

HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE NET DÜŞÜ DEĞİŞİMİNİN AKTİF GÜÇ ÇIKIŞI  
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Fatih ERAYDIN

Kütahya Dumlupınar Üniversitesi  
Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliği Uyarınca  
Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
Olarak Hazırlanmıştır.

Danışman: Doç. Dr. Celal YAŞAR

Temmuz- 2019

## KABUL VE ONAY SAYFASI

Fatih ERAYDIN'ın YÜKSEK LİSANS tezi olarak hazırladığı "Hidroelektrik Santrallerde Net Düşü Değişiminin Aktif Güç Çıkışı Üzerine Etkisinin İncelenmesi" başlıklı bu çalışma, jürimizce Dumlupınar Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin ilgili maddeleri uyarınca değerlendirilerek kabul edilmiştir.

11/07/2019

Prof. Dr. Önder UYSAL  
Enstitü Müdürü, Fen Bilimleri Enstitüsü

Prof. Dr. Mehmet Ali EBEOĞLU  
Anabilim Dalı Başkanı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği

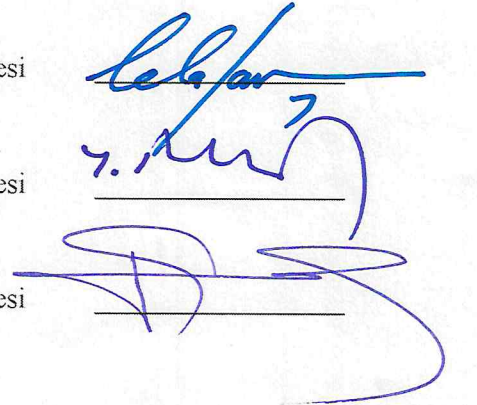
Doç. Dr. Celal YAŞAR  
Danışman, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Sınav Komitesi Üyeleri

Doç. Dr. Celal YAŞAR  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Dumlupınar Üniversitesi

Prof. Dr. Yılmaz ASLAN  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Dumlupınar Üniversitesi

Doç. Dr. Eyyüp GÜLBANDILAR  
Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Dumlupınar Üniversitesi



## ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANI

Bu tezin hazırlanmasında Akademik kurallara riayet ettiğimizi, özgün bir çalışma olduğunu ve yapılan tez çalışmasının bilimsel etik ilke ve kurallara uygun olduğunu, çalışma kapsamında teze ait olmayan veriler için kaynak gösterildiğini ve kaynaklar dizininde belirtildiğini, Yüksek Öğretim Kurulu tarafından kullanılmak üzere önerilen ve Dumlupınar Üniversitesi tarafından kullanılan İntihal Programı ile tarandığını ve benzerlik oranının % 12 çıktığını beyan ederiz. Aykırı bir durum ortaya çıktığı takdirde tüm hukuki sonuçlara razı olduğumuzu taahhüt ederiz.



Doç. Dr. Celal YAŞAR



Fatih ERAYDIN

# HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE NET DÜŞÜ DEĞİŞİMİNİN AKTİF GÜÇ ÇIKIŞI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Fatih ERAYDIN

Elektrik -Elektronik Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi, 2019

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Celal YAŞAR

## ÖZET

Bu tezde dar rezervuar hacmine ve küçük net düşü aralığına sahip hidroelektrik santrallerin (HES) aktif güç üretim dengesizliklerini azaltmak için yapay sinir ağlarından (YSA) faydalanılan farklı bir yaklaşım sunulmuştur. Çalışmada önce hidroelektrik santrallerden ve santrallerde kullanılan türbin tiplerinden bahsedilmiş ve sonra hız regülatörlerinde kullanılan kontrol yöntemlerine değinilmiştir. İlave olarak hidroelektrik santrallerde net düşü gibi aktif güç üretimini olumsuz etkileyen bazı çevresel etkilerden bahsedilmiştir. Uygulama yapılacak HES için ileri beslemeli geri yayımlı YSA kullanılmıştır. HES'te paralel çalışan senkron generatörler birbirlerini etkileyeceklerinden, tasarlanan YSA'lar her bir senkron generatör için ayrı ayrı eğitilmiştir. Ağ yapılarının tamamında ortalama karesel hata oranı (MSE) performans fonksiyonu olarak kullanılmıştır. Denetleyici kontrol ve veri toplama sistemi (SCADA) verileri minimum-maksimum normalizasyon yöntemi kullanılarak normalize edilmiştir. Normalizasyon işleminden sonra bu veriler YSA eğitim ve test verileri olarak kullanılmıştır.

Elde edilen en iyi sonuçlar farklı eğitim fonksiyonları ile de test edilmiş, farklı YSA modeliyle eğitilerek mümkün olan en iyi sonucun elde edilmesi hedeflenmiştir. Yapılan denemelerde en iyi sonuç alınan YSA ağ yapısı; birinci senkron generatör için çok katmanlı, performans fonksiyonu MSE, eğitim fonksiyonu trainlm, gizli katmanlarında logaritmik-sigmoid ve çıkış katmanında da lineer aktivasyon fonksiyonu kullanan yapı olmuştur. İkinci senkron generatör için en iyi sonuç alınan YSA yapısı ise; çok katmanlı, performans fonksiyonu MSE, eğitim fonksiyonu trainlm, gizli katmanlarında tanjant-sigmoid ve çıkış katmanında tanjant-sigmoid aktivasyon fonksiyonu olan yapı olmuştur. En iyi sonuç veren ağ yapıları test edilerek elde edilen sonuçlar çizelgeler halinde verilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Değişken net düşü, Hidroelektrik Santral, Yapay sinir ağları.

## **THE INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NET HEAD VARIATION ON ACTIVE POWER OUTPUT IN HYDROELECTRIC POWER PLANTS**

Fatih ERAYDIN

Electric - Electronic Engineering, M. Sc. Thesis, 2019

Thesis Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Celal YAŞAR

### **SUMMARY**

In this thesis, a different approach using artificial neural networks (ANN) to reduce active power generation imbalances of hydroelectric power plants (HEPP) with narrow reservoir volume and small net head range is presented. In this study, firstly hydroelectric power plants and turbine types used in power plants are mentioned and then the control methods used in speed regulators are mentioned. In addition, some environmental impacts that negatively affect active power generation, such as net head fall in hydroelectric power plants, are mentioned. The Feed Forward Back Propagation ANN was used for the HEPP to be applied. Since the synchronous generators operating in parallel in HEPP will affect each other, the designed ANNs are trained separately for each synchronous generator. The mean square error rate (MSE) was used as a performance function in all network structures. Supervisory Control and Data Acquisition (SCADA) data was normalized using the minimum-maximum normalization method. After normalization, these data were used as ANN training and test data.

The best results were tested with different training functions, and it was aimed to obtain the best possible result by training with different ANN models. The best results were obtained in the ANN network. The first synchronous generator has been multi-layered, the performance function is MSE, the training function is trainlm, the logarithmic-sigmoid in the hidden layers and the linear activation function in the output layer. The best results for the second synchronous generator ANN structure; The structure has been multilayer, performance function MSE, training function trainlm, tangent-sigmoid in hidden layers and tangent-sigmoid activation function in output layer. The best results obtained by testing the network structures are presented in tables and the results are discussed.

**Keywords:** Variable net head, Hydroelectric Power Plant. Artificial neural networks.

## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmamda karşılaştığım sorunları çözmemde her zaman yardımcı olan, ihtiyaç duyduğum motivasyonu ve akademik bakış açısını kazandırmaya çalışan her daim destek olan sayın tez danışmanım Doç Dr. Celal YAŞAR'a tavsiyelerde bulunan tez jüri üyelerimiz Prof. Dr. Yılmaz ASLAN ve Doç. Dr. Eyyüp GÜLBANDILAR' a, hiçbir zaman desteğini esirgemeyen değerli dostum Yük. Müh. Yunus Emre YAĞAN'a Lisans ve Yüksek Lisans eğitimimde büyük emekleri olan bölümümüzün değerli hocalarına ve bu günlere ulaşmamda büyük pay sahibi olan kıymetli aileme en içten dileklerle teşekkürlerimi sunarım.



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖZET .....	v
SUMMARY .....	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ .....	xii
1. GİRİŞ .....	1
2. REZERVUARLI HİDROELEKTRİK SANTRALLER İÇİN TÜRBİN SEÇİMİ VE NET DÜŞÜ ETKİSİ .....	5
2.1. Hidroelektrik Santraller.....	5
2.2. Suyun Etki Şekline Göre Türbinler.....	6
2.2.1. Etki türbinleri .....	7
2.2.2. Tepki türbinleri.....	8
2.2. Hidroelektrik Santraller için Dikkate Alınacak İlave Hususlar .....	12
2.2.1. Net düşü ve akarsu yatağındaki yan dere potansiyeli .....	12
2.2.2. Akarsu yatağındaki yan dere potansiyeli.....	13
2.2.3. Kavitasyon .....	13
2.2.4. Çöp faktörü .....	14
3. HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE SCADA SİSTEMİ VE FREKANS İLİŞKİSİ .....	15
3.1. Türbin Hız Regülatörü Kontrolü .....	16
3.1.1. PID kontrol yöntemi.....	16
3.2. Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolü .....	18
3.2.1. Primer frekans kontrolü (PFK) .....	19
3.2.2. Sekonder frekans kontrolü (SFK) .....	20
3.2.3. Tersiyer kontrol (TK).....	21
3.3. Yapay Sinir Ağları (YSA) .....	23
3.3.1. Yapay nöron modeli .....	23
3.3.2. İleri beslemeli yapay sinir ağları.....	24
3.3.3. Geri yayımlı yapay sinir ağları .....	26
4. GÖL SEVİYESİNİN AKTİF GÜÇ ÇIKIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ .....	30
4.1. Uygulama Yapılacak HES'in Özellikleri .....	30
4.2. Göl seviyesinin Aktif Güç Çıkışı Üzerindeki Etkisi .....	30

**İÇİNDEKİLER (devam)****Sayfa**

4.3. Eğitim Verilerinin Seçilme ve Sisteme Dahil Edilme Yöntemi .....	30
4.3.1. YSA ile $P_{SET}$ değeri tahmin etme .....	32
4.3.2. Birinci senkron generatörün tek başına çalışırken $P_{SET}$ değerini tahmin eden YSA .....	34
4.3.3. İkinci senkron generatör tek başına çalışırken $P_{SET}$ değeri tahmini yapan YSA ...	39
4.4. Santral Kurulumundaki Değerlerle ve Güncel Değerlerin Karşılaştırılması.....	44
5. SONUÇ VE ÖNERİLER .....	47
KAYNAKLAR DİZİNİ.....	49
ÖZGEÇMİŞ	

## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Rezervuarlı hidroelektrik santrali genel düzeni .....	5
2.2. Pelton tipi hidrolik türbine ait nozul .....	8
2.3. Francis türbin ve bağlı sistemlerin genel görünümü .....	10
2.4. Kaplan tipi türbin görünümü .....	11
3.1. İki senkron generatörlü hidroelektrik santrali organizasyon şeması .....	15
3.2. Basit bir kontrol sistemi blok diyagramı .....	16
3.3. Geri beslemeli kapalı çevrim kontrol sistemi.....	17
3.4. PID kontrollü hız regülatörlerine ait basit prensip şeması .....	18
3.5. Kontrol işleyiş düzeni .....	21
3.6. Frekans kontrolü blok diyagramı .....	22
3.7. Kontrollerin zamana göre çalışması.....	22
3.8. Biyolojik nöron yapısı.....	23
3.9. Tek girişli nöron modeli .....	24
3.10. İleri beslemeli YSA modeli .....	25
3.11. İki katmanlı, ileri beslemeli bir YSA .....	26
4.1. Basitleştirilmiş $P_{SET}$ değeri işleyiş düzeni .....	32
4.2. YSA ile SCADA $P_{SET}$ değerini belirleyen algoritmanın akış diyagramı.....	33
4.3. Birinci senkron generatör $P_{SET}$ değeri tahmini yapan YSA [logaritmik-sigmoid (6 nöron), logaritmik-sigmoid (8 nöron), lineer (1 nöron)].....	35
4.4. Seçilen ağın nntool genel yapısı.....	36
4.5. YSA Modeli için regresyon analizi .....	37
4.6. Senkron Generatör 2'nin $P_{SET}$ değerini tahmin eden YSA [tanjant-sigmoid (9 nöron), tanjant-sigmoid (7 nöron), tanjant-sigmoid (1 nöron)] .....	40
4.7. Seçilen ağın nntool genel yapısı.....	42
4.8. YSA Modeli için regresyon analizi .....	42
4.9. HES için başlangıçtaki ve 10 yıl sonraki işletme değerleri farkı .....	46

