanıma uygun olup olmadığının kontrolü yapılacaktır.

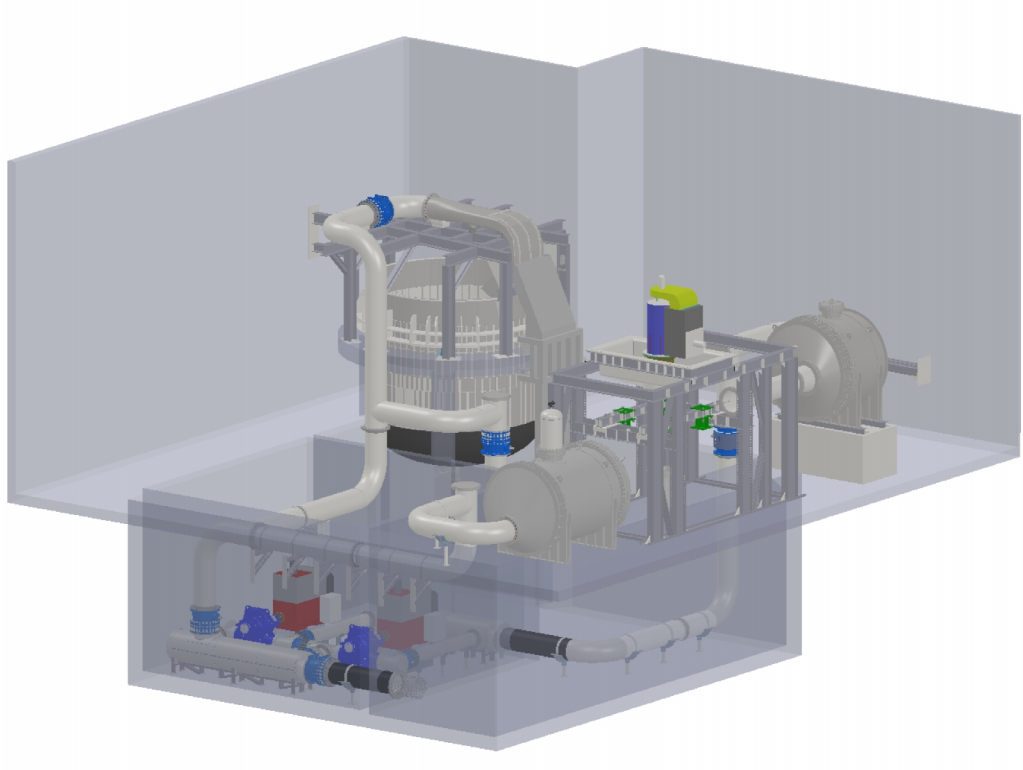


Şekil 3.1. Tezgâhlar

Su Türbinleri Test Laboratuvarı ise kurulan test merkezinin asıl amacını yerine getirecektir. Laboratuvar, iki kattan ibaret olup alt katta rezervuar ve pompa odası üst katta ise deney düzeneğinin mekanik ve elektronik ekipmanlarına uygun bir biçimde planlanmış yerleşim alanı yer almaktadır.

Alt katta bulunan rezervuar, 178 m^2 taban alanına sahip olup 600 m^3 su depolama kapasitesindedir. Rezervuar duvarlarının iç yüzleri, rezervuara konulacak suyun dışarı sızmasını önleyecek ve dışarıdan suya kirletici bir madde karışmasına engel olacak şekilde kaplanmıştır. Pompa odası ise 100 m^2 'lik bir alana sahiptir.

Üst kat ise 600 m^2 alana sahip olup tavan yüksekliği 19 metredir. Ayrıca, laboratuvarda 20 ton kapasiteli gezer köprülü bir vinç bulunmaktadır. Laboratuvar, test ekipmanlarının ve kullanılacak suyun ağırlığına göre tasarlanmıştır. Test düzeneğinin çalışması esnasında oluşabilecek titreşimler göz önünde bulundurularak binanın kalanından ayrı bir temel üzerine oturtulmuştur.

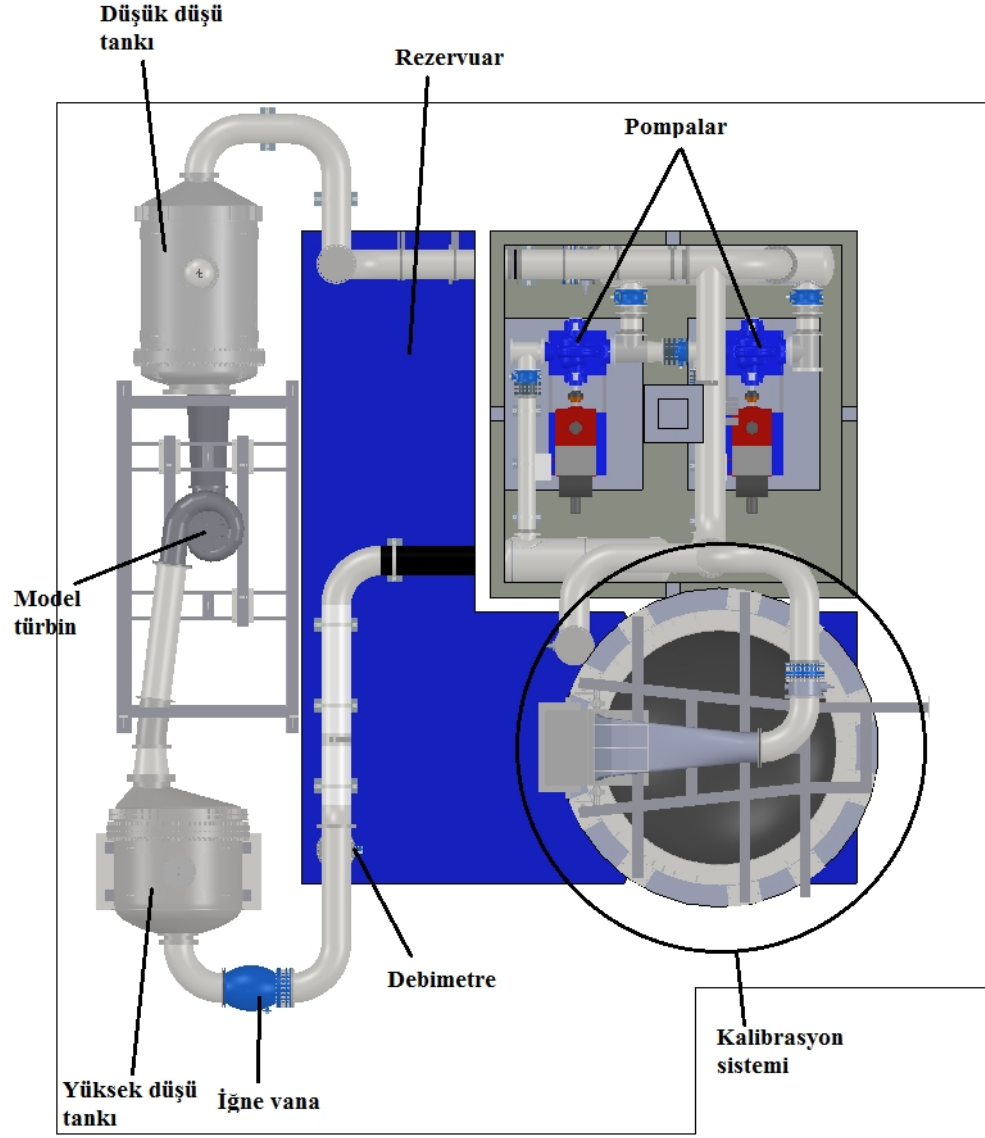


Şekil 3.2. Su türbinleri test laboratuvarı yerleşimi

Test merkezinin üst katlarında ise, tasarım ofisleriyle beraber deney düzeneğini kontrol edecek olan elektronik ekipmanın yerleştirileceği bir adet SCADA odası bulunmaktadır. Düzeneğin yerleşimi Şekil 3.2’de gösterildiği gibidir.

3.2 Test Düzeneği

Test düzeneği Francis tipi bir türbinin çalışmasını modelleyecek şekilde tasarlanmıştır. Bu bağlamda, iki adet tank arasına yerleştirilen bir model türbinden ve sistemin çalışması ile gereken verinin ölçümlerinin yapılmasını sağlayan yardımcı elemanlardan ibarettir. Suyun akış yönüne göre model türbinden önce gelen tank, türbine giren yüksek basınçlı suyu barındıran yüksek düşü tankıdır. Modelden sonra gelen tank ise düşük düşü tankıdır. Düzenek, Şekil 3.3’te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.3. Su türbinleri test düzeneği

IEC 60193 standardı uyarınca, düzenek ve test edilen model Çizelge 1.1’de belirtilmiş olan minimum test değerlerini sağlamak zorundadır. Test esnasında yapılan ölçümler bu değerlerin sağlandığı çalışma koşullarında yapılmalıdır. Ayrıca, yine aynı standardın belirttiği üzere model türbin boyutu mümkün olduğu kadar büyük olmalıdır.

IEC 60193 standardına göre, deney düzeneği, modelde oluşacak kavitasyondan etkilenmeyecek şekilde tasarlanmalıdır. Kavitasyon, düzeneğin kararlılığını ve performans ölçüm cihazlarını etkilememelidir[10]. Kavitasyon sonucu oluşan hava kabarcıkları, debi ve basınç ölçüm cihazları başta olmak üzere düzenek üzerindeki cihazların çalışmasını etkilememelidir.

Deneyde kullanılan su temiz ve berrak olmalıdır. İçinde katı parçacıklar bulunmamalı, viskozite ve buhar basıncı değerlerini etkileyebilecek ölçüde kimyasal safsızlık taşımamalıdır. Test öncesinde, su içindeki gaz ve hava kabarcıkları mümkün olduğunca ortadan kaldırılmalıdır. Deney esnasında su sıcaklığı 35° C'yi aşmamalıdır. Ortam sıcaklığı ile su sıcaklığı arasında ölçüm cihazlarının performansını etkileyecek farklılıklar bulunmamalıdır. Düzeneğin herhangi bir noktasında sıvı kaçağı olmamalıdır.

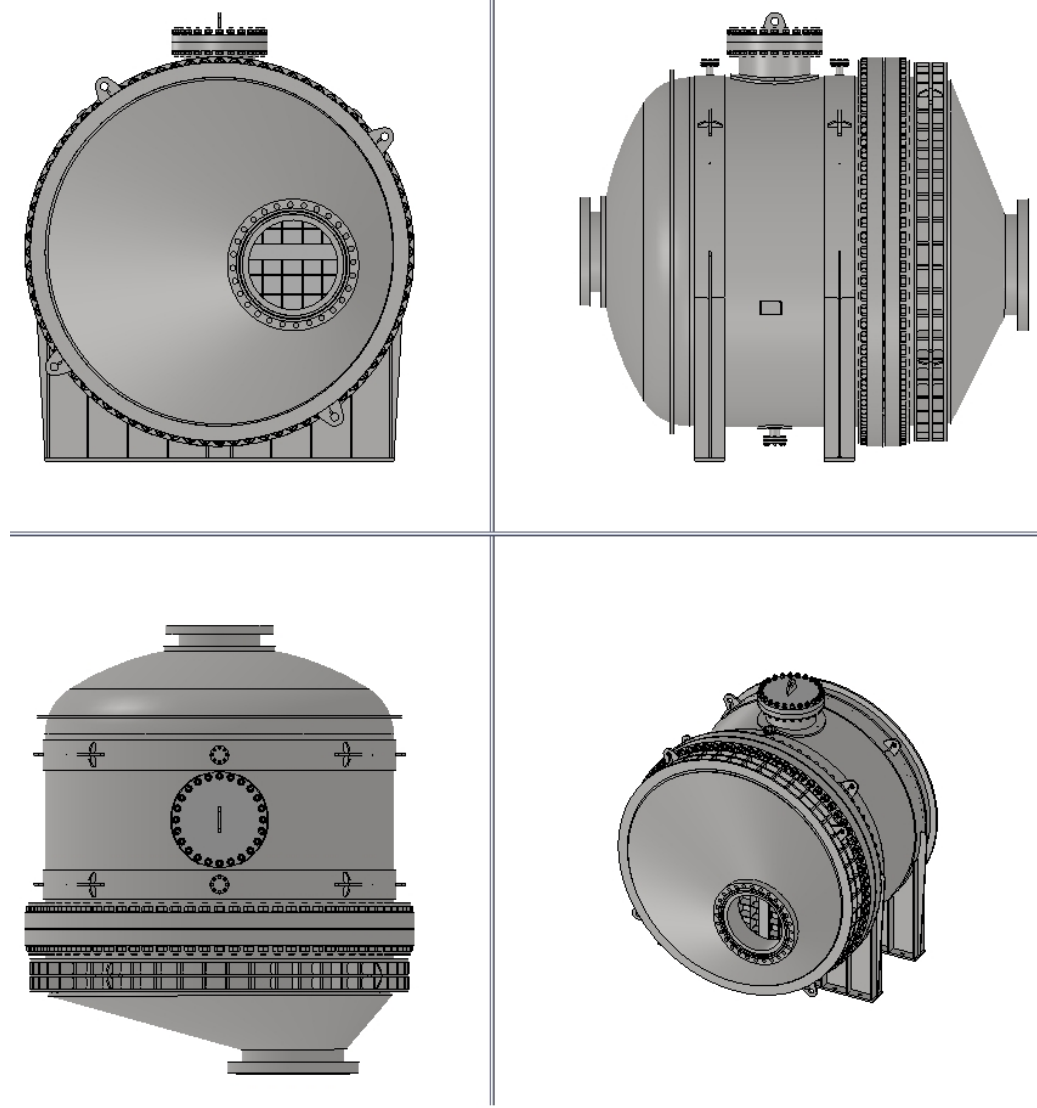
IEC 60193 standardı[10], debi ve tork ölçüm sistemleri başta olmak üzere, bütün ölçüm cihazlarının sistem üzerinde kalibre edilmesini tavsiye eder. Kalibrasyon metotları, yalnızca, ağırlık, uzunluk ve zaman temel özelliklerine dayanarak işlev görmelidir. Ölçüm cihazları, veri toplama sisteminden bağımsız olarak, üzerinden doğrudan veri okunabilecek şekilde olmalı ve kolay ulaşılabilecek biçimde konumlandırılmalıdır.

Düzenek, üzerinden bulunan kelebek vanaların ayarlanması suretiyle üç farklı konfigürasyonda çalıştırılabilmektedir. Bunlar; performans testlerinin uygulandığı açık çevrim, kavitasyon testlerinin gerçekleştirildiği kapalı çevrim ve akış ölçüm sisteminin kalibre edilmesi esnasında kullanılan kalibrasyon çevrimidir.

3.2.1 Yüksek Düşü Tankı

Test düzeneğinde, suyun akış yönüne göre, model türbinin hemen önündeki basınçlı tanktır. 31,5 m³ hacmine sahiptir. ST52 çelik malzemeden üretilmektedir. Su değen yüzeylerde paslanma oluşmaması için pas önleyici boya ile boyanacaktır. Tank, PN25 basınç sınıfına uygunluk gösterecek şekilde tasarlanmış olup buna uygun

olarak üretilecek ve 37,5 bar basınca tabi tutularak test edilecektir. Tankın boyu 4500 mm, çapı ise 3500 mm ölçülerindedir. Yüksek düşü tankı Şekil 3.4’te gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yüksek düşü tankı

Tankın çıkış tarafında 3500 mm çapında dairesel bir kapak bulunmaktadır. Bu kapağın içine 900 mm çapında daha küçük bir kapak yerleştirilmiştir. Küçük dairesel kapağın merkez noktası, tank eksenine göre 750 mm eksantriklik göstermektedir. Yüksek düşü tankının çıkış kısmı, test edilecek model türbinin boyutlarına göre, bu eksenden kaçıklık kullanılarak ayarlanabilecektir.

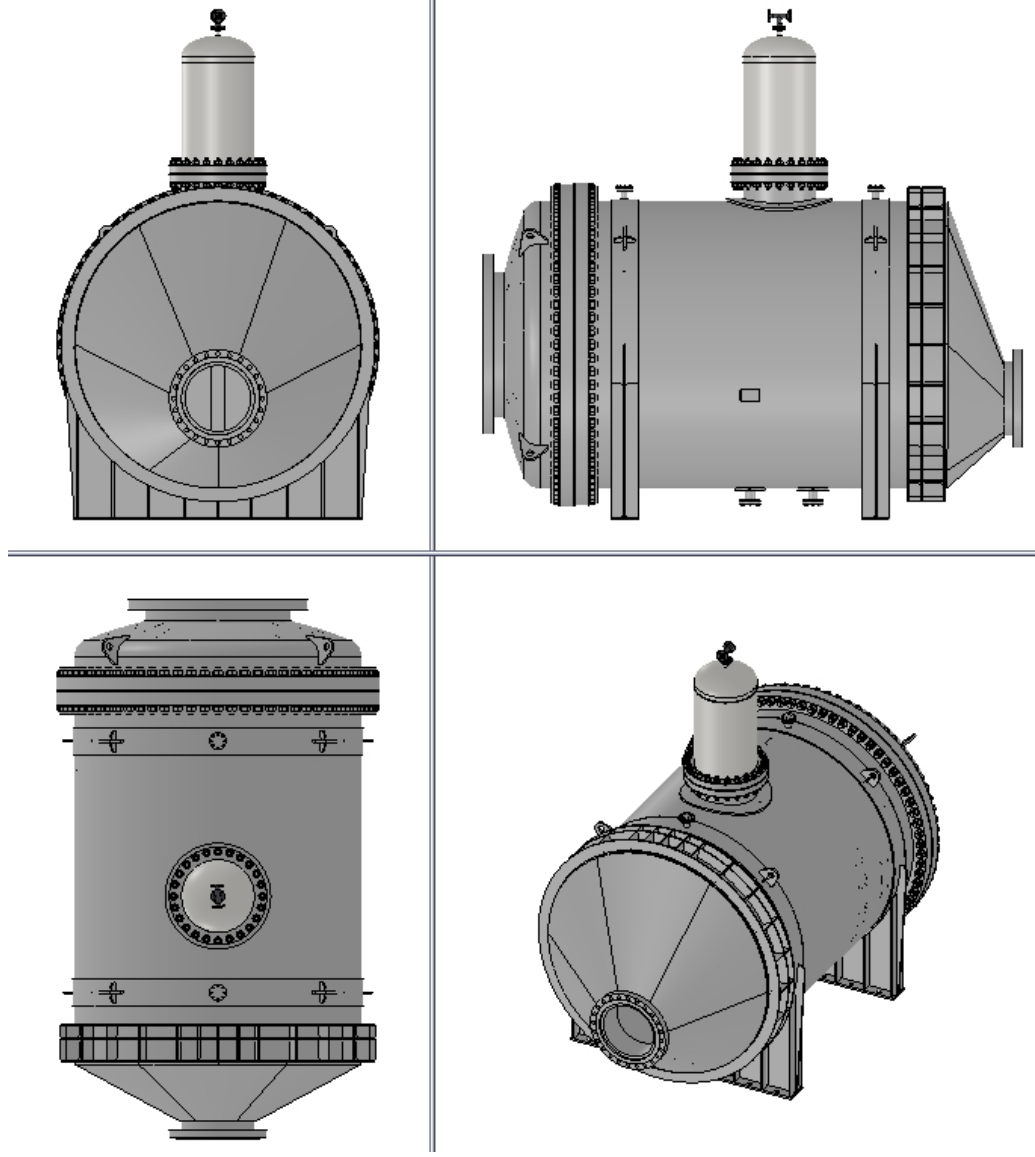
Tank iki adet metal ayak üzerine yerleştirilerek zemine sabitlenmiştir. Tankın içine bir adet ızgara yerleştirilmiştir. Izgaranın delikleri kare şeklinde olup kenar uzunluğu 200 mm'dir. Ayrıca, tankın üst tarafında insan girişi amacıyla yerleştirilmiş bir adet delik bulunmaktadır. Bu delik, temizlik ve kontrol gibi bakım faaliyetleri esnasında kullanılacaktır.

