



**HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE HIZ REGÜLATÖRÜ TASARIMI  
ve GEZENDE HES'e UYGULANMASI**

**Abdullah ALTAY**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2015**

Abdullah ALTAY tarafından hazırlanan “HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE HIZ REGÜLATÖRÜ TASARIMI ve GEZENDE HES’e UYGULANMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. İres İSKENDER

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Başkan :** Prof.Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

**Üye :** Dr. Cem ŞAHİN

Elektriksel Güç Teknolojileri Bölümü, Enerji Enstitüsü, TÜBİTAK MAM

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum

.....

Tez Savunma Tarihi: 06/02/2015

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....  
Prof. Dr. Şeref SAĞIROĞLU  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

## ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Abdullah ALTAY

13.02.2015

# HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE HIZ REGÜLATÖRÜ TASARIMI VE GEZENDE HES'e UYGULANMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Abdullah ALTAY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Şubat 2015

## ÖZET

Bu tez, hidroelektrik santraller için hız regülatörü tasarımı ve hız regülatörü performansını arttırmak için bir yöntem ve model uygulaması içermektedir. Bu yöntem ilk olarak matematiksel modele, daha sonra ise Gezende HES hız regülatörüne uygulanmıştır. İlk olarak, oluşturulan matematiksel modeline ait parametreler, Gezende HES parametreleri kullanılarak ayarlanmıştır. Bu aşamada, simülasyon sonuçları ile saha ölçümlerinin eşleşmesi için Gezende HES hız regülatörünün mekanik sistemdeki eskime ve boşlukları geleneksel modele ilave edilmiştir. Boşlukların gecikme etkisinin aşılması için, kontrol sistemine ileri besleme(feed forward) ve Ziegler-Nichols(ZN) kazanç artırımı yöntemleri uygulanmış ve ileri besleme yönteminin hem enterkonnekte modda hem de izole ada modda daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir. Bu durumdan dolayı gerçek sistemde ileri besleme yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. Güncellenen hız regülatörü PID kontrolcüsü, sahadaki gerçek sisteme uygulanmıştır ve hız regülatörü performansının iyileştirildiği saha ölçüm sonuçları ile doğrulanmıştır.

Bilim Kodu : 905.1.033  
Anahtar Kelimeler : Hidroelektrik santral, HES, hız regülatörü, kontrol, PID, boşluk, ileri besleme  
Sayfa Adedi : 78  
Danışman : Prof. Dr. İres İSKENDER

SPEED REGULATOR DESIGN FOR HYDROELECTRIC POWER PLANT AND  
IMPLEMENTATION IN GEZENDE HEPP

(M. Sc. Thesis)

Abdullah ALTAY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

February 2015

ABSTRACT

This thesis presents a method to design and enhance the performance of speed governors for Hydroelectric Power Plants(HEPPs). This method is first applied to the mathematical model and afterwards realized in the Gezende HEPP speed governor. At first, the parameters of mathematical model is generated using Gezende HEPP parameters. Afterwards, the aging and backlash effect are added to the conventional model in order to match the simulation outputs with the site measurements. The feed forward and Ziegler-Nichols(ZN) methods are applied in order to mitigate the delay impact of backlash, and it is observed that the feed forward method gives better results in both interconnected mode and isolated island mode. Therefore, feed forward is selected to use actual system since it also provides island-mode stability. The updated PID controller of speed governor is applied to actual system and speed governor performance progress is verified by site measurements.

Science Code : 905.1.033

Key Words : Hydroelectric power plant, HEPP, speed regulator, governor, control, PID, backlash, feed forward

Page Number : 78

Supervisor : Prof. Dr. İres İSKENDER

## TEŞEKKÜR

Öncelikli olarak bu tezin hazırlanması sırasında bana her konuda yardımcı olan saygıdeğer hocam ve danışmanım Prof. Dr. İres İSKENDER'e teşekkürlerimi sunarım.

Aynı zamanda, "Gezende HES Kontrol Sistemleri Rehabilitasyon İşleri" projesinde bana çalışma şansı veren ve projede her türlü imkanı tanıyan Abdullah NADAR'a, bu tezin hazırlanması sırasında değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Dr. Cem ŞAHİN'e ve tez sürecinde desteğini eksiltmeyen ve yardımlarıyla beni yönlendiren Dođan GEZER'e teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca bu tezin hazırlanması sırasında desteğini sürekli hissettiren Elif Tûba ÇETİNKAYA'ya ve beni bu günlere getiren, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme sonsuz sevgi ve saygılarımı sunarım.

## İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ .....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiv
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. HİDROELEKTRİK SANTRALLER .....</b>	<b>7</b>
2.1. Hidrolik Türbinler .....	10
2.1.1. Reaksiyon türbinleri .....	13
2.1.2. Aksiyon türbinleri .....	18
2.2. Hız Regülatörü .....	21
2.2.1. Hız regülatörü bileşenleri .....	24
2.2.2. Hız regülatörü işlevleri.....	28
<b>3. MATEMATİKSEL İFADELER.....</b>	<b>33</b>
3.1. Hidrolik Türbin Modeli.....	33
3.1.1. Doğrusal türbin modeli .....	34
3.1.2. Doğrusal olmayan türbin modeli.....	37
3.2. Hız Regülatörü Modeli.....	41
<b>4. SİMÜLASYON ve UYGULAMA ÇALIŞMALARI.....</b>	<b>45</b>
4.1. Modellerin Oluşturulması .....	46
4.1.1. Hız regülatörü modeli .....	47



	<b>Sayfa</b>
4.1.2. Doğrusal türbin modeli .....	48
4.1.3. Basit doğrusal olmayan türbin modeli .....	48
4.1.4. Sürtünme kayıplarını içeren doğrusal olmayan model.....	49
4.2. Gezende HES Saha Yük Alma Yük Atma Testleri.....	50
4.2.1. Gerçek durum ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması .....	50
4.2.2. Gezende HES ayar kanatlarındaki boşluğun tespiti .....	53
4.2.3. Boşluk etkisinin değerlendirildiği simülasyon sonuçları .....	55
4.2.4. Boşluk etkisinin giderilmesi için tasarlanan hız regülatörü modeli .....	57
4.2.5. Boşluk etkisinin giderilmesi için tasarlanan hız regülatörünün gerçek sisteme uygulanması .....	64
4.3. Gezende HES Primer-Frekans Kontrol Testleri.....	65
4.3.1. Primer-frekans kontrolü rezerv testi başarı kriterleri .....	65
4.3.2. Primer-frekans kontrolü rezerv testleri .....	66
4.3.3. Primer-frekans rezerv test sonucunun değerlendirilmesi.....	67
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>69</b>
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>71</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>75</b>
EK-1. Matlab/Simulink model parametreleri .....	76
EK-2. “Backlash” bloğunun parametre ayarı.....	77
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>78</b>

**ÇİZELGELERİN LİSTESİ**

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 4-1. Saha yük alma ve yük atma testi frekans değişimi.....	50
Çizelge 4-2. Kapalı çevrim Ziegler–Nichols metodu için parametrelerin hesaplanması .....	58

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. Hız regülatörü blok şeması .....	3
Şekil 2.1. Hidroelektrik santralin genel görünümü .....	7
Şekil 2.2. HES’lerde düşü-debi-güç ilişkisi .....	10
Şekil 2.3. Düşü ve akışa göre türbin seçimi .....	11
Şekil 2.4. Örnek düşü-akış-verim grafiği .....	12
Şekil 2.5. Francis türbinin yerleştikten sonra görünümü .....	14
Şekil 2.6. Yapım aşamasında olan Francis tipi türbin .....	14
Şekil 2.7. Örnek bir Francis tipi türbin .....	15
Şekil 2.8. Kaplan tipi türbinin genel görünümü .....	16
Şekil 2.9. Kaplan tipi türbinin kanatları .....	16
Şekil 2.10. Regülasyon çemberi .....	17
Şekil 2.11. Servomotor, regülasyon çemberi ve ayar kanatları bağlantısı detaylı gösterimi .....	18
Şekil 2.12. Pelton tipi türbin .....	19
Şekil 2.13. Pelton tipi türbinin çalışma prensibi .....	19
Şekil 2.14. Banki tipi türbin .....	20
Şekil 2.15. Banki tipi türbinin çalışma prensibi .....	21
Şekil 2.16. Ünite blok şemasında hız regülatörünün yeri .....	22
Şekil 2.17. Hidro-mekanik hız regülatörünün iç yapısı .....	23
Şekil 2.18. Hız regülatörü genel blok şeması .....	23
Şekil 2.19. Hız regülatörünün santraldeki konumu .....	24
Şekil 2.20. Gezende HES’de kullanılan elektronik hız regülatörü .....	25
Şekil 2.21. Gezende HES’de kullanılan basınçlı yağ sistemi .....	26
Şekil 2.22. Gezende HES’de kullanılan basınçlı tank .....	27

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 2.23. Gezende HES’de kullanılan servomotor .....	27
Şekil 2.24. Elektro-hidrolik hız regülatörü prensip şeması.....	29
Şekil 2.25. Kalıcı hız düşümü değişkeni bulunan bir hız regülatöründe hız değişimi-aktif çıkış gücü ilişkisi .....	31
Şekil 3.1. Hidrolik türbin blok diyagramı .....	33
Şekil 3.2. Hidroelektrik ünite şematik gösterimi .....	34
Şekil 3.3. Ayar kanatları ideal açıklığı ile gerçek açıklık arasındaki ilişki.....	39
Şekil 3.4. Basit doğrusal olmayan türbin modeli .....	40
Şekil 3.5. Sürtünme kayıplarını içeren doğrusal olmayan türbin modeli .....	41
Şekil 3.6. Detaylı hız regülatörü blok diyagramı .....	41
Şekil 3.7. Hız regülatörü matematiksel modeli blok şeması.....	43
Şekil 4.1. Model ile saha verilerinin karşılaştırma felsefesi .....	45
Şekil 4.2. Model parametrelerinin ve saha ölçümlerinin modele girilmesi .....	46
Şekil 4.3. Model genel görünümü.....	47
Şekil 4.4. Hız regülatörü modeli .....	48
Şekil 4.5. Model 1, Doğrusal türbin modeli.....	48
Şekil 4.6. Model 2, Basit doğrusal olmayan model .....	49
Şekil 4.7. Model 3, Sürtünme kayıplarını içeren doğrusal olmayan model.....	49
Şekil 4.8. Saha yük alma ve yük atma test verileri-Saha veri seti 1 .....	51
Şekil 4.9. Saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının güç bakımından karşılaştırılması-Saha veri seti 1 .....	51
Şekil 4.10. Saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının tepki süresi bakımından karşılaştırılması-Saha veri seti 1 .....	52
Şekil 4.11. Saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının ayar kanat açıklıklarının karşılaştırılması-Saha veri seti 1 .....	52
Şekil 4.12. Servomotor ile ayar kanatları arasındaki boşluğun tespiti için yapılan saha testi-Saha veri seti 2 .....	53

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.13. Saha veri seti 2’de ayar kanat konumuna %5’lik boşluğun uygulanması ....	54
Şekil 4.14. Gerçek sistemde ayar kanatlarında tespit edilen %5’lik boşluğun modellenmesi .....	55
Şekil 4.15. %5’lik boşluk modellenerek saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının güç bakımından karşılaştırılması-Saha veri seti 1....	56
Şekil 4.16. %5’lik boşluk modellenerek saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının tepki süresi bakımından karşılaştırılması-Saha veri seti 1 .....	56
Şekil 4.17. %5’lik boşluk modellenerek saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının ayar kanat açıklıklarının karşılaştırılması-Saha veri seti 1 .....	56
Şekil 4.18. Kapalı çevrim Ziegler-Nichols metoduna ait çıkış işareti .....	58
Şekil 4.19. Saha sonuçları ile PI parametreleri ZN metodu ile hesaplanan model 3 sonuçlarının güç bakımından karşılaştırılması.....	59
Şekil 4.20. İzole ada modu için hazırlanan Matlab/Simulink modeli.....	60
Şekil 4.21. Ziegler-Nichols yöntemi ile bulunan PI parametrelerini içeren hız regülatörünün izole ada modunda frekans tepkisi .....	60
Şekil 4.22. %5’lik boşluk etkisinin giderilmesi için tasarlanan hız regülatörü modeli ..	61
Şekil 4.23. %5’lik boşluğun alınması için tasarlanan boşluk alma modeli .....	61
Şekil 4.24. Saha sonuçları ile ileri besleme yöntemini içeren hız regülatörünün güç bakımından karşılaştırılması .....	62
Şekil 4.25. İleri besleme yöntemi içeren hız regülatörünün izole ada modunda frekans tepkisi .....	62
Şekil 4.26. %5’lik boşluk alan hız regülatörü modeli ile almayan modelin ve gerçek durumun karşılaştırılması-Saha veri seti 1 .....	63
Şekil 4.27. %5’lik boşluk modellenerek saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının tepki süresi bakımından karşılaştırılması-Saha veri seti 1 .....	63
Şekil 4.28. %5’lik boşluk alan gerçek hız regülatör ile %5’lik boşluk alan modelin ve %5’lik boşluk almayan modelin yük atma esnasında karşılaştırılması-Saha veri seti 3 .....	64

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.29. %5'lik boşluk alan gerçek hız regülatörü sonuçları ile %5'lik boşluk alan model.....	65
Şekil 4.30. Rezerv testinde beklenen ünite tepkisi .....	66
Şekil 4.31. Rezerv testlerinde ünitenin davranışı.....	66
Şekil 4.32. $\Delta f=-200$ mHz rezerv testi.....	67
Şekil 4.33. $\Delta f=-200$ mHz rezerv testi model sonuçları.....	67
Şekil 4.34. $\Delta f=-200$ mHz rezerv testi gerçek hız regülatöründe “Boşluk Alma” bloğu yok .....	68

## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$P_m$	Türbin çıkış gücü
$\eta$	Türbin verimi
$q$	Akış
$\rho$	Su yoğunluğu
$a_g$	Yerçekimi ivmesi
$h$	Net düşü
$R_p$	Kalıcı hız düşümü
$\Delta f$	Frekansdaki değişim
$\Delta P$	Aktif güçteki değişim
$K_u$	Türbin orantı sabiti
$K_p$	Türbin sabiti
$U$	Cebri boru içinde akan suyun çizgisel hızı
$G$	Ayar kanat açıklığı
$H$	Ayar kantlarından ölçülen hidrolik düşü
$H_0$	Hidrolik düşünün sürekli-hal başlangıç değeri
$H_f$	Sürtünmeden kaynaklı hidrolik düşüdeki azalma
$f_p$	Cebri borudaki su sürtünme katsayısı
$P$	Türbin gücü
$Q$	Su debisi
$L$	Cebri boru uzunluğu
$A$	Cebri boru kesit alanı
$\rho LA$	Cebri boru içindeki suyun kütlesi
$\rho a_g(H - H_0)$	Türbin girişinde düşü değişimine bağlı debi değişimi
$\Delta U$	Cebri boru içinde akan suyun hızındaki değişim
$\Delta G$	Ayar kanat açıklığındaki değişim
$\Delta H$	Ayar kantlarından ölçülen hidrolik düşüdeki değişim

**Simgeler****Açıklamalar**

$\omega_n$	Nominal türbin hızı
$P_r$	Oranlanmış türbin katsayısı
$A_t$	İdeal açıklık katsayısı
$T_m$	Türbin çıkış torku
$D$	Sönümlenme katsayısı
$U_{nl}$	Yüksüz durumdaki cebri boru içinde akan suyun hızı
$T_w$	Su zaman sabiti
$\emptyset$	Türbin kanat açısı

**Kısaltmalar****Açıklamalar**

<b>HES</b>	Hidroelektrik santral
<b>HR</b>	Hız regülatörü
<b>EHR</b>	Elektronik hız regülatörü
<b>HHR</b>	Hidrolik hız regülatörü
<b>AKA</b>	Ayar kanat açıklığı
<b>PID</b>	Proportional-Integral-Derivative
<b>HEPP</b>	Hydroelectric power plant
<b>ZN</b>	Ziegler-Nichols



## 1. GİRİŞ

Günümüz teknolojik gelişmeleri ve ihtiyaçlarına bağlı olarak elektrik enerjisi çok önemli ve vazgeçilemez bir konuma gelmiş bulunmaktadır. Dünyada ve ülkemizde de hızla artan elektrik enerjisi talebi, yeni santralleri zorunlu hale getirmiştir. Ülkemizde bu talebi karşılamak için yapımına başlanan büyük ölçekli nükleer santrallerin yanı sıra, büyük ve orta ölçekli hidroelektrik santral projeleri de gündeme gelmektedir. Özellikle artan fosil yakıt fiyatları, ülkemizde doğalgaz santrallerinin üretilen enerjinin yarısından fazlasını karşılaması ve doğalgaz konusunda komşu ülkelere olan bağımlılığımız, ülkemizde bulunan kömürün kalitesinin düşüklüğü ve çevresel etkenler göz önüne alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarının önemi daha çok ortaya çıkmıştır [13]. Elektrik enerjisi üretim oranları dikkate alındığında, yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde en büyük paya sahip olan HES'lerin cazip bir seçenek olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Büyük su kaynaklarını değerlendirmek için barajlı büyük HES yapılırken, küçük su kaynaklarını değerlendirmek amacıyla küçük HES'ler de yapılmaktadır. Finansal yatırımı ve işletme maliyeti ile ön plana çıkan hidroelektrik santraller su kaynakları bakımında zengin olan ülkemizde yaygındır. 31 Aralık 2014 itibariyle Türkiye elektrik sistemi kurulu gücü 69516,4 MW'tır. Kurulu gücümüzün 23640,9 MW(%34)'ı hidroelektrik santrallerden karşılanmaktadır ve bu oran her geçen gün devreye alınan yeni hidroelektrik santrallerle de giderek artmaktadır [36].

HES'lerin yıllık üretimleri, kaynağa gelen su miktarıyla doğru orantılı olduğundan ve bir yıl boyunca gelen su, tam kapasite çalıştırmaya yetmeyebileceğinden, genel olarak puant santrali olarak çalıştırılırlar. Devreye alınmış ve çıkarılışları termik santrallere göre çok kolay ve hızlı olduğundan, su rejimine bağlı olarak enerji gereksiniminin çok olduğu puant saatlerde çalıştırılarak, enerjiye az gereksinim olduğu zamanlarda ise devre dışı bırakılırlar.

Suyun potansiyel enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren bu santrallerde enerjinin talep güç karşısındaki kontrolünün ve kalitesinin sağlanması önemli bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır. Elektrik üretiminde frekans ve gerilim çok önemli iki kriterdir. Gerilim generatörün uyarıtımı, frekans ise generatör rotor dönüş hızı kontrol edilerek ayarlanabilir. Başka bir deyişle gerilim reaktif güç kontrolü yapılarak, frekans ise aktif güç kontrolü yapılarak kontrol edilir. Kaliteli elektrik enerjisi gerilimi ve frekansı istenilen değerde sabit

ve sürekli olan elektrik enerjisidir. Tüketiciler sürekli, kararlı, kaliteli, ucuz ve güvenilir enerji talep etmektedir. Bu nedenle güç sistemlerinde aktif güç dengesinin sağlanması gerekmektedir. Tüketiciler tarafından talep edilen enerji ile üretilen enerji arasında bir denge olmalıdır. Üretilen enerji talep edilenden fazla olursa frekans artar, üretilen enerji tüketilen enerjiden daha az olursa ise frekans azalır. Bu istenmeyen bir durumdur. Hidroelektrik santrallerde üretilen elektrik enerjisi güç trafoları ile bir bara vasıtasıyla güç sistemi şebekesine katılır. Her baradan çekilen anlık yükler, iklim koşullarına, gün saatine, günün özelliğine göre özel saatlere bağlı olarak değişmektedir. Üretilen toplam güç, tüketilen güç ile hat kayıpları toplamına eşit olmak durumundadır. Aksi takdirde, güç sistemi frekansı değişecektir. Güçte meydana gelen ani bir değişimde, aktif güç dengesi sağlanabilirse, frekans kontrolü de sağlanmış olur. Gerek her ülkenin kendi enterkonekte güç sistemi içerisinde, gerekse ülkeler arası enterkonekte sistemlerde, frekansın kontrol edilebilmesi ve sabit kalması önemli bir konudur. Güç sisteminde sabit frekans elde etmek için her santralde ve yük tevzide üretim kontrolü yapılmaktadır. Yük tevzide güç sistemi ağındaki üretimi kontrol edilir ve tüketim ile kayıpların toplamına eşit bir üretim dağılımı sağlanır. Bu nedenle, güç sistemlerinde yük-frekans kontrolü önemli bir yer tutmaktadır. Yük-frekans kontrolü, üretilen ve tüketilen aktif güç arasındaki dengeyi sağlayabilmek için, güç akışını sağlayarak frekansı istenen değerler arasında tutma işlemidir.

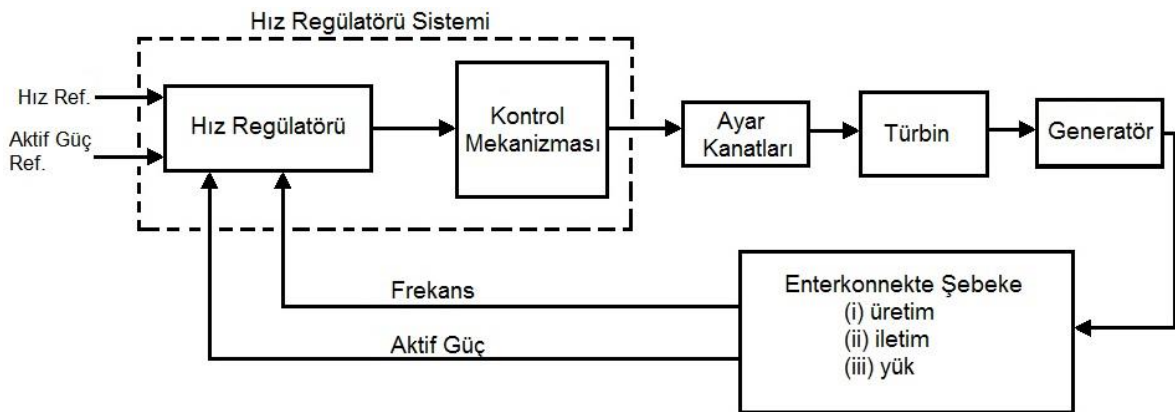
Genel olarak bir HES 'in iki farklı çalışma biçimi vardır. İlk çalışma şekli şebekeye bağlı çalışmadır. Bu durumda santral üretiminin tümü şebekeye iletilecektir. Dolayısıyla santralin işletme amacı, mümkün olan en yüksek enerjiyi üretmektir. Doğal koşullar tarafından belirlenen nehir debisinin santral işletmesi ile değişmeyeceği açıktır. Fakat türbin verimlilik eğrileri ve anlık nehir debisi göz önüne alınarak, baraj gölü seviyesi kontrol edilebilir ve nehir debisinin en verimli şekilde kullanılması sağlanabilir. Baraj gölünün seviyesinin kontrol edildiği bu işletim şekline seviye kontrol denir [13].

İkinci çalışma şekli olan izole ada modunda ise santral, şebekeden bağımsız olan bir bölgede elektrik ihtiyacını karşılar. Bu çalışma prensibi şebekede oluşacak bir arıza sonrasında ve santral tasarımı uygunsa kullanılabilir. Örneğin, santralin ve bölgesel yükün şebekeye tek bir iletim hattı ile bağlı olduğu durumlarda, santrali ve bölgesel yükü şebekeye bağlayan iletim hattında meydana gelecek bir arıza dolayısıyla iletim hattının kesici ile açılması sonrası, santral ve bölgesel yük bir izole ada oluşturabilir. Bu çalışma prensibinde santralin amacı enerji üretimini maksimize etmek veya nehir debisini verimli

kullanmak değil, izole sistemin gerilimini ve frekansını belirli sınırlar içinde tutmaktır [13].

Türbin kontrol sistemlerinin asıl amacı, güç generatörlerindeki hız değişimlerini kontrol ederek frekansı sabit tutmak ve buna bağlı olarak güç değişimlerini kontrol altında tutarak güç kalitesini sağlamaktır. Bundan 50 - 60 yıl öncesinde bu kontrol ilk olarak hidro-mekanik türbin kontrolü biçiminde sağlanmaktaydı. Daha sonra talep ve sistem gereksinimlerinin artmasına ve teknolojik gelişmelere bağlı olarak dijital elektronik hız regülatörü(governor) sistemleri kullanılmaya başlanmıştır. Hız regülatörleri ünitenin enterkonnekte sisteme bağlanması sırasında generatör frekansını ayarlamaktadır. Ünitenin enterkonnekte sisteme bağlantısından sonra ise enterkonnekte sistemdeki frekans değişimlerine tepki vererek generatörün güç çıkışını kontrol etmektedir. Hız regülatörü çalışırken frekansı sabit tutarak üretim kontrolü yaparken, ünitenin hem mekanik hem de elektriksel olarak dengesiz hale gelmemesini de sağlamaktadır.

Hız regülatörleri yukarıda bahsedildiği gibi generatörün çıkış gücünü ve frekansını, türbine giren su miktarını ayarlayarak kontrol etmektedir. Dolayısıyla türbine giren su miktarını ayarlayarak türbinin ürettiği mekanik gücü kontrol etmektedir. Generatörün çıkış aktif gücünü veya frekansını istenilen seviyede tutmak istediğinde ise hız regülatörü türbine giren su miktarını değiştirmektedir. Hız regülatörleri türbine giren su miktarını ise türbin girişinde bulunan ayar kanatlarının konumunu değiştirerek yapmaktadır. Şekil 1.1'den de görüleceği üzere hız regülatörlerinin girişi, generatörün ürettiği aktif güç ve frekansı yani rotorun dönüş hızı, çıkışı ise ayar kanat konum hedef değeridir.



Şekil 1.1. Hız regülatörü blok şeması [6]

Hız regülatörü tasarlanırken ünitenin türbini ve bileşenleri ile beraber düşünölmelidir. Yukarıda da bahsettiğimiz gibi hız regülatörü türbinin mekanik çıkış gücünü etkilemektedir. Dolayısı ile kontrol ettiği sistem türbindir. Hız regülatörü kontrol parametreleri belirlenirken, hız regülatörünün kontrol ettiği türbin ile beraber modellenip analiz edilmelidir. Model ve simölasyon çalışması hız regülatörünün sağlıklı bir şekilde çalışmasını, değişen yük koşullarına göre nasıl davranacağını önceden öngörölmesini sağlamaktadır.

Bu tez çalışmasında hız regülatörü ve türbin sisteminin modellenmesi, kontrol parametrelerinin belirlenmesi ve sisteme etkisi konularına değinilecektir. Modellenen sistem ve simölasyon sonuçları, TÜBİTAK MAM 5122802 nolu “GEZENDE HES KONTROL SİSTEMLERİ YENİLEME PROJESİ” kapsamında yenilenen Gezende HES’in hız regülatörü performansı ile karşılaştırılacaktır. Klasik yaklaşımlarla tasarlanan hız regülatörünün, Gezende HES’in sahip olduğu mekanik boşluklardan kaynaklı gecikme karşısında yetersiz kaldığı görölmüştür. Bu gecikmelerin etkisini azaltmak için ileri besleme yöntemi kullanılarak bir metot önerisi matematiksel modele uygulanmıştır. Simölasyon ortamında sağlıklı sonuçların alınmasından sonra geliştirilen metot gerçek sisteme uygulanmış ve boşluklardan kaynaklı gecikmeleri azalttığı görölmüştür. Modellenenekte sistemde, Gezende HES’in sahip olduğu ekipman özellikleri ve parametreleri kullanılacaktır.

Öncelikli olarak bu tez çalışmasına yön vermek amacıyla daha önce literatürde yapılmış olan çalışmalar incelenmiştir. Literatürü incelediğimizde hız regülatörünün türbin sistemi ile beraber modellendiğı ve generatörün modellenmesine gerek olmadığı görölmüştür. Generatörün zaman sabiti türbin ile kıyaslandığında oldukça küçüktür. Bu yüzden hız regülatörü performansında etkisi olmadığı literatür taramasında görölmüştür. tez çalışmasına yön vermek amacıyla daha önce literatürde yapılmış olan tüm türbin, hız regülatörü modelleme tekniklerini ve kontrol yöntemleri incelenmiştir.