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Şekil 2.1’de verilen HES kısımlarının numara ve açıklamaları. ....	6
2.2. HES’lerin sınıflandırılması. ....	7
3.1. Mekanik hıza bağlı generatör momentleri ve sistem frekansı değişimi . ....	19
3.2. YSA’ da kullanılan çeşitli aktivasyon fonksiyonları. ....	27
4.1. YSA eğitiminde kullanılan örnek santral değerleri. ....	31
4.2. Birinci senkron generatör set değeri tahmini için % hata tablosu. ....	35
4.3. Birinci senkron generatör $P_{SET}$ değeri tahmin sonuçları (logaritmik-sigmoid (6 nöron), logaritmik-sigmoid (8 nöron), lineer (1 nöron)).....	38
4.4. İkinci senkron generatör set değeri tahmini için % hata tablosu.....	39
4.5. Aktif güç set değeri tahmininin trainbr fonksiyonu kullanıldığında % hata değişimi.....	41
4.6. Senkron Generatör 2’nin $P_{SET}$ değeri tahmin sonuçları [tanjant-sigmoid (9 nöron), tanjant-sigmoid (7 nöron), tanjant-sigmoid (1 nöron)]. ....	43
4.7. Hill-Chart üzerindeki bazı işletme değerleri. ....	44
4.8. Kurulumundan 10 yıl sonraki net düşü ve aktif güç değerleri. ....	45

**SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ**

<b><u>Kısaltmalar</u></b>	<b><u>Açıklama</u></b>
YSA	Yapay Sinir Ağı
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
MSE	Ortalama Kareysel Hata (Mean Square Error)
HES	Hidroelektrik Santral
kWh	Mega Watt Saat
NNTOOL	Neural Network Toolbox
MWh	Mega Watt Saat
MTU	Merkezi Kontrol Birimi
RTU	Uzak Uç Kontrol Birimi
PID	Oransal+İntegral+Türev Kontrol yapısı (Proportional Integral Derivative)
PFK	Primer Frekans Kontrol Yöntemi,
SFK	Sekonder Frekans Kontrol Yöntemi
ENTSO-E	Avrupa Elektrik İletim Sistemi İşletmecileri Ağı (European Network of Transmission System Operators for Electricity)

## 1. GİRİŞ

Elektrik enerjisi günümüzde yaşamın vazgeçilmez bir parçasıdır. Artan dünya nüfusu ve tüketim alışkanlıkları enerjiye olan ihtiyacı artırmaktadır. Bu nedenle ülkelerin gelişmişlik düzeyini gösteren faktörlerden biri de elektrik enerjisinin üretim potansiyeli ve çeşitliliğidir. Ülkemizde elektrik enerjisine olan ihtiyaç artan nüfus ve sanayileşme nedeniyle artarak devam etmektedir. Ülkemizdeki elektrik tüketimi 2017 yılında bir önceki yıla göre %5,6 artarak 294,9 milyar kWh olarak gerçekleşmiştir. Bu tüketimin yaklaşık % 20'lik kısmı akarsu ve barajlardan üretilen elektrik enerjisinden karşılanmıştır (Enerji Bakanlığı, 2019).

Elektrik enerjisi, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilebileceği gibi fosil kaynaklardan da üretilmektedir. Termik, doğalgaz, fueloil gibi santraller fosil kaynaklı santrallere örnektir. Bunun yanında hidroelektrik santraller (HES), jeotermal, rüzgar ve güneş santralleri yenilenebilir enerji kaynaklı santrallere örnek olarak gösterilebilir. Günümüzde elektrik enerjisi üretiminde yakıt olarak hammaddeye ihtiyaç duyulmaması ve üretim neticesinde zararlı atık oluşmaması nedeniyle, yenilenebilir enerji kaynaklı üretim yöntemleri daha çok tercih edilmektedir.

Elektrik üretim tesisleri genel olarak iki kısımdan oluşur. Bunlardan birincisi; mekanik gücü sağlayacak tahrik sistemi, ikincisi ise mekanik gücü elektrik enerjisine dönüştürecek elektromekanik sistemdir. Bunların dışındaki üretim tesisindeki diğer tüm birimler yardımcı sistem olarak enerji üretimine destek sağlamaktadırlar. HES'ler, yenilenebilir enerji santralleri içerisinde hem yüksek kurulu güçleri hem de arz güvenliği avantajları ile ön plana çıkmaktadırlar. HES'ler sahip oldukları su kaynağının enerji potansiyeli dikkate alınarak tasarlanırlar ve kurulurlar. Suyun mekanik gücü, türbin vasıtası ile kullanılmaktadır. Su kaynağının debisi ve düşü yüksekliği gibi karakteristik özellikleri farklı türbin tiplerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır. Sonuçta türbin tiplerindeki çeşitlilik daha verimli elektrik enerji üretilbilmesine olanak sağlamaktadır.

HES'lerde enerji üretmek amacıyla kullanılacak su; doğrudan veya depo edilip kullanılabilir. Bu durumlara göre suyun doğrudan kullanıldığı santrallere nehir tipi, depo edilip kullanıldığı santrallere de rezervuarlı HES'ler denilir. Rezervuarlı HES'ler kullanacakları suyun tamamını veya bir kısmını rezervuarda biriktirirler. Rezervuardaki kullanılabilir su potansiyelinin yüksekliği ise net düşü olarak adlandırılır. Rezervuar hacmi küçük olan barajlarda net düşü seviyesi su miktarına bağlı olarak hızlı değişim gösterebilir. Rezervuardaki suyun seviyesi değiştiğinde sahip olduğu potansiyelde değişir. Bu değişim üretim yapan tahrik makinasının ürettiği

mekanik gücünde etkiler. Ama işletme şartlarında ise, net düşü değışse bile üretilen enerjinin değışmemesi istenebilir.

HES'lerde üretilen aktif gücün verimli hale gelmesi için gerçekleştirilen bu çalışmada yapılan literatür taramasında konuyla ilgili bazı çalışmalara rastlanmıştır. Bu çalışmalar aşağıdaki gibi özetlenebilir.

Gözde ve Taplamacıoğlu 2009'da yaptıkları çalışmada; nehir tipi bir hidroelektrik santral modeli üzerinde klasik integral kontrolör (proportional integral-PI) ve bulanık mantık kontrolör kullanarak yük -frekans kontrolü simülasyonu gerçekleştirmişlerdir. Simülasyon sonuçlarına bakıldığında, bulanık mantık kontrolöründe frekans sapmasının negatif ve pozitif maksimum aşımının daha küçük ve oturma zamanının da daha kısa olması sebebiyle klasik integral PI'den daha iyi performans gösterdiği görülmüştür (Gözde ve Taplamacıoğlu, 2009).

Michaud ve Robert 2010 yılında yaptıkları çalışmada, ileri beslemeli PI kontrol yöntemi ile kararlılık-tabanlı kontrol yöntemini karşılaştırmışlardır. Çok uzun cebri boruya ve denge bacasına sahip HES'lerde meydana gelen su salınımları; klasik oransal integral türevsel (PID) kontrol yöntemi hız regülatörünün kontrol edilmesinde yeterli olamamaktadır. Kararlılık kontrol yöntemi temelinde, sabit çıkış için hedef takibi stratejisi kullanır. Sistemin hedef değeri olan aktif güç ile sabit çıkış ilişkilendirilerek gerçek değeri ile farkı alınır ve PID kontrol girişı olarak kullanılır. Takipteki doğrusal çıkış kullanılarak hız kontrolörü çıkışı olan ayar kanadı açıklığı değeri elde edilir. Daha sonra PID çıkışı ile toplanarak genel kontrol çıkışı elde edilir. PI kontrolörün tek başına uygulandığı yapıya göre 1. ve 4. aşım yüzdelerinde daha iyi sonuç alındığı görülmüştür. Elde edilen bu iyileşme sensör gibi donanım değışikliği olmadan sadece yazılım değışikliği ile elde edilmiştir (Michaud ve Robert, 2010).

Hız düzenleyici performansını bazı dış etkileri dâhil ederek artırma yaklaşımları da vardır. Bu amaçla Eker (2003), çalışmasında hız regülatörleri için tek girişı ve çok çıkışı olan yapıyı önermiştir. Doğrusal olmayan türbin modelini bazı dalga etkileri, sudaki koç darbesi ve esnek olmayan cebri borular gibi etkileri de dahil ederek genişletmiştir. Ulaşılan değerler ile klasik PI ve PID yapılarını da karşılaştırmıştır. Yaptığı çalışmasında düzensiz kısımlar olsa da önemli derecede performans iyileştirmesi sağlayabilmiştir (Eker, 2003).

Abdolmaleki ve arkadaşları (2007), sağlam bir bulanık mantık yöntemi ile parametreleri belirlenen PI kontrolör yapısı ile sabit parametrelerin olduğu PI kontrolörü karşılaştırmışlardır. Yöntemin uygulandığı bir barajda yük değışimine frekansın verdiği tepki yüzde aşım olarak azaltılmıştır. %10 frekans değışiminde %2'lik aşım görülürken, bulanık mantık uygulandığında

%0,8 bir aşım olduğu görülmüştür. %100'lük yük değişimde bulanık PI kontrolcünün tepki hızı PI kontrolcünün %50 kadardır. Bu nedenle, bulanık mantık kontrol cihazı, hidroelektrik santralinde yük değişimi koşullarında sistem kararlılığını iyileştirmektedir (Abdolmaleki vd. 2007).

Hidrotermal bir sistemin hız regülatörü kontrolünün hidrotürbin hız regülatörlerinin mekanik ve elektriksel hız regülatörleri dikkate alınmıştır. Aynı zamanda termal sistemli santrallerdeki tekrar ısıtılmalı türbinlerin kullandığı klasik integral kontrolcü ve PI kontrolör performansı karşılaştırılmıştır. Mekanik hız regülatörü geçici durum tepki değerini doğru seçmenin sistem kararlılığı için önemli olduğu gözlenmiştir. Elektrik ve mekanik hız regülatörü oturma zamanı tepkisi yaklaşık aynıdır, ancak mekanik sistemdeki kararsız yapı çok daha fazla gözlenmiştir. Basit integral kontrolör ile PI kontrolör arasında dikkate değer bir fark yoktur ancak hidrolik ve termal katkı olduğunda türbindeki oturma süresi daha da uzamıştır (Nanda vd., 2010).

Oysal ve arkadaşları (2004), ortaya koydukları çalışmada önerdikleri kontrolör; yapay sinir ağı ve bulanık mantığın olumlu yönlerini kullanacak yapıdadır. Bu kontrolör akıllı denetim sağlayan bir frekans denetleyicisidir. İntegratörler gibi dinamik elemanlar içeren bir dinamik bulanık ağ (DBA) yük frekans denetimi sağlamak için kullanılmıştır. Bu şekilde yük frekans denetimi açısından iyileştirme yapılmakta ve oluşabilecek maddi zarar azaltılabilmektedir (Oysal vd., 2004).

Yapılan literatür araştırmasında HES'lerde kullanılan hız regülatörleri için farklı önerilerin ileri sürüldüğü görülmüştür. Literatürdeki çalışmalar, genel itibari ile HES'lerin ürettiği enerjiyi kontrol eden bu hız regülatörlerinin, yazılımsal ve matematiksel işleyişi üzerinde değişiklikler öngörmektedir. Bu tez çalışmasında, hız regülatörleri ile birlikte enerji üretimini olumsuz etkileyen faktörler incelenmiştir ve net düşü değişiminin etkisi üzerinde durulmuştur. Fiziksel ve çevresel bir etki olan net düşü değişimi; rezervuar su seviyesinin en az ve en yüksek olduğu anlarda açıkça etkili olmaktadır. Bu çalışmada farklı olarak, aktif güç üretimini olumsuz yönde etkileyen net düşü değişiminin; hız regülatörü yapısında herhangi bir değişiklik yapılmadan Yapay Sinir Ağı (YSA) kullanımı ile ortadan kaldırılması veya mümkün olduğunca azaltılması istenmiştir. Bu amaçla tez çalışmasında İleri Beslemeli Geri Yayılımlı Yapay Sinir Ağı algoritması kullanılmıştır.

İkinci bölümde bu teze konu olan net düşü değişiminin daha iyi anlaşılabilmesi için HES'lerin yapısından ve üretimde kullanılacak türbinlerin seçilme kriterlerinden bahsedilmiştir.

Üçüncü bölümde hız regülatörlerinde kullanılan PID kontrol yöntemlerine değinilmiştir. PID kontrol ile hız regülatörü türbinin hızını kontrol eder. Bu sayede aktif güç üretimi de kontrol edilir. Bu bölümde ayrıca aktif güç üretimi ile sağlanan frekans kontrol yöntemlerinden de bahsedilmiştir.