IEC 60193 standardına göre, model testi esnasında, model türbin girişinde, hidrolik olarak uygun koşullar sağlanmalıdır[10]. Bu bağlamda, yine aynı standart uyarınca, akış; düzensiz olmamalı, aşırı miktarda türbülans barındırmamalı ve burgaçlardan arındırılmış olmalıdır.

Yüksek düşü tankının sistemde kullanılma sebebi bahsedilen uygun hidrolik koşulları sağlama zorunluluğudur. Tank, yüksek hacmi ile pompa veya diğer sistem elemanlarında kaynaklanabilecek akış düzensizliğini sönmüleyerek, tank çıkışında, sabit bir hıza ve hız profiline sahip bir akış oluşturacaktır. Ayrıca, geniş çapıyla, akış hızını yavaşlatarak, aşırı türbülanslı akış durumunun önüne geçecektir. Düzeneğin maksimum çalışma debisi olan $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ değerinde, tank içinde oluşan akışın hızı $0,25 \text{ m/s}$ değerinde olmaktadır. Ancak, bu akışın Reynolds sayısı 900000 olarak hesaplanır. Dolayısıyla, akışı burgaçlardan ve baloncuklardan arındırılabilmesi için tankın içine ızgaralar yerleştirilmiştir.

3.2.2 Düşük Düşü Tankı

Model türbinin çıkış tarafına yerleştirilmiş olan basınçlı tanktır. $39,2 \text{ m}^3$ hacminindedir. ST52 çelik kullanılarak imal edilecek ve paslanmayı engelleyecek şekilde boyanacaktır. Bahsedilen tank, PN25 basınç sınıfına göre tasarlanmış olup buna göre üretilecek ve belirtilen basınç koşulları altında test edilecektir. Tankın boyu 6000 mm, çapı ise 3250 mm ölçülerindedir. Düşük düşü tankı Şekil 3.5'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.5. Düşük düşü tankı

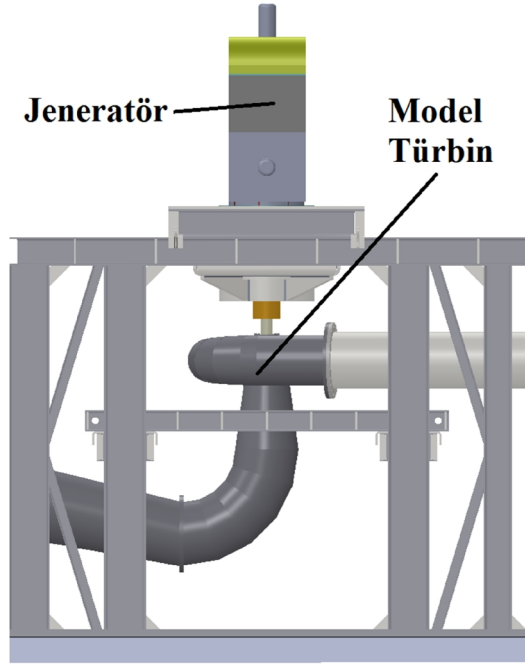
IEC 60193 standardı[10] uyarınca, test düzeneği, model türbin çıkışında akışı etkileyebilecek bir yapı barındırmamalıdır. Bu bağlamda, emme borusu çıkışı, düşük düşü tankına düz bir şekilde bağlanmalı ve akışın önünde herhangi bir aksam olmamalıdır. Bu durumu sağlayabilmek adına, tankın giriş kapağı 1700 mm çapında olup bombesiz bir biçimde tasarlanmıştır. Bu düz kapak, tank çapında bombeli bir kapağın üstüne yerleştirilmiştir. Bu sayede emme borusu çıkışında akışın yönünü değiştirebilecek bir sınırlama olması engellenmiştir. Ayrıca, farklı boyutlara sahip

model türbinlerin emme borusu çıkışına uyumluluk taşıması açısından da bu şekilde bir tasarım yapılmıştır.

Tankın üzerinde bir adet kapak vardır. Bu kapağın üstüne bir vakum pompası yerleştirilmiştir. Pompa tank basıncını gerekli durumda düşürebilmek amaçlı kullanılacaktır. Zira, IEC 60193 standardına[10] göre, reaksiyon türbinlerinde kavitasyon testi; model türbinin, seçilen bir çalışma noktasında farklı Thoma sayısı değerleri altında çalıştırılması ve oluşan kavitasyonların incelenmesi suretiyle yapılmaktadır. Farklı Thoma sayılarını erişebilmek içinse, türbin çıkışındaki mutlak basınç değerinin değiştirilmesi gerekir.

3.2.3 Model Türbin ve Jeneratör

Deney düzeneğine, test edilecek model türbinin sabitleneceği bir mesnet yerleştirilmiştir. Bu mesnet, model türbin ve türbinin bağlandığı jeneratörü taşıma görevini üstlenir. Model türbin ve jeneratörün mesnete yerleştirilişi Şekil 3.6'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.6. Model türbin ve jeneratör

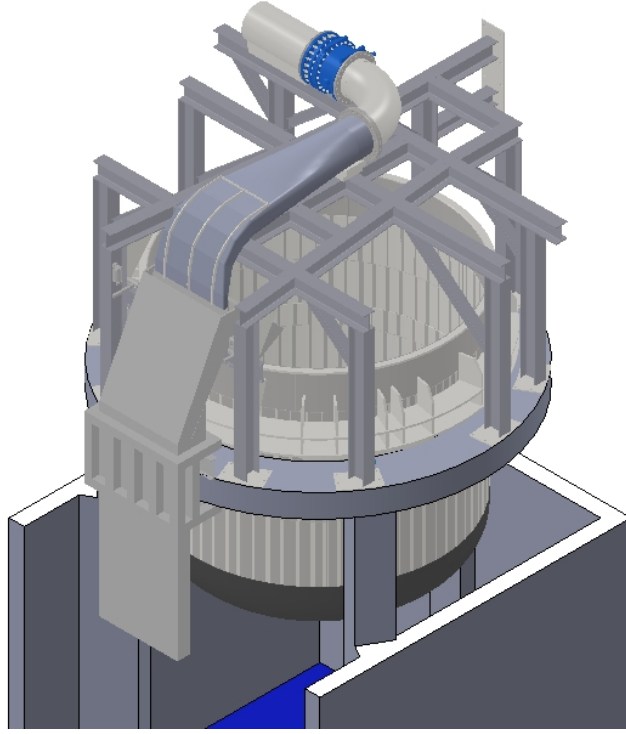
Mesnet, farklı boyutlarda model türbinlerin sisteme bağlanarak test edilebilmesine olanak sağlayacak şekildedir. Bu bağlamda, model türbin, mesnet üzerinde sağa sola ve yukarı aşağı hareket ettirilerek sabitlenebilir. Jeneratör ise mesnetin üst kısmına yerleştirilmiş olup türbinin konumuna uyum gösterecek şekilde hareket ettirilebilir.

IEC 60193 standardı[10] uyarınca, türbinin ürettiği tork, değişken devirde dönebilen bir jeneratör tarafından çekilebilir. Bu sayede, test esnasında pompalar tarafından harcanan enerji sisteme geri kazandırılır. Düzenekte, ABB AMI 500L4A jeneratör[28] kullanılmıştır. Jeneratör 2000 kW gücündedir. Maksimum dönüş hızı 2400 rpm, verimliliği ise %96,9'dur.

3.2.4 Debimetre Kalibrasyon Sistemi

Debi ölçümü, düzenekte yapılan testlerin tamamının bir parçasıdır. Test sonuçlarının doğruluğunun yüksek olması için, test esnasında sistemden geçen debinin titizlikle ölçülmesi gerekmektedir. Ölçüm sonuçlarının kesinliğinden emin olmak için ise debiyi ölçen cihazlar kalibre edilmelidir.

IEC 60193'e göre ölçüm cihazları, yalnızca, ağırlık, uzunluk ve zaman temel özelliklerine dayanan yöntemlerle kalibre edilebilir. Bu bağlamda, test düzeneği üzerine, ağırlık ölçüm yöntemine dayanarak debi ölçümü yapan bir sistem yerleştirilmiştir. Bu sistem, test düzeneğinde bulunan debimetreyi kalibre etmek amacıyla kullanıldığı için debimetre kalibrasyon sistemi olarak adlandırılır. Kalibrasyon sistemi Şekil 3.7'de gösterildiği gibidir.



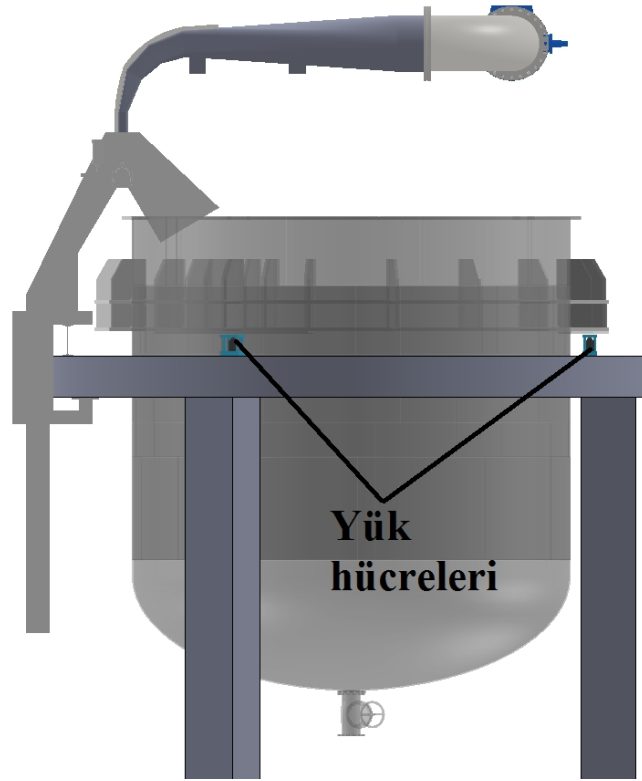
Şekil 3.7. Kalibrasyon Sistemi

Ağırlık ölçüm yöntemi kullanılarak yapılan debi ölçüm işlemi ISO 4185 standardında[29] açıklandığı gibi gerçekleştirilmelidir. Standart uyarınca, sistemde bir ağırlık tankı, bir rezervuar ve bir ayırıcı bulunmalıdır. Rezervuardan alınan su, belirlenen zaman aralığı boyunca ağırlık tankına, kalan zamanlarda rezervuara akıtılır. Suyun, tanka ya da rezervuara akmasını sağlayan eleman ise ayırıcı mekanizmadır. Bu sebepten ötürü, test düzeneği kapsamında tasarlanan sistem, kalibrasyon tankı, lüle ve ayırıcı olmak üzere üç parçadan oluşmaktadır.

ISO 4185 standardına[29] göre, kalibrasyon işlemi esnasında, ağırlık tankı en az 30 s boyunca, kalibre edilecek cihazın ölçüleceği maksimum debi değerinde gerçekleştirilen bir akışla doldurulmalıdır. Boşaltım işlemi ise, tankın alt kısmına yerleştirilen bir vana yardımıyla yapılabilir. Ayrıca, ağırlık ölçümünün doğru yapılabilmesi adına, tank sadece ölçüm cihazlarından destek olarak durmalıdır. Ağırlık ölçümü ise yük hücresi kullanılarak yapılabilir.

Bahsedilen sebeplerden dolayı, kalibrasyon tankı, 200 m³ hacimde olacak şekilde üretilmiştir. Üretim, AISI 304 paslanmaz çelik malzeme kullanılarak yapılmıştır. Tank, beton bir iskelet üzerine oturtularak, alt kısmı ana rezervuarın üzerine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Bu alt kısım bombelidir. Bombenin dip tarafına yerleştirilen bir vana sayesinde ölçüm işlemi bittikten sonra tankın içerisinde bulunan su ana rezervuara aktarılacaktır.

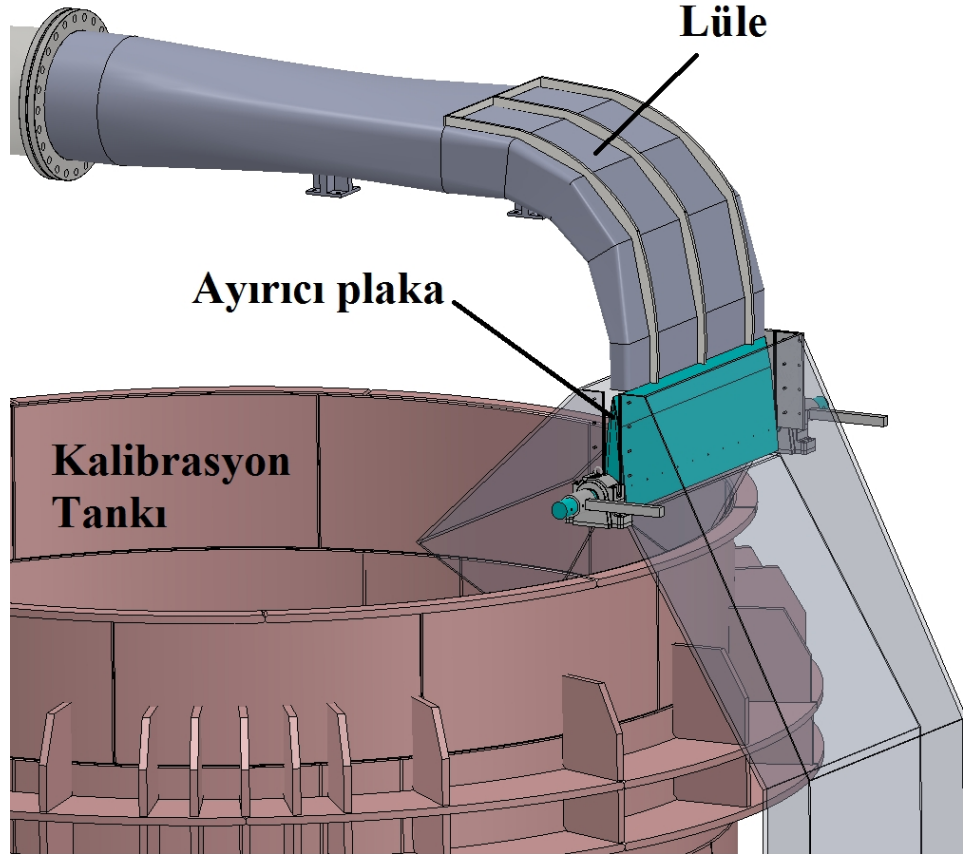
Kalibrasyon tankı, üç beton kolon üzerine yerleştirilmiş beton bir iskelet üzerinde konumlandırılmıştır. Tankın üst kısmına, mekanik dayanıma yardımcı olmak ve ölçüm işlemini mümkün kılmak adına bir çember yerleştirilmiştir. Bu çember vasıtasıyla, tank, bahsedilen beton iskeletin üzerine bindirilmiştir. Beton iskelet ile tank arasında Sartorius PR6201 yük hücreleri[30] yerleştirilmiştir. Tank, Şekil 3.8'de gösterildiği üzere, bu beton iskelete, sadece yük hücreleriyle temas eder bir biçimde asılı olacak şekilde konumlanmıştır.



Şekil 3.8. Kalibrasyon tankı

ISO 4185 standardı uyarınca, akış ayırıcı mekanizmanın akış yönünü değiştirmesi en fazla 0,1 saniye sürebilir[29]. Bu nedenle, ayırıcı hızlı hareket etmelidir. Bununla beraber, yönü belirlenecek akış, ince bir plaka şekline sokulmuş bir profilde olmalıdır. Bu profil, bir lüle kullanılarak sağlanır. Akış profilinin kalın kenar uzunluğu, ince kenar uzunluğunun 15 ila 50 katı olmalıdır.

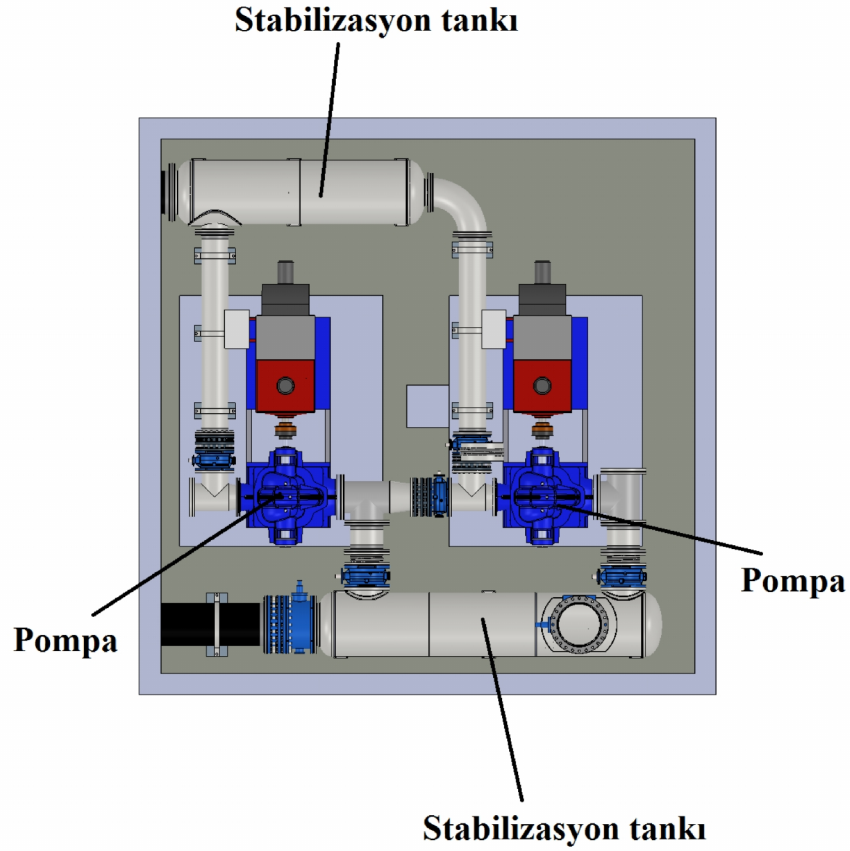
Sistemde bulunan ayırıcı, iki ucuna bağlanan pnomatik pistonlar aracılığıyla hareket ettirilen bir plakadan ibarettir. Plaka, lüleden gelen suyun rezervuara veya tanka iletimi sağlayan, kapalı bir kanal içine yerleştirilmiştir. Sistemdeki lüle ise, su akış profilini, kısa kenarı 120 mm uzun kenarı ise 1800 mm olan bir dikdörtgen biçimine getirmek amacıyla kullanılmıştır. Lüle, HAD yöntemleri kullanılarak tasarlanmıştır[31]. Ayırıcı ve lüle Şekil 3.9'da gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Ayırıcı ve lüle

3.2.5 Pompalar

Laboratuvarda, iki adet pompa bulunmaktadır. Pompalar, 1500 kW gücünde, değişken frekans kontrollü ABB AMI 500L motorlar[28] vasıtasıyla çalıştırılmaktadır. Pompalar için nominal çalışma düşü ve debi değerleri 80 metre ve 1 m²/s değeridir. Ancak, frekans kontrollü motor sayesinde, geniş bir debi ve düşü aralığında türbin testi yapılmasına imkan sağlayacak şekilde fonksiyon gösterirler. Pompalar, Şekil 3.10'de gösterildiği gibidir.



