

TOBB EKONOMİ VE TEKNOLOJİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**KEPEZ HİDROELEKTRİK SANTRALİ' NİN SAHA ÖLÇÜMLERİ
VE SAYISAL BAZLI HİDROLİK ANALİZİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Gülsevim SEPETCİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Selin ARADAĞ

ARALIK 2017

Fen Bilimleri Enstitüsü Onayı

.....
Prof. Dr. Osman EROĞUL
Müdür

Bu tezin Yüksek Lisans/Doktora derecesinin tüm gereksinimlerini sağladığını onaylarım.

.....
Doç. Dr. Murat Kadri AKTAŞ
Anabilimdalı Başkanı

TOBB ETÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 151511029 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Gülsevim SEPETCİ**' nin ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "**KEPEZ HİDROELEKTRİK SANTRALİ'NİN SAHA ÖLÇÜMLERİ VE SAYISAL BAZLI HİDROLİK ANALİZİ**" başlıklı tezi **07.12.2017** tarihinde aşağıda imzaları olan jüri tarafından kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Selin ARADAĞ**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Eş Danışman : **Dr. Kutay ÇELEBİOĞLU**
TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Zafer BOZKUŞ (Başkan)**
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Ekin ÖZGİRGİN YAPICI
Çankaya Üniversitesi

TEZ BİLDİRİMİ

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

Gülsevim SEPETCİ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

KEPEZ HİDROELEKTRİK SANTRALİ'NİN SAHA ÖLÇÜMLERİ VE SAYISAL BAZLI HİDROLİK ANALİZİ

Gülsevim SEPETCİ

TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Selin ARADAĞ

Tarih: Aralık 2017

Bu tez çalışmasında, Antalya'da bulunan Kepez-1 Hidroelektrik Santrali Rehabilitasyon Projesi'nin kavramsal tasarımı gerçekleştirilmiştir. MİLHES adlı Tübitak Kamag projesinin amacı, santralin tüm bileşenlerini yerli imkanlarla yenileyerek, günümüz tasarım yaklaşımlarıyla yeni bir tasarım yaparak mevcut santralin gücünü ve verimini artırmaktır. Projenin faaliyet alanı, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) destekli su türbini tasarımını, model üretim ve testini, prototip üretim ve montajını, generatör ve SCADA sistemini kapsamaktadır. Kavramsal tasarım çalışmaları, projenin ilk adımı olup, hidrolik türbin tasarımı, kavramsal tasarım çalışmalarını baz alarak gerçekleştirilmiştir. Mevcut santral, hidrolik türbinin en önemli iki tasarım parametresi olan debi ve hidrolik yük değerleri hedeflenerek modellenmiştir. Modellerde Manning's sürtünme eşitliği kullanılmıştır. Bu modeller, santralin başlangıç noktası olan rezervuardan türbinin girişine kadar olan detayları içermektedir. Bu detaylar için kaynaklar, saha inceleme çalışmaları ve santral teknik resimleridir. Bilgisayar ortamında oluşturulan modellerin doğrulanması için

saha testleri gerçekleştirilmiştir. Bunlar debi, hidrolik yük, verim ve güç ölçüm testleridir. Test sonuçlarının, model sonuçlarıyla karşılaştırılması sonucu literatürde bulunmayan kirecin sürtünme katsayısına bir yaklaşım oluşturulmuştur. Farklı debilerde borularda oluşan kayıp değişeceğinden, türbine kalan hidrolik yükler de değişecektir. Bu sebeple farklı debilerdeki hidrolik yükler doğrulanan modellerle hesaplanmıştır. Debi ve hesaplanan hidrolik yük, hidrolik türbin tasarımında kullanılan iki ana parametredir. Bunların ışığında türbinin çalışabileceği çalışma aralığı eğrisi çıkarılmış, tasarlanacak yeni türbinin tasarım debi ve hidrolik yükü belirlenmiştir. Bunlara ek olarak doğrulanan modelin zamana bağlı çözümleri gerçekleştirilmiş ve su darbesi etkisi ölçülmüştür. Su darbesi hesabı için kullanılan modellerin doğruluğu için sahada ani kapanma testleri gerçekleştirilmiş ve modelden zamana bağlı basınç eğrilerinin testlerle örtüşmesi beklenmiştir. Saha testleri ve bilgisayar ortamında oluşturulan modelin karşılıklı iterasyonu sonucunda, su darbesi zamana bağlı analiz sonuçları, santralde bulunan PRV'ye (Basınç Düzenleme Vanası) ve türbin önünde bulunan sürgülü vanaya girdiler oluşturmuştur. Tüm bu sonuçlar daha yüksek verimli ve daha yüksek güç üretebilen su türbini tasarımı için temel oluşturmuştur.

Anahtar Kelimeler: Su türbini, Su darbesi, Manning's sürtünme katsayısı, Boru hattı sistemleri, Basınç düzenleme vanası, Denge bacası

ABSTRACT

Master of Science

HYDRAULIC ANALYSIS OF KEPEZ HYDROELECTRIC POWER PLANT BASED ON SITE MEASUREMENTS AND NUMERICAL ANALYSIS

Gülsevim SEPETCİ

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

Supervisor: Prof. Dr. Selin ARADAĞ

Date: December 2017

In this thesis, Conceptual Design of Kepez-1 Hydroelectric Power Plant which is in Antalya, Turkey was studied. The aim of the rehabilitation project called MILHES, financially supported by Tubitak Kamag, is to increase the power and efficiency with state of the art techniques. The scope of the project is Computational Fluid Dynamics (CFD) aided turbine design, model manufacturing and tests , design, production and implementation of the turbine, generator and the SCADA system. Design of the hydraulic turbine is based on the conceptual design performed in this study. The hydroelectric power plant is modeled with two design parameters: head and flow rate. Manning's friction factor is used in the computations. The source for these details is technical drawings and site observations. For verification of the power plant model, field tests are performed as a part of the project. As a result of the comparison of numerical and field test results, friction coefficient of limestone is predicted and used for further computations. The losses in pipeline change with flow rate; therefore, head values are calculated for different flow rates. With the light of this thesis, operation limits of the turbine are determined. Best efficiency and design points of the turbine

are obtained, as well as the range of operation for flow rate and head. Transient analysis of the system is also performed to evaluate water hammer characteristics. For the verification of water hammer analysis, instant load rejection tests are conducted. The results of the transient analysis provide the inputs for the design of by-pass pipeline and pressure relief valve. These results provide an idea on the feasibility of the increase in power.

Keywords: Hydro turbine, Water hammer, Manning's friction factor, Pipeline, Pressure Relief Valve, Surge Tank.



TEŞEKKÜR

Lisans hayatımın ilk yılından beri kendisiyle çalışmak istediğim, ve bundan iki yıl sonra bu fırsatı yakaladığım, beni ETÜ HİDRO'ya lisans eğitimim sırasında kabul ederek kendisiyle çalışma fırsatını tanıyan, hayalimi gerçekleştiren, yüksek lisansım boyunca, özellikle de tez yazma sürecinde bana göstermiş olduğu sabır ve anlayış için danışman hocam Prof. Dr. Selin Aradağ'a teşekkür ederim. Mühendislik eğitimimde geldiğim noktada kendisine çok şey borçluyum.

Sahip olduğum mühendislik bilgisinde katkısı çok çok büyük olan, ETÜHİDRO'da bulunduğum süreçte bana sorumluluk vermekten kesinlikle kaçınmayan, bu sayede kendime olan güvenimi arttıran, bakış açımı değiştiren, desteğini her zaman hissettiğim hocam Dr. Kutay Çelebioğlu'na sonsuz teşekkür ederim.

Tez jürisi üyeleri Prof. Dr. Zafer Bozkuş'a ve Yrd. Doç. Dr. Ekin Özgirgin Yapıcı'ya zaman ayırıp tezimi değerlendirdikleri ve jürimde buldukları için teşekkür ederim.

En zor anlarımda yanımda olan, çalışmalarımızı yetiştirmek için birlikte sabahladığımız, hatalarımı tolere ederek kendi içimizde çözmemizi sağlayan, motivasyonumun bittiği noktalarda beni tekrar kendime getiren çok sevgili dostum Alev Elikalfa'ya teşekkür ederim.

Yüksek lisans yaptığım süre boyunca ETÜ HİDRO'da birlikte çalıştığım arkadaşlarıma başta Hüseyin Çentintürk, Alper Kaplan, Fevzi Büyüksolak ve Burak Altıntaş olmak üzere katkıları ve destekleri için teşekkür ederim.

Lisans hayatımın başından beri beni bir an olsun yalnız bırakmayan, her zaman elinden gelenin en iyisiyle bana yardımcı olmaya çalışan, hayatımda dönüm noktaları olarak tanımladığım olayların baş kahramanı Fırat Kıyıcı'ya çok teşekkür ederim.

Maddi manevi desteklerini benden bir an olsun eksik etmeyen, her zaman her koşulda yanımda olan arkadaşlarım Gizem Özmen, Gözde Dilek ve Pelinsu Çelebi'ye hayatıma olan katkılarından ötürü sonsuz teşekkür ederim.

Destek ve sevgilerini benden eksik etmeyen, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Tez çalışmalarımı tamamladığım TOBB ETÜ Su Türbini Tasarım ve Test merkezi altyapısının oluşturulmasındaki maddi desteği sebebiyle, Kalkınma Bakanlığı'na teşekkür ederim. Çalışmalarım sırasındaki sağladığı burs ile katkıda bulunan 113G109 no'lu TÜBİTAK projesine teşekkür ediyorum. Bu tez, 113G109 nolu Tübitak Kamag projesi kapsamında yürütülmüştür. Ayrıca TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi'ne tarafıma sağlamış olduğu proje burs için teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	v
ABSTRACT	vii
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
ŞEKİL LİSTESİ	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
KISALTMALAR	xvii
SEMBOL LİSTESİ	xix
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı.....	1
1.2 Literatür Taraması.....	3
1.2.1 Hidrolik türbinler.....	3
1.2.1.1 Hidrolik türbin çeşitleri.....	4
1.2.1.2 Francis türbinleri.....	5
1.2.2 Borularda oluşan kayıplar.....	7
1.2.3 Süreklilik ve momentum denklemleri.....	11
1.3 Tez Planı.....	13
2. SİSTEM HİDROLİK ANALİZİ	15
2.1 Yöntem.....	15
2.1.1 Debi.....	15
2.1.2 Hidrolik yük.....	15
2.1.2.1 Kayıplar.....	18
2.2 Sistem Hidrolik Analizi Modelleri ve Sonuçları.....	24
2.2.1 Sistem hidrolik analizi.....	24
2.2.1.1 Sistem analiz modelleri.....	25
2.2.1.2 Kepez-1 HES türbin hidrolik yük ve debi ölçümü.....	28
2.2.1.3 Analiz sonuçları ve test sonuçlarının karşılaştırılması.....	29
2.2.1.4 Sistem analizi çalışmalarının doğrulanması.....	31

2.2.1.5 Test verileri ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması	35
2.2.1.6 Manning's sürtünme katsayısı ve Darcy-Weisbach sürtünme faktörü ...	38
2.3 Türbin debi ve hidrolik yük değerleri.....	39
3. SU DARBESİ.....	45
3.1 Yöntem	45
3.1.1 Su darbesinin teorik modellenmesi.....	45
3.1.2 Karakteristikler yöntemi	49
3.2 Su Darbesi Analizleri.....	53
3.2.1 Su darbesi analiz modelleri.....	53
3.2.1.1 Tek türbin su darbesi analizleri.....	58
3.2.1.2 Tek türbin su darbesi analiz sonuçları	60
3.2.1.3 Üç türbin su darbesi analizleri	61
3.2.1.4 Üç türbin su darbesi analiz sonuçları	63
3.2.2 Sürgülü vana kapanma süreleri.....	65
3.2.2.1 Sürgülü vana su darbesi analizleri	65
4. DEĞERLENDİRME.....	71
KAYNAKLAR.....	73
EKLER.....	79
ÖZGEÇMİŞ.....	91

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 1.1: Hidroelektrik santral kesiti [47].	3
Şekil 1.2: Türbin çeşitlerinin farklı hidrolik yük ve debilere göre davranışı [10].	4
Şekil 1.3: Francis türbin kesiti ve bileşenleri.	6
Şekil 1.4: Kepez Hidroelektrik Santrali su türbini.	7
Şekil 1.5: Kepez Hidroelektrik Santrali su türbini kesiti.	7
Şekil 1.6: Borularda ani daralma.	11
Şekil 1.7: Borulardaki süreklilik ilişkisi.	12
Şekil 2.1: Cebri boruda gerçekleşen kayıplar.	16
Şekil 2.2: Türbin giriş ve çıkışı enerji değişimi.	17
Şekil 2.3: Yükleme havuzu enerji tüneli su alma yapısı ızgarası görünümü [39].	20
Şekil 2.4: Enerji tüneli su alma yapısı ve havuzun membadan görünümü [39].	20
Şekil 2.5: Cebri boru güzergâhı [39].	21
Şekil 2.6: Cebri borudaki kireç tabakası.	22
Şekil 2.7: Denge bacası görünümü [39].	23
Şekil 2.8: Sürgülü Vana'nın santral binası içinden görüntüsü.	24
Şekil 2.9: Tek ünite çalışırken kullanılan model.	26
Şekil 2.10: Farklı debi ve sürtünme katsayılarına bağlı olarak oluşan kayıplar.	28
Şekil 2.11: Deney sonuçları ile model sonuçları.	31
Şekil 2.12: HAD analiz sonuçları – sistem kayıpları.	33
Şekil 2.13: Ölçümlerin alındığı noktalar [40].	34
Şekil 2.14: Belirsizliklerin dahil edildiği ölçümler ve watercad analiz sonuçları.	36
Şekil 2.15: Tek türbin analizlerinde kullanılan model.	40
Şekil 2.16: İki türbin analizlerinde kullanılan model.	40
Şekil 2.17: Üç türbin analizlerinde kullanılan model.	41
Şekil 2.18: Türbin için belirlenen çalışma aralığı [41].	42
Şekil 2.19: Debi ve yük değerleri.	43
Şekil 3.1: $0 < t < L/a$ zaman aralığındaki davranış.	46
Şekil 3.2: $L/a < t < 2L/a$ zaman aralığındaki davranış.	46
Şekil 3.3: $2L/a < t < 3L/a$ zaman aralığındaki davranış.	47
Şekil 3.4: $3L/a < t < 4L/a$ zaman aralığındaki davranış.	47
Şekil 3.5: Sistemdeki süreklilik ilişkisi.	48
Şekil 3.6: x-t düzlemindeki karakteristik çizgileri [46].	51
Şekil 3.7: Denge bacasının bulunduğu kısım.	54
Şekil 3.8: Basınç düzenleme vanasının bulunduğu kısım.	55
Şekil 3.9: Tek türbin analizlerinin kullanıldığı model.	56
Şekil 3.10: Üç türbin analizlerinin kullanıldığı model.	57
Şekil 3.11: Test ve Hammer programı kapanma sürelerinin karşılaştırılması.	58
Şekil 3.12: Saha testleri ve analizlerin basınç ilişkisi.	61
Şekil 3.13: Saha testleri ve analizlerin debi ilişkisi.	61
Şekil 3.14: Test ve hammer programı kapanma sürelerinin karşılaştırılması.	62

Şekil 3.15: Saha testleri ve analizlerin basınç ilişkisi.	64
Şekil 3.16: Saha testleri ve analizlerin debi ilişkisi.....	64
Şekil 3.17: Tek türbin analizlerinin kullanıldığı model.	67
Şekil 3.18: Üç türbin analizlerinin kullanıldığı model.....	68
Şekil Ek 1.1: Antalya bölgesi su raporu.	80
Şekil Ek 1.2: Pantolon bölmesi katı modeli [48].	81
Şekil Ek 1.3: Ölçümün yapıldığı düzlemdeki statik basınç dağılımı.	84
Şekil Ek 1.4: Ölçümün yapıldığı düzlemdeki total basınç dağılımı.....	84
Şekil Ek 1.5: Ölçümün yapıldığı düzlemdeki hız dağılımı.	85
Şekil Ek 1.6: Borunun orta kesitindeki statik basınç dağılımı.	85
Şekil Ek 1.7: Borunun orta kesitindeki hız dağılımı.	86
Şekil Ek 1.8: Boruda oluşan akış çizgileri.	86
Şekil Ek 2.1: Sürgülü vana akış hesapları.	89



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1: Türbin tipleri ve çalışma aralıkları [12].	5
Çizelge 2.1: Kepez I HES test sonuçları.	29
Çizelge 2.2: Suyun yoğunluğuna etki eden maddeler ve miktarları.	29
Çizelge 2.3: Hesaplanan santral suyu yoğunluk değerleri.	30
Çizelge 2.4: Ölçüm sonuçları.	30
Çizelge 2.5: Teorik çalışma ve WaterCAD analizleri arasındaki fark.	32
Çizelge 2.6: Veriler arasındaki farklar.	37
Çizelge 3.1: Basınç düzenleme vanası açıklık debi ilişkisi.	60
Çizelge 3.2: Basınç düzenleme vanası kapalılık debi ilişkisi.	60
Çizelge 3.3: Basınç düzenleme vanası açıklık debi ilişkisi.	63
Çizelge 3.4: Basınç düzenleme vanası kapalılık debi ilişkisi.	63
Çizelge 3.5: Vananın 16 barlık basınç düşümünü sağladığı veriler.	65
Çizelge 3.6: Sürgülü vana kapalılık debi ilişkisi.	66
Çizelge 3.7: Analizlerde oluşan maksimum basınç değerleri.	69
Çizelge Ek 1.1: Verim ölçüm verileri.	79
Çizelge Ek 1.2: HAD analizleri için kullanılan giriş ve çıkış değerleri.	81
Çizelge Ek 1.3: HAD Analizleri sonucunda elde edilen cebri boru kayıpları.	81
Çizelge Ek 1.4: HAD analizleri için kullanılan giriş ve çıkış değerleri.	82
Çizelge Ek 1.5: Farklı debi değerlerinde işaretlenen bölgelerde okunan değerler.	83
Çizelge Ek 1.6: Basınç sensörü'ndeki belirsizliğin etkisi.	87
Çizelge Ek 1.7: Basınç sensörü'ndeki ve debimetre'deki belirsizliğin etkisi.	87
Çizelge Ek 1.8: Basınç sensörü'ndeki ve debimetre'deki belirsizliğin etkisi.	87
Çizelge Ek 1.9: Farklı debilerde ve türbin sayısına göre hidrolik yükler.	88
Çizelge Ek 2.1: Vananın 1 barlık basınç düşümünü sağladığı veriler.	90

KISALTMALAR

KAMAG	: TÜBİTAK Kamu Araştırmaları Destek Grubu
MAM	: TÜBİTAK Marmara Araştırma Merkezi
PRV	: Basınç Düzenleme Vanası
TCV	: Kısmi Valfi
HES	: Hidroelektrik Santral
IEC	: Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnical Commission)
TOBB ETÜ	: Türkiye Odalar ve Borsalar Birliği Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi
T.O.M	: Toplam Organik Madde
T.D.S.	: Toplam Çözülmüş Madde
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
MİLHES	: Hidroelektrik Santral Bileşenlerinin Yerli Olarak Tasarımı ve Üretimi
MSS	: Metre Su Sütunu

SEMBOL LİSTESİ

Bu çalışmada kullanılmış olan simgeler açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
τ_w	Kesme Gerilmesi
ΔP	Basınç Değişimi
V	Hız
D	Çap
l	Uzunluk
ε	Mutlak Pürüzlülük
μ	Dinamik Viskozite
ρ	Yoğunluk
H_L	Boruda Oluşan Kayıp
h_L	Kayıp Gradyanı
Q	Debi
C	Hazen Williams Kayıp Katsayısı
n	Manning's Sürtünme Kayıp Katsayısı
f	Darcy-Weisbach Sürtünme Kayıp Faktörü
g	Yerçekimi İvmesi
A	Alan
Re	Reynolds Sayısı
K	Yerel Kayıp Katsayısı
h_y	Yerel Kayıp
P	Basınç
H	Hidrolik Yük
t	Zaman
Z	Deniz Seviyesinden Yükseklik
ν	Kinematik Viskozite
R_h	Hidrolik Yarıçap
R	Yarıçap
a	Dalga Hızı
ΔH	Hidrolik yük Farkı
ΔS	Uzama Miktarı
K	Esneklik Kitle Sayısı
E	Young Modülü
b	Borunun Kalınlığı

1. GİRİŞ

Dünyada elektrik enerjisi ihtiyacı giderek artış göstermektedir. Bunun en büyük sebebi gelişmekte olan ülkelerin ekonomik gelişmeleridir. Bu nedenle hidrolik enerjinin ekonomik, teknik ve çevresel faydaları düşünüldüğünde dünyadaki enerji ihtiyacını karşılamada önemli bir paya sahip olduğu görülmektedir [1, 2].

Hidrolik santraller, yüksek verimliliklerde çalışabilmesinin yanı sıra diğer güç santralleriyle karşılaştırıldığında daha yüksek enerji kapasitesine sahiptir. Hidroelektrik santrallerinin ilk yatırım maliyeti oldukça yüksek olmasına rağmen, düşük işletim maliyetine sahip oldukları için uzun dönemde uygun bir seçenek haline gelmektedir. Hidrolik enerjinin en büyük avantajı elektrik üretiminin planlanabilir olmasıdır. Elektrik yükü ihtiyacı gün içinde değişim gösterebilir. Hidrolik güç elektrik üretimin yanı sıra sulama, sel kontrolü ve içme suyu gibi diğer temel hizmetler de sağlamaktadır [1, 2].

Hidroelektrik enerji, Dünya ihtiyacının %20'sini karşılayabilmektedir. İşletmede olan hidroelektrik santrallerin yıllık üretim kapasitesi dikkate alındığında, teknik yapılabilir potansiyelin %37.3'ünü geliştirmiştir. Türkiye'nin teknik olarak değerlendirilebilir hidroelektrik potansiyeli dünya genelinin %1.5'i, Avrupa potansiyelinin %17.6'sıdır [3].

Türkiye'nin coğrafik konumu, iklimi ve sahip olduğu su kaynakları düşünüldüğünde hidrolik güç, sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak öne çıkmaktadır. 2016 yılı verilerine göre hidrolik güç enerji üretiminde %26.2'lik bir paya sahiptir [3, 4].

1.1 Tezin Amacı

Günümüzde hidrolik türbinlerin tasarımı ve testi hesaplamalı akışkanlar dinamiği analizleri ve model türbin testleriyle gerçekleştirilmektedir. Tasarım sürecinde hedefler; verimin artırılması, hidrolik türbinin çalışma aralığının genişletilmesi ve

daha küçük boyutlarda daha yüksek güçte ve verimlerde hidrolik türbin tasarlanmasıdır.

MİLHES projesinin amacı, Antalya’da bulunan Kepez-1 Hidroelektrik Santrali’nin günümüz tasarım yaklaşımları kullanılarak ve yerli imkanlarla rehabilitasyonunun gerçekleştirilmesi, buna bağlı olarak da santral güç ve veriminin artırılmasıdır. TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, projenin hesaplamalı akışkanlar mekaniği destekli su türbini tasarımı model üretimi ve testinden sorumludur.

Tezin amacı, su türbini tasarımının temelini oluşturacak Kepez-1 Hidroelektrik Santrali’nin kavramsal tasarım çalışmalarının gerçekleştirilmesidir. Kavramsal tasarım çalışmalarında santral, rezervuarın bulunduğu başlangıç noktasından, suyun türbini terk ettiği kuyruk suyuna kadar bilgisayar ortamında modellenmiştir. Bu modellerde kullanılan yerel kayıp katsayısı verileri FENSU Mühendislik İnşaat Enerji Ltd. Şti. firmasının gerçekleştirdiği saha inceleme raporundan, uzunluk, çap ve kotların denizden yükseklik değerleri ise santral paftalarından alınmıştır. Akdeniz Bölgesi’nin karstik yapısından ötürü bölgedeki su oldukça kireçlidir. Bundan kaynaklı olarak santral borularının iç yüzeyinin kireçle kaplı olduğu görülmüştür. Oluşturulan modellerin girdilerinden biri de sürtünme katsayısıdır, boruların iç yüzeyleri kireçle kaplı olduğu için modellerde kirecin sürtünme katsayısı kullanılmalıdır. Fakat literatürde kirecin sürtünme katsayısı bulunmadığından analizler birden fazla sürtünme kayıp katsayısına göre yapılmıştır. Bu aşamada sürtünme kayıp katsayısına karar verilebilmesi için proje ortaklarından TÜBİTAK MAM ekibi tarafından sahada hidrolik yük ve debi ölçüm testleri gerçekleştirilmiş ve deney sonuçlarıyla model eğrileri karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma sonucu kireç sürtünme kayıp katsayısı bulunmuş ve doğrulanan yani test sonuçlarını yansıtan model kullanılarak türbin tasarım parametrelerini oluşturacak olan debi ve hidrolik yük hesaplanmıştır. Bilgisayar ortamında oluşturulan modeller, su darbesinin santrale olan etkisinin araştırılması ve incelenmesi için de kullanılmıştır. Zamana bağlı gerçekleşen su darbesi analizlerinin ani kapanma testleri sahada yine TÜBİTAK MAM ekibi tarafından gerçekleştirilmiş ve test sonuçları zamana bağlı çözdürülen modellerle karşılaştırılmış ve bu aşamada türbin ve PRV’nin (Basınç Düzenleme Vanası) davranışları incelenmiştir. Zamana bağlı yapılan analizler, daha sonra türbin girişinde

bulunan ve acil durumlarda hidrolik piston yardımı ile kapanan vananın kapanma süresinin hesaplanmasında kullanılmıştır.

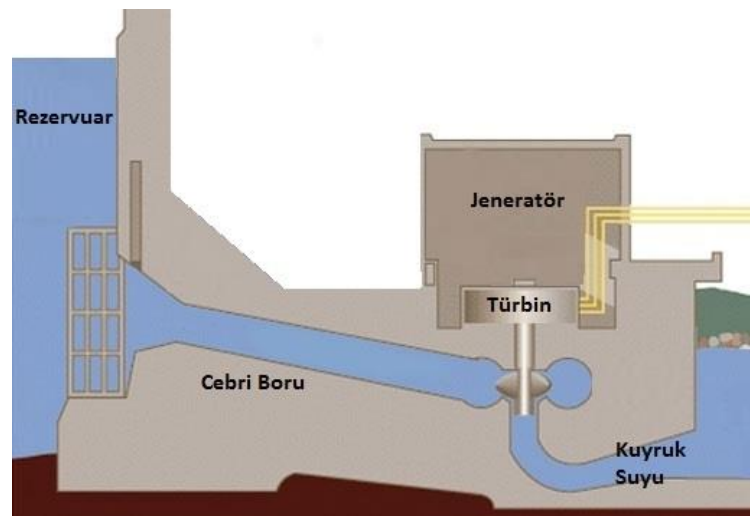
Yapılan sistem analizi ve su darbesi analiz modellerinin doğrulanması, saha testleri yardımıyla gerçekleştirilmiş, bu test sonuçlarının modellerle olan ilişkisi ve değerlendirilmesi bu tezin kapsamında gerçekleştirilmiştir.

1.2 Literatür Taraması

1.2.1 Hidrolik türbinler

Su gücünün varlığının anlaşılması insanoğlunun en büyük keşiflerinden biri olmuştur. Su gücü ilk olarak M.Ö 1. yüzyılda dikey su tekerleği olarak bilinen şekilde Orta Doğu'da kullanılmıştır. Su gücünün ekonomiye olan önemli etkisi sayesinde geliştirilmesi 19. Yüzyılda daha da önem kazanmıştır. 19. Yüzyılın başında verimliliği %30-40 olan su çarkının geliştirilmesiyle 19. Yüzyılın sonlarına doğru verimliliği, düşük Hidrolik yük değerlerinde ünite başına 10-50 kW güç değerleri için %80-90'lara çıkartılmıştır [5, 6]. Bütün bu çalışmalar günümüz hidrolik türbinlerinin temelini oluşturmuştur.

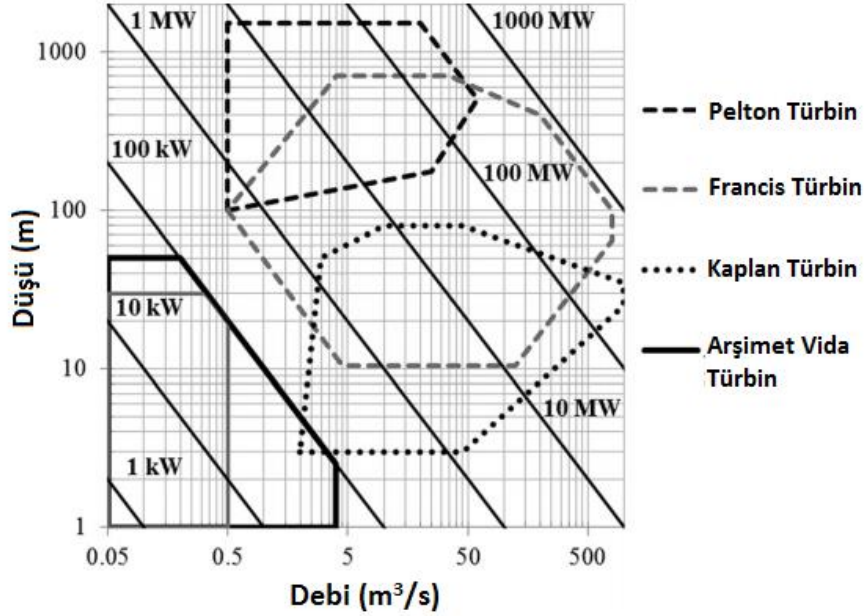
Şekil 1.1'de hidroelektrik santrali bileşenleri gösterilmiştir. Türbine göre daha yüksek bir yerde bulunan rezervuardan su cebri borular yardımıyla türbine taşınır. Türbine ulaşan su, çarkı döndürür ve potansiyel enerji kinetik enerjiye çevrilmiş olur. Bu aşamada shaftı döndüren türbin çarkı, bu enerjiyi jeneratöre aktarmış olur [7].