Dördüncü bölüm uygulamanın nasıl yapıldığının anlatıldığı bölümdür. Kullanılan yöntemde Matlab Neural Network Toolbox (nntool) ara yüzü kullanılarak birçok YSA modeli tasarımı ve uygulamaları gerçekleştirilmiştir. YSA'ya ait eğitim fonksiyonu, gizli katman sayıları, gizli katmanlardaki nöron sayıları ve katmanlara ait aktivasyon fonksiyonları gibi parametreler istenilen sonuç için deneme yanılma yolu ile belirlenmiştir. Elde edilen YSA modeli kullanılarak farklı zaman dilimine ait SCADA verileri test edilmiştir. Sonuçta ise üretim kaybı başarılı sayılabilecek ölçüde minimize edilmiştir.

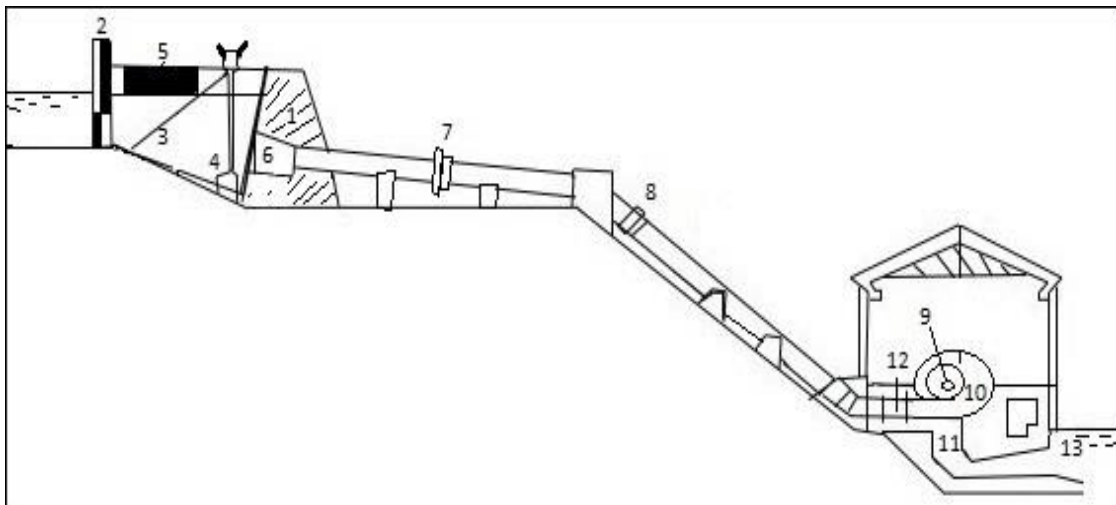
Beşinci bölümde elde ettiğimiz YSA modelinin amaca ne kadar uygun olduğu, örnekteki santralde uygulanabilirliği değerlendirilmiştir. Ayrıca ileride yapılacak çalışmalar için önerilerde bulunulmuştur.

## 2. REZERVUARLI HİDROELEKTRİK SANTRALLER İÇİN TÜRİN SEÇİMİ VE NET DÜŞÜ ETKİSİ

Bu bölümde hidroelektrik santraller ve bu santrallerde kullanılan türbin tipleri özetlenmiştir. Ayrıca göl seviyesinin üretilen enerji üzerindeki etkisini açıklayabilmek için net düşü, akarsu yatağı, yan dere potansiyeli ve kavitezyon gibi fiziksel şartlara değinilmiştir.

### 2.1. Hidroelektrik Santraller

Hidrolik Santraller, herhangi bir düşü farkına sahip suyun kinetik enerjisini dönme (mekanik) enerjisine dönüştüren ve birincil işlevi bir elektrik generatörü kullanmak olan üretim tesisleri olarak tanımlanabilir. Bir metreküp su, indiğı her metre için yaklaşık 9800 Joule mekanik enerji sağlayabilir ve 1 metrelik bir düşü de  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ ' lik akış 9800 W güç sağlayabilir. Hidroelektrik üretim aslında, enerjiyi üretmek için yararlı bir şekilde kullanılan kontrollü bir su çıkışı yöntemidir. HES'ler birkaç metreden 1500 metreye hatta 2000 metreye kadar değışebilen bir düşü boyunca düşen suyun enerjisini kullanır. Bu geniş düşü farklılıklarında enerji üretebilmek için, çalışma bileşenleri bakımından farklı türde türbinler kullanılmaktadır. Bir hidroelektrik sisteminin ana bileşenleri mekanik olarak türbin, ilgili boruları örneğın cברי borular, tünel ve dalgalanma tankı gibi ve bunlara ait kontrol sistemini içeren hidrolik sistem bileşenleri; elektriksel olarak senkron generatör tarafından oluşturulan elektrik sistemi bileşenleri ve onun kontrol sistemi gibi iki kısma ayrılabilir (Nagpurwala, 2015). Rezervuarlı HES'in genel düzeni Şekil 2.1'de ve açıklamaları ise Çizelge 2.1'de verilmiştir.



Şekil 2.1. Rezervuarlı hidroelektrik santrali genel düzeni (Nagpurwala, 2015).

**Çizelge 2.1.** Şekil 2.1’de verilen HES kısımlarının numara ve açıklamaları.

No	Açıklama	No	Açıklama	No	Açıklama	No	Açıklama
1	İntake Kapağı	5	Soğutma Suyu Girişi	9	Türbin Şaftı	13	Kuyruk Suyu Çıkışı
2	Giriş Ağzı	6	Cebri Boru Giriş Ağzı	10	Türbin		
3	Çöp Engeli	7	Genişleme Doldurma Kısımı	11	Draft Tüp		
4	Servis Kapağı	8	Cebri Boru Mukavemet Bloğu	12	Kelebek Vana		

Türbinler düşü yüksekliği, çıkış gücü, mil eksen, suyun akış şekli ve suyun etki şekli gibi özelliklerine göre sınıflandırılabilir. Bu sınıflandırma çizelge 2.2’de verilmiştir.

HES’lerde enerji üretiminde kullanılacak suyun düşüsünün üretimdeki etkisi Bernoulli denklemindeki H ifadesi hesaplanarak görülmektedir (Başışme, 2003). İncelenen bir kesitteki suyun hızı, zamana bağılı olarak değişmiyorsa ve sürtünmesiz bir akışsa, borunun her yerindeki yerel yükseklik, basınç yüksekliği ve hız yüksekliğinin toplamı her an aynı değerde sabittir. Genel ifadesi ise; eşitlik (1)’deki gibidir.

$$H_1 + \frac{P_1}{\gamma \cdot g} + \frac{C^2_1}{2 \cdot g} = H_2 + \frac{P_2}{\gamma \cdot g} + \frac{C^2_2}{2 \cdot g} \quad (2.1)$$

Denklemden H yüksekliği, C hızı, p basınç, g yerçekimi ivmesi ve  $\gamma$ ’da yoğunluğunu göstermektedir. İçerisinden sıvı geçirilen kapalı bir boru içerisine her iki ucu açık bükülmüş bir boru, sıvının akışına karşı yerleştirilmiş olsun. Diğer yandan borunun kenarına bir delik açılarak başka bir boru monte edilsin. Eklenen borulardaki sıvı seviyelerinin eşit olmadığı görülecektir. Bunlar arasındaki yükseklik farkı H ise, suyun hızı eşitlik (2)’deki ifadeden bulunabilir (Başışme, 2003).

$$C = 2 \cdot g \cdot \Delta H \quad (2.2)$$

## 2.2. Suyun Etki Şekline Göre Türbinler

Bu bölümde türbinler suyun kullanım şekline göre; etki ve tepki tipi türbinler olmak üzere özetle açıklanmıştır.

**Çizelge 2.2.** HES'lerin sınıflandırılması.

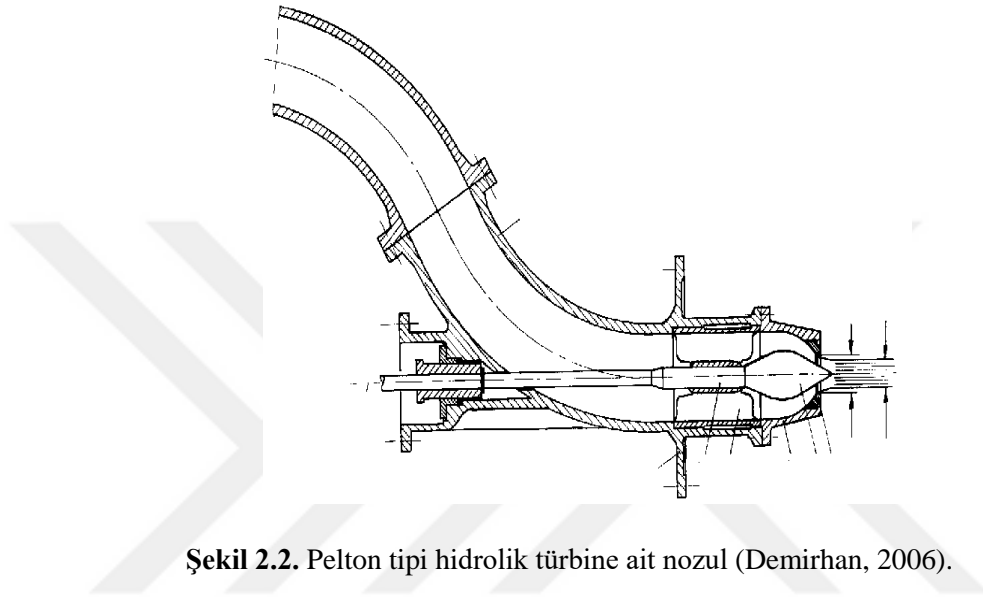
HES'lerin Sınıflandırma Kriterleri				
Düşü Yüksekliği	Türbin Çıkış Gücü	Türbin Mili Eksenli	Suyun Akış Şekli	Suyun Etki Şekli
H > 300 M Yüksek Basınçlı Türbinler	Yüksek Güçlü Hidrolik Türbinler (> 100 MW)	Yatay Eksenli Türbinler	Eksenel Akışlı Türbinler (Kaplan, Uskur)	Etki Tipi Türbinler (Pelton, Turgo, Banki)
400 M < H < 20 M Orta Basınçlı Türbinler	Orta Güçlü Hidrolik Türbinler (20 – 100 MW Güce Sahip)	Dikey Eksenli Türbinler	Radyal Akışlı Türbinler (Francis)	Tepki Tipi Türbinler (Francis, Kaplan, Uskur, Boru) (Yolcubal. 2011)
H < 50 m Düşük Basınçlı Türbinler	Küçük Güçlü Hidrolik Türbinler (1 – 20 MW Arası Güce Sahip)	Eğik Eksenli Türbinler	Diagonal Akışa Sahip Türbinler (Yüksek Hızlı Francis)	
	Mini Hidrolik Türbinler (100 Kw – 1 MW Arası Güce Sahip)		Teğetsel Akışlı Türbinler (Pelton, Banki)	
	Mikro Hidrolik Türbinler (5 Kw – 100 Kw Arası Güce Sahip)		Saptırılmış Akışlı Türbinler (Turgo)	
	Piko hidrolik türbinler (< 5 KW)			

### 2.2.1. Etki türbinleri

Etki tipi türbinlerde kanatlar hava içerisinde bulunur ve su belirli bir püskürtme yöntemi ile kanatlara çarptırılarak dönme kuvveti elde edilir. Etki tipi türbinlerde suyun giriş ve çıkış basınçları aynı atmosfer basıncındadır.

Bu tip türbinler, 1880 yılında Amerika'lı PELTON tarafından keşfedilmiş ve günümüze kadar geliştirilerek kullanılmaya devam etmiştir. Pelton tipi hidrolik türbinler, çok yüksek hidrolik düşümler ve küçük su debileri için kullanılmaktadırlar. Michell-Banki (cross-flow) tipi

türbinler de bu türbin sınıfına dâhildir. 1903 yılında M. Michell tarafından keşfedilen Michell-Banki tipi türbinler, 1917 yılında D. Banki tarafından geliştirilmiştir. Bu türbinler dar bir kullanım alanı olan özel türbin tiplerindedir. Genellikle küçük güçlü olup, nehir tipi santrallerde tercih edilir (Demirhan, 2006).



Şekil 2.2. Pelton tipi hidrolik türbine ait nozul (Demirhan, 2006).

Şekil 2.2’de Pelton türbinlerde kullanılan pelton iğnesi (nozül) verilmiştir. Nozullar her türbinin kullanım şartlarına göre farklı sayıda olabilir. Aynı anda nozulların tamamı veya bir kısmı çalışarak türbin güç üretebilir. Ayrıca içerisinden geçen suyun debisi de ayarlanıp üretim kapasitesi değiştirilebilir.