Şekil 3.10. Pompalar

Yapılacak testin gerektirdiği debi ve düşü değerlerini göre, pompalar, seri veya paralel olarak çalışabilmektedirler. Bu durum; pompa bağlantıları üzerine yerleştirilen vanalar kullanılarak sağlanır. Ayrıca, test düzeneğinin ihtiyacı doğrultusunda, ters yöne dönerek türbin işlevi de görebilmektedirler.

Pompaların hem giriş hem de çıkış kısımlarında birer adet stabilizasyon tankı bulunmaktadır. Tankların içinde ızgara mevcuttur. IEC 60193[10] gereğince, pompalarda oluşabilecek hava kabarcıklarının ve akış düzensizliklerinin ölçüm cihazları başta olmak üzere, sistemin geri kalanını etkilememesi için bu tanklar yerleştirilmiştir.

3.2.6 Vanalar ve Borular

Test düzeneğinde, toplam 9 adet kelebek vana bulunmaktadır. Bunların 4 tanesi DN800 çapında olup sistemin çalışma konfigürasyonunun belirlenmesi için kullanılmaktadır. 5 adedi ise pompaların seri veya paralel çalışabilmesini sağlamak amacıyla yerleştirilmiş olup, DN500 çapındadır. Bunların dışında, sistemde bir adet iğne bir adet te küresel vana bulunmaktadır. İğne vana, yüksek düşü tankı girişine yerleştirilmiş olup debi kontrolünü sağlayabilmek için kullanılacaktır. Küresel vana ise kalibrasyon tankının altına, tahliye işleminde kullanmak amacıyla konulmuştur.

Vanalar, PN25 standardı göz önünde alınarak seçilecek ve 37,5 bar basınç altında teste tabi tutulacaklardır. Tüm vanalar ST304 paslanmaz çelik kullanılarak imal edilmiştir. Vanaların tamamı elektronik olarak kontrol edilebilir olup SCADA sistemine bağlanacaktır.

Sistemin elemanlarını birbirine bağlayan boruların tamamı PN25 basınç sınıfı altında çalışacak şekilde seçilmiştir. ST316 paslanmaz çelikten üretilen borular, bahsedilen basınç sınıfı uyarınca test edilecektir.

3.3 Ölçüm cihazları

Test düzeneği üzerinde; debi, basınç, sıcaklık, çark torku ve çark dönüş hızı ölçmeye yarayan ölçüm cihazları vardır. Ayrıca, deneyde kullanılan su, içerdiği çözünmüş hava miktarı açısından ölçülmektedir.

3.3.1 Debi Ölçümü

Debi ölçümü, sistemde test edilen model türbinin geçirdiği debiyi belirlemek amacıyla yapılır. Bu bağlamda, ölçüm yapılan konum ile model türbin arasında sisteme su girişi veya sistemden su çıkışı olmamalıdır.

IEC 60193, test esnasında debi ölçümü amacıyla kullanılacak cihazları belirlemiştir. Bunlardan birisi de elektromanyetik debimetredir. Tasarlanan test düzeneğinde, debi ölçümü için kullanılacak elektromanyetik debimetrenin seçimi, sisteme yerleştirilmesi ve kullanımı ISO 6817 standardı uyarınca yapılır.

Elektromanyetik debimetre, bir manyetik alan yaratarak, bu manyetik alandan geçen akışkanın ürettiği voltajı ölçmek suretiyle işlev görür. Bu noktada, kullanılan akışkanın elektriği iletmesi gerekir. Ayrıca, bu akışkan mıknatıslanma özelliğine sahip olmamalıdır.

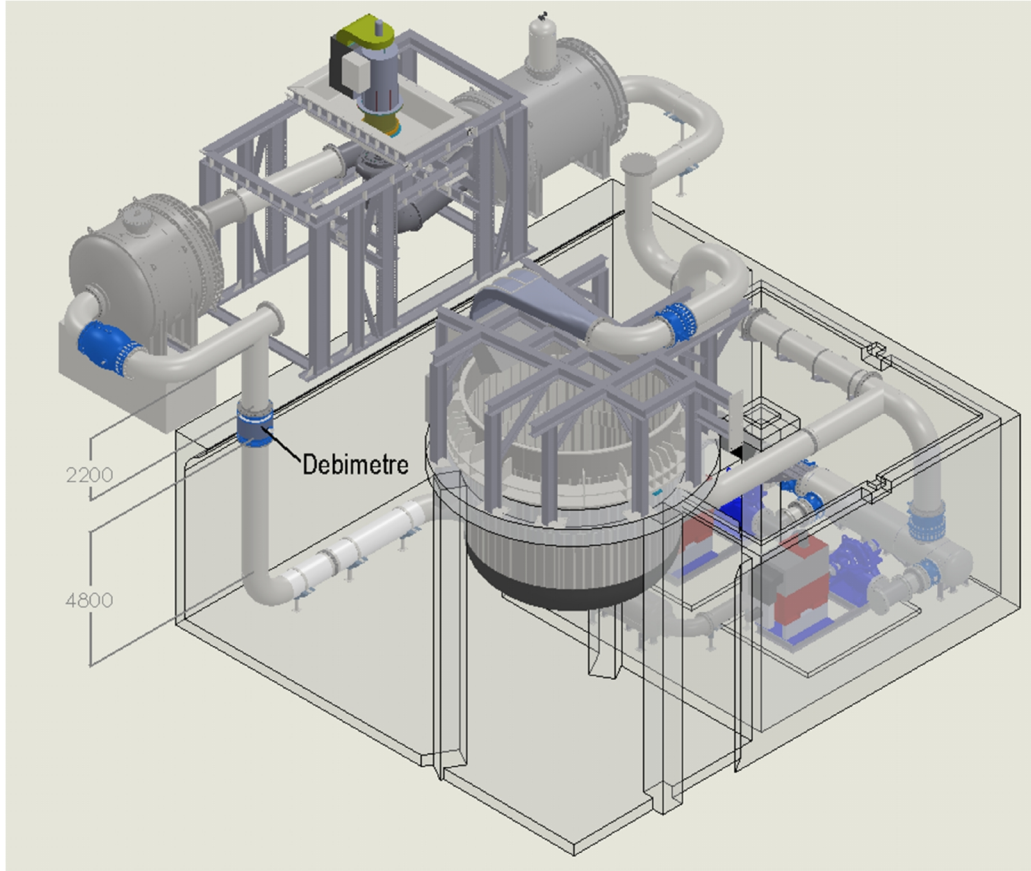
Debi ölçümü, sisteme yerleştirilmiş bir adet Siemens Sitrans MAG 5100 W[32] elektromanyetik debimetre aracılığıyla gerçekleştirilir. Şekil 3.11’de debimetre gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Elektromanyetik debimetre

Debimetre, PN16 basınç sınıfında olup 24 bar basınç altında test edilmiştir. Suyla temas eden yüzeyleri ST304 paslanmaz çelikten mamuldür. 10 m/s akış hız değerine kadar ölçüm yapabilmektedir. Bu değer de, 5 m³/s debiye karşılık gelerek test düzeneğinin çalışma aralığını rahatlıkla kapsamaktadır. Debimetrenin ölçüm hassasiyeti %0,2'dir.

ISO 6817 standardına göre, ölçüm esnasında, debimetre tamamen suyla dolu olmalıdır. Ayrıca, debimetreden geçen akışın düzenli olması gerekir. Bu bağlamda, debimetre, test düzeneğine akışın yukarı doğru olduğu dikey bir boru üzerinde bulunacak şekilde bağlanmıştır. Ayrıca, debimetre öncesinde 4800 mm'lik kısma, akışı bozacak bir eleman yerleştirilmemiş, bu kısım düz bir boru olarak seçilmiştir. Şekil 3.12'de debimetrenin konumlandırılması görülmektedir.



Şekil 3.12. Debimetrenin sistemdeki konumu

Kalibrasyon işlemi, düzenek üzerine yerleştirilen kalibrasyon sistemi vasıtasıyla yapılacaktır. Bu bağlamda, test düzeneği, kalibrasyon çevrimi modunda çalıştırılarak, belirli bir zaman aralığı boyunca debimetreden geçen suyun toplam ağırlığı ölçülecek ve debimetrenin gösterdiği değerle karşılaştırılacaktır.

3.3.2 Basınç Ölçümü

Basınç ölçümü, sistemde test edilen model türbinin özgül enerjisini ve NPSE değerini elde etmek amacıyla yapılır. Model türbin girişi ve çıkışına yerleştirilen basınç ölçüm cihazları vasıtasıyla ölçülen mutlak basınç büyüklükleri kullanılarak bahsedilen E ve NPSE değerleri hesaplanır. Bu bağlamda, basınç ölçüm aygıtlarının model türbine oldukça yakın bir biçimde konumlandırılması gerekir. Bu şekilde, ölçüm noktası ile model türbin arasındaki kayıplardan kaynaklanan hesaplama hataları en aza indirilir.

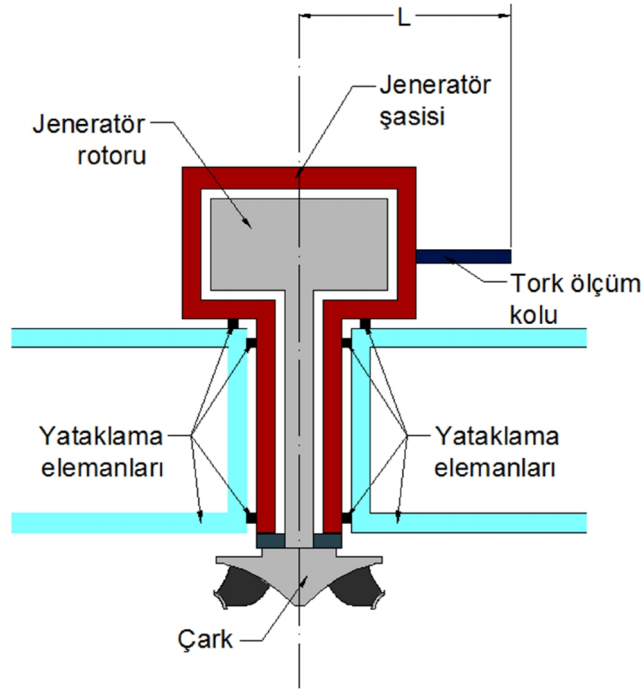
IEC 60193'e göre, basınç ölçümü, basınç tapaları kullanılarak yapılır. Akışın ölçüleceği kesit üzerine en az iki çift basınç tapası yerleştirilmelidir. Dairesel kesitlerde, tapalar, birbirine dik iki kesit çapının uç noktalarına yerleştirilir. Hava kabarcıklarından kaçınmak için en üst noktaya, kirlenme ihtimaline karşın en alt noktaya tapa konulmaz. Dairesel olmayan kesitler için ise köşelere yakın konumlara tapa yerleştirmekten kaçınılmalıdır.

Bir kesit üzerine yerleştirilen basınç tapalarına bağlanan borular bir toplayıcı vasıtasıyla birleştirilir. Toplayıcıda oluşan basınç ise Siemens Sitrans P 500 basınç sensörü vasıtasıyla belirlenir. Tapalardan çıkan boruların her birine ayrı ayrı vana yerleştirilmelidir, böylece bir kesit üzerinde yerleştirilmiş bütün basınç tapalarında oluşan basınç değerleri ayrı ayrı okunabilir.

Sensör, 0 ila 32 bar arasındaki basınç değerlerini ölçebilmektedir. Ölçüm hassasiyeti %0,03'tür. Sensörün kalibrasyonu bir ölü yük manometresi kullanılarak yapılacaktır. Ölü yük manometresi, test sürecinin herhangi bir anında, sensörün ölçüm doğruluğunu kontrol etmek adına sisteme bağlanabilecektir.

3.3.3 Tork Ölçümü

Model türbinin ürettiği mekanik gücün hesaplanabilmesi için tork değeri ölçülmelidir. Bu bağlamda, sistemdeki jeneratörün şasisi, hidrostatik bir yatak üzerinde yüzer konumda yerleştirilecektir. Bu şasi, bir kenarına monte edilen bir kolun sabitlenmesi suretiyle dönmekten alıkonulacaktır. Şasiye monte edilen kol, bir kuvvet sensörüne bağlanarak sabitlenir. Model türbinin torku ise, kuvvet sensörünün kola bağlandığı noktanın, çarkın dönme eksenine göre ölçülen mesafe, L , ile sensörün ölçtüğü kuvvetin çarpımından ibarettir. Tork ölçüm mekanizması Şekil 3.13'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.13. Tork ölçüm mekanizması

3.3.4 Hız Ölçümü

Türbinin ürettiği mekanik gücün hesaplanabilmesi için dönüş hızı değerine ihtiyaç duyulur. Bu bağlamda, sistemde kullanılan jeneratörün taşıdığı devir ölçer vasıtasıyla, dönüş hızı ölçülecektir.

3.3.5 Suyun Fiziki Özelliklerinin Ölçümü

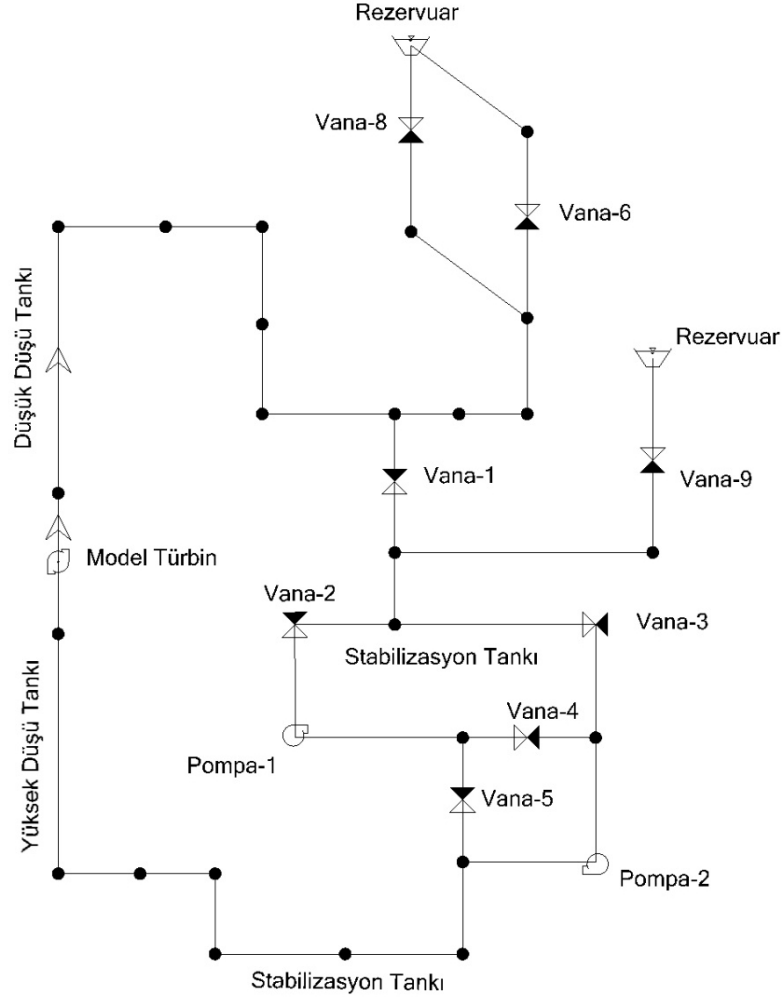
Model türbinin güç ve NPSE ve Reynolds sayısı değerlerinin hesaplanabilmesi için, test esnasında kullanılan suyun özkütlesi, kinematik viskozitesi ve buhar basıncı gibi fiziki özelliklerinin bilinmesi gerekir. Bu bağlamda, testte kullanılan suyun sıcaklık değeri ve içerdiği hava miktarı ölçülmelidir. Ayrıca, testin yapıldığı ortamın da sıcaklık değeri belirlenmelidir.

Sıcaklık ölçümleri, Siemens Sitrans TS sıcaklık ölçüm cihazı kullanılarak yapılır. Cihazın ölçüm hassasiyeti 0,30 °C'dir. Suyun içerdiği hava miktarı ise Hach Lange LDO çözülmüş oksijen sensörü kullanılarak belirlenecektir.

3.4 Hidrolik Tasarım

Tasarlanan deney düzeneği hidrolik olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu analizler; çalışma koşulları esnasında oluşacak hidrolik kayıpların belirlenmesi ve bu kayıplara dayanarak test yapılabilecek aralığın ortaya konması için yapılmıştır. Bu bağlamda; düzenek, bütün test tiplerini sağlayan çevrim durumlarını kapsayacak şekilde modellenmiş ve incelenmiştir. Modeller, pompaların seri ve paralel çalışma konfigürasyonları göz önüne alınarak oluşturulmuştur. Modelleme ve analizler Bentley WaterCAD V8i[33] programı kullanılarak yapılmıştır.

Hidrolik modelin oluşturulması esnasında, öncelikle, döngünün başlangıç ve bitiş noktalarına rezervuarlar yerleştirilmiştir. Daha sonra; test düzeneğini meydana getiren borular, dirsekler ve boru bağlantı noktaları modellenmiştir. Boru çap ve uzunluk değerleri programa girdi olarak verilmiştir. Sistemi çalıştıran pompalar yerleştirilmiş ve tanımlanmıştır. Bunun ardından, test düzeneğinin çalışma döngülerini ve pompaların seri veya paralel olarak faaliyet gösterme durumunu belirleyen vanalar sisteme eklenmiştir. Son olarak model türbin sisteme eklenmiş ve çalışma değerleri belirlenmiştir. Modellenen deney düzeneği Şekil 3.14'te gösterildiği gibidir.



Şekil 3.14. Deneysel düzeneğin hidrolik modeli

Kullanılan program, borunun çap ve uzunluk değerleri ile üretimde kullanılan malzemenin özelliklerinden yararlanarak sürtünme kayıplarını hesaplayabilmektedir. Ancak yerel kayıp katsayılarının programa girilmesi gerekmektedir. Bu noktada, hidrolik modeli tamamlamak adına, düzeneğe bulunan dirsekler, bağlantılar, vanalar ve ölçüm cihazları dikkate alınarak yerel kayıp katsayıları programa girdi olarak verilmiştir.