Şekil 1.1: Hidroelektrik santral kesiti [47].

1.2.1.1 Hidrolik türbin çeşitleri

Başlıca iki tip hidrolik türbin vardır bunlar aksiyon ve reaksiyon tipi türbinlerdir. Aksiyon Tipi Türbinler yüksek hidrolik yüklerde ve düşük debi değerlerinde kullanılırken, Pelton Aksiyon Tipi Türbinlere örnektir. Reaksiyon Tipi Türbinlere Francis ve Kaplan örnek olarak gösterilir. Reaksiyon Tipi Türbinler, Aksiyon Tipi Türbinlere oranla daha hızlı dönerler ve yapısı daha komplekstir [8, 9].



Şekil 1.2: Türbin çeşitlerinin farklı hidrolik yük ve debilere göre davranışı [10].

Şekil 1.2'deki grafikte türbin çeşitlerinin farklı hidrolik yük ve debilerdeki davranışları gösterilmiştir. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan türbin tipi Francis'tir. Bu durumun en büyük sebeplerinden biri Francis türbinlerinin çok geniş hidrolik yük ve debilerde yüksek verimlilik değerlerinde çalışabiliyor olmasıdır [11, 9]. Bu durum Şekil 1.2'de gösterilen grafikte de açıkça görülmektedir. Çizelge 1.1'de yaygın olarak kullanılan türbin tipleri olan Francis, Kaplan ve Pelton tipi türbinler için çalışma aralıkları verilmiştir.

Çizelge 1.1: Türbin tipleri ve çalışma aralıkları [12].

	Pelton	Kaplan	Francis
Hidrolik Yük (m)	100-1770	6-70	20-900
Maksimum Güç (MW)	500	300	800
Optimal Verim (%)	90	94	95

1.2.1.2 Francis türbinleri

Francis türbinlerinde, su türbin boyunca ilerleyerek suyun basıncını değiştirir ve enerjisini kanatlara aktararak potansiyel enerjinin kinetik enerjiye çevrimini sağlar [13].

Francis türbinlerin farklı debi ve hidrolik yük değerlerinde yüksek verimlerde çalışabilmesi onun gerek büyük, gerekse küçük çaplı hidroelektrik santrallerde tercih edilmesini sağlamıştır [14]. Farklı hız, debi ve hidrolik yük değerleri temelde aynı çalışma prensibine sahip Francis türbininin çark tasarımını büyük ölçüde etkilemiştir [15]. Francis türbinler 20 m'den 900 m'ye kadar değişebilen hidrolik yük aralıklarında çalışabilmektedir [16].

Francis tipi türbin 5 ayrı bileşenden oluşmaktadır. Bunlar sırasıyla;

- Salyangoz
- Sabit kanatlar
- Ayar kanatları
- Çark
- Emme borusudur.

Salyangoz türbinin girişinde bulunan yapıdır. En önemli iki görevi, basınçlı suyun sabit kanatlara her bir noktada eşit debilerle girmesini sağlamak ve en az miktarda hidrolik kayba sebep olmaktır [17]. Salyangoz kesiti girişinden çıkışına doğru azalan bir yapıdır ve çıkışı sabit kanatlara açılır [18].

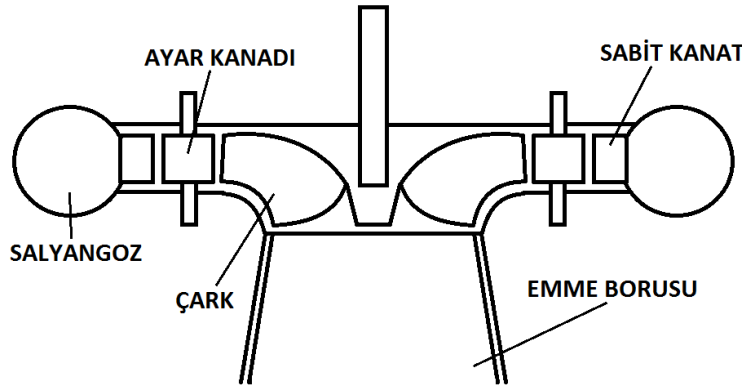
Sabit kanatlar ise akışı yönlendirerek ayar kanatlarına ulaşmasını sağlar. Bunun yanı sıra sabit kanatlar salyangozun bir arada durabilmesi için türbine mekanik bir dayanım oluşturur [19].

Sabit kanatlardan çıkıp ayar kanatlarına ulaşan akış, ayar kanatlarının duruş açısına bağlı olarak belirli bir debiyle çarka giriş yapar [20]. Ayar kanatlarının asıl görevi buradan da anlaşılacağı üzere çarka giriş yapacak olan suyun debisini kontrol etmektir [21].

Çark, Francis türbinlerin en önemli elemanıdır. Çark kanatlarına çarpan su, çarkın bir shaft aracılığıyla bağlı olduğu jeneratörü döndürür ve bu şekilde elektrik üretimi sağlanmış olur. Çarktan çıkan su emme borusuna ulaşır [9].

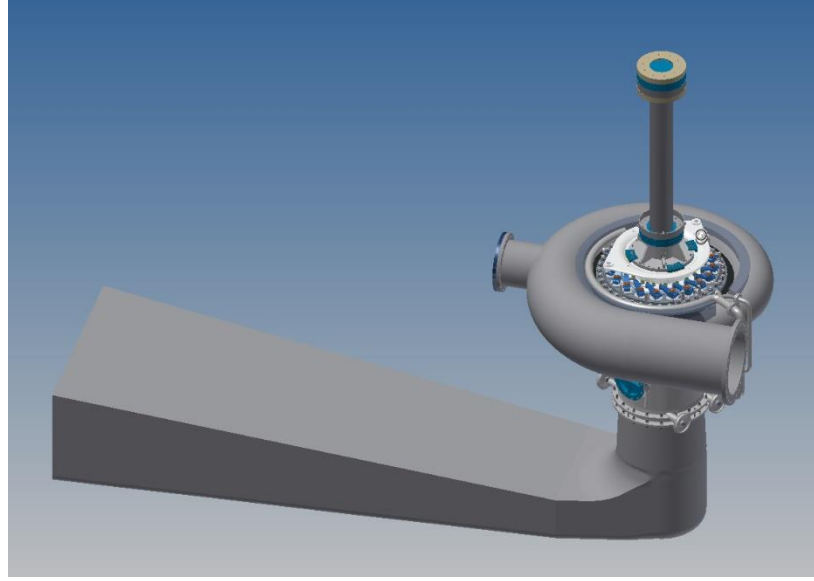
Emme borusunda kesit genişleyerek devam eder ve basınç geri kazanımı sağlanır [9,21].

Şekil 1.3'te ise Francis türbini oluşturan parçalar detaylı bir şekilde belirtilmiştir.

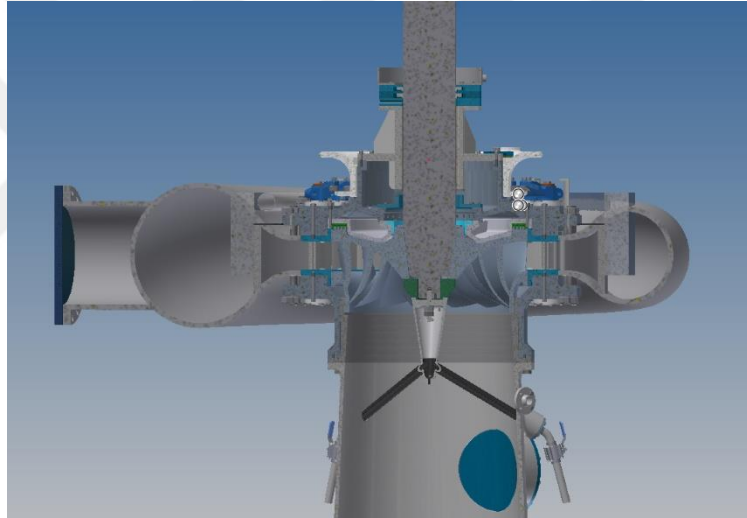


Şekil 1.3: Francis türbin kesiti ve bileşenleri.

Şekil 1.4 ve 1.5'te projenin uygulandığı Kepez-1 Hidroelektrik Santrali mevcut türbinin katı modeli ve kesiti gösterilmiştir. Şekil 1.4'ten de görüleceği üzere su, borulardan geçtikten sonra salyangoza giriş yapar ve daha sonra sırasıyla sabit kanatlara ve ayar kanatlarına ulaşır. Ayar kanatlarından çıktıktan sonra çarka girer ve shaftı döndürür. Potansiyel enerjisini, çarkı döndürerek kinetik enerjiye çeviren su, son türbin bileşeni olan emme borusundan çıktıktan sonra türbini terk eder.



Şekil 1.4: Kepez Hidroelektrik Santrali su türbini.



Şekil 1.5: Kepez Hidroelektrik Santrali su türbini kesiti.

1.2.2 Borularda oluşan kayıplar

Suyun rezervuardan türbine getirilmesi cebri borular yardımıyla olur. Cebri boruda gerçekleşen kayıplar, türbinin performansını doğrudan etkilemektedir.

Borularda oluşan kayıplar iki farklı durumdan kaynaklanmaktadır; kesme gerilmesinden kaynaklanan birincil kayıplar yani sürtünme kayıpları ve yerel (ikincil) kayıplardır. Sürtünme kayıpları bütün bir boru boyunca gerçekleşirken, yerel kayıplar vana, borulardaki çap değişikliği vb. geometrik değişimlerden kaynaklanır. Çoğu zaman ikincil kayıplar, sürtünme kayıplarının yanında oldukça önemsiz kalmaktadır.

Borularda kayıp sonucu oluşan basınç düşümü akış ve boru yüzeyinde oluşan kesme gerilmesine (τ_w) bağlıdır. Sabit, sıkıştırılmaz türbülanslı bir akış için basınç düşümü, (ΔP) alttaki fonksiyonla verilebilir;

$$\Delta P = F(V, D, l, \varepsilon, \mu, \rho) \quad (1.1)$$

V ortalama hız, l borunun uzunluğu, ε boru duvarındaki pürüzlülüğün ölçüsü, D borunun yarıçapıdır. μ ve ρ ise sırası ile akışkanın dinamik viskozitesi ve yoğunluğudur.

Türbülanslı akış için, basınç düşümü, duvar pürüzlülüğünün bir fonksiyonudur.

Birincil kayıpların hesabında kullanılan formüller; Hazen Williams, Manning's ve Darcy Weisbach formülleridir. Hazen Williams ve Manning's ampirik birer formülken, Darcy Weisbach yarı analitik bir denklemdir.

• **Hazen-Williams denklemi**

$$h_L = \frac{H_L}{L} = \frac{10.67Q^{1.85}}{C^{1.85}d^{4.87}} \quad (1.2)$$

h_L = Kayıp gradyanı (metrede gerçekleşen kayıp miktarı)

H_L = Boruda oluşan kayıp (m)

L = Borunun uzunluğu (m)

Q = Debi (m^3/s)

d = Borunun çapı (m)

C değeri tipik su dağıtımı yapan boruların malzemesine göre değişiklik gösterir. 20 ile 140 arasında değişir [22].

• **Manning's denklemi**

$$h_L = \frac{10.3L(nQ)^2}{D^{5.33}} \quad (1.3)$$

Q = Debi (m^3/s)

D = Borunun çapı (m)

L = borunun uzunluğu

n = Manning's pürüzlülük katsayısı [23].

• **Darcy-Weisbach denklemi**

$$h_L = f \frac{L V^2}{D 2g} \quad (1.4)$$

h_L = Boruda oluşan kayıp (m)

f = Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı

L = Borunun uzunluğu (m)

D = Borunun çapı (m)

V = Akışın hızı (m/s)

g = yerçekimi ivmesi (m/s²) [24]

$$V = \frac{Q}{A} \quad (1.5)$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (1.6)$$

$$h_L = r Q^2 \quad (1.7)$$

Q = Debi (m³/s)

D = Borunun çapı (m)

V = Akışın hızı (m/s)

A = Borunun kesit alanı (m²)

Denklem 1.5 ve 1.6, denklem 1.4'e uygulandığı takdirde denklem 1.7'de bahsedilen boru direncini temsil eden r değeri şu şekilde bulunur [25];

$$r = \frac{8f L}{\pi^2 g D^5} \quad (1.8)$$

Türbülanslı akışlarda Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı Moody Diyagramından faydalanılarak belirlenir.

Moody Diyagramı

1939 yılında Colebrook pürüzlü ve pürüzsüz cidar formüllerini ve sürtünme için kabul edilmiş tasarım formülünü oluşturmuştur [26,27].

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{2.51}{Re\sqrt{f}} + \frac{\varepsilon}{3.71D} \right] \quad (1.9)$$

Denklemden bulunan ε ortalama pürüzlülük yüksekliğidir. Bu denklemden, $\varepsilon = 0$ olarak kabul edilirse denklem (1.9) [28], Colebrook-White Denklemi, pürüzsüz borular için sürtünme kayıp katsayısı hesabında kullanılan Prandtl denklemine dönüşmektedir [29];

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right] = 2 \log(Re\sqrt{f}) - 0.8 \quad (1.10)$$

Denklem, 1944'te Moody tarafından şimdi boru sürtünmesi için kullanılan ve Moody Diyagramı olarak anılan diyagrama konulmuştur [27, 30]. Moody diyagramı, dairesel ve dairesel olmayan boru kesitlerindeki akışlar için kullanılabilir.

Darcy-Weisbach sürtünme faktörü hesabında kullanılacak bir diğer eşitlik de Swamee-Jain denklemidir. Bu denklemden f değerinin bağlı olduğu değişkenler ε , D ve Reynolds sayısıdır [49].

$$f = \frac{0.25}{\left\{ \log \left[\left(\frac{\varepsilon}{0.37D} \right) + \left(\frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right] \right\}^2} \quad (1.11)$$

Reynolds sayısının çok büyük olduğu durumlarda Swamee-Jain denkleminde Reynolds sayısına bağlı terim 0'a eşit olacaktır. Bu durumda f sadece ε ve D 'ye bağlı olarak değişen bir değer haline gelecektir.

Borularda oluşan ikincil kayıplar, borulardaki fiziksel değişikliklerden (valfler, ani genişleme ve daralmalar) dolayı oluşan akış bozulmalarında yaşanan kayıplardır. Boru

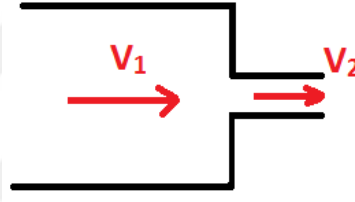
yeterince uzunsa, oluşan sürtünme kayıpları yerel kayıplardan oldukça fazladır. Bu sebeple birincil tasarımlarda genellikle ihmal edilirler.

Sürtünme kayıplarından farklı olarak, teori, yerel kayıp katsayılarının hesaplanmasında oldukça yetersiz kalmaktadır. Bu sebeple yerel kayıplar için kayıp katsayılarının belirlenmesine deneyler yön vermiştir [31].

$$h_y = K \frac{V^2}{2g} \quad (1.12)$$

K değeri boyutsuzdur ve yerel kayıp katsayısını temsil eder. Yerel kayıp katsayısı doğrudan geometriye bağlıdır fakat akış özelliklerinden de zaman zaman etkilendiği görülmektedir.

Borularda oluşan genişleme ve daralmalardaki yerel kayıplar hız farkının karesiyle doğru orantılıdır (Şekil 1.6).



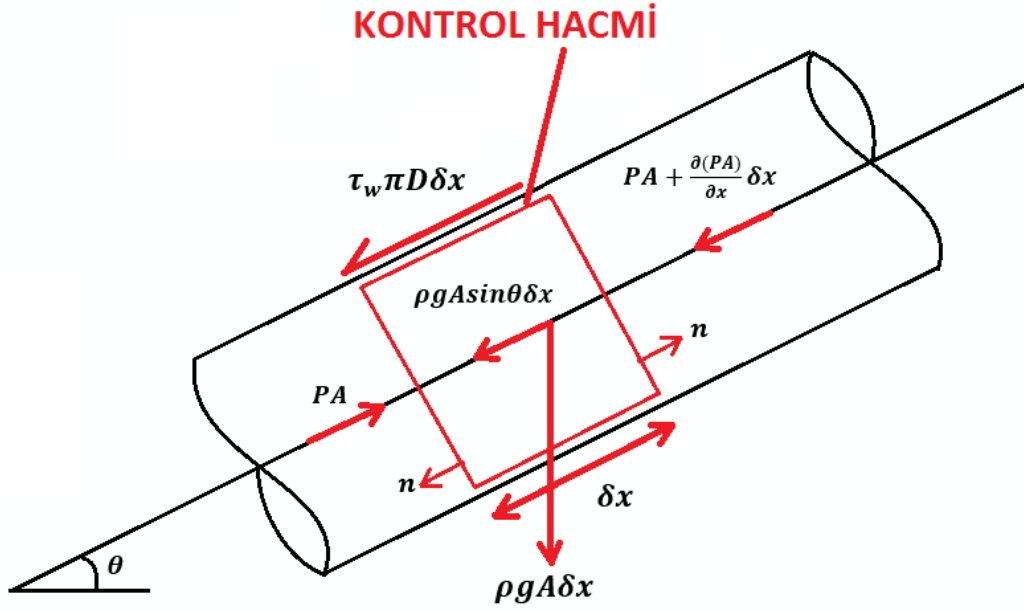
Şekil 1.6: Borularda ani daralma.

Ani daralmalarda kullanılan alternatif eşitlik [31];

$$h_y = K \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g} \quad (1.13)$$

1.2.3 Süreklilik ve momentum denklemleri

Zamana bağlı çözümde boruda oluşan hız V (m/s), debi Q (m^3/s), basınç P (Pa) ya da hidrolik eğim kotunun H (m) belirlenebilmesi için süreklilik ve momentum denklemleri kullanılmaktadır. Süreklilik denklemi için kütle korunumu kanunu uygulanır. Şekil 1.7'de süreklilik ve momentum denklemleri parametreleri belirtilmiştir. Akış tek boyutlu ve sıkıştırılabilir kabul edilmiştir.



Şekil 1.7: Borulardaki süreklilik ilişkisi.

Süreklilik
Denklemi

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \underbrace{V \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{a^2}{g} \frac{\partial V}{\partial x}}_{\text{İhmal Edilebilir}} = 0 \quad (1.14)$$

Momentum
Denklemi

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \underbrace{V \frac{\partial V}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x}}_{\text{İhmal Edilebilir}} + \underbrace{\frac{f}{2D} V|V|}_{\text{Sürtünme Kayıpları}} + g \sin \theta = 0 \quad (1.15)$$

Süreklilik denkleminde ikinci terim diğer terimlerin yanında çoğu zaman oldukça küçük kalmaktadır. Bu sebeple ihmal edilebilir.

Momentum denkleminde f , Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı, dahil edilerek sürtünmeden kaynaklı kuvvetler de işin içine katılmış olur. Bu denklemdaki ikinci terim akıştaki bir noktadaki hızın mekansal değişimi ile orantılıdır. Bu terim genellikle ihmal edilir [32].

Bu denklemler çoğu zaman analitik yöntemlerle çözülemezler. Bu sebeple nümerik yöntemlere başvurulmuştur. Karakteristikler Yöntemi bu denklemlerin çözülmesi için kullanılan en popüler yöntemlerden biridir [33].

1.3 Tez Planı

Bu tezde Kepez-1 Hidroelektrik Santrali'nin tek boyutlu modellemesi yapılmıştır. Bilgisayar ortamında oluşturulan bu modelde, her bir debiye karşılık santralde türbinin çalışacağı hidrolik yük hesaplanmıştır. Hidrolik yük değerleri farklı sürtünme koşullarında değişmektedir. Cebri borunun sürtünme katsayısı bilinmediğinden farklı katsayılara bağlı olarak farklı debi ve hidrolik yük eğrileri hesaplanmıştır. Yapılan bu çalışmada ortaya çıkan debi-hidrolik yük eğrileri, TÜBİTAK MAM ekibi tarafından sahada gerçekleştirilen debi ve hidrolik yük ölçüm verileri ile karşılaştırılmış ve sürtünme katsayısının bulunması hedeflenmiştir. Testle doğrulanan modelde literatürde bulunmayan kirecin sürtünme katsayısı hesaplanmıştır. Yine aynı model üzerinden su darbesi etkisi çalışmaları yapılmıştır.

Bölüm 1'de tezin konusu ve kapsamı hakkında genel bilgiler verilmiş, literatür taraması anlatılmıştır. Bu bölümde genel olarak su türbininin bileşenleri açıklanmıştır. Tezin konuları olan sistem analizi ve su darbesinin genel anlamda dayandığı teorik eşitlikler açıklanmıştır. Bölüm 2'de tezin kapsadığı konulardan biri olan sistem hidrolik analizinde kullanılan yöntem anlatılmış, kullanılan programların ara yüzündeki denklemler açıklanmıştır. Bilgisayar ortamında modellenen santralle ilgili olarak yapılan analizler, sahada gerçekleştirilen testler açıklanmıştır. Elde edilen veriler ve doğrulanan modellerden sonra, türbinin çalışma aralığı çıkartılmıştır. Çıkarılan çalışma aralığına göre türbinin tasarım paametreleri olan debi ve hidrolik yük değerleri saptanmıştır. Bölüm 3'te yapılan sistem analizi çalışmaları kaynak olarak kullanılmıştır ve modeller santralin su darbesi karakteristikliğini ortaya koyabilmek için zamana bağlı çözülmüştür. Model sonuçları sahada gerçekleştirilen ani kapanma testi ölçümleriyle karşılaştırılmıştır. Çalışmaların doğruluğu ispat edildikten sonra aynı modellerde türbinin önünde bulunan sürgülü vananın kapanma süresi hesaplanmıştır. Bölüm 4'te ise sonuçlar değerlendirilmiş, çalışmanın sağladığı ve sağlayacağı katkılar kısaca açıklanmıştır. Gelecekte konu ile ilgili neler yapılabileceği ve yapılacağından kısaca bahsedilmiştir.



2. SİSTEM HİDROLİK ANALİZİ

2.1 Yöntem

Su türbini tasarımında en önemli iki parametre debi ve hidrolik yüküdür. Debi ve hidrolik yük değerleri santralin kurulacağı bölgenin jeolojik yapısına ve yağış miktarına bağlıdır [9]. Türbin tasarımı çalışmaları başlamadan önce santralin coğrafi koşullarının ve yağış grafiğinin incelendiği fizibilite çalışmaları gerçekleştirilir. Fizibilite çalışmaları sonunda türbinin yüksek verimde yüksek güç üretmesini sağlayacak debi ve hidrolik yük değerleri belirlenir ve bu şekilde türbinin çalışma koşulları belirlenmiş olur. Bu bilgiler tamamlandıktan sonra türbin tipi belirlenir ve tasarım çalışmaları başlar.

Türbin fizibilite çalışmaları ön tasarım olarak da adlandırılır. Ön tasarımda santralin su alma yapısından türbin girişine kadar ki kısım modellenir. Literatürde yer alan teorik ve ampirik formüllerle bu model çözülür ve veriler elde edilir. Ön tasarım için Bentley, WaterCAD [34] programı kullanılmıştır. Bu program daimi, zamana bağlı olmayan çözümler sunar.

2.1.1 Debi

Debi birim zamanda türbinden geçen su miktarıdır [35]. Q ile gösterilir ve modellerde kullanılan birimi m^3/s dir. Modellerde debi değeri bir girdidir. Program girilen, istenen debi değerine göre çıktılar vermektedir.

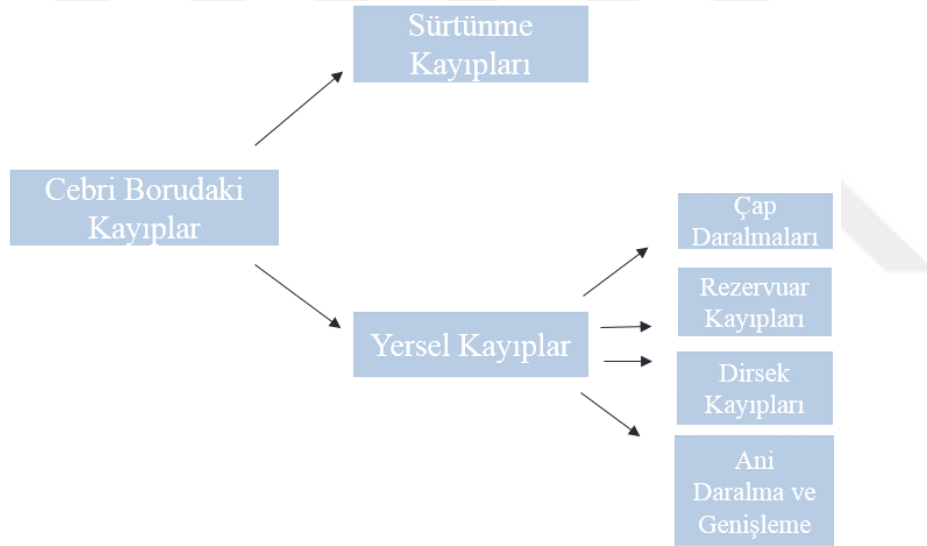
2.1.2 Hidrolik yük

Hidrolik yük, suyun sahip olduğu potansiyel enerji, basınç yükü ve akışkanın kesitteki hızından kaynaklanan hız yüksekliğinin toplamını temsil etmektedir. Debiden farklı olarak hidrolik yük, programda modellerin daimi, zamana bağlı olmayan, çözümlerinde bir çıktıdır. Hidrolik yük, başta debi olmak üzere, kayıp katsayısına, boruların uzunluğuna ve çapına bağlı olarak değişir.

Santral, farklı bölümlerindeki hidrolik yük ve debi değerlerinin belirlenmesi için Bentley, WaterCAD programı ile modellenmiştir [36]. Boru hattı sistemi iki fiziksel kanunla kontrol edilmektedir. Bunlar; kütle ve enerjinin korunumu yasalarıdır.

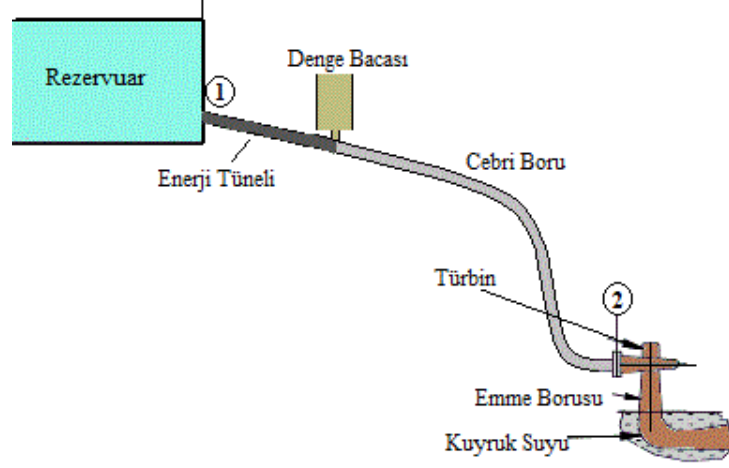
Sistemin hidrolik yükü belirlenirken, debi, üst rezervuar kotu, türbin eksen kotu ve kayıplar belirleyici olur. Üst rezervuar kotu ve türbin eksen kotu sabit olduğundan sistemde oluşan yük doğrudan debiye bağlı olarak oluşan kayıplara bağlı olarak değişir. Kayıplar, birincil kayıplar ve yerel kayıplar olmak üzere ikiye ayrılır.

Santral boru hattında, rezervuar denge bacası arası bağlantı enerji tüneli olarak adlandırılan yapı ile, denge bacası türbin arası bağlantı cebri boru ile sağlanır. Enerji tüneli boyunca oluşan sürtünme kayıpları ve bağlantı noktalarında oluşan yerel kayıplar da Şekil 2.1’de belirtilen cebri borudaki kayıplar başlığı altında yer almaktadır.



Şekil 2.1: Cebri boruda gerçekleşen kayıplar.

Sürtünme kayıpları birincil kayıplar olarak da adlandırılabilir ve boru boyunca sürtünmeden kaynaklı gerçekleşir. Yerel kayıplar ise ikincil kayıplar olarak da adlandırılabilir ve çap daralmalarında, ani daralma ve genişlemelerde, rezervuar ve dirseklerde gerçekleşen kayıplardır. Hidrolik yük hesaplarında tek boyutlu ve sıkıştırılamaz akışlarda, kesitlerde uniform dağılmış hızların olduğu, tek giriş ve tek çıkışı olan kontrol hacimleri için verilen enerji denklemi, yapılan bütün bu hesaplamaların temelinde yer alır (Şekil 2.2).



Şekil 2.2: Türbin giriş ve çıkışı enerji değişimi.

Göl seviyesi (1) ile türbin girişi (2) arasındaki enerji değişimi için enerji denklemi [9];

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + H_L \quad (2.1)$$

Denklem 2.1'de yer alan H_L , rezervuardan türbinin girişine kadar olan toplam kayıpları kapsar. Bu kayıplar sürtünme dolayısıyla oluşan birincil kayıplar ve dirseklerden, ani genişleme ve ya ani daralmalardan oluşan yerel kayıplardır.

$\frac{P_1}{\rho g}, \frac{P_2}{\rho g}$ basınç yükünü, $\frac{V_1^2}{2g}, \frac{V_2^2}{2g}$ hız yüksekliğini, z_1 ve z_2 ise komponentlerin denizden olan yüksekliklerini temsil etmektedir.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = H_1 \quad (2.2)$$

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 = H_2 \quad (2.3)$$

$$H_1 = H_2 + H_L \quad (2.4)$$

Rezervuardaki yük H_1 'dir. Boru boyunca oluşan kayıplar H_1 değerinden çıkarıldığında türbin girişindeki hidrolik yük H_2 , türbinin kullanabileceği yani enerjiye dönüştürebileceği maksimum hidrolik yük elde edilir.