Pelton tipi hidrolik türbinler 60m ile 1.000 m hidrolik düşüleri arasında ve 2 kW ile 100 MW arasındaki güçlerde tercih edilir. Günümüzde 300MW gücünde Pelton tipi hidrolik türbinlerde imal edilebilmektedir. Michell-Banki tipi türbinlerde bu türbin sınıfına dâhildir.

### 2.2.2. Tepki türbinleri

Tepki tipi türbinler Francis, Kaplan, Uskur, Boru tipi türbinler olarak sayılabilir. Bu tip türbinler tamamen suyun içindedir ve suyun giriş ve çıkış basınçları farklıdır. Türbin gövdeleri basınca dayanıklıdır. Rotoru çeviren mil üzerindeki kanatlara etkiyen su basıncı dönme kuvveti sağlar. Kanatlara çarpan suyun basıncında doğal olarak düşme meydana gelir. Bu düşüş ise suyun ivmelenmesine yani hızlanmasına neden olur. Tepki tipi türbinlerden özellikle Francis ve Kaplan tipi türbinleri çok kullanılmaktadır. Francis tipi türbinler orta düşü de kullanılabilirken, düşük

düşü de ise Francis ve kaplan tipi türbinler kullanılabilir. Kaplan tipi türbinler özellikle yüksek basınç ve düşük düşü için uygundur.

Amerikalı HOWD 1838 yılında Francis tipi hidrolik türbinleri keşfetmiştir. Bu türbin yapısı 1848 yılında yine Amerikalı FRANCIS tarafından geliştirilerek denenmiştir. 1912 yılında Prof. Dr. Viktor KAPLAN tarafından Kaplan tipi hidrolik türbinler geliştirilerek modern haliyle kullanılmaya başlanmıştır.

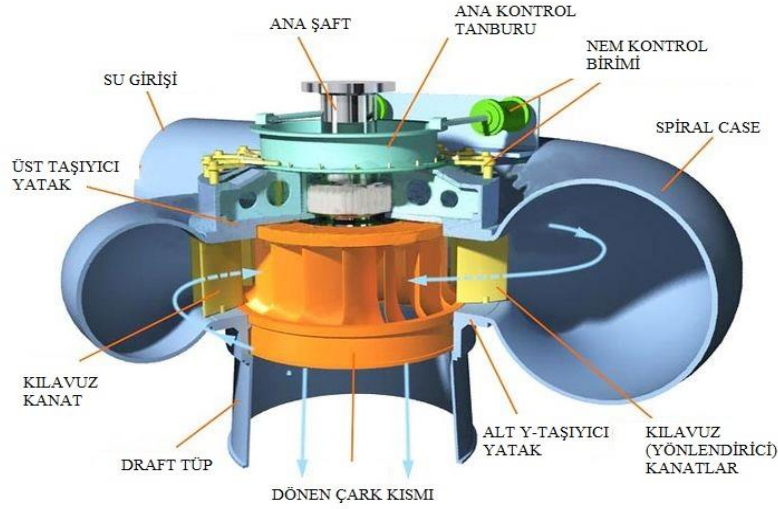
Tepki türbinlerinin gövdeleri tamamen suyun içerisinde ve yüksek basınç altında bulunduğu türbinlerin hareketli ve sabit kısımları hassas olarak üretilmelidir. Tepki türbinlerinde, basınca sahip su, türbine girmeden tamamen hıza çevrilir. Kaplan türbinlerinde, stator ve rotor kanatları ayarlanabilir ancak Francis türbinlerinde sadece stator kanatları ayarlanabilir. Francis türbinlerinde su, spiral şeklinde ve kanatları yönlendirilebilen bir gövde içinde, rotorun aksel olarak dönmesini sağlar. Tepki türbinlerinin en büyük avantajı, alçak düşülerde, modern generatörler için gerekli devir sayısını sağlayabilmeleridir (Paish, 2002).

### Francis tipi türbin

Francis, 1849 yılında Francis türbini adlı radyal türbini geliştirdi. 1870'de Profesör Fink, Francis türbininde akışkan deşarjını düzenlemek için kılavuz pervaneleri bir mil üzerinde döndürerek önemli bir gelişme sağlamıştır. (Nagpurwala, 2015).

Francis türbinleri 2 m ile 600 m hidrolik düşüler arasında ve 2 – 600.000 kW güçler için imal edilmektedir. Günümüzde gücü 800.000 kW Francis tipi hidrolik türbinler de imal edilmiş bulunmaktadır. Francis tipi hidrolik türbinler küçük güçlerde yatay ve büyük güçlerde ise dikey aksel olarak imal edilirler. Bu nedenle; aksel tipi olarak dikey aksel ve yatay aksel Francis türbini olarak iki gruba ayrılır (Başışme, 2003).

Francis türbini, orta düşülü ve tepki tipi türbin gruplarında yer almakta olup yapısı ile ilgili görünümü Şekil 2.3'te verilmiştir. Francis tipi türbinlerde cebri boru; salyangoz adı verilen ve işlevi suyun çarklara eşit şekilde etki etmesini sağlayan kısmına bağlanır. Buradaki su salyangoz içerisinde bulunan kanatlardan geçerek çarka çarpar ve çarka bağlı kütleyle dönme kuvveti sağlar. Türbine giren su belli bir basınçta geldiğinden hareket enerjisi yanında basınç kuvvetine de sahiptir. Türbinden çıkan ve enerjisi azalan su emme borusu ile kuyruk suyu denilen kısımdan dışarı atılır. Türbinden alınan enerjinin olabildiğince büyük olması için giriş ve çıkış basınç farkı da büyük olmalıdır. Bu nedenle emme borusu basıncının atmosfer basıncından düşük olması istenir.

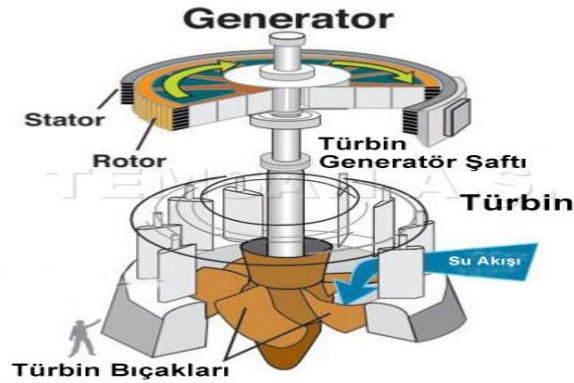


**Şekil 2.3.** Francis türbin ve bağlı sistemlerin genel görünümü (Başesme, 2003).

Bazı özel durumlarda çok büyük güçlerdeki Francis tipi türbin rotorları parçalı olarak imal edilebilir. Genel olarak küçük ve orta güçlü Francis tipi türbin rotorları ile büyük güçlü Francis tipi türbin rotorları tek parçalı olarak imal edilirler. Bunun dışında türbin ayar kanatları, hız çemberi gibi su akımını yönlendiren ve su debisini kontrol eden ayarlayıcı tertibatların montajının kolay olması, ayar yapılabilmesi gibi amaçlara hizmet etmek için parçalı olarak da imal edilirler (Başesme, 2003).

### Kaplan tipi türbin

Kaplan tipi türbinler 1912 yılında Prof. Victor KAPLAN tarafından geliştirilmiş ve patenti alınmıştır. Bu tip türbinler tepki tipi türbin sınıfına girerler. Suyun türbine girişi ile çıkışı arasında basınç farkı vardır. Etkiyen su basıncı ve kinetiği sayesinde eksenel bir dönme kuvveti ile dönerler. Kaplan tipi türbinler 2 ile 60 m hidrolik düşülerde ve 2 kW ile 200.000 kW arasında imal edilir. Verimli olduğu düşü seviyesi ise ortalama 80 m'nin altındadır. Şekil 2.4'te genel görünümü verilen Kaplan türbinleri salyangoz gövdeli veya boru tip olarak imal edilirler. Uygulamada 500.000 kW gücünde olan Kaplan tipi türbinde yer almaktadır.



**Şekil 2.4.** Kaplan tipi türbin görünümü (Temsan, 2017).

Kaplan tipi türbinler sabit kanatlı rotora sahip veya kanatları ayarlanabilen rotora sahip olarak üretilir. Ayarlanabilir kanatlı rotorları olan türbinler Uskur tipi Kaplan türbini olarak isimlendirilir. Ayrıca Bulb, Tube, Straflo türbinlerde kaplan türbininin çeşitlerindedir (Yolcubal, 2011).

Kaplan türbinlerinin başlıca özellikleri aşağıda beş madde de belirtilmiştir.

- Yüksek özgül hızlarda kısmi yüklerdeki verimi düzelterek ve türbine değişik yük ve düşüler de çalışma kolaylığı sağlayabilmek için bu türbinler hareketli parçalı türbinlerdir.
- Bu türbinler nehir üstü santraller için çok ideal bir türbin tipleridir.
- Su akımı tam olarak akseldir.
- Özgül hızın bu kadar büyük olması türbin ve generatör boyutlarını küçülterek maliyeti azaltır, bu nedenle Francis'ten daha avantajlıdır.
- Değişken düşülerde en uygun türbin tipidir.

## 2.2. Hidroelektrik Santraller için Dikkate Alınacak İlave Hususlar

Bu bölümde hidroelektrik santrallerin rezervuarlarında enerji üretimini etkileyen net düşü, kavitasyon, akarsu yatağındaki yan dere potansiyeli ve çöp faktörü gibi çevresel etkilerden bahsedilmiştir.

### 2.2.1. Net düşü ve akarsu yatağındaki yan dere potansiyeli

HES'lerde tahrik gücünü su sağlamakta olup suyun tahrik yeteneği suyun düşüsü ve potansiyel akış rejimine bağlıdır. Üretilmek istenen elektrik enerjisi için belirlenen bir potansiyel olmalıdır. Örneğin; Deriner Barajı 150 MWh enerji üretmek için yaklaşık 90 m<sup>3</sup>/s suyu harcarken, aynı yatakta bulunan Borçka HES bu enerjiyi üretmek için nominal rezervuar (göl) kotunda 190 m<sup>3</sup>/s su harcamaktadır. Gürcistan sınırından önce Çoruh nehri üzerindeki son baraj olan Muratlı HES ise 57 MWh enerji üretmek için en yüksek göl seviyesinde bile 170 m<sup>3</sup>/s civarında su harcamaktadır. Buradaki kullanılan su ve üretim değeri ilişkisi, rezervuardaki net düşü ile ilgilidir. Net düşünün belirlenmesi; inşa edilebilir gövde yüksekliği, akarsu rejimi, oluşacak olan göl havzasının yüzey alanı ve biriken suyun çevreye etkisi gibi faktörlere bağlıdır.

HES'ler suyun potansiyel gücünü kullanarak elektrik ürettiğine göre, kullanılacak suyun sürekliliği son derece önemlidir. Çoruh vadisindeki bir örnek olan Muratlı HES gibi net düşü mesafesi kısa ve rezerv hacmi küçük olan santrallerde, gelen suyun sürekliliği çok önemli hale gelir. Gelen su çeşitli şekillerde havzaya akabilir. Akarsu üzerinde sıralı halde rezervuarlı santraller varsa üretim planı açısından suyu önce kullanan santral, sonra kullanan santral için belirleyici olacaktır. Aynı şekilde Muratlı HES örnek olarak verilirse, kendisine en yakın işletme durumundaki santraller sırası ile Artvin Barajı, Deriner Barajı, Borçka Barajı'dır. Örneğin Borçka Barajı göl havzası kullanılan su miktarına oranla uzun süre yeterli olabileceği için üretim planı dışına çıkma ihtiyacı duymaz. Ancak hem göl havzasının kısıtlı olması, hem de yan derelerden havzaya akan su potansiyeli yüksek olduğundan Muratlı HES gibi santrallerde üretim planı dışına çıkma ihtiyacı duyulabilir. Çünkü yörenin yağış potansiyeli yüksek ve şekli belli belirsizdir. Bu nedenle santrali elektrik üretimine elverişli seviye bulmak mümkün olmayabilir. Gün içerisinde bu santrale ait rezervuarda her an en düşük ve en yüksek seviyeler görülebilir. Bu da üretimde kullanılan suyun miktarını ve dolayısıyla üretilmek istenen elektrik enerjisinin miktarını önemli ölçüde etkiler.

### 2.2.2. Akarsu yatağındaki yan dere potansiyeli

Çoruh havzasında vadiden yatağa gelen su potansiyeli, özellikle feyezan döneminde olmakla birlikte farklı zamanlarda da uzun süren sağanak yağışlardan dolayı  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$ 'ye kadar çıkabilmektedir. Bu miktardaki su akışı, Borçka HES çalışmasa bile Muratlı HES için göl seviyesini saatte 50 cm'den fazla arttırabilmektedir. Dar olan rezerv hacmi ve kısa net düşü aralığı göz önüne alındığında enerji üretiminde kullanılmayan bir potansiyel oluşabilir. Göl havzasına akan suyun, enerjiye çevrilmeden dolu savaklardan atılması yerine enerjiye çevrilebilmesi suyun verimli kullanılması adına çok önemlidir.