Düzeneğe bulunan yüksek ve düşük düşü tankları ile stabilizasyon tankları aynı çapta boru kullanılarak modellenmiştir. Model türbin ise analizde kullanılan debi değerini sağlayacak şekilde tanımlanmıştır.

Oluşturulan hidrolik model kullanılarak, deney düzeneğinin çalışma biçimleri analiz edilmiştir. Bu bağlamda; açık ve kapalı çevrim durumlarında pompaların seri ve paralel bağlanma koşullarına göre ayrı ayrı analizler yapılmış ve hidrolik kayıplar belirlenmiştir. Seri çalışma durumunda hidrolik kayıplar belirlenirken, pompaların düşüleri toplanmış ve türbin düşüsü bu değerden çıkarılmıştır. Paralel çalışma durumunda ise, pompaların düşü değerleri birbirlerine oldukça yakın olduğu için bu değerlerin aritmetik ortalaması alınmış ve türbin düşüsü bu değerden çıkarılmıştır.

Açık çevrim esnasında meydana gelen hidrolik kayıp değerleri kapalı çevrim durumundakilere göre daha yüksek olduğu için, analizler bu döngü esas alınmak suretiyle, geniş bir debi aralığını tarayacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Açık çevrim durumu için hidrolik kayıplar Çizelge 3.2’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.1. Açık çevrim durumunda hidrolik kayıplar

	Model Türbin Debi (l/s)	Pompa-1 Düşü (m)	Pompa-2 Düşü (m)	Model Türbin Düşü (m)	Toplam Hidrolik Kayıp (m)
Seri Bağlantı	250	102,82	102,82	205,26	0,38
	500	99,49	99,49	197,52	1,46
	750	92,22	92,22	181,17	3,27
	1000	80	80	154,21	5,79
	1250	61,96	61,96	114,93	8,99
Paralel Bağlantı	1250	96,73	96,1	91,2	5,215
	1500	92,67	91,77	84,75	7,47
	1750	87,4	86,16	76,67	10,11
	2000	80,81	79,18	66,84	13,155
	2250	72,78	70,71	55,16	16,585
	2500	63,23	60,67	41,53	20,42

Bununla beraber, kapalı çevrim durumu için de pompaların tasarım debi değeri kullanılarak seri ve paralel bağlantı için analiz yapılmıştır. Kapalı çevrim durumu için hidrolik kayıplar ise Çizelge 3.3'te gösterildiği gibidir.

Çizelge 3.2. Kapalı çevrim durumunda hidrolik kayıplar

	Model Türbin Debi (l/s)	Pompa-1 Düşü (m)	Pompa-2 Düşü (m)	Model Türbin Düşü (m)	Toplam Hidrolik Kayıp (m)
Seri Bağlantı	1000	80	80	154,98	5,02
Paralel Bağlantı	2000	80,81	79,18	69,81	10,185

4. MODEL TÜR BİN

Test etmek amacıyla kullanılacak model türbinin, IEC 60193 standardında açıklanmış geometrik benzerlik özelliklerini taşıması gerekmektedir. Bu bağlamda, esas türbin, suyla etkileşimde olan bütün yüzeyleri bakımından, model türbin ile tam olarak aynı şekilde ve ölçek nezdinde küçültülmüş ölçülerde olmalıdır. Modelin sahip olması gereken minimum ölçüler Çizelge 1.1’de gösterilmiştir.

Test sonuçlarından esas türbinin performans değerlerinin elde edilmesi esnasında, ölçeklemenin etkisinin az olması gerekmektedir. Bu noktada, model türbin, testi mümkün kıldığı ölçüde, büyütülebilir. IEC 60193 standardı uyarınca modelin mekanik açıdan sahip olması gereken temel özellikler aşağıda belirtilmiştir[10].

- Model; test koşullarının gerekli kıldığı basınç altında, en az miktarda deforme olacak şekilde üretilmeli ve modelin malzeme seçimi bu durum dikkate alınarak yapılmalıdır.
- Ayar kanadı gibi pozisyon değişikliğine uğrayabilen parçalar, test için belirlenen konumlarını koruyabilecek ve aynı konuma tekrar ayarlanabilecek şekilde tasarlanmalı ve imal edilmelidir.
- Yataklama sistemi; modelin dönen kısımları ile sabit kısımlarının temasını engelleyecek ölçüde rijit olmalıdır. Bu bağlamda, sızdırmazlık labirentlerinin 0,15 mm’den daha düşük bir boşluğa sahip olacak şekilde tasarlanması önerilmez.
- Model; birleşim yerlerinin birbirine tam olarak düzgünce oturacak şekilde tasarlanmalıdır. Ek yerleri, akışta ayrılmaya sebep olmayacak şekilde birleştirilmelidir.
- Model üretiminde kullanılan malzeme paslanmaya ve elektrokimyasal aşınmaya karşı direnç gösterebilir olmalıdır. Suyla temas içinde olan kısımlar, test esnasında bozulma göstermemelidir.

- Model, suyun geçtiği kısımların kolay bir biçimde temizlenebilmesine ve tamir edilebilmesine imkan sağlayacak şekilde üretilmelidir.
- Çark içerisindeki akışın gözlenebilmesi için, emme borusu giriş konisi, kısmen veya tamamen şeffaf olmalıdır.
- Model; basınç salınımları, akış hız dağılımı veya ayar kanadı torku ölçümü gibi ek ölçümler yapılmak istendiğinde, gereken cihazların, kolay bir biçimde bağlanabileceği şekilde üretilmelidir.

Modelin sızdırmazlık sistemi esas türbinle geometrik ve hidrolik benzerlik göstermelidir. Ancak, özellikle büyük ölçekleme oranları için, bu benzerliği yakalamak zordur. Zira, sızdırmazlık elemanları birbirine temas edebilir Ancak, model ve esas türbin arasındaki bu fark sonucu oluşacak hidrolik kayıplar, ya ihmal edilebilir ölçüde küçük olmalı ya da isabetli bir biçimde belirlenebilmelidir.

4.1 Model Türbin Tasarımı

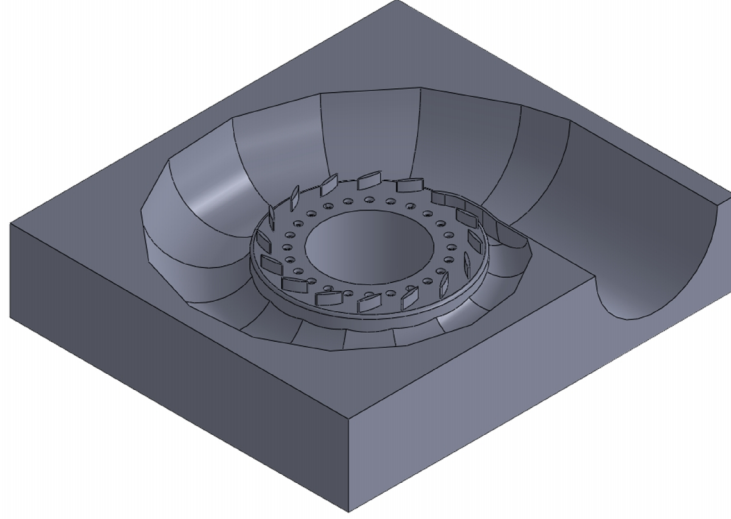
Model türbin, Francis tipi bir türbinin ölçeklenmesi sonucu ortaya çıkarılmıştır. Türbin çarkı ve yardımcı parçalar olmak üzere iki başlık altında tasarlanmıştır. Türbin çarkı, çark kanadı, taç ve bilezikten ibarettir. Yardımcı parçalar ise; salyangoz, hız ringleri, ön ve arka kapak, sabit kanatlar, ayar kanatları ve emme borusundan oluşmaktadır.

Model türbin çarkı tasarımı esnasında bilgisayar destekli tasarım ve imalat yöntemleri kullanılmıştır. Bu sayede, üretim sırasında harcanan zaman kısılırken üretim kalitesi yüksek olmaktadır. Üç boyutlu modeller, SolidWorks[34] programı kullanılarak oluşturulmuştur.

Üretim, test merkezi bünyesinde bulunan üretim ekipmanları kullanılarak gerçekleştirilecektir. Üretim sonrası yapılacak olan boyutsal analiz ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, yine merkez bünyesinde gerçekleştirilecektir.

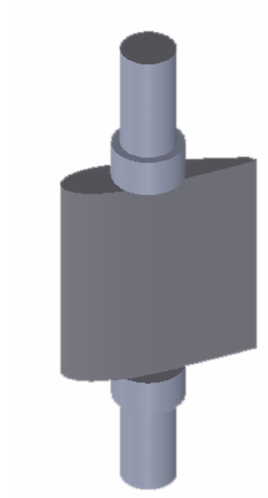
4.1.1 Yardımcı Parçalar

Salyangoz, hız ringleri, ön ve arka kapaklar ile sabit kanatlar bir arada olacak şekilde projelendirilmiştir. Bu şekilde, akışı etkileyebilecek birleşim noktalarının daha az bulunduğu bir model ortaya konmuştur. Montajı mümkün kılmak için iki parça halinde üretilecek şekilde tasarlanmıştır. İlk sabit kanat esas türbine uygun biçimde modellenmiştir. Parça üzerine, ayar kanatlarının millerinin oturacağı delikler açılmıştır. Delikler ile ayar kanadı milleri arasında bir yataklama ve sızdırmazlık sistemi yerleştirilmelidir. Parçanın üst tarafında, model türbin milinin geçeceği bir delik bulunmaktadır. Bu delik ile model türbin mili arasında da bir yataklama ve sızdırmazlık sistemi yerleştirilmelidir. Alt tarafta ise, emme borusunun bağlanacağı, çarkın çıkış kısmı vardır. Bu kısım ile çark arasında da sızdırmazlık labirentleri yerleştirilmelidir. Bahsedilen parça, Şekil 4.1’de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.1. Salyangoz, hız ringleri ve sabit kanatlar

Ayar kanatları, esas türbininkilerle aynı kanat profilini taşıyacak şekilde modellenmiştir. Ancak dayanım sağlaması için daha kalın bir mile sahip olacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4.2’de bir ayar kanadı gösterilmiştir.



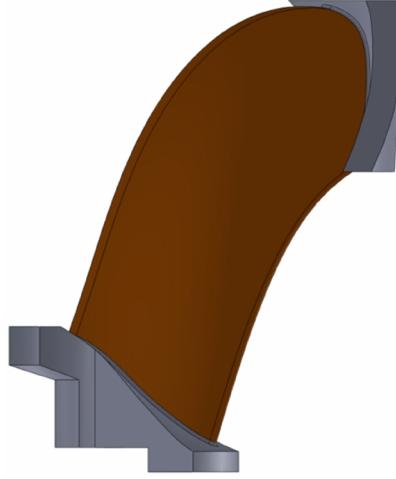
Şekil 4.2. Ayar kanadı

Emme borusu ise kavitasyonun gözlenebileceği şekilde üretilmelidir. Bu bağlamda giriş konisinin tamamı veya bir kısmı şeffaf olacak biçimde imal edilmelidir.

4.1.2 Çark

Model türbin çarkı, yekpare olarak tasarlandığı takdirde, üretim ve boyutsal kontrole imkân sağlayabilecek kadar büyük olmamaktadır. Bu bağlamda, çark kanatları ayrı ayrı üretilerek kontrol edilecek ve daha sonra montajları yapılacaktır. Montaj sonrasında, tekrar boyutsal kontrol gerçekleştirilerek montajın doğruluğu onaylanacaktır.

Deneme amaçlı tasarlanan model çarkın çapı 234 mm su giriş yüksekliği 62,5 mm'dir. Ayrıca, çark 15 kanattan oluşmaktadır. Şekil 4.3'te bir adet kanat gösterilmektedir.

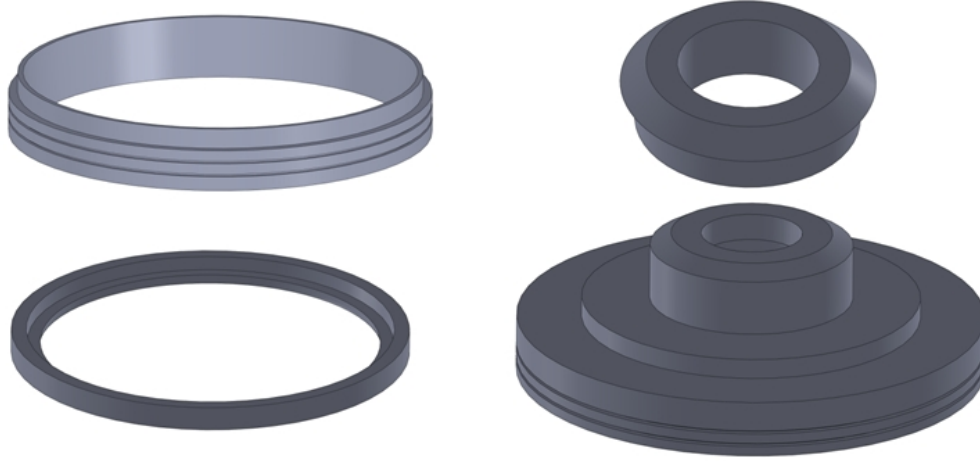


Şekil 4.3. Model türbin çark kanadı

Model çarkın, deney esnasında yaratılacak çalışma koşulları altında mekanik dayanım göstermesi gerekmektedir. Bu amaçla, kanadın alt kısmı kademeli olarak tasarlanmış ve buralara vida delikleri açılmıştır. Torkun kanatlardan taca iletilmesi bu vidalar vasıtası ile olacaktır. Ayrıca, tacın alt tarafı türbin milinin bağlanabileceği şekilde tasarlanmıştır.

Test sonuçlarının doğruluk göstermesi adına, model çarkın gerekli sızdırmazlık elemanlarını da taşıması gerekmektedir. Bu bağlamda, hem taç hem de bilezik parçaları üzerine gerekli sızdırmazlık labirentleri açılmıştır.

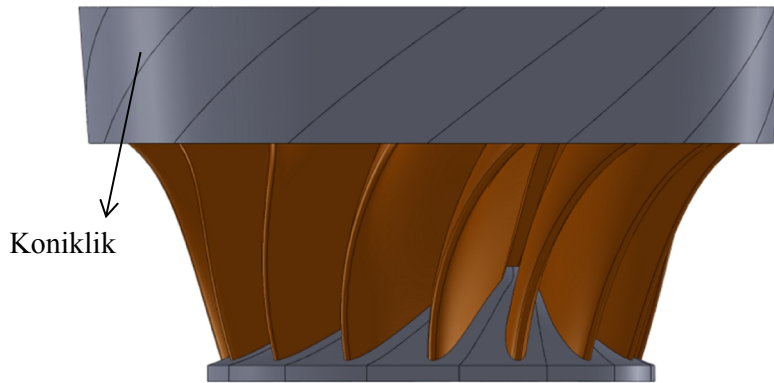
Modelin montajı hatasız gerçekleştirilmek zorundadır. Montajın doğru yapılması da en az üretim kısmı kadar önem taşımaktadır. Montaj esnasında, birleşim noktalarında akışı bozacak bir unsur oluşmamasına dikkat edilmelidir. Ayrıca çark kanatlarının eksenselliği koruyacak bir biçimde birleştirilmesi gerekmektedir. Bunu sağlamak adına, taç ve bilezik parçaları ikişer parça olarak belirlenmiş ve modelin düzgün bir biçimde monte edilmesini sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Şekil 4.4'te bu parçalar görülmektedir.



Şekil 4.4. Model çark taç ve bilezik

Montaj esnasında, ilk olarak kanatlar sırasıyla taç alt parçasının üstüne oturtulmalıdır. Daha sonra taç üst parçası takılmalıdır. Bu esnada kanatlar tam olarak sabitlenmemiş olmaktadır.

Şekil 4.5'te gösterildiği üzere model çarkın tüm kanatlarının birleşmesi sonucu oluşan yapının ayrıca üretilecek olan bileziğe oturan kısmı koniktir. Bu koniklik, eksenelliği sağlamak amaçlı konulmuştur.

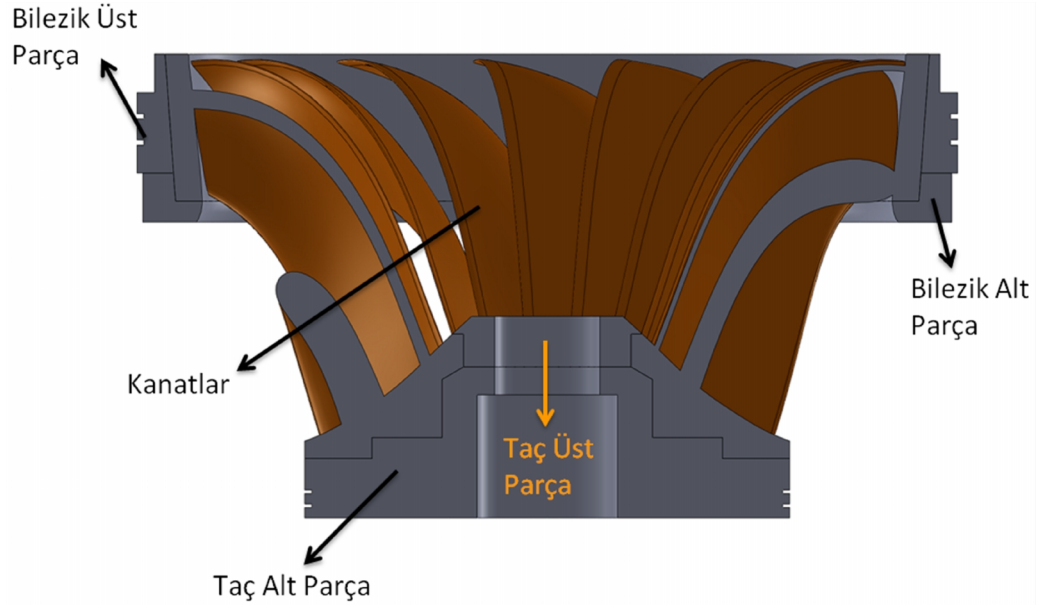


Şekil 4.5. Model çark kanatlar

Gösterilen konik kısma, bileziği oluşturan iki adet parça monte edilecektir. İlk olarak bilezik üst parçası taç tarafından çarka geçirilecek, daha sonra bilezik alt parçası

takılarak monte edilecektir. Bilezik üst parçası çarka sıkı geçme suretiyle takılacaktır. Bu birleşim sonucu bilezik tarafında suyun değdiği yüzeylerin birleşme noktaları akışı bozmayacak şekilde bir devamlılık gösterecektir.