Bu konudaki yayınlar incelendiğinde ise, [4] no’lu makalede hidroelektrik santral modellemesi ve kontrol yöntemleri konusunda yapılmış olan çalışmalar incelenmiş ve özetlenmiştir. [5] no’lu makalede hidroelektrik santralin dinamik simölasyonu ve davranışları incelenmiştir. Bu çalışmaları yapabilmek için oluşturulan modellerin gerekli matematiksel ifadeleri ve parametre belirlenmesi anlatılmıştır. [7] no’lu makalede

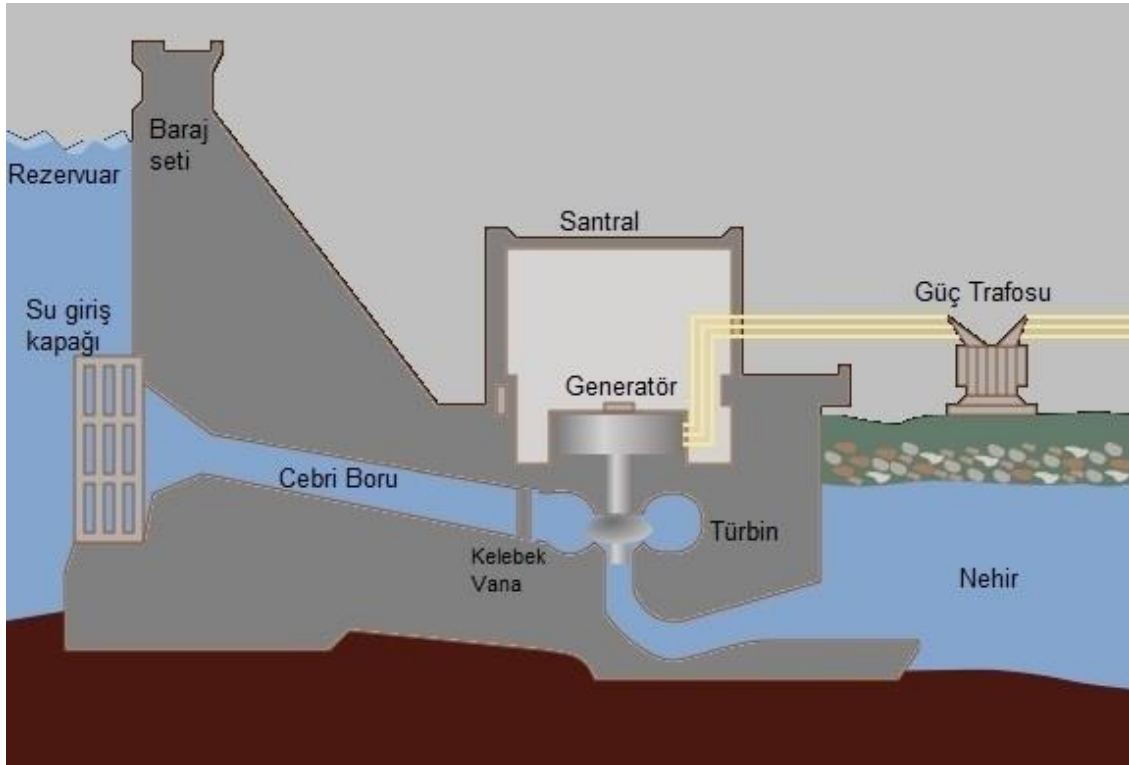
hidroelektrik santralin lineer olmayan modeli anlatılmıştır. Bu model için gerekli olan matematiksel ifadeler anlatılmıştır. [8] no'lu makalede hidrolik türbin ve hız kontrolü için farklı modeller anlatılmıştır. Doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlar kullanılarak hidroelektrik santral modellenmiştir. Her parça için denklemler türetilmiştir. Geçici kararlılık çalışmaları için incelenmiştir. [9] no'lu makalede türbinin dinamik çalışmaları için doğrusal olmayan modeli anlatılmıştır. Bir türbin, cebri borunun modeli ile çoklu türbin ve bu türbinlere bağlı cebri boru modelleri oluşturularak sonuçlar karşılaştırılmıştır. Doğrusal olmayan modellerle parametre tahmini amaçlanmıştır. [20] no'lu makalede katı kitle yaklaşımı ve elastik su sütunu denklemleri yöntemleri anlatılıp, karşılaştırılmıştır. Katı kitle yaklaşımında suyun sıkıştırılabilirliği ihmal edilerek türbine ait transfer fonksiyonu hesaplanmıştır. Elastik su sütunu denklemlerinde ise cebri boru ve akışkanların elastikliği dikkate alınarak transfer fonksiyonu oluşturulmuştur. [21] no'lu makalede dijital hız regülatörü tasarımı, yapımı ve deneyleri tanımlanmıştır. Dijital hız regülatörü, geleneksel analog hız regülatörü ile karşılaştırılmıştır. [22] no'lu makalede mikroişlemci tabanlı hız regülatörünün donanımı, yazılımı ve testi ile ilgili bilgi vermiştir. Test sonuçları dinamik ve performans testleri olmak üzere iki bölümde sunulmuştur. [23] no'lu makalede Apalachia Hidroelektrik Santrali'nde bulunan hidrolik türbin ünitelerinin frekans tepkisi testleri yapılmıştır. Apalachia Hidroelektrik Santrali uzun tünel, diferansiyel denge bacası, iki cebri boru, iki Francis tipi türbin ve emme borusundan oluşur. Bu çalışmada temel hidrolik denklemler yazılmış farklı koşullar için sistemin tepkisi incelenmiştir. [24] no'lu makalede L. M. Hovey'in lineer hız regülatörü denklemleri doğrusal olmayan sistemleri tanımlamak için genişletilmiştir. Doğrusal olmayan hız regülatörü modeli küçük ve büyük sinyal geçici tepkilerini simüle etmek için kullanılmıştır. L. M. Hovey'in sonuçları ile doğrusal olmayan model sonuçları karşılaştırılmıştır. [25] no'lu makalede generatör, ikaz sistemi ve hız regülatöründe kullanılan parametrelerin belirlenmesi için yapılan test prosedürü anlatılmıştır. Program sonuçlarına göre, mevcut modelde küçük değişiklikler yaparak hız sönümleme etkisi, ölçüm değerleri ile yakınlaşır. Türbinin doğruluğunu artırmak için de çalışmalar yapılmıştır. [26] no'lu makalede kaskat rezervuarlı hidroelektrik santral için dinamik model oluşturulmuştur. Geliştirilen model, doğrusal olmayan dinamikleri simüle etmek ve kontrol sisteminin tasarımı için kullanılmıştır. Kaskat sistemin performansı, doğrusal olmayan dinamikleri ve kontrol sistemi tasarımı gösterilmiştir. Simülasyon modeli Matlab/Simulink'te uygulanmıştır. [27] no'lu makalede mikroişlemci tabanlı dijital hız regülatörünün gelişimi ve testi anlatılmıştır. Dijital hız regülatörünün analog hız regülatörüne göre üstünlükleri gösterilmiştir. [28] no'lu makalede

hız regülatörünün tasarımı ve performansı gösterilmiştir. Klasik türbin transfer fonksiyonu sonuçları ile saha testleri sonuçları karşılaştırılmıştır. Test sonuçlarının çok yakın olduğu görülmüştür. [29] no'lu makalede frekans kontrol modunda hidroelektrik santralin geçici ve kararlı durum tepkileri anlatılmıştır.

PID katsayılarının belirlenmesi veya optimizasyonu ile ilgili yayınlara bakıldığında [14] no'lu makalede hız regülatörü parametreleri ve hidrolik bağlantı etkileri (hydraulic coupling effect), izole ada çalışma (isolated operation) ve “black start” koşullarında incelenmiştir. [15] no'lu makalede hız regülatörünün optimum çalışabilmesi için parametreler ayarlanmıştır. İzole yük olduğunda, hız regülatörünü kararlı bir biçimde çalıştırmak ve küçük yük değişimlerinde geçici hız değişimlerini sönümleme amacıyla metotlar geliştirilmiştir. Bu metotlarda değerlerin kompanzasyonu ve sönümleyici zaman kullanılmıştır. [16] no'lu makalede generatörün hız kontrolünün ayarları için PI parametreleri anlatılmıştır. Kutup(Pole) kaldırılma tasarımı metotları analizde temel alınmıştır. [17] no'lu makalede türbin ve hız regülatörünün analizi ve parametrelerinin ayarı için kullanılan küçük sinyal durum uzayı modeli anlatılmıştır. Türbin ve hız regülatörünün normal çalışma koşuluna bakarak açık çevrim sistemde, durum uzayı küçük sinyal modeli parametrelerinin tanımı için kararlılık programı temel yaklaşımı kullanılmıştır. Tek girişli çok çıkışlı model kapalı çevrim tepkisi ile karşılaştırılıp, başarılı olmuştur. Mekanik hidrolik, Woodward PID ve klasik Neyrpic PD olmak üzere üç farklı hız regülatörü modeli kullanılmıştır. [18] no'lu makalede çok girişli ve tek çıkışlı bir kontrol sistemi tasarlanmıştır. Hız regülatörünün hız kontrolü için, basınç sinyalinin kullanımı anlatılmıştır. Hız regülatörünün kazancı, KP, KI, KD parametreleri ile yük seviyesindeki değişim için hız regülatörünün en uygun tepkiyi vermesi sağlanmıştır. PID ile oturma zamanı 12,5 saniye ve aşırı hızlanma(aşım) %2,4 iken yeni kontrolcü ile oturma zamanı 11,6 saniyeye ve aşırı hızlanma(aşım) % 2'ye düşmüştür. [19] no'lu makalede kontrol parametrelerinin optimizasyon algoritmasının temel alındığı ortogonal test yaklaşımı anlatılmıştır. Optimizasyon sonuçlarının PID tipi kontrolcü için iyi olduğu görülmüştür.

## 2. HİDROELEKTRİK SANTRALLER

Hidrolik enerji, suyun belirli bir yükseklikten aşağı düşürülerek bu potansiyel enerjinin önce bir türbin vasıtası ile mekanik enerjiye dönüştürülmesine ve ardından mekanik enerjinin generatör vasıtası ile elektrik enerjisine çevrilmesi esasına dayanır [12]. Üretilen enerji miktarı iki değişkene doğrudan bağlıdır. Bunlardan ilki “düşü” olarak adlandırılan suyun katettiği düşey mesafedir. İkincisi ise suyun akış miktarıdır. Bir hidroelektrik santral genel olarak, baraj seti arkasındaki rezervuar suyu, su giriş kapıları, bu suyun türbine kadar akacağı basınçlı boru hattı (cebri boru), kelebek vana, ayar kanatları, türbin, generatör ve yardımcı sistemlerden oluşmaktadır. Hidrolik santrallerde sistemin giriş gücünü suyun potansiyel ve kinetik enerjisi oluşturmaktadır. Rezervuardan cebri boru içerisine akan su sahip olduğu potansiyel enerji ve türbine kadar kazanmış olduğu kinetik enerji ile türbini çevirir ve çıkışta elektrik enerjisi elde edilmiş olur. Basit bir hidroelektrik santral yapısı Şekil 2.1’ de gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Hidroelektrik santralin genel görünümü [34]

Genel olarak bir hidroelektrik santralının temel bileşenleri şunlardır: Set: Büyük bir su rezervuarı oluşturmak amacıyla beton ve beton benzeri kompozit malzemelerden oluşan ve suyu tutmaya yarayan büyük bloklardır.

- Dolu savak: Aşırı yağışlı dönemlerde taşkın ve sel gibi durumlarda baraj seti maksimum su seviyesine kadar dolduğunda, baraj gövdesinin zarar görmemesi için fazla gelen suların nehir yatağının mansabına atılmasına yarayan tesislerdir.
- Dip savak: Baraj gölünün suyunu gerektiğinde nehir yatağına bırakmaya yarayan tesislerdir.
- Cebri boru: Baraj gölü ile türbinler, yükleme odası ile türbinler veya denge bacası ile türbinler arasındaki basınçlı borulara cebri boru denir. Akışkanın iletilmesine olanak sağlar. Akan su cebri borulardan geçerek türbin çarkının dönmesini sağlar.
- Kelebek vana: Cebri borunun sonunda yer alır. Emniyet amaçlı kullanılmaktadır. Kelebek vanasının kullanıldığı durumda “by-pass” vanasının da kullanılması gerekmektedir. Cebri borudaki basınçlı su, kelebek vanası açılmadan salyangozu doldurmak için “by-pass” vanası kullanılır. Böylelikle kelebek vanası açıldığında her iki taraftaki basınç eşitlenmiş olur.
- Salyangoz: Cebri borunun bitimine yerleştirilir. Burada su belirli bir ivme kazanarak eşit debide çarka gelir ve her noktadan sabit bir akış meydana getirerek daha verimli bir çalışma sağlar.
- Ayar kanatları: Salyangozdaki su ile türbinin arasında duran kanatlardır. Ayar kanatların konumu ayarlanarak türbine giren su miktarı ayarlanır.
- Türbin: Türbin çarkı, türbin shaftı, hız regülatör sistemi, basınçlı yağ sistemi, türbin yatağı, soğutma sistemi, kumanda panosu ve yardımcı teçhizattan oluşur. Su, türbinin geniş pervanelerine vurduğunda türbin dönmeye başlar. Bu türbinin mili aynı zamanda generatörün rotoruna bağlıdır.
- Generatör: Generatör rotoru, statoru, yatağı, ikaz(uyartım), soğutma sistemi, koruma sistemi, kumanda ve işletim sistemi, kesici ve ayırıcılar ile yardımcı organlardan oluşur. Türbin pervaneleri döndüğünde, türbin miline bağlı generatörün rotoru da dönmeye başlar. Dönen bu rotor statorda alternatif akım üretilmesine sebep olacaktır.
- Transformator: Elde edilen gerilimi düşürmeyi veya yükseltmeyi sağlar. Hidroelektrik santrallerinde genelde düşük gerilimi yükseltmek amacıyla tasarlanmışlardır. Tek fazlı



veya üç fazlı olabilirler. Ana gövde, soğutma sistemi, yangın sistemi, koruma sistemi bölümlerinden oluşur.

- Şalt sahası: Transformatörlerde oluşturulan yüksek gerilimin elektrik iletim hatlarına bağlandığı bölgedir.

Rezervuarda depolanan suyun potansiyel enerjisinin elektrik enerjisine dönüştüğünü ve üretilen enerji sırasında prosesten kaynaklı kayıpları bir katsayı ile tanımlarsak (verim katsayısı) suyun potansiyel gücü ile elektriksel güç arası ilişki aşağıda belirtildiği gibi olacaktır.

$$P_m = \eta \cdot q \cdot \rho \cdot a_g \cdot h \quad (2.1)$$

$P_m$ : Türbin çıkış gücü (W)

$\eta$  : Türbin verimi

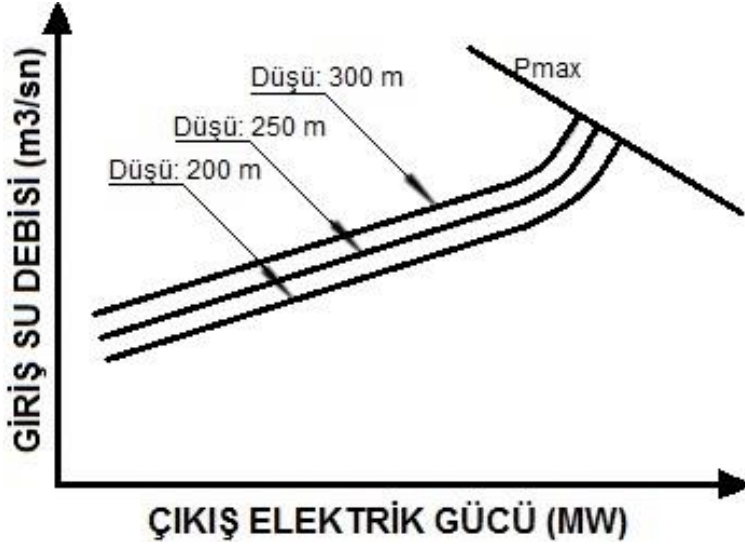
$q$  : Akış ( $m^3/sn$ )

$\rho$  : Su yoğunluğu ( $kg/m^3$ )

$a_g$ : Yerçekimi ivmesi ( $m/sn^2$ )

$h$  : Net düşü (m)

Hidroelektrik santrallerde üretilen güç, kritik bir değere kadar suyun net düşüsüne ve cebri borudan akan suyun debisine bağlıdır. Rezervuar su seviyesi ile su çıkışı seviyesi arası mesafe brüt düşü(gross hydraulic head) olarak tanımlanır. Net düşü(net hydraulic head) ise kayıplardan dolayı brüt düşüden çok az miktarda düşüktür. Farklı hidrolik düşüleri için hidrolik santral giriş ve çıkış karakteristiği Şekil 2.2’de verilmektedir.



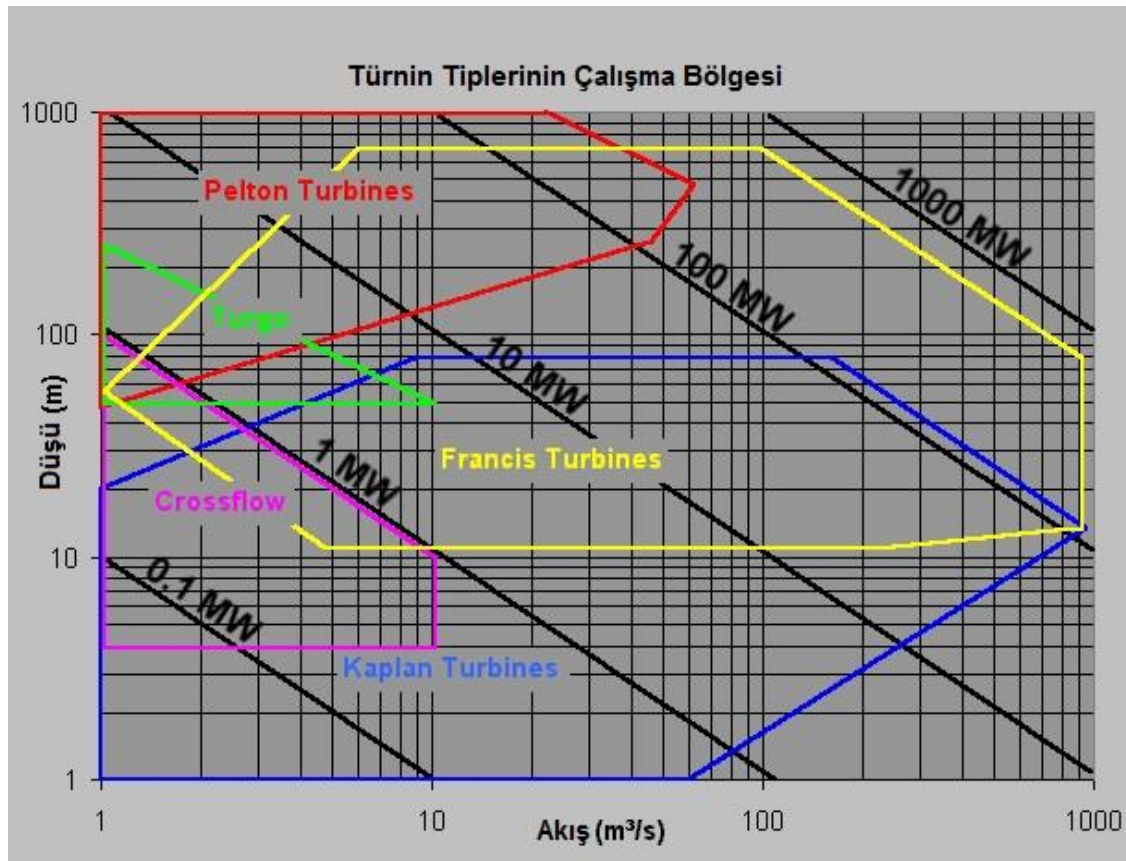
Şekil 2.2. HES’lerde düşü-debi-güç ilişkisi

## 2.1. Hidrolik Türbinler

Hidrolik türbinler, suyun hidrolik enerjisini döner çarklar yardımı ile mekanik enerjiye çeviren hidrolik makinalardır. Hidrolik makinalar, su türbinleri ve su çarkları olmak üzere ikiye ayrılırlar. Su türbinleri dinamik hidrolik makinalardır, su çarkları ise su ağırlığı kuvveti makinalarıdır. Hidrolik türbinlerde, türbin rotorunun kanat aralıklarından geçirilen suyun basıncı, dönen türbin rotorunun kanat aralıklarında mekanik enerjiye dönüştürülür. Buna karşın su çarklarında, suyun mevcut olan potansiyel enerjisi, suyun çark kepeçlerine dolması ve ağırlık tesiri ile çarkı döndürmesi suretiyle mekanik enerjiye dönüşür [31].

Su türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisinin, iletim hatları ile uzak mesafelere iletilmesi ile birlikte daha büyük, daha güçlü ve birbirleri ile paralel olarak çalışan HES’ler kurulmaya başlanmıştır. Modern anlamda otomatik olarak yük-frekans ayarlaması yapılabilen, Francis, Kaplan ve Pelton tipi hidrolik türbinler, 1920’lerden itibaren kullanılmaya başlanmıştır ve bu tip türbinler hala çok yaygın olarak kullanılmaktadırlar. Günümüzde imal edilen büyük güçlü hidrolik türbinlerin verimleri %95’e kadar yükselmiştir [31]. Su türbinlerinin modernleşerek büyük bir gelişme göstermelerine karşın su çarkları fazla gelişmemiş ve çok küçük hidrolik düşülü ve su debisi çok fazla değişen dağ köylerinde çok dar bir kullanım sahası içinde kalmışlardır.

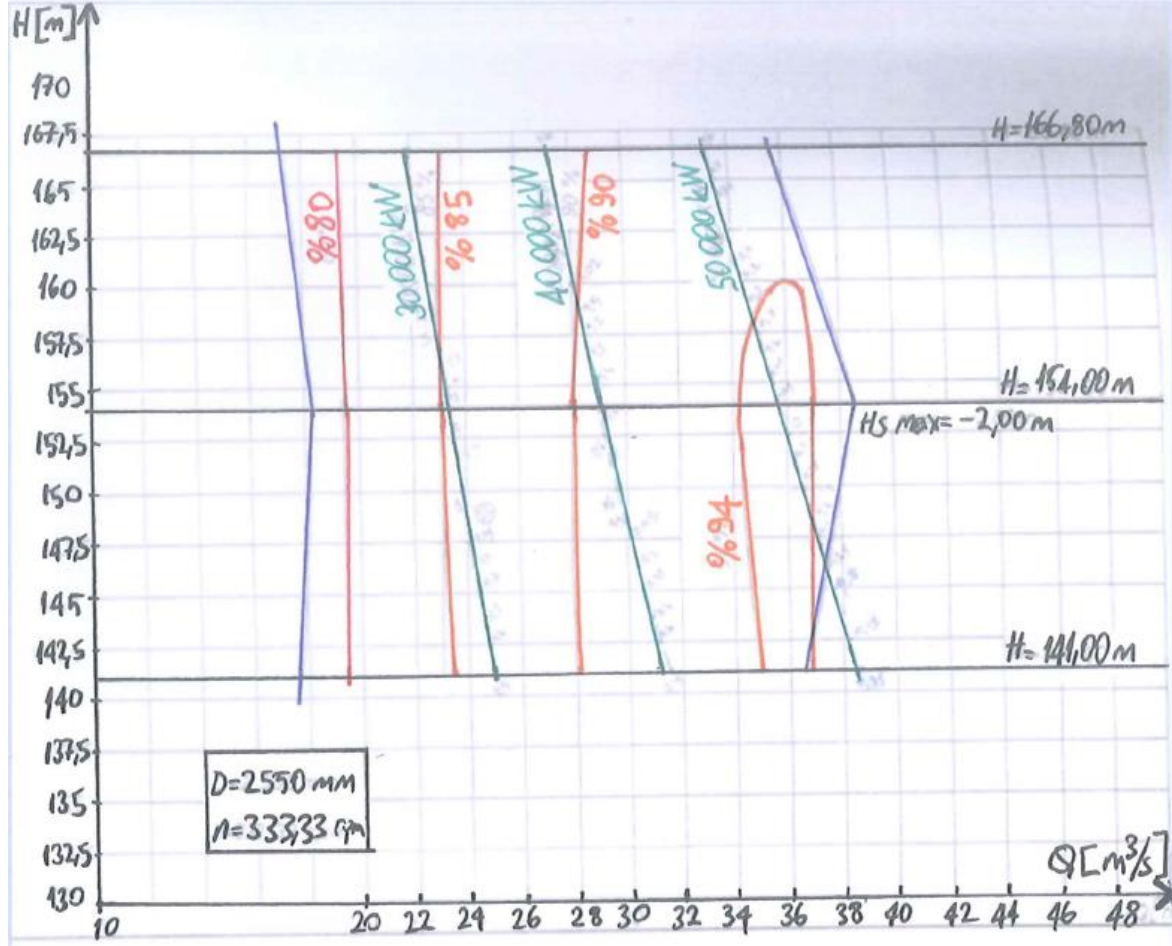
Herhangi bir yer için en uygun türbin tipinin seçimi, o yerin karakteristik özelliklerine bağlıdır. Ayrıca, düşü ve debi değerine bağlı olarak hesaplanan özgül hız değerlerine bakılarak da türbin tipi belirlenir. Türbin tipi seçiminde türbin veya generatörün hızı da önemlidir. Diğer bir kriter ise, türbinin kısmi debi koşullarında çalıştırılıp çalıştırılmayacağıdır. Tüm türbinler, bir güç-hız ve bir verim-hız karakteristiğine sahiptir. Türbin tarafından döndürülen generatörler, tipik bir türbinin optimum hızından daha yüksek bir devirde dönerler. Bu bağlantı kayış-kasnak, dişli mekanizması veya bir kavrama yardımıyla sağlanır. Burada, hız oranının minimum olması tercih edilir. Bu durumda bağlantı daha kolaydır ve maliyet daha düşüktür. Türbin hızının generatör hızında olması durumunda, generatör direkt olarak türbin miline bir kavrama ile bağlanır.



Şekil 2.3. Düşü ve akışa göre türbin seçimi [35]

Hidroelektrik santral tesislerinde kullanılan hidrolik türbinlerin projelendirilmeleri için dizayn düşüsünün tespit edilmesi çok büyük önem taşımaktadır. Özellikle barajlı HES tesislerine ait baraj göllerinin su seviyeleri mevsimlere göre değişiklikler gösterir. Bu duruma bağlı olarak da bu tip hidrolik santrallerin su düşüleri mevsimlere göre büyür veya küçülür. Bu nedenle barajlı HES tesislerinde kullanılacak hidrolik türbinler için öyle bir

dizayn düşüsü seçilmesi gerekir ki baraj gölü seviyesi yükseldiği veya alçaldığı zamanlarda türbinler bu durumdan en az etkilensin ve yüksek verimle çalıştırılabilsin [32].



Şekil 2.4. Örnek düşü-akış-verim grafiği

İşletme tarzlarına, yapılaş şekillerine, hidrolik düşüye göre hidrolik türbinleri çeşitli sınıflandırmalara tabi tutmak mümkündür. Ancak, genellikle, hidrolik türbinleri “aksiyon türbinleri” ve “reaksiyon türbinleri” olmak üzeri iki ana gruba ayırmak mümkün görülmektedir [31].