### 2.2.3. Kaviteasyon

Üretilmek istenen enerjiyi göl seviyesine göre sınırlayan bir diğer etkide kaviteasyondur. Su kapalı basınçlı bir ortamda hareket ederken çok fazla basıncın düştüğü noktalar olabilir. Düşük basınç halinde su buharlaşır ve su buharı ile dolu olan vakumlu su zerrecikleri suyun genel hareketine uymaya çalışır. Hareket halindeki zerrecikler büzülüp genişlerken ani olarak ortadan kalkabilir. Bu etki ile çok hızlanan su zerrecikleri malzeme yüzeyine çarparak yüksek gürültülü darbeler yapar ve darbeler sonucunda malzeme yüzeyi süngerleşir. Bu etkiye "Kaviteasyon" adı verilmektedir (Brennen, 1995).

İşletmede önemli olan kullanılan teçhizatların sağlıklı ve süreklilik esasına göre çalışmasını sağlamaktır. Francis tipi türbinlerin üretimi için hesaplanan kaviteasyon katsayısı, türbin özgül devir sayısına bağlıdır. Türbin özgül devir sayısı ise net su düşüsüne bağlıdır. Bu nedenle, mevcut düşü yüksekliğine en uygun üretim aralığını sağlayan türbin-generatör sisteminin imal veya temin edilmesi için kaviteasyon katsayısı hesaplanması gerekir.

İşletme şartlarında çok düşük göl seviyelerinde üretilen aktif güç, ayarlanan (set) edilen değerinden daha az olabilir. Bu durumda ortaya çıkan güç kaybını önlemek için türbin ayar kanatları tamamen açılabilir bile set edilen güç değerini karşılayamayabilir. Bunun nedeni, istenilen elektrik enerjisinin üretilmesi için ihtiyaç duyulan su basıncının sağlanamamasıdır. Bu noktada türbin ve çevresinde kaviteasyon etkisi artmaya başlar ve malzemeye zarar verir. Bu durum plansız bakım gerektirecek durumlara neden olabilir. Plansız bakım faaliyetleri de HES'lerde üretim kaybına neden olabilir.

#### 2.2.4. öp faktörü

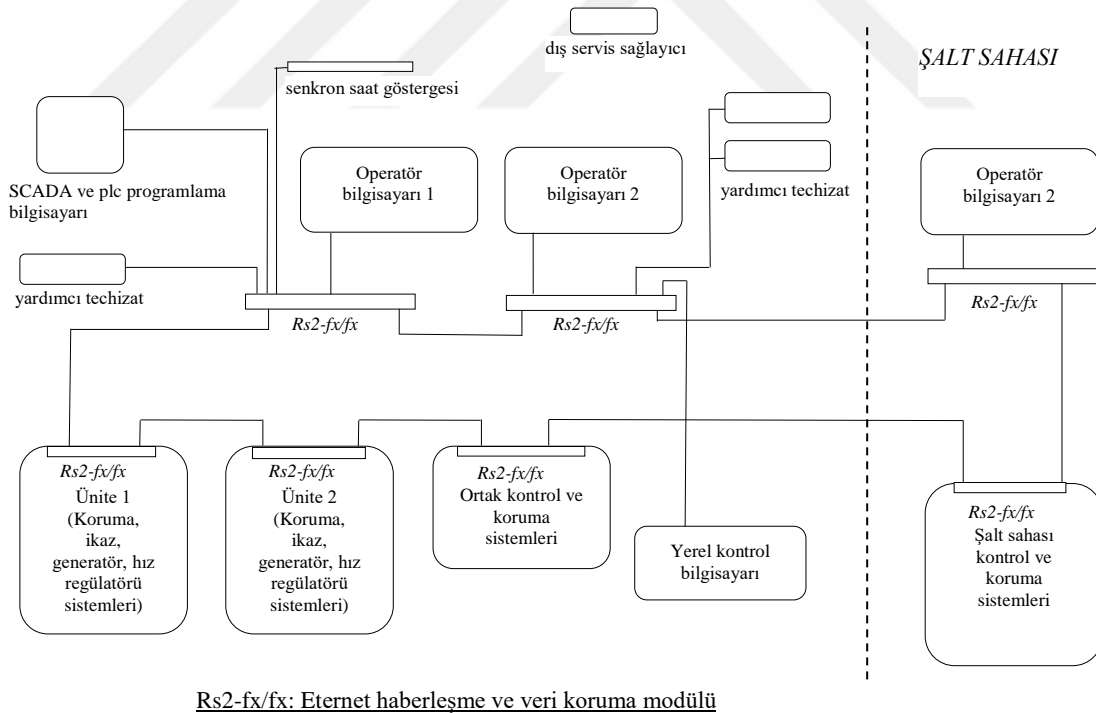
HES'lerde üretilen aktif gücü etkileyeni bir başka çevresel etkide göl havzasında biriken çöptür. Özellikle göl havzasındaki insan çöpu ve doğal katı atıklar; üretim sırasında göl içerisinde oluşan akımla gövde üzerinde su giriş ağzında bulunan ızgaralarda birikir. Biriken bu çöp varlığı suyun cebri borulara girişini engellediğı için elektriksel güç üretimini zorlaştırır. Bu durum özellikle en düşük net düşü seviyelerinde sorun yaratmaktadır. Bu çalışmada SCADA üzerinde doğrudan böyle bir veriye sahip olunmadığı için çöp faktörü etkisi YSA modellemesinde ihmal edilmiştir.



### 3. HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE SCADA SİSTEMİ VE FREKANS İLİŞKİSİ

Denetleyici kontrol ve veri toplama sistemi (Supervisory Control and Data Acquisition-SCADA) belirli bir alana yayılmış olan cihazların bir bilgisayar aracılığı ile denetlenmesini, kontrol edilmesini veya izlenmesini önceden tasarlanmış mantıksal bir düzen içerisinde işletilmesini ve geçmiş zaman verilerinin de saklanmasını sağlayan sistemlerin genel adıdır (Kul, 2009).

SCADA sistemleri temel olarak merkezi kontrol birimi (MTU), uzak uç birim (RTU) ve iletişim sistemi şeklinde birimlerden oluşur. HES'ler SCADA sistemleri üzerinden kontrol ve kumanda edilir. Her işletmede olduğu gibi HES'lerde de belirli bir organizasyon yapısı vardır. Şekil 3.1'de iki senkron generatörü bulunan HES için basit bir organizasyon örneğine yer verilmiştir.



**Şekil 3.1.** İki senkron generatörlü hidroelektrik santrali organizasyon şeması.

Yukarıda verilen organizasyon şemasında ilk olarak SCADA ve PLC ile ilgili her türlü yönetici işlemlerinin yapılabileceği kontrol birimi bulunmaktadır. Ayrıca şalt kontrol birimi de

santral kontrol birimi ile haberleşme halindedir. Santral işletmesi operatör bilgisayarlar tarafından yapılmaktadır. Herhangi bir arıza olduğunda ya da bakım ihtiyacında yerel kontrol sağlamak amacıyla yerel kontrol bilgisayarları kullanılmaktadır. İşletme sürekliliğini sağlamak amacıyla her iki senkron generatörün ikaz ve koruma sistemleri bağımsızdır.

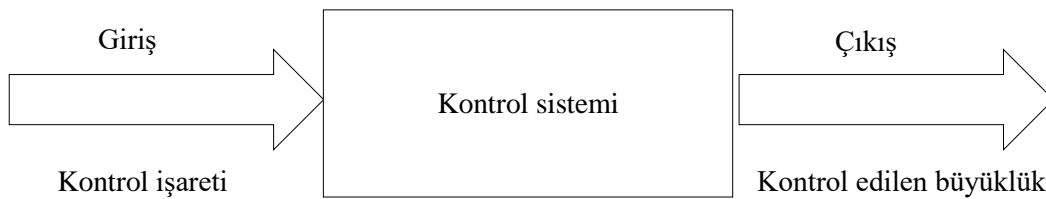
### 3.1. Türbin Hız Regülatörü Kontrolü

HES’lerde türbin hız kontrolü yapmak için genellikle PID kontrol kullanılmaktadır. PID kontrolde tepki süresi kısa ve fiziksel sistemlere uyumludur. Bu bölümde, günümüzde hız regülatörlerinde sıklıkla kullanılan oransal integral türevsel (PID) kontrol yöntemi özetle açıklanmıştır.

#### 3.1.1. PID kontrol yöntemi

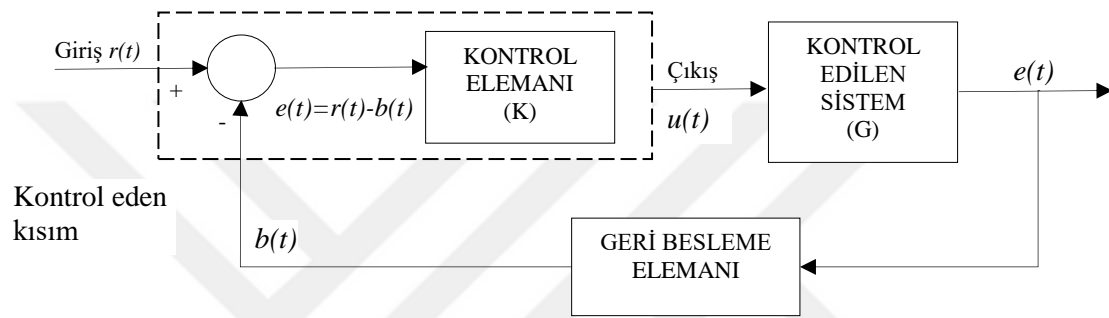
Kontrol sistemleri günümüzde elektriksel, elektronik veya mekanik olarak adlandırabileceğimiz en küçük sistemlerden en karmaşık olanlara kadar tüm sistemlerde kullanılmaktadır. Bu kullanım şekli matematiksel veya fiziksel olarak olabilir. HES’ler birçok hidromekanik, elektrik ve elektronik alt sistemlerden oluşmaktadır. Yan sistemlerin yanı sıra ürün olarak adlandırabileceğimiz elektrik güç çıkışı da belirli bir kontrol sistemi alt yapısı gerektirir.

Şekil 3.2 ile basit bir kontrol sistemi bloğu verilmiştir. Sistem bir giriş ve bir çıkışa sahipse bu kontrol sistemine bir girişli ve bir çıkışlı sistem denir. Bu işaretler çok sayıda ise çok girişli ve çok çıkışlı sistem denir. Kontrol sistemlerinde giriş işareti, sistemin kumandası ya da kontrol işaretidir (Bozali, 2011).



Şekil 3.2. Basit bir kontrol sistemi blok diyagramı.

Kontrol sistemleri çıkışın veya giriş işaretinin kontrol edilmesi bakımından açık çevrim ve kapalı çevrim olarak ikiye ayrılır. Açık çevrim kontrol sistemi giriş değerinin çıkış değerinden bağımsız olduğu kontrol sistemidir. Kapalı çevrim kontrol sistemi, diğer bir ismi geri beslemeli kontrol sistemidir. Giriş değeri doğrudan veya dolaylı (çeşitli sabit veya değişken parametre) olarak çıkışla ilişkili olan kontrol sistemidir. Şekil 3.3'te geri beslemeli kapalı çevrim kontrol sistemi verilmiştir. Günümüzde hız regülatörü kontrol sistemi için en fazla kullanılan PID kontrol yöntemidir (Baydemir, 2013).



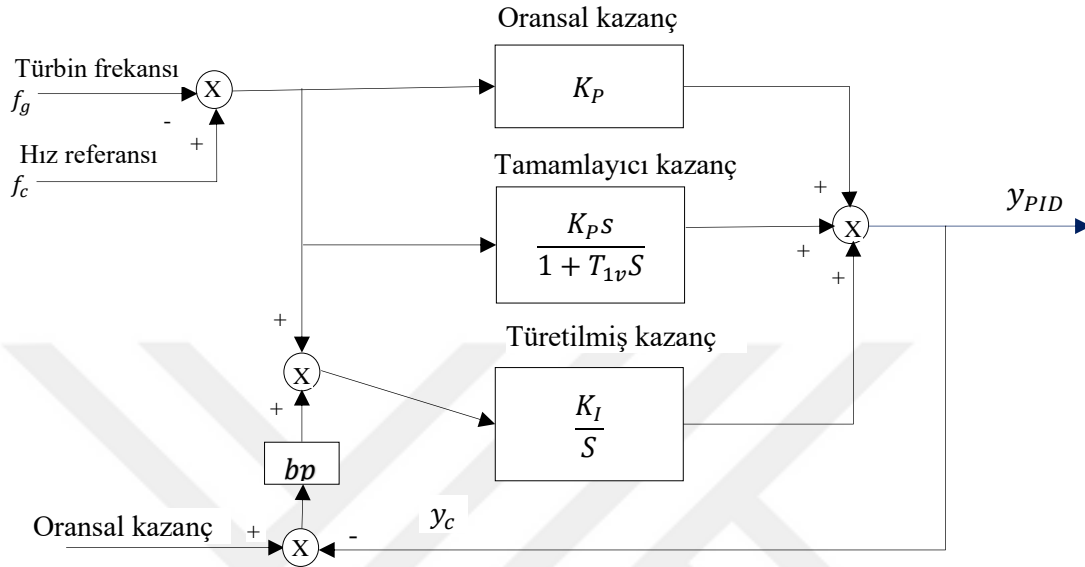
Şekil 3.3. Geri beslemeli kapalı çevrim kontrol sistemi.