Son olarak, çark kanatları, tork anahtarı ile taç alt parçasına tek tek vidalanacaktır. Bu vidalama, kanatların taç alt parçası yüzeyine düzgün bir biçimde oturmasını sağlayacak ve bunun sonucunda akış yüzeyi istenildiği gibi olacaktır. Bu aşama sonucunda montaj tamamlanmış olacaktır. Şekil 4.6'da monte edilmiş çarkın kesit görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.6. Model çark montaj kesiti

4.2 Ölçüm ve Kontrol

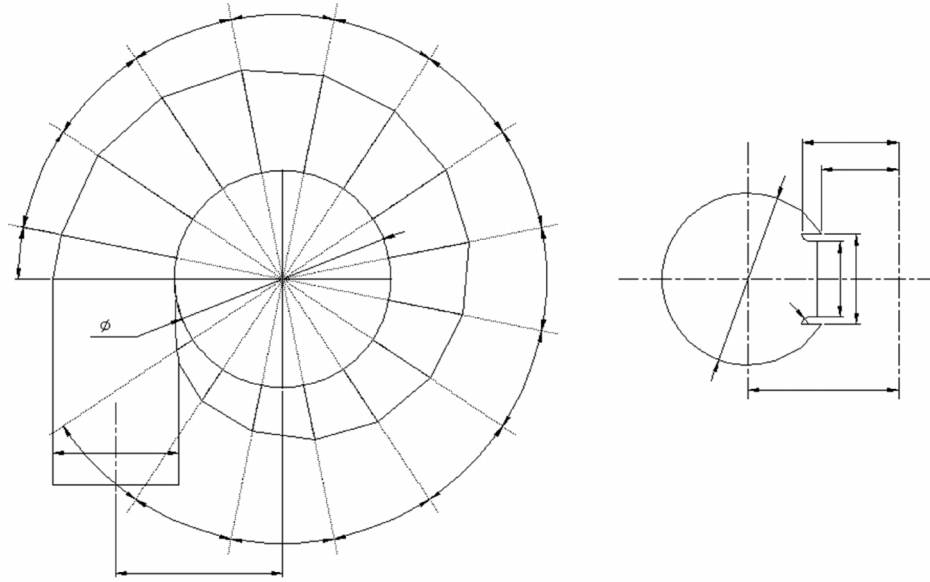
4.2.1 Boyutsal Analiz

IEC 60193[10] standardına göre, model ve esas türbin arasındaki geometrik benzerlik kontrole tabi tutulmalıdır. Bunun için, öncelikle, hem model hem de esas türbinin kendi parçaları arasındaki türdeşlik kontrol edilmelidir. Türbinlerin; tekrar eden bütün parçaları için, belirlenen konumlardan ölçüm yapılır. Bu ölçümlere tekil ölçüm adı verilir. Bu ölçümlerin ortalamasına ise ortalama ölçüm adı verilir.

Model ve esas türbinin kendi parçaları arasındaki türdeşlik; herhangi bir türbin parçasının tüm kullanılan elemanlarının tekil ölçülerinin ortalama ölçülerine göre gösterdiği sapma miktarı dikkate alınarak belirlenir. Model ve esas türbin arasındaki benzerlik ise ortalama değerlerin ölçekleme oranı göz önüne alınarak karşılaştırılması suretiyle kontrol edilir.

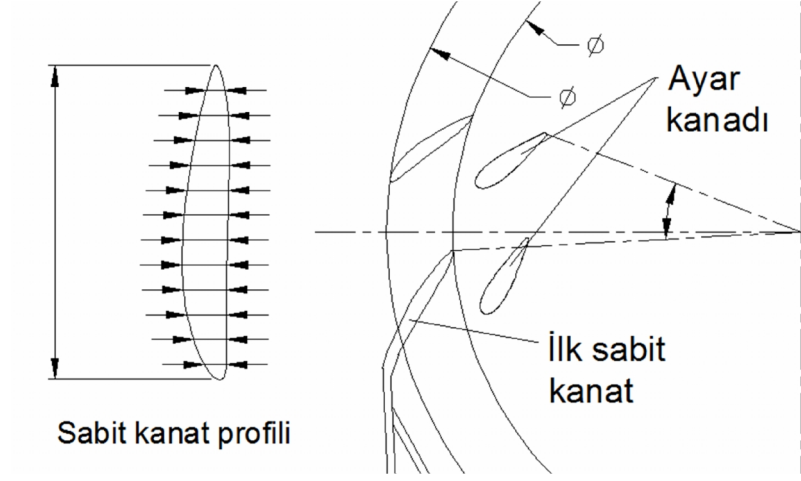
Suyun geçiş yaptığı bölgeyi tanımlayan her türlü parça ölçümlenmelidir. Bu bağlamda, salyangoz, sabit kanatlar, ayar kanatları, hız ringi ve emme borusu ölçüme tabi tutulur. Çark kanatları, sabit kanatlar ve ayar kanatları için, ölçüm yapmak amacıyla seçilen nokta sayısı, en az, kanat profillerini veya yüzeylerini tanımlamaya yetecek kadar olmalıdır.

Salyangoz, hız ringleri ve sabit kanatlar aynı parça üzerinde üretildiği için beraber ölçümlenmelidir. Salyangoz için; giriş çapı, virol çapları, giriş eksenin şaft eksenine olan uzaklığı, virol dış noktalarının şaft eksenine olan uzaklığı, virol basma çapları gibi salyangozu eksiksiz bir biçimde tanımlayacak bütün boyutlar ölçümlenmelidir. Ayrıca, hız ringi kalınlığı, iç ve dış çapları da belirlenmelidir. Salyangoz, viroller ve hız ringleri için ölçülecek boyutlar Şekil 4.7’de gösterildiği gibidir.



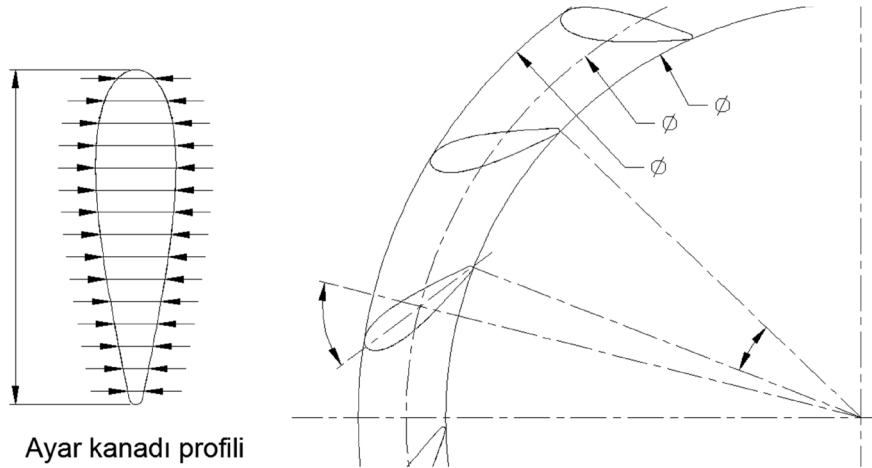
Şekil 4.7. Salyangoz ve hız ringi ölçümü

Sabit kanatlar için; kanat yüksekliği, maksimum kalınlık, kanat profili, giriş ve çıkış çapları ve sabit kanatların ayar kanatlarına göre açısıl konumlar gibi sabit kanadın hidrolik bütün etkilerini kapsayacak boyutları ölçülecektir. Sabit kanat için ölçüm yapılacak boyutlar Şekil 4.8’de gösterilmiştir.



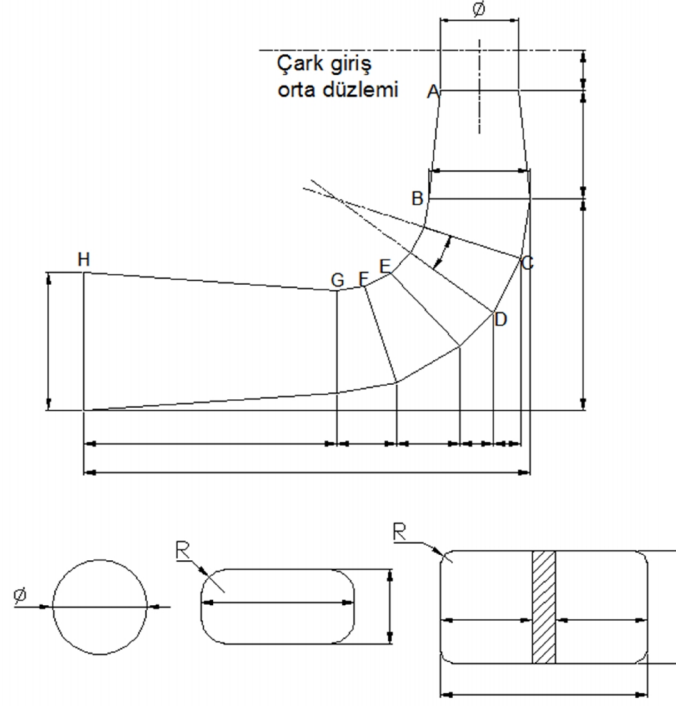
Şekil 4.8. Sabit kanatlar

Ayar kanatları için; kanat yüksekliği, kanat profili, maksimum kalınlık, mil basma çapı, giriş ve çıkış çapları ile ayar kanadı açıklık açıları ölçülmelidir. Ayrıca, ayar kanatlarının en çok açık olduğu andaki açıklık açısı belirlenmelidir. Ayar kanadı için yapılacak ölçümler Şekil 4.9’da gösterilmiştir.



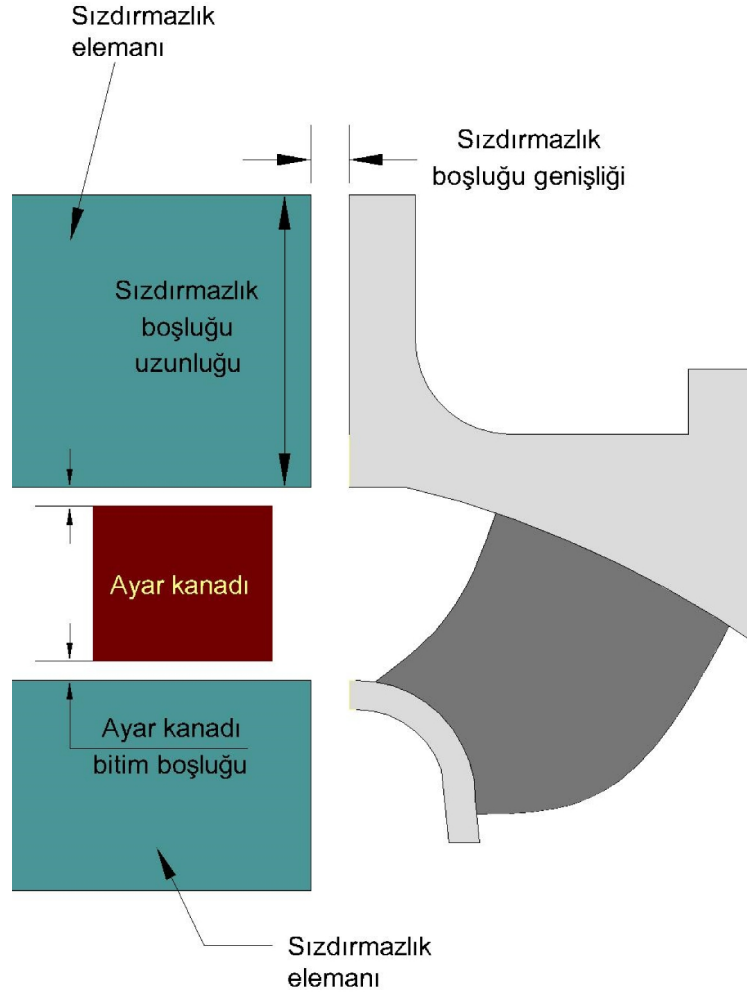
Şekil 4.9. Ayar kanatları

Emme borusu için; giriş çapı, giriş ile ayar kanatları orta düzlemi arasındaki uzaklık, giriş konisi yüksekliği, dirsek yüksekliği dirsek sonrası uzunluk ve boru boyunca seçilen kesit profilleri gibi emme borusunu tümüyle tanımlayacak boyutlar ölçülmelidir. Emme borusu için ölçülecek boyutlar Şekil 4.10’da gösterildiği gibidir.



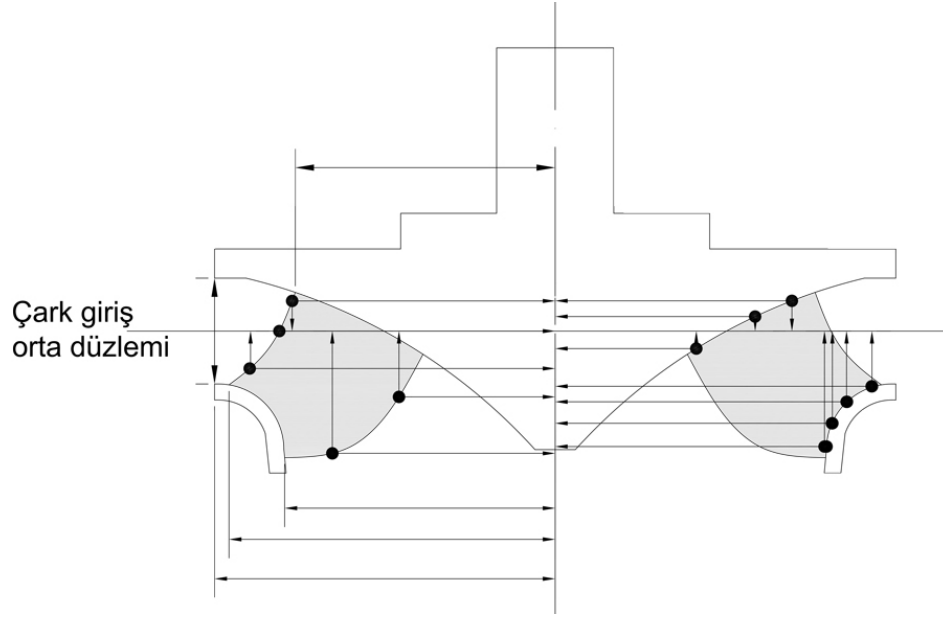
Şekil 4.10. Emme borusu

Türbinde sızdırmazlık amacıyla tasarlanan kısımlar da ölçüme tabi tutulur. Çark için, sızdırmazlık boşluğunun genişliği ve uzunluğu, ayar kanadı için ise, ayar kanadının üst ve alt bitim boşluğudur. Bu ölçümler Şekil 4.11’de gösterilmiştir.



Şekil 4.11. Sızdırmazlık elemanları ölçümü

Türbin çarkı için, giriş ve çıkış çapları, giriş yüksekliği, taç ve bileziğin profilleri ve kanat uçları ile sızdırmazlık elemanları arasındaki uzaklık gibi çarkın akışı etkileyen bütün boyutlar kontrol edilmelidir. Ek olarak, sızdırmazlık elemanları ile çark arasındaki boşluklar gibi boyutlar için de ölçüm yapılmalıdır. Çark için yapılacak ölçümler Şekil 4.12’de gösterilmiştir.

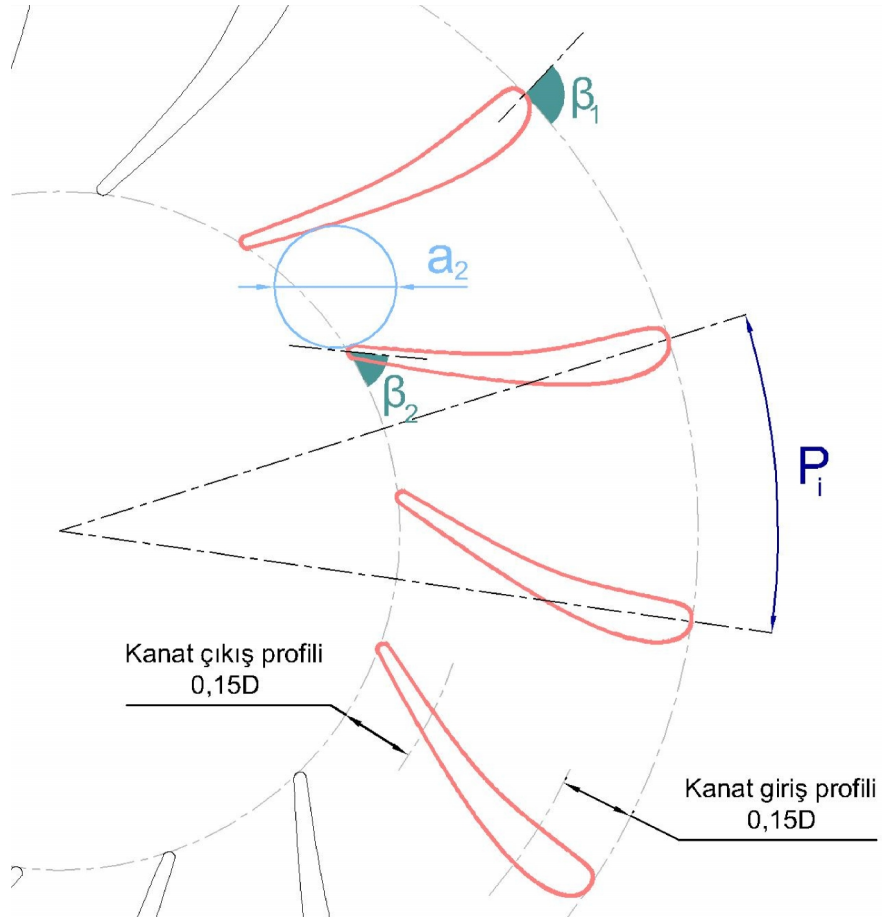


Şekil 4.12. Çark için ölçüm noktaları

Francis tipi türbinler için çark kanadı ölçümleri aşağıda belirtilen gereklilikleri sağlamalıdır[10].

- Kanat giriş profili ölçümü, düşük özgül hıza sahip türbinlerde en az iki kesit yüksek özgül hıza sahip türbinlerde ise en az üç kesit seçilerek yapılmalıdır. Giriş profili, Şekil 4.13'te görüldüğü gibi kanadın hücum kenarından itibaren 0,15 referans çap ölçüsündeki mesafesidir.
- Tüm kanat profili ölçümü, en az bir kanat kesiti boyunca yerleştirilmiş veya bütün yüzeyi kapsayacak şekilde rastgele seçilmiş noktalar üzerinden yapılır.
- Kanat giriş açıları, β_1 , kanat giriş profilleri ile aynı kesitler kullanılarak ölçülmelidir. Çıkış açıları ise, β_2 , çıkış profilleri ile aynı kesitler kullanılarak ölçülmelidir. Kanat giriş ve çıkış açıları, Şekil 4.13'te belirtilen açıdır.
- Kanat çıkış profili ölçümü, en az üç kesit üzerinde yapılmalıdır. Çıkış profili, Şekil 4.13'te görüldüğü üzere kanadın firar kenarından itibaren 0,15 referans çap ölçüsündeki mesafesidir.

- Hücüm ve firar kenarları için ölçümler, özgül hıza bağılı olarak, en az iki veya üç nokta kullanılarak yapılmalıdır.
- Kanatlar arasındaki çıkış genişliği, a_2 , her bir kanat için en az dörder nokta kullanılarak kontrol edilmelidir. Bahsedilen genişlik Şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13. Çark kanadı ölçümü

Francis tipi türbinler için, bir modelin test edilebilmesi için, boyut kontrolü sonucunda ortaya çıkan, ölçülen boyutların gösterebileceği maksimum sapma miktarları Çizelge 4.1'de gösterildiği gibidir.