2.1.2.1 Kayıplar

Türbülanslı akışlar oldukça komplekstir ve teorik hesaplamalarla anlaşılması tam olarak mümkün değildir. Bu sebeple yapılan çalışmaların büyük çoğunluğu ampirik formüllere ve deneysel çalışmalara dayanmaktadır. Boru hattı sistemlerinde, denklem 2.1'den de görülebileceği üzere borularda gerçekleşen kaybı hesaplamak önemlidir. Boru sistemleri farklı ölçülerden (uzunluk, çap vb. farklılıklar) oluşabileceği gibi farklı bileşenlerden de (valf, dirsek vb. farklı bileşenler) oluşabilir. Sistemde sürtünmeden oluşan kayıplara, birincil kayıplar bir başka deyişle sürtünme kayıpları denir ($h_{L,birincil}$). Bileşenlerin farklılaşmasından oluşan kayıplar ise ikincil kayıplar yani yerel kayıplar olarak adlandırılır ($h_{L,ikincil}$).

$$h_L = h_{birincil} + h_{ikincil} \quad (2.5)$$

Birincil kayıplar

Kayıp hesaplarından önce borulardaki akışın türbülanslı mı laminar mi olduğu araştırılmıştır ve bu doğrultuda Reynolds sayısı hesaplanmıştır.

Reynolds sayısı atalet kuvvetlerinin viskoz kuvvetlere oranını temsil eden, akışkanın laminar mi türbülanslı mı olduğunu anlamamıza yarayan boyutsuz bir sayıdır. Dairesel bir borunun içindeki akışa ait Re sayısı 2100'den küçükse akış laminar, 4000'den büyükse akış türbülanslıdır. Reynolds sayısı bu iki limitin arasında ise akış geçiş bölgesindedir [35].

Kepez-1 Hidroelektrik santrali göz önüne alındığında hızın en yüksek olması beklenen noktada Reynolds Sayısı;

$$Re_D = \frac{\rho VD}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (2.6)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.7)$$

$$Q = 6.1 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$D = 1.3 \text{ m}$$

$$A = 1.32 \text{ m}^2$$

$$V = 4.62 \text{ m/s}$$

$$\mu = 0.0035 \cdot 10^{-6} \text{ Ns/m}^2 @ 20^\circ\text{C}$$

$$Re_D = \frac{4.62 \cdot 1.3}{1.0035 \cdot 10^{-6}} = 5.98 \cdot 10^6$$

Yapılan hesaplamalarda akışın, türbülanslı olduğu hesaplanmış ve tam gelişmiş olarak kabul edilmiştir.

Borularda oluşan sürtünme kayıpları farklı formüllerle hesaplanabilir. Bu formüller önceki bölümlerde açıklanmıştır. Darcy-Weisbach, Hazen Williams ve Manning's formülleri türbülanslı akışlara uygulanabilir.

Bahsedilen bu formüller arasında ilişki bulunmaktadır. Yapılan literatür araştırmasında bu formül katsayılarının birbirlerine dönüştürülebileceği görülmüştür. Manning's n ve Darcy-Weisbach f arasındaki ilişki şu şekilde ortaya konmuştur [37];

$$n = \left(f \frac{R_h^{\frac{1}{3}}}{8g} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.8)$$

$$R_h = \frac{\text{Kesit Alanı}}{\text{Islak Çevresi}} = \frac{\pi R^2}{2\pi R} \quad (2.9)$$

Darcy Weisbach denklemi, kayıp hesaplarında en yaygın kullanılan denklemdir [27].

Yerel Kayıplar

Borularda sürtünme kayıplarının yanı sıra geometrik değişikliklerden oluşan kayıplar da mevcuttur. Çoğu zaman bu kayıplar sürtünme kayıplarının yanında oldukça küçük kalır. Yerel kayıpların olduğu durumlar [27,38];

• Boru giriş ve çıkışları

Kepez-1 Hidroelektrik Sanralı'nde boru giriş ve çıkışlarından kaynaklı oluşan yerel kayıplardan biri santralin yükleme havuzu su alma yapısı ve su alma yapısı

ızgarasından kaynaklanmaktadır. Kepez-1 HES su alma yapısı ve ızgarası Şekil 2.3 ve 2.4'te gösterilmiştir.

Su alma yapısında ızgara sisteminin yer almasının amacı; suyu, suyun içinde bulunan artık maddelerden arındırmaktır.



Şekil 2.3: Yükleme havuzu enerji tüneli su alma yapısı ızgarası görünümü [39].



Şekil 2.4: Enerji tüneli su alma yapısı ve havuzun membadan görünümü [39].

• Borulardaki dönüşler ve dirsekler

Borularda dönüş ve dirseklerden oluşan kayıplar, cebri boru boyunca görülmektedir (Şekil 2.5). Cebri boru üzerinde santral binası girişine yakın bir bölgede cebri borunun dik açılarla yerin altına inerek branşmanlara geldiği görülmektedir.

Cebri boru güzergâhından santral girişindeki branşman (pantolon) bölgesi dışında herhangi bir yatay kurp bulunmamaktadır.



Şekil 2.5: Cebri boru güzergâhı [39].

Cebri borunun çalıştığı uzun yıllar boyunca kireçle kaplandığı saha ziyaretinde ifade edilmiştir. Bu kirecin yaklaşık 1.5 cm kalınlığında olduğu belirtilmiştir. Boruları kaplayan kireç Şekil 2.6’da açıkça görülmektedir. Bu delik saha testleri için cebri boruda açılmıştır ve santral girişinin yaklaşık 30 m gerisinde bir bölümdedir. Kirecin oluşturduğu sürtünme kaybı çelik ve betondan farklıdır, bu durum yapılacak hidrolik çalışmaların temelini oluşturmaktadır.



Şekil 2.6: Cebri borudaki kireç tabakası.

- **Ani genişleme ve daralmalar**

Enerji tüneline gelen suyun cebri boruya bağlandığı noktada denge bacası yer almaktadır. Arazi kotlarından ötürü denge bacası yer altına gömülmemiş, yer üstüne kule olarak inşa edilmiştir. Şekil 2.7’de denge bacası görülmektedir. Denge bacası ile ilgili sahada temin edilen projelerde yapılan incelemelerde iç çapın 5 m olduğu ve toplam yüksekliğin temelden 57.55 m olduğu belirlenmiştir. Denge bacası enerji tüneline çapından (2.5 m), 5 m genişliğe geçen bir kesite sahiptir. Enerji tüneline denge bacasına geçiş, Kepez-1 HES ani genişleme ve daralmalardan kaynaklı oluşan yerel kayıplara örnektir.



Şekil 2.7: Denge bacası görünümü [39].

- **Vanalar**

Sahada yapılan incelemelerde santralde yer alan türbinlere direk bağlı olarak çalışan PRV (Basınç Düzenleme Vanası) bulunduğu görülmüştür. Ani kapanma durumlarında oluşacak basınç dalgası bu vanalar yardımıyla su geriye tepmeden ve basınç dalgası daha da büyümeden direk türbin kısmında sönmülenerek kuyruk suyu kanalına bırakılmakta olduğu görülmüştür [39].

Santralde bulunan bir diğer vana da salyangozun önünde bulunan ani durumlarda suyun türbine ulaşmasını engellemek için kapanan sürgülü vanadır.

Şekil 2.8’de sürgülü vananın santral binası içindeki görüntüsü bulunmaktadır.

Santralde bulunan vanalar yerel kayıplara sebep olan bir diğer bileşenlerdir.

Birçok boru hattı sistemi çeşitli geçiş sistemleri içermektedir. Örneğin borulardaki çap değişikliğinden kaynaklı bağlantılar buna örnek verilebilir. Bu geçişler yumuşak ya da

sert bir şekilde gerçekleştirilebilir. Santral mimarisinde yapılan her bir değişiklik sürtünme kayıplarının hesaba katmadığı bir kayba sebep olur [35].



Şekil 2.8: Sürgülü Vana'nın santral binası içinden görüntüsü.

2.2 Sistem Hidrolik Analizi Modelleri ve Sonuçları

2.2.1 Sistem hidrolik analizi

Kepez-1 Hidroelektrik Santrali'nde yapılan verim ölümü sırasında sistem analizi için gereken üst rezervuar kotu ve kuyruk suyu kotu, bunlardan farklı olarak da farklı debilerde salyangoz önünde gerçekleşen statik basınç değerleri TÜBİTAK MAM ekibi tarafından ölçmüştür. Verim lm sırasında kireç kalınlığının 1.5 cm olarak belirlenmesi sonucu WaterCAD [34] programındaki boru çaplarında da kireç kalınlığı 1.5 cm alınmıştır. Analizler, her bir debi değeri için farklı Manning's n sürtünme

katsayılarına göre tekrarlanmış ve sahada ölçümü yapılan debi-hidrolik yük değerleriyle karşılaştırılarak bu eğriye uyan sürtünme katsayı değeri belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışma çark tasarımı için ön bir araştırma olup, çarkın tasarımının yapılacağı debi ve hidrolik yük değerlerinin belirlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır.

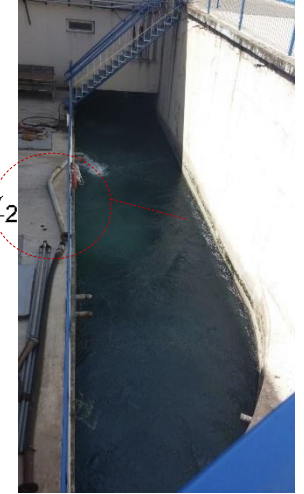
2.2.1.1 Sistem analiz modelleri

Sahada yapılan ölçümler tek türbin çalışma durumu esnasında gerçekleşmiştir. Sonuçların karşılaştırılabilir olması açısından yapılan WaterCAD [34] analizlerinde tek türbin modeli kullanılmıştır. Bu çalışma durumu için kireç tabakası 1.5 cm olarak belirlenmiştir. Tek türbin analizleri için bilgisayar ortamında WaterCAD programı ile oluşturulmuş olan model Şekil 2.9'da gösterilmektedir.

Şekil 2.9'dan da görülebileceği üzere santral rezervuardan kuyruk suyuna kadar modellenmiştir. R-1, üst rezervuarı temsil ederken, R-2 kuyruk suyunu yani türbin çıkışını temsil etmektedir. Rezervuarda oluşan yerel kayıplar, daha önceki bölümlerde de bahsedilen ızgara, yükleme havuzu vb. kayıp katsayıları toplanmış ve rezervuarı temsil eden noktaya toplu bir şekilde girilmiştir.

V-0' dan V-9'a kadar olan noktalar ve S1 noktası santral boru hattı boyunca bulunan dirsekleri ve bendleri oluşturmaktadır. Bu noktaların dirseklere ve bendlere konmuş olmasının sebebi dirseklerle ve bendlere program arasında doğrudan bir arayüz oluşturmak ve buralarda oluşan yerel kayıpları girdi olarak modele girmektir.

E1, rezervuar ve denge bacası arasında bulunan enerji tünelidir. P-1'den P-9'a kadar olan bölüm cebri borudur. B1 cebri borunun branşmana ayrıldığı kısım, S1 ise salyangozdan önceki kısmı temsil etmektedir.



Şekil 2.9: Tek ünite çalışırken kullanılan model.

Oluşturulan modeller daimi, zamana bağlı olmayan çözümlenmektedir. Girdiler, rezervuarın denizden olan yüksekliği ve yerel kayıp katsayısı, boru bağlantıları olan dirsekler ve bentlerin denizden olan yükseklikleri, boruların uzunlukları, çapları ve sürtünme kayıp katsayıları, türbinin çapı ve dönme hızı, kuyruk suyu rezervuarının denizden olan yüksekliğidir. Bütün bu girdiler incelendiğinde, kirecin sürtünme katsayısının literatürde olmadığı görülmüş ve model sürtünme katsayısı girilmediği için doğrulanamamıştır.

Reynolds sayısının bütün boru sistemi boyunca oldukça büyük olduğu görülmektedir. Reynolds sayısı yüksek olduğundan dolayı Moody diyagramında eğrilerin birbirlerine paralel olduğu bölge santraldeki akışı temsil etmektedir. Eğrilerin birbirlerine paralel olduğu bölgede akış Reynolds sayısından bağımsız olarak hareket eder. Bu sebeple santral boru sistemindeki akış Reynolds sayısından bağımsız sadece yüzey pürüzlülüğüne bağlıdır.

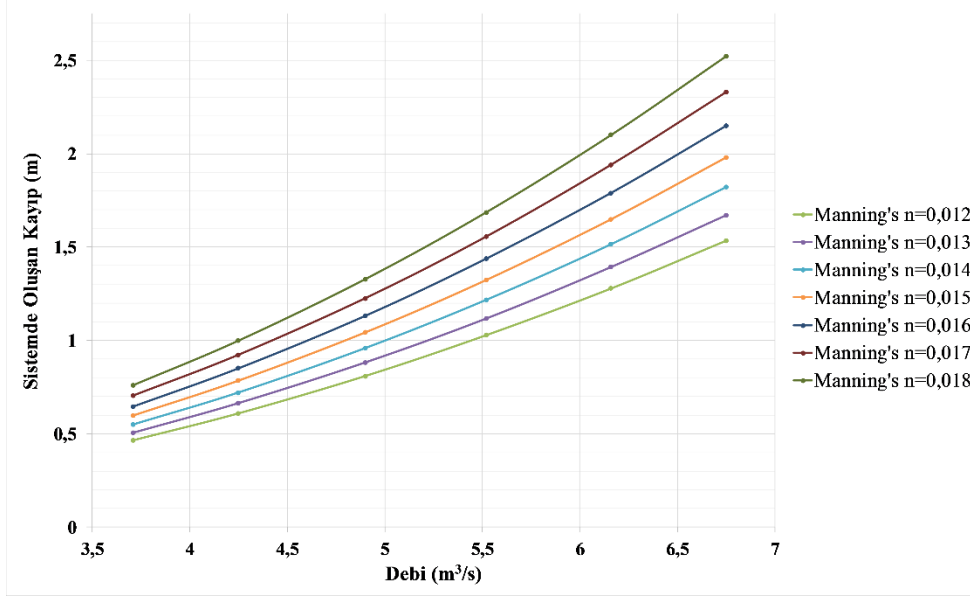
Modelde borularda oluşan sürtünme Manning's denklemi kullanılarak çözdürülmüştür. Hesaplarda Darcy-Weisbach denkleminin kullanılmamasının sebebi ise Darcy-Weisbach sürtünme katsayısı olan f 'nin birden fazla değişkene bağlı olmasıdır. Bu değişkenler Re sayısı, bağımlı pürüzlülük değeri ve boru çapıdır.

Fakat bunlardan farklı olarak Manning's sürtünme katsayısı n sadece borunun malzemesine bağlı olarak değişmektedir. Bu sebeple iteratif devam eden süreçte Manning's sürtünme katsayısı ile devam etmek daha uygun olacaktır.

Sürtünme katsayısını bulmak için model, farklı Manning's n sürtünme katsayıları ve farklı debilerde yapılan analizlerde, sensörün konulduğu kısım olan ve S1 olarak adlandırılan boruya kadar ki kayıplar verim ölçümü sonuçlarıyla karşılaştırmak üzere hesaplanmıştır. Yapılan bu analizlerde debiye ve farklı sürtünme katsayılarına bağlı sistemde oluşan kayıplar Şekil 2.10'da gösterilmiştir.

Sistem kayıplarının borulardan geçen debi ile doğru orantılı olarak arttığı, sürtünme katsayısı artışının yine borularda oluşan kaybı doğru orantılı olarak etkilediği grafikten görülmektedir.

Bu aşamada sürtünme katsayısının belirlenmesi için TÜBİTAK MAM ekibi tarafından Kepez-1 HES'te bazı testler yapılmıştır. Bu testler debi ölçümü ve basınç ölçümüdür.



Şekil 2.10: Farklı debi ve sürtünme katsayılarına bağlı olarak oluşan kayıplar.

2.2.1.2 Kepez-1 HES türbin hidrolik yük ve debi ölçümü

Gerçekleştirilen kavramsal tasarım modellerinin doğrulanabilmesi için 12.10.2015 tarihinde Kepez I Hidroelektrik Santralinde IEC60041 standardına uygun türbin verim, debi, hidrolik yük ölçümü, TÜBİTAK MAM Ekibi tarafından ETÜ HİDRO'nun danışmanlığıyla yapılmıştır. Tezin bu kısmında anlatılan tüm ölçümler MLS.IP11.D.80.3009.V20 Türbin Verim Ölçüm Raporu'ndan alınmıştır. Tezin daha iyi anlaşılması açısından ölçüm sonuçları teze eklenmiştir.

Üç üniteden oluşan santralde sadece birinci ünite için test gerçekleştirilmiştir.

Hidrolik yükün hesaplanması için yüksek ve düşük basınç referans bölgelerine ihtiyaç vardır. Standart türbin için bu bölgeleri sırasıyla salyangoz girişi ve emme borusu çıkışı olarak tanımlamaktadır ve ölçümlerde sensörler emme borusu çıkışına ve salyangoz önünde bulunan sürgülü vananın önüne yerleştirilmiştir [50].

Debi ve hidrolik yük ölçüm sonuçları Çizelge 2.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 2.1: Kepez I HES test sonuçları.

Kepez I HES Ünite 1	Debi (m ³ /s)	Sensörün Okuduğu Basınç (MPa)	Şaft Gücü (MW)
8.7 MW Testi	6.750	1.604	9.02
8 MW Testi	6.17	1.609	8.34
7 MW Testi	5.52	1.615	7.46
6 MW Testi	4.90	1.620	6.40
5 MW Testi	4.25	1.626	5.33
4 MW Testi	3.71	1.631	4.44

2.2.1.3 Analiz sonuçları ve test sonuçlarının karşılaştırılması

Deney sonuçlarının WaterCAD modelleriyle karşılaştırılabilmesi için sensörün okuduğu basınç değerinin yüke dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu işlem için de suyun yoğunluk değerine ihtiyaç vardır. Fakat santraldeki su, saf su değildir ve içinde ağır metaller bulunduğu için yoğunluğunun saf suyun yoğunluğundan daha fazla olması beklenmektedir. Test sırasında yapılan ölçümler ve ölçümlerdeki sıcaklık değerleri Çizelge Ek 1.1’de suyun kimyasal analizinin yapıldığı rapor Şekil Ek 1.1’de verilmiştir. Bu rapora göre suyun yoğunluğuna etki eden maddeler ve miktarları Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2: Suyun yoğunluğuna etki eden maddeler ve miktarları.

Özellik	Miktar (mg/l)
Sertlik	400
Klor	29.11
Toplam Organik Madde (T.O.M)	1.1
Toplam Çözünmüş Madde (T.D.S)	0.117
Demir	0.01
Toplam	430.337
Toplam (kg/m³)	0.4303

Santral suyunun yoğunluğu, hesaplanan 0.4303 kg/m³ değeri ile saf suyun belirli sıcaklıklardaki değerinin toplamına eşit olacaktır. Hesaplanan santral suyu yoğunluğu değerleri Çizelge 2.3’te gösterilmiştir.

Çizelge 2.3: Hesaplanan santral suyu yoğunluk değerleri.

MW	Sıcaklık (C°)	Saf Suyun Yoğunluğu (kg/m ³)	Santral Suyu Yoğunluğu (kg/m ³)
8.7	14.72	999.83	1000.27
8	14.92	999.80	1000.24
7	15.2	999.71	1000.15
6	15.5	999.59	1000.03
5	15.58	999.56	999.99
4	15.53	999.58	1000.02

Saha testi sonuçlarına göre hesaplanan cebri boru kayıpları Çizelge 2.4'te gösterilmiştir.

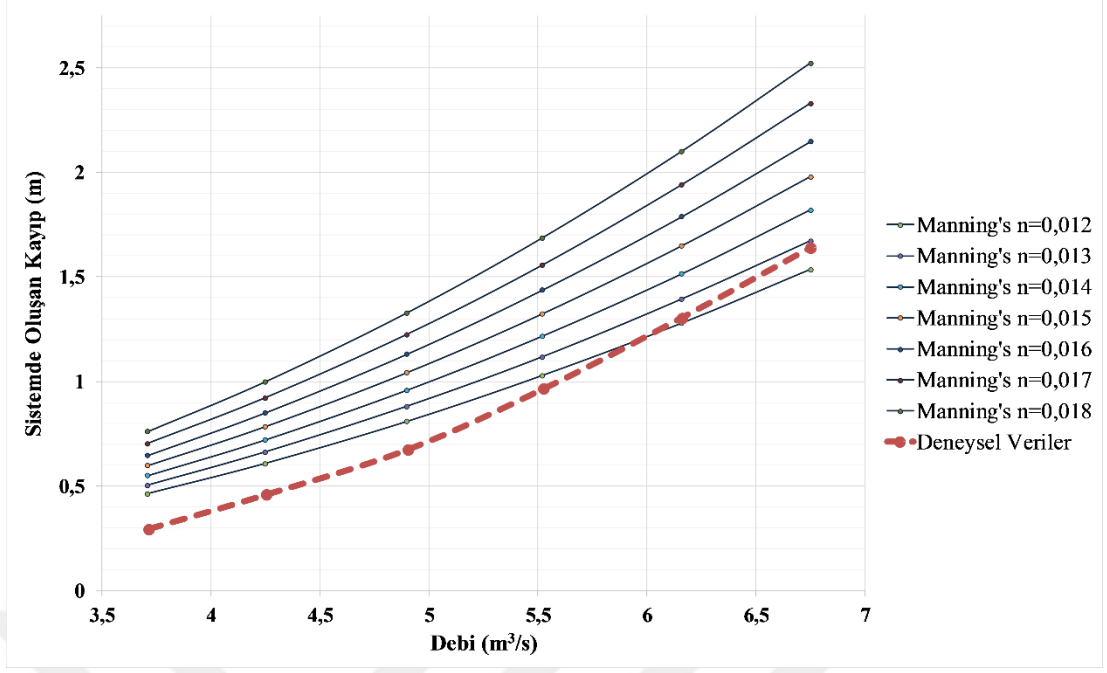
Çizelge 2.4: Ölçüm sonuçları.

Debi (m ³ /s)	Basınç Yüksekliği (m)	Hız Yüksekliği (m)	Hidrolik Yük (m)	Cebri Boru Kaybı (m)
6.75	163.71	1.32	165.03	1.64
6.17	164.25	1.10	165.35	1.31
5.52	164.83	0.88	165.72	0.99
4.90	165.42	0.69	166.12	0.68
4.25	165.97	0.52	166.50	0.46
3.71	166.48	0.399	166.88	0.297

Bölüm 2.2.1.1 de farklı Manning's n sürtünme katsayılarına göre oluşturulan debi-hidrolik yük eğrileri Bölüm 2.2.1.2'de sonuçları verilen deneylerle karşılaştırılmış ve aynı grafiğe taşınmıştır. Grafik, Şekil 2.11'de verilmiştir.

Bu test sonucunda deney sonuçlarının model sonuçlarından birine oturması beklenmiş fakat Şekil 2.11'de de görüleceği üzere verilerin birbirleriyle uyum içinde olmadığı, farklı olduğu görülmüştür.

Bu aşamada gerek model sonuçlarının gerekse deney sonuçlarının kendi içinde doğrulanması çalışmaları başlamıştır.



Şekil 2.11: Deney sonuçları ile model sonuçları.

2.2.1.4 Sistem analizi çalışmalarının doğrulanması

Bu kısımda, yapılan model analizleri sonucunda elde edilen verilerin doğruluğu için sayısal çalışmalar yapılmıştır. Ölçümlerin doğruluğu tartışılmıştır.

Yapılan bu doğrulama çalışmaları, literatürde bulunan teorik kayıp formülleriyle kayıpların tekrar hesaplanmasını ve pantolon bölünmesindeki akışın incelenmesi için yapılan hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) analizlerini içermektedir.

Teorik formüller

Cebri boruda gerçekleşen kayıplar ve bu kayıpların hesaplanmasında kullanılan formüller Denklem 1.3 ve Denklem 1.12'de gösterilmiştir. Bahsedilen formüller kullanılarak her bir boruda oluşan sürtünme kaybı ve yerel kayıplar hesaplanmıştır. Bu yapılan çalışma her bir Manning's n sürtünme katsayısı ve farklı debi değerleri için gerçekleştirilmiş ve hesaplanan toplam sistem kaybı, WaterCAD programı ile alınan sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hatanın ortalama % 0.5 civarında olduğu görülmüştür. Programda hesaplanan sürtünme kayıpları Manning's denklemi ile hesaplanmıştır, karşılaştırmanın daha doğru olması için teorik hesaplamalarda da Manning's denklemi kullanılmıştır.

Aşağıdaki çizelgede Manning's $n = 0.014$ ve tasarım debisi olan $6.16 \text{ m}^3/\text{s}$ için yapılan teorik hesaplamalar ve yine aynı değerleri kapsayan model analiziyle aralarında bulunan hata payı gösterilmiştir.

Çizelge 2.5: Teorik çalışma ve WaterCAD analizleri arasındaki fark.

	Çap (cm)	WaterCAD ile hesaplanan kayıp (m)	Teorik yöntemlerle hesaplanan kayıp (m)
Enerji Tüneli	247	0.49	0.49
Cebri Boru 1	237	0.31	0.30
Cebri Boru 2	210	0.62	0.62
Bransman	127	0.083	0.082
TOPLAM		1.50	1.492
HATA (%)		0.5	

WaterCAD modeli kullanılarak gerçekleştirilen HAD analizleri

Modele uygulanan santral bileşenlerinden en kritik kısmın pantolon ayrılması olduğu düşünülmektedir. Bunun sebebi, debinin bu kısımda bölünmesi ve yatay kurpun burada bulunmasıdır. Bu sebeple, pantolon kısmında oluşan akışı incelemek için santral paftaları kullanılarak 3 boyutlu katı modeli çıkarılmış, çeşitli giriş ve çıkış koşullarında HAD analizleri yapılmıştır. Pantolon bölünmesinin çizilen üç boyutlu modeli Şekil Ek 1.2'de gösterilmiştir.

Pantolon bölmesi HAD analizleri giriş koşulu için, Manning's $n=0.012$ olan sistem analizleri sonucunda hesaplanan basınç değerleri kullanılmıştır ve hidrolik yük değerleri girilmiştir. Çıkış koşulu olarak ise debi kullanılmıştır. HAD analizlerinde verilen giriş ve çıkış koşulları Çizelge Ek 1.2'de verilmiştir. Bunun sonucunda da boru çıkışında oluşan yük değerleri hesaplanmıştır.

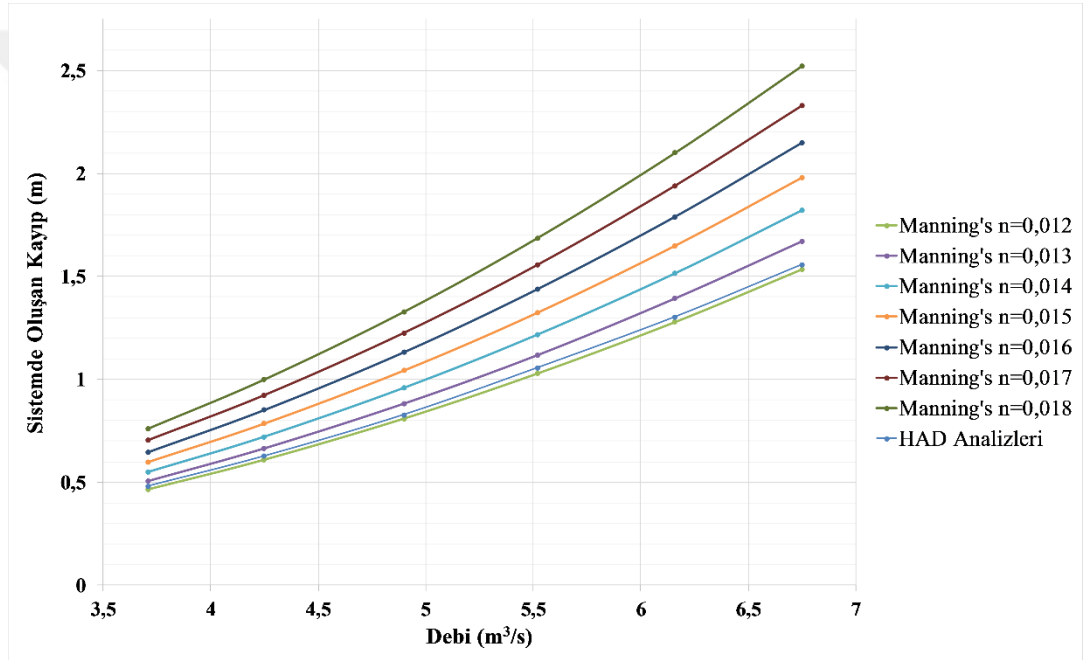
Bir sonraki aşamada ise aşağıda verilen eşitlik kullanılarak her bir debi değerine bağlı sistemde oluşan kayıp hesaplanmıştır.

Sistemdeki Kayıplar (m)

$$\begin{aligned}
 &= \text{Üst Rezervuar Su Yüzü Deniz Seviyesinden Yüksekliği (m)} \\
 &- \text{Türbin Eksenini Deniz Seviyesinden Yüksekliği (m)} \\
 &- \text{Türbin Girişindeki Toplam Enerji Yüğü (m)}
 \end{aligned} \tag{2.10}$$

HAD analizleriyle elde edilen sonuçlar Çizelge Ek 1.3'te gösterilmektedir. Bahsedilen HAD analizlerinde girdi olarak branşman ayrılması girişinde oluşan hidrolik yük değerleri alınırken, çıktı olarak branşman çıkışı yani türbin girişi yük değerleri alınmıştır. Bahsedilen bu türbin girişi yük değerleri denklem 2.10'da verilen salyangoz giriş yüküdür. Denklem 2.10 ile her bir debiye karşılık gelen sistemde oluşan kayıp hesaplanır.