PID (Oransal+İntegral+Türev) kontrolör doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerde kullanılabilirliği ve teorik hesaplamaların fiziksel sistemlerde başarı ile uygulanabilmesi nedeniyle günümüzde en yaygın olarak bilinen ve kullanılan kontrol yöntemidir. PID kontrollü hız regülatörleri, hızlı tepkime süresine sahiptir. Türevsel eleman, suyun hareket etme süresi yüksek olan türbinlerde izole çalışmada fayda göstermektedir. Tianjin'e göre türevsel eleman, enterkonnekte bir sistemde çalışan generatörde dalgalanmalara neden olarak sistemin dengesiz (unstable) çalışma rejimine geçmesine yol açması nedeniyle PID kontrolcüler PI (oransal, integral) olarak çalıştırılmaktadır (Baydemir, 2013).

PID kontrolcü parametreleri, geçici hız eğimi kazanç ve sıfırlama sürelerine göre tespit edilir. Günümüzde governör kontrolör için en fazla kullanılan PID yöntemidir. Hız regülatörleri için  $K_p$  (orantı kazancı),  $K_I$  (integral kazancı),  $T_{1V}$  (Hızlandırılmış hız atalet zaman sabiti),  $K_d$  (türev kazancı) gibi parametrelere bağlı PID kontrol bloğu şekil 3.4'te verilmiştir.

Her bölümün etkisini açıklamak gerekirse; orantılı kazanç, tüm sisteme göre oransal sapmayı göstermektedir. Ayrıca, sistemde bir sapma oluştuğunda tüm sistemi kontrol ederek oluşan saptmaları azaltan veya engelleyen bölümdür. Tamamlayıcı kazanç, kararlı durum sağlanması için oluşan hataları yok eder. Eğer hata oluşursa, oluşan hatalar giderilmek için çalışılır. Türetilen kazanç ise, sistem üzerinde oluşan; sistemden sapma oranlarını yansıtır. Bu

yüzden sistemi önceden kontrol etme eğilimini ve sisteme öngörülebilir bir fonksiyon önerilir. Burada amaç sapma oluşmadan önce bu problemi ortadan kaldırmaktır (Baydemir, 2013).



Şekil 3.4. PID kontrollü hız regülatörlerine ait basit prensip şeması (Baydemir, 2013).

### 3.2. Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrolü

Bir veya daha çok generatörle üretim yapan santraller için bağlı buldukları iletim hattı veya hatları santrallerin ürettikleri güç değerlerini etkilemektedirler. Bu da sisteme ait frekansın sürekli ya sabit tutulmasını ya da belli bir tolerans aralığında değişimine müsaade edilmesini gerektirmektedir. Frekansın tüketim ve üretim dengesine bağlı olması ve tüketimin sürekli değişkenlik göstermesi üreticiler için sürekli olarak güç kontrolü yapma zorunluluğunu ortaya çıkartmaktadır. Frekans ve güç dengesi gerektiren elektrik şebekelerinde bu ihtiyacı karşılamak için belirli kurallar ve yöntemler vardır. Temel olarak uygunluğu tespit edilmiş üreticiler için bu yöntemler; primer frekans kontrolü (PFK), sekonder frekans kontrolü (SFK) ve tersiyer kontrol (TK) gibi güç rezervlerine dayanan kontroller olarak belirtilebilir.

Dünyada yüksek güçteki elektrik enerjisi enterkonnekte şebekeler vasıtasıyla alternatif akım ve yüksek gerilim kullanılarak iletilmektedir. Bunun amacı tüm sistem üzerinde ayarlanabilir sabit bir frekans değerinin olmasıdır. Bazı ülkelerde frekans 50 Hz ve bazılarında ise 60 Hz'dir. Türkiye'de 50 Hz olan ve sabit olması beklenen bu frekans, senkron generatörlerin çalışma şartlarını belirlemektedir. Elektrik üreten generatör ve bağlı bulunan iletim hattı birbirine ters moment uygulamaktadır. Bu şekilde türbin ile sağlanan mekanik moment, elektrik iletim

hattının uyguladığı elektriksel momente eşit olmaktadır. Eğer sisteme bağlı kaynakların üretimi sistemdeki tüketime eşit olur ise, hat denge halinde çalışmaktadır. Hat üzerindeki üretim ve tüketim dengesi bozulur ise, generatör yavaşlama veya hızlanma eğilimi göstermektedir. Senkron çalışma şartlarında ise güç sisteminin sürekli dengede olması istenmektedir. Çizelge 3.1’de güç sistemlerindeki frekans ile elektrik tesislerindeki elektrik makinalarındaki elektriksel ve mekanik moment arasındaki ilişki verilmiştir.

**Çizelge 3.1.** Mekanik hıza bağlı generatör momentleri ve sistem frekansı değişimi (Gözde, 2010).

MEKANİK HIZIN DEĞİŞİMİ	MEKANİK VE ELEKTRİKSEL MOMENTLER ARASINDAKİ İLİŞKİ	SİSTEMDEKİ FREKANS DEĞERİ
YOK	$T_m = T_e$	SABİT
POZİTİF	$T_m > T_e$	ARTAR
NEGATİF	$T_m < T_e$	AZALIR

HES’lerde generatörler, hız kontrolörleri tarafından güç ayarı yapılarak devir sayısı ayarlanır ve üretim yaparlar. Governör sistemi ayar kanatçıkları ile sürekli olarak istenilen çıkış gücünü sağlamak için devir sayısını sabit tutmak şartı ile tahrik seviyesini ayarlar. Kullanılan su bu şekilde kontrollü olarak mekanik momenti sağlar. Elektrik hatlarında sürekli yük değişimi olduğu için bazı dalgalanmalar meydana gelir. İşletme şartlarında izin verilen toleranslar dışında etkili olabilecek dalgalanmalar generatörde ani hız değişimlerine neden olur. Böyle durumlarda sistem, koruma amaçlı olarak durdurma yoluna gider ve çökme ikazı verir. Tüm hat boyunca asıl yükü karşılayan santrallerin art arda çökmesi durumunda ise sistemin çökmesi, bir başka değişle hattın enerjisiz kalma durumu gerçekleşir. Hattın enerjisiz kalması ve tekrar enerjili hale getirilmesi, zor ve riskli bir iştir. Frekans arz güvenliğini doğrudan etkileyen en önemli parametredir.

### 3.2.1. Primer frekans kontrolü (PFK)

PFK; bir güç sisteminde frekansın azalması veya artmasına bağlı olarak santraldaki generatör aktif güç çıkışının hız regülatörü yardımı ile artırılması veya azaltılmasıdır.

Türkiye’de bazı santral tipleri hariç kurulu gücü 50 MW ve üzerinde olan tüm üretim santrallerinin PFK’ya katılma zorunluluğu vardır. Aynı şekilde ülkemizde PFK yükümlülüğü HES’leri % 10 rezerv güç miktarı belirler. Yükümlüler sistem frekansında  $\pm 200$  mHz’lik bir

değişim olması durumunda üretim tesisi tarafından etkinleştirilmesi gereken rezerv miktarının tamamını devreye almak zorundadır (EPDK, 2017).

Avrupa elektrik iletim sistemi işletmecileri ağı (European Network of Transmission System Operators for Electricity-ENTSO-E) kurallarına göre; bu rezervler sistem frekans sapması belirli sınırlar içinde kalacak şekilde tasarlanmıştır. İşletme şartlarında 49,8 ve 50,2 Hz frekans aralığı normal çalışma aralığına karşılık gelir. 1 GW'lık üretim kaybı veya yükte oluşabilecek bir dengesizlikte güç sisteminde 5-10 mHz/s'lik frekans değişiminin gözlemlenebileceği kabul edilmiştir. Ancak, oluşan frekans 47,5 Hz veya 51,5 Hz aralığını aşarsa, bir sistem çökmesi kaçınılmaz olabilir (Tedaş, 2005, 2006).

### 3.2.2. Sekonder frekans kontrolü (SFK)

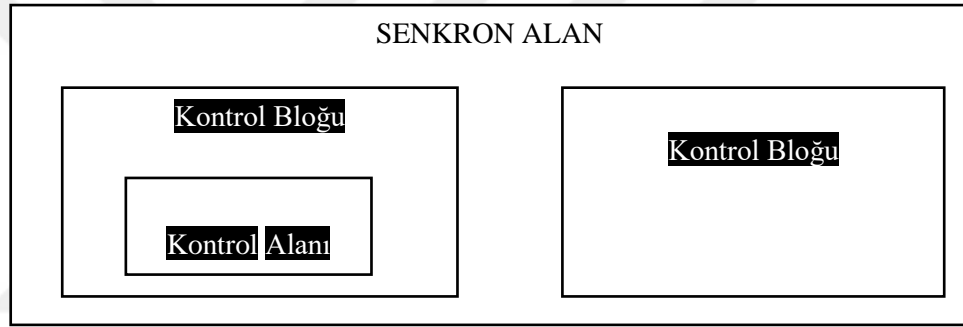
SFK, sekonder kontrol rezervlerini kullanarak aşağıdaki maddeleri sağlamak amacıyla bir kontrol alanındaki üretimi regüle eden merkezi otomatik bir fonksiyondur (Sezer, 2008).

- a) Bütün kontrol alanları ile güç alışverişini programlanan değerlerde tutmak.
- b) Kontrol alanından kaynaklanan bir frekans sapması durumunda, frekansı ayar değerine geri getirmek.
- c) Primer kontrol tarafından kullanılan kapasitenin serbest bırakılmasını sağlamak.
- d) Verilen görevleri yerine getirebilmek için, sekonder kontrol programı (Automatic Generation Control - AGC), periyodik olarak alan kontrol hatasını (Area Control Error-ACE) hesaplar ve kontrolü altındaki santrallere ayar değerleri (set-point) gönderir.
- e) Sekonder kontrol, PI kontrol özelliğine sahiptir.
- f) Sekonder kontrolün devreye alınması dakikalar içerisinde gerçekleşir (maksimum süre 15 dakikadır).

Kontrol alanı, bağımsız sistemde tek bir iletim sistemi operatörü tarafından işletilmekte olan kendi içerisinde fiziksel yükler ve kontrol edilebilir üretim elemanları bulunan bir alt sistemdir. Genellikle bir şirket bölgesi, bir ülke veya bir coğrafi bölgedir. Bir kontrol bloğu, eşzaman alanının diğer kontrol bloklarına göre, sekonder kontrol fonksiyonu konusunda birlikte çalışan bir ya da daha çok kontrol alanını içerir. Blok operatörü, bağımsız bloklar yönünden bütün kontrol bloğunun sekonder kontrolünden, blok içindeki tüm kontrol alanlarının muhasebe işlemlerinden ve organizasyonundan sorumludur. Yani, bloğun genel kontrolünü sağlayan tek bir iletim sistemi operatörüdür. TEİAŞ ise, sekonder frekans kontrol hizmet anlaşması kapsamında

yer alan üretim tesislerinin işletmecisinden; Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği hükümleri uyarınca belirlenen sekonder frekans kontrol yedeğinin temin edilmesini beklemektedir.

Ülkemizde TEİAŞ için sekonder kontrol rezervi hizmeti veren bir işletmede ünitenin aktif çıkış gücü değerleri otomatik üretim kontrol programı tarafından gönderilen ayar noktası değerinin  $\pm 1$ 'lik toleransı dahilinde olmalıdır. Yaptığı izleme ya da kontroller neticesinde TEİAŞ, sekonder frekans kontrol hizmeti sunan bir üretim tesisinin hizmeti gerektiği şekilde sağlamadığını tespit etmesi durumunda, tesisin sekonder frekans kontrol hizmeti sertifikasının yenilenmesini talep edebilir (TEİAŞ, 2015). Konuyla ilgili kontrol işleyiş düzeni Şekil 3.5'te verilmiştir.