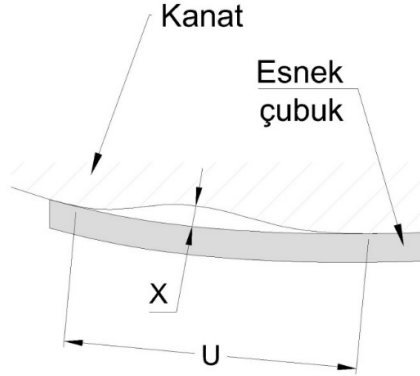
Çizelge 4.1. Türbin boyutları için maksimum sapma değerleri[10]

Türbin elemanları	Türdeşlik (Model türbin)	Benzerlik (Model türbin – Esas türbin)
Salyangoz	±%2	±%1
Emme borusu	±%2	±%1
Hız ringi çapı	±%1	±%1
Sabit kanat uzunluğu	±%2	±%2
Maksimum sabit kanat kalınlığı, T'	±%5	±%5
Maksimum ayar kanadı kalınlığı, T''	±%5	±%5
Hız ringi kalınlığı	±%2	±%2
Ayar kanadı yüksekliği	±%0,3	±%0,2
Ayar kanadı mil çapı	±%0,2	±%0,2
Sabit kanatların ayar kanatlarına göre konumu	±1°	±1°
Ayar kanadı profili	±%3T'	±%3T'
Sabit kanat profili	±%3T''	±%5T''
Ayar kanadı maksimum açıklığı	±%1,5	> 0
Çark sızdırmazlık boşluğu genişliği	±%50	< 0
Çark sızdırmazlık boşluğu uzunluğu	-	> 0
Ayar kanadı bitim boşluğu	±%50	< 0
Çark kanadı profili (giriş ve çıkış)	±%0,1D	±%0,1D
Çark kanadı profili (diğer kısımlar)	±%0,2D	±%0,2D
Giriş aralığı P _i	±%0,2D	-
Giriş açısı β ₁	±1,5°	±1,5°
Çıkış açısı β ₂	±1°	±1°
Çıkış genişliği, a ₁	±%3	+%3 -%1
Maksimum kanat kalınlığı, T	+%3 -%6	+%3 -%6
Kanat çıkış kalınlığı	±%15	±%15
Diğer çark ölçüleri (İç çap, dış çap, taç ve bilezik profilleri vd.)	±%0,25D	±%0,25D

4.2.2 Yüzey Kalitesi

Yüzey kalitesini belirlemede kullanılan iki unsur vardır. Bunlar yüzey dalgalılığı ve yüzey pürüzlülüğü olarak tanımlanabilir[10].

- *Yüzey Dalgalılığı:* Bir yüzey profili üzerinde, profili belirleyen düzgün eğriden gerçekleşen sapma miktarını gösteren orandır. Dalgalılık, esnek bir çubuk kullanılarak, Şekil 4.14'te gösterilen şekilde belirlenebilir. Yüzey dalgalılığının yüzey pürüzlülüğü olarak kabul edilmemesi için, Şekil 4.14'te görülen U değerinin 50 mm'den az olması ve maksimum sapmayı gösteren X noktasının U ile gösterilen mesafenin orta üçte birlik kısmında yer alması gerekmektedir. Dalgalılık değeri X'in U'ya oranıdır.
- *Yüzey Pürüzlülüğü:* Yüzeyin üretim biçimi, üretim malzemesi ve benzeri koşullar tarafından belirlenen bir özelliğidir. Yüzeyin üzerindeki girinti ve çıkıntıların gösterdiği sapma miktarlarının aritmetik ortalamasına eşittir. Pürüzlülük, R_a ile gösterilir.

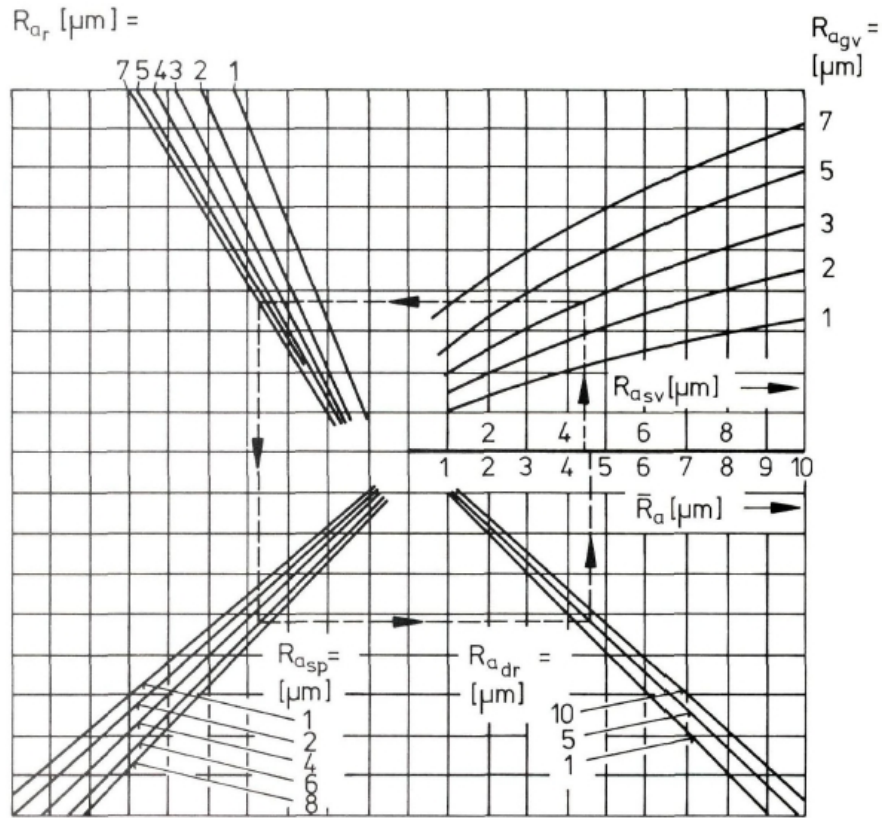


Şekil 4.14. Dalgalılık ve pürüzlülük

Tüm kanatların yüzeyleri ve çark dâhilinde taç ve bilezik yüzeyleri dalgalılık açısından ölçülmelidir. Kabul edilebilir dalgalılık oranı kavitasyona maruz kalan yüzeyler için 0,01, diğer tüm yüzeyler için 0,02'dir.

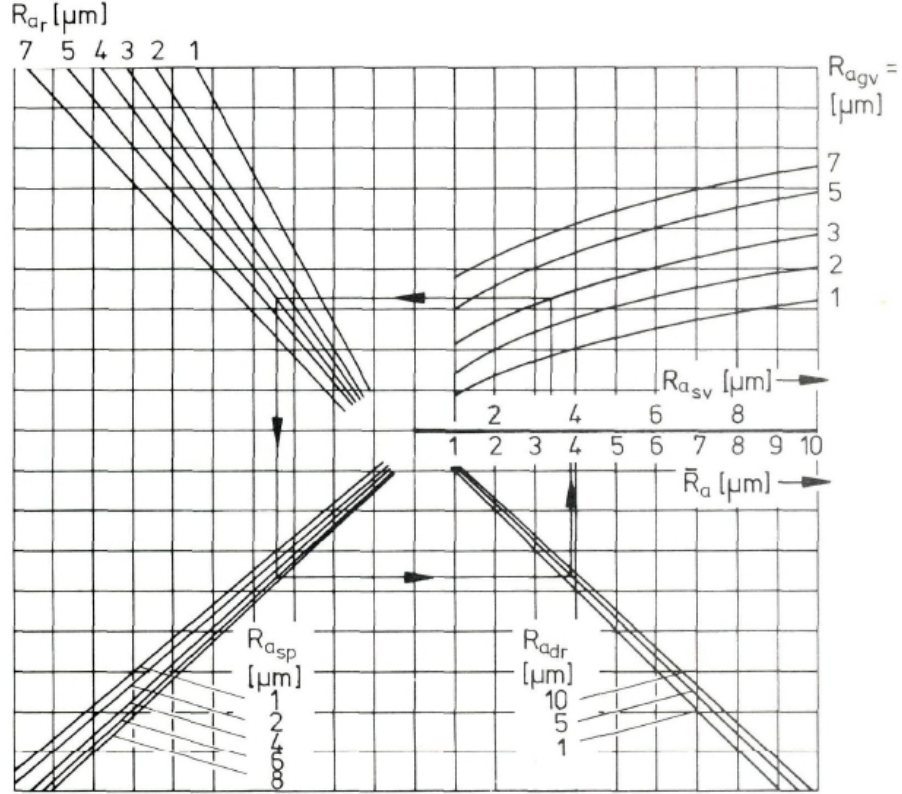
Yüzey pürüzlülüğü değerinin büyük olması, türbin verimliliğini negatif etkiler. Bunun yanı sıra, modelden ölçülen özelliklere dayanarak esas türbinin performans değerlerinin belirlenebilmesi için akışın *hidrolik düzgünlük* göstermesi gerekir[10]. Aksi takdirde, sürtünme kayıplarının, ölçülen ve hesaplanan performans değerlerinde etkisi, elde edilen verinin model türbine uyarlanmasını engelleyecek kadar büyük olur. Bu bağlamda, modelin göstereceği yüzey pürüzlülüğü değeri, hidrolik olarak düzgün bir akış sağlamaya elverecek şekilde olmalıdır.

Türbinlerin farklı parçaları, farklı yüzey pürüzlülüğü değerlerine sahip olabilir. Bu değerler kullanılarak, türbinin eşdeğer yüzey pürüzlülüğü değeri, \bar{R}_a , belirlenir. Şekil 4.15'te özgül hız değeri 20 ila 40 olan Francis türbinleri için eşdeğer yüzey pürüzlülüğü gösteren bir grafik verilmiştir[35].



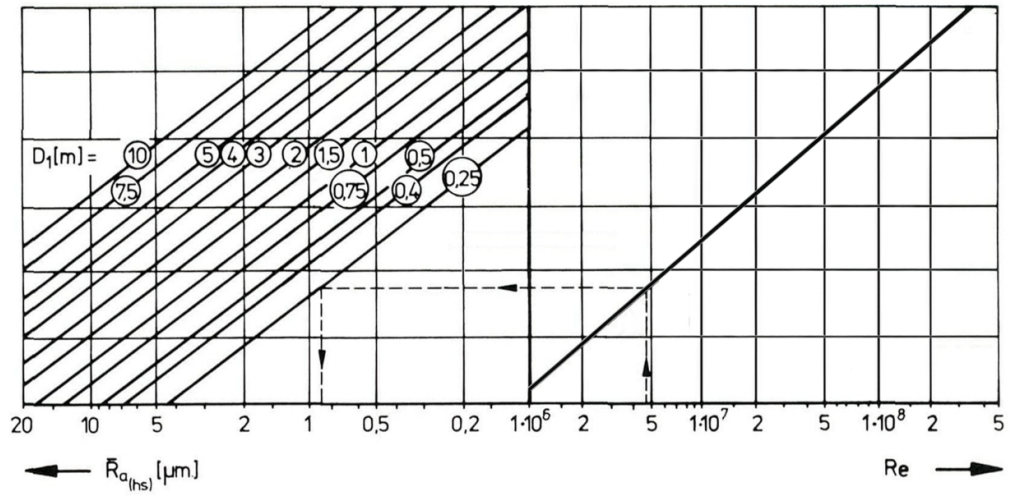
Şekil 4.15. Özgül hızı 20 ila 40 olan Francis türbinleri için \bar{R}_a değerleri[35]

Verilen grafikte, yüzey pürüzlülüğü değerleri, sabit kanatlar için R_{asv} ile ayar kanatları için R_{agv} ile çark için R_{ar} ile salyangoz için R_{asp} ile emme borusu için ise R_{adr} ile gösterilmiştir. Şekil 4.16'da ise özgül hız değeri 40 ila 70 olan Francis türbinleri için aynı grafik verilmiştir.



Şekil 4.16. Özgül hızı 40 ila 70 olan Francis türbinleri için \bar{R}_a değerleri[35]

Türbinin, hidroluk olarak düzgün bir akış sağlayabilmesi için, grafiklerden elde edilen eşdeğer yüzey pürüzlülüğü büyüklüğünün, belirli bir değer altında olması gerekir. Özgül hızı 20 ila 70 arası Francis tipi türbinler için bu değer, $\bar{R}_{a(hs)}$, Şekil 4.17'deki grafikte gösterildiği gibidir.



Şekil 4.17. Francis türbinlerinin hidrolik düzgünlüğü için \bar{R}_a sınır değerleri[35]

5. TESTLERİN UYGULANIŞI

Test işlemi için öncelikle, test edilmesi istenen esas türbinin çalışma aralığı, model boyutu ve mekanik özellikleri ve test düzeneğinin limitleri göz önüne alınarak, model türbin testi için bir çalışma aralığı belirlenir. Belirlenen bu aralık Çizelge 2.1’de gösterilen minimum değerlere uygun olmalıdır. Çalışma aralığı, aşağıda gösterilen parametrelerin sınırlandırılması ile tanımlanır.

- Hız veya özgül enerji
- Debi
- Güç ve/veya tork
- Emmedeki pozitif net enerji

Performans testleri için test aralığı; model türbinin Thoma sayısı, esas türbininki ile eşit veya ondan büyük olacak şekilde seçilmelidir. Model türbin Thoma sayısının esas türbinden yüksek olduğu durumda, performans testleri, kavitasyon etkisini kapsayamaz. Zira model testi esnasında kavitasyon görülmeyen çalışma noktası için esas türbinde kavitasyon görülüyor olabilir. Bu durumda, model türbin için bahsedilen çalışma noktasında gözlenen hidrolik performans, esas türbin açısından anlamsız olur. Bu bağlamda, model test sonuçlarının doğru olabilmesi için kavitasyonun hidrolik performans üzerindeki etkilerinin incelenmesi oldukça önemlidir.

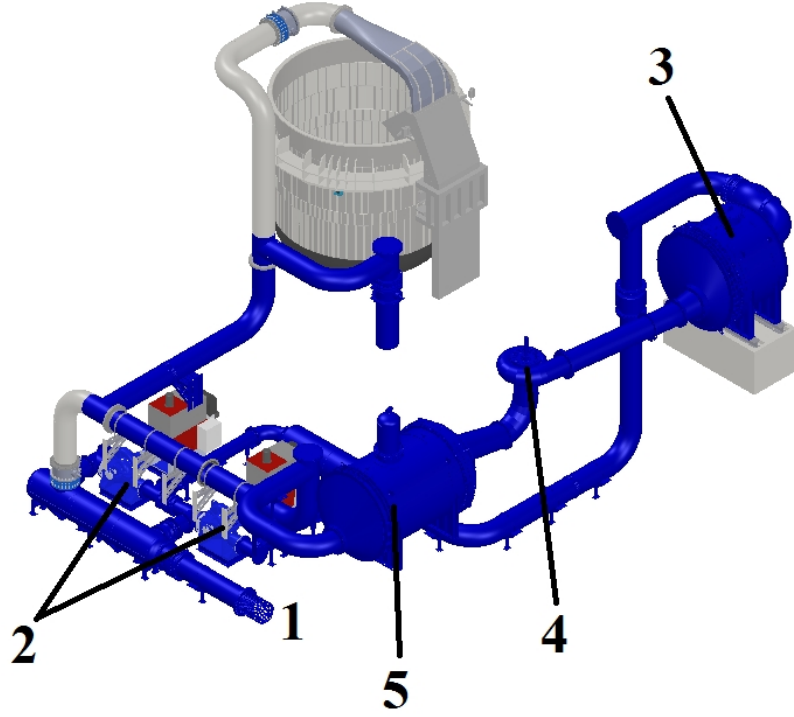
Kavitasyon testleri; kavitasyonun hidrolik performans üzerindeki etkilerini ortaya koymak amacıyla yapılır. Testten elde edilen bilgiler doğrultusunda, kavitasyonun; verimlilik, debi ve güç değerlerini nasıl etkilediği ortaya konur. Ayrıca, esas türbin için kritik bir kavitasyon değeri belirlenerek güvenli bir çalışma aralığı oluşturulması sağlanır.

Performans testleri, mümkün oldukça yüksek özgül enerjiler altında gerçekleştirilmelidir. Bunun sebebi, model türbinin Reynolds sayısını esas türbininkine yaklaştırarak ölçekleme hatalarının minimuma indirilmesidir. Kavitasyon testleri için ise böyle zorunluluklar yoktur. Ancak, özgül enerjinin, ölçüm hassasiyetini etkileyecek kadar düşmemesi istenir.

Test esnasında, farklı çalışma noktalarına ulaşmak için düzenek farklı basınç ve debi değerlerinde çalıştırılabilir, model türbin değişik dönüş hızı ve ayar kanadı açıklıklarında faaliyet gösterebilir. Bu değerler değiştiğinde, ölçüm alınmadan önce, sistemin kararlı hale gelmesi beklenir. Daha sonra ölçülen değerler kayıt altına alınır. Test sonucunda, model türbin için elde edilen debi faktörü, hız faktörü ve Thoma sayısından oluşan boyutsuz değerler hesaplanır. Bu boyutsuz değerler, esas türbin için de geçerlilik gösterir. Model türbin için ölçülen verimlilik ve güç değerleri ise belirli bir düzeltme uygulandıktan sonra esas türbininkilere eşit olur. Bu hesaplamalardan yola çıkarak, esas türbini hidrolik performansını gösteren değerleri elde edilir.

5.1 Açık Çevrim ve Performans Testi

Performans testleri için, düzenek, açık çevrim konfigürasyonunda çalıştırılacaktır. Çevrimin, açık çevrim olarak isimlendirilmesinin sebebi, düzenekten geçen suyun, rezervuardan alınıp rezervuara dönmesidir. Açık çevrim çalışma düzeni Şekil 5.1'de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.1. Açık çevrim

Test esnasında; rezervuardan(1) temin edilen su, pompalar(2) vasıtasıyla yüksek düşü tankına iletilir. Yüksek düşü tankından(3) model türbine(4) gelen su, enerjisini bırakarak model türbini terk eder. Su, model türbinden sonra düşük düşü tankına(5) gider. Düşük düşü tankından ise tekrar rezervuara boşaltılır.

Performans testi, dönüş hızı veya düşü değeri parametresi sabit tutularak yapılır. Bu bağlamda, öncelikle hangi parametrenin sabit tutulacağına karar verilir. Performans testinde, model ve esas türbin arasında Reynolds benzerliği olması, istenen bir durumdur. Ancak genelde bu durum yakalanamaz. Lakin esas türbin için hesaplanan verimlilik ve güç değeri, model ile esas türbinin Reynolds sayıları oranı nispetinde bir düzeltmeye tabi tutulur. Bu bağlamda, performans testlerinin, dönüş hızı parametresi sabit tutularak yapılması önerilir. Bu şekilde, yapılan ölçümlerin tümünde, modelin Reynolds sayısı sabit kalacaktır. En azından, elde edilen sonuçların tümü, aynı oranda düzeltmeye tabi tutulacaktır. Dolayısıyla, model türbinden esas türbine geçişte oluşan hesap hataları bir nebze önlenecektir.