Çizelge Ek 1.3'te belirtilen ve HAD analizleriyle elde edilen sonuçlar, debiye karşılık sistemde oluşan kayıp değerleri olarak Şekil 2.10'da gösterilen grafiğe eklenmiş ve Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Yapılan bu HAD analizlerindeki giriş çıkış koşulları, Manning's $n = 0.012$ olduğu analiz sonuçlarındaki hidrolik yük ve debi değerleridir.



Şekil 2.12: HAD analiz sonuçları – sistem kayıpları.

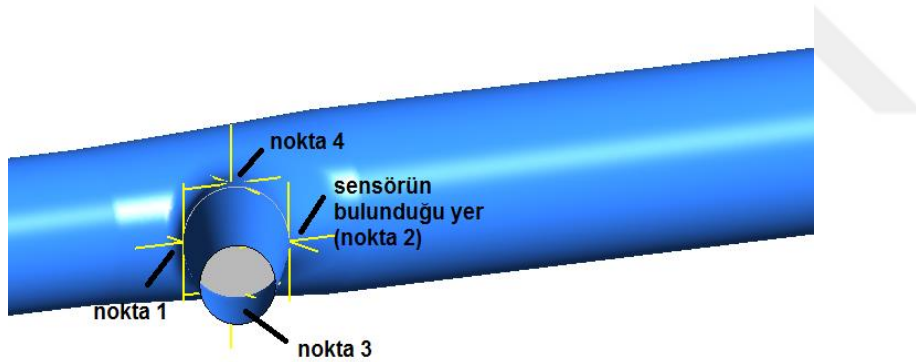
Yapılan HAD analiz sonuçlarında girdi olarak Manning's $n = 0.012$ model verileri kullanılmış ve HAD analizlerinden $n = 0.012$ eğrisine yakın değerlerde sonuç alınmıştır. Bu iki eğri arasındaki farkın yaklaşık olarak %3 olduğu hesaplanmıştır. Değerlerdeki bu yakınlık Şekil 2.12'den de açıkça görülmektedir. Bu çalışma sonucunda, WaterCAD analizlerinin kendi içinde sayısal çalışmalarla ne kadar tutarlı olduğu görülmektedir.

Deney verileri kullanılarak gerçekleştirilen HAD analizleri

Sahada TÜBİTAK MAM ekibi tarafından gerçekleştirilen verim ölçümü çalışmalarında elde edilen veriler kullanılarak HAD analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu analizlerde de giriş koşullarına bir önceki HAD analizlerinden farklı olarak ölçülen hidrolik yük değerleri, çıkış koşullarına da debi değerleri tanımlanmıştır. Çizelge Ek 1.4'te bu değerler detaylı bir şekilde yer almaktadır.

Sahada hidrolik yük ölçümü, pantolon bölmesindeki dirsekten hemen sonraya yerleştirilmiş sensörle tek bir noktadan ölçüm yapılarak gerçekleştirilmiştir. HAD analizlerinde sensörün bulunduğu noktadaki akışta herhangi bir girdap yapısının bulunup bulunmadığı ve sensörün ölçeceği basınç değerinin tek bir noktadan değil de boruyu çevreleyecek şekilde yerleştirilecek olan dört farklı sensörün ölçeceği basınç değerinden ne kadar farklı olabileceği araştırılmıştır.

HAD analizlerinde ölçümlerin alındığı noktalar Şekil 2.13'te gösterilmiştir.



Şekil 2.13: Ölçümlerin alındığı noktalar [40].

HAD analizi sonuçlarında elde edilen veriler Çizelge Ek 1.5'te ayrıntılı olarak gösterilmiştir. Çizelge Ek 1.5'te de görüldüğü üzere noktasal olarak alınan basınç değerleri birbirinden konumlandırıldıkları yere göre farklılıklar göstermektedir. Fakat bu noktaların ortalaması alındığında bu değerlerin sensörün bulunduğu nokta 2'deki basınç değerinden çok farklı olmadığı ayrıca bu değerden daha da yüksek bir değer olduğu görülmüştür. Tüm bunların ışığında sensörün tek noktadan ölçüm yapmasına rağmen ortalama değere çok yakın basınç değerleri okuduğu görülmüştür.

Yapılan analizlerle noktasal basınç değerlerinin okunmasının yanı sıra boruda oluşan akıştaki girdap yapısı incelenmiştir. Akışın farklı debilerde benzer karakteristik özellik sergilediği görülmüştür. 6.75 m³/s debi değerindeki analizlerde boruda oluşan statik basınç, toplam basınç ve hız değerleri Şekil Ek 1.3-1.8’de gösterilmiştir.

Sonuç konturlarında (Şekil Ek 1.3-1.8) sensörün bulunduğu kısımda herhangi bir girdap yapısı görülmemiştir. Sensörün okuduğu basınç değerinde konumdan kaynaklı bir hata olmadığı bütün debi değerleri için ortaya konmuştur.

Bu bölümde yapılan çalışmalarda hem WaterCAD modelleri hem deney sonuçlarında bir hata bulunmadığı görülmüştür. Bu aşamada deneyde kullanılan sensörlerin belirsizlikleri üzerine yoğunlaşmış ve deneyden alınan veriler belirsizliklerin eklenip çıkarılması ile bir bant haline getirilmiştir.

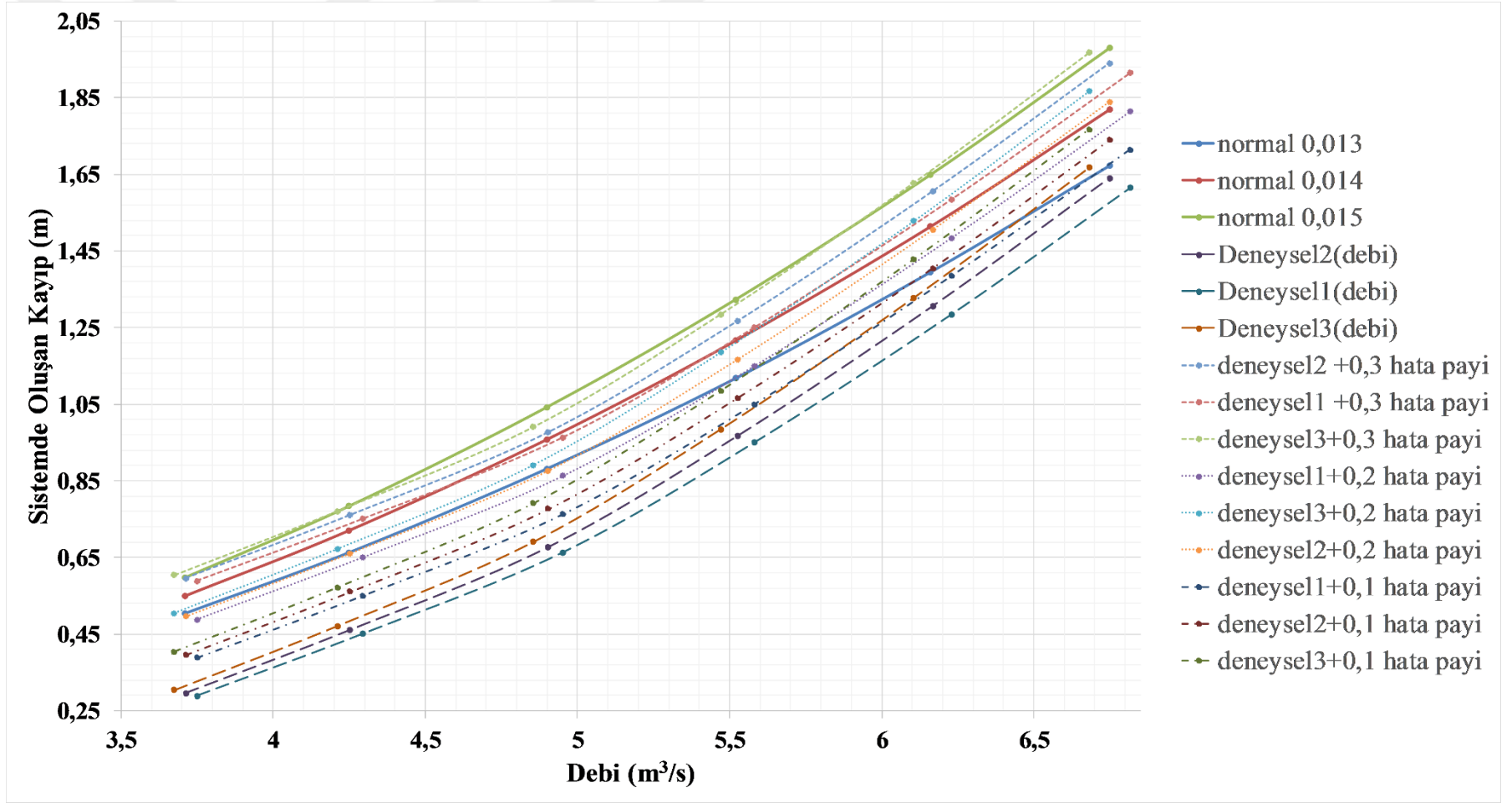
2.2.1.5 Test verileri ve analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Santralde ölçüm esnasında kullanılan sensör belirsizlikleri basınç sensörü için ± 0.3 m, debimetre için %1 olduğu göz önünde bulundurulduğunda, debimetre ve basınç sensörü belirsizliğinin cebri boru kaybına olan etkisi Çizelge Ek 1.6-1.8’ de gösterilmiştir.

Bu çizelgede her bir veri setinde debiler $\pm 1\%$, hidrolik yük değerleri de ± 0.3 m değiştirilmiştir. Her bir test debi-hidrolik yük eğrisi debilerde ve hidrolik yüklerde yapılan değişiklikten ötürü ileri ve geri ötelenmiştir.

Yapılan bu çalışma bir grafikte toplandığında Şekil 2.14 elde edilmiştir.

Bu grafikte WaterCAD analiz sonuçlarının oluşturduğu eğrilere, önceki paragraflarda bahsedilen çeşitli belirsizliklerin de dahil edildiği deney sonucu eğrilerinden birinin yaklaşması beklenmektedir. Bunun nedeni, deneysel ve programla yapılan analizlerin arka planında aynı formüller bulunmaktadır ve bu yüzden bu iki durumun kayıp eğrilerinin eğimleri birbirine oldukça yakın olmak durumundadır.



Şekil 2.14: Belirsizliklerin dahil edildiği ölçümler ve watercad analiz sonuçları.

Şekil 2.14'te kesikli olmayan çizgilerle ifade edilen eğriler WaterCAD modelinden alınmış üç farklı Manning's n sürtünme katsayısına göre çözdürülmüş analiz sonuçlarıdır. Bu değerler Manning's n = 0.013, 0.014, 0.015'dir. Normal 0.013, Normal 0.014, Normal 0.015 olarak adlandırılmıştır.

Deneysel 1, Deneysel 2 ve Deneysel 3 debi belirsizliklerini temsil etmektedir. Basınç ölçüm sensöründeki belirsizlikten kaynaklı ± 0.3 m ise Deneysel 1, Deneysel 2 ve Deneysel 3 debi belirsizliklerine eklenmiş ve farklı eğriler elde edilmiştir.

Bu grafik detaylı bir şekilde incelendiğinde, basınç sensörü belirsizliğinin eklenmediği (0 m ötelenen) eğrilerde (uzun kesik çizgi ile gösterilen) 'normal 0.013' eğrisini sadece tek bir noktada kesmektedir.

0.1 m ve 0.2 m ötelenen eğrilerdeki debi-kayıp değerlerinin herhangi bir WaterCAD analiz eğrisini takip etmediği görülmüş hatta farklı debi değerleri için farklı sürtünme katsayısı davranışı göstermiştir.

0.3 m ötelenen eğriler incelendiğinde ise, bu eğrilerin 'normal 0.015' ve "normal 0.014" eğrisini takip ettiği ve hemen hemen her debi değeri için aynı sürtünme katsayısını işaret ettiği görülmüştür. Bu aşamada hangi eğrinin daha yakın olduğuna bakılmış, aşağıda gösterilen çizelgede yakınlık derecesi detaylıca incelenmiştir.

Çizelge 2.6: Veriler arasındaki farklar.

WaterCAD (0.014)	Deneysel1+0.3 m Hata Payı	WaterCAD (0.015)	Deneysel3+0.3 m Hata Payı
0.55	0.59	0.6	0.60
0.72	0.75	0.78	0.77
0.95	0.96	1.04	0.991
1.21	1.25	1.32	1.29
1.51	1.58	1.64	1.63
1.82	1.91	1.97	1.97

Normal 0.014 ile ona yakın sonuç olan Deneysel1+0.3 Hata Payı verileri arasındaki farkın Normal 0.015 ile ona yakın sonuç olan Deneysel3+0.3 Hata Payı ile arasındaki farktan daha fazla olduğu görülmektedir.

Tüm bunların ötesinde debimetredeki $\pm \%1$ ve basınç sensöründeki ± 0.3 m belirsizlik değeri göz önüne alındığında verim ölçüm sonuçlarıyla WaterCAD analizlerinin Manning's sürtünme katsayısı n = 0.015'te örtüştüğü görülmüştür.

2.2.1.6 Manning's sürtünme katsayısı ve Darcy-Weisbach sürtünme faktörü

Akdeniz Bölgesi'nin karstik yapısından ötürü, bölgedeki sular oldukça kireçlidir. Saha incelemesi esnasında Kepez-1 Hidroelektrik Santrali boru hattı sisteminde de yaklaşık 1.5 cm kalınlığında kireç tabakası olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak ölçüm model hesaplarından kirecin Manning's n sürtünme kayıp katsayısı 0.015 olarak bulunmuştur.

Darcy Weisbach sürtünme faktörü ve Manning's sürtünme kayıp katsayısı arasındaki ilişkiyi ortaya koyan ampirik formül Denklem 2.8'de belirtilmiştir. Bu korelasyon santrale uygulanmak istenirse;

$$\left. \begin{array}{l} n = 0.015 \\ D = 2.13 \text{ m} \\ R_h = 0.532 \text{ m} \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Denklem 2.8 kullanıldığında } f = 0.0218 \text{ bulunmuştur.} \\ \text{Borudaki } Re = 3.7 * 10^6. \\ \text{Moody Diyagramı kullanılarak } \epsilon/D = 0.0015 \\ \epsilon = 3.195 \text{ mm} \end{array}$$

$\epsilon = 3.2 \text{ mm}$ değeri aynı malzemedeki borular için sabit alındığında, doğrulama işlemi için 1.30 m'lik yine aynı malzemeye sahip bir santral borusunda ters işlem uygulanırsa;

$$\left. \begin{array}{l} \epsilon = 3.2 \text{ mm} \\ D = 1.30 \text{ m} \\ \epsilon/D = 0.00246 \\ Re = 6 * 10^6 \\ R_h = 0.325 \end{array} \right\} \begin{array}{l} \text{Moody Diyagramı kullanılarak } f = 0.0247 \\ \text{Denklem 2.8 kullanıldığında } n = 0.0147 \text{ bulunmuştur.} \end{array}$$

Yukarıdaki işlemlerde de görüldüğü üzere sadece borunun malzemesine göre değişiklik gösteren n değeri korelasyon kullanılarak Darcy-Weisbach f faktörüne çevrilebilir. f faktöründen yola çıkarak, mutlak pürüzlülük değerine ulaşılabilir. Bulunan mutlak pürüzlülük değeri ters işlem ile santralin başka bir borusuna uygulandığında, değişen akış koşullarıyla Moody diyagramında ikinci boru için farklı bir f değeri bulunur bu f değeri yukarıdaki korelasyonla n değerine çevrildiğinde ilk

başta kullanılan Manning's n değerine oldukça yakın bir değer elde edilmektedir. Kullanılan iki borunun malzemesinin de aynı olduğu düşünüldüğünden n değerlerinin birbirine yakın çıkması doğru bir yaklaşımda bulunulduğunu göstermektedir.

Literatürde betonun mutlak pürüzlülük değerinin 0.3 ile 3 mm arasında olduğu görülmektedir [48]. Yapılan hesaplar incelendiğinde kirecin mutlak pürüzlülük değerinin yaklaşık olarak 3.2 mm çıktığı görülmektedir. Bu sebeple kirecin oldukça pürüzlü denilebilecek bir beton gibi davrandığı söylenebilir.

Uzunluğu 100 m, çapı 2.13 m olan, 6.1 m³/s debi geçirilen bir boruda oluşan kayıp;

$$\begin{array}{l} \text{Darcy-Weisbach} \\ \text{Denklemi} \end{array} \quad h_L = f \frac{L V^2}{D 2g} = 0.0218 * \frac{100}{2.13} \frac{1.711^2}{2 * 9.81} = \mathbf{0.1528 m}$$

$$\begin{array}{l} \text{Manning's} \\ \text{Denklemi} \end{array} \quad h_L = \frac{10.3L(nQ)^2}{D^{5.33}} = \frac{10.3 * 100(0.015 * 6.1)^2}{2.13^{5.33}} = \mathbf{0.1532 m}$$

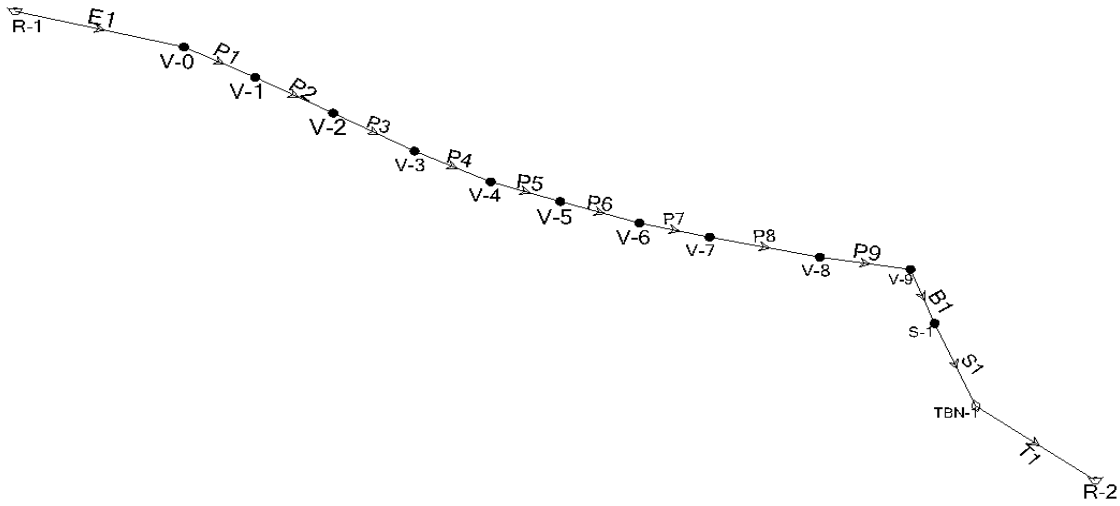
Uzunlukları, çapı, malzemesi aynı olan ve eşit miktarda debi geçiren bir boruda kayıp hesabı yapılırken farklı empirik formüller kullanılmıştır. Sürtünme hesaplama yöntemi farklı olmasına rağmen birbirine çok yakın sonuçlar elde edilmiştir. Bu durum, n ve f katsayıları arasında oluşturulan korelasyonun doğruluğunu gözler önüne sermiştir.

2.3 Türbin debi ve hidrolik yük değerleri

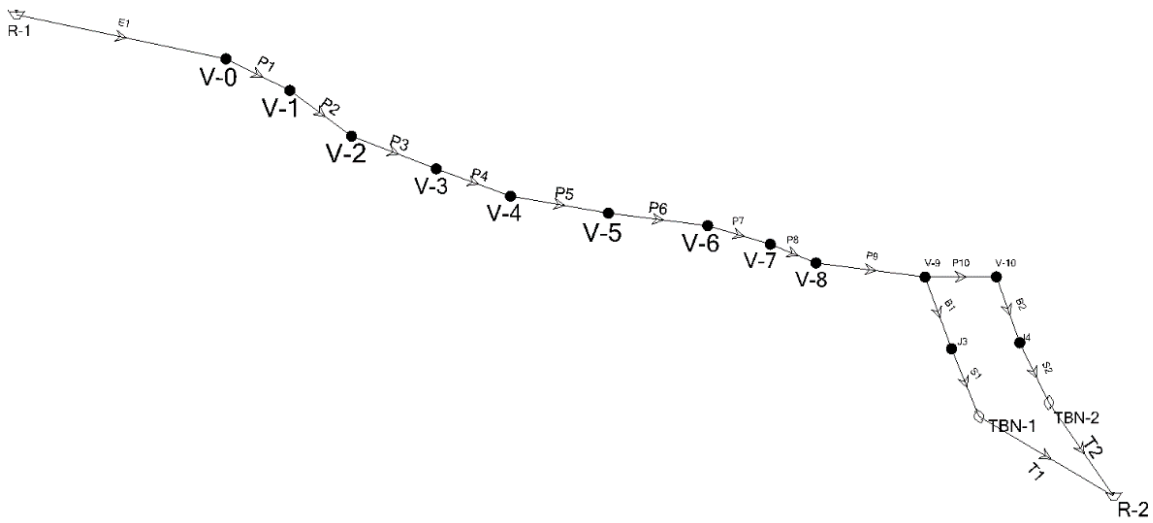
Sistemde oluşan kayba kirecin etkisi iki farklı şekilde açıklanabilir. Bunlardan ilki kirecin boru kesit çapında sebep olduğu daralma ((1.5+1.5) 3 cm), diğeri ise kirecin sürtünme kayıp katsayısının oldukça yüksek olması sebebiyle boruda oluşan kayıpların artışıdır. Bu iki durum karşılaştırıldığında kirecin kesitte sebep olduğu daralmanın sisteme etkisi, sürtünme kayıp katsayısının artışıdaki etkisine göre oldukça küçük, önemsiz kalmaktadır. Bu sebeple cebri boruda bulunan kireç katmanı temizlense bile, suyun etkisiyle kısa bir süre sonra borularda tekrar kireç oluşumu gözlenecektir. Kayıplar sürtünme kayıp katsayısı değişeceğinden artış gösterecektir. Kireç tabakası oluştuktan sonra tabakanın kalınlığının kayba önemli oranda etkisi olmayacaktır. Bu sebeple cebri boruların temizlenmesi fikrinden vazgeçilmiş, tasarlanacak türbinin kireçli duruma göre tasarlanması kararı alınmıştır.

Sistem analizinde WaterCAD [34] programıyla oluşturulan ve kayıp, hidrolik yük hesaplarında kullanılan modeller Şekil 2.15,16 ve 17’de gösterilmiştir.

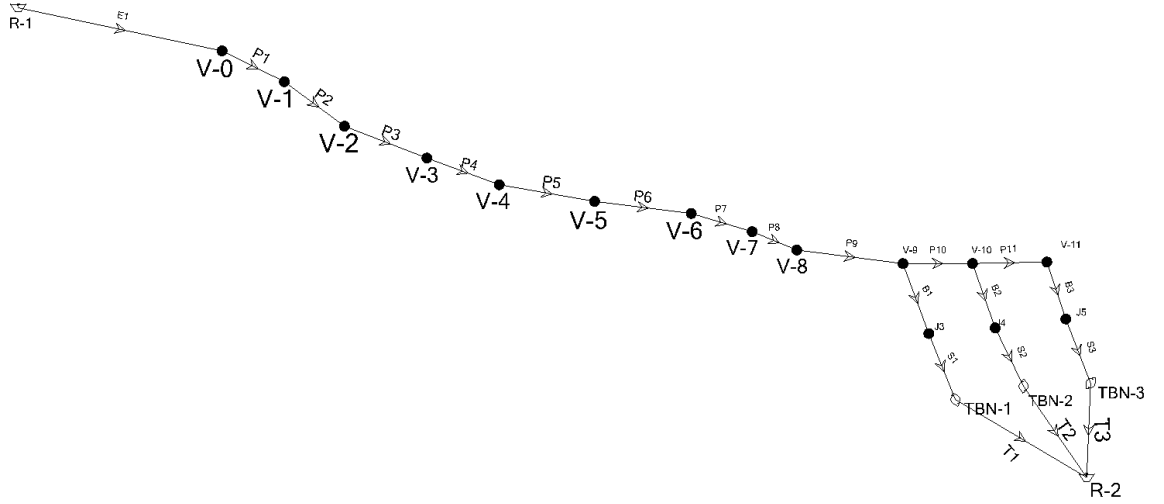
Cebri boruda oluşan kayıp, geçen debinin karesiyle doğru orantılıdır. Bu sebeple sistemden geçen debi miktarı değiştikçe oluşan hidrolik yük de değişmektedir. Bu aşamada tam yük altında çalışan bir türbin ya da üç türbin için sistemden geçirilen debi farklıdır. Üç türbin analizlerinde sistemden geçen debi, tek türbinde geçen debinin üç katıdır. Tüm bunlar bir araya getirildiğinde tek türbin çalışan santralde türbinin kullanacağı debi miktarı ile üç türbin çalışan santralde her bir türbinin kullanacağı hidrolik yük farklıdır. Bu sebeple yapılan tek türbin, iki türbin ve üç türbin analizleri için farklı modeller oluşturulmuştur.



Şekil 2.15: Tek türbin analizlerinde kullanılan model.



Şekil 2.16: İki türbin analizlerinde kullanılan model.



Şekil 2.17: Üç türbin analizlerinde kullanılan model.

3.7 m³/s minimum, 6.1 m³/s optimum, 6.75 m³/s maksimum debi değerlerinde tek türbin ve üç türbinde sistemde oluşan kayıplar hesaplanmış, buna bağlı olarak da türbin önündeki yük değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan hidrolik yük değerleri Çizelge Ek 1.9'da detaylı bir şekilde gösterilmiştir.

Proje kapsamında mevcut türbinin davranışının belirlenmesi için, TÜBİTAK MAM ekibi tarafından türbin ayar kanadı ve çarkının katı modelleri bilgisayar ortamına taranarak aktarılmıştır.

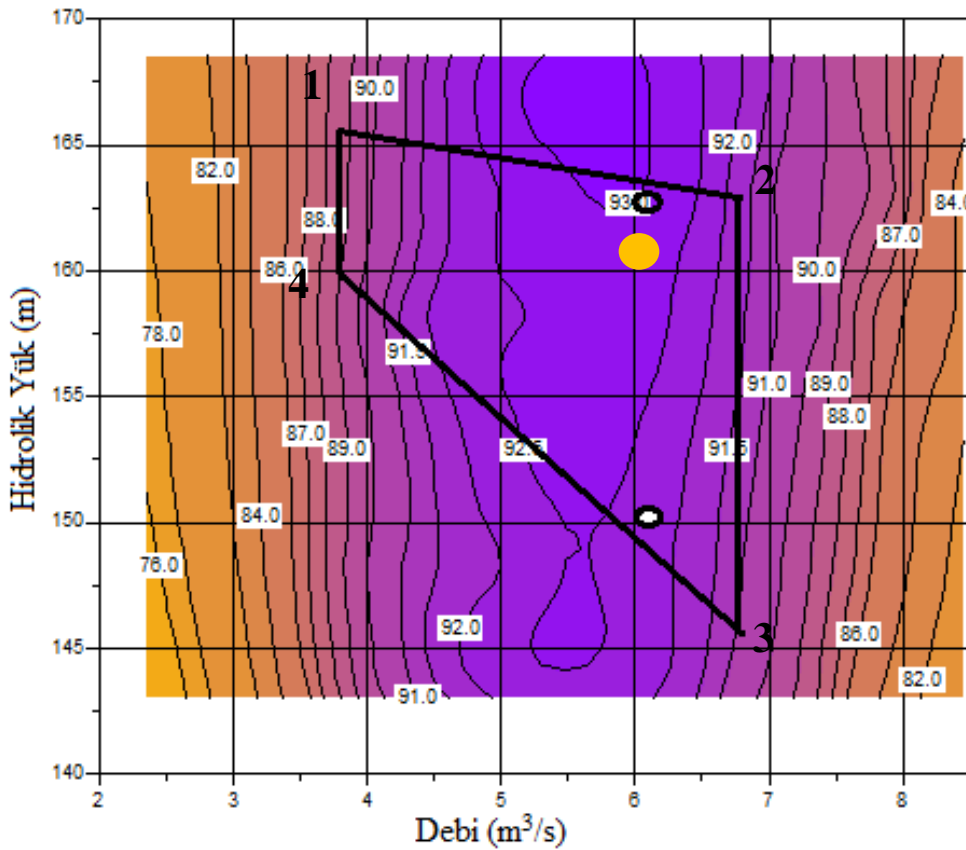
Salyangoz, sabit kanatlar, ayar kanadı, çark ve emme borusunun yani mevcut türbinin girişinden çıkışına kadar bütün bileşenlerinin 3 boyutlu katı modelleri elde edilmiş ve tam türbin analizleri verilmiştir. ETÜ HİDRO tarafından farklı debi ve hidrolik yük değerlerinde HAD analizleri gerçekleştirilmiş, farklı sınır koşullarında türbinin davranışı incelenmiştir. HAD analizlerinden çıkan sonuçlarla Şekil 2.18'de gösterilen tepe diyagramı elde edilmiştir [41]. Bu tepe diyagramı türbinin karakteristiğini açıkça gözler önüne sermektedir. Şekil 2.18'de gösterilen HAD sonuçları üzerine çalışma bölgelerinin belirlenebilmesi için minimum debi ve hidrolik yükleri gösteren çalışma aralığı ilgili grafiğe eklenmiştir.

Şekil 2.18'de çalışma aralığı belirtilmiş mevcut türbin tepe diyagramında, 1 numaralı nokta tek türbin için minimum debinin (3.71 m³/s) santralden geçme durumunu temsil etmektedir. 2 numaralı nokta tek türbin için maksimum debi (6.75 m³/s) nin geçme durumunu, 3 numaralı nokta üç türbin için maksimum debi (her bir türbin için 6.75 m³/s, cebri borularda toplamda 6.75*3 m³/s), 4 numaralı nokta ise üç türbin için

santralin çalışması için gereken minimum debide oluşan hidrolik yükü karşılık yeridir.