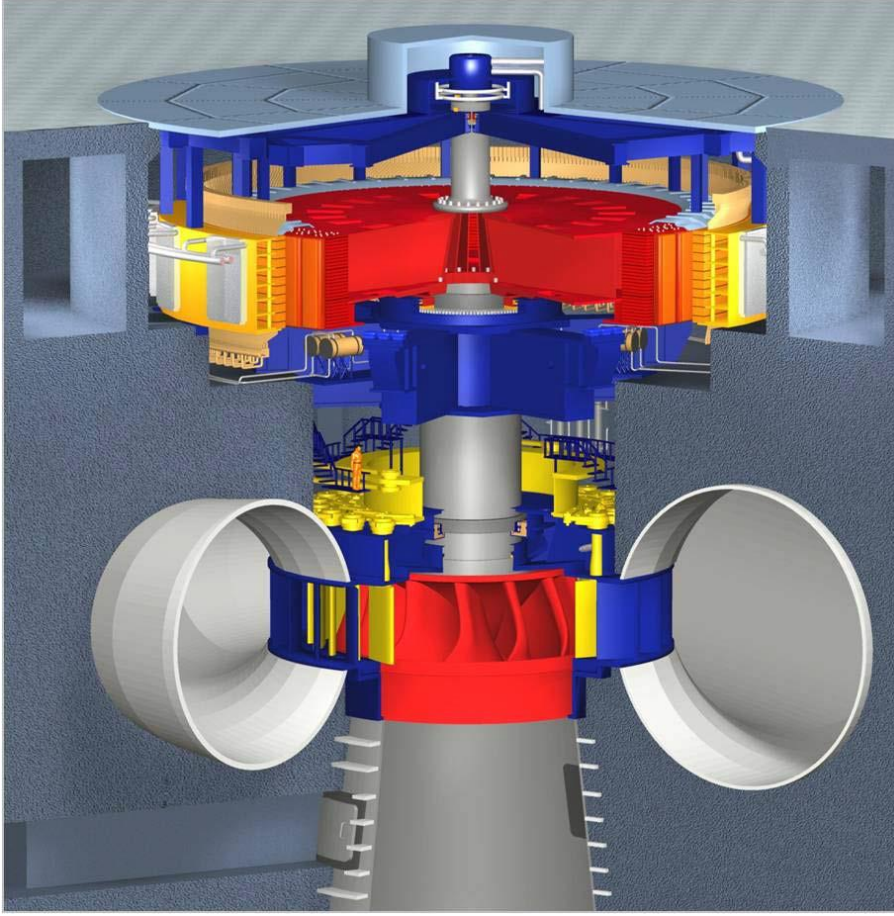
### 2.1.1. Reaksiyon türbinleri

Reaksiyon türbinleri tamamen suyun içinde olup, gövdeleri basınca dayanıklı olarak imal edilmişlerdir. Türbinin kanatlarında oluşan basınç farkı türbinin dönmesini sağlamaktadır. Reaksiyon türbinleri grubuna, Francis tipi hidrolik türbinler ile Kaplan tipi hidrolik türbinler girmektedir. Bu tip türbinlerde, türbin kanatları arasında suyun giriş basıncında bir düşüş meydana gelir. Su basıncında meydana gelen bu düşüş, suyun ivmelenmesine, yani suyun hızlanmasına neden olur. Hidrolik düşünün ve türbinden geçecek su debisinin değerlerine göre, hidrolik türbinlerin kullanım alanları değişmektedir. Kaplan tipi hidrolik türbinler, büyük su debilerinde ve küçük düşülerde kullanılırlar. Francis tipi hidrolik türbinler ise, genel olarak orta yükseklikteki su düşülerinde ve orta değerlerdeki su debilerinde kullanılırlar [33].

Reaksiyon türbinlerinin imalatında, sabit ve hareketli kısımlardaki kanat ve yüzeylerin çok daha hassas işlenmesi gerektiğinden, bu türbinler aksiyon türbinlerine göre daha ileri üretim teknikleri gerektirirler. Bununla birlikte, alçak düşülü yer sayısının daha fazla ve bu merkezlerin daha fazla elektrik enerjisi talep edilen yerlere yakın olması, bu türbinlerin daha basit şekilde imal edilmeleri için yapılan çalışmaları arttırmıştır. Reaksiyon türbinlerinde, basınç altındaki su, türbine girmeden tamamen hıza çevrilir. Kaplan türbinlerinde, türbin kanatlarının açısı ayarlanabilirken, Francis türbinlerinde bu kanatlar sabittir. Francis türbinlerinde su, spiral şeklinde ve kanatları yönlendirilebilen bir gövde içinde, türbinin aksenel olarak dönmesini sağlar. Reaksiyon türbinlerinin en büyük avantajı, alçak düşülerde, modern generatörler için gerekli devir sayısını sağlayabilmeleridir [33].

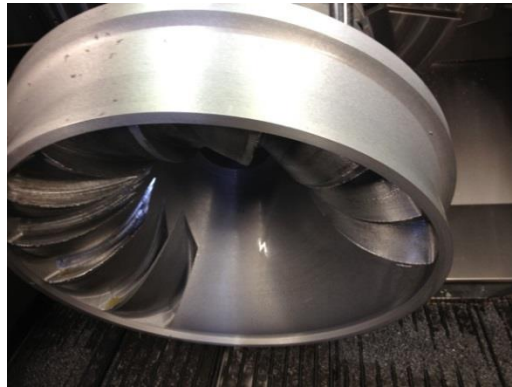
Francis tipi hidrolik türbinler ilk defa 1838 yılında Amerikalı Howd tarafından keşfedilmiş ve 1848 yılında ise Amerikalı Francis tarafından geliştirilerek denenmiştir. Francis tipi hidrolik türbinler 2 metre ile 600 metre hidrolik düşüler ve 2 kW ile 800 MW güçleri arasında imal edilmektedirler. Günümüzde, gücü 800 MW olan Francis tipi hidrolik türbinler imal edilmiş bulunmaktadır [31].

Şekil 2.5’de Francis tipi bir türbinin santralde yerleşim şeması gösterilmiştir.



Şekil 2.5. Francis türbinin yerleştikten sonra görünümü [34]

Şekil 2.6’da yapım aşamasında olan Francis tipi bir türbinin fotoğrafı gösterilmiş bulunmaktadır.



Şekil 2.6. Yapım aşamasında olan Francis tipi türbin



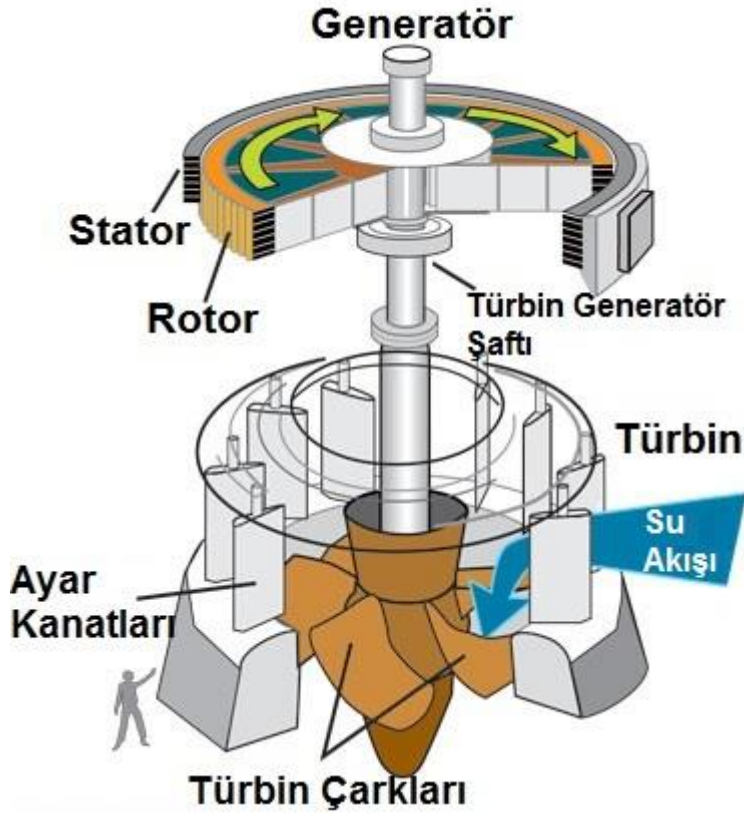
Şekil 2.7’de ise Avusturya’da bulunan Hieflau santralinde 1964-2012 yılları arasında kullanılmış toplam 2400 milyon kWh üretim yapmış Francis türbin yer almaktadır.



Şekil 2.7. Örnek bir Francis tipi türbin

Kaplan tipi hidrolik türbinler ise 1912 yılında Prof. Dr. Viktor Kaplan tarafından geliştirilerek bugünkü anlamda modernleştirilmiştir. Kaplan tipi hidrolik türbinlerde 2 metre ile 60 metre hidrolik düşümler ve 2 kW ile 500 MW güçler arasında imal edilmektedirler. Günümüzde, gücü 500 MW olan Kaplan tipi türbinler imal edilmiş bulunmaktadır [31].

Şekil 2.8’de Kaplan tipi bir türbinin santralde yerleşim seması gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Kaplan tipi türbinin genel görünümü [35]

Şekil 2.9’da ise Kaplan tipi bir türbinin kanatlarının fotoğrafı gösterilmiştir.



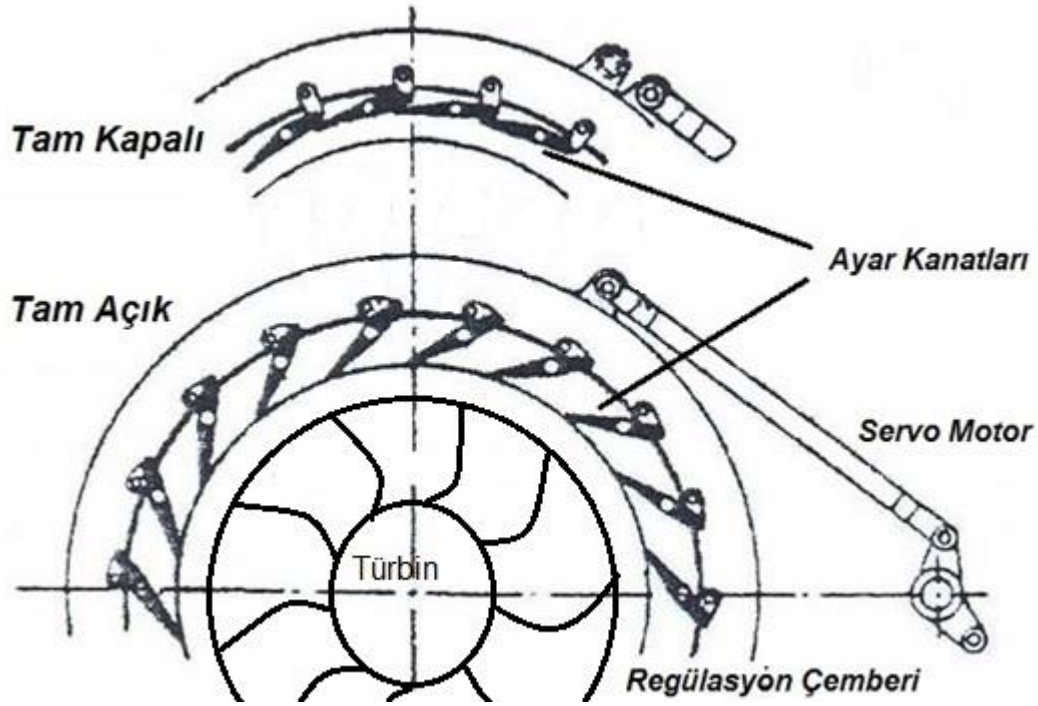
Şekil 2.9. Kaplan tipi türbinin kanatları [35]

Kaplan tipi türbinin Francis tipi türbinden diğer bir farkı da, türbin çarklarının ayarlanabilir olmasıdır. Düşü, debi ve ayar kanatları konumuna bağlı olarak Kaplan tipi türbinin çark konumu değişmektedir. Bunun sebebi Kaplan tipi türbinin daha geniş debi aralıklarında verimli olarak çalışabilmesine olanak sağlamaktır. Kaplan türbine ait olan hız regülatörü

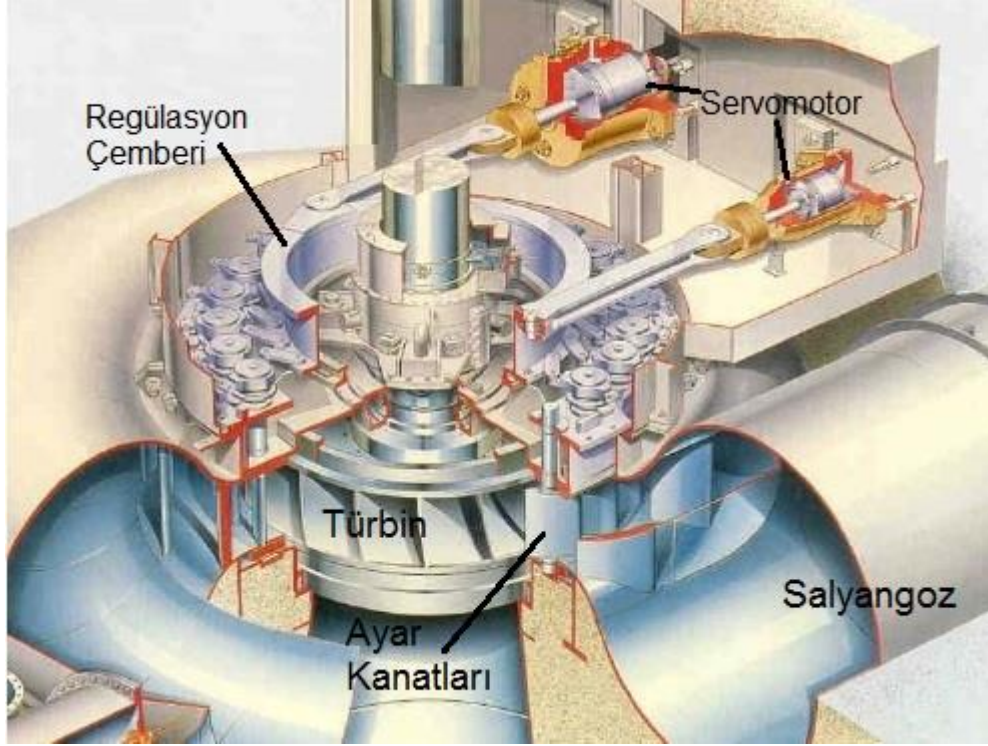


iki değişkeni birden kontrol etmelidir. Bunlardan birisi ayar kanatları konum hedef değeri diğeri ise türbin çarkının konum hedef değeridir. Buna karşılık, Francis tipi türbinlerde türbin çarkları sabit ve değişmezdir. Hız regülatörünün sadece ayar kanatlarını regüle etmesi beklenmektedir.

Hem Francis tipi hidrolik türbinlerde ve hem de Kaplan tipi hidrolik türbinlerde kullanılan türbin ayar kanatları ve ayar kanatlarını ayarlama emberi(Regüstasyon emberi) mekanizması 1860 yılında Prof. Dr. Fink tarafından keşfedilmiş ve günümüze kadar gelişme göstermiştir. Bu tip türbinlerde kullanılan ayar kanatları ayarlama çemberi mekanizmasının prensibini açıklayıcı basit bir sistem Şekil 2.10'da gösterilmiş bulunmaktadır [31].



Şekil 2.10. Regüstasyon emberi [31]



Şekil 2.11. Servomotor, regülasyon çemberi ve ayar kanatları bağlantısı detaylı gösterimi

### 2.1.2. Aksiyon türbinleri

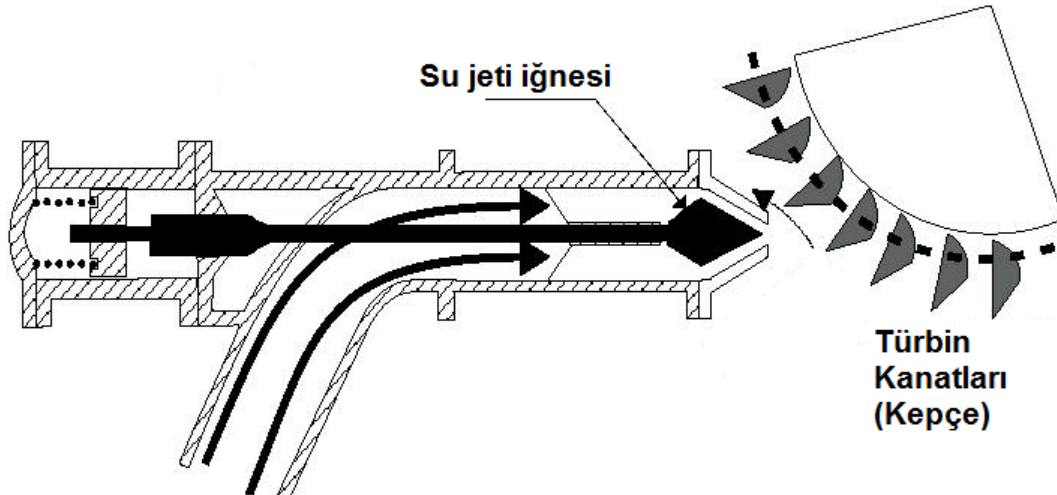
Aksiyon türbinlerinde kanatlar, reaksiyon türbinlerinden farklı olarak hava içindedir ve püskürtülen basınçlı su ile çalışmaktadırlar. Su, kanatlara temastan önce ve sonra, aynı atmosfer basıncında kalmaktadır.

Bu tip türbinler, 1880 yılında Pelton tarafından keşfedilmiş ve gelişmeleri günümüze kadar devam etmiştir. Pelton tipi hidrolik türbinler, çok yüksek hidrolik düşümler ve küçük su debileri için kullanılmaktadırlar. Pelton tipi hidrolik türbinler 60 metre ile 1000 metre hidrolik düşümler arasında ve 2 kW ile 300 MW arasındaki güçler için imal edilmektedirler. Günümüzde 300 MW gücünde Pelton tipi hidrolik türbinler imal edilmiş bulunmaktadır [31]. Bu tip türbinlerde suyun enerjisi önce, uygun şekilde sahip bir borudan geçirilip, çıkış ağzında su jeti haline getirilerek, kinetik enerjiye dönüştürülür. Daha sonra bu jet, kepçe şeklindeki türbin kanatlarına püskürtülür. Kepçelerin geometrisi, su jetinin enerjisini en yüksek oranda emecek biçimde tasarlanmış ve ortalarından geçen dikey bölücü plakalar, suyun iki yana doğru takatsizce dağılmasını sağlar. Pelton türbinleri, düşey veya yatay olarak konumlandırılabilir. Jetlerin sayısını arttırmak suretiyle, tek bir türbinden sağlanan

gücü arttırmak mümkündür. Yatay konum için genellikle iki olan jet sayısı, dikey konumlar için, çoğunlukla dört veya daha fazla olabilir. Yatay konumlandırma halinde, tek bir generatörü süren aynı şaft üzerine, bir yerine iki türbin yerleştirmek de mümkündür. Şekil 2.12’de Pelton tipi bir hidrolik türbinin kanatları ve kepçeleri ve Şekil 2.13’da ise kanat kepçelerine su fişkırta Pelton su jetinin basit bir prensip şeması gösterilmiş bulunmaktadır.



Şekil 2.12. Pelton tipi türbin

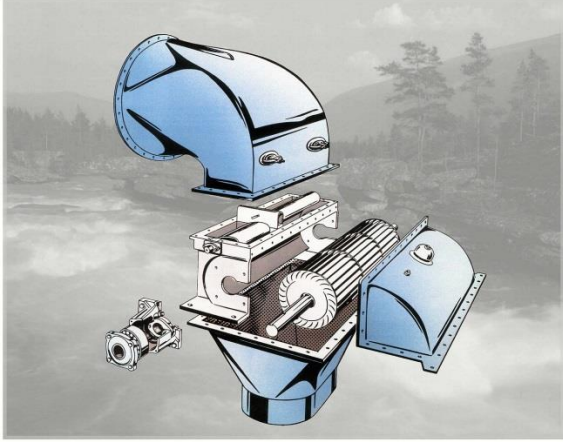


Şekil 2.13. Pelton tipi türbinin çalışma prensibi

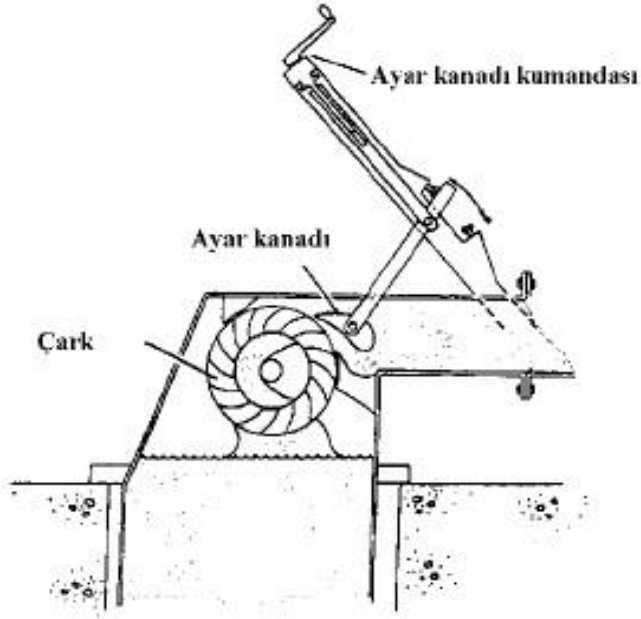
Bu tip türbinlerde suyun enerjisi önce, uygun şekle sahip bir borudan geçirilip, çıkış ağzında su jeti haline getirilir. Pelton tipi hidrolik türbinlerde çıkış ağzındaki su jetinden fişkırta su Şekil 2.12’de görülen Pelton çarkının çevresindeki kepçelere teğetsel olarak çarpar. Bu çarpma ile suyun hız enerjisi (kinetik enerjisi) mekanik enerjiye dönüşmüş olur

ve türbin döner [33]. Türbin çevresindeki kepçelere suyun çarptırılması bir veya birkaç su jeti ile yapılabilir. Genellikle küçük güçlü Pelton tipi hidrolik türbinlerin 1 veya 2 su jeti olmasına karşın büyük güçlü Pelton tipi hidrolik türbinlerin 4 veya 6 adet su jeti bulunur.

Michell-Banki(cross-flow) tipi türbinler de bu türbin sınıfına dahil edilebilirler. Bu tip türbinler, 1903 yılında Avusturyalı mühendis M. Michell tarafından keşfedilmiş ve 1917 yılında da Macar Prof. Dr. Banki tarafından geliştirilmiştir. Bu tip özel türbinlerin kullanılma sahası çok dar olup, genellikle küçük güçlü, nehir tipi santrallerde tercih edilmektedirler [31]. Şekil 2.14'de Banki(Cross-flow) türbininin genel görünümü, Şekil 2.15'de ise türbin çarkı ve çalışma ilkesi gösterilmiştir.



Şekil 2.14. Banki tipi türbin [35]

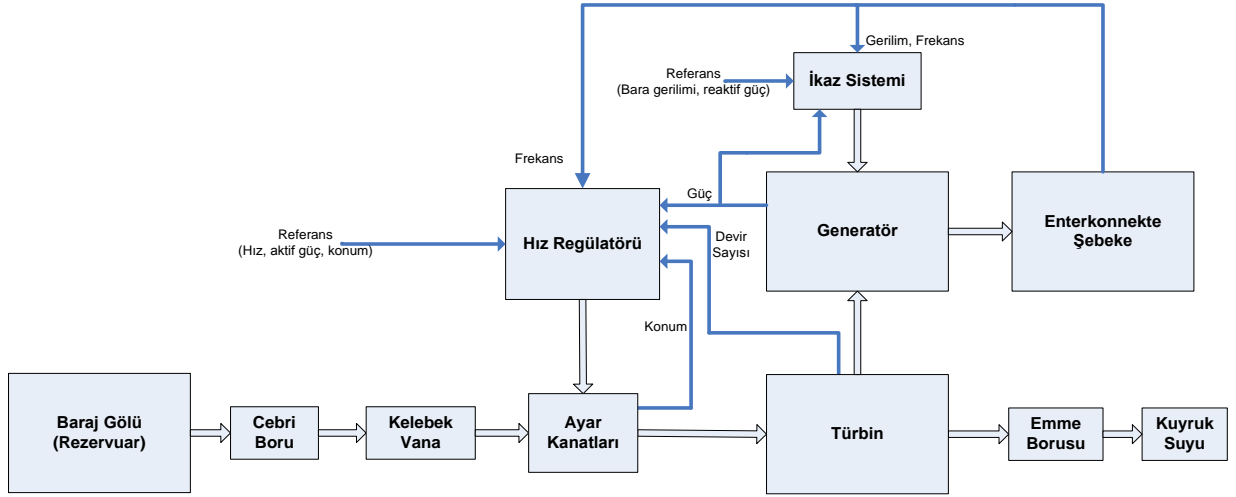


Şekil 2.15. Banki tipi türbinin çalışma prensibi [31]

Aksiyon türbinlerinden Pelton ve Crossflow türbinlerinin verimleri, nominal debilerinin % 20'sine kadar çok az değişmektedir. Bu türbinlerin verimleri, nominal çalışma değerleri içinde, reaksiyon türbinlerinden daha düşüktür.

## 2.2. Hız Regülatörü

Hız Regülatörü(HR) türbin hızını ve ünite elektriksel çıkış gücünü ayarlayan yardımcı kontrol sistemidir [11]. Güç sistemlerinde senkron generatörü süren türbinin döndürülmeye başlanması, senkron hızda boшта dönmesi ve yükte çalışabilmesi için yeterli çıkış gücüne ulaştırılması için hız regülatörü sistemleri kullanılır. Bir ünitenin ana ekipmanları arasındaki etkileşim Şekil 2.16'de gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Ünite blok şemasında hız regülâtörünün yeri

Hız regülâtörü bir hidrolik-türbinin hız veya mekanik çıkış gücünü kontrol eden geri beslemeli bir kontrol sistemidir. Hız regülâtörünü oluşturan bileşenler:

- Referans girişi için bir ayar değeri
- Türbin hız geri beslemesi
- Gerekli diğer bazı parametre geri beslemeleri (elektriksel çıkış gücü, servo valf konum bilgisi, vb.)
- Kontrol fonksiyonu (PID, vb.)
- Kontrol aktüatörleri (valf, servomotor, vb. )

olarak verilebilir.

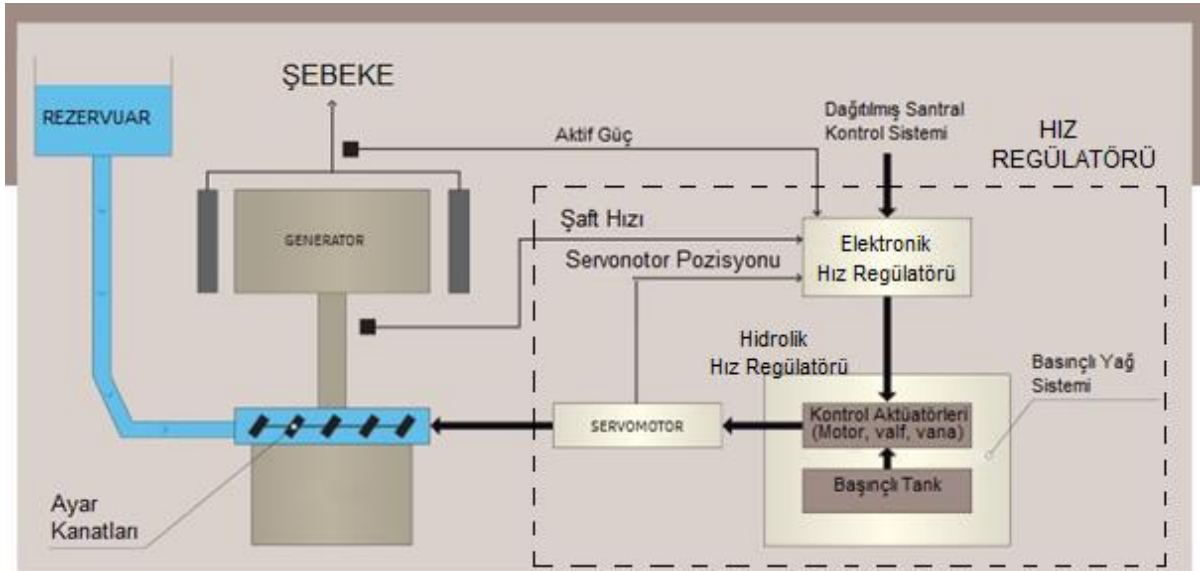
Hız regülâtörü sistemlerinin geçmişine bakıldığında ilk sistemlerin Şekil 2.17’de gösterilen hidro-mekanik tipte olduğu ve Watt santrifüjlü mekanizmanın hız regülâtörü olarak kullanıldığı görülür. Böylelikle ilk “otomatik” regüle edilen türbin kontrol sistemi icat edilmiş oldu. İki uçan topun hız tepkisi için kullanıldığı bu mekanizmanın yerini daha sonra genel blok şeması Şekil 2.18’de verilen elektro-hidrolik hız regülâtörü almıştır.