Genelde, aynı çalışma noktasında, model türbin esas türbine göre daha küçük bir Reynolds sayısına sahiptir. Model türbin, esas türbinden daha küçük bir çapta üretildiği için, model türbinde gözlenen sürtünme kayıplarının toplam kayıplara oranı esas türbine göre daha yüksektir. Bu bağlamda, performans testleri esnasında, sürtünmeden kaynaklı kayıpların toplam kayıplar içindeki payının ihmal edilemeyecek kadar yükseklik gösterdiği bahsedilen düzeltmenin uygulanması gerekir.

Kavitasyonun verimlilik üzerindeki etkisinin %0,5'ten yüksek olduğu durumlarda ve ambalman hızı ölçümü gibi verimlilik gözetilmeden yapılan testlerde Reynolds benzerliği dikkate alınmaz.

Sabit tutulacak parametre ve bu parametrenin alacağı değer belirlendikten sonra, ölçüm yapılacak çalışma noktaları ortaya çıkarılır. Bunun için, dönüş hızı veya düşü parametrelerinden sabit tutulmayı için, bütün test aralığını kapsayacak şekilde değerler belirlenir. Daha sonra, bu parametrenin belirlenen her bir değerinde, türbinin ayar kanadı açıları için, kapalı durumdan maksimum açıklık durumuna kadar bütün aralığı tarayacak şekilde açılış değerleri seçilir. Bu şekilde çalışma noktaları ortaya konmuş olur. Belirlenen çalışma noktalarının tümü için; debi, model türbin giriş ve çıkış mutlak basıncı, çark torku, dönüş hızı, su sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve ortam basıncı verileri ölçülecektir.

Test esnasında, öncelikle, en iyi verimlilik noktası, η_{optM} , belirlenir. Bu noktada ölçülen Reynolds sayısı değeri, model türbin verilerinden esas türbin verilerine geçilirken yapılacak düzeltmeye temel oluşturur. Bu değer, Re_{optM} , olarak gösterilmektedir.

Ölçümler yapıldıktan sonra, elde edilen veri için, sistematik ve rastgele belirsizlik oranları incelenecek ve açıklığa kavuşturulacaktır. IEC 60193 standardı uyarınca, rastgele belirsizlik oranı %0,1 değerinin altında olmalıdır.

Elde edilen veriler kullanılarak, model türbinin performansını belirleyen çeşitli parametreler hesaplanacaktır. Bu parametreler, debi Q_M , özgül enerji, E_M , suyun

özgül ağırlığı, ρ_M , mekanik çark gücü, P_{mM} , hidrolik verim, η_{hM} , emmedeki net pozitif enerji, $NPSE_M$, ve Reynolds sayısı, Re_M , olarak sıralanır. Daha sonra, model türbinden elde edilen verinin esas türbinde kullanılabilmesi için, hız faktörü, n_{ED} , debi faktörü, Q_{ED} , ve Thoma sayısı, σ , hesaplanarak ortaya konur.

Bu değerler elde edildikten sonra, Reynolds sayısı göz önüne alınarak çeşitli düzeltmeler yapılması gerekir. Bahsedilen düzeltme; aşağıda gösterilen Denklem 3.1, 3.2 ve 3.3 uyarınca yapılır. Denklemdaki δ_{ref} , $Re=Re_{ref}$ iken oluşan bağlı ölçeklenebilir kayıp değeridir.

$$(\Delta\eta_h)_{M \rightarrow M^*} = \delta_{ref} \left[\left(\frac{Re_{ref}}{Re_M} \right)^{0,16} - \left(\frac{Re_{ref}}{Re_{M^*}} \right)^{0,16} \right] \quad (3.1)$$

$$\delta_{ref} = \frac{1 - \eta_{hoptM}}{\left(\frac{Re_{ref}}{Re_{optM}} \right)^{0,16} + \frac{1 - V_{ref}}{V_{ref}}} \quad (3.2)$$

$$Re_{ref} = 7 \times 10^6 \quad (3.3)$$

Denklemlerde gösterilen V_{ref} değeri, Francis tipi türbinler için 0,7'dir. Eğer aksi bir durum üzerinde anlaşılınmışsa, genellikle, Re_{M^*} , değeri esas türbinin Reynolds sayısı değerine eşit olacak şekilde seçilir.

Düzeltilmiş verim değeri hesaplandıktan sonra, model türbinin, güç katsayısı ve güç faktörü değerleri, bu yeni verim değeri göz önüne alınarak güncellenir. Denklem 3.4 ve 3.5'te bu boyutsuz sayıların yeni değerleri hesaplanmıştır.

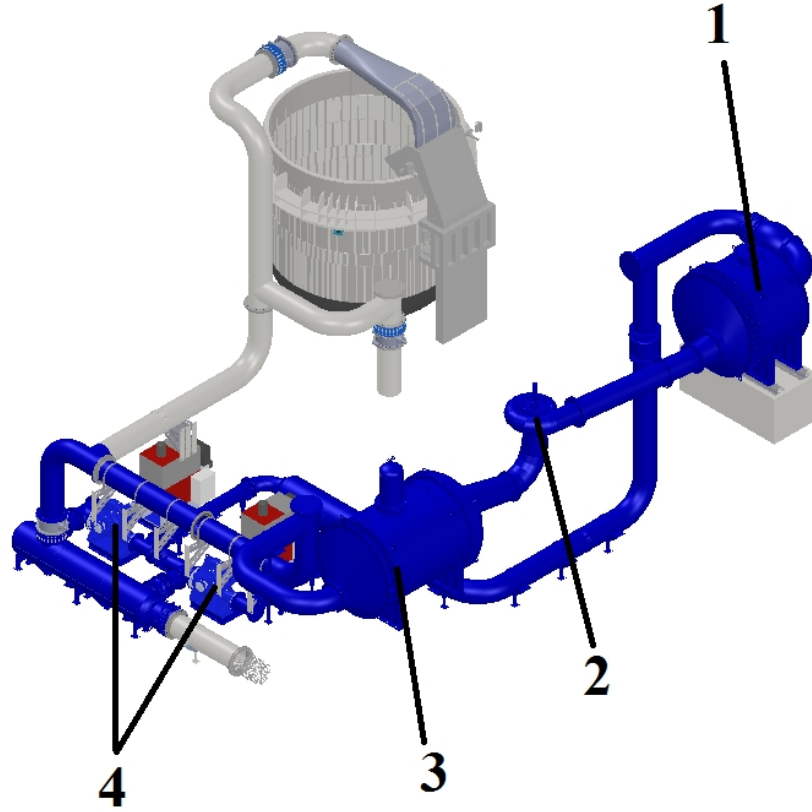
$$P_{ED^*} = P_{ED} \frac{\eta_{hM^*}}{\eta_{hM}} \quad (3.4)$$

$$P_{nD^*} = P_{nD} \frac{\eta_{hM^*}}{\eta_{hM}} \quad (3.5)$$

Denklemlerle gösterilen düzeltme yapıldıktan sonra, esas türbinin performans parametreleri, düzeltilmiş bu parametreler yardımıyla hesaplanır. Hesaplanan performans parametreleri, debi Q_p , özgül enerji, E_p , mekanik çark gücü, P_{mp} , hidrolik verim, η_{hp} , emmedeki net pozitif enerji, $NPSE_p$, olarak sıralanabilir. Sonuç olarak, esas türbinin belirlenen test aralığına karşılık gelen çalışma aralığı boyunca, hidrolik performansı elde edilmiş olur.

5.2 Kapalı Çevrim ve Kaviteasyon Testi

Kaviteasyon testleri için, düzenek, kapalı çevrim konfigürasyonunda çalıştırılacaktır. Çevrimin, kapalı çevrim olarak isimlendirilmesinin sebebi, suyun, rezervuardan bir kez temin edildikten sonra, test boyunca, sistemin içinde kalmasıdır. Kapalı çevrim çalışma düzeni Şekil 5.2’de gösterildiği gibidir.



Şekil 5.2. Kapalı çevrim

Test esnasında, su, yüksek düşü tankından(4) model türbine(5), oradan da düşük düşü tankına(6) gider. Düşük düşü tankından pompalara (2) giden su buradan yüksek düşü tankına tekrar basılır.

Kavitasyon testleri ise, dönüş hızı veya debi değeri parametresi sabit tutularak yapılır. Özgül enerjisi düşük türbinler, kavitasyon testine tabi tutulurken, model türbin ile esas türbinin Froude sayıları açısından benzerlik göstermesi gerekir. Bu durumun bir başka biçimde ifade edilişi de şudur: Eğer esas türbinin boyutları, esas türbinin düşüsü karşısında önem arz edecek kadar büyükse Froude benzerliği uygulanması gerekir. Froude benzerliği uygulanması gereken durumda, debi değerinin sabit tutulması gerekebilir.

Test işlemi için, öncelikle hangi parametrenin sabit tutulacağına karar verilmesi gerekir. Daha sonra sabit tutulacak olan bu parametreye; test aralığı, model türbin boyutu ve test düzeneğinin özellikleri göz önünde bulundurularak bir değer verilir. Sabit tutulacak parametre ve bu parametrenin alacağı değer belirlendikten sonra, ölçüm yapılacak çalışma noktaları ortaya çıkarılır. Çalışma noktalarının tanımlanması için, öncelikle, test esnasında uygulanacak türbin ayar kanadı açıklıkları, kapalı durumdan maksimum açıklık durumuna kadar bütün aralığı tarayacak birçok açı değeri seçilmesi suretiyle belirlenir. Daha sonra, her bir ayar kanadı açıklık açısı için, türbin çıkışındaki mutlak basınç büyüklükleri, normalde ölçülen değer ile seçilen minimum bir değer arasındaki aralığı tarayacak şekilde seçilir. Bu minimum değer test düzeneğinin çalışma kararlılığını ve ölçüm cihazlarının doğruluğunu etkilemeyecek şekilde belirlenmelidir. Bu şekilde çalışma noktaları ortaya konmuş olur. Görüldüğü üzere, kavitasyon testi, türbinin bahsedilen tüm çalışma aralığı için Thoma sayısı değerini değiştirmek ve bunun etkilerini incelemek üzerine kurulmuştur.

Test esnasında, türbin çıkışındaki mutlak basınç değerini düşürebilmek için vakum pompasından yardım alınır. Belirlenen çalışma noktalarının tümü için; debi, model türbin giriş ve çıkış mutlak basıncı, çark torku, dönüş hızı, su sıcaklığı, ortam sıcaklığı ve ortam mutlak basıncı verileri ölçülecektir. Ayrıca, şeffaf çıkış konisi

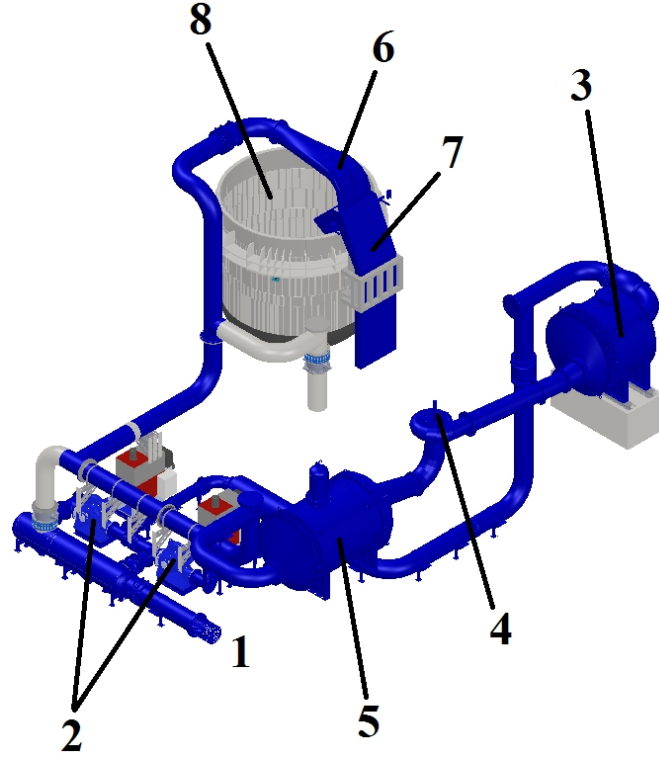
yardımla, çark çıkışında görüntü kaydı alınacaktır. Bu vesileyle, Thoma değerleri değıştikçe kavitasyonun oluşumu ve oluşma biçimi incelenmiş olacaktır.

Elde edilen verilerin kullanılmasıyla, model çarkın kavitasyon oluşumundan ne şekilde etkilendiğı anlaşılır. Bunun için, hidrolik performansa dair belirli kriterlerin Thoma sayısı değışiminden nasıl etkilendiklerinin ortaya konması gerekir. Bu bağlamda, hidrolik performansı belirleyen çeşitli parametreler hesaplanacaktır. Bu parametreler, debi Q_M , özgül enerji, E_M , mekanik çark gücü, P_{mM} , hidrolik verim, η_{hM} , değerleridir.

Belirtilen parametrelerle Thoma sayısı ilişkisi ortaya konduktan sonra, test aralığını kapsayacak şekilde, kritik Thoma sayısı değerleri belirlenir. Bunun için, model türbinin Thoma sayısının esas türbinle aynı olduğu andaki verim değeri referans alınır. Bu referans değerinin %1 düşüş gösterdiği noktadaki Thoma sayısı değeri, o çalışma noktası için kritik Thoma sayısı değeridir.

5.3 Kalibrasyon Çevrimi ve Debimetrenin Kalibrasyonu

Sistemde bulunan debimetrenin kalibre edilebilmesi için, düzenek kalibrasyon çevrimi modunda çalıştırılır. Bu çevrimde; rezervuardan alınan su, belirlenen zaman aralığı boyunca kalibrasyon tankına akar, diğer zamanlarda rezervuara döner. Çevrimin çalışma düzeni Şekil 5.3'te gösterildiğı gibidir.



Şekil 5.3. Kalibrasyon çevrimi

Çevrim esnasında; rezervuardan(1) alınan su, pompalar(2) vasıtasıyla yüksek düşü tankına(3) basılır. Yüksek düşü tankından model türbine(4) giden su, oradan da düşük düşü tankına(5) aktarılır. Su, düşük düşü tankından lüleye(6) iletilir. Bu aşamada; su, ayırıcı mekanizma(7) tarafından, seçilen zaman aralığı boyunca kalibrasyon tankına(8) diğer zamanlarda rezervuara aktarılır.

Kalibrasyon işlemi için, öncelikle kalibrasyon tankının boş ağırlığı belirlenir. Daha sonra, sistem, debimetre tarafından ölçülecek maksimum debi miktarı altında çalıştırılır. Bu esnada, ayırıcı, lüleden gelen suyu rezervuara iletmektedir. Sistemdeki akış, sabit bir debi değeri yakalayarak kararlı hale gelene kadar ayırıcı belirtilen pozisyonda kalır. Daha sonra, belirlenen bir anda, ayırıcının yönü değiştirilerek akışın kalibrasyon tankına aktarılması sağlanır. Aynı anda, zaman ölçümüne başlanır. 100 saniye boyunca Seçilen zaman aralığı boyunca doldurulan kalibrasyon tankının ağırlığı ölçülerek debimetre kalibre edilir.

5.4 Benzetim ve Hesaplama

Bir model türbinin benzetimi ve çalışma noktalarının belirlenmesi süreçlerini örneklemek amacıyla iki hidroelektrik santral seçilmiştir. Bunlardan ilki Three Gorges HES[4] ikincisi ise Keban HES'tir. Her iki barajda da Francis tipi türbinler kullanılmaktadır. Türbin özellikleri Çizelge 5.1'de gösterildiği gibidir[38][39].

Çizelge 5.1. Three Gorges HES ve Keban HES türbin özellikleri[38][39]

	Three Gorges HES	Keban HES
Çark Çapı (mm)	10427	4300
Debi (m³/s)	950	145,9
Maksimum Düşü (m)	113	154
Nominal Düşü (m)	80.6	145
Minimum Düşü (m)	71	118
Dönüş Hızı (rpm)	75	166,67
Nominal Güç (MW)	778	183

Three Gorges HES, Çin'in Sandouping kentinde yer almaktadır. 2008 yılında devreye alınan bu elektrik santrali, 22500 MW kurulu gücüyle dünyanın en yüksek kurulu güce sahip HES'idir. Santralde 32 adet türbin bulunmaktadır. Santral, test merkezinin deney kapasitesini ortaya koyabilmek amacıyla örnek olarak seçilmiştir.

Keban HES, 1330 MW kurulu gücüyle Türkiye'nin ilk büyük enerji yatırımlarındandır. Kurulduğu tarihte Türkiye'nin toplam elektrik üretiminin %20'sini gerçekleştirecek kapasitededir[36]. 1974 yılında ilk 4 ünitesi 1981 yılında ise diğer 4 ünitesi devreye alınan Keban HES günümüzde rehabilitasyona ihtiyaç duymaktadır[37]. Rehabilitasyon için ihale yapılmış, 245 milyon TL bedel ile sonuçlanmıştır. Keban HES, test merkezinin ekonomik açıdan ülkeye sağlayabileceği katkıyı göstermek amacıyla seçilmiştir.

İki türbin için de verilen debi, dönüş hızı, çap değerleri ile birlikte üç farklı düşü değeri kullanılarak üçer çalışma noktası belirlenecektir. Bu noktalarda benzerliği kurmak için, Denklem 2.41 ve 2.42’de gösterilen hız faktörü ve debi faktörü değerleri hesaplanacaktır. Three Gorges HES için çalışma noktaları Çizelge 5.2’de gösterildiği gibidir.

Çizelge 5.2. Three Gorges HES çalışma noktaları

	TGÇN 1	TGÇN 2	TGÇN 3
Düşü (m)	113	80,6	71
Debi (m³/s)	950	950	950
Dönüş Hızı (rpm)	75	75	75
Çark Çapı (mm)	10427	10427	10427
Hız Faktörü	0,391	0,464	0,494
Debi Faktörü	0,262	0,311	0,331

Keban HES için ise çalışma noktaları Çizelge 5.3’te gösterildiği gibidir.

Çizelge 5.3. Keban HES çalışma noktaları

	KÇN 1	KÇN 2	KÇN 3
Düşü (m)	154	145	118
Debi (m³/s)	145,9	145,9	145,9
Dönüş Hızı (rpm)	166,67	166,67	166,67
Çark Çapı (mm)	4300	4300	4300
Hız Faktörü	0,307	0,317	0,351
Debi Faktörü	0,203	0,209	0,232

Her iki türbin için de merkezde kullanılan imalat tezgâhlarının kapasitesi doğrultusunda 650 mm çapında model türbinler üretilebilir. Bu durumda, model türbinler için yukarıdaki çizelgelerde gösterilen çalışma noktalarına karşılık gelen noktalar hız ve debi faktörü değerlerinden yararlanılarak hesaplanır. Test edilecek çalışma noktaları belirlenirken IEC 60193 standardı önerisi doğrultusunda, dönüş hızı değeri sabit tutulmuştur. Hesaplanan çalışma noktaları Çizelge 5.4'te gösterildiği gibidir.