Yapılan analizlerde elde edilen sonuçlarda, en fazla hidrolik yükün tek türbin minimum debide görülmesi, en düşük hidrolik yükün ise maksimum debi, üç türbin analizlerinde görülmüştür.

WaterCAD modelleri ve test sonuçları yardımıyla hesaplanan hidrolik yük değerleri tepe diyagramı üzerinde belirtilmiş grafiği Şekil 2.18’de gösterilmiş ve tek türbin minimum debinin en yüksek hidrolik yükü, üç türbin maksimum debinin en düşük hidrolik yükü işaret ettiği görülmüştür. Tepe diyagramı üzerinde belirtilen bu sınırlar türbinin çalışma koşulları aralığını oluşturmaktadır.

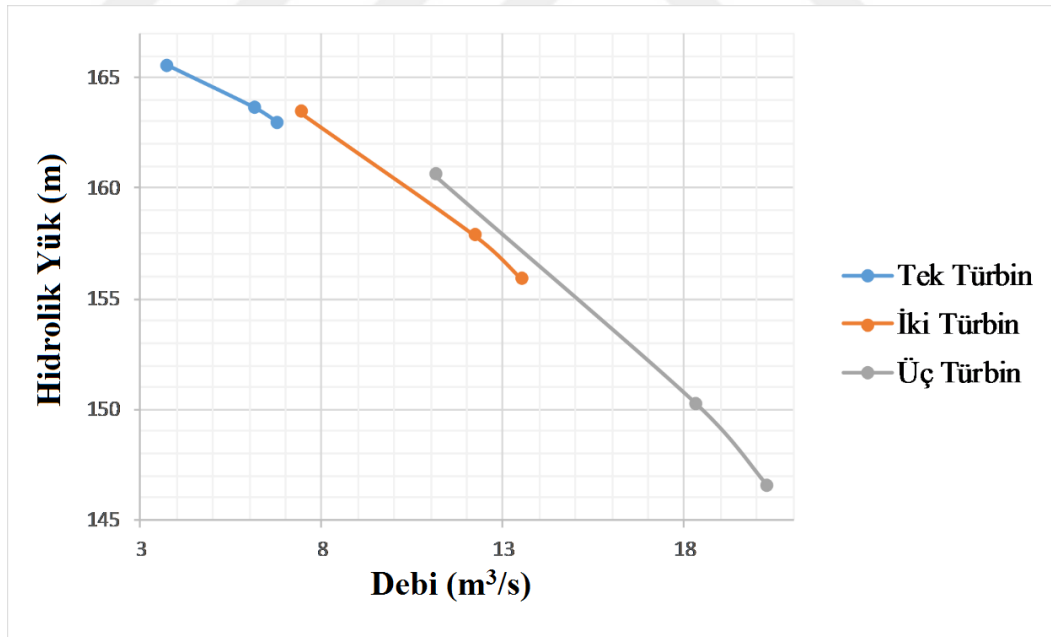


Şekil 2.18: Türbin için belirlenen çalışma aralığı [41].

Bu noktalar yukarıda da açıklandığı gibi santralin maksimum ve minimum noktalarını temsil etmektedir. Dolayısıyla bu noktaların birleşimiyle oluşturulan alan türbinin çalışma aralığını oluşturmaktadır.

Daha önce de açıklandığı üzere, tezin amaçlarından biri, su türbin tasarım parametrelerinin belirlenmesidir. Tepe diyagramı üzerinde çalışma aralığının çıkarılması mevcut türbin koşullarının ne olduğunu gözler önüne sermiştir. Şekil 2.18 çalışma aralığı üzerindeki turuncu nokta türbin tasarımının gerçekleştirileceği debi ve hidrolik yük değerini temsil etmektedir. Bu noktalar 160 m, 6.1 m³/s 'e denk gelmektedir. Bu noktaların tasarım parametresi olarak kabul edilmesinin sebebi, maksimum verimin etrafında şekilleneceği bu noktayı türbinin çalışma aralığının biraz daha ortasına taşımak, daha geniş bölgede yüksek verimler elde etmektir. Ayrıca tasarım noktasının çalışma aralığının ortasına taşınması tasarım noktasının tek türbin (1-2 numaralı noktaların oluşturduğu sınır) ve üç türbin (3-4 numaralı noktaların oluşturduğu sınır) çizgilerine de eşit uzaklıkta olması amaçlanmıştır. Bu durum yine bu iki farklı operasyon için aralarında oluşacak verim farkını azaltmaya yönelik gerçekleştirilmiştir.

Şekil 2.19'da farklı türbin sayılarında sistemden geçen debilere karşılık yük değerleri gösterilmiştir. Debi artışına bağlı olarak borularda oluşan kayıp da artacağı için, hidrolik yükün giderek azalması doğal bir sonuçtur.



Şekil 2.19: Debi ve yük değerleri.



3. SU DARBESİ

3.1 Yöntem

Su darbesi, su dalgasının ya da basınç değişiminin bir kanalda ya da boruda ani şekilde artıp azalmasıdır [42]. Borulara zarar verebilen su darbesinin başlıca sebepleri, zamana bağlı gerçekleşen şok ve kavitasyondur. Su darbesinin zararı 4 ana başlıkta toplanabilir; zamana bağlı yüksek su basınçları, vakum etkisiyle borularda oluşan basıklık ve kavitasyon sebebiyle boru ve boru bağlantılarının zarar görmesidir [51].

Boru hattı sistemlerinde zamana bağlı akışın belirlenmesi, ön görülebilmesi için birçok teknik uygulanmıştır. Bu teknikler hidrolik açıdan aynı olmadıkları dolayısıyla, uygulamalarıyla ilgili genel bir kural ya da uluslararası ana esaslar bulunmamaktadır [42].

3.1.1 Su darbesinin teorik modellenmesi

Su darbesinin sebepleri hakkında birçok çalışma yapılmıştır. İlk olarak Joukowsky, içme suyu besleme boruları hakkında deneyler yapmıştır. Bu deney sonuçları bir araya getirildiğinde denklem 3.1 elde edilmiştir [43].

$$\Delta P = \pm \rho a \nabla V \quad (3.1)$$

ΔP = Basınç Değişimi (N/m²)

ρ = Yoğunluk (kg/m³)

a = Dalga Hızı (m/s)

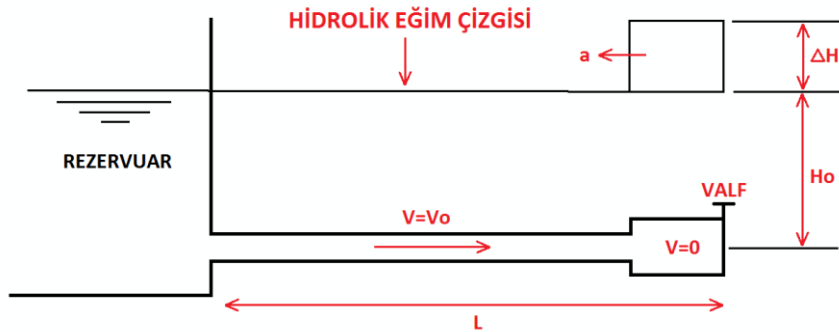
∇V = Hızdaki Değişiklik (m/s)

Joukowski denklemi daha çok türbinlerde ani yük atma durumu için, pompalarda ve vanalarda ani kapanma durumlarında kullanılır. Joukowski'ye göre ani yük atma, kapanma süresinin dalganın yansımasından daha hızlı olduğu durumlardır.

Denklemdaki \pm , işaretleri pompa, türbin veya vananın sistemdeki konumu ile ilişkilidir.

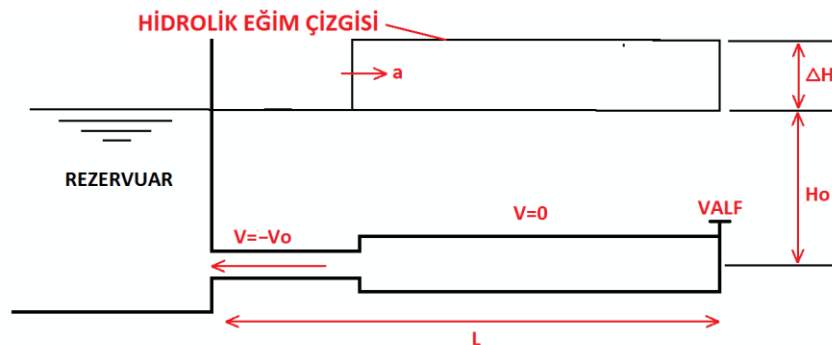
Borunun uzunluğu L olarak alındığında, dalganın yansıma süresi $2L/a$ olur. Kapanma süresi $2L/a$ 'dan daha kısaysa bu ani yük atma durumudur [43].

Şekil 3.1-3.4'de su darbesinin genel olarak farklı zamanlardaki davranışı incelenmiştir. Şekil 3.1.'de ($0 < t < L/a$) valf aniden kapanmıştır ve valf çevresindeki akış hızı 0 'a inmiştir. Buradaki basınç artışı $\Delta H = (a/g)V_0$. $t = L/a$ anında dalga rezervuara ulaşmış ve boru boyunca oluşan bütün basınç artışı düşmüştür [43].



Şekil 3.1: $0 < t < L/a$ zaman aralığındaki davranış.

Şekil 3.2'de ($L/a < t < 2L/a$) aralığı incelenmiştir. Rezervuarda hidrolik yük daima H_0 'dır fakat borulardaki hidrolik yük değeri $H_0 + \Delta H$. Bu sebeple borulardan rezervuara bir akış gerçekleşir ve ters yönlü olduğu için $-V_0$ değerindedir. Bunun sonucunda borulardaki hidrolik yük $H_0 + \Delta H$ 'den H_0 'a düşer. $t = 2L/a$ anında bütün borulardaki hidrolik yük H_0 'dır ve dalga tekrar valfe ulaşmıştır [43].



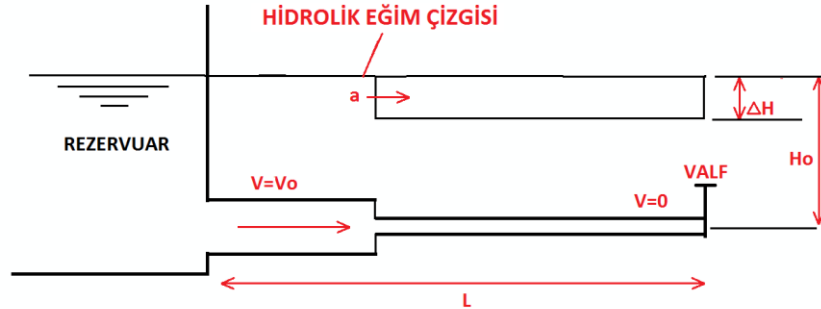
Şekil 3.2: $L/a < t < 2L/a$ zaman aralığındaki davranış.

Şekil 3.3'te ($2L/a < t < 3L/a$) aralığı incelenmiştir. Bu aşamada geri akış daha fazla sağlanamaz ve $-V_0$ olan hız 0'a düşer. Bu da H_0 olan hidrolik yük değerini $H_0 - \Delta H$ 'e düşürür. Özetlenirse, $t = 3L/a$ anında borulardaki hız 0, basınç değeri de $H_0 - \Delta H$ dir [43].



Şekil 3.3: $2L/a < t < 3L/a$ zaman aralığındaki davranış.

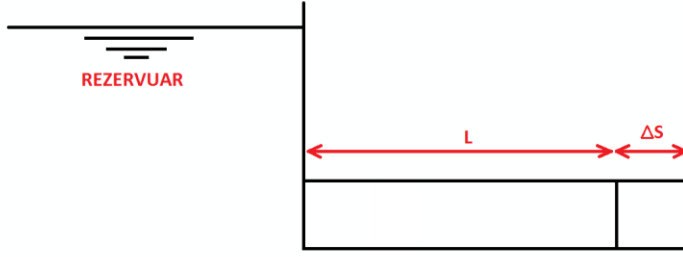
Şekil 3.4'te ($3L/a < t < 4L/a$) aralığı incelenmiştir. Negatif basınç değeri rezervuara ulaştıktan sonra yeniden dengesiz bir durum oluşmuş olur. Rezervuar basıncı boru basınçlarından daha yüksektir. Bu sebeple rezervuardan borulara doğru bir akış başlar ve $t = 4L/a$ anında basınç değeri tekrar H_0 'a ulaşır. Bu davranış $4L/a$ zaman aralıklarıyla devam eder [43].



Şekil 3.4: $3L/a < t < 4L/a$ zaman aralığındaki davranış.

Vananın kapanmasından sonra akış valfe çarpmıştır, bu durum bir miktar uzamaya, Δs , sebep olmuştur. Hız a m/s, zaman L/a s, uzunluk L m alınır, sistemdeki kütle $\rho AV_0 L/A$ olur. Boruda gerçekleşen uzama miktarı hesaba katıldığında [44];

$$\frac{\rho AV_0 L}{a} = \rho L \Delta A + LA \Delta \rho + \rho A \Delta s \quad (3.2)$$



Şekil 3.5: Sistemdeki süreklilik ilişkisi.

$$\Delta V = \frac{\Delta S a}{L} - V_o \quad (3.3)$$

Denklem 3.2 ile 3.3 bir araya getirildiğinde;

$$-\frac{\Delta V}{a} = \frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho} \quad (3.4)$$

Denklem 3.1 türetildiğinde;

$$\Delta H \approx -\frac{a \Delta V}{g} \quad (3.5)$$

Denklem 3.4 ile 3.5 bir araya getirildiğinde;

$$a^2 = \frac{g \Delta H}{\frac{\Delta A}{A} + \frac{\Delta \rho}{\rho}} \quad (3.6)$$

Esneklik kitle sayısı K;

$$K = \frac{\Delta P}{\frac{\Delta \rho}{\rho}} \quad (3.7)$$

Tekrar düzenlendiğinde;

$$a^2 = \frac{\frac{K}{\rho}}{1 + \left(\frac{K}{A}\right) \left(\frac{\Delta A}{\Delta P}\right)} \quad (3.8)$$

İnce cidarlı borularda;

$$a = \frac{\sqrt{\frac{K}{\rho}}}{\sqrt{1 + \left[\left(\frac{K}{E}\right) \left(\frac{D}{b}\right)\right] C_1}} \quad (3.9)$$

Eğer boru yukarı yöndeki ucundan bağlanmışsa $C_1 = 1 - \mu/2$, aşağı yöndeki ucundan bağlantısı yapılmışsa $C_1 = 1 - \mu^2$. Eğer boru iki taraflı bağlantıya sahipse $C_1 = 1$ 'dir. μ Poisson oranıdır [44].

3.1.2 Karakteristikler yöntemi

Hız (V) ve basınca (P) bağlı süreklilik ve momentum denklemlerini çözmek için karakteristikler yöntemi, sonlu elemanlar metodu, sonlu farklar metodu, sınır integrali yöntemleri kullanılabilir. Fakat tek boyutlu, hidrolik zamana bağlı problemlerin çözümünde programlamanın kolay olması ve verimliliği dolayısıyla en iyi metot karakteristikler yöntemidir [45]. Temel iki denklem olan süreklilik ve momentum denklemlerinin karakteristikler yöntemi ile çözümü aşağıdaki gibi açıklanabilir.

Denklem 1.13, L_1 , Denklem 1.14, L_2 olarak kabul edilirse;

$$L_1 + \lambda L_2 = 0 \quad (3.10)$$

$\frac{f}{2D} V|V| + g \sin \theta = F$ olarak kabul edilir ve Denklem 1.13, 1.14, 3.10 bir araya getirilirse;

$$\frac{\partial P}{\partial t} + V \frac{\partial P}{\partial x} + a^2 \rho \frac{\partial V}{\partial x} + \lambda \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + F \right) = 0 \quad (3.11)$$

Basitleştirildiğinde;

$$\left[\frac{\partial P}{\partial t} + \left(V + \frac{\lambda}{\rho} \right) \frac{\partial P}{\partial x} \right] + \left[\frac{\partial V}{\partial t} + \left(V + \frac{a^2 \rho}{\lambda} \right) \frac{\partial V}{\partial x} \right] \lambda + \lambda F = 0 \quad (3.12)$$

Birinci terimde, $V + \frac{\lambda}{\rho} = \frac{dx}{dt}$ eşitse birinci terim $\frac{dP}{dt}$ olur. İkinci terimde, $V + \frac{a^2 \rho}{\lambda} = \frac{dx}{dt}$ eşitse ikinci terim $\frac{dV}{dt}$ haline gelir.

$$\frac{dx}{dt} = V + \frac{\lambda}{\rho} = V + \frac{a^2 \rho}{\lambda} \quad (3.13)$$

Son halde;

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \lambda \left(\frac{\partial V}{\partial t} \right) + \lambda F = 0 \quad (3.14)$$

Denklem 3.13 çözüldüğünde;

$$\lambda = \pm \rho a \quad (3.15)$$

$$\frac{dx}{dt} = V \pm a \quad (3.16)$$

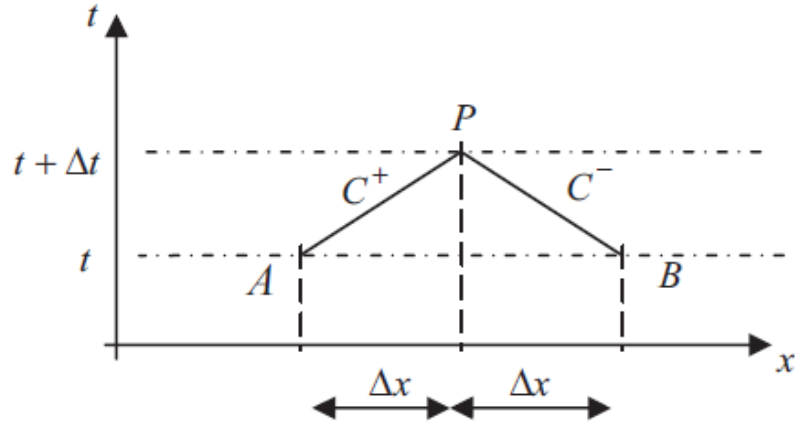
Dalga hızı, akışın hızında çok daha yüksek olduğu için denklem 3.16'daki V ihmal edilir.

$$\frac{dx}{dt} = \pm a \quad (3.17)$$

Denklem 3.17, 3.14 ve 3.15 bir araya getirildiğinde;

$$C^+: \quad \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dt} + a \frac{dV}{dt} + aF = 0 \quad \frac{dx}{dt} = +a \quad (3.18)$$

$$C^-: \quad \frac{1}{\rho} \frac{dP}{dt} - a \frac{dV}{dt} - aF = 0 \quad \frac{dx}{dt} = -a \quad (3.19)$$



Şekil 3.6: x-t düzlemindeki karakteristik çizgileri [46]

Şekil 3.6'da $+\frac{1}{a}$ eğimindeki eğri C^+ , $-\frac{1}{a}$ eğimindeki eğri C^- 'dir. $t = t_0$ anındaki hız (V) ve basınç (P) bilinendir ve başlangıç koşulları olarak kabul edilmiştir. P ve V'nin P noktasındaki yani $t = t_0 + \Delta t$ zamanındaki değerleri hesaplanmak istenmektedir.

Denklem (3.18) ve (3.19)'un integrali alındığında [43];

$$C^+: \int_A^P \frac{1}{\rho a} dP + \int_A^P dV + \int_A^P F dt = 0 \quad \int_A^P dx = \int_A^P a dt \quad (3.20)$$

$$C^-: -\int_B^P \frac{1}{\rho a} dP + \int_B^P dV + \int_B^P F dt = 0 \quad \int_B^P dx = -\int_B^P a dt \quad (3.21)$$

F değerinin $(g \sin \theta + \frac{f}{2D} V|V|)$ 'e eşit olduğundan önceki kısımlarda bahsedilmiştir.

Farklı eğriler için integrali alındığında [43];

$$C^+: \int_{t_A}^{t_P} F dt = g \sin \theta \Delta t + \frac{f}{2D} V_A V_A \Delta t \quad (3.22)$$

$$C^-: \int_{t_B}^{t_P} F dt = g \sin \theta \Delta t + \frac{f}{2D} V_B V_B \Delta t \quad (3.23)$$

Denklem (3.22) G_A , Denklem (3.23) G_B olarak adlandırılır ve Denklem (3.18) ve (3.19) ile bir araya getirilir [43];

$$C^+: \quad (P_P - P_A) + \rho a(V_P - V_A) + \rho a G_A = 0 \quad (3.24)$$

$$C^-: \quad -(P_P - P_B) + \rho a(V_P - V_B) + \rho a G_B = 0 \quad (3.25)$$

Denklem 3.24 ve 3.25'ten V_P ve P_P hesaplanır [43];

$$V_P = \frac{1}{2} \left[(V_A + V_B) + \frac{1}{\rho a} (P_A - P_B) - (G_A + G_B) \right] \quad (3.26)$$

$$P_P = \frac{1}{2} [(P_A + P_B) + \rho a(V_A - V_B) - \rho a(G_A - G_B)] \quad (3.27)$$

Denklem 3.18 ve 3.19 ile P noktasındaki hız ve basınç değerlerini hesaplanabilmektedir. Bu denklemler hidrolik yük ve debi cinsinden ifade edilebilir.

Denklem 3.18, $a \frac{dt}{g} = \frac{dx}{g}$ ile çarpılırsa, dönüşümü gerçekleştirilmiş olur [44]. C^+ karakteristik çizgisi;

$$\int_{H_A}^{H_P} dH + \frac{a}{gA} \int_{Q_A}^{Q_P} dQ + \frac{f}{2gDA^2} \int_{x_A}^{x_P} Q|Q|dx = 0 \quad (3.28)$$

Denklem 3.28'de yer alan terimler; $B = \frac{a}{gA}$, $R = \frac{f\Delta x}{2gDA^2}$ olarak alınır [44];

$$C^+: \quad H_P = H_A - B(Q_P - Q_A) - RQ_A|Q_A| \quad (3.29)$$

$$C^-: \quad H_P = H_B + B(Q_P - Q_B) - RQ_B|Q_B| \quad (3.30)$$

Düzenlendiğinde [44];

$$C^+: \quad H_{Pi} = C_P - BQ_{Pi} \quad (3.31)$$

$$C_P: \quad C_P = H_{i-1} + BQ_{i-1} - RQ_{i-1}|Q_{i-1}| \quad (3.32)$$

$$C^-: \quad H_{Pi} = C_M + BQ_{Pi} \quad (3.33)$$

$$C_M: \quad C_M = H_{i+1} - BQ_{i+1} + RQ_{i+1}|Q_{i+1}| \quad (3.34)$$

3.2 Su Darbesi Analizleri

Bölüm 2’de Kepez-1 Sistem Hidrolik Analizi çalışmaları gerçekleştirilmiş, santral WaterCAD programı ile bilgisayar ortamına aktarılmış, aktarılan modelin doğruluğu sahada yapılan deneylerle doğrulanmıştır. Bölüm 2.2.1.5’te, bulunan modele ek olarak sisteme PRV (Basınç Düzenleme Vanası) ve denge bacası eklenmiş bir önceki bölümde olumlanan Manning’s n sürtünme katsayısı 0.015 kullanılmıştır. Doğrulan bu modeller su darbesi analizleri için doğrudan kaynak oluşturmuştur.

WaterCAD, boru hattı sistemini daimi, zamana bağlı olmayan, çözen bir programdır. Su darbesi durumu ise zamana bağlı çözüm gerektirir bu sebeple su darbesi analizleri için zamana bağlı çözüm yapan Bentley HAMMER [32] programı kullanılmıştır. Bu iki program arasında ara yüz bulunmaktadır bu sebeple WaterCAD programında oluşturulan modeller HAMMER’a aktarılabilir. Bu sebeple WaterCAD programında oluşturulan modeller HAMMER’a aktarılabilir.

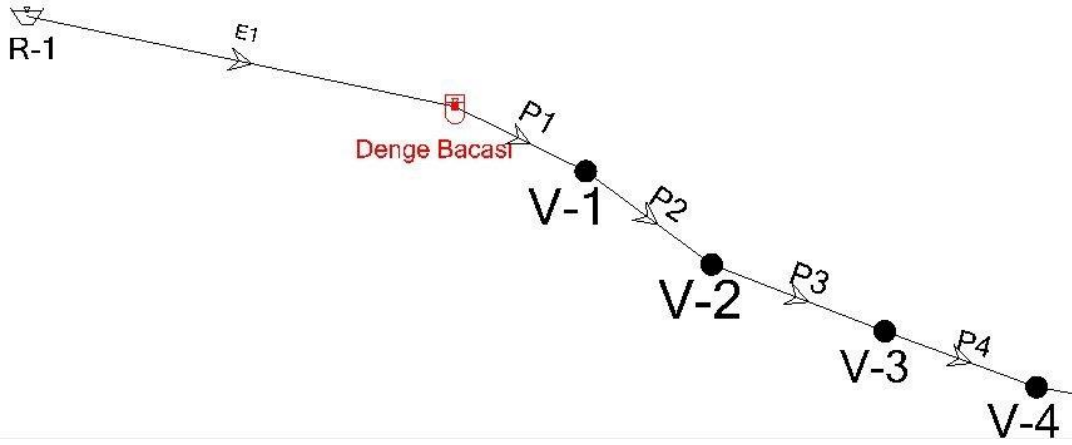
3.2.1 Su darbesi analiz modelleri

HAMMER [32] analizlerinde kullanılan santral modelinde, WaterCAD [34] programıyla yapılan sistem analizi çalışmalarında kullanılan santral modeli temel alınmıştır. WaterCAD programında yapılan santral modelinde şekilde gösterilen bölümlere denge bacası ve tahliye vanalarının eklendiği görülmektedir.

Denge bacası santralde de enerji tüneliyle cebri boruyu birleştirdiği için modelde ikisinin arasına yerleştirilmiştir.

Bu modelde denge bacası modellenirken göz önüne alınması gereken bazı parametreler bulunmaktadır. Bunlar denge bacasının maksimum yüksekliği maksimum su alma kapasitesi, minimum su alma durumu ve santral normal çalışırken yani herhangi bir acil kapama yapılmamışken denge bacasında bulunan suyun seviyesidir.

PRV (Basınç Düzenleme Vanası), santralde türbin için baypas hattı oluşturmaktadır. Santralde fazla suyun tahliyesini sağlar bu sebeple oluşan basıncı azaltmaktadır. Baypas hattının başlangıç noktası salyangozun önüdür ve baypas hattı kuyruk suyuna açılır.



Şekil 3.7: Denge bacasının bulunduğu kısım.

HAMMER programında bileşen olarak PRV (Basınç Düzenleme Vanası) olmasına rağmen debi program içinde TCV (Kısma Valfi) ile daha rahat kontrol edilebildiğinden TCV (Kısma Valfi) kullanılmış, girilen girdiler ile PRV (Basınç Düzenleme Vanası) gibi davranması sağlanmıştır.

Kepez-1 HES basınç düzenleme vanası şu şekilde çalışmaktadır;

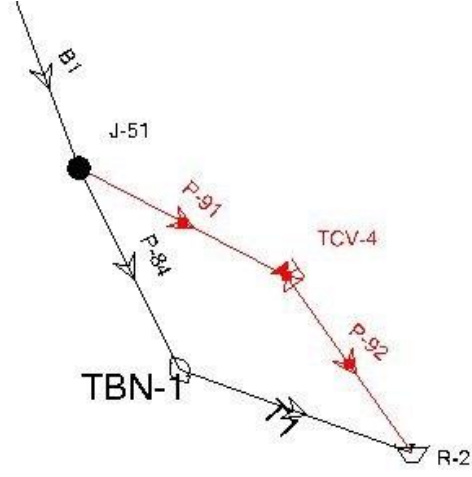
- Türbin ayar kanatlarında ani kapanma başlatılır.
- Ani kapanmanın başlamasıyla özellikle türbine yakın olan kısımlardaki borularda basınç artışı görülür.
- Basınç artışı, mekanik yolla basınç düzenleme vanasının açılmasını tetikler ve fazla suyun tahliye işlemi başlamış olur.
- Borulardaki basıncın tekrar normale dönmesi ile basınç düzenleme vanası kapanır.

Basınç düzenleme vanası modellenirken göz önüne alınan parametreler ise;

Vananın bulunduğu yükseklik bulunurken santral paftaları kullanılmıştır. Türbin çark eksen kotuyla hemen hemen aynı düzleme oturduğundan dolayı 111.05 olarak kabul edilmiştir.