### 2.2.1. Hız regülatörü bileşenleri

Hız regülatörü, hız veya aktif güç bilgisini değerlendirerek istenen hedef değere ulaşılması için gerekli ayar kanat açıklık değişikliğini yapan donanımın tamamına denir. Ayar kanat açıklığı değişikliği elektronik hız regülatörü(kontrolcü), hidrolik hız regülatörü(kontrol elemanları-oransal valf, vana vb. gibi) ve servomotor(hareket elemanı) yardımıyla yapılmaktadır. Elektronik hız regülatöründe üretilen ayar kanatları konum değeri, öncelikli olarak kontrol elemanlarının bulunduğu hidrolik hız regülatörüne oradan da servomotora iletilerek ayar kanatlarının değişikliği yapılmaktadır. Şekil 2.19’de hız regülatörünün santraldeki konumu ve bileşenleri ayrıntılı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.19. Hız regülatörünün santraldeki konumu



### Elektronik hız regülatörü:

Elektronik hız regülatörü(EHR) hız regülatörü sisteminin kontrolcüsü olarak çalışmaktadır. Sistemi sürekli takip ederek sistemi seçilen kontrol modundaki hedef değere getirmeye çalışmaktadır.

Elektronik hız regülatörü, sistemi istenilen hedef değere getirmesinin yanı sıra hidrolik basıncın izin verilen değerler içinde tutulması için basınçlı yağ sisteminin kontrolünü, aşırı hız denetimini ve aşırı hız durumunda gerekli manevraların yapılmasını da kontrol etmektedir. Şekil 2.20’de Gezende HES için geliştirilen elektronik hız regülatörünün gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Gezende HES’de kullanılan elektronik hız regülatörü

### Hidrolik hız regülatörü:

Hidrolik hız regülatörü(HHR) elektronik hız regülatöründen aldığı ayar kanat konum hedef değerine göre servomotorun sürülmesini ve servomotorun sürülmesi için gerekli yağ basıncını sağlamaktadır. Hidrolik hız regülatörü servomotorun sürülmesi için gerekli olan yağ basıncını Şekil 2.21’de gösterilen basınçlı yağ sisteminde yer alan pompalarla ve Şekil 2.22’de gösterilen basınçlı tank ile sağlamaktadır. Basınçlı tankta depolanan basınç servomotorun hareketi için kullanılmaktadır.

Hidrolik hız regülatörü bünyesinde yer alan oransal valf, kontrolcüden gelen hedef değere göre servomotora iletilen yağ akışını ayarlamaktadır. Eğer sistem istenilen hedef değerde değil ise oransal valf yağ akışının ileri veya geri yönde olmasını sağlamaktadır. Eğer sistem istenilen hedef değerde ise oransal valf yağ akışını keserek servomotorun hareketini durdurmaktadır.



Şekil 2.21. Gezende HES’de kullanılan basınçlı yağ sistemi

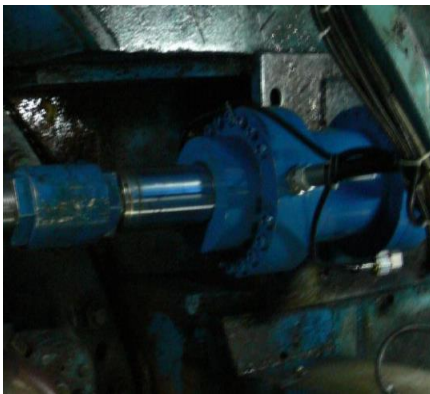


Şekil 2.22. Gezende HES’de kullanılan basınçlı tank

### Servomotor:

Servomotor hız regülatörü sisteminde ayar kanatlarının hareketini sağlayan son kontrol elemanıdır. Servomotor ayar kanatlarına regülasyon çemberi ile bağlıdır. Servomotor, regülasyon çemberi ve ayar kanatları bağlantısını gösteren detaylı şekiller Şekil 2.10’da ve Şekil 2.11’de verilmiştir. Oransal valfin yön verdiği yağ akışı ile servomotor ayar kanatlarının bağlı olduğu regülasyon çemberini hareket ettirmektedir. Regülasyon çemberinin hareketi ile ayar kanatları da hareket etmektedir. Oransal valfin izin verdiği yağ akışına göre bu hareket açma veya kapama yönünde olmaktadır.

Servomotordan aynı zamanda elektronik hız regülatörünün ihtiyaç duyduğu konum geri besleme bilgisi alınmaktadır. Bu geri besleme bilgisi servomotor pistonunun konum bilgisidir.



Şekil 2.23. Gezende HES’de kullanılan servomotor

## 2.2.2. Hız regülatörü işlevleri

### Hız regülatörü temel işlevleri:

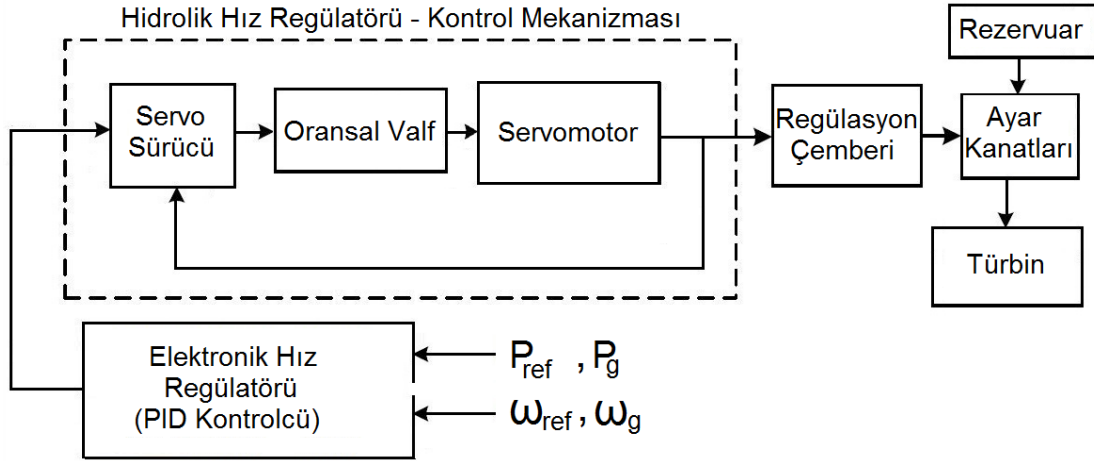
Hız regülatörü temel işlevleri genel olarak üç ana başlık altında toplanabilir [1-3]:

#### 1. Yüksüz çalışma kontrolü:

Yüksüz çalışma kontrolü, türbinin durağan halden senkronizasyon öncesi nominal hızda boşta döndürülmesi için kullanılır. Genel olarak türbinin dönmeye başlaması için açık çevrim ve kapalı çevrim kontrol yöntemleri kullanılır [10, 30]. Türbin durağan haldeyken ayar kanat açıklığı önceden belirlenmiş bir değere getirilir ve türbin hızının belli bir eşiği aşmasının ardından PID kontrole geçilir. PID kapalı çevrim kontrolü ile türbinin hızı anma hızına getirilir ve ünite ile şebeke senkronizasyonunun gerçekleştirilmesi beklenir.

#### 2. Yükle çalışma kontrolü:

Ünite ile şebeke senkronizasyonunun gerçekleştirilmesinin ardından ünite kesicisi kapatılır. Kesicinin kapanması ile birlikte hız regülatörü bağlandığı şebeke boyutuna göre şebeke ya da izole ada modunda çalıştırılır. Şebeke modunda şebeke hızının tek bir hız regülatörü tarafından kontrolü mümkün olmadığı ve bu modda şebeke hızı sabit kabul edildiği için, hız regülatörünün yaptığı ayar kanat açıklığı ayarlamaları ünitenin aktif gücünü etkiler. İzole ada modunda ise hız regülatörünün yaptığı ayar kanat açıklık ayarlamaları, ünitenin aktif çıkış gücünü etkilemesinin yanında küçük ölçekli şebekenin frekansına da etki eder.



Şekil 2.24. Elektro-hidrolik hız regülatörü prensip şeması [2]

### 3. Aşırı hız koruması:

Türbin aşırı hız koruması ile ünitenin yükte çalışma esnasında şebeke ile bağlantısının kopması durumunda türbinin hızlanarak ambalman(kaçma hızı–runaway speed) hızına ulaşması önlenir. Ünite tam yükte çalışırken üniteye giren hidrolik kaynaklı mekanik güç, sürtünme, verim kayıpları ve büyük oranda elektriksel çıkış gücünün toplamı kadardır. Ancak ünitenin yükte çalışırken herhangi bir nedenden dolayı ünite kesicisinin açılarak şebeke bağlantısının kopması durumunda üniteye giren hidrolik güç, elektriksel çıkış gücü olarak atılmadığı için türbin ve generatörün hızı artmaya başlar. Bu durumda türbin hızındaki artışın hemen hız regülatörü tarafından algılanması ve ayar kanatlarının mümkün olan en kısa sürede kapatılarak üniteye giren hidrolik gücün sıfırlanması gerekmektedir. Ayar kanatlarının kapatılma süresinin belirlenmesinde dikkat edilecek husus su akışının kesilmesi ile ortaya çıkan hidrolik basınç artışının cebri borunun dayanım sınırları içerisinde kalmasını sağlayacak sürede ayar kanatlarının kapatılması gerektiğidir.

Hız Regülatörü yukarıda sayılan bu temel işlevleri gerçekleştirebilmesi için üç farklı çalışma modu gereklidir. Bunlar açıklık kontrolü, hız kontrolü ve aktif güç kontrolüdür. Açıklık kontrolü, başka herhangi bir parametreye bakmaksızın türbin ayar kanatlarının açıklığını doğrudan ayarlarken, hız kontrolü türbinin hızını göz önüne alır ve genellikle ada veya izole işletme durumunda tercih edilir. Aktif güç kontrolü ise enterkonnekte şebekeye bağlı çalışırken, ünitenin frekans değişikliklerine tepki vermesini sağlayan moddur.

### Primer-frekans kontrol işlevi:

Enterkonnekte çalışan senkron generatörler normal şartlarda aynı hızda dönmektedir. Eğer üretilen güç harcanan güce eşitse sistem dengededir ve generatörlerin hızı sabittir. Eğer senkron generatörler, yükün harcadığından daha çok veya daha az güç üretirse hız artar veya azalır. Bir elektrik sisteminde üretim ve tüketim arasındaki dengesizlik, senkron generatörlerin dönüş hızlarının değişmesine(frekans değişimine) neden olur.

Primer frekans kontrolünün amacı enterkonnekte sistemde üretilen enerji ile tüketilen enerji arasındaki dengeyi sağlamaktır [37]. Üretim-tüketim arasındaki denge durumunda şebeke frekansı sabit bir değerdedir. Enterkonnekte sistemde üretim-tüketim dengesini bozacak çeşitli dalgalanmalar durumunda enterkonnekte frekansında bir sapmaya neden olur.(Ani bir üretim sisteminin devre dışı kalması, çeşitli üretim sistemlerinin yük alması/atması, iletim hatlarında açma-kapama olaylarının yaşanması ve sistemde ani yüklerin devreye girmesi vs.). Primer kontrolde çalışan üniteler bu dalgalanmaya cevap vererek sistem frekansının sabit değerde kalmasını sağlar.

Elektrik enerjisi üretim ve tüketiminin eşit olmaması durumunda sapmaya uğrayan sistem frekansını, sabit bir değerde dengeleyip frekans değişimini durdurmak için her ünite rezerv kapasitesinin, türbin hız regülatöründe ayarlanan kalıcı hız eğimi oranında, frekans sapması süresince merkezi müdahale olmaksızın, otomatik olarak sağlanması suretiyle katkıda bulunması gerekmektedir [37]. Eğer frekans sapması hidroelektrik santraller için belirlenmiş olan frekans limitini geçerse primer frekans aktive olur. Primer kontrol yapan üniteler frekanstaki sapmayı takip ederek primer rezerv gücünün tamamını aktive edebilmelidir.

Hız regülatörünün yükte çalışma kontrolünde önemli bir işlevi de primer frekans kontrolü yapmasıdır. Şebekede meydana gelen arz/talep dengesizliğinin hızlı bir şekilde giderilmesi için kullanılan primer frekans kontrolü hız regülatörlerinin kontrol modlarına eklenir. Kalıcı hız eğimi(permanent speed droop- $R_p$ ) adı verilen hız regülatörü değişkeni ile yükte çalışma halinde iken şebeke hızındaki değişim ile aktif çıkış gücü değişimi arasındaki oran belirlenir.

Primer frekans kontrolü için frekanstaki değişim ve aktif çıkış gücü arasındaki ilişki Şekil 2.25’de gösterilmiştir.

$$R_p = \frac{\Delta f}{\Delta P} * 100 \quad (2.1)$$

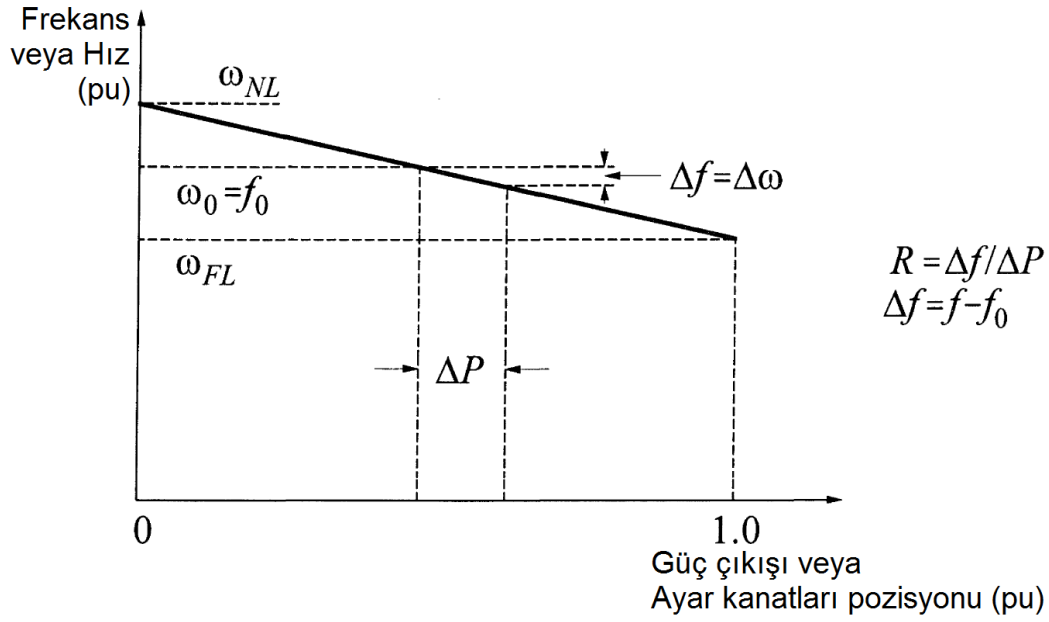
Bu denklemde,

$R_p$ : kalıcı hız düşümü

$\Delta f$ : Frekans ya da şebeke hızındaki değişim

$\Delta P$ : Aktif güçteki değişim

anlamına gelmektedir.



Şekil 2.25. Kalıcı hız düşümü değişkeni bulunan bir hız regülatöründe hız değişimi – aktif çıkış gücü ilişkisi [1]



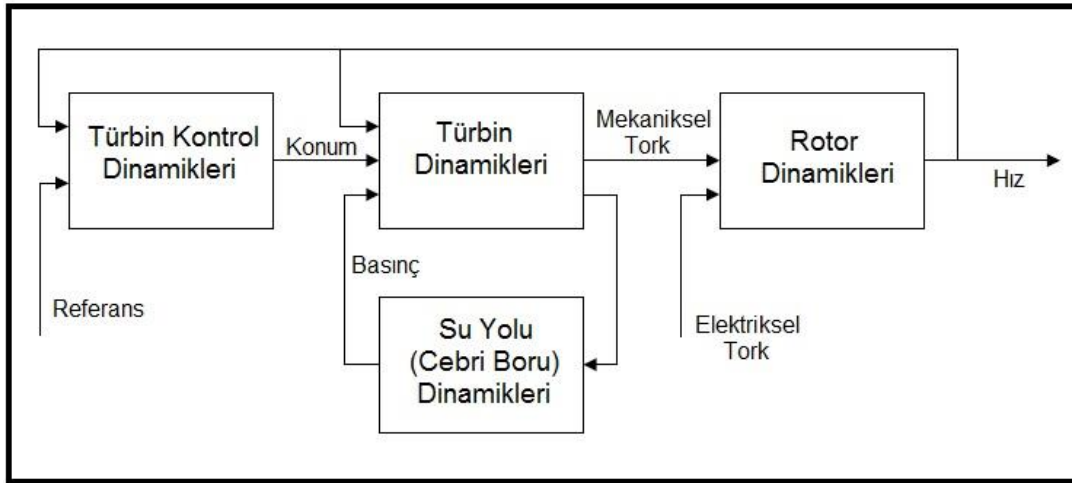


### 3. MATEMATİKSEL İFADELER

Bu bölümde hidrolik türbinin ve bileşenleriyle beraber kontrol sistemi olan hız regülatörünün matematiksel modelleri çıkartılacaktır.

#### 3.1. Hidrolik Türbin Modeli

Hidrolik türbin modeli cebri borunun, türbin karakteristiklerinin ve hız regülatörünün modellenmesini içermektedir [7]. Genelleştirilmiş hidrolik türbin modeli Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3.1. Hidrolik türbin blok diyagramı [8]

Türbinde üretilen güç; net düşünün, su akışının ve türbin kanatlarının açısının bir fonksiyonudur. Türbindeki su akışı ise, net düşünün, türbin hızının, ayar kanatlarının açıklığının ve türbin kanatlarının bir fonksiyonudur [6].

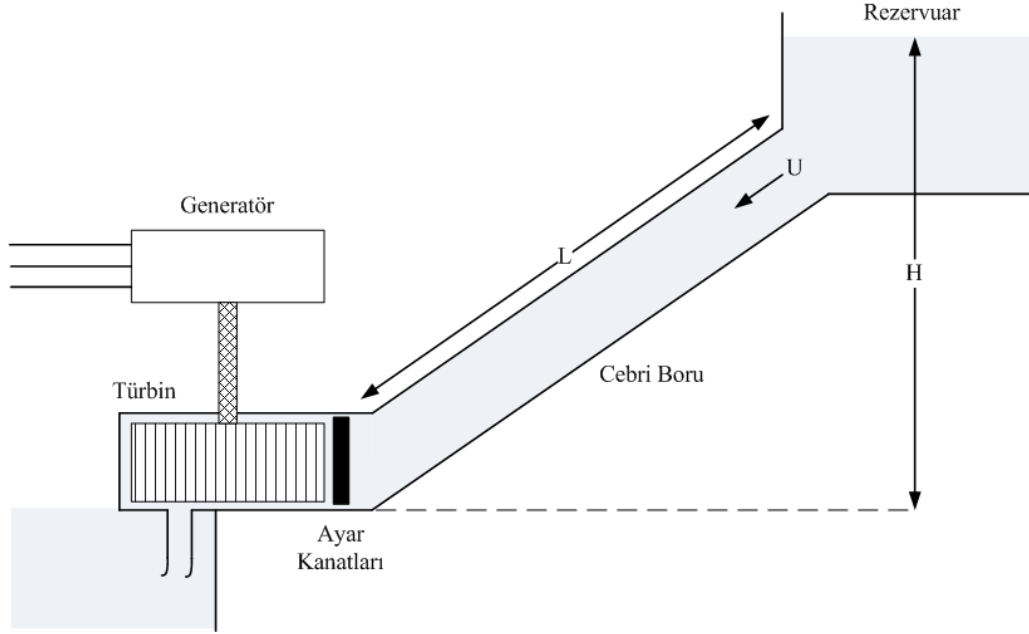
$$p = f_p(h, u, g, \emptyset) \quad (3.1)$$

$$q = f_q(h, u, g, \emptyset) \quad (3.2)$$

Francis türbinlerde türbin kanatlarının açısı( $\emptyset$ ) sabit ve değişmez olduğundan kanat açısının düşünülmesine gerek yoktur. Aksiyon türbinlerinde ise akış düşü ile su jetinin açıklığına bağlıdır.

### 3.1.1. Doğrusal türbin modeli

Bu kısımda türbin ve su kolonu ile ilgili hidromekanik büyüklüklerin doğrusal olan matematiksel modelleri oluşturulacaktır. Şekil 3.2'de bir hidroelektrik ünitenin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.2. Hidroelektrik ünite şematik gösterimi [1]

Model 1-2-3 oluşturulurken aşağıdaki varsayımlar yapılmıştır [1]:

- Cebri boru elastik değildir: Cebri boruya etki eden kuvvetler, borunun mekanik boyutlarını değiştirmez.
- Su sıkıştırılabilir değildir: Su kolonuna etki eden kuvvetler, kolonun hacmini değiştirmez.
- Suyun hızı, ayar kanat açıklığı ve türbinde ölçülen net düşünün karekökü ile doğru orantılıdır.
- Türbin gücü net düşü ile hacim debisinin çarpımı ile doğru orantılıdır.
- Rezervuar ile türbin arasında denge bacasının (surge tank) olmadığı varsayılmıştır.

Türbin denklemleri aşağıdaki gibi doğrusallaştırılabilir.

- Cebri boru su hızı, türbin ayar kanat açıklığı ve net hidrolik yüksekliğin karekökü ile doğru orantılı olduğu için;

$$U = K_u G \sqrt{H} \quad (3.3)$$

$U$  : Cebri boru içinde akan suyun çizgisel hızı

$G$  : Ayar kanat açıklığı

$H$  : Ayar kantlarından ölçülen hidrolik düşü

$K_u$ : Türbin orantı sabiti

Doğrusallaştırma; denklem (3.3) ve cebri boru su hızı çalışma noktası değeri baz değeri alınarak yapılabilir. Aşağıdaki ifadelerde  $U_0$  cebri boru su hızı çalışma noktası değeri olup  $U_0 = K_u G_0 \sqrt{H_0}$  olarak verilir.

$$\Delta U = \frac{\partial U}{\partial H} \Delta H + \frac{\partial U}{\partial G} \Delta G \quad (3.4)$$

$$\frac{\Delta U}{U_0} = \frac{\Delta H}{2H_0} + \frac{\Delta G}{G_0} \quad (3.5)$$

$$\Delta \bar{U} = \frac{1}{2} \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (3.6)$$

- Türbin çıkış gücü, hidrolik yükseklik ve su hızının çarpımı ile doğru orantılı olduğu için;

$$P_m = K_p H U \quad (3.7)$$

$P_m$  : Türbin gücü

$K_p = \eta \cdot \rho \cdot a_g \cdot A$  , Türbin sabiti

$\eta$  : Türbin Verimi

$\rho$  : Su Yoğunluğu ( $\text{kg/m}^3$  )

$a_g$  : Yerçekimi ivmesi ( $\text{m/sn}^2$  )

$A$  : Cebri boru alanı ( $\text{m}^2$ )

Türbin mekanik gücü de su hızına benzer şekilde, denklem (3.7) kullanılarak doğrusallaştırılabilir. Güç için baz değer,  $P_{m0}$  türbin gücü çalışma noktası değeri olup  $P_{m0} = K_p H_0 U_0$  olarak verilir.

$$\bar{P}_m = \Delta \bar{H} + \Delta \bar{U} \quad (3.8)$$

Denklem (3.6)'dan sırasıyla  $\Delta \bar{U}$  ve  $\Delta \bar{H}$  ifadeleri çekilerek  $\Delta \bar{P}_m$  bu değişkenler ve ideal ayar kanat açıklığı cinsinden aşağıdaki şekillerde ifade edilebilir.

$$\Delta \bar{P}_m = 1.5 \Delta \bar{H} + \Delta \bar{G} \quad (3.9)$$

$$\Delta \bar{P}_m = 3 \Delta \bar{U} - 2 \Delta \bar{G} \quad (3.10)$$

- Suyun türbin girişinde kazandığı kinetik enerji, suyun potansiyel enerjisine eşit olduğundan su sütununun ivmesi aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$(\rho L A) \frac{dU}{dt} = -A(\rho a_g)(H - H_0) \quad (3.11)$$

Doğrusallaştırma, denklem (3.11) ve cebri boru su hızı ve net düşünün söz konusu çalışma noktası değerleri baz değeri alınarak yapılabilir.

$$(\rho L A) \frac{d\Delta U}{dt} = -A(\rho a_g)(H - H_0) \quad (3.12)$$

$\rho L A$  : Cebri boru içindeki suyun kütlesi (kg)

$\rho a_g(H - H_0)$  : Türbin girişinde düşü değişimine bağlı debi değişimi

$L$  : Cebri boru uzunluğu (m )

$$\left( \frac{L U_0}{a_g H_0} \right) \frac{d}{dt} \left( \frac{\Delta U}{U_0} \right) = - \frac{\Delta H}{H_0} \quad (3.13)$$

$$T_w \frac{d\Delta \bar{U}}{dt} = -\Delta \bar{H} \quad (3.14)$$

$$T_w = \left( \frac{L U_0}{a_g H_0} \right) = \frac{L \cdot Q_0}{a_g \cdot A \cdot H_0} , T_w : \text{Su zaman sabiti, } (Q = A \cdot U) \quad (3.15)$$

Denklem (3.14)'e göre pozitif bir basınç değişimi su ivmesini negatif yapar. Başka bir deyişle, suyu yavaşlatır. (3.6) ve (3.14) kullanılarak (3.16) elde edilebilir

$$T_w \frac{d\Delta\bar{U}}{dt} = 2(\Delta\bar{G} - \Delta\bar{U}) \quad (3.16)$$

Laplace dönüşümü ile (3.17) elde edilir.

$$\Delta\bar{U} = \frac{1}{1+\frac{1}{2}T_w s} \Delta\bar{G} \quad (3.17)$$

- Denklem (3.10)'daki  $\Delta\bar{U}$  ifadesi kullanılarak denklem (3.18)'deki türbin, su kolonunun çalışma noktası etrafında geçerli olan doğrusal model transfer fonksiyonu elde edilir.

Model 1: Doğrusal Model

$$\frac{\Delta\bar{P}_m}{\Delta\bar{G}} = \frac{1-T_w s}{1+\frac{1}{2}T_w s}$$

Denklem, ideal ve kayıpsız bir türbin için, ayar kanat açıklığındaki bir değişimin çıkış gücü değişimi ile ilişkisini tanımlar.

### 3.1.2. Doğrusal olmayan türbin modeli

Bu kısımda türbin ve su kolonu ile ilgili hidromekanik büyüklüklerin doğrusal olmayan matematiksel modelleri oluşturulacaktır.

Doğrusal olmayan basit türbin modeli:

Büyük-sinyal performansı için denklemler anma değerlerine bölünerek, oranlanmış büyüklükler elde edilecektir. Denklemlerde herhangi bir değişkenin “r” alt indisi, o değişkenin anma değeri olduğunu, herhangi bir değişkenin üzerindeki çizgi(  $\bar{\quad}$  ), o değişkenin oranlanmış değer olduğunu, herhangi bir değişkenin “0” alt indisi ise o değişkenin sürekli-hal çalışma noktası değeri olduğunu ifade etmektedir.