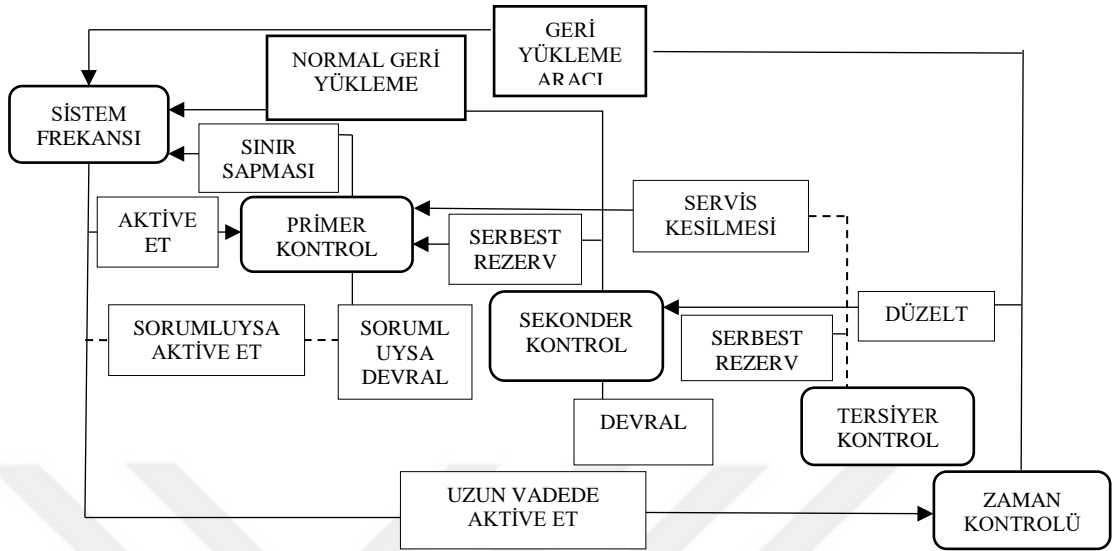


Şekil 3.5. Kontrol işleyiş düzeni (TEDAŞ, 2005, 2006).

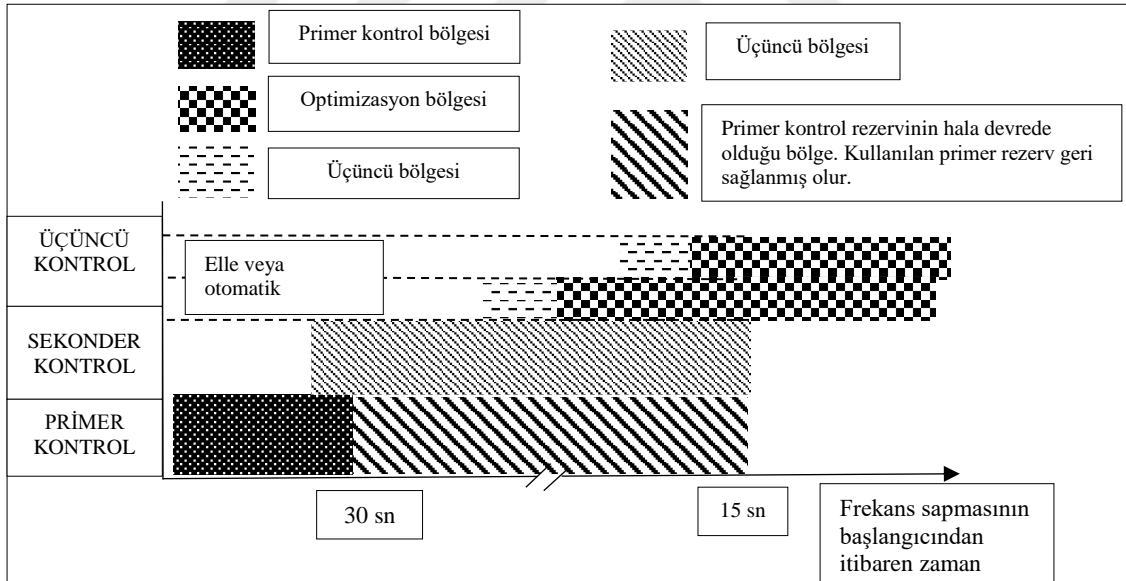
### 3.2.3. Tersiyer kontrol (TK)

Tersiyer kontrol yedeği (15 dakika yedeği), işletmedeki sekonder kontrol yedeği devreye alındıktan sonra ihtiyaç anında elle servise alınması gereken ve yeni bir frekans sapmasına karşı sekonder yedeği serbest bırakabilecek miktardaki kısımdır. Tersiyer kontrol yedeği her zaman talimata hazır olmalıdır (TEİAŞ, 2015).

Tipik olarak, tersiyer kontrolün işletimi sekonder kontrolün ardından ya da onu tamamlamak için, programlamanın zaman çerçevesine bağlıdır. Fakat ilke olarak enterkonnekte işletme üzerinde sekonder kontrol ile aynı etkiye sahiptir. Frekans kontrolünün blok diyagramı Şekil 3.6'da gösterildiği gibidir. Şekil 3.7'de ise frekans kontrolünde kullanılan yöntemler ve tepki süreleri verilmiştir.



Şekil 3.6. Frekans kontrolü blok diyagramı (Sezer, 2008).



Şekil 3.7. Kontrollerin zamana göre çalışması (Sezer, 2008).

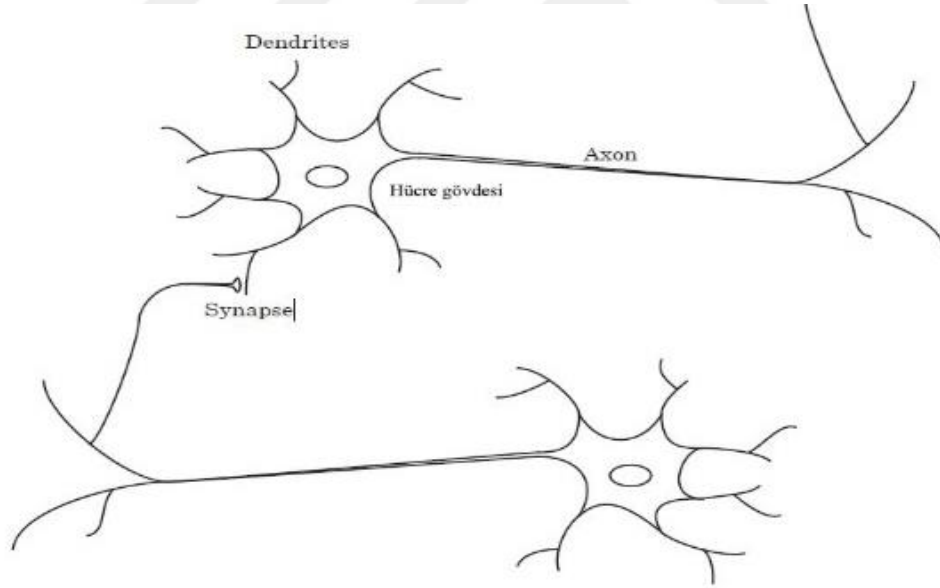
Şekil 3.6’da iletim hatları işletmecisinin frekans kontrolünü nasıl sağladığı verilmiştir. İlk olarak devreye alınan PFK yetersiz kaldığında durumda SFK’ya başvurulur. Halen frekans düzeltilmesi gerekli ise tersiyer kontrol ile frekans sağlanmaya çalışılır. Şekil 3.7’de ise bazı anlarda her iki kontrol rezervi aynı anda kullanılır. Üçüncül kontrol rezervine başvurulduktan bir süre sonra primer rezerv serbest kalır ve başka bir frekans sapması ihtimaline karşın hazırda

bekler. Primer ve sekonder kontrol üretim tesislerinde otomatik sağlanırken tersiyer kontrol elle veya otomatik olarak devreye alınabilir.

### 3.3. Yapay Sinir Ağları (YSA)

Günümüzde önemi giderek artan yapay sinir ağları vazgeçilmez bir endüstriyel araç haline gelmiştir. Başlarda insan beyninin matematiksel olarak taklit edilme çabası olsa da günümüzde birçok alanda gelişmekte ve önem kazanmaktadır. En gelişmiş sinir ağı olan insan beyni yaklaşık  $10^{10}$  sinir hücresi barındırmaktadır. Hücre başına bağlantı sayısı ise  $10^2$  mertebesinde. Vücutta beyin dışında da bulunan sinir hücreleri sayesinde bilgi alışverişi sağlanır (Çetin, 2006).

Biyolojik örneğindeki gibi benzetimi yapılan sinir hücreleri, nöronlar ve bu nöronlara ait bağlarla bir ağ oluştururlar (Nabiyev, 2010). Yapay nöron modelinin benzetimi Şekil 3.8’de biyolojik bir sinir hücresi olarak verilmiştir.

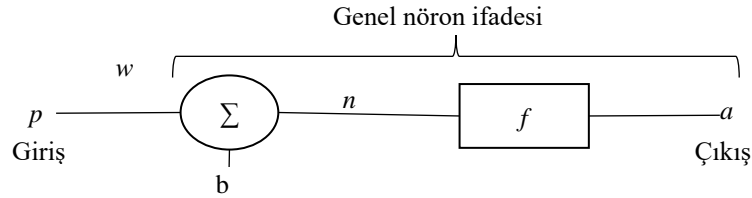


Şekil 3.8. Biyolojik nöron yapısı (Hagan vd., 2014).

#### 3.3.1. Yapay nöron modeli

Nöron yapısal olarak hücre gövdesi, kıvrımlı gövde uzantıları olan dendrit ve nöronlar arasında bağlantı sağlayan aksondan oluşmaktadır. Dendrit vasıtasıyla somaya aktarılan bilgi işaretini değerlendiren hücre bir çıkışta darbe işareti üretip üretmeyeceğine karar verir. İletilecek olan bilgi varsa akson üzerinden hedef hücre veya organa iletilir. Aksonun başka bir sinir hücresi

ile olan bağlandığı yere sinaps, bu bağa ise sinaptik bağ denir. Vücuttaki bu sinir hücrelerinin ve milyarlarca sinaptik bağın oluşturduğu ağ sinir ağıdır. Başlangıç olarak Şekil 3.9'da tek girişli yapay nöron modeli verilmiştir (Kölmek, 2012).



**Şekil 3.9.** Tek girişli nöron modeli (Hagan vd., 2014).

Buradaki nöron modelinin çıkış değeri eşitlik (3.1)'den hesaplanır.

$$a = f(wp) + b \quad (3.1)$$

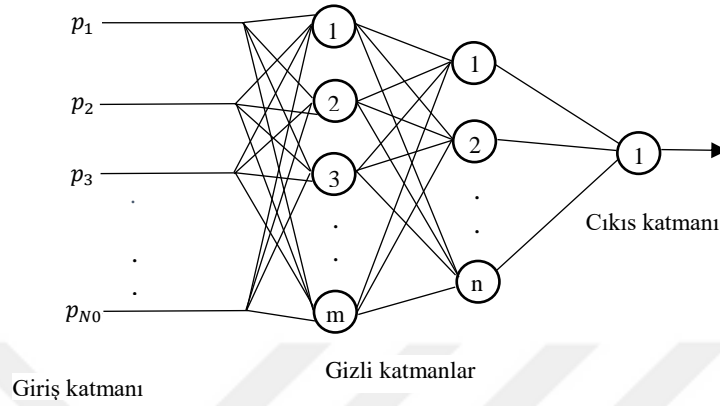
Yapay sinir ağlarını (YSA) oluşturan her nöronun her girişi için, çıkışı doğrudan etkileyen bir ağırlık katsayısı vardır. YSA eğitimi bu ağırlıkların ilgili problem için belirlenmesidir. YSA elde edilen ağırlık değerleri ile kendisine verilen giriş verisini kullanarak çıkış üretmeyi öğrenir. Bu nedenle YSA eğitiminde ağırlıkların belirlenebilmesi için eğitim verilerine ihtiyaç duyulur (Ayyagari, 2011; Yağan, 2015).

YSA paralel çalışma özelliği sayesinde aynı anda dağıtılmış çalışma ile herhangi bir katman veya giriş verisindeki bozukluk çıkıştaki doğruluk oranını çok etkilemez. Alınan sonuçların doğru ya da doğruya yakın olabilmesini sağlar. Ancak YSA'nın eğitilmediği durumlarda verdiği tepkinin doğruluğu kararsız ve kötü olması olumsuz bir taraftır. Bu nedenle eğitim verilerinin mümkün olan her durum için elde edilmiş olması önemlidir. Yapay sinir ağları oluşturulan modeldeki nöronların birleştirilme yönlerine bağlı olarak ileri ve geri beslemeli ağlar olmak üzere iki genel sınıfa ayrılabilirler (Ayyagari, 2011; Yağan, 2015). Bu tez çalışmasında ileri beslemeli YSA modeli kullanılmıştır.