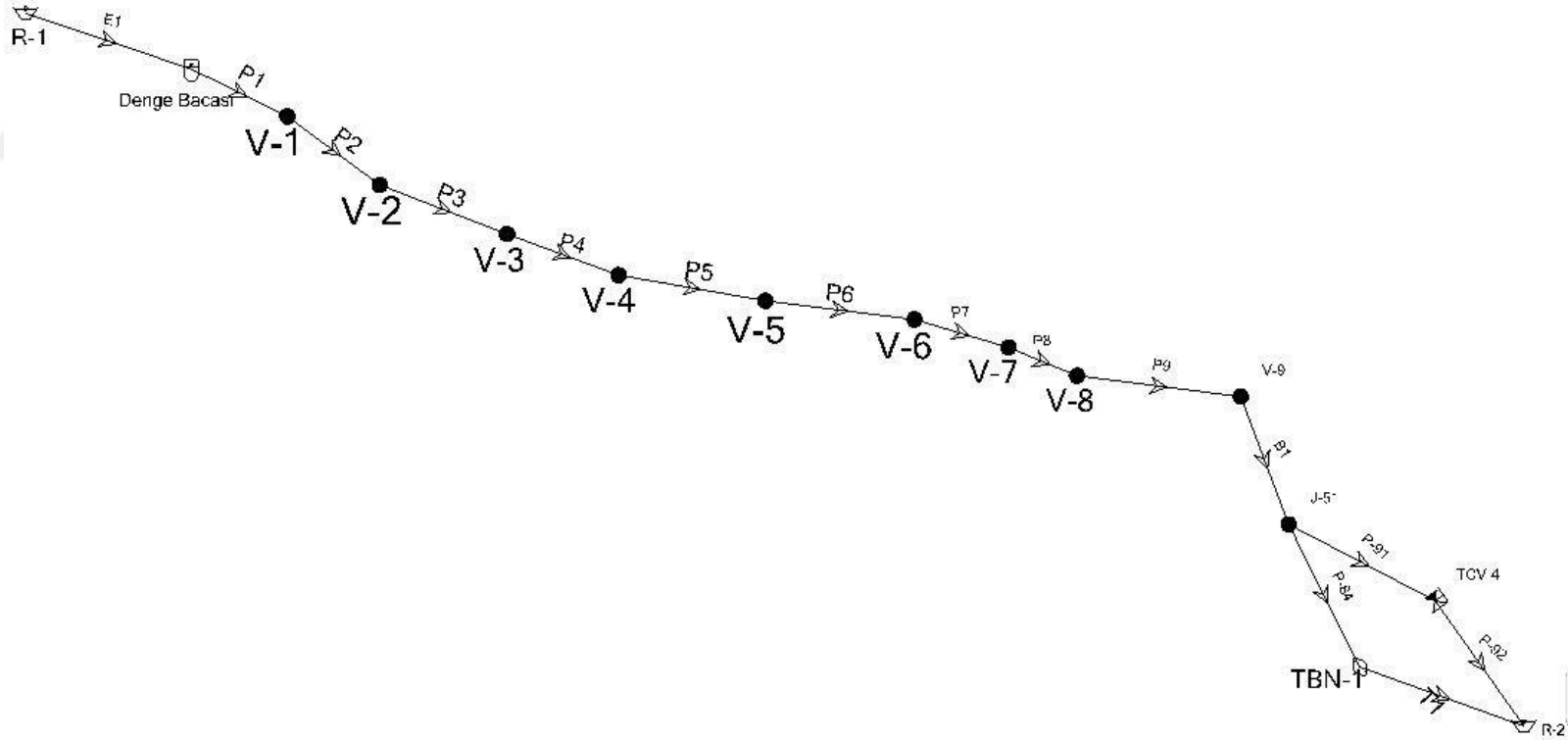
Vananın başlangıçta kapalı, daha sonra türbin ayar kanatlarının kapanmaya başlamasıyla oluşmaya başlayan yüksek basınç ile mekanik olarak tetiklenmesi sonucu açılmaya başladığı modelde de göz önüne alınmıştır.

Vananın çapı bulunurken paftalar kullanılmıştır. Paftalara göre 60 cm olduğu belirlenmiştir.

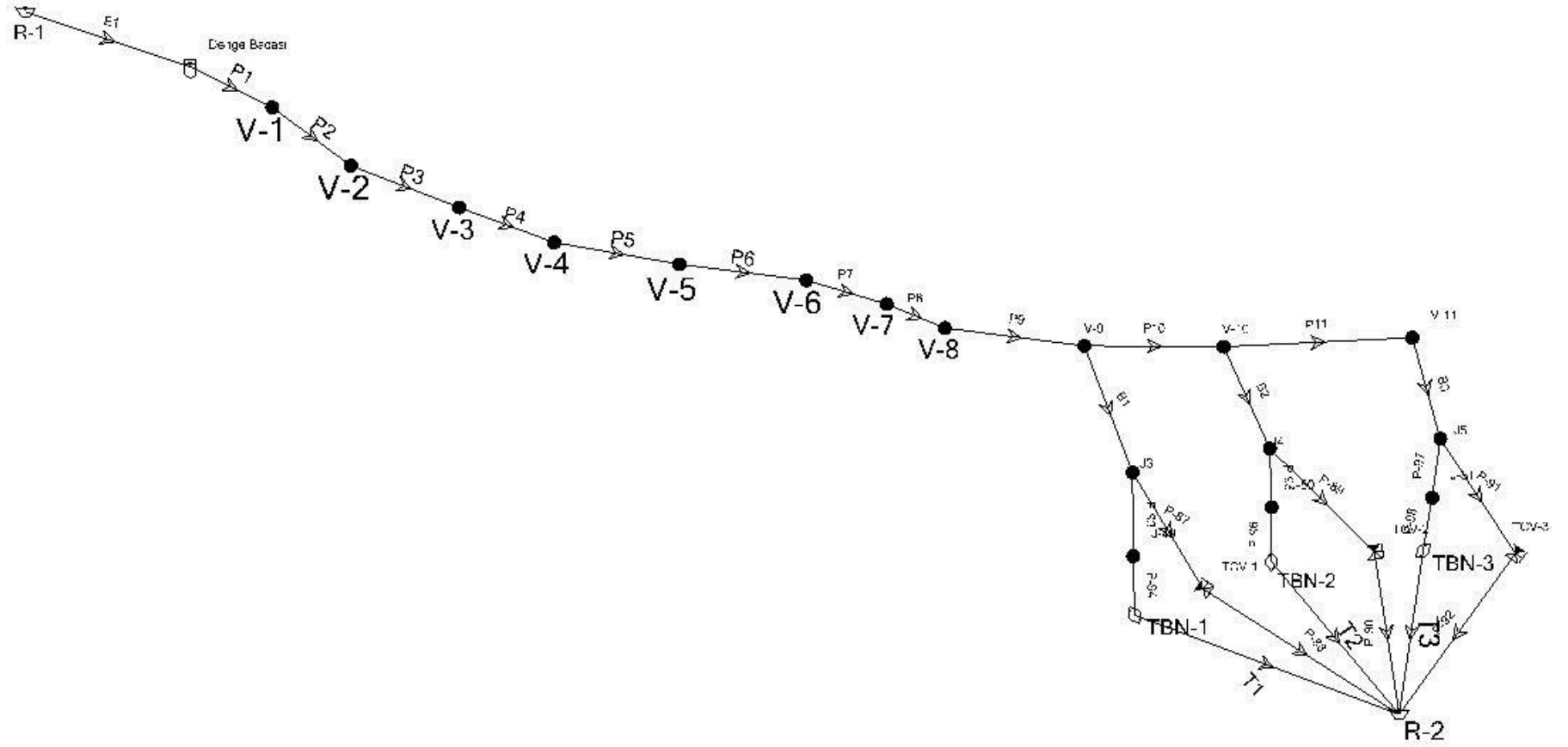


Şekil 3.8: Basınç düzenleme vanasının bulunduğu kısım.

Sistem analizi bölümünde de açıklandığı gibi tek türbin ve üç türbin için yapılan analizlerde türbin başına düşen debi aynıken, cebri borudan geçen toplam debi farklıdır. Bu yüzden ayrı modeller oluşturulmuştur.



Şekil 3.9: Tek türbin analizlerinin kullanıldığı model.

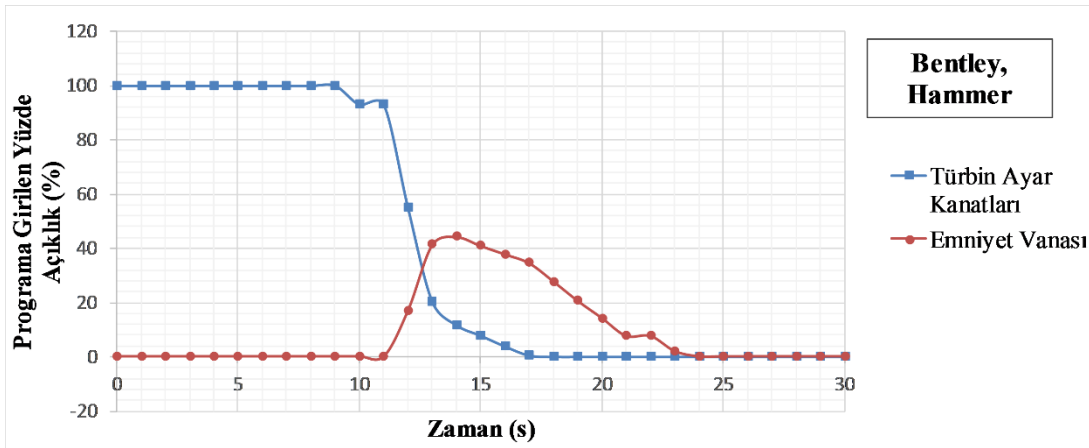
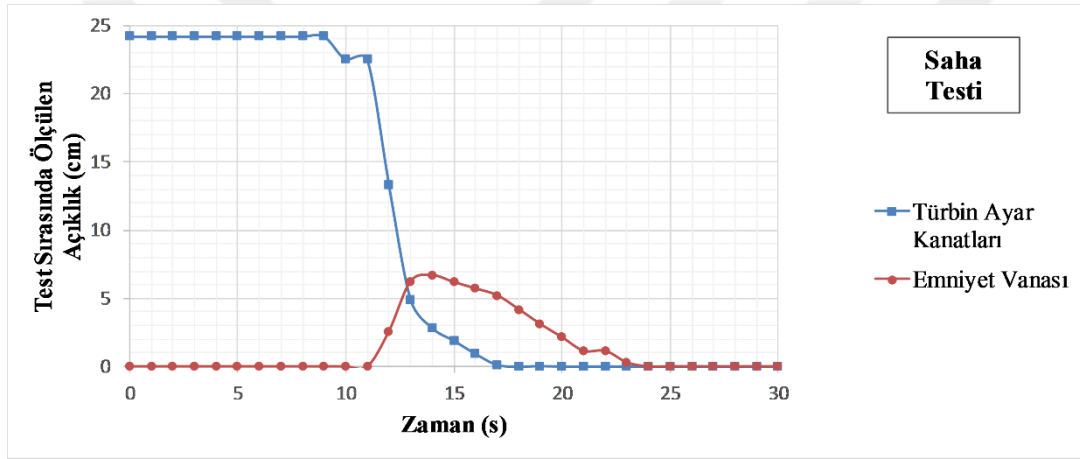


Şekil 3.10: Üç türbin analizlerinin kullanıldığı model.

3.2.1.1 Tek türbin su darbesi analizleri

Tek türbin için kullanılan santral modeli Şekil 3.9’da detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Bu bölümde yer alan çalışmaların amacı, santralde gerçekleştirilen testlere bilgisayar ortamında yapılan su darbesi modelleriyle yaklaşmak ve santral testlerini bilgisayar ortamına taşımaktır.

Analizlerin amacının santralde yapılan acil kapama testlerine bilgisayar ortamında bir temel oluşturulmak istendiğinden daha önce bahsedilmiştir. Aşağıdaki şekilde model açılma ve kapanma süreleri ile testlerde ölçülen açılma ve kapanma sürelerinin karşılaştırılması yer almıştır. Ve bunların birebir örtüştüğü görülmüştür. İlk grafik testleri temsil ederken, ikinci grafik program girdilerini temsil etmektedir.



Şekil 3.11: Test ve Hammer programı kapanma sürelerinin karşılaştırılması.

Şekil 3.11’de ani kapanma testinde PRV ve türbinin davranışı görülmektedir. Ani kapanma testinde türbin kapatılmaya başlanmasıyla PRV’nin açılmaya başladığı net bir şekilde görülmektedir. Grafik incelendiğinde PRV (Basınç Düzenleme Vanası)’nin

türbinin kapanmaya başlamasından yaklaşık olarak 1 s sonra açıldığı görülmektedir. Bunun sebebi, türbinin kapanmaya başlaması ile borularda oluşan basınç artışının türbin açıldıktan 1 s sonraki durumu PRV'nin tetiklenmesine yetmiştir. Eğer türbinin kapanması sonucu oluşan basınç artışı PRV'nin açılması için gerekli basınç limitinin altında kalsaydı PRV'nin süreç boyunca hiç açılmadığı da gözlemlenebilirdi. Bu aşamada PRV'nin açılışının direkt sebebi türbinin kapanmaya başlaması değil, türbinin kapanmaya başlaması ile oluşan basınç artışı denilebilir.

Yapılan saha testlerinde basınç düzenleme vanasının açılma ve kapanma sürelerinin hesaplanmasının yanı sıra kaç cm açıklıkta ne kadar debi geçirdiği de saptanmıştır. Sahada ani kapanma testlerinde PRV'den geçirilebilen en fazla su debisi $1.68 \text{ m}^3/\text{s}$ olmuştur. Daha yüksek debide suyun PRV'den (Basınç Düzenleme Vanası) boşaltımı sağlanamamıştır. Bu sebeple daha yüksek debilerdeki PRV açıklık miktarı, testte daha düşük debiler ile oluşturulan debi-açıklık eğrisine göre hesaplanmıştır. Bu hesaplamada ölçülen açıklıkların sistemden geçen debiye göre grafiği çizilmiş, bu grafiğin davranışını temsil eden bir eğim çizgisi çıkarılmıştır. Testin gerçekleştirilemediği debi değerlerindeki açıklık bu eğim çizgisi denkleminde göre hesaplanmıştır.

Yapılan acil kapama testinde, PRV'nin geçen debiye göre pozisyonundaki değişiklik cm cinsinden aşağıdaki tabloda belirtilmiştir. Bu tabloya göre $0.88 \text{ m}^3/\text{s}$ debi PRV'den geçerken PRV'deki açıklık miktarı 0.788 cm 'dir. $1.68 \text{ m}^3/\text{s}$ debi geçerken ise PRV'nin açıklık seviyesi 2.13 cm 'ye ulaşmaktadır. Bunların ötesinde PRV'nin maksimum açıklığının 15.116 cm olduğu bilinmektedir. PRV'nin yüzde açıklık değerleri, test sırasında cm cinsinde ölçülen tablo 3.1'de "Açıklık (cm)" olarak belirtilen değerlere dayanmaktadır.

Yine tablo 3.1'de açıklık değerine göre PRV'den geçen debiler ölçülmüştür. Bu testlerde sistemden geçen debinin $6.8 \text{ m}^3/\text{s}$ olduğu bilindiğinden debide yapılan yüzde işleminde $6.8 \text{ m}^3/\text{s}$ debi değeri %100 olarak kabul edilmiş, yüzde debiler bu verilere dayandırılarak hesaplanmıştır.

Çizelge 3.1: Basınç düzenleme vanası açıklık debi ilişkisi.

PRV Açıklık (cm)	PRV Açıklık (%)	Debi (m ³ /s)	Debi (%)
0.001	1	0.5	7.35
0.788	5.21	0.88	12.94
1.78	11.77	1.42	20.88
2.13	14.10	1.68	24.71
6.683	44.21	4.345	63.95

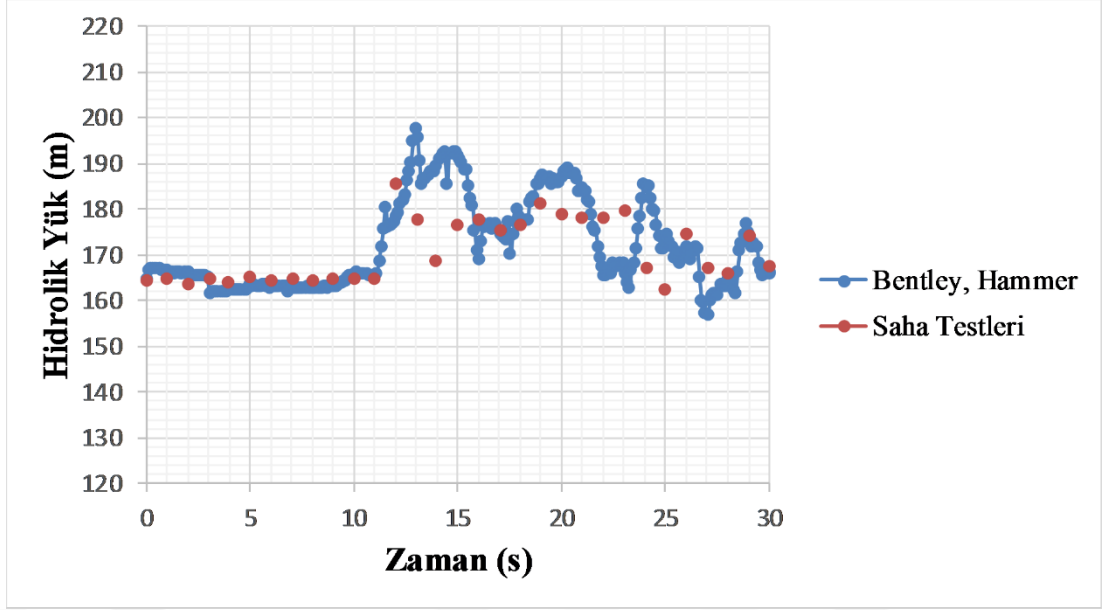
Çizelge 3.2’de yer alan ve PRV için hesaplanan kapalılık yüzdeleri, HAMMER programında girdi olarak kapalılık yüzdeleri istendiğinden dolayı, %100’den açıklık yüzdelerinin çıkarılmasıyla bulunmuştur.

Çizelge 3.2: Basınç düzenleme vanası kapalılık debi ilişkisi.

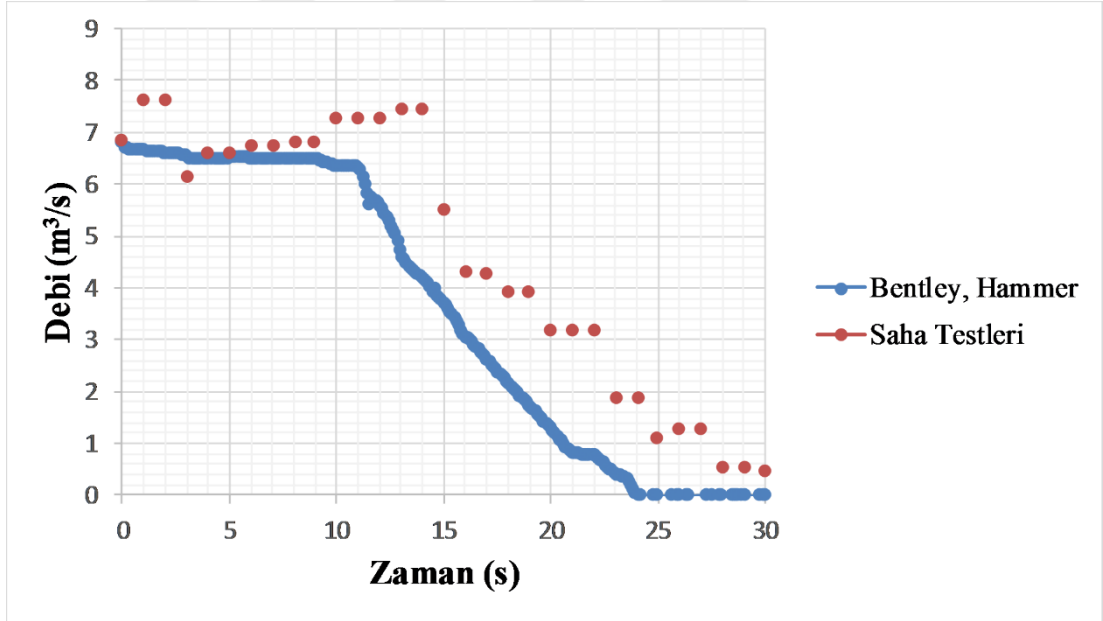
PRV Kapalılık Yüzdesi (%)	Bağımlı Debi (%)
100	0
99	7.35
94.79	12.94
88.23	20.88
85.90	24.71
55.79	63.95
0	100

3.2.1.2 Tek türbin su darbesi analiz sonuçları

Yapılan analizler ayar kanatlarının ve basınç düzenleme vanası açılma ve kapanma sürelerini kapsayan 30 s için gerçekleştirilmiştir. Basınç ve debi sonuçları Şekil 3.12 ve 3.13’te gösterilmektedir.



Şekil 3.12: Saha testleri ve analizlerin basınç ilişkisi.

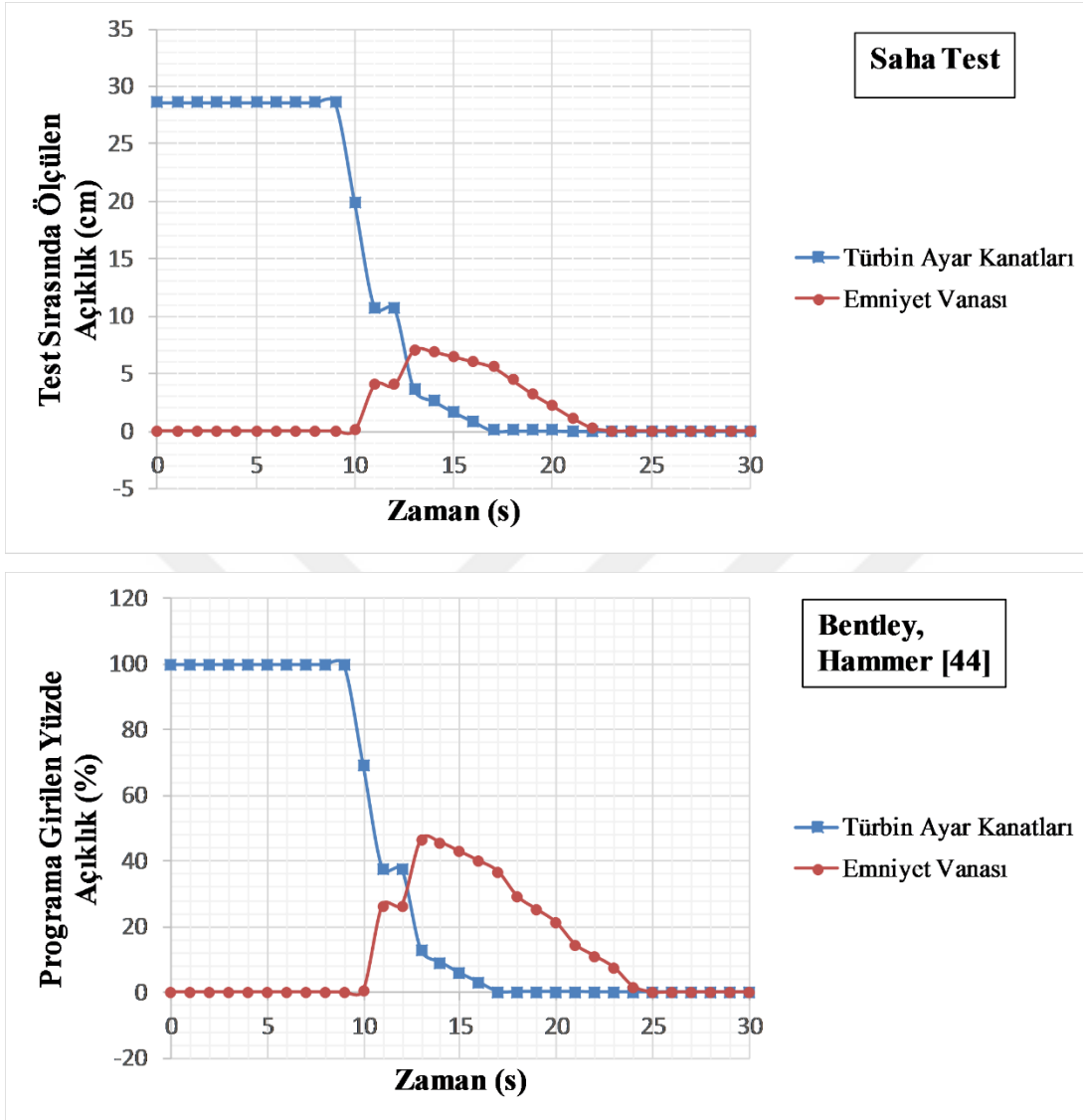


Şekil 3.13: Saha testleri ve analizlerin debi ilişkisi.

3.2.1.3 Üç türbin su darbesi analizleri

Üç türbin için kullanılan santral modeli Şekil 3.10'da detaylı bir şekilde gösterilmiştir. Üç türbin su darbesi analizlerinin tek türbin su analizlerinden farklı olduğu tek nokta türbin ayar kanatları ve basınç düzenleme vanası açılma ve kapanma sürelerinde oluşan farktır. Üç türbin analizlerinde tek türbinin 3 kat kadar debi cebri borudan

geçtiği için daha yüksek basınç değerleri ve basınç düzenleme vanasının tetiklenme süresinin tek türbine göre çok daha kısa olduğu görülmektedir.



Şekil 3.14: Test ve hammer programı kapanma sürelerinin karşılaştırılması.

Üç türbin analizlerinde de aynı özellikteki türbin bileşenleri ve basınç düzenleme vanası kullanıldığı için açıklık-debi ilişkisi aynı kalmaktadır. İki tip analiz için de bu değerler sabit kalmıştır. Fakat türbinlerin kapanmaya başlamasıyla itilen suyun debisi tek türbin analizlerinde türbinin kapanmasıyla itilen sudan daha fazla olduğu için PRV (Basınç Düzenleme Vanası)'nin daha çabuk cevap verdiği söylenebilir. Yani PRV'nin açılması için gerekli basınç değerine daha çabuk ulaşılmıştır.

Yapılan üç türbin acil kapama testinde, PRV'nin debi (m^3/s)-açıklık (cm) ilişkisi sabit kalmaktadır. Tek türbin su darbesi analizlerinde kullanılan veriler üç türbin için de

geçerlidir. Fakat üç türbin ani kapanma testinde sistemden geçen debinin $6.73 \text{ m}^3/\text{s}$ olduğundan, debi için gerçekleştirilen yüzde işleminde $6.73 \text{ m}^3/\text{s}$ debi değeri %100 olarak kabul edilmiş, yüzde debiler bu verilere dayandırılarak hesaplanmıştır. Debi yüzdelerinin hesaplamasında üç türbin saha testlerinde sistemden geçen debi $6.73 \text{ m}^3/\text{s}$ olduğundan ötürü yüzde hesaplamada küçük farklılıklar olmuştur. Basınç düzenleme vanası kapanma yüzdesine bağlı debi değerleri Çizelge 3.3 ve 3.4'te gösterilmiştir.

Çizelge 3.3: Basınç düzenleme vanası açıklık debi ilişkisi.

PRV Açıklık (cm)	PRV Açıklık (%)	Debi (m^3/s)	Debi (%)
0.001	1	0.5	7.35
0.788	5.21	0.88	12.94
1.78	11.76	1.42	20.89
2.13	14.10	1.68	24.70
7.263	48.05	4.45	66.15

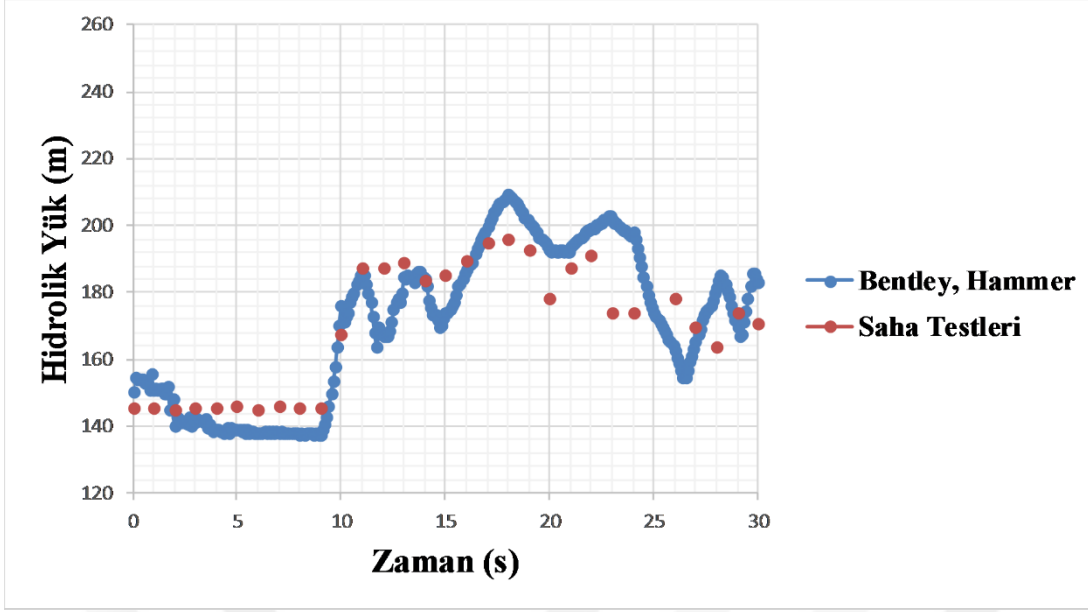
Çizelge 3.4'te yer alan ve PRV için hesaplanan kapalılık yüzdeleri, HAMMER programında girdi olarak kapalılık yüzdeleri istendiğinden dolayı, %100'den açıklık yüzdelerinin çıkarılmasıyla bulunmuştur.

Çizelge 3.4: Basınç düzenleme vanası kapalılık debi ilişkisi.