- Denklem (3.3) ve (3.7) no'lu denklemin normalize edilmesi:

$$\frac{U}{U_r} = \frac{G}{G_r} \sqrt{\frac{H}{H_r}}, \quad \bar{U} = \bar{G} \bar{H}^{1/2} \text{ or } \bar{H} = \left(\frac{\bar{U}}{\bar{G}}\right)^2 \quad (3.19)$$

$$\bar{P} = \bar{H} \bar{U} \quad (3.20)$$

- (3.11)'deki denklem sadeleştirilerek (3.21) şeklinde yazılır.

$$\frac{dU}{dt} = -\frac{a_g}{L}(H - H_0) \quad (3.21)$$

(3.21) no'lu denklemin normalize edilmesi;

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{U}{U_r} \right) = -\frac{H_r a_g}{U_r L} \left( \frac{H}{H_r} - \frac{H_0}{H_r} \right) \quad (3.22)$$

$$\frac{d\bar{U}}{dt} = \frac{1}{T_w} (\bar{H}_0 - \bar{H}) \quad (3.23)$$

Denklem (3.23)'deki  $T_w$  anma yükünde su başlama zamanı olarak tanımlanır.  $H_r$  net düşüşündeki suyun cebri boru içerisinde sıfırdan  $U_r$  çizgisel hızına ulaşması için geçecek süredir. Denklem Laplace dönüşümü uygulandığında, denklem (3.24) elde edilir.

$$\frac{\bar{U}}{H_0 - H} = \frac{1}{T_w s} \quad (3.24)$$

- Mekanik güç;

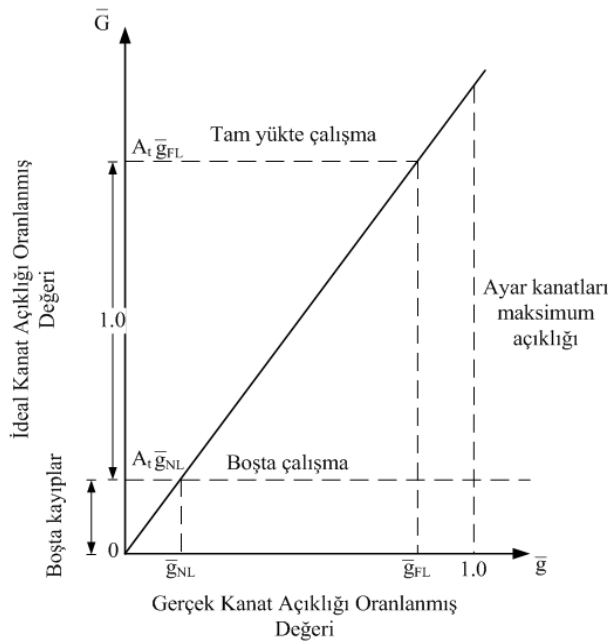
$$P_m = P - P_l \quad (3.25)$$

Denklem (3.25)'de  $P_l$  türbindeki kayıpları ifade eder.  $P_l = U_{NL}H$ , eşitliği geçerlidir.  $U_{NL}$  türbinin yüksüz iken anma hızında dönebilmesi için gerekli su hızıdır. Türbin girişindeki su bu hızda iken güç türbin anma hızı sürtünme kayıpları kadardır. Denklem (3.25)'de verilen  $P_m$  denklem (3.27)'de normalize edilmiştir.

$$\frac{P_m}{P_r} = \frac{P}{P_r} - \frac{P_1}{P_r} = \left( \frac{U}{U_r} - \frac{U_{NL}}{U_r} \right) \frac{H}{H_r} \quad (3.26)$$

$$\bar{P}_m = (\bar{U} - \bar{U}_{NL})\bar{H} \quad (3.27)$$

- İdeal ayar kanat açıklığının  $\bar{G}$ , gerçek ayar kanat açıklığı  $\bar{g}$  ile ilişkisi Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Ayar kanatları ideal açıklığı ile gerçek açıklığı arasındaki ilişki denklem 3.28'de verilmiştir. Yukarıdaki denklemlerde  $\bar{G}$ , yüksüz boştta çalışma durumdan tam yük durumuna kadar doğrusal olan, ideal ayar kanat açıklığı olarak tanımlanmıştır ve bu aralıkta oransal değerindeki değişim 1 birim olmalıdır. Bunun sebebi çıkartılan denklemlerin türbin dönüş hızının yüksüz durumda anma hızında dönerken geçerli olması ve ideal kanat açıklığı oranlanmış değerindeki 1 birimlik değişimin, mekanik güç çıkışındaki 1 birimlik değişime karşı gelmesi gerekliliğidir.



Şekil 3.3. Ayar kanatları ideal açıklığı ile gerçek açıklık arasındaki ilişki [1]

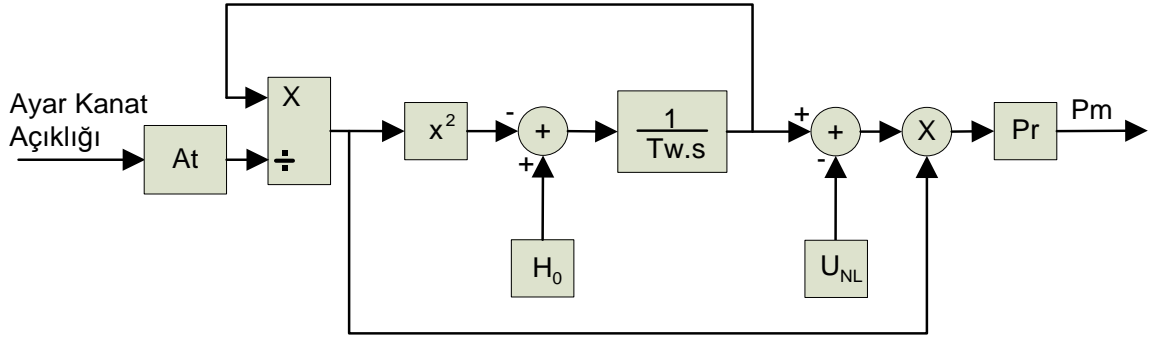
$$\bar{G} = A_t \bar{g} \quad (3.28)$$

$$A_t = \left( \frac{1}{\bar{g}_{FL} - \bar{g}_{NL}} \right) \quad (3.29)$$

- Denklem (3.27) türbin mekanik gücünü, türbin anma gücüne oranlanmış değerini vermektedir. Fakat sistem kararlılığı analizleri kapsamında türbin mekanik torkunun generatör MVA anma gücüne veya ortak bir MVA baz gücüne oranlanmış olması gerekmektedir. Bu sebeple türbin oranlanmış gücü söz konusu baz MVA gücüne göre oranlanır.

$$\bar{T}_m = \left(\frac{w_0}{w}\right) \bar{P}_m \left(\frac{P_r}{MVA_{base}}\right) = \frac{1}{\bar{w}} (\bar{U} - \bar{U}_{NL}) \bar{H} \bar{P}_r \quad (3.30)$$

$$\bar{P}_r = \text{Oranlanmış türbin anma gücü} = \frac{\text{Türbin Gücü (MW)}}{\text{Generatör Anma Gücü (MVA}_{base})} \quad (3.31)$$



Şekil 3.4. Basit doğrusal olmayan türbin modeli

#### Sürtünme kayıplarını içeren doğrusal olmayan türbin modeli:

Cebri boru içerisindeki sürtünme, akan suyun yüksekliğini azaltıcı bir etki yapmaktadır [8, 9]. Sürtünmeden kaynaklı bu negatif yükseklik  $H_f$  ile ifade edilir ve matematiksel ifadesi denklem (3.33)' de verilmiştir.

$$H_f = f_p \cdot Q^2 = f_p \cdot (A \cdot U)^2 \quad (3.32)$$

$f_p$  : Sürtünme katsayısı

(3.24)'deki denkleme (3.33) ifadesi yerleştirilirse (3.34) elde edilir.

$$\frac{\bar{U}}{\bar{H}_0 - \bar{H} - \bar{H}_f} = \frac{1}{T_{ws}} \quad (3.34)$$





### PID kontrolcü:

Bir PID kontrolcü hız geri beslemesi ile hız referans girişi arasındaki hatayı, oransal, integral ve türevsel terimlerden geçirip toplayarak servomotoru süren sinyali üretir. İntegral ve oransal terimler hız regülatörünün kararlı çalışmasını belirlerler. İntegral terimi ayrıca hatanın mutlak sifira ulaşmasını sağlar. Bunun sebebi, hatanın çok ufak değerlerde olması durumunda dahi integral terimi sayesinde toplanarak bir sürücü sinyali üretecek olmasıdır.

### Servo sürücü ve oransal valf:

Servo sürücü PID kontrolcünden çıkan sürücü sinyalini oransal valfe ileten elamandır. Oransal valf ise sürücüden aldığı elektriksel konum sinyalinin hidrolik bir büyüklük olan yağ basıncına dönüştürüldüğü elemandır. Oransal valf çıkışındaki değişken yağ basıncı ile servomotorun pozisyonunu belirler. Matematiksel modelleri, PID'in ürettiği konum sinyalinde zaman gecikmesi olacak şekildedir. Servo sürücü ve oransal valfin çalışmaları aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

PID kontrolcü konum çıkışı üretir. Servo sürücü PID kontrolcünün ürettiği konum çıkışını elektriksel sinyale dönüştürür. Oransal valfin pozisyonu servo sürücünün ürettiği elektriksel sinyalin etkisi altında hareket ettiği düşünülebilir. Değişken elektriksel sinyal oransal valfin hangi yöne ve hangi miktarda hareket edeceğini belirler. Bu yön yukarı veya aşağı yön olabilir; oransal valfin yukarı yönde hareketi ayar kanatları pozisyonunu belirleyen servomotor pistonlarını açma, aşağı yönde hareketi de ayar kanatları pozisyonunu belirleyen servomotor pistonlarını kapama yönünde hareket ettirecek yağ akışını sağlar. Bu yağ akışı oransal valfin içerisinde bulunan diyaframlar sayesinde gerçekleşir. Oransal valf yukarı/aşağı yönlü hareket miktarı ile bahsedilen diyafram açıklığı ve diyaframdan geçen yağ debisini doğrudan belirleyerek servomotor pistonunun hareket hızını, dolayısıyla ayar kanatları açılıp kapanma hızını belirler. Bu hız hidrolik ünitenin kararlılığı için son derece büyük önem taşır.

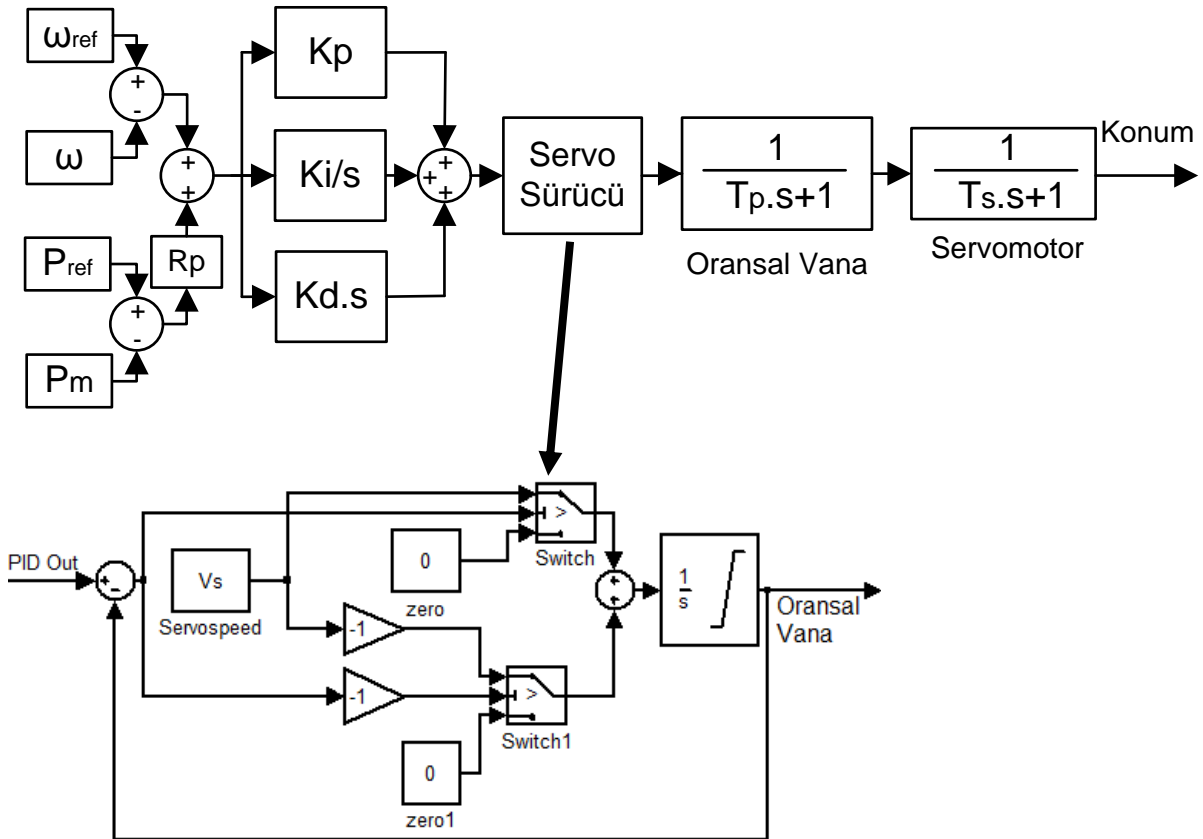
### Servomotor:

Servomotor pistonu, regülasyon çemberi aracılığıyla ayar kanatlarına bağlıdır ve hareketi ile ayar kanat açıklığını değiştirerek türbine giren su debisini değiştirir.

### Daimi hız düşümü (Permanent speed droop):

Bu özellik hidrolik ünitelerin enterkonnekte şebekedeki frekans değişimlerine verdikleri tepkiyi koordine edilebilmesini sağlar. Bu özellik ayar kanat açıklığı veya ünite aktif güç çıkışından geri besleme alınıp, hız hatasını oluşturan toplam kutusuna girilerek sağlanır.

Hız Regülatörünün kontrol blokları Şekil 3.7'de verilmiştir. Servo sürücü modelinin ayrıntısı da şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7. Hız regülatörü matematiksel modeli blok şeması

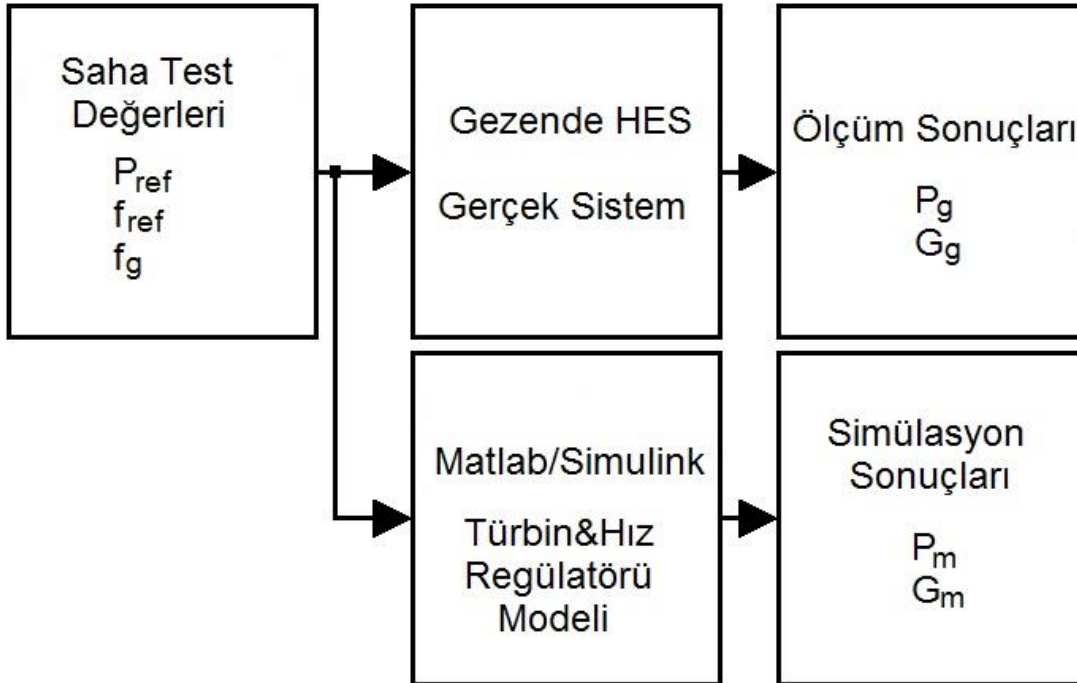
Yukarıdaki açıklamalar geçerli olmakla birlikte, Gezende HES için dijital tipte hız regülatörü geliştirilmiştir. Sistemde servo pistonlarının kontrolü için servo sürücü ve

oransal valf kullanılmıştır. Bununla ilgili matematiksel model, kısım 4.1.1 matematiksel model kısmında açıklanmıştır.

#### 4. SİMÜLASYON ve UYGULAMA ÇALIŞMALARI

Bu bölümde hidrolik türbinin ve kontrol sistemi olan hız regülatörünün Matlab/Simulink'te modellerinin oluşturulması ve oluşturulan modellerin Gezende HES saha verileri ile karşılaştırılması ele alınacaktır. Bölüm 3'de anlatılan farklı türbin modelleri ve hız regülatörü modeli ile oluşturulan türbin kontrol sistemleri Gezende HES saha verileri ile karşılaştırılacaktır ve Gezende HES hız regülatörü performansının iyileştirilmesi sağlanacaktır.

Modellerin çıktıları ile Gezende HES saha verilerinin sağlıklı bir şekilde karşılaştırılabilmesi için modellere sahadan toplanan ölçüm değerleri girilecektir. Modellerin girişine santraldaki gerçek sisteme uygulanan aktif güç referans değeri, hız referans değeri ve santralde ölçülen anlık frekans değeri girilecektir. Modellerin ürettiği ayar kanat açıklığı ve aktif güç bilgisi sahadan ölçülen aktif güç bilgisi ve ayar kanat açıklığı bilgisi ile karşılaştırılacaktır. Şekil 4.1'den de görüleceği gibi gerçek sistem ve model giriş değerlerinin aynı olması sağlanacaktır.



Şekil 4.1. Model ile saha verilerinin karşılaştırma felsefesi

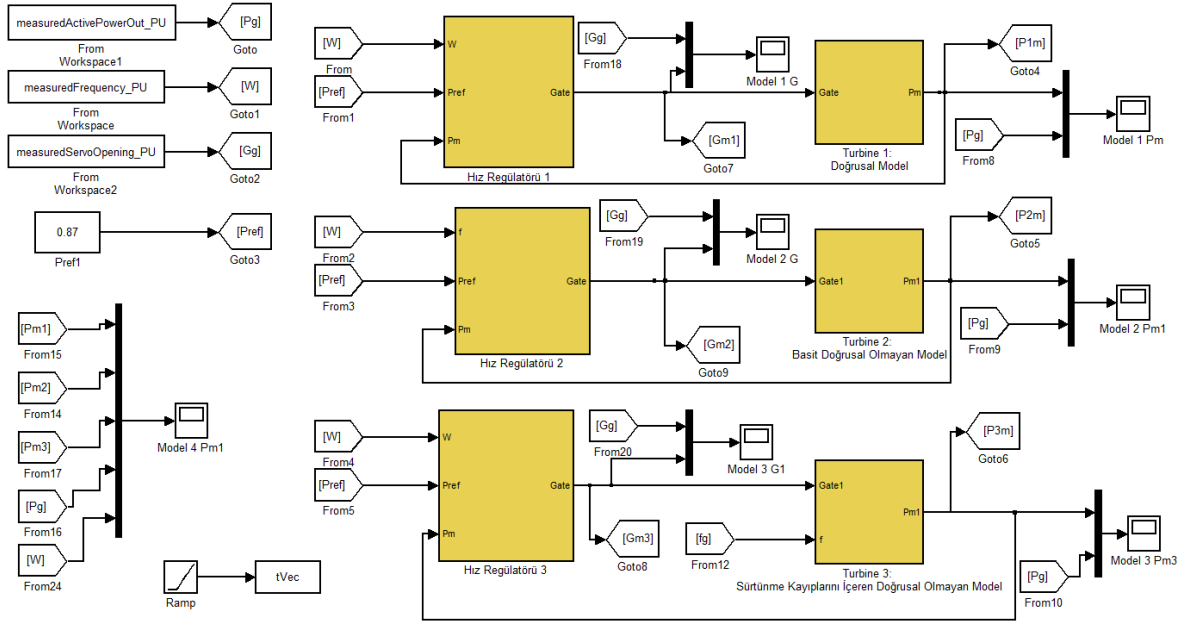
#### 4.1. Modellerin Oluşturulması

Bu bölümde Bölüm 3’de anlatılan hidrolik türbin ve hız regülatörlerinin modelleri oluşturulacaktır. Modellerin ihtiyaç duyduğu tüm parametreler Gezende HES verilerinden elde edilecektir. Modellerin sonuçları ile karşılaştırılacak olan saha ölçümleri de Matlab/Simulink’e girilecektir. Gezende HES parametreleri kullanılarak oluşturulan model parametreleri EK-1’de verilmiştir.

Name ▲	Value	Min	Max
A	19.6350	19.6350	19.6350
At	1.2658	1.2658	1.2658
D	0.5000	0.5000	0.5000
G_fl	0.9300	0.9300	0.9300
G_nl	0.1400	0.1400	0.1400
Hn	154	154	154
Ho	1	1	1
L	548.2300	548.2300	548.2300
Pr	0.8500	0.8500	0.8500
Qn	38.6000	38.6000	38.6000
Rp	0.0400	0.0400	0.0400
Tw	0.7134	0.7134	0.7134
U_nl	1.0000e-03	1.0000e-03	1.0000e-03
Un	1.9659	1.9659	1.9659
VA_base	62500000	62500000	62500000
W_base	53125000	53125000	53125000
fp	1.0000e-03	1.0000e-03	1.0000e-03
g	9.8100	9.8100	9.8100
measuredActivePowerOut_PU	<23245x2 double>	0	23245
measuredFrequency_PU	<23245x2 double>	0	23245
measuredServoOpening_PU	<23245x2 double>	0	23245
in	333	333	333
r	2.5000	2.5000	2.5000

Şekil 4.2. Model parametrelerinin ve saha ölçümlerinin modele girilmesi

Şekil 4.3’de oluşturulan modellerin genel görünümü yer almaktadır.

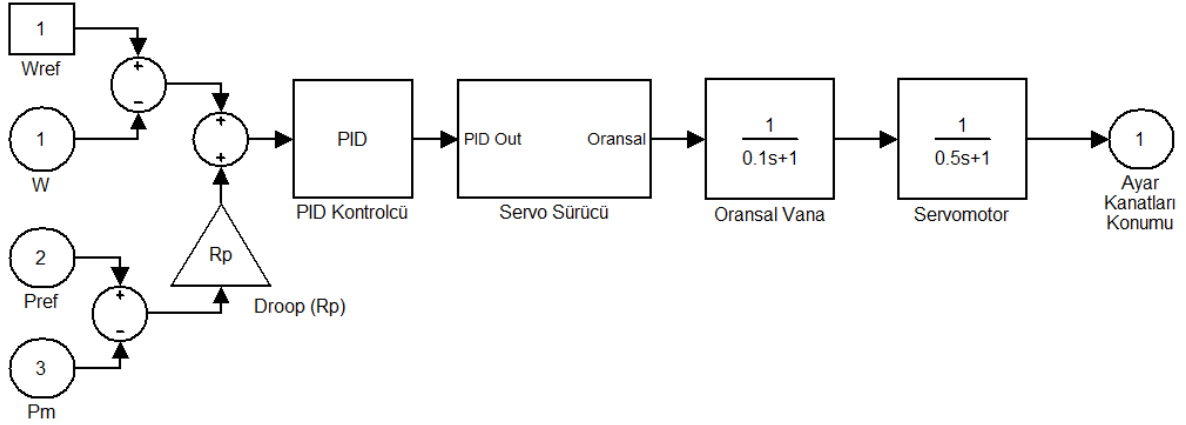


Şekil 4.3. Model genel görünümü

#### 4.1.1. Hız regülatörü modeli

Hız regülatörü, Bölüm 3.2’de anlatıldığı gibi modellenmiştir. Hız regülatörü PID kontrolcü, servo sürücü, oransal vana ve servomotor bileşenlerinden oluşmaktadır. Hız hatası ile aktif güç hatasını toplayarak ayar kanatları konum hedef değerini ayarlamaktadır. Hız regülatörü bileşenlerinden olan servo sürücü, oransal vana ve servomotor PID kontrolcünün ürettiği konum değerini olduğu gibi ayar kanatlarına ileten pasif elemanlardır. Dolayısı ile bu bileşenlerin hepsi PID kontrolcü ile ayar kanatları arasında bir gecikme oluşturmaktadır. Modelde de bu bileşenler PID kontrolcünün ürettiği konum sinyalinde birer gecikme oluşturacak şekilde modellenmiştir.

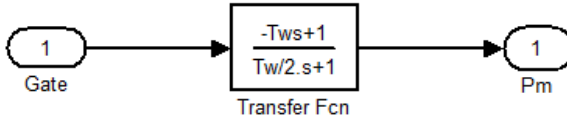
Tüm türbin kontrol sistemi modellerinin hız regülatörü modellerinde aksi belirtilmedikçe Şekil 4.4’de verilen model kullanılacaktır.



Şekil 4.4. Hız regülatörü modeli

#### 4.1.2. Doğrusal türbin modeli

Doğrusal türbin modelinin oluşturulması Bölüm 3.1.1’de anlatılmıştır. Model ideal ve kayıpsız bir türbin için, ayar kanat açıklığındaki bir değişimin çıkış gücü değişimi ile ilişkisini tanımlar.

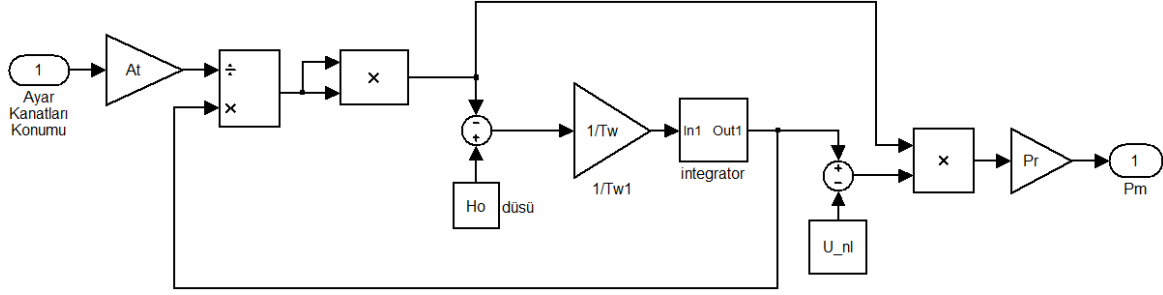


Şekil 4.5. Model 1, Doğrusal türbin modeli

#### 4.1.3. Basit doğrusal olmayan türbin modeli

Basit doğrusal olmayan türbin modelinin elde edilmesi, Bölüm 3.1.2’de anlatılmıştır. Model ideal olmayan ve kayıpsız bir türbin için, ayar kanat açıklığındaki bir değişimin çıkış gücü değişimi ile ilişkisini tanımlar.

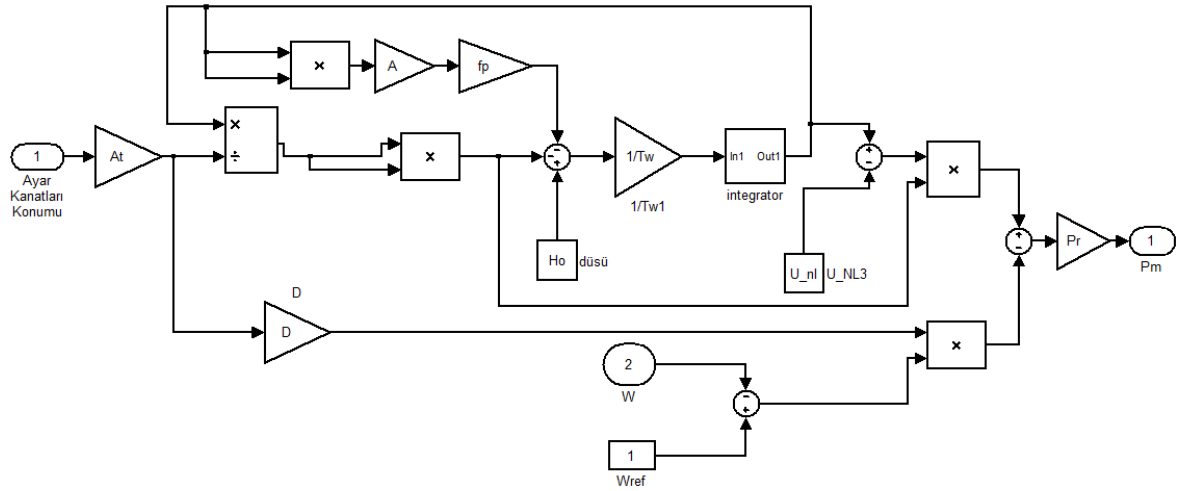




Şekil 4.6. Model 2, Basit doğrusal olmayan model

#### 4.1.4. Sürtünme kayıplarını içeren doğrusal olmayan model

Sürtünme kayıplarını içeren doğrusal olmayan türbin modeli, Bölüm 3.1.2’de anlatıldığı gibi modellenmiştir. Model ideal olmayan ve sürtünme kayıplarını içeren bir türbin için, ayar kanat açıklığındaki bir değişimin çıkış gücü değişimi ile ilişkisini tanımlar.  $f_p$  katsayısı ile cebri borudaki sürtünme katsayısı ifade edilmektedir.