### 3.3.2. İleri beslemeli yapay sinir ağları

YSA çok girişli, çok katmanlı veya çoklu çıkışa sahip olabilir. En basit ağ yapısı olan ileri beslemeli yapay sinir ağlarında herhangi bir geri besleme yok ve tek yönlü bilgi akışı vardır (Haykin, 1994). Giriş sayısı  $N_0$  ve çıkış sayısı  $N_R$  olan giriş, çıkış ve gizli katmandan oluşan ileri beslemeli bir YSA modeli Şekil 3.10'da verilmiştir. Burada  $p_{N_01}$  giriş sayısını,  $m$  ve  $n$  ise

gizli katmanlardaki nöron sayılarını gösterir. Gizli katmandaki çıkış değeri eşitlik (3.2)'teki şekilde hesaplanır.



**Şekil 3.10.** İleri beslemeli YSA modeli.

$$P^{(i)} = f^i W^i g^{(i-1)} \quad (3.2)$$

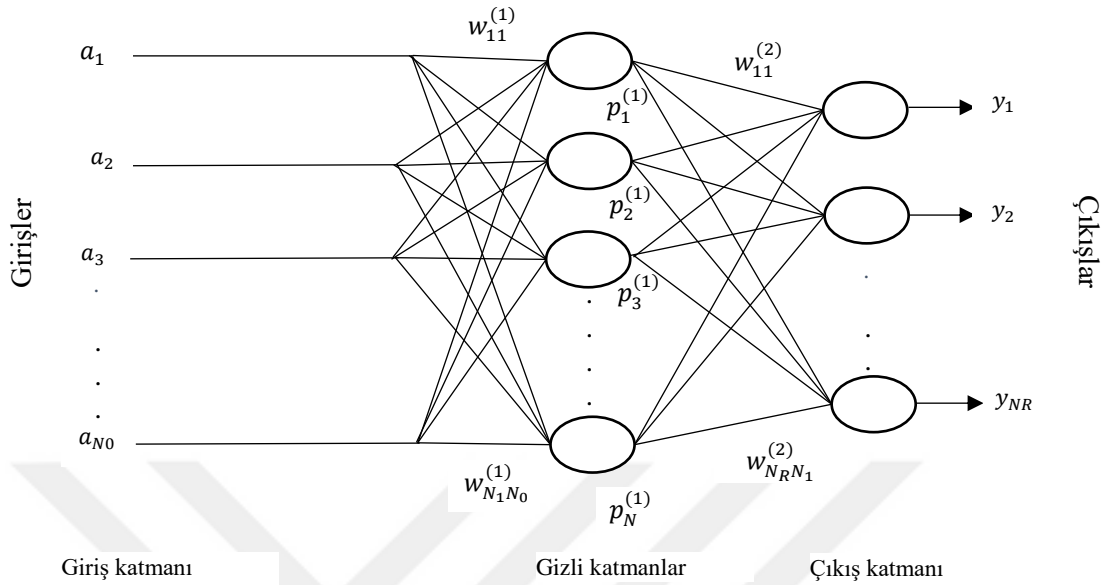
Burada  $P^i = p_1^i p_2^i \dots p_{N_i}^i$  i.(gizli) katmanın çıkış vektörünü ifade etmektedir.  $W^i$ ,  $i$ . ve  $(i-1)$ . katmanlar arasındaki ağırlık matrisi olup eşitlik (3.3)'te verilmiştir.

$$W^{(i)} = \begin{pmatrix} W_{10}^{(i)} & \dots & W_{1N_{i-1}}^{(i)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ W_{N_i0}^{(i)} & \dots & W_{N_iN_{i-1}}^{(i)} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

$$g^{i-1} = \begin{cases} A & i = 1 \\ p^{i-1} & i = 2, 3, \dots, R \end{cases} \quad (3.4)$$

$$y = p^{(R)} = y_1 y_2 \dots y_{N_R}^T \quad (3.5)$$

Burada  $A$ , YSA'ya giriş vektörü,  $f^i$   $i$ . katmandaki aktivasyon fonksiyonu,  $R$  işlem katmanları sayısı ve  $y$  çıkış vektörüdür. Aynı katmanda bulunan nöronlar benzer kabul edilir ve ağdaki gizli katman sayısı birden fazla olabilir (Ayyagari, 2011; Yağan, 2015). Şekil 3.11'de iki katmanlı ileri beslemeli bir YSA verilmiştir. Aktivasyon fonksiyonlarının özellikleri ve şekilleri ise Çizelge 3.2'de verilmiştir.



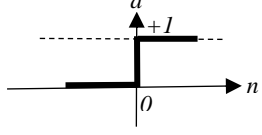
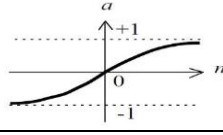
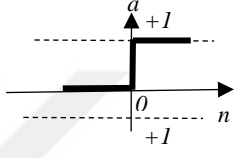
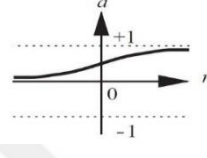
Şekil 3.11. İki katmanlı, ileri beslemeli bir YSA.

### 3.3.3. Geri yayımlı yapay sinir ağları

Geriyayımlı yapay sinir ağları en çok kullanılan uygulamalardan biridir. Geriyayılım (backpropagation) algoritması, ağıdaki çıktı değerlerinin belirlendiği ileri besleme ve oluşan hatanın gradiyenti azaltma amacıyla geriye doğru ağırlıklarının güncellendiği geri besleme aşamalarından oluşmaktadır. Eldeki giriş verileri giriş katmanında değerlendirilerek ileri besleme gerçekleşir. Giriş katmanı girdi verilerini aldığı için veri setindeki sayı ile giriş katmanındaki nöron sayısı eşit olmalıdır. Giriş katmanındaki nöronlar aldıkları değerleri gizli katmana doğrudan iletirler. Üretilen çıktı değerleri beklenen çıktı değerleri ile karşılaştırıldığından çıkış katmanı nöron sayısı veri setindeki çıktı sayısı ile aynı olmalıdır (Arı ve Berberler, 2017).

Her tabaka bir ya da birden çok nörondan oluşur ve tabakalar aralarında ağırlık kümeleri ile bağlanırlar. Bağlanma şekli ve her kısımdaki nöron sayısı değişebilmektedir. Aynı tabakadaki nöronlar arasında iletişim kurulmaz. Nöronlar girdiyi ya başlangıç girdilerinden ya da ara bağlantılardan almaktadır (Dahamsheh ve Aksoy, 2009).

**Çizelge 3.2.** YSA’ da kullanılan çeşitli aktivasyon fonksiyonları.

Adım fonksiyonu	$a = 1, x \geq 0$ $0, x < 0$	
Tanjant sigmoid fonksiyon	$a = \frac{1 - e^{-2n}}{1 + e^{-2n}}$	
Hard limit fonksiyon	$a = 0 \quad n < 0$ $a = 1 \quad n \geq 0$	
Logaritmik Sigmoid fonksiyon	$a = \frac{1}{1 + e^{-n}}$	

Geri yayımlı YSA algoritması dört ana adıma ayrılabilir. Ağırlıklar rastgele seçilirler ve daha sonra gerekli düzeltmeleri hesaplamak için kullanılırlar. Bu dört adım; ileriye doğru hesaplama, çıkış katmanına geri yayılım, gizli katmana geri yayılım ve ağırlık güncellemeleri şeklindedir. Hata fonksiyonunun değeri yeterince küçük olduğunda da algoritma durur. Geri yayılım algoritması temel olarak bu şekildedir. Bu yöntemin farklı bilim adamları tarafından çeşitli varyasyonları geliştirilmiştir (Cilimkovic, 2015).

Bazı durumlar geri yayılım algoritması performansını artırabilir. Sınıflandırıcı için hedeflerin makul tutulması, momentum kullanarak öğrenimi hızlandırma, ağırlık sapmalarında öğrenme oranı azaltma, kısmi minimumdan sakınma, sıfıra giden türevleri engelleme gibi durumlar buna örnektir. Ayrıca küçük başlangıç ağırlıkları ve küçük başlangıç öğrenme oranı kullanımı ile “sürü etkisi” önlenir (Touretzky, 2006).

Levenberg-Marquardt (trainlm) algoritması karelerinin toplamlarını minimize eden matematiksel problemler ve yüksek hız beklenen uygulamalarda kullanılabilecek geri yayılım algoritmasıdır. Gerektirdiği hafıza fazla olmasına rağmen genelde tercih edilen bir denetimli öğrenme yöntemidir. Ayrıca hessian matrisi gibi hesaplamaları da gerektirmez. Levenberg-

Marquart algoritması için hata fonksiyonu hesabı eşitlik (7)'de verilmiştir (Yüksek, 2007; Yağan, 2010).

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i - t_i)^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (3.6)$$

Bu eşitlikteki  $y_i$  hedef çıkışı,  $t_i$  ise kullanılan ağın bulduğu değer,  $\varepsilon$  ortalama hata karesi ve  $n$ 'de ağdaki nöron sayısını gösterir. Geri yayılım eğitimi kullanılan çok katmanlı YSA yapılarının çıkış katmanında lineer aktivasyon fonksiyonu kullanılır. Bu tür YSA'ların gizli katmanlarında ise yaygın olarak logaritmik-sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılır (Beale, vd., 2015).

Yığın eğitim fonksiyonu (train), ağın ağırlık ve bias değerlerini tüm eğitim seti ağı uygulandıktan sonra günceller. Her bir eğitim örneğindeki hesaplanan gradyanlar, ağırlık ve biaslardaki değişikliği belirlemek için birlikte eklenir.

Toplu gradyan iniş fonksiyonu (traingd), ağırlıklar ve bias, performans fonksiyonunun negatif gradyanı yönünde güncellenir. Eğer bir ağ en hızlı iniş kullanarak eğitilmek istenirse, trainFcn traingd'e olarak alınabilir ve ardından eğitim yürütülebilir. Traingd'nin belirli bir ağ ile ilişkili tek bir eğitim işlevi vardır.

Momentum ile toplu gradyan iniş (traingdm) fonksiyonu, traingd ek olarak, daha hızlı yakınsama sağlayan ilerlemeli ağlar için başka bir eğitim algoritmasıdır. Momentum ile en dik iniş fonksiyonudur Momentum daima bir ağdaki sadece yerel gradyanlara değil, aynı zamanda hata yüzeyindeki son değişimlere de yanıt vermesini sağlar. Alçak geçiren filtre gibi hareket eden momentum, ağın hata yüzeyindeki küçük özellikleri görmezden gelmesine izin verir. Momentum olmadan bir şebeke sıkı bir yerel minimumda sıkışabilir (Hagan vd., 2007).

Değişken öğrenme oranı (traingda, traingdx), standart en dik iniş fonksiyonu ile öğrenme oranını sabit tutarak eğitimi gerçekleştirir. Öğrenme oranının doğru ayarlanması algoritmanın performansını çok etkiler. Öğrenme hızı yüksek ayarlanırsa, algoritma salınım yapabilir ve kararsız hale gelebilir. Öğrenme oranı çok küçükse, algoritma yakınsama için çok uzun sürecektir. Eğitim süreci sırasında en uygun öğrenme oranı değişikliklerinin belirlenmesi pratik değildir. Eğitim süreci boyunca öğrenme oranının değişmesine izin verilmesi traingdx algoritmasının performansını geliştirilebilir. Uyarlanabilir bir öğrenme oranı, öğrenmeyi sabit tutarken öğrenme adımı boyutunu mümkün olduğunca büyük tutmaya çalışacaktır (Beale, vd., 2015).

İleri beslemeli geri yayımlı YSA'ların tahmin ve sınıflandırma problemlerinde çok iyi sonuçlar vermesinden dolayı, Çetin Elmas 2007 yılında yazdığı yapay zeka uygulamaları adlı kitabında bu tip problemlerde en çok kullanılan YSA tipi olarak belirtmiştir (Yağın, 2015).



## 4. GÖL SEVİYESİNİN AKTİF GÜÇ ÇIKIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

### 4.1. Uygulama Yapılacak HES'in Özellikleri

Çalışmada uygulama yapılacak HES; Çoruh nehri üzerinde yağış rejimi düzensiz, sıralı santrallerin bulunduğu bir havzada bulunmaktadır. Net düşü mesafesi kısa, rezerv hacmi küçük ve kendinden önce sıralı rezervuarlara sahip olan HES, orta güçlü, orta basınçlı, dikey eksenli türbin sınıfına dahil iki adet Francis türbinine sahiptir. İki adet senkron generatör bulunan HES'te, her bir generatörün kurulu gücü 82 MVA ve en fazla