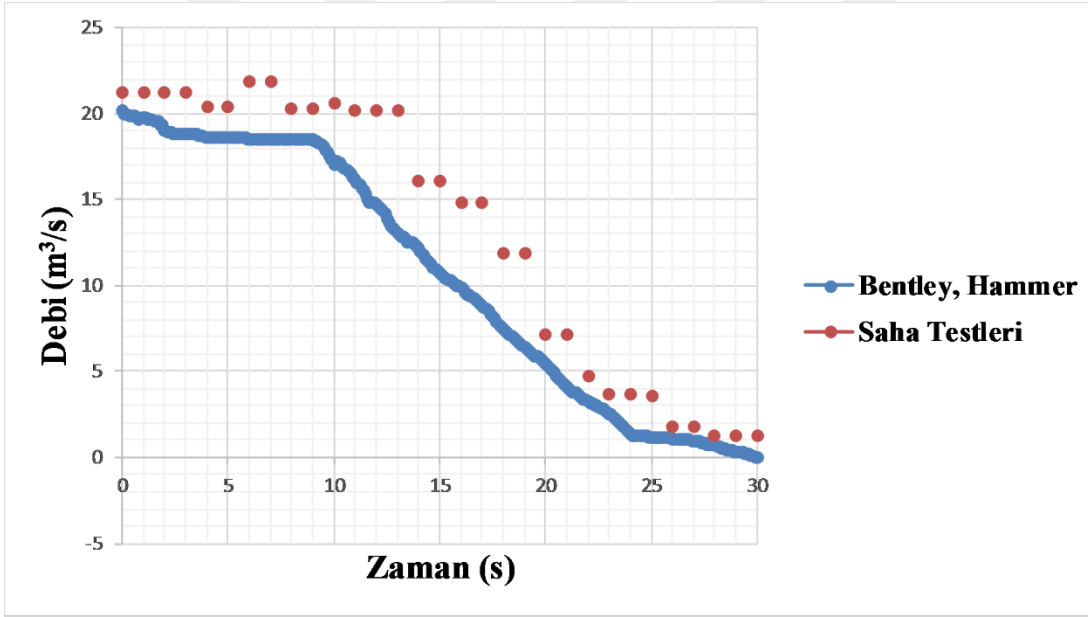
PRV Kapalılık Yüzdesi (%)	Bağlı Debi (%)
100	0
99	7.35
94.79	12.94
88.24	20.89
85.90	24.70
51.95	66.15
0	100

3.2.1.4 Üç türbin su darbesi analiz sonuçları

Yapılan analizler ayar kanatlarının ve basınç düzenleme vanası açılma ve kapanma sürelerini kapsayan 30 sn için gerçekleştirilmiştir. Basınç ve debi sonuçları Şekil 3.15 ve 3.16'da gösterilmektedir.



Şekil 3.15: Saha testleri ve analizlerin basınç ilişkisi.



Şekil 3.16: Saha testleri ve analizlerin debi ilişkisi.

Tek türbin ve üç türbin zamana bağlı analizler HAMMER programıyla modellenmiş ve sahada TÜBİTAK MAM ekibinin ani kapanma testi ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın daha sağlıklı şekilde sonuç verebilmesi için test sırasında santralden geçen debi değerine göre modellerden debi geçirilmiştir. Bu debiler tek türbin analizi için $6.80 \text{ m}^3/\text{s}$, üç türbin analizleri için $6.73 \text{ m}^3/\text{s}$ 'dir. Tek türbin ve üç türbin analizleri karşılaştırıldığında elde edilen grafiklerdeki değerlerin birbirine yakın olduğu, debinin ve hidrolik yükün de aynı davranışı sergilediği

söylenbilir. Test sonuçlarıyla, model analiz sonuçlarının arasındaki bir miktar farklılık bulunmaktadır. Bu farkların en büyük sebeplerinden biri ölçümün saniyeler üzerinden yapılmış olmasıdır. Model çalışması esnasında görülmüştür ki, saliselik farklar bile borularda oluşan basınç değerlerini ve salınım noktalarını değiştirebilmektedir.

3.2.2 Sürgülü vana kapanma süreleri

3.2.2.1 Sürgülü vana su darbesi analizleri

Sürgülü Vana türbin bileşeni olan salyangozun önünde bulunmaktadır. Santraldeki işlevi acil durumlarda kapatılarak suyun türbine ulaşmasını engellemektir. Sürgülü vananın kapatıldığı durumlara örnek olarak türbin montajı ya da türbinin bir sebepten arızalanması verilebilir.

Şekil Ek 2.1’de verilen sürgülü vana akış hesapları göz önüne alınarak Akış Katsayısı (Kv) ve Valf Kayıp Katsayısı (K) bulunmuştur. Çizelge Ek 2.1’de gösterilen bu veriler sürgülü vananın 1 barlık basıncı düşürdüğünde sahip olduğu değerleri göstermektedir.

Bu aşamadan sonra K değerleri sabit alınarak hesaplamalar 16 barlık basınç düşümüne göre tekrar yapılmış, debi ve hız değerleri hesaplanmıştır.

Çizelge 3.5: Vananın 16 barlık basınç düşümünü sağladığı veriler.

Valf Açıklık Oranı (%)	Yeni Hız (m/s)	Yeni Q (m³/s)
20	11.63	7.64
40	20.89	13.72
60	34.54	22.68
80	52.20	34.28
100	145.52	95.56

Sürgülü vana su darbesi analizleri yapılırken türbin ayar kanatlarının hiç kapanmadığı PRV (Basınç Düzenleme Vanası)’nin hiç açılmadığı senaryo incelenmiştir. Bunun sebebi sürgülü vananın en zor şartlardaki davranışını incelemektir. Türbin kapanmaya başlasa ve ya PRV açılıp su tahliyesine başlasa sürgülü vana üzerindeki kuvvetlerde azalma görülecektir.

Sürgülü vana Şekil 3.17 ve 3.18’den de görülebileceği üzere türbinin hemen önüne konumlandırılmıştır.

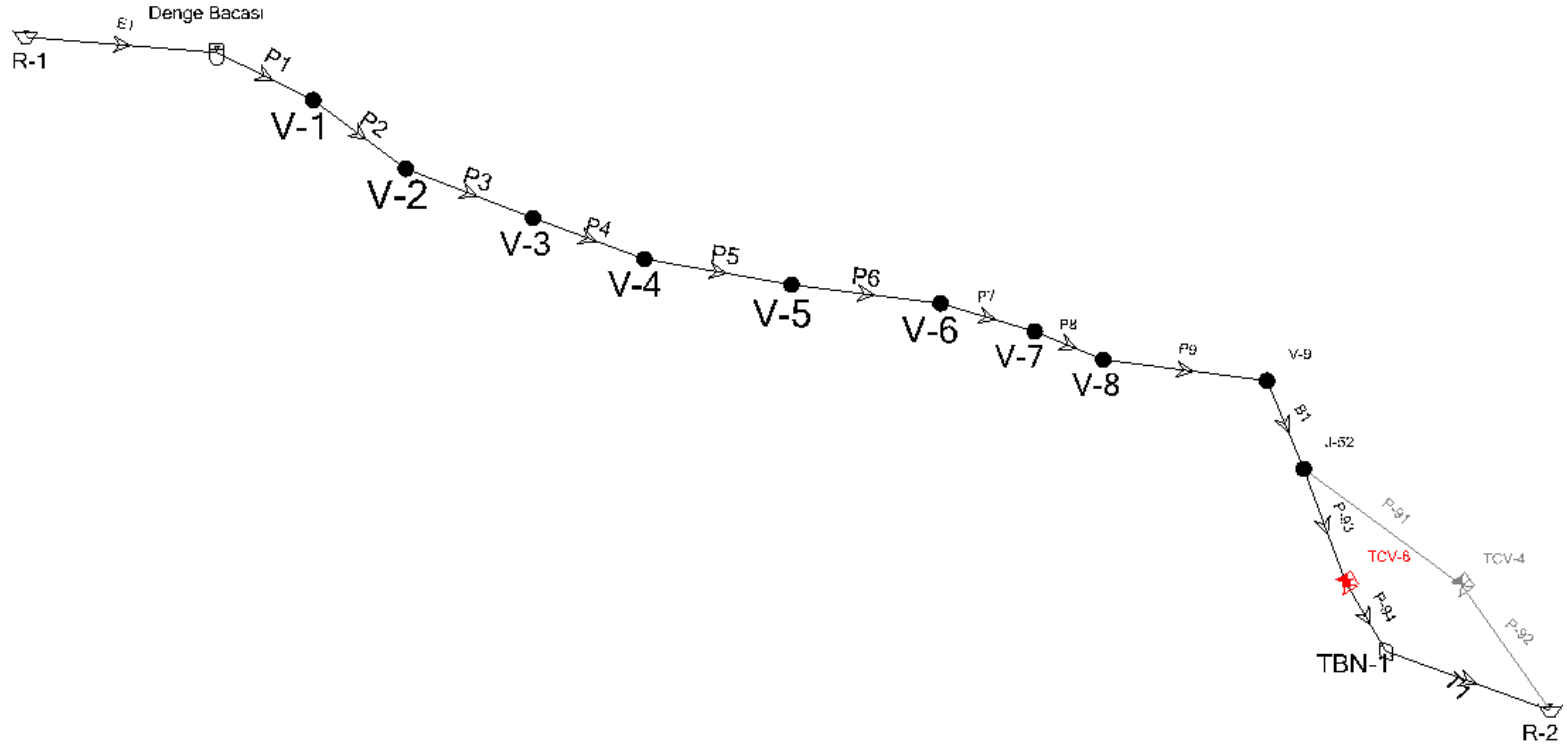
HAMMER ile sürgülü vananın modellenmesi de program üzerinde TCV (Kısmi Vanası) ile gerçekleştirilmiştir. Bu durum PRV (Basınç Düzenleme Vanası)'nin yerine TCV (Kısmi Vanası) kullanılması ile aynı sebepten kaynaklanmaktadır, debi TCV ile daha rahat kontrol edilebilmektedir.

Basınç düzenleme vanası analizlerinde yükseklik olarak çark eksen kotu olan 111.05 m kullanılmıştır. Ayrıca vananın en başta açık pozisyonda zamana bağlı olarak kapandığı ele alındığından başlangıç kapalılık değeri % 0 olarak belirlenmiştir. Valf çapı 0.9144 m, boşaltma katsayısı da 7.56 olarak alınmıştır. Farklı valf yüzde açıklıklarında sistemden geçen bağlı debi çizelge 3.6'da gösterilmiştir.

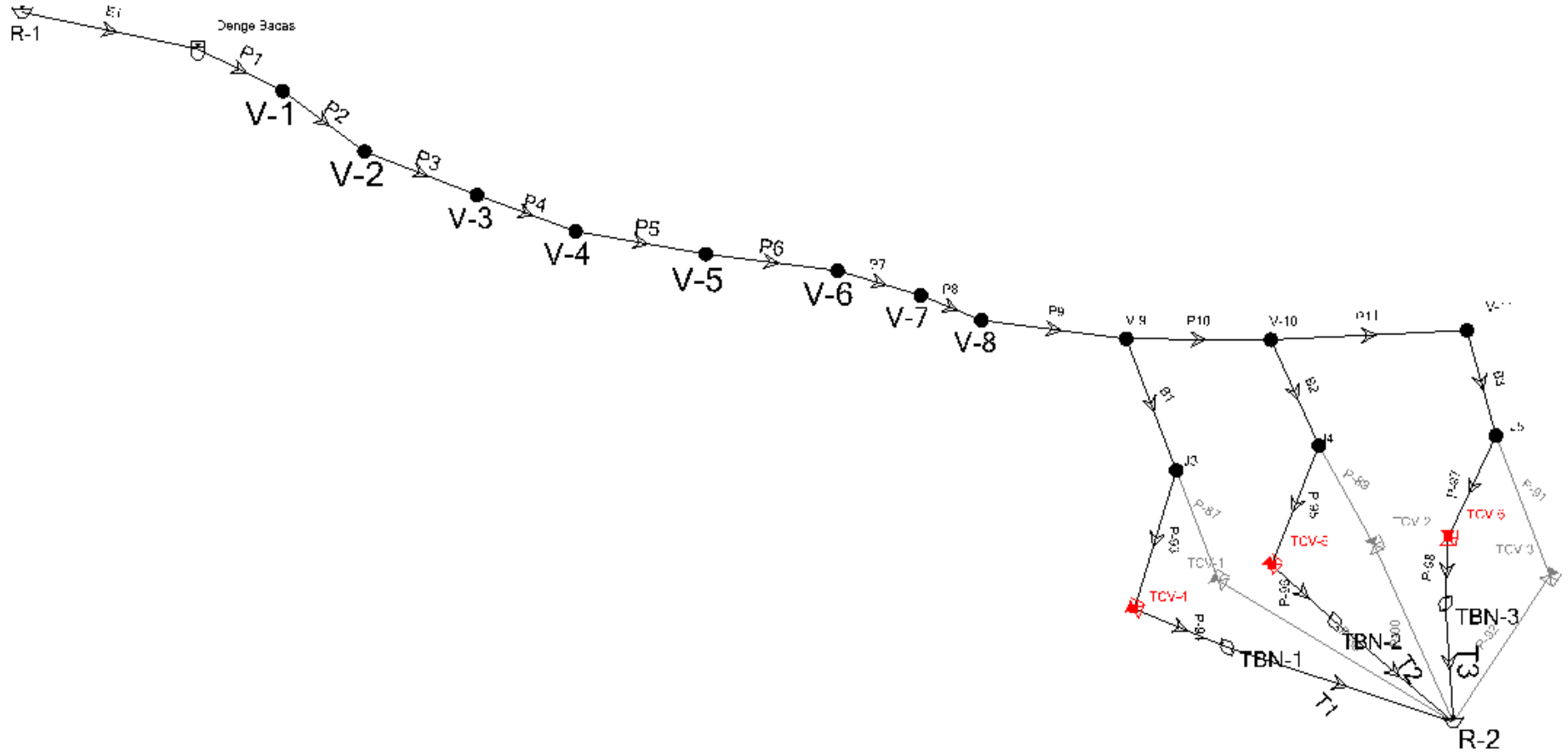
Çizelge 3.6: Sürgülü vana kapalılık debi ilişkisi.

Valf Açıklık (%)	Bağlı Debi (% m³/s)
0	100
20	35.87
40	23.73
60	14.35
80	8
100	0

Valf kendi ağırlığıyla kapanacağından ötürü valfin kapanma hızı sabit olarak alınmıştır ve analizler bu süreler değiştirilerek yapılmıştır. Bu konuda kısıt, ayar kanatları, basınç düzenleme vanası çalışmaz iken sürgülü vananın kapanmasıyla borularda oluşacak basınç değerlerinin daha önce santralde yapılmış testlerdeki basınç değerlerinden daha düşük çıkmasıdır.



Şekil 3.17: Tek türbin analizlerinin kullanıldığı model.



Şekil 3.18: Üç türbin analizlerinin kullanıldığı model.

HAMMER programında kurulan modelle gerçekleştirilen analizlerde kapanma süresi 100 s'den 300 s'e kadar 50'şer saniyelik periyotlarla gerçekleştirilmiştir. Maksimum noktanın 300 s seçilmesinin sebebi IEC 60034 standardına göre jeneratörün 300 s boyunca yüksek hıza dayanması gerektiği ile ilgilidir [52]. Bu sebeple sürgülü vana 300 s'den önce kapanmak zorundadır.

Çizelge 3.7: Analizlerde oluşan maksimum basınç değerleri.

Kapanma Süresi (s)	3 Türbin	1 Türbin
	Oluşan Maks. Basınç (m)	Oluşan Maks. Basınç (m)
100	212.23	181.74
150	194.97	176.36
200	187.22	173.84
250	182.74	172.87
300	179.51	171.31

Yapılan analizlerde beklenildiği gibi sürgülü vananın kapanma süresi arttıkça borularda oluşan maksimum basıncın azaldığı görülmektedir. Şekil 3.13 incelendiğinde saha testlerinde ölçülen tek türbin acil kapanmada oluşan maksimum basıncın 186 m olduğu, şekil 3.16 incelendiğinde ise saha testlerinde ölçülen üç türbin acil kapanmada bu değer 195 m olduğu görülmektedir. Daha önce de bahsedildiği üzere sürenin belirlenmesinde kısıt ani kapanma saha testlerinde oluşan maksimum basıncın altına düşmektir. Tüm bunlar göz önüne alındığında sürgülü vananın kapanma süresinin yaklaşık 250 s olması gereklidir.



4. DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışması, MİLHES projesi kapsamında gerçekleştirilen Kepez-1 Hidroelektrik Santrali Rehabilitasyonunun ilk aşamasıdır. Bu çalışmada santral, gerek bilgisayar üzerinde oluşturulan modellerle gerek sahada gerçekleştirilen testlerle başlangıç noktasından (rezervuar) türbin girişine kadar incelenmiş ve su türbin tasarımı için gerekli veriler elde edilmiş ve doğrulanmıştır.

Sistem analizi kısmında türbine suyu ulaştıran bütün bileşenler detaylı bir şekilde çalışılmış ve bir model oluşturularak, santral bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Bu modelde kullanılan veriler, saha inceleme raporundan ve teknik resimlerden alınmıştır. Fakat Akdeniz Bölgesi'nin karstik yapısı dolayısıyla santral suyu oldukça kireçlidir ve boruların iç yüzeylerini yaklaşık 1.5 cm'lik kireç tabakalarının kapladığı görülmüştür. Bu kireç sürtünme katsayısı ve tabakanın kalınlığı, (borularda sebep olduğu 3 cm'lik daralma) türbinin kullanacağı hidrolik yük değerini kayıplarda değişikliklere sebep olduğundan doğrudan etkilemektedir. Bu aşamada literatürde kirecin sürtünme katsayısı araştırılmış fakat böyle bir bilgi olmadığı saptanmıştır. Hazırlanan modeller farklı Manning's n sürtünme katsayılarına göre oluşturulmuştur. Bu aşamada kireç sürtünme kayıp katsayısının saptanması sahada gerçekleştirilen debi ve hidrolik yük testleriyle sağlanmıştır. Sahada gerçekleştirilen testlerde ortaya çıkan debi-hidrolik yük eğrisi, modelde farklı sürtünme katsayılarına göre oluşturulan eğrilerden Mannings $n = 0.015$ ile örtüşmüştür. Bu değer mutlak pürüzlülük değeri 3.2 mm olarak hesaplanmıştır. Kirecin sürtünme katsayısı olarak bulunan bu değerler, literatürde bulunan betonun sürtünme katsayısı ve mutlak pürüzlülük değeri ile karşılaştırıldığında, kirecin en az beton kadar pürüzlü olduğu yorumu çıkmaktadır.

Model, saha testleriyle doğrulandıktan sonra, tasarım debisinde, santralin çalıştırıldığı en düşük ve yüksek debilerde, türbinin girişinde oluşan hidrolik yük değeri farklı farklı hesaplanmış ve türbinin çalışabileceği bir çalışma aralığı çıkartılmıştır. Tasarlanacak olan türbinin tasarım debi ve hidrolik yükü bu çalışma aralığı temel alınarak $6.1 \text{ m}^3/\text{s}$ debi 160 m hidrolik yük olarak belirlenmiştir. Bu noktanın seçilmesiyle, tasarım

noktasındaki yüksek verimi çalışma aralığının ortasına çekerek, daha geniş aralıkta yüksek verimler görmek hedeflenmiştir.

Tezde çalışılan bir diğer konu su darbesi hesaplarıdır. Su darbesi hesaplarında, sistem analizinde doğrulanan model kullanılmış ve sistem analizinden farklı olarak, model zamana bağlı çalıştırılmıştır. Zamana bağlı çalıştırılan modelin doğrulama çalışmaları yine sahada Tübitak MAM ekibi tarafından yapılan testlerle gerçekleştirilmiştir. Sahadaki türbinlerde ani kapanma gerçekleştirilmiş, kapanmanın gerçekleştiği süre hesaplanmış ve bu süre çerçevesinde oluşan basınç değişimleri gözlenmiştir. Sahada kapanmanın gerçekleştiği süre, zamana bağlı çözdürülen modele uygulandığında, yine sahada ölçülen basınç değerleriyle, modelde hesaplanan basınç değerlerinin örtüştüğü görülmüştür. Bu durum, modelin gerçeğe uygun çalıştığını göstermiştir.

Doğrulan, zamana bağlı çalıştırılan modelde, türbin salyangozunun hemen önünde bulunan sürgülü vananın kapanma süresi hesaplanmıştır. Bu süre çalışmada kıstas, oluşacak basıncın, boruların kaldıracabileceğinden fazla olmaması ve denge bacasıyla rahat sönmülenebilmesidir. Bunları sağlayan en kısa süre 250 s olarak hesaplanmıştır.

Bu tez kapsamında yapılan çalışmalar, gelecekte yapılacak olan bir çok çalışmaya ışık tutacaktır. Saha testleri ve bilgisayar ortamında oluşturulan modellerin karşılıklı iterasyonu sonucu doğrulanması ile literatürde olmayan kirecin sürtünme kayıp katsayısına bir yaklaşım sağlanmıştır. Kireç sürtünme katsayısı gelecek yıllarda yapılacak olan çalışmalarda kullanılabilecektir. Kepez-1 Hidroelektrik Santrali için yapılan sistem analizi sonucu türbinin çalışma aralığı çıkartılmış ve tasarlanacak olan türbinin tasarım parametreleri olan debi ve hidrolik yük belirlenmiştir. Bu iki tasarım parametresi ışığında su türbin tasarımı çalışmaları gerçekleştirilecektir. Su darbesi analizleri ile santralin mevcut durumda karşılaştığı maksimum basınçlar, bilgisayar ortamında oluşturulan ve zamana bağlı çözdürülen analizlerle hesaplanmış, bunun sonucunda hesaplanan maksimum basınç değerlerini aşmayacak şekilde türbinin hemen önünde bulunan sürgülü vananın acil durumlarda kapanacağı süre bulunmuştur. Ayrıca ayar kanadı ve PRV vanası ile ilgili kapanma süreleri hesaplanmış, saha testleri ile doğrulanmış ve yeni tasarımda kullanılacaktır.

KAYNAKLAR

- [1] **Yüksel, İ., Arman, H.**, (2010) Global Warming and Hydropower in Turkey for a Clean and Sustainable Energy Future Global Warming and Hydropower in Turkey for a Clean and Sustainable Energy Future, no. July 2017.
- [2] **Kaygusuz, K.**, (2009) Hydropower in Turkey: The Sustainable Energy Future, Energy Sources, Part B Econ. Planning, Policy, vol. 4, no. 1, pp. 34–47, Jan. 2009.
- [3] Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü” erişim adresi: <http://www.dsi.gov.tr/docs/stratejik-plan/dsi-2016-faaliyet-raporu.pdf?sfvrsn=2>, erişim tarihi: 20 Aralık 2017
- [4] **Karagöl, E. T., Kavaz I.**, “BİLİREnerji,” SetaSiyaset,Ekonomi Ve Toplum Araştırmaları Vakfı, vol. 197, no. 197, pp. 1–32, 2017.
- [5] **Viollet, P. L.**, (2017) From the water wheel to turbines and hydroelectricity. Technological evolution and revolutions, Comptes Rendus - Mec., vol. 345, no. 8, pp. 570–580.
- [6] **Round, G. F.**, (2004) Incompressible Flow Turbomachines: Design, Selection, Applications and Theory, Gulf Professional Publishing, U.S.A.
- [7] **Raabe, J.**, (1985) Hydropower: The Design, Use, and Function of Hydromechanical, Hydraulic, and Electrical Equipment, Düsseldorf, VDI-Verlag.
- [8] **Nasir, B. A.**, (2014) Design considerations of micro-hydro-electric power plant, Energy Procedia, vol. 50, pp. 19–29.
- [9] **Krivchenko, G. I.**, (1986) Hydraulic Machines: Turbines and Pumps, Moscow, Mir Publishers.
- [10] **Riglin, J. D., Schleicher, W. C., Oztekin, A.**, (2015) Cavitation Phenomena and Performance Implications in Archimedes Flow Turbines, J. Fluids Eng., vol. 138, no. 3, p. 31303.

- [11] **Kramer, M., Wieprecht, S., Terheiden, K.**, (2017) Minimising the air demand of micro-hydro impulse turbines in counter pressure operation, *Energy*, vol. 133, pp. 1027–1034.
- [12] **Kavurmacı, B. Ç.**, Su Türbini Testleri için Deney Düzeneği Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2015.
- [13] **Ayancık, F., Aradag, U., Ozkaya, E., Celebioglu, K., Unver, O., Aradag, S.**, (2013) Hydroturbine Runner Design and Manufacturing, *Int. J. Mater. Mech. Manuf.*, vol. 1, no. 2, pp. 162–165.
- [14] **Kocak, E., Karaaslan, S., Yucel, N., Arundas, F.**, (2017) A Numerical Case Study: Bovet Approach to Design a Francis Turbine Runner, *Energy Procedia*, vol. 111, no. September 2016, pp. 885–894.
- [15] **Kang, M. W., Park, N., Suh, S. H.**, (2016) Numerical Study on Sediment Erosion of Francis Turbine with Different Operating Conditions and Sediment Inflow Rates, *Procedia Eng.*, vol. 157, pp. 457–464.
- [16] **Fu, T., Deng, Z. D., Duncan, J. P., Zhou, D., Carlson, T. J., Johnson, G. E., Hou H.**, (2016) Assessing hydraulic conditions through Francis turbines using an autonomous sensor device, *Renew. Energy*, vol. 99, pp. 1244–1252.
- [17] **Çetintürk, H.**, Boru İçerisinde Francis Tipi Türbin Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2016.
- [18] **Wang, L., Wei, D.**, (2011) The optimum structural design for spiral case in hydraulic turbine, *Procedia Eng.*, vol. 15, pp. 4874–4879.
- [19] **Drtina, P., Sallaberger, M.**, (1999) Hydraulic turbines—basic principles and state-of-the-art computational fluid dynamics applications, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, vol. 213, no. 1, pp. 85–102.
- [20] **Patel, K., Desai, J., Chauan, V., Charnia, S.**, (2011) Development of Francis Turbine Using Computational Fluid Dynamics, 11st Asian International Conference on Fluid Machinery and 3rd Fluid Power Technology Exhibition”, 1-3, India.

- [21] **Aytaç, F. Z.**, Su türbini ayar kanadı tasarım sistemi geliştirilmesi ve çeşitli Francis tipi türbinler için uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2014).
- [22] **Speight, V. L.**, (2014) Impact of pipe roughness on pumping energy in complex distribution systems, *Procedia Eng.*, vol. 70, pp. 1575–1581.
- [23] **Ghazaw, Y. M.**, (2011) Design and analysis of a canal section for minimum water loss, *Alexandria Eng. J.*, vol. 50, no. 4, pp. 337–344.
- [24] **Keloğlu, N.**, “Bir haznedeki atmosfere açılan basınçlı boruların boşaltım eğrilerinin analitik yoldan elde edilmesi”.
- [25] **Herrera, M., Abraham, E., Stoianov, I.**, (2015) Graph-theoretic surrogate measures for analysing the resilience of water distribution networks, *Procedia Eng.*, vol. 119, no. 1, pp. 1241–1248.
- [26] **Colebrook, C. F.**, (1939) Turbulent flow in pipes with particular reference to the transition region between the smooth and rough pipe laws, *J. Inst. Civil Eng.* 133–156, London.
- [27] **White, F. M.**, (1999) *Fluid Mechanics*. Boston, Mass: WCB/McGraw-Hill.
- [28] **Brkić, D.**, (2016) A note on explicit approximations to Colebrook’s friction factor in rough pipes under highly turbulent cases, *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 93, pp. 513–515.
- [29] **Rollmann, P., Spindler, K.**, (2015) Explicit representation of the implicit Colebrook-White equation, *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 5, pp. 41–47.
- [30] **Moody, L. F.**, (1944) Friction Factors for pipe flow, *ASME Trans.*, vol. 66, pp. 671–684.
- [31] **Larock, B. E., Jeppson, R. W., Watters, G. Z.**, *Hydraulics of Pipeline Systems* Library of Congress Cataloging-in-Publication Data, 1999.
- [32] Bentley, “Hammer V8i.”.
- [33] **Karadžić, U., Bergant, A., Vukoslavčević, P.**, (2010) Water hammer caused by closure of turbine safety spherical valves, *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.*, vol. 12, p. 12096.
- [34] Bentley, “WaterCAD V8i.”.
- [35] **Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., Huebsch, W. W.**, *Fundamentals of Fluid Mechanics*, Wiley Publishing, 2010.

- [36] **Sepetci, G., Cetinturk, H., Ozkan, S. Y., Yuksel, S. O., Karadeniz, C., Celebioglu, K., Tascioglu, Y., Aradag, S.,** (2016) Conceptual design of a hydroelectric power plant for a rehabilitation project, International conference of Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics (HEFAT).
- [37] **Gilley, J. E., Kottwitz, E. R., Wieman, G. A.,** (1991) Roughness Coefficients for Selected Residue Materials, *J. Irrig. Drain. Eng.*, vol. 117, pp. 503–514.
- [38] Borulama ve hidrolik hesaplar.pdf
- [39] FENSU Mühendislik İnşaat Enerji Ltd. Şti. TÜBİTAK-Kepez-1 HES Sistem Analiz Raporu
- [40] **Ansys Inc.,** Ansys CFX, Sürüm 15.0.
- [41] **Ayli İnce, Ü. E.,** Francis tipi türbinlerin sayısal yöntemler ile tasarımı, parametre optimizasyonu ve model testlerinin sayısal alt yapısının geliştirilmesi, Doktora Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2016).
- [42] **Skulovich, O., Perelman, L., Ostfeld A.,** (2014) Modeling and optimizing hydraulic transients in water distribution systems, *Procedia Eng.*, vol. 70, pp. 1558–1565.
- [43] **Dinçer, A. E.,** Investigation of water hammer problems in the penstock of pumped-storage power plants, Yüksek Lisans Tezi, Orta doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2013).
- [44] **Dursun, S.,** Numerical investigation of protection measures against water hammer in the Yesilvadi Hydropower Plant, Yüksek Lisans Tezi, Orta doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, (2013).
- [45] **Chaudry, M. H.,** (1987) *Applied Hydraulic Transients*. New York: Van Nostrand Reinhold Company Limited.
- [46] **Afshar, M. H., Rohani, M., Taheri R.,** (2010) Simulation of transient flow in pipeline systems due to load rejection and load acceptance by hydroelectric power plants, *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 52, no. 1, pp. 103–115.

- [47] Erişim Adresi: <https://nurbanuozen.weebly.com/nasil-ccedilali350ir.html> Erişim Tarihi: 25.11.2017
- [48] **Mcgovern, J.**, (2011) Technical Note : Friction Factor Diagrams for Pipe Flow
Technical Note : Friction Factor Diagrams for Pipe Flow, pp. 0–15.
- [49] **Yıldırım, G.**, (2009) Computer-based analysis of explicit approximations to the implicit Colebrook-White equation in turbulent flow friction factor calculation, *Adv. Eng. Softw.*, vol. 40, no. 11, pp. 1183–1190.
- [50] IEC60041 (1991) Field acceptance tests to determine the hudraulic performance of hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines (3rd ed.). Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission.
- [51] **Che, T. C., Duan, H. F.**, (2016) Evaluation of Plane Wave Assumption in Transient Laminar Pipe Flow Modeling and Utilization, *Procedia Eng.*, vol. 154, pp. 959–966.
- [52] IEEE Std C50.13-2005, IEEE Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generator / Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above, vol. 2005, no. February. 2006.