Şekil 4.7. Model 3, Sürtünme kayıplarını içeren doğrusal olmayan model

## 4.2. Gezende HES Saha Yük Alma Yük Atma Testleri

Bu çalışmada Gezende HES’de yapılan yük alma ve yük atma testlerinin ölçüm değerleri modellere uygulanmıştır.

Bunun sonucunda sahada yapılan testler sonucunda üretilen gerçek aktif güç ile modellerin ürettiği aktif güç karşılaştırılıp yorumlanacaktır. Yine aynı şekilde sahadaki ayar kanat açıklığı ile modellerin ürettiği ayar kanat açıklıkları karşılaştırılıp yorumlanacaktır.

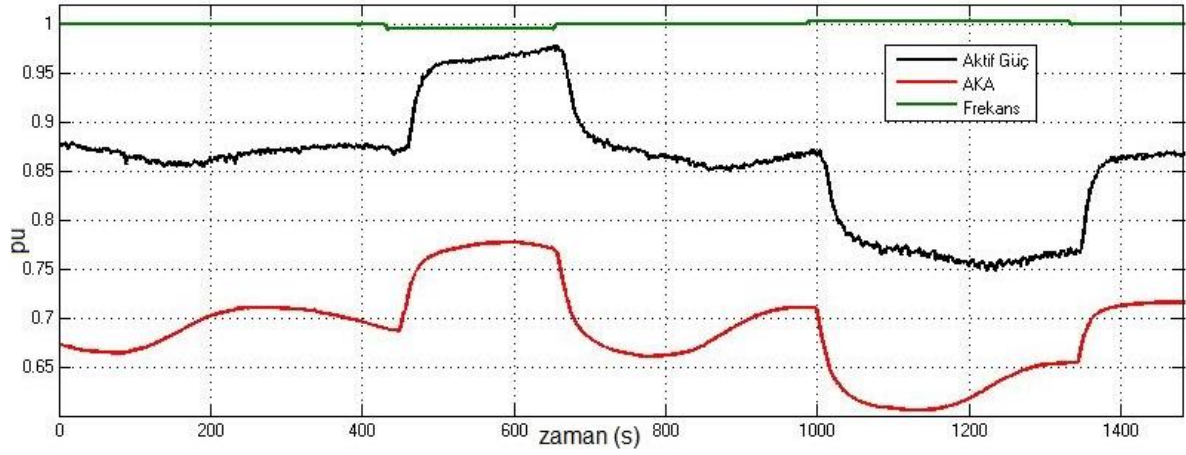
Bu çalışmada Şekil 4.3’de verilen parametreler ve Bölüm 4.1’de verilen modeller kullanılacaktır.

### 4.2.1. Gerçek durum ile simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması

Bu test hız regülatörünün girişine uygulanan frekans geri beslemesi değiştirilerek yapılmıştır. Şekil 4.4’de görülen hız regülatörünün “ $\omega$ ” girişine uygulanan sinyal Tablo 4.1’de görüldüğü gibi değiştirilerek ünitenin yük alması ve yük atması sağlanmıştır. Böylelikle ünitenin adım basamak şeklinde verilen değişikliklere tepkisi gözlemlenmiştir.

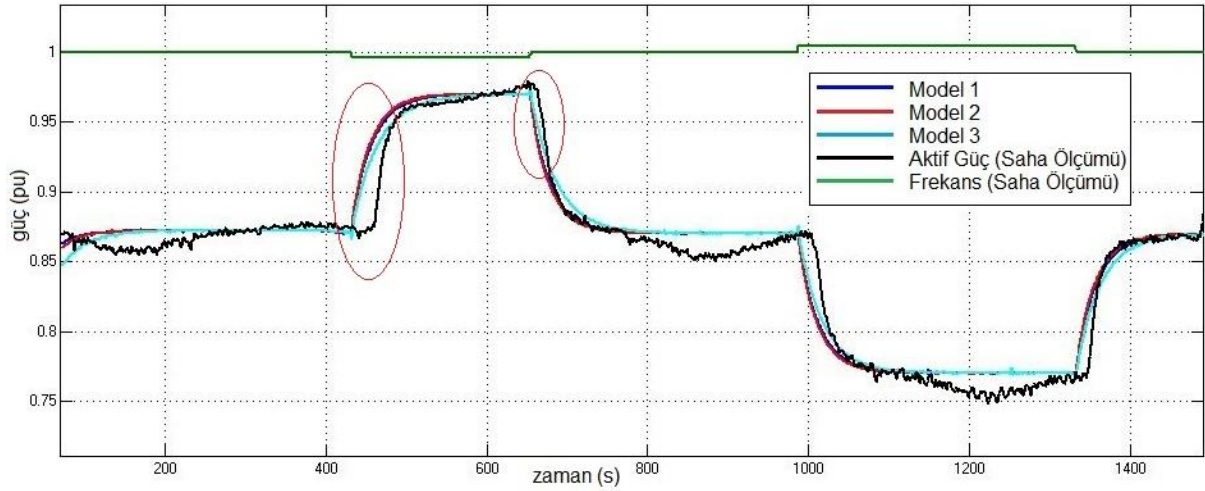
Çizelge 4-1. Saha yük alma ve yük atma testi frekans değişimi

t=0 ile t<432 aralığında	$\omega = 1$ pu
t= 432 ile t<654 aralığında	$\omega = 0,996$ pu
t=654 ile t<987 aralığında	$\omega = 1$ pu
t= 987 ile t<1332 aralığında	$\omega = 1,004$ pu
t=1332 ile t=1480 aralığında	$\omega = 1$ pu

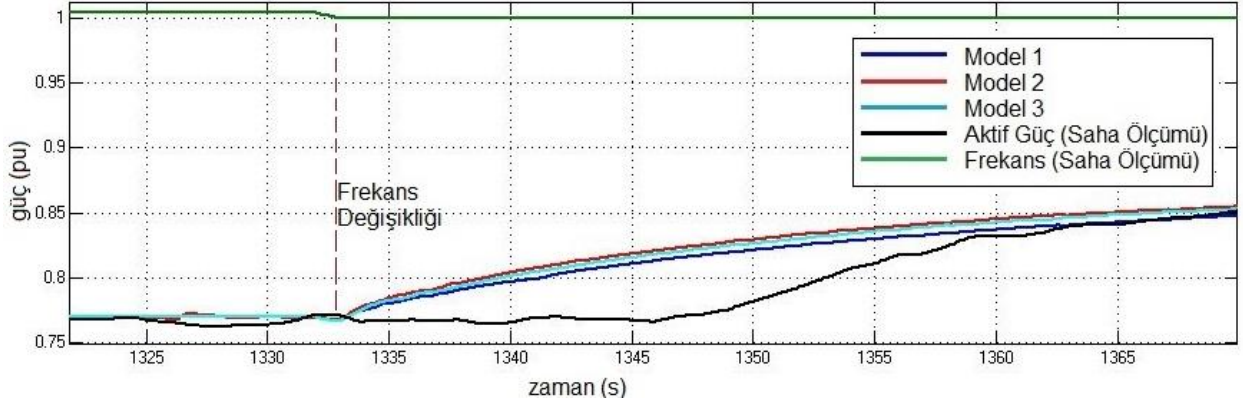


Şekil 4.8. Saha yük alma ve yük atma test verileri–Saha veri seti 1 (Aktif güç, ayar kanat açıklığı(AKA), frekans)

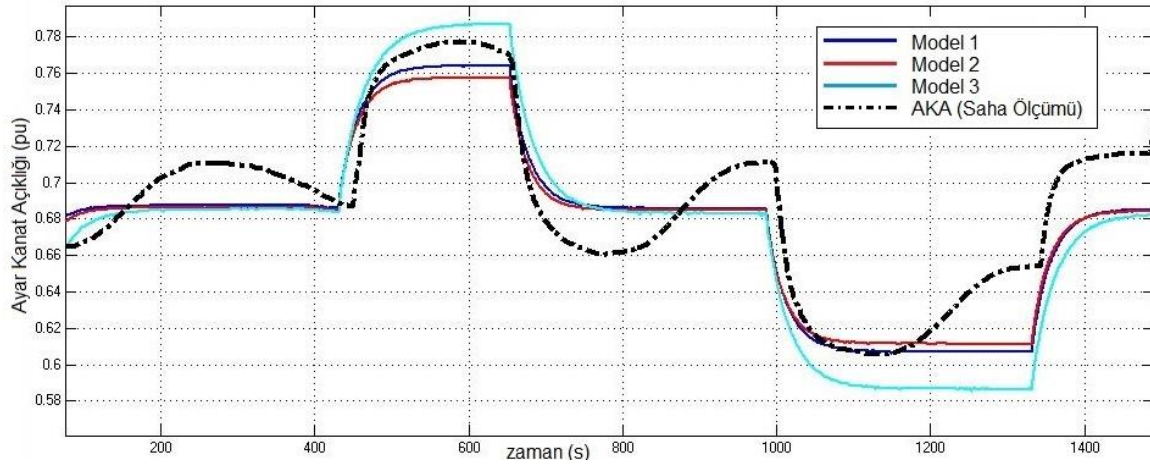
Şekil 4.8’de gösterilen saha veri seti 1’de ölçümler 1 saniyelik aralıklarla kaydedilmiştir. Frekans değişimi yukarıda Çizelge 1’de verildiği şekildedir. Şekil 4.8’de giriş test sinyali olan frekansın, çıkış değerleri olan AKA ve Aktif Güç ile karşılaştırılabilmektedir.



Şekil 4.9. Saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının güç bakımından karşılaştırılması–Saha veri seti 1



Şekil 4.10. Saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının tepki süresi bakımından karşılaştırılması–Saha veri seti 1



Şekil 4.11. Saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının ayar kanat açıklıklarının karşılaştırılması–Saha veri seti 1

Saha veri seti 1 ile modeller çalıştırılmıştır. Modellerin ürettiği güç ile gerçek güç bilgisinin sürekli halde aynı olduğu Şekil 4.9'de görülmektedir. Ancak ünitenin yük almaya ve yük atmaya başlaması sırasında bir gecikme olduğu Şekil 4.9'da ve detaylı olarak Şekil 4.10'dan görülmektedir. Şekil 4.10'da frekans değişikliği ile beraber modeller tepki vermeye başlamışlardır ancak gerçek sistemde ise bir gecikme olduğu görülmektedir. Modellerin ürettiği güç bilgilerinde ise bu gecikme oluşmamıştır.

Aynı şekilde Şekil 4.11'de görüleceği gibi modellerin ürettiği ayar kanat açıklığı bilgilerinin benzer olduğu görülmektedir. Model 3'ün ürettiği ayar kanat açıklığı diğer modellerin ürettiği ayar kanat açıklığından farklı olduğu görülmektedir. Bunun nedeni bu modelin sürtünme kayıplarını içeriyor olmasıdır. Ancak gerçek ayar kanat açıklığı

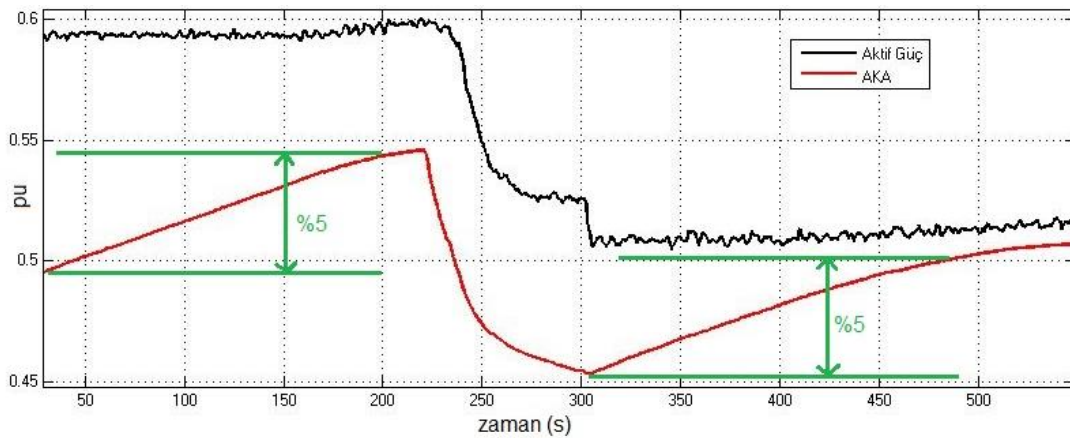
bilgisinin model sonuçlarından çok farklı olduğu ve dalgalı olduğu görülmektedir. Gerçek ayar kanat açıklığında meydana gelen bu salınımın aktif gücü etkilemediği de Şekil 4.8'den detaylı olarak görülmektedir.

Ayar kanatlarındaki değişimin üretilen aktif gücü etkilememesi ideal sistemlerde mümkün değildir. Gezende HES'de ayar kanat açıklığı bilgisi servomotor üzerinden alınmaktadır. Ancak servomotor ayar kanatlarına doğrudan bağlı değildir. Ayar kanatları ile servomotor arasında birçok pasif mekanik ekipman yer almaktadır. Bu ekipmanların başında regülasyon çemberi yer almaktadır. Servomotor, regülasyon çemberi ve ayar kanatlarının bağlantısını gösteren detaylı gösterim Şekil 2.10'da ve Şekil 2.11'de verilmiştir. Ayar kanatlarındaki değişimin üretilen aktif gücü etkilememesi, servomotor ile ayar kanatları arasında yer alan mekanik bağlantılarda boşluk olabileceğini göstermektedir. Bu boşluğun tespiti için Gezende HES'de ikinci bir saha testi yapılmıştır.

#### 4.2.2. Gezende HES ayar kanatlarındaki boşluğun tespiti

Gezende HES servomotor ile ayar kanatları arasındaki boşluğun olabileceği düşüncesiyle ayar kanat açıklığı bilgisi ile üretilen aktif güç bilgisinin karşılaştırma işlemi yapılmıştır. Sahada yapılan testlerde ayar kanatları konumu artırılarak üretilen aktif güç değer değişimi gözlemlenmiştir.

Şekil 4.12'de gösterilen saha veri seti 2'de ölçümler 1 saniyelik aralıklarla kaydedilmiştir.

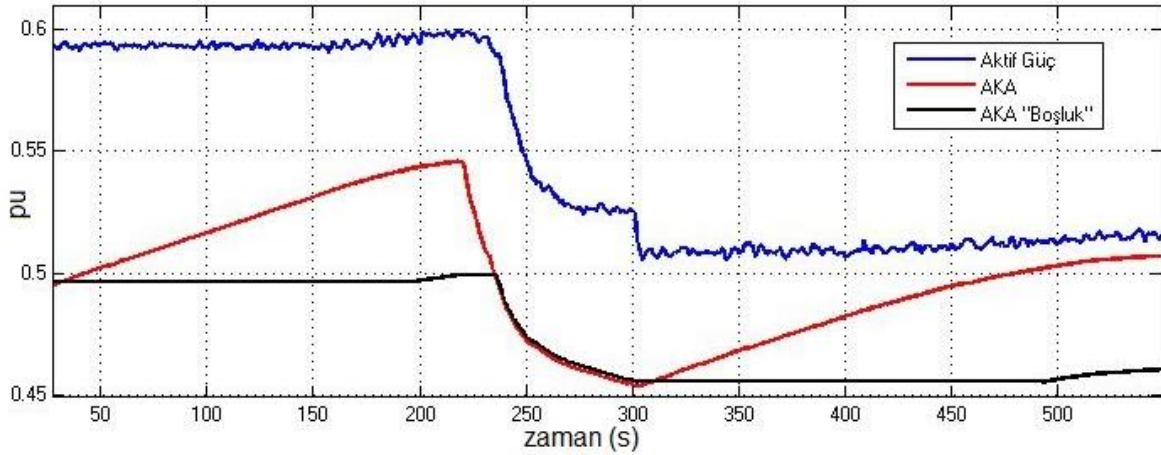


Şekil 4.12. Servomotor ile ayar kanatları arasındaki boşluğun tespiti için yapılan saha testi - saha veri seti 2

Şekil 4.12'den de görüleceği üzere, ayar kanatları konumu olarak düşünülen servomotor konumu artırılmıştır ve aktif gücün değişmediği görülmüştür. Ayar kanatlarındaki değişim yaklaşık %5 oranında değiştiğinde aktif gücün de arttığı gözlemlenmiştir. Yapılan bu testten sonra servomotor ile ayar kanatları arasında %5'lik bir boşluk olduğu görülmüştür. Bu test yalnızca artış yönünde kontrollü olarak yapılmış ve boşluk değeri gözlenmiştir. 200-300 saniyeler arasındaki hızlı azalma kontrollü yapılmamış, bu sebeple şekilde negatif yönlü boşluk gösterilmemiştir. Ancak bunun da %5 olduğu düşünülebilir.

Hidroelektrik santrallerde servomotor piston kolu konumu ayar kanat açıklığı geri beslemesi olarak alınır. Servomotor ile ayar kanatları arasındaki mekanik ekipmanın ideal olduğu düşünülerek servomotor piston konumu ayar kanatlarının konumu olarak düşünülür ve tüm kontrol döngülerine bu değer geri besleme olarak kullanılır. Ancak Gezende HES gibi yapımından yaklaşık 25 yıl geçmiş eski santraller için bu durum geçerli olmayabilir. Sistemde kullanılan mekanik ekipmanın aşınmasından dolayı boşluklar oluşabilmektedir.

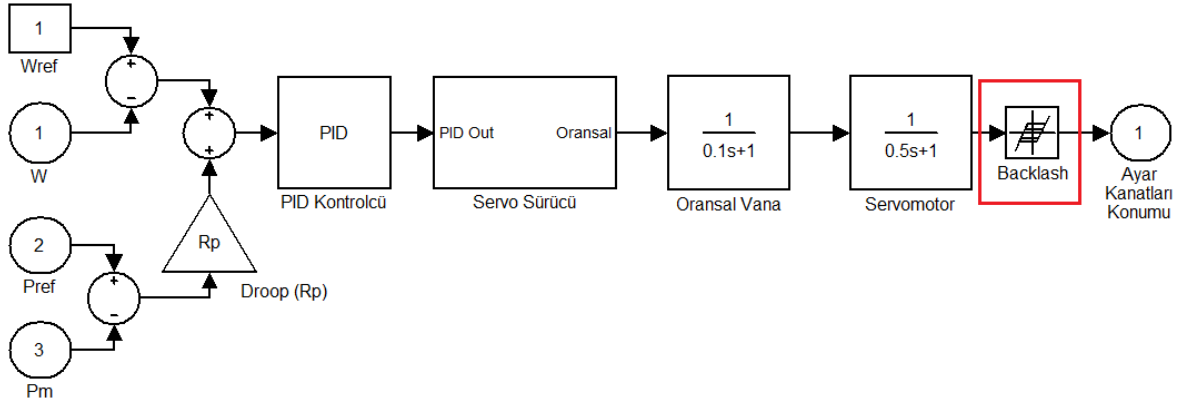
Şekil 4.12'de görülen ayar kanat açıklığına %5 boşluk düşünülerek bu test sonuçları incelendiğinde ise Şekil 4.13'de görülen sonuç ortaya çıkmaktadır. Şekil 4.13'ün elde edilebilmesi için saha ayar kanat ölçümlerine "Backlash" bloğu uygulanmış ve çıktısı, "AKA Boşluk" olarak şekilde gösterilmiştir. "AKA Boşluk" eğrisinden görülebileceği gibi, servomotor hareketi ancak ve ancak regülasyon çemberindeki boşluk etkisini giderdikten sonra (yaklaşık 200 sn.) aktif güçte değişim gözlenmektedir.



Şekil 4.13. Saha veri seti 2'de ayar kanat konumuna %5'lik boşluğun uygulanması

### 4.2.3. Boşluk etkisinin değerlendirildiği simülasyon sonuçları

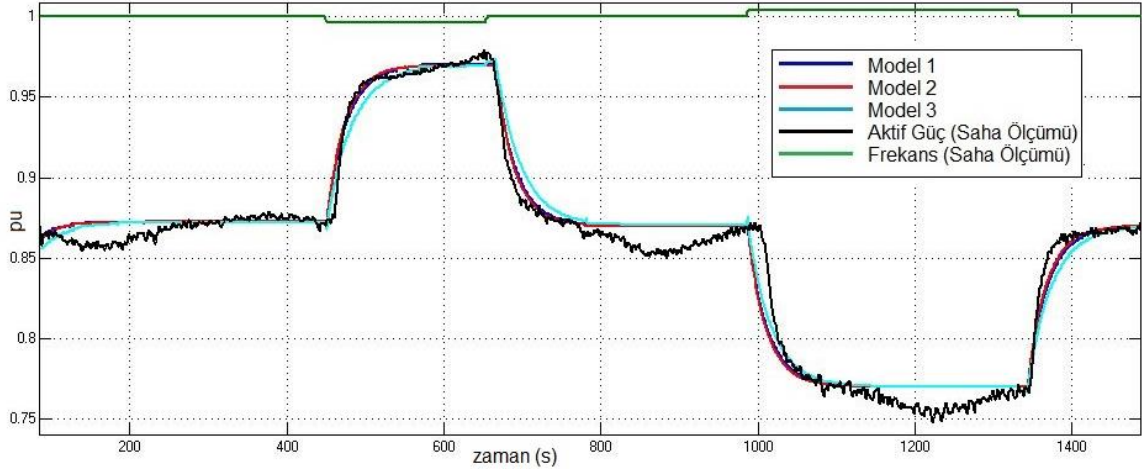
Yapılan saha testleri ve test sonuçlarından sistemde boşluk olduğu görülmektedir. Bundan sonraki aşamada, boşluk matematiksel modele de eklenecek ve bunun etkisini giderilmesi için model üzerinde farklı metotlar denenecektir. Servomotor ile ayar kanatları arasında tespit edilen boşluğun modellenmesi için “Matlab/Simulink” kütüphanesinde bulunan “Backlash” bloğu kullanılmıştır. Bu blok kullanılarak oluşturulan hız regülatörü modeli Şekil 4.14’de verilmiştir. Bu bölümdeki simülasyon çalışmasında tüm hız regülatörü modellerinde bu model kullanılacaktır. “Backlash” bloğunun parametre ayarları EK-2’de verilmiştir.



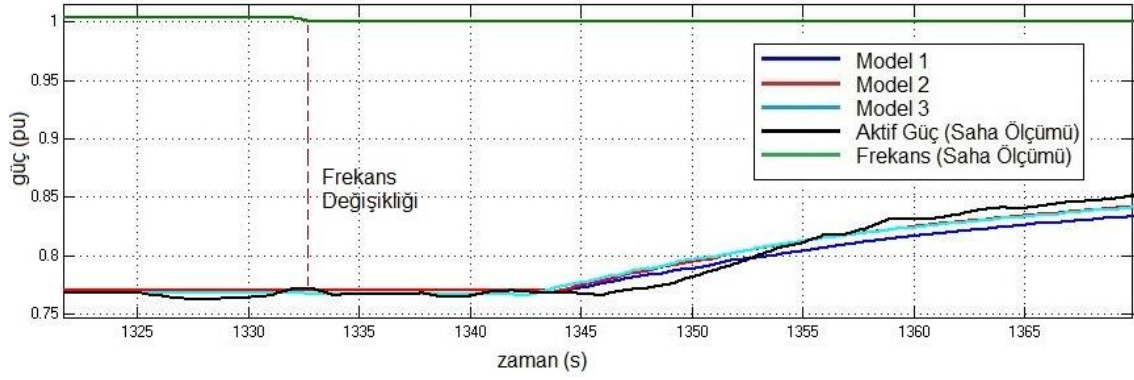
Şekil 4.14. Gerçek sistemde ayar kanatlarında tespit edilen %5’lik boşluğun modellenmesi

Boşluğun modellenmesinden sonra simülasyon çalışması tekrar yapılarak gerçek veriler ile model sonuçları tekrar karşılaştırılmıştır.

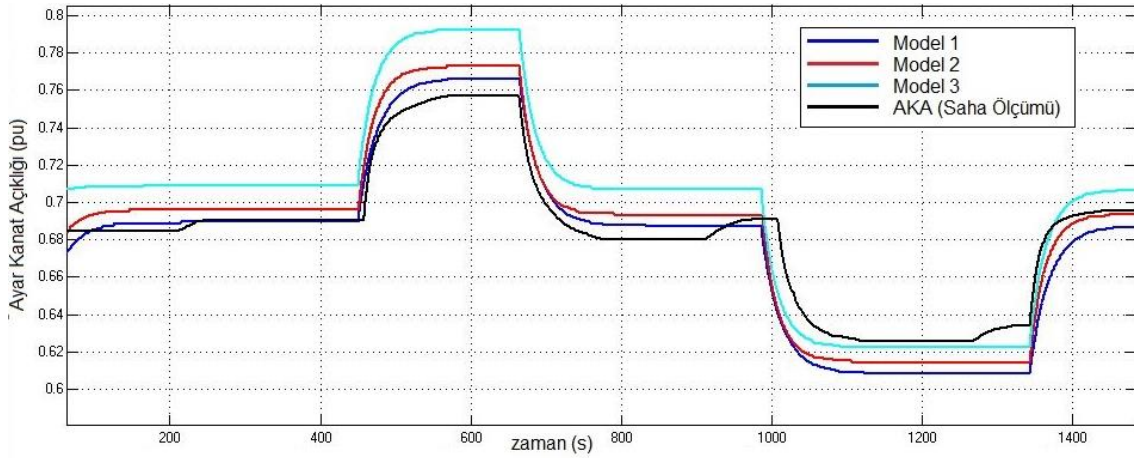




Şekil 4.15. %5'lik boşluk modellenerek saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının güç bakımından karşılaştırılması– Saha veri seti 1



Şekil 4.16. %5'lik boşluk modellenerek saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının tepki süresi bakımından karşılaştırılması – Saha veri seti 1



Şekil 4.17. %5'lik boşluk modellenerek saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının ayar kanat açıklıklarının karşılaştırılması–Saha veri seti 1



Boşluk eklenen modellerin simülasyon sonuçlarına bakıldığında, saha testi sonuçları ile model sonuçlarının uyumlu olduğu görülmüştür. Şekil 4.9’da yük alma ve yük atma esnasında görülen gerçek durumdaki gecikme boşluk etkisinin modele eklenmesi ile beraber Şekil 4.15’de ve Şekil 4.16’da da görüleceği gibi simülasyon sonuçlarında da görülmektedir.

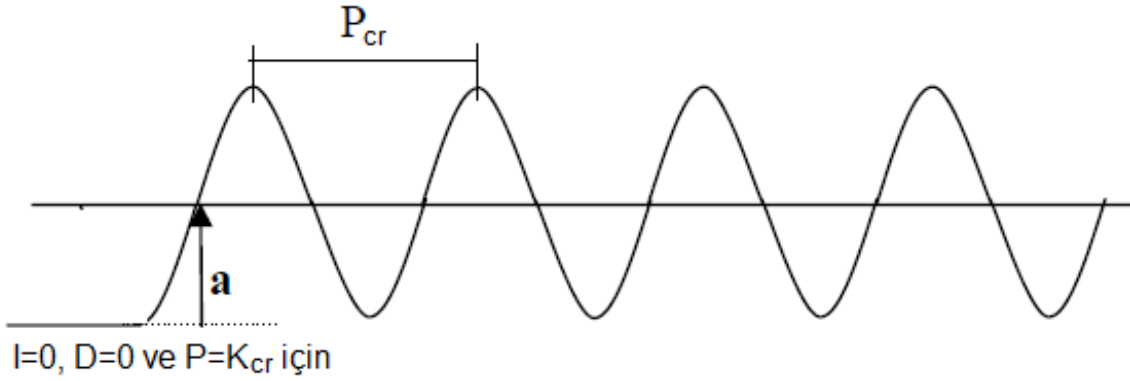
#### **4.2.4. Boşluk etkisinin giderilmesi için tasarlanan hız regülatörü modeli**

Bölüm 4.2.3’de gerçek sistemde var olan boşluk modellenerek saha sonuçları ile doğrulanmıştır. Ancak hala gerçek sistemde servomotor ile ayar kanatları arasında var olan boşluktan ötürü gecikme devam etmektedir. Bu gecikmenin ortadan kalkması için gerçek sistemdeki hız regülatörü kontrol döngüsünde bu boşluktan kaynaklı gecikme düşünülmelidir. Boşluktan kaynaklı gecikmeyi gidermek için ilk olarak hız regülatörü PID kontrolcüsünün parametrelerinin ayarlanmasına çalışılmıştır. Bu parametre ayarı için Matlab/Simulink ortamında hazırlanan modellere Ziegler-Nichols(ZN) yöntemi uygulanmıştır. Bu metot ile bulunan parametrelerin enterkonnekte modda hız regülatörü tepkisini iyileştirdiği ancak izole ada modda salınımlara neden olduğu görülmüştür. ZN yönteminin gerçek sisteme uygulanamayacağını anlaşıldığında sonra ise ileri besleme yöntemi Matlab/Simulink ortamında hazırlanan modellere uygulanmıştır. İleri besleme yönteminin hem enterkonnekte modda hem de izole ada modda hız regülatörü performansını iyileştirdiği görülmüştür.