Çizelge 5.4. Test edilecek çalışma noktaları

	TGÇN 1	TGÇN 2	TGÇN 3	KÇN 1	KÇN 2	KÇN 3
Hız Faktörü	0,391	0,464	0,494	0,307	0,317	0,351
Debi Faktörü	0,262	0,311	0,331	0,203	0,209	0,232
Düşü (m)	40,57	28,81	25,41	45,70	42,86	34,96
Debi (m³/s)	2,21	2,21	2,21	1,82	1,81	1,82
Dönüş Hızı (rpm)	720	720	720	600	600	600
Çark Çapı (mm)	650	650	650	650	650	650

6. DEĞERLENDİRME

Tez çalışmasında, Francis tipi su türbinlerinin test edilebilmesi amacıyla kullanılacak bir deney düzeneği tasarlanmıştır. Düzenekte test edilecek model türbinlerin tasarım metodolojisi belirlenmiştir. Testlerin yapılış biçimleri açıklanmıştır. Tez kapsamında tasarlanan düzenek ve model türbin ile ortaya konulan test yöntemi IEC 60193[10] standardına uygun olacak şekilde yapılmıştır.

Test düzeneği; bir model türbini belirlenen düşü ve debi değerlerinde çalıştırarak basınç, debi, tork gibi değerlerin ölçümünü yapacaktır. Bu şekilde, model türbinin performansı analiz edilecektir. Ayrıca, deneyler esnasında, model türbin üzerinde cebren bir kavitasyon oluşturulacak ve kavitasyonun performans üzerindeki etkileri incelenecektir. Tasarlanan düzenek; bahsedilen bu deneyleri, IEC 60193[10] standardında detaylı bir biçimde belirlenmiş kriterlere uygun olarak yapabilme kapasitesine sahiptir.

Düzenek, üzerinde bulunan iki adet pompa vasıtasıyla çalıştırılacaktır. Pompalar, suyu basınçlandırarak model türbinin hemen öncesinde yer alan yüksek düşü tankına basacaktır. Basınçlı su yüksek düşü tankından model türbine iletilecektir. Burada, suyun taşıdığı enerji türbin çarkına aktarılacaktır. Su, model türbinden düşük düşü tankına geçecektir.

Düzenek hidrolik olarak modellenmiş ve analiz edilmiştir. Bu bağlamda, çalışma debisine göre kayıplar hesaplanmış ve düzeneğin testleri gerçekleştirebileceği aralık belirlenmiştir. Yapılan örnek hesaplamalar sonucu düzeneğin, 2015 yılı itibariyle dünyanın en yüksek kurulu güce sahip hidroelektrik santrali olan Three Gorges HES'i mevcut kapasitesi ile test edebileceği görülmüştür.

Performans testleri esnasında, düzenekten geçen su, açık bir rezervuardan alınacak ve tekrar bu rezervuara boşaltılacaktır. Bu testin yapılabilmesi için deney düzeneği açık çevrim konfigürasyonunda çalıştırılacaktır. Kavitasyon testlerini gerçekleştirebilmek için ise, deney düzeneği bir kere suyla doldurulduktan sonra

rezervuar ile olan bağlantı kesilecek ve bu sayede sistem kapalı devre olarak çalışacaktır. Bu test ise deney düzeneğini kapalı çevrim konfigürasyonunda çalıştırmak suretiyle gerçekleştirilecektir. Her iki çevrim durumunda da pompalar seri veya paralel olarak kullanılabilir. Bu sayede, model türbinin test edilmesi gereken debi ve düşü değerleri için deney yapabilmeye kapasitesi oldukça geniş bir aralığı kapsayacaktır.

Deney sonuçları, sistem üzerine yerleştirilmiş ölçüm cihazlarından elde edilen veriler kullanılarak belirlenecektir. Debi ölçümü elektromanyetik debimetre kullanılarak yapılacaktır. Model türbinin giriş ve çıkış noktalarına yerleştirilecek olan basınç tapaları kullanılarak bu noktalardaki mutlak basınç değerleri ölçülecektir. Düzenekten geçen suyun ve ortamın sıcaklık ölçümü yapılacaktır. Model türbinin bağlandığı jeneratörün şasisi üzerine yerleştirilen bir kuvvet kolu vasıtasıyla çark torku ölçümü yapılacaktır. Türbin mili üzerinden devir sayısı değeri ölçülecektir. Ayrıca, deneyde kullanılan suyun içindeki hava miktarı ölçülerek belirlenecektir. Düzenekte kullanılan ölçüm cihazları; sadece ağırlık, uzunluk ve zaman ölçümüne dayanan yöntemler kullanılarak kalibre edilecektir.

Model türbin, IEC 60193[10] standardında titizlikle belirlenen özellikleri haiz olacak şekilde tasarlanacak ve üretilecektir. Tez kapsamında, tasarım metodolojisi belirlenmiş ve örnek bir model türbin tasarımı anlatılmıştır. Tasarım yöntemi kapsamında, 3 boyutlu modeller istemlere uygun bir biçimde tasarlanma metodu ortaya konmuş ve montaj işleminin yapılaş biçimi belirlenerek anlatılmıştır. Ayrıca, üretilecek modelin sağlaması gereken boyutsal özellikler ve yüzey pürüzlülüğü değerleri belirlenmiştir. Boyutsal kontrol amacıyla yapılacak ölçümlerin yöntemi açıklanmıştır.

Performans ölçümü yapılırken, model türbinin dönüş hızı veya düşü değeri önceden belirlenmiş bir değerde sabitlenecektir. Daha sonra, bu iki değerden sabit olarak belirlenmemiş olanı ve ayar kanat açıklık değerleri değiştirilerek model türbin çalıştırılacak bu şekilde istenen test aralığının tamamını kapsayacak şekilde performans ölçümü yapılacaktır. Deneyin gerçekleştirildiği çalışma noktalarının

tümü için, model türbin giriş ve çıkışındaki mutlak basınç değerleri, debi değeri ve çark torku değeri kullanılarak; türbinin gücü ve verimliliği ölçülecektir.

Kavitasyon testi esnasında ise dönüş hızı ya da debi değeri sabit tutulacaktır. Sabit tutulan bu değer altında, ayar kanat açıklık değerleri değiştirilecek ve her bir açıklık değeri için türbin çıkışındaki mutlak basınç değerleri düşürülerek kavitasyon oluşturulacak ve oluşan kavitasyon gözlenecektir. Türbin çıkış basıncını istenen seviyelere kadar düşürebilmek için, düşük düşü tankı üzerine yerleştirilmiş bir vakum pompasından yararlanılacaktır. Test esnasında, model türbin giriş ve çıkışındaki mutlak basınç değerleri, debi değeri ve çark torku ölçülecek, bu ölçümlerden yararlanarak, türbin gücü ve verimliliğinin yanı sıra, NPSE ve Froude sayısı değerleri belirlenecektir. Ayrıca, model türbin çıkışında bulunan şeffaf koni aracılığıyla kavitasyon oluşumu gözlenecek ve kayıt altına alınacaktır. Bu sayede, türbinin kavitasyon karakteristikleri ve kavitasyonun performans üzerindeki etkileri belirlenecektir.

Deney düzeneği tamamlanarak işler hale getirildikten sonra, yapılacak deneylerde elde edilen tecrübe kullanılarak, ölçüm hatalarının kaynağı doğru bir biçimde analiz edilebilir. Bu noktada, uygulanan ölçüm ve test yöntemleri güncellenerek değiştirilebilir. Model türbin tasarım ve üretim süreçlerinin, deney sonuçları üzerinde olan etkileri gözlenerek, model türbin üretimi için farklı bir metodoloji ortaya çıkarılabilir. Bu bağlamda, tasarım ve montaj yöntemleri değiştirilerek test sonuçlarının doğruluğunu daha az etkileyecek tasarım yöntemleri kullanılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] D. Arvizu, T. Bruckner, H. Chum, O. Edenhofer, S. Estefen, A. Faaij, M. Fischedick, G. Hansen, G. Hiriart, O. Hohmeyer, K. G. T. Hollands, J. Huckerby, S. Kadner, Å. Killingtveit, A. Kumar, A. Lewis, O. Lucon, P. Matschoss, L. Maurice, M. Mirza, C. Mitchell, W. Moomaw, J. Moreira, L. J. Nilsson, J. Nyboer, R. Pichs-Madruga, J. Sathaye, J. L. Sawin, R. Schaeffer, T. A. Schei, S. Schlömer, K. Seyboth, R. Sims, G. Sinden, Y. Sokona, C. von Stechow, J. Steckel, A. Verbruggen, R. Wiser, F. Yamba, ve T. Zwickel, “Technical Summary”, içinde *IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation*, O. Edenhofer, R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, K. Seyboth, P. Matschoss, S. Kadner, T. Zwickel, P. Eickemeier, G. Hansen, S. Schlömer, ve C. von Stechow, Ed. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2011.
- [2] L. Gagnon, C. Belanger, ve Y. Uchiyama, “Life-cycle assessment of electricity generation options: the status of research in year 2001”, *Energy Policy*, c. 30, sayı 14, ss. 1267–1278, 2002.
- [3] J. Raabe, *Hydro power: the design, use, and function of hydromechanical, hydraulic, and electrical equipment*. VDI-Verlag, 1985.
- [4] J. Wu, J. Huang, X. Han, X. Gao, F. He, M. Jiang, Z. Jiang, R. B. Primack, ve Z. Shen, “The Three Gorges Dam: an ecological perspective”, *Front. Ecol. Environ.*, c. 2, sayı 5, ss. 241–248, Haziran 2004.
- [5] EÜAŞ Elektrik Üretim AŞ, “2013 Yıllık Rapor”, EÜAŞ, Ankara, 2013.
- [6] P. Gadonneix, Y. D. Kim, K. Meyers, G. Ward, ve C. Frei, “World Energy Resources 2013”, *World Energy Council. Cons. Mond. L’Energie*, 2013.
- [7] Türkiye Elektrik İletim AŞ, “Türkiye Elektrik Enerjisi 5 Yıllık Üretim Kapasite Projeksiyonu (2014 – 2018)”, Ankara, 2014.
- [8] Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi, “Türkiye Enerji Raporu 2013”, Poyraz Ofset, Ankara, 2014.
- [9] E. Cabrera, V. Espert, ve F. Martínez, *Hydraulic Machinery and Cavitation: Proceedings of the XVIII IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Cavitation*. Springer Netherlands, 2015.
- [10] International Electrotechnical Commission, *IEC 60193:1999 Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - Model acceptance tests*. 1999.

- [11] B. Kavurmaci, H. Akin, E. Ayli, K. Celebioglu, ve S. Aradag, “Design of an experimental test stand for francis type hydraulic turbines”, içinde *Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2013 Fourth International Conference on*, 2013, ss. 876–880.
- [12] E. Ayli, B. Kavurmaci, K. Celebioglu, ve S. Aradag, “Design and Construction of an Experimental Test Rig for Hydraulic Turbines”, içinde *ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2014, ss. V002T09A001–V002T09A001.
- [13] G. I. Krivchenko, *Hydraulic machines: turbines and pumps*. Lewis Publishers, 1994.
- [14] Y. A. Çengel ve J. M. Cimbala, *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill Higher Education, 2010.
- [15] X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat, F. Avellan, ve M. Coussirat, “Detection of cavitation in hydraulic turbines”, *Mech. Syst. Signal Process.*, c. 20, sayı 4, ss. 983–1007, 2006.
- [16] H. Başeşme, *Hidroelektrik santrallar ve hidroelektrik santral tesisleri*. EÜAŞ Genel Müdürlüğü Hidrolik Santraller Dairesi Başkanlığı, 2003.
- [17] S. L. Dixon, *Fluid Mechanics and Thermodynamics of Turbomachinery*. Butterworth-Heinemann, 1998.
- [18] J. B. Francis, *Lowell hydraulic experiments*. 1868.
- [19] M. Heitele, T. Helmrich, M. Maihöfer, ve A. Ruprecht, “New Insight into an Old Product by High Performance Computing”, içinde *5th European SGI/CRAY MPP Workshop, Bologna*, 1999.
- [20] P. Drtina ve M. Sallaberger, “Hydraulic turbines—basic principles and state-of-the-art computational fluid dynamics applications”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, c. 213, sayı 1, ss. 85–102, 1999.
- [21] EPFL-LMH, “Hydraulic Machine Experimental Test Rigs - LMH.” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://lmh.epfl.ch/page-57350-en.html>. [Erişim: 30 Temmuz 2015].
- [22] EPRI ve US Department of Energy, “Fish Friendly” *Hydropower Turbine Development and Deployment: Alden Turbine Preliminary Engineering and Model Testing*. Palo Alto CA, 2011.
- [23] ANSYS Inc., “ANSYS® CFX Academic Research, Release 15.0.” .

- [24] Dassault Systèmes, “CATIA v6®.” .
- [25] “DMU 65 monoBLOCK®.” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://tr.dmgmori.com/ueruenler/freze-teknolojisi/5-eksenli-ueniversal-i%C5%9Flleme-merkezleri/dmu-monoblock/dmu-65-monoblock>. [Erişim: 01 Mayıs 2015].
- [26] “NTX 2000 Yüksek Hassasiyetli Yüksek Verimlilikli Entegre Freze-Torna Merkezi.” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://tr.dmgmori.com/ueruenler/torna-teknolojisi/turn-mill-eksiksiz-i%C5%9Flleme-merkezleri/ntx/ntx2000>. [Erişim: 01 Mayıs 2015].
- [27] “DEA GLOBAL Silver Performance.” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: http://www.dea.it/DEA-GLOBAL-Silver-Performance_541.htm#.VVBh8ZP098E. [Erişim: 01 Mayıs 2015].
- [28] “High voltage modular induction motors.” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://new.abb.com/motors-generators/high-voltage-induction-motors/modular-induction-motors>. [Erişim: 02 Mayıs 2015].
- [29] I. S. O. Standard, “4185: Liquid flow measurement in closed conduits–Weighing method”, *Int. Organ. Stand.*, 1980.
- [30] “Sartorius Precision Compression Load Cell PR 6201.” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.sartorius-intec.com/en/applications/filling/precision-compression-load-cell-pr-6201/>. [Erişim: 01 Mayıs 2015].
- [31] H. Cetinturk, F. Z. Aytac, Y. Tascioglu, K. Celebioglu, ve S. Aradag, “Design of a Flow Diverter Mechanism and a Nozzle for a Hydro Turbine Experimental Test Rig”, içinde *ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2014, ss. V002T11A007–V002T11A007.
- [32] “SITRANS F M MAG 5100 W.” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://w3.siemens.com/mcms/sensor-systems/en/process-instrumentation/flow-measurement/electromagnetic/pulsed-dc-meters/sensors/pages/sitrans-f-m-mag-5100-w-for-water-applications.aspx>. [Erişim: 01 Mayıs 2015].
- [33] Bentley, “WaterCad V8i.” .
- [34] Dassault Systèmes SolidWorks Corp., “SolidWorks.” .
- [35] J. Osterwalder ve L. Hippe, “GUIDELINES FOR EFFICIENCY SCALING PROCESS OF HYDRAULIC TURBOMACHINES WITH DIFFERENT

TECHNICAL ROUGHNESSES OF FLOW PASSAGES”, *J. Hydraul. Res.*, c. 22, sayı 2, ss. 77–102, Mart 1984.

- [36] DSİ, “Keban Barajı - DSİ Genel Müdürlüğü.” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <http://www.dsi.gov.tr/projeler/keban-baraj%C4%B1>. [Erişim: 30 Temmuz 2015].
- [37] EÜAŞ Ticaret Dairesi Başkanlığı, “EÜAŞ İHALE İLANI - KEBAN HES’in 8 (sekiz) Ünitesinin Rehabilitasyonu.” [Çevrimiçi]. Erişim adresi: <https://www.turkiye.gov.tr/kik-ihale-sorgula?asama=detay&kayitNo=2014/58130&sf=0>. [Erişim: 30 Temmuz 2015].
- [38] M. Doutreligne, “Water as source as conflict: The Three Gorges Dam”, 2008.
- [39] A. Dinçel ve N. Taylan, “KEBAN PROJESİ VE ENTERKONNEKTE SİSTEMİMİZ”, *Elektr. Mühendisliği*, c. 135, ss. 11–29, 1968.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : KAVURMACI, Berat Çağrı
Uyruğu : T.C.
Doğum tarihi ve yeri : 01.04.1988, Aksaray
Medeni hali : Evli
Telefon : 0 (532) 157 01 47
e-mail : bkavurmaci@etu.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2015
Lisans	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü	2012
Lise	Ankara Fen Lisesi	2005

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2012–	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Su Türbinleri Tasarım ve Testleri Merkezi	Mühendis
2012	Su Enerji Mühendislik ve Enerji Hizmetleri	Stajyer
2010	Selamoğlu Makine	Stajyer
2008	Nabay Tekstil A.Ş.	Stajyer

Yabancı Dil

İngilizce (ileri düzeyde), Almanca (temel düzeyde)

Yayınlar

Uluslararası Konferans Yayınları

Ayli, E., Kaplan, A., Cetinturk, H., **Kavurmaci, B.**, Demirel, G., Celebioglu, K., Aradag, S., “CFD Analysis of 3D Flow for 1.4 MW Francis Turbine and Model Turbine Manufacturing”, ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference (IDETC/CIE 2015), Ağustos 2015.

Ayli, E., **Kavurmaci, B.**, Cetinturk, H., Kaplan, A., Celebioglu, K., Aradag, S., Tascioglu, Y., “Design and Construction of a Hydroturbine Test Facility”, 67th Annual Meeting of the APS Division of Fluid Dynamics, Kasım 2014.

Ayli, E., **Kavurmaci, B.**, Celebioglu, K., Aradag, S., “Design and Construction of an Experimental Test Rig for Hydraulic Turbines.”, ASME 2014 12th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis, Temmuz 2014.

Kavurmaci, B., Aytac, Z., Akin, H., Ayancik, F., Celebioglu, K., Aradag, S., “Design and Analyses of a Pressure Reducing Valve Integrated to a Francis Turbine for a Pre-Existing Penstock”, The International Congress and Trade Fair on Small Hydropower, Mayıs 2014.

Aytac, Z., **Kavurmaci, B.**, Celebioglu, K., Aradag, S., Tascioglu, Y., “TOBB ETU Hydro Research Center – Capabilities and Challenges”, The International Congress and Trade Fair on Small Hydropower, Mayıs 2014.

Kavurmaci, B., Akin, H., Ayli, E., Celebioglu, K., Aradag, S. “Design of an experimental test stand for francis type hydraulic turbines”, 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Mayıs 2013.

Ozkaya, E., Akin, H., **Kavurmaci, B. C.**, Celebioglu, K., Aradag, S., ”CFD Aided Design of Hydraulic Turbines through University-Industry Collaboration”, 2. Mühendislik Eğitim Uluslararası Konferansı (MEUK), Ekim, 2012.

Ulusal Konferans Yayınları

Ayli, E., **Kavurmaci, B.**, Akin, H., Aytac, Z., Ayancik, F., Aradag, U., Mert, B., Celebioglu, K., Aradag, S., Unver, O., Tascioglu, Y., “Su Türbini Tasarımı ve Testleri Merkezi”, Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Konferansı (ULIBTK 2013), Eylül 2013.