EKLER

EK-1

Çizelge Ek 1.1: Verim ölçüm verileri.

MW	Debi (m ³ /s)	Sensörün Okuduğu Basınç (MPa)	Sıcaklık (C°)	Üst rezervuar Kotu (m)	Sensörün Bulunduğu Kesit Alanı (m ²)
8.7	6.75	1.604	14.72	277.72	1.32
8	6.16	1.609	14.92	277.71	1.32
7	5.52	1.615	15.2	277.73	1.32
6	4.9	1.620	15.5	277.84	1.32
5	4.25	1.626	15.58	278.00	1.32
4	3.71	1.631	15.53	278.22	1.32

T.C.
SAĞLIK BAKANLIĞI
ANTALYA BÖLGE HİFZISSİHHA ENSTİTÜSÜ
MÜDÜRLÜĞÜ

Sayı : B.10RSH.1.04 () 2344

ANTALYA

Konu : Kimyasal Su Tahlili

3.10.2002

R A P O R

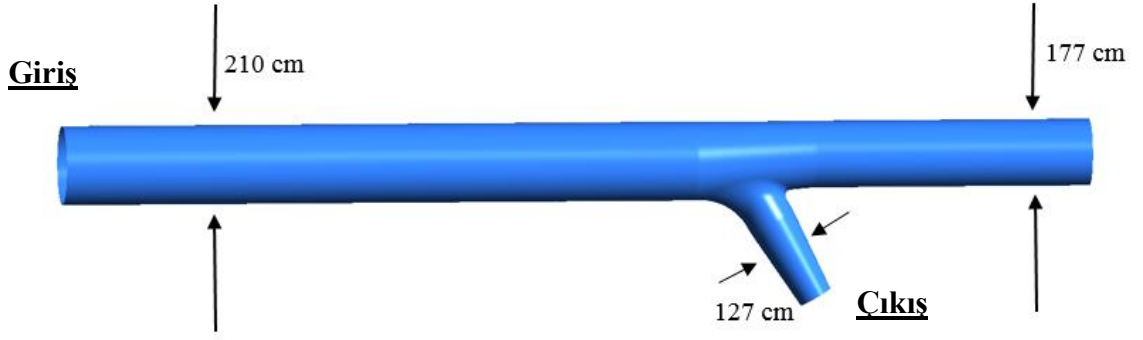
	Su	Su
Suyun Adı ve Cinsi	Kepez Elektrik T.A.Ş.	
Gönderen Makam	27.9.2002/08301	
Yazının Tarih ve No.su	Yok	
Zabıt Tarih ve No.su	Yok	
Resmi Mühür	1-Kepez Elektrik Tank Suyu	2-Kepez Elek.Yükleme Havuz Suyu
Numune Sahibi	1 şişe	1 şişe
Numune Miktarı	30,9.02	
Analize Alış Tarihi	"	
Analiz Bitiş Tarihi	Aşıktan	
Orijinal Ambalajı	"	
Markave Etiketli	"	
İmal Tarihi ve Seri No.	Renksiz, berrak	
Renk ve Görünüş	Kokusuz, tatsız	
Koku ve Tad	Yok	Yok
Tortu	7,74	7,78
PH	37	40
Toplam Sertlik (Fr ³)	Yok	Yok
Amonyak NH ₃	Yok	Yok
Nitrit No2	29,11	28,44
Klorür (Cl ⁻) Mgr/Lt.	Yok	yok
Klor (Cl ₂) Mgr/Lt.		
Total Organik Madde Mgr/Lt. (Oksijen Hesabıyla)	1,1	1,1
TDS	: 0,117mg/lt.	0,128 mg/lt.
Demir Miktarı	: 0,01 "	0,01 mg/lt.
Analiz Neticesi:	Yapılan analizde yukarıdaki değerler bulunmuştur.	

ANALİZİ YAPAN
Kimya Mühendisi
Al. İhsa: ÇENGİZ

UZMAN



Şekil Ek 1.1: Antalya bölgesi su raporu.



Şekil Ek 1.2: Pantolon bölmesi katı modeli [48].

Çizelge Ek 1.2: HAD analizleri için kullanılan giriş ve çıkış değerleri.

Giriş: WaterCAD ile Hesaplanan Hidrolik Yük Değerleri (m)	Çıkış: Debi (m³/s)
165.25	6.75
165.48	6.17
165.73	5.52
166.047	4.9
166.39	4.25
166.74	3.71

Çizelge Ek 1.3: HAD Analizleri sonucunda elde edilen cebri boru kayıpları.

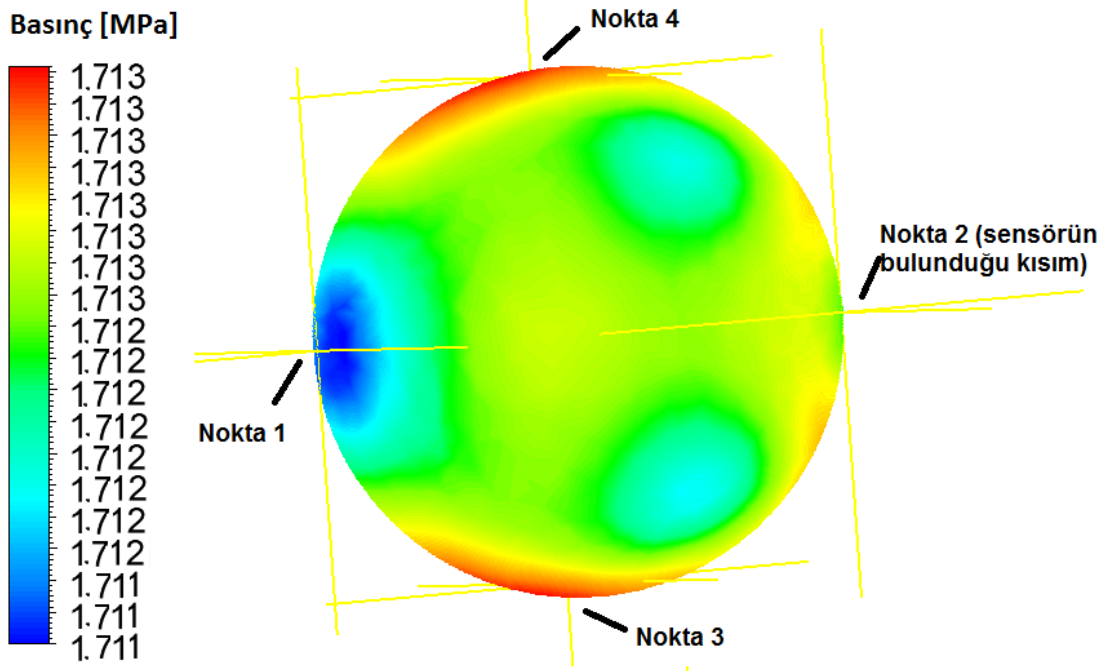
Debi (m³/s)	Çıkış Basıncı (mss)	Cebri Boru Kaybı (m)
3.71	166.69	0.48
4.25	166.33	0.63
4.9	165.96	0.83
5.52	165.62	1.05
6.1	165.36	1.30
6.75	165.11	1.56

Çizelge Ek 1.4: HAD analizleri için kullanılan giriş ve çıkış değerleri.

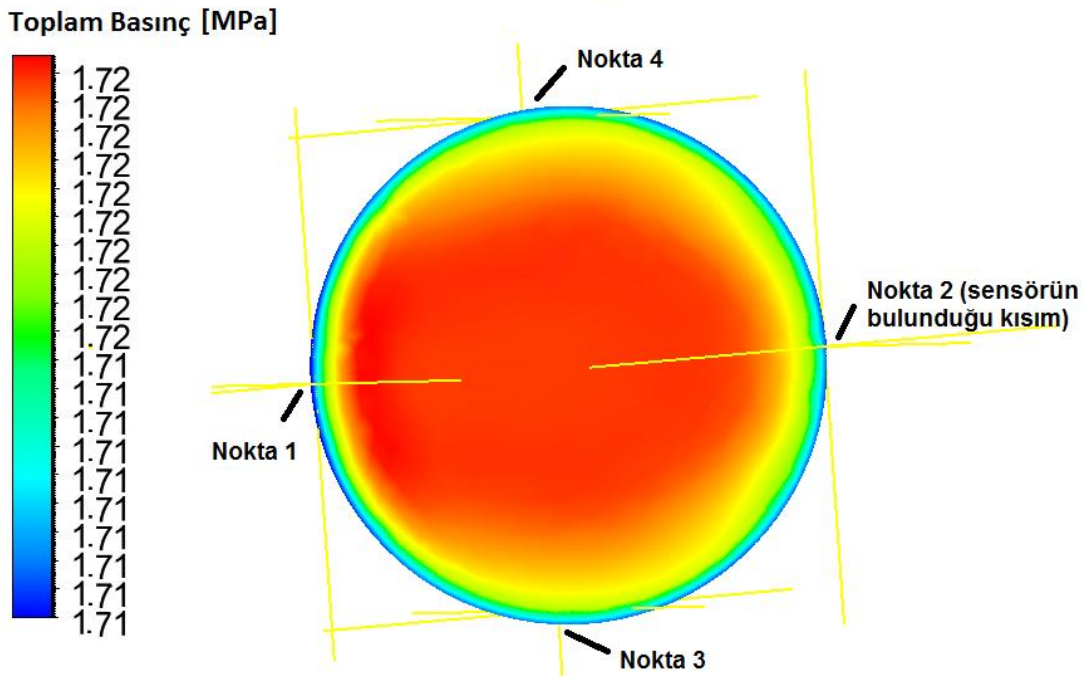
Verim Ölçümü ile Belirlenen Girişteki Hidrolik Yük Değerleri (m)	Debi (m³/s)
165.85	6.75
166.18	6.17
166.66	5.52
167.19	4.90
167.66	4.25
167.980	3.71

Çizelge Ek 1.5: Farklı debi değerlerinde işaretlenen bölgelerde okunan değerler.

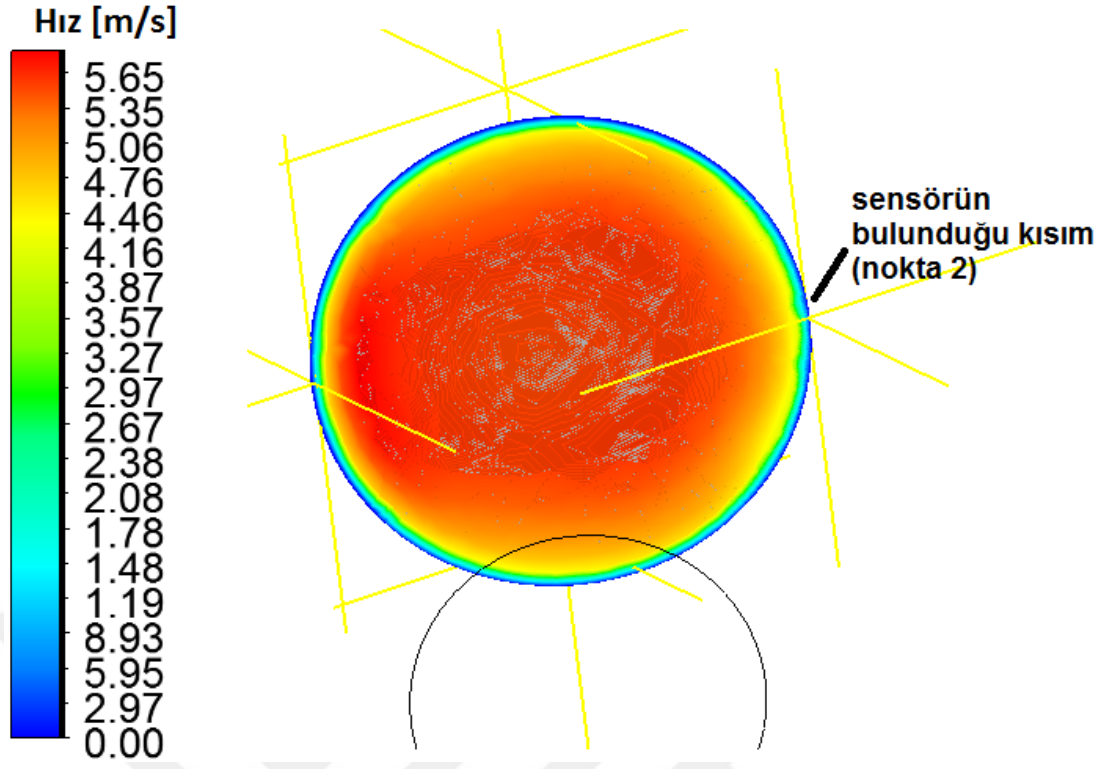
165.85 m-6750 kg/s	Statik Basınç (mss)	Total Basınç (mss)
Düzlem Ortalama	164.28	165.67
Nokta 1	164.18	164.92
Nokta 2	164.28	164.96
Nokta 3	164.45	165.35
Nokta 4	164.46	165.34
4 Noktanın Ortalaması	164.34	165.14
166.18 m-6160 kg/s		
Düzlem Ortalama	164.87	166.03
Nokta 1	164.79	165.41
Nokta 2	164.87	165.44
Nokta 3	165.01	165.76
Nokta 4	165.02	165.76
4 Noktanın Ortalaması	164.92	165.59
166.66 m-5520 kg/s		
Düzlem Ortalama	165.61	166.54
Nokta 1	165.54	166.04
Nokta 2	165.61	166.07
Nokta 3	165.72	166.32
Nokta 4	165.74	166.27
4 Noktanın Ortalaması	165.65	166.18
167.19 m-4900 kg/s		
Düzlem Ortalama	166.35	167.09
Nokta 1	166.30	166.70
Nokta 2	166.36	166.72
Nokta 3	166.44	166.91
Nokta 4	166.46	166.93
4 Noktanın Ortalaması	166.39	166.82
167.66 m-4250 kg/s		
Düzlem Ortalama	167.03	167.58
Nokta 1	166.99	167.29
Nokta 2	167.03	167.30
Nokta 3	167.10	167.45
Nokta 4	167,11	167.47
4 Noktanın Ortalaması	167.06	167.38
167.98 m-3710 kg/s		
Düzlem Ortalama	167.50	167.92
Nokta 1	167.47	167.70
Nokta 2	167.50	167.71
Nokta 3	167.55	167.82
Nokta 4	167.56	167.83
4 Noktanın Ortalaması	167.52	167.76



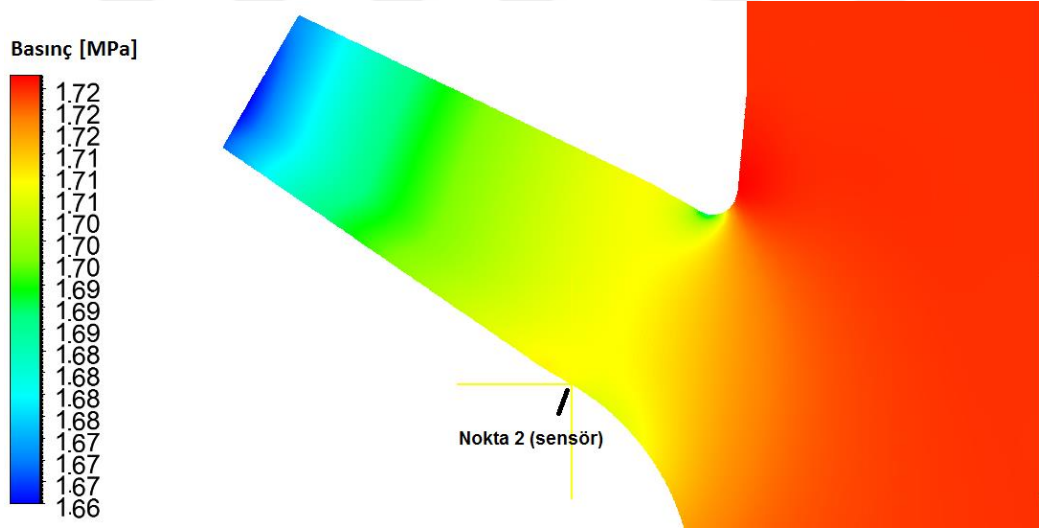
Şekil Ek 1.3: Ölçümün yapıldığı düzlemdeki statik basınç dağılımı.



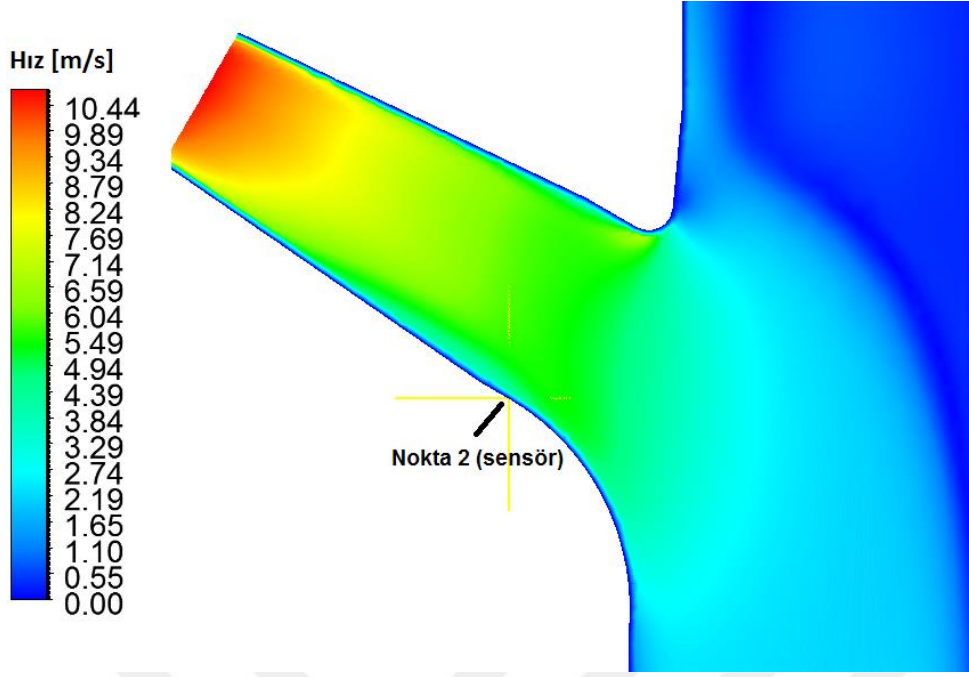
Şekil Ek 1.4: Ölçümün yapıldığı düzlemdeki total basınç dağılımı.



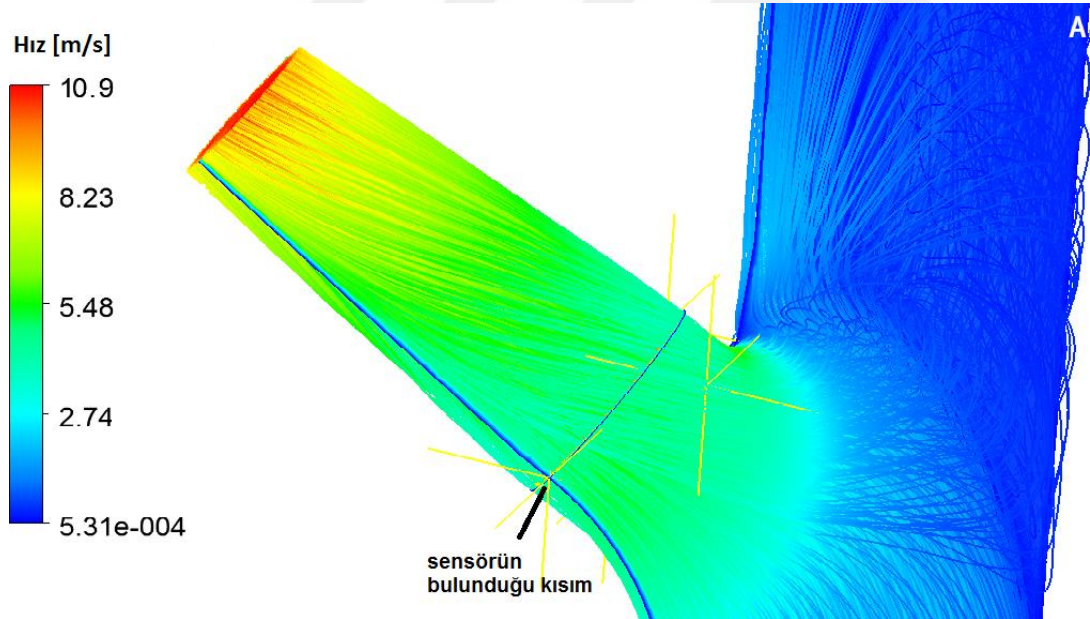
Şekil Ek 1.5: Ölçümün yapıldığı düzlemdeki hız dağılımı.



Şekil Ek 1.6: Borunun orta kesitindeki statik basınç dağılımı.



Şekil Ek 1.7: Borunun orta kesitindeki hız dağılımı.



Şekil Ek 1.8: Boruda oluşan akış çizgileri.

Çizelge Ek 1.6: Basınç sensörü'ndeki belirsizliğin etkisi.

Debi (m ³ /s)	Hız Yüksekliği (m)	Hidrolik Yük (m)	Kayıp (m)	Kayıp +0.1 (m)	Kayıp +0.2 (m)	Kayıp +0.3 (m)
6.75	1.32	165.04	1.64	1.74	1.84	1.94
6.17	1.10	165.36	1.31	1.41	1.51	1.61
5.52	0.89	165.72	0.97	1.07	1.17	1.27
4.90	0.70	166.12	0.67	0.77	0.87	0.97
4.25	0.52	166.49	0.46	0.56	0.66	0.76
3.71	0.40	166.89	0.29	0.39	0.49	0.59

Çizelge Ek 1.7: Basınç sensörü'ndeki ve debimetre'deki belirsizliğin etkisi.

Debi (m ³ /s)	Hız Yüksekliği (m)	Hidrolik Yük (m)	Kayıp (m)	Kayıp +0.1 (m)	Kayıp +0.2 (m)	Kayıp +0.3 (m)
6.81	1.35	165.06	1.61	1.71	1.81	1.91
6.23	1.12	165.37	1.28	1.38	1.48	1.58
5.58	0.90	165.74	0.95	1.05	1.15	1.25
4.95	0.71	166.13	0.66	0.76	0.86	0.96
4.30	0.53	166.50	0.45	0.55	0.65	0.75
3.75	0.41	166.89	0.29	0.39	0.49	0.59

Çizelge Ek 1.8: Basınç sensörü'ndeki ve debimetre'deki belirsizliğin etkisi.

Debi (m ³ /s)	Hız Yüksekliği (m)	Hidrolik Yük (m)	Kayıp (m)	Kayıp +0.1 (m)	Kayıp +0.2 (m)	Kayıp +0.3 (m)
6.68	1.29	165.00	1.66	1.76	1.86	1.96
6.11	1.08	165.33	1.33	1.43	1.53	1.62
5.47	0.87	165.70	0.98	1.08	1.18	1.28
4.86	0.68	166.10	0.69	0.79	0.89	0.99
4.21	0.51	166.48	0.47	0.57	0.67	0.77
3.67	0.39	166.87	0.30	0.40	0.50	0.60

Çizelge Ek 1.9: Farklı debilerde ve türbin sayısına göre hidrolik yükler.

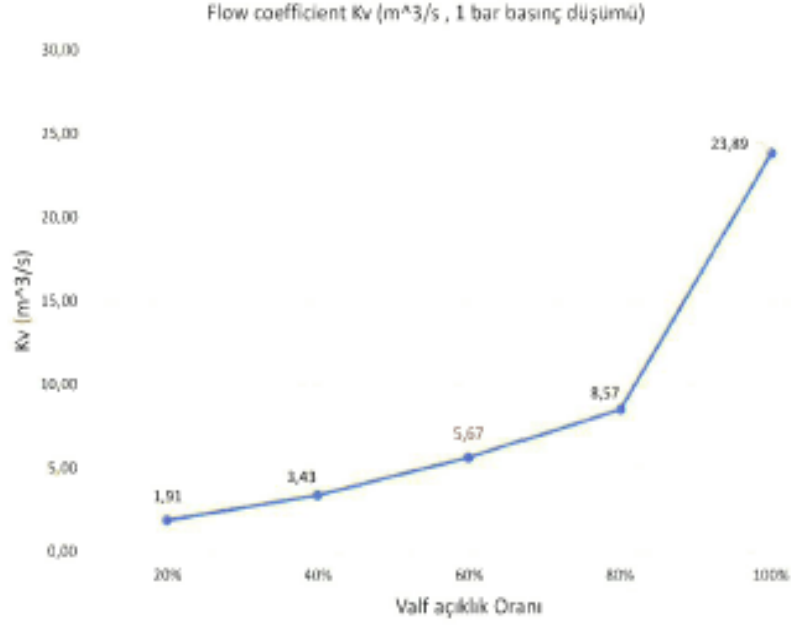
	6.1 m³/s 1T	3.7 m³/s 1T	6.75 m³/s 1T	12.2 m³/s 2T	7.4 m³/s 2T	13.5 m³/s 2T	18.3 m³/s 3T	11.10 m³/s 3T	20.25 m³/s 3T
B1	0.08	0.031	0.10	1.27	0.47	1.56	1.27	0.47	1.56
E1	0.49	0.18	0.60	1.96	0.72	2.40	4.41	1.63	5.41
P1	0.026	0.009	0.032	0.10	0.038	0.13	0.23	0.08	0.28
P2	0.057	0.021	0.072	0.23	0.085	0.28	0.52	0.19	0.63
P3	0.04	0.014	0.047	0.15	0.057	0.19	0.35	0.13	0.43
P4	0.14	0.052	0.17	0.57	0.21	0.70	1.27	0.47	1.56
P5	0.09	0.032	0.11	0.346	0.13	0.42	0.78	0.29	0.95
P6	0.19	0.07	0.23	0.75	0.28	0.92	1.69	0.62	2.07
P7	0.34	0.13	0.42	1.37	0.50	1.67	3.08	1.13	3.76
P8	0.11	0.041	0.14	0.45	0.17	0.55	1.012	0.37	1.24
P9	0.05	0.018	0.06	0.19	0.071	0.23	0.43	0.16	0.53
S1	1.38	0.51	1.69	1.38	0.51	1.69	1.38	0.51	1.69
HİDROLİK YÜK	163.66	165.56	162.99	157.88	163.43	155.91	150.24	160.61	146.55

EK-2



Valf Armatür Sanayi Ticaret A.Ş.
O.S.B ÇERKEZKÖY / TEKİRDAĞ / TÜRKİYE
Tel: +90 282 758 36 50 Fax: +90 282 758 36 59

FLOW RATE(Kv) and VALVE LOSS COEFFICIENT(K) CALCULATION FOR 36inch ES11H.13



FORMULATION

$$K_v = Q (SG / dp)^{1/2}$$

Q= water flow (cubic meters per hour)
SG = specific gravity (1 for water)
dp = pressure drop (bar)

$$dp = K \cdot \rho \cdot V^2 / 2$$

K=Loss Coefficient
 ρ =Density (kg/m³)
V=Velocity (m/s)
dp = Pressure drop (Pa)

Calculating K value for this Valve

Kv=85993,6 m³/h
dp =1 bar
V=37,55m/s
 $100000\text{Pa} = K \cdot (1000 \text{ kg/m}^3) \cdot (37,55\text{m/s})^2 / 2$

$$K=0,1418$$

Prepared	Description	Origin	Date	Page
YUSUF KAYA 	.	RD37-E5-6R1	30.03.2016	1/1

Şekil Ek 2.1: Sürgülü vana akış hesapları.

Çizelge Ek 2.1: Vananın 1 barlık basınç düşümünü sağladığı veriler.

Valf Açıklık Oranı (%)	Kv (m³/s)	Kv (m³/h)	SG	dp (kPa)	dP (bar)	Q (m³/s)	ρ (kg/m³)	Çap (m)	Alan (m²)	Hız (m/s)	K
20	1.91	6876	1	100	1	1.91	1000	0.91	0.65	2.90	23.64
40	3.43	12348	1	100	1	3.43	1000	0.91	0.65	5.22	7.33
60	5.67	20412	1	100	1	5.67	1000	0.91	0.65	8.63	2.68
80	8.57	30852	1	100	1	8.57	1000	0.91	0.65	13.05	1.17
100	23.89	86004	1	100	1	23.89	1000	0.91	0.65	36.37	0.15

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Gülsevim Sepetci
Uyruğu : T.C.
Doğum Tarihi ve Yeri : 01.10.1992 – Efeler/Aydın
E-posta : gulsevimsepetci@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2015, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2017, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği.

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

Yıl	Yer	Görev
2017 -	TEI – Tusaş Motor Sanayii A.Ş.	Aerodinamik Mühendisi
2016 - 2017	TTC (Türkiye Teknoloji Merkezi) TEI-GE Aviation Ortak Ofisi	Tasarım Mühendisi
2015 – 2016	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Su Türbinleri Tasarım ve Test Merkezi	Proje Burslu Yüksek Lisans Öğrencisi
2015	TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Su Türbinleri Tasarım ve Test Merkezi	Stajyer
2014	Türk Traktör Ziraat Makineleri A.Ş.	Stajyer
2013	TEI – Tusaş Motor Sanayii A.Ş.	Stajyer

YABANCI DİL: İngilizce (İleri düzeyde), Almanca (Temel düzeyde)

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Sepetci, G.**, Cetinturk, H., Ozkan S.Y., Yuksel, S.O., Karadeniz, C., Celebioglu, K., Tascioglu, Y., Aradag, S. (2016) “Conceptual Design of a Hydroelectric Power Plant for a Rehabilitation Project”, “International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, HEFAT 2016”.