#### Ziegler-Nichols yöntemi ile parametrelerin ayarlanması:

Ziegler-Nichols yöntemi PID parametrelerinin ayarlanması için kullanılmaktadır. Bu metot açık çevrim ve kapalı çevrim olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Açık çevrim Ziegler-Nichols metodunda sistemin ölü zamanı ve maksimum eğimi hesaplanır. Hesaplanan bu değerler gerekli formüller kullanılarak PID kontrolör için gereken katsayılar hesaplanır. Kapalı çevrim Ziegler-Nichols metodunda ise PID parametrelerinden I(Integral) ve D(Derivative) sıfırlanarak sadece P(Proportional) kazancı ile sistem çıkış eğrisinin osilasyona girmesi sağlanır. Şekil 4.18’de sistem çıkışının “a” noktasına geldiği noktadaki oransal kazanç değeri osilasyon kazancı( $K_{cr}$ ) olarak ifade edilir ve osilasyon periyodu( $P_{cr}$ ) ile kullanılarak gerekli PID katsayıları Çizelge 4.2’deki formüller kullanılarak

hesaplanabilir [38].



Şekil 4.18. Kapalı çevrim Ziegler-Nichols metoduna ait çıkış işareti

Çizelge 4-2. Kapalı çevrim Ziegler-Nichols metodu için parametrelerin hesaplanması [38]

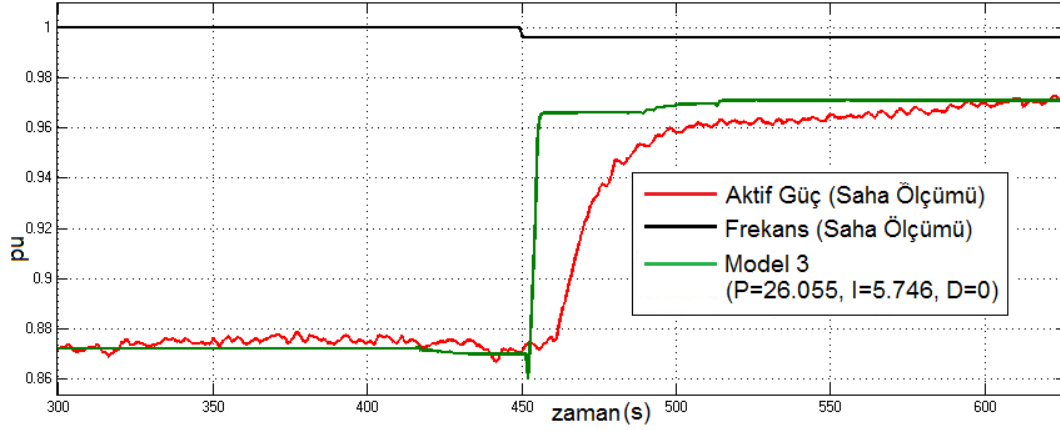
Kontrolör	K <sub>P</sub>	K <sub>I</sub>	K <sub>D</sub>
P	0,5K <sub>cr</sub>	∞	0
PI	0,45K <sub>cr</sub>	$\frac{1}{1,2}P_{cr}$	0
PID	0,6K <sub>cr</sub>	0,5P <sub>cr</sub>	0,125P <sub>cr</sub>

Matlab/Simulink ortamında, Şekil 4.14’de verilen boşluk etkisi içeren hız regülatörü ve türbin modeline(Model 3) kapalı çevrim Ziegler-Nichols yöntemi uygulanmıştır. Sürekli osilasyona neden olan oransal kazanç  $K_{cr}=57,9$  ve osilasyon periyodu  $P_{cr}=6,896$  olarak bulunmuştur. Çizelge 4.2’ye göre PI kontrolcü için;

$$K_P = 0,45 K_{cr} = 26,055$$

$$K_I = \frac{1}{1,2} P_{cr} = 5,746$$

olarak hesaplanmıştır. PI parametrelerinin Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanmasından sonra saha ölçümleri ile simülasyon sonuçları tekrar karşılaştırılmıştır.



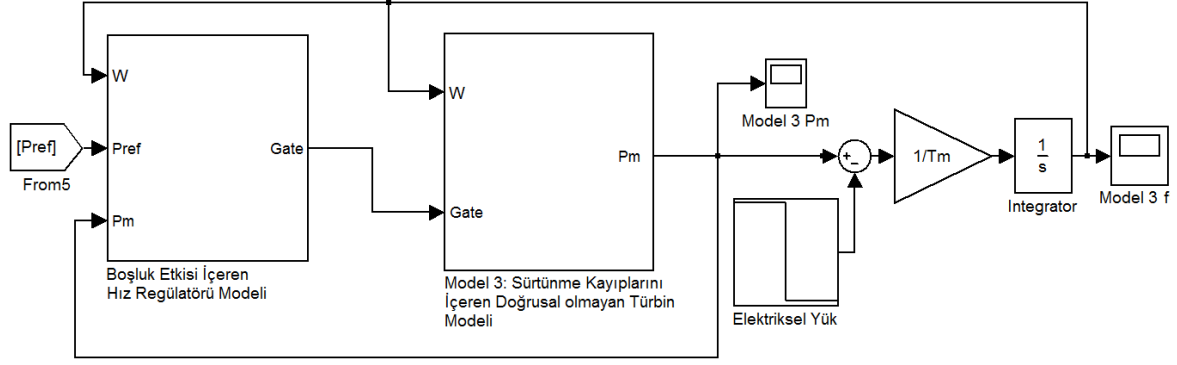
Şekil 4.19. Saha sonuçları ile PI parametreleri ZN metodu ile hesaplanan model 3 sonuçlarının güç bakımından karşılaştırılması

Boşluktan kaynaklanan gecikmelerin kapalı çevrim Ziegler-Nichols yöntemi kullanılarak hesaplanann PI parametreleri ile ortadan kalktığı Şekil 4.19'dan görülebilmektedir.

Ancak IEEE standartlarına göre, hız regülatörünün izole ada modunda üniteyi kararlı bir şekilde kontrol etmesi gerekmektedir. Hız regülatörü parametreleri en kötü durum olan izole ada modunda ünite frekansını sabit tutmalıdır [3].

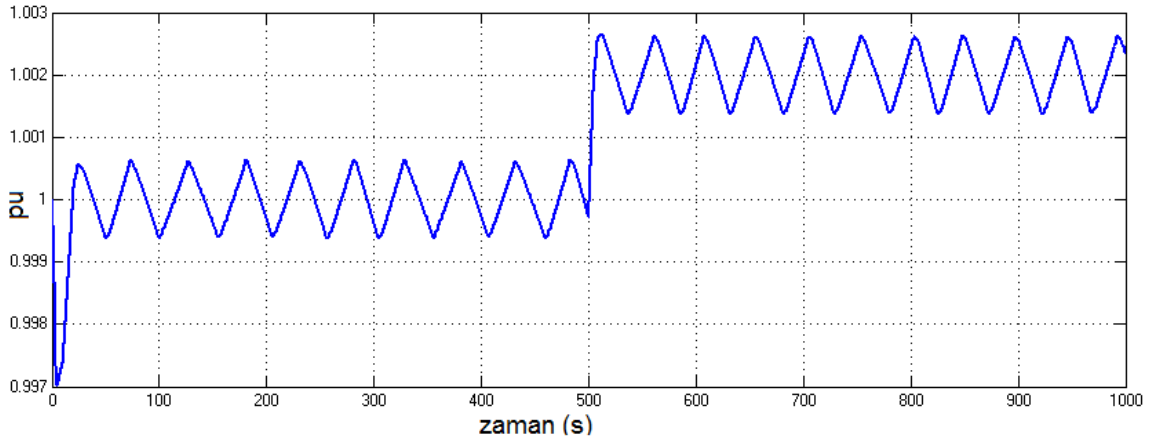
#### İzole ada modu:

Santral şebekeden bağımsız olan bir bölgede elektrik ihtiyacını karşılamaktadır [3]. Örneğin, santrali ve bölgesel yükü şebekeye bağlayan iletim hattında meydana gelecek bir arıza dolayısıyla iletim hattının kesici ile açılması sonrası, santral ve bölgesel yük bir izole ada oluşturabilir. Bu çalışma prensibinde santralin amacı enerji üretimini maksimize etmek değil, izole sistemin gerilimini ve frekansını belirli sınırlar içinde tutmaktır. İzole ada modu için kullanılan model Şekil 4.20'de verilmiştir. Bu model sadece izole ada modu çalışması için kullanılmıştır. İzole ada modu için hazırlanan modelde kullanılan hız regülatörü modeli Şekil 4.14'de verilen boşluk etkisi içeren hız regülatörü modelidir ve türbin modeli ise Şekil 4.7'de verilen sürtünme kayıplarını içeren doğrusal olmayan türbin modelidir(Model 3).



Şekil 4.20. İzole ada modu için hazırlanan Matlab/Simulink modeli

Kapalı çevrim Ziegler-Nichols yöntemi ile bulunan PI ( $K_P = 26,055$ ,  $K_I = 5,746$ ) parametrelerini içeren hız regülatörü ve türbin modeli (Model 3) izole ada modunda çalıştırıldığında, hız regülatörünün frekansı kontrol edemediği Şekil 4.21'den görülebilmektedir. Şekil 4.21'de verilen grafikte  $t=500$  anında elektriksel yük %5 oranında azaltılmıştır. İzole ada modunda, Gezende HES'in enterkonnekte moda göre sayıca az diğer santrallerle beraber ada oluşturduğu ve sadece Gezende HES'in frekansı kontrol ettiği varsayılmıştır. Bu yüzden  $T_m = 50$  s olarak alınmıştır.

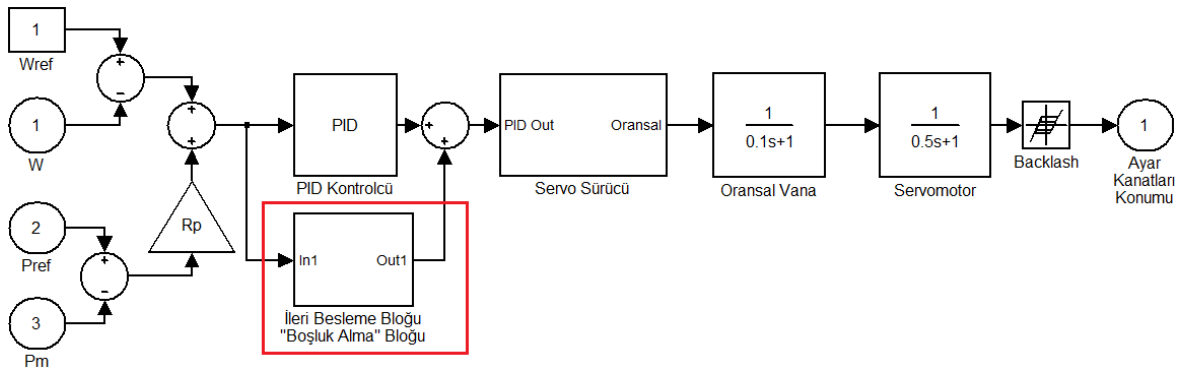


Şekil 4.21. Ziegler-Nichols yöntemi ile bulunan PI parametrelerini içeren hız regülatörünün izole ada modunda frekans tepkisi

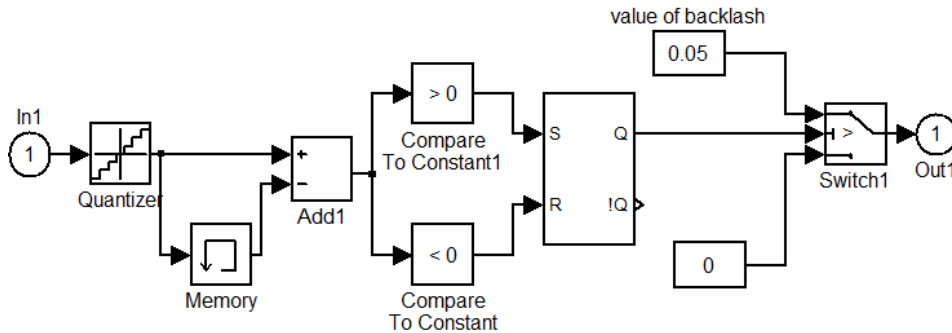
Sonuç olarak, kapalı çevrim Ziegler-Nichols yöntemi kullanılarak hesaplanan PI parametrelerinin enterkonnekte moda boşluk etkisine karşı olumlu sonuç vermesine karşın izole ada modda ünite frekansını sabit tutamadığı için bu parametre setinin ( $K_P = 26,055$ ,  $K_I = 5,746$ ) gerçek sistemde kullanılmayacağı anlaşılmıştır.

### İleri besleme yönteminin uygulanması:

Ziegler-Nichols yöntemi ile elde edilen parametre setinin gerçek sistemde kullanılamayacağını anlaşıldığından sonra ileri besleme yöntemi boşluk etkisini azaltmak için düşünülmüştür. İleri besleme sistemin hedef değere daha hızlı gelmesi için herhangi bir kapalı çevrim kontrol yöntemi ile kullanılabilen öngörülü bir kontrol yöntemidir [3]. Simülasyon çalışmasında Şekil 4.22’de verilen hız regülatörü modeli kullanılmıştır. Bu modelde ileri besleme kontrol döngüsü kullanılmaktadır. Şekil 4.23’de verilen model ayrıntısından da görüleceği üzere, eklenen blok PID girişindeki hata sinyalini takip etmektedir. PID hata sinyalinin işareti yön değiştirdiğinde eklenen “Boşluk Alma” bloğu PID’nin ürettiği işarete boşluk değeri kadar(%5) katkı sağlamaktadır. Böylece yalnız PID sinyalinin boşluğu aşana kadar yaşadığı gecikme ortadan kalkmıştır.

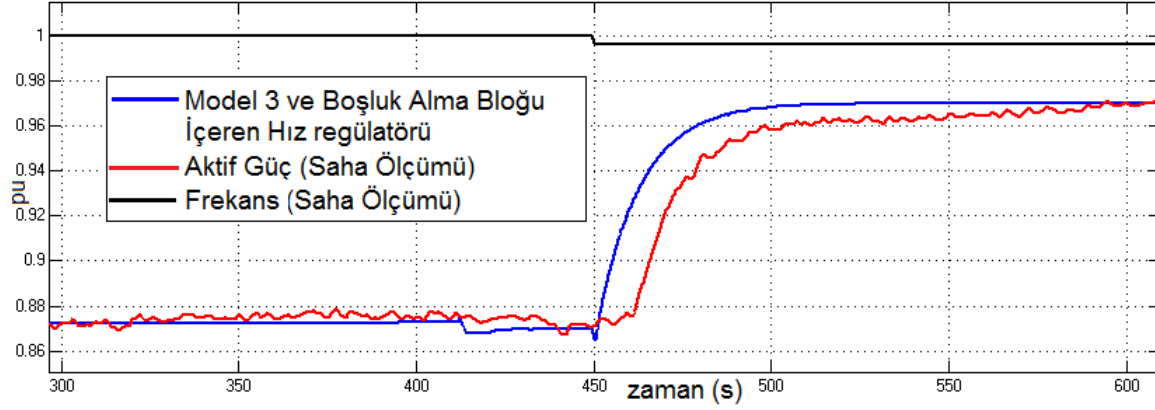


Şekil 4.22. %5’lik boşluk etkisinin giderilmesi için tasarlanan hız regülatörü modeli



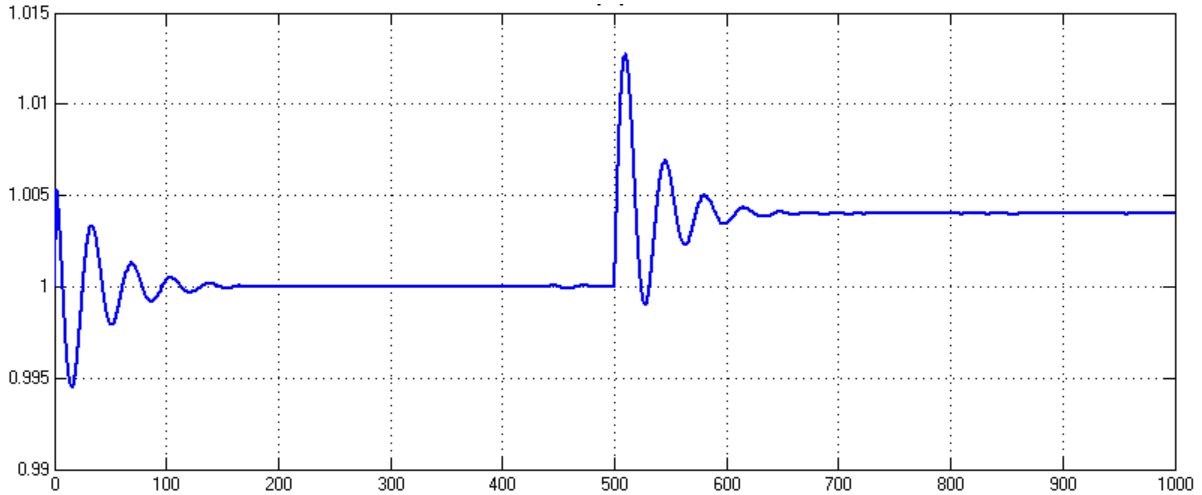
Şekil 4.23. %5’lik boşluğun alınması için tasarlanan boşluk alma modeli

İleri besleme yönteminin hız regülatörüne eklenmesinden sonra saha ölçümleri ile simülasyon sonuçları tekrar karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.24. Saha sonuçları ile ileri besleme yöntemi içeren hız regülatörünün güç bakımından karşılaştırılması

İleri besleme yöntemi kullanılarak oluşturulan “Boşluk Alma” bloğu ve orjinal PI parametreleri ( $K_p=2$ ,  $K_I=1,3$ ) ile enterkonnekte modda boşluktan kaynaklı gecikmelerin ortadan kalktığı Şekil 4.24’den görülmektedir. Ancak “Boşluk Alma” bloğunun gerçek sistemde kullanılabilmesi için hız regülatörünün izole ada modunda da ünite frekansını kararlı bir şekilde kontrol etmelidir. İzole ada modu için Şekil 4.20’de verilen model kullanılmıştır. Bu modelin hız regülatörü modeli için Şekil 4.22’de verilen ileri beslemeli hız regülatörü modeli kullanılmıştır.

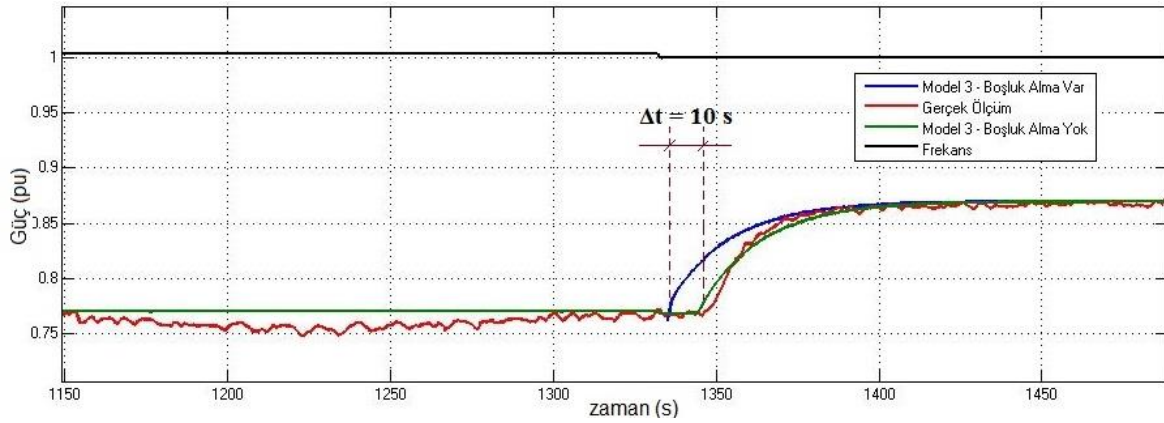


Şekil 4.25. İleri besleme yöntemi içeren hız regülatörünün izole ada modunda frekans tepkisi

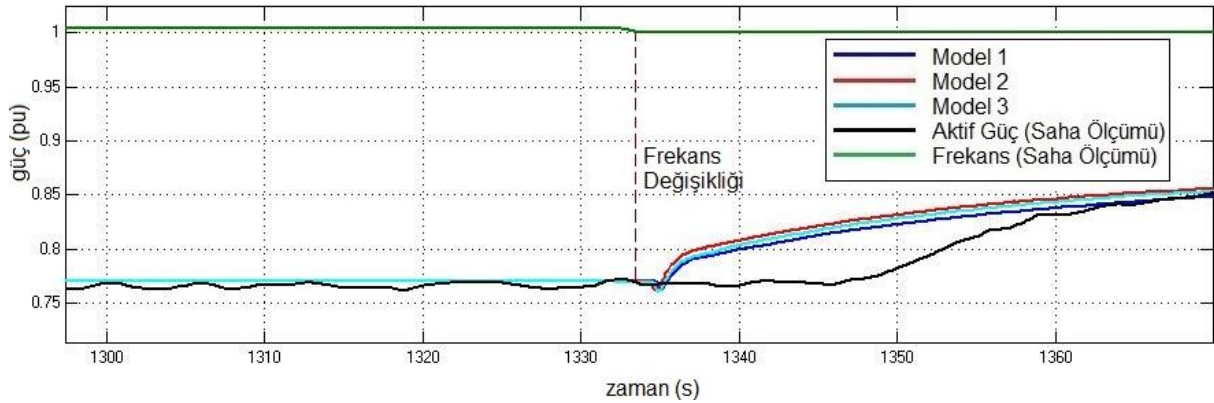
İleri besleme yöntemi kullanılarak hazırlanan “Boşluk Alma” bloğunun izole ada modunda da sağlıklı sonuç verdiği Şekil 4.25’den görülmektedir. Bundan sonraki simülasyon çalışmalarındaki tüm hız regülatörü modellerinde aksi belirtilmedikçe Şekil 4.23’de detayı

gösterilen “Boşluk Alma” bloğu ile Şekil 4.22’de detayı gösterilen hız regülatörü modeli kullanılacaktır.

“Boşluk Alma” bloğunun PID bloğunun çıkışına eklenmesinden sonra, simülasyon ortamında “Boşluk Alma” bloğunun eklendiği Model 3 ile “Boşluk Alma” bloğunun eklenmediği Model 3 ve sahadaki gerçek durum karşılaştırılmıştır.



Şekil 4.26. %5’lik boşluk alan hız regülatörü modeli ile almayan modelin ve gerçek durumun karşılaştırılması–Saha veri seti 1



Şekil 4.27. %5’lik boşluk modellenerek saha yük alma ve yük atma testi sonuçları ile model sonuçlarının tepki süresi bakımından karşılaştırılması–Saha veri seti 1

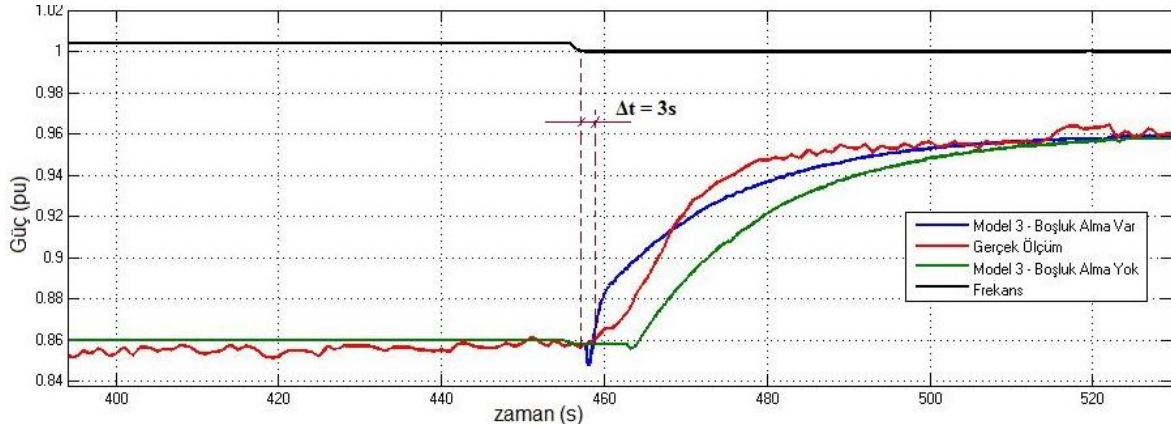
Şekil 4.26’dan de görüleceği üzere “Boşluk Alma” bloğunun eklendiği Model 3’de boşluktan kaynaklı gecikmenin ortadan kalktığı görülmektedir. Gerçek sistemde ve “Boşluk Alma” bloğunun eklenmediği Model 3’de tepki süresinin 10 saniye mertebelerinde olduğu görülmektedir.

#### 4.2.5. Boşluk etkisinin giderilmesi için tasarlanan hız regülatörünün gerçek sisteme uygulanması

“Boşluk Alma” bloğunun simülasyon ortamında sağlıklı çalıştığı gözlemlendikten sonra sahada çalışan gerçek hız regülatörüne de “Boşluk Alma” bloğu uygulanmıştır. Gerçek hız regülatörü kontrolcüsüne Şekil 4.23’de detayı gösterilen “Boşluk Alma” bloğu uygulanmıştır. Bu blok gerçek sisteme uygulandıktan sonra sahada tekrar ölçümler alınmış ve ölçüm sonuçları model sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

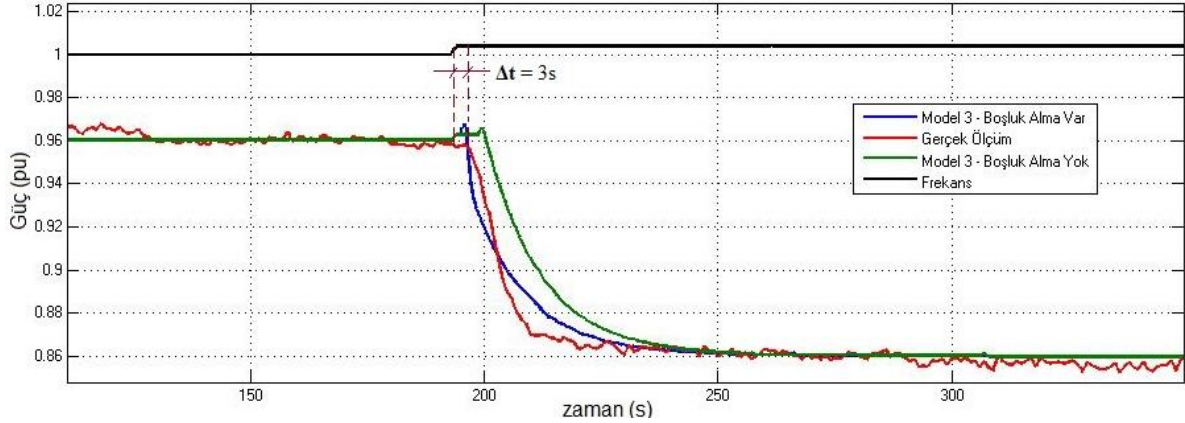
Şekil 4.28’den de görüleceği üzere gerçek sisteme “Boşluk Alma” bloğu uygulandıktan sonra tepki süresi 3s mertebelerine kadar inmiştir. “Boşluk Alma” bloğu uygulanmayan gerçek sistemde ise bu tepki süresi Şekil 4.26’den de görüleceği üzere 10s mertebelerinde gerçekleşmiştir. “Boşluk Alma” bloğunun uygulanmadığı modelde ise bu tepki süresi hala 10s mertebelerinde kaldığı görülmektedir.

Şekil 4.28’den ve Şekil 4.29’dan görüldüğü gibi “Boşluk Alma” bloğunun gerçek sistemdeki tepki süresini iyileştirdiği görülebilmektedir.



Şekil 4.28. %5’lik boşluk alan gerçek hız regülatör ile %5’lik boşluk alan modelin ve %5’lik boşluk almayan modelin yük alma esnasında karşılaştırılması–Saha veri seti 3





Şekil 4.29. %5'lik boşluk alan gerçek hız regülatörü sonuçları ile %5'lik boşluk alan model sonuçları ve %5'lik boşluk almayan modelin yük atma esnasında karşılaştırılması-Saha veri seti 3

Şekil 4.28'de ve Şekil 4.29'da gösterilen saha veri seti 3'de ölçümler 1 sn. aralıklar ile kaydedilmiştir.

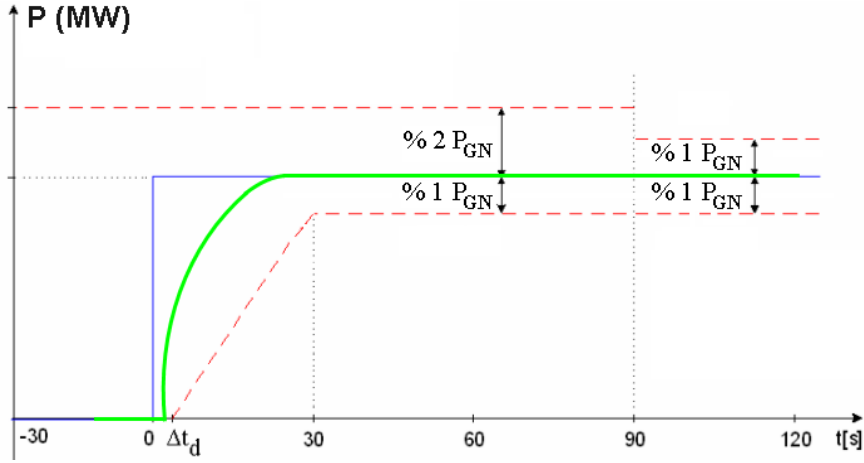
### 4.3. Gezende HES Primer-Frekans Kontrol Testleri

#### 4.3.1. Primer-frekans kontrolü rezerv testi başarı kriterleri

Bir ünitenin primer frekans kontrolüne katılımı için aşağıdaki anlatılan rezerv testini başarılı bir şekilde tamamlaması gerekir.

#### Rezerv testi:

Yönetmelikte anlatılan ayarlamalar yapıldıktan sonra simüle frekans ile  $\Delta f = -200$  mHz'lik frekans sapması hız kontrol döngüsüne verilir. Aşağıdaki şekilde gösterilen tepkinin verilmesi ve özellikle 15 dakika boyunca verilen tepkinin  $\pm 1\%$  aralığında muhafaza edilmesi beklenir [37].

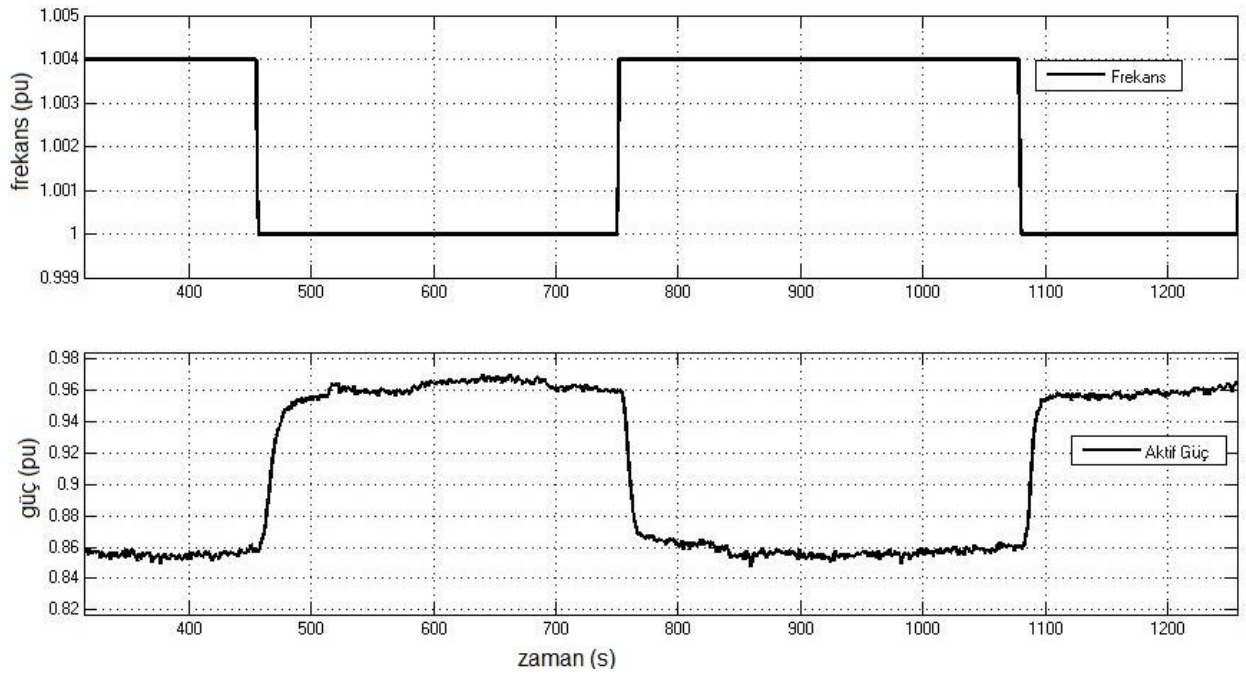


Şekil 4.30. Rezerv testinde beklenen ünite tepkisi

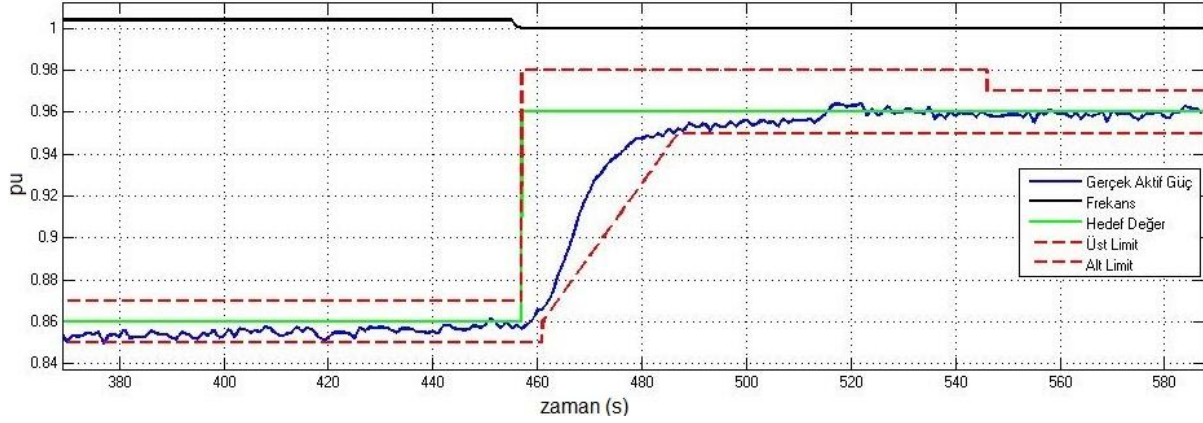
$\Delta t_d$  = Ünitenin hız değişimine vereceği tepkiye başlama süresi

#### 4.3.2. Primer-frekans kontrolü rezerv testleri

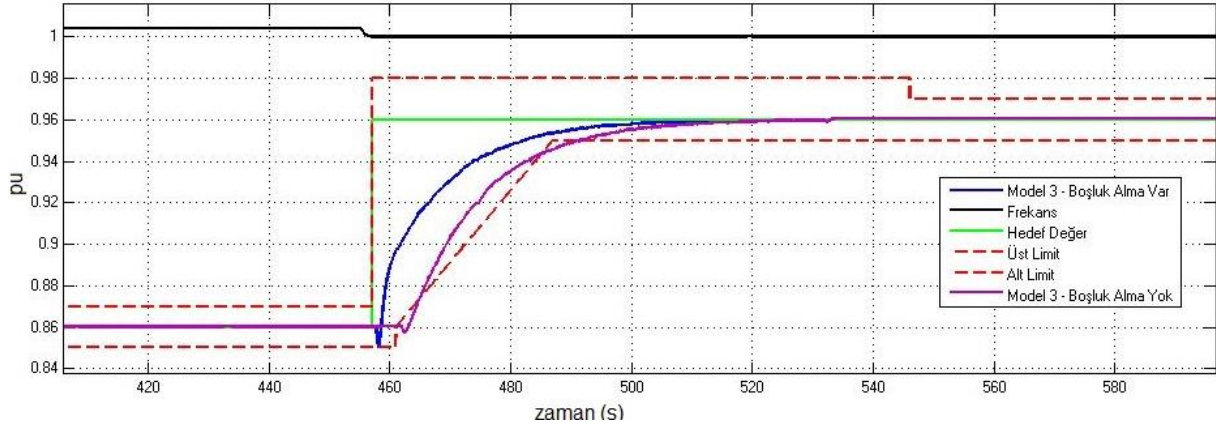
Primer-frekans testleri aşağıdaki tablodaki değerler kullanılarak Gezende HES ünite 1'de primer-frekans kontrol testi yapılmıştır.



Şekil 4.31. Rezerv testlerinde ünitenin davranışı



Şekil 4.32.  $\Delta f=-200$  mHz rezerv testi



Şekil 4.33.  $\Delta f=-200$  mHz rezerv testi model sonuçları

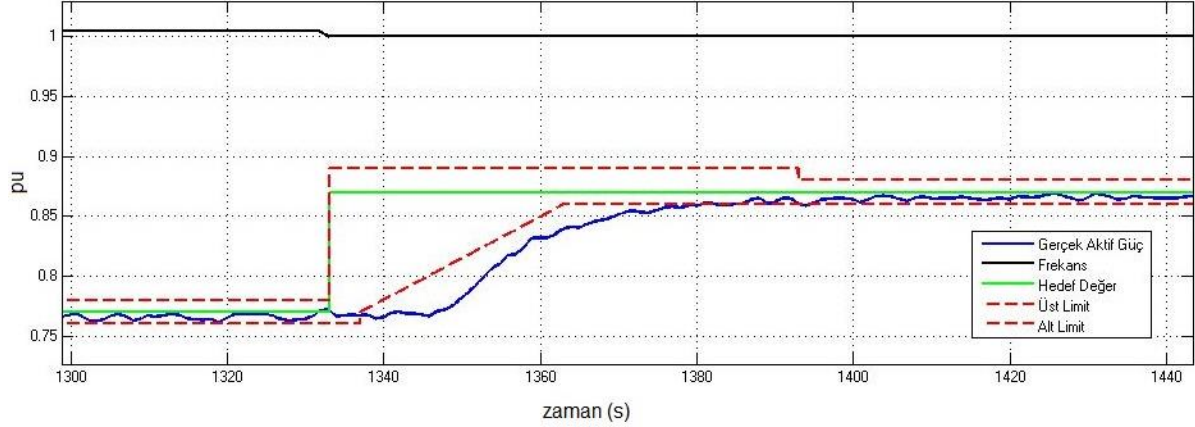
### 4.3.3. Primer-frekans rezerv test sonucunun değerlendirilmesi

Gezende HES Primer-frekans testleri sonucunda ünitenin, Şekil 4.31'den de görüleceği üzere  $\Delta f=+200$ mHz olarak basamak değişikliği halindeki frekans sapmalarına karşılık gerekli rezerv miktarını sağladığı, sağladığı rezerv miktarını test boyunca sürdürdüğü, frekans sapmasına uygun olarak çıkış gücünü beklenen tepki grafiğine uygun olarak değiştirdiği görülmüştür.

Yine aynı şekilde Şekil 4.32'den de görüleceği üzere test tepkisini kriterlere uygun olarak 4s içinde verdiği görülmüştür.

Şekil 4.33'de ise test sırasındaki beklenen durum ile model sonuçları karşılaştırılmıştır.

“Boşluk Alma” bloğunun eklendiği Model 3’ün test tepkisini kriterlere uygun olarak verdiği görülmüştür. “Boşluk Alma” bloğunun eklenmediği Model 3 ise test tepkisini kriterlere uygun olarak verememiştir. Servomotor ile ayar kanatları arasındaki boşluk yüzünden tepkisi geç kalmıştır. Dolayısıyla bu testi geçemeyeceği görülmüştür.



Şekil 4.34.  $\Delta f = -200$  mHz rezerv testi gerçek hız regülatöründe “Boşluk Alma” bloğu yok

“Boşluk Alma” bloğu eklenmeden önceki gerçek hız regülatörünün -200 mHz frekans değişimine tepkisi Şekil 4.34’de gösterilmektedir. Şekil 4.34’den de görüleceği üzere sistemde var olan boşluklardan dolayı güç tepkisinin verilmesi beklenen tepki süresinden fazla sürmektedir. Gezende HES’deki hız regülatörü bu hali ile “TEİAŞ Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”ne göre primer-frekans kontrol kriterlerini sağlayamamaktadır.

Ancak model ortamında geliştirilen “Boşluk Alma” bloğunun Gezende HES hız regülatörüne uygulanmasından sonra bu tepki süresinin iyileştiği ve Şekil 4.32’den de görüleceği gibi “TEİAŞ Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”ne göre primer-frekans kontrol kriterlerini sağladığı görülmüştür. Buradan da anlaşılacağı üzere gerçek hız regülatörüne konan “Boşluk Alma” bloğu ünitenin tepkisini iyileştirmiştir. Dolayısıyla yükümlü olduğu primer-frekans kontrol testinin rezerv testi aşamasını sağlıklı bir şekilde yerine getirmiştir.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında kullanım ömrü nedeniyle türbin ölçüm/kontrol sistemlerinde boşluklar oluşmuş hidroelektrik santrallerin performansını arttıracak bir hız regülatörü geliştirme metodu anlatılmıştır. Geliştirilen bu metot Gezende HES'e uygulanmıştır. Gezende HES'in güç tepkisinde ayar kanatları mekanik sisteminde bulunan boşluklardan ötürü gecikmeler bulunmaktadır. İlk olarak sistemin bilgisayarda matematiksel modeli oluşturulmuştur. Model parametrelerinin belirlenmesinde saha ölçümleri ve santral parametreleri kullanılmıştır. Bu aşamada, Gezende HES hız regülatörünün mekanik sistemdeki eskime ve boşlukları geleneksel modele ilave edilmiştir ve bu sayede model çıkışı ile saha ölçümleri birbirine uydurulmuştur. Boşlukların gecikme etkisinin aşılması için, kontrol sistemine ileri besleme (feed forward) ve Ziegler-Nichols alternatif yöntemleri uygulanmış ve ileri besleme yönteminin daha iyi sonuç verdiği gözlenmiştir. Güncellenen hız regülatörü PID kontrolcüsü, sahadaki gerçek kontrol sisteminde uygulanarak, hız regülatörü performansının iyileştirildiği saha ölçüm sonuçları ile doğrulanmıştır.

“TEİAŞ Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği”ne göre, hidroelektrik santrallerde 200 mHz frekans değişimi uygulandığı zaman türbin çıkış gücündeki tepkisini en fazla 4 saniye içerisinde vermesi gerekmektedir. Bu kriter karşısında modellenen kontrol sisteminin tepki süresi değerlendirildiğinde; hız regülatörü yaklaşık olarak 3 saniye gibi bir sürede tepki verdiği görülmüştür.

Özellikle Gezende HES gibi türbin mekanik sisteminde boşluklar ve aşınmalar bulunan diğer hidroelektrik santrallerinin hız regülatörü performansını artırmak için bu tezde anlatılan ileri besleme metodu kullanılabilir. Bu metodun kullanılabilmesi için türbin mekanik sisteminde varolan boşluğun büyüklüğü bilinmelidir. Bu tezde anlatılan saha testi yöntemi ile bu boşluk değeri ölçülebilir.



## KAYNAKLAR

1. Kundur, P. (1994). *Power System Stability and Control*, New York: McGraw-Hill.
2. Machowski, J., Bialek, J.W. ve Bumby J.R. (2008). *Power System Dynamics: Stability and Control*, United Kingdom: John Wiley & Sons Ltd.
3. IEC Standartları, (2004) *Guide for the Application of Turbine Governing Systems for Hydroelectric Generating Units*, New York.
4. Kishor, N., Saini, R.P. ve Singh, S.P. (2005). A Review on Hydropower Plant Models and Control. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 776–796.
5. Naghizadeh, R.A., Jazebi, S. ve Vahidi, B. (2012). Modeling Hydro Power Plants and Tuning Hydro Governors as an Educational Guideline. *International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.MO.S.)*, 5(4), 1780-1790.
6. Singh, G. ve Chauhan, D. S. (2011). Development and Simulation of Mathematical Modelling of Hydraulic Turbine. *ACEEE Int. J. on Control System and Instrumentation*, 2(2), 55-59.
7. Nanware, R.A., Sawant, S.R. ve Jadhav, B.T. (2012). Modeling of Hydraulic Turbine and Governor for Dynamic Studies of HPP. *International Conference in Recent Trends in Information Technology and Computer Science*, 6-11.
8. Hydraulic Turbine and Turbine Control Models For System Dynamic Studies. (1992). *Transactions on Power Systems*, 7(1), 167-179.
9. De Jaeger, E., Janssens, N., Malfliet, B. ve Van De Meulebroeke, F. (1994). Hydro Turbine Model for System Dynamic Studies. *IEEE Transactions on Power Systems*, 9(4), 1709-1715.
10. Gezer, D., Altay, A., Çakır, C., Nadar, A. ve Şahin, C. (2012) *A Test System for Developing Electronic Speed Governor of a Hydropower Plant*. NURER'12, Turkey.
11. Gezer, D., Şahin, C., Nadar, A. ve Altay, A. (2011) *Implementation of a Test System based on OPC Server for Development of Electronic Speed Governor in Gezende HEPP*. ELECO'11, Bursa.
12. Güner, E., Tör, O.B., Altın, M. ve Nadar, A. (2008). *Küçük Hidrolik Santrallerin Projelendirilmesinde Göz Önünde Bulundurulması Gereken Bazı Temel Hususlar*. Eleco 2008, Bursa.
13. Cebeci, M.E., Tör, O.B., Yılmaz, O., Nadar, A. ve Güner, E. (2008). *Nehir-Tipi Hidroelektrik Santrallerin Kararlı ve Güvenli Çalışma Sınırlarını Belirleyen Faktörler*. Eleco 2008, Bursa.

14. Hannett, L.N., Feltes, J.W., Fardanesh, B. ve Crean, W. (1999). Modeling And Control Tuning Of A Hydro Station With Units Sharing A Common Penstock Section. *IEEE Transactions on Power Systems*, 14(10), 1407-1414.
15. Hovey, L.M. (1962). Optimum Adjustment of Hydro Governors on Manitoba Hydro System. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Part III*, 81(3), 581-586.
16. Wozniak, L. (1990). A Graphical Approach to Hydrogenerator Governor Tuning. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 3(4), 417-421.
17. Kamwa, I., Lefebvre, D. ve Loud, L. (2002). Small Signal Analysis of Hydro-Turbine Governors in Large Interconnected Power Plants. *Power Engineering Society Winter Meeting*, 2, 1178-1183.
18. Herron, J. ve Wozniak, L. (1991). A State-Space Pressure And Speed Sensing Governor For Hydrogenerators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 6(3), 414-418.
19. Li, Z. ve Malik, O.P. (1997). An Orthogonal Test Approach Based Control Parameter Optimization and Its Application To A Hydro-Turbine Governor. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 12(4), 388-393.
20. Vournas, C.D. ve Zaharakis, A. (1993). Hydro Turbine Transfer Functions With Hydraulic Coupling. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 8(3), 527-532.
21. Tripathy, S.C. (1998). Digital Governor for Use in Computer Control of a Generating Unit. *Energy Conversion and Management*. 39(10), 973-983.
22. Luqing, Y., Shouping, W., Zhaohui, L., Malik, O.P. ve Hope, G.S. (1990). Field Tests and Operation of a Duplicate Multiprocessor-Based Governor For Water Turbine and Its Further Development. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 5(2), 225-231.
23. Oldenburger, R. ve Donelson, J. (1962). Dynamic Response of a Hydroelectric Plant. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Part III*, 81(3), 403-418
24. Undrill, J.M. ve Woodward, J.L. (1967). Nonlinear Hydro Governing Model and Improved Calculation for Determining Temporary Droop. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 86(4), 443-453.
25. Hannett, L.N., Feltes, J.W. ve Fardanesh, B. (1994). Field Tests to Validate Hydro Turbine-Governor Model Structure and Parameters. *IEEE Transactions on Power System*, 9(4), 1744-1751.
26. Mahmoud, M., Dutton, K. ve Denman, M. (2004). Dynamical Modelling and Simulation of a Cascaded Reservoirs Hydropower Plant. *Electric Power Systems Research*, 70, 129-139.



27. Murphy, L.D., Wozniak, L. ve Whittemore, T.A. (1988). A Digital Governor for Hydrogenerators. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 3(4), 780-784.
28. Eilts, L.E. ve Schleif, F.R. (1977). Governing Features and Performance of The First 600-MW Hydrogenerating Unit at Grand Coulee. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 96(2), 457-466.
29. Jones, D.I., Mansoor, S.P., Aris, F.C., Jones, G.R., Bradley D.A. ve King, D.J. (2004). A Standard Method For Specifying The Response Of Hydroelectric Plant In Frequency-Control Mode. *Electric Power Systems Research* 68, 19-32.
30. Singh, G. ve Chauhan, D.S. (2011). Simulation and Modeling of Hydro Power Plant to Study Time Response During Different Gate States. *International Journal of Advanced Engineering Sciences And Technologies*, 10(1), 42-47.
31. Demirhan, A.Y. (2006). *Küçük Hidroelektrik Santrallerde Türbin Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
32. Başeşme H. (1980). *Hidroelektrik Santraller ve Hidroelektrik Santral Tesisleri*, Ankara: Tek Yayınevi
33. İnternet: Tekno Tasarım. Hidroelektrik Enerji ve Türbinler. URL: [http://download.teknotasarim.com/urun\\_katalog/HIDROELEKTRIK\\_ENERJI\\_TURBINLER.pdf](http://download.teknotasarim.com/urun_katalog/HIDROELEKTRIK_ENERJI_TURBINLER.pdf), Son Erişim Tarihi: 13.02.2015.
34. Gençoğlu, C. (2010). *Assessment Of The Effect Of Hydroelectric Power Plants' Governor Settings On Low Frequency Inter Area Oscillations*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
35. İnternet: Wikipedia. (Şubat, 2013). Water Turbine, URL: [http://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_turbine](http://en.wikipedia.org/wiki/Water_turbine), Son Erişim Tarihi: 13.02.2015.
36. İnternet: TEİAŞ, Türkiye Elektrik Enerjisi Kuruluş ve Yakıt Cinslerine Göre Kurulu Güç. URL: <http://www.teias.gov.tr/YukTevziRaporlari.aspx>, Son Erişim Tarihi: 13.02.2015.
37. TEİAŞ (2009). *Primer Frekans Kontrol Hizmetinin Uygulanmasına İlişkin El Kitabı*, Ankara:TEİAŞ.
38. Ogata, K. (1996). *Modern Control Engineering*, New Jersey:Prentice Hall.

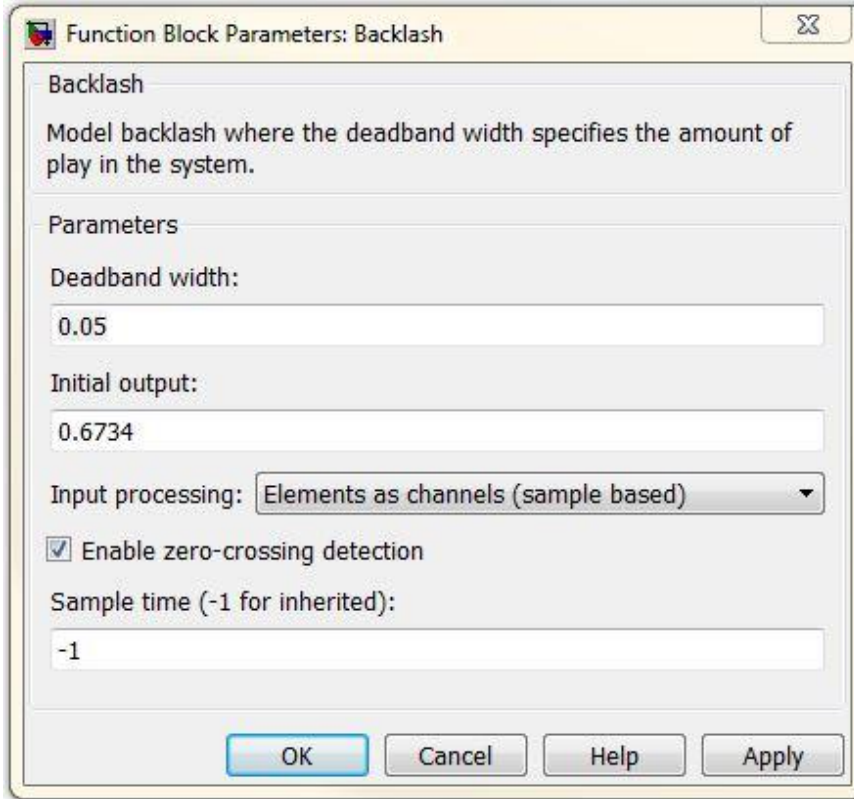


**EKLER**

## EK-1. Matlab/Simulink model parametreleri

$W_{base}$	53125000 W
$VA_{base}$	62500000 VA
$H_r$	154 m
$U_r$	1,9659 m/s
$L$	548,23 m
$T_w$	0,7134 s
$T_m$	6,867 s
$H_0$	1 pu
$f_p$	0,001
$D$	0,5
$R_p$	0,04
$T_p$	0,1
$T_s$	0,5
$K_p$	2
$K_I$	1,3
$K_D$	0
$V_s$	0,04167 pu/sn
$\omega_{ref}$	1 pu
$U_{NL}$	0,0177 m/s

## EK-2. “Backlash” bloğunun parametre ayarı



Function Block Parameters: Backlash

Backlash

Model backlash where the deadband width specifies the amount of play in the system.

Parameters

Deadband width:  
0.05

Initial output:  
0.6734

Input processing: Elements as channels (sample based)

Enable zero-crossing detection

Sample time (-1 for inherited):  
-1

OK Cancel Help Apply

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ALTAY, Abdullah  
 Uyuğu : T.C.  
 Doğum tarihi ve yeri : 15.06.1987, Samsun  
 Medeni hali : Bekar  
 Telefon : 0 (312) 2101830-1626  
 Faks : 0 (312) 2101033  
 E-Posta : abduallah.altay@tubitak.gov.tr



### Eğitim

Derece	Okul/Program	Mezuniyet tarihi
Lisans	Kocaeli Üniversitesi/Elektrik Mühendisliği	2010
Lise	Samsun 100. Yıl Lisesi	2005

### İş Deneyimi

Yıl	Çalıştığı Yer	Görev
2011-2012	TÜBİTAK Uzay Güç Sistemleri Birimi	Araştırmacı
2012-Halen	TÜBİTAK MAM EE Ankara Birimi	Araştırmacı

### Yabancı Dil

İngilizce

### Yayınlar

Gezer, D., Şahin, C., Nadar, A., ve Altay, A. (2011) *Implementation of a Test System based on OPC Server for Development of Electronic Speed Governor in Gezende HEPP*. ELECO'11, Bursa.

Gezer, D., Şahin, C., Nadar, A., Altay, A. ve Çakır, C. "Gezende HES' teki Yeni Elektronik Hız Regülatörünün Geliştirilmesi için OPC Sunucu Tabanlı Test Sisteminin Kurulumu", Türkiye'de ve Dünyada Otomasyon Dergisi, Nisan 2012.

Gezer, D., Altay, A., Çakır, C., Nadar, A., Şahin, C. (2012) *A Test System for Developing Electronic Speed Governor of a Hydropower Plant*. NURER'12, Turkey.

### Hobiler

Futbol, Sinema, Bilgisayar Oyunları, Masa Tenisi, Bowling



*GAZİ GELECEKTİR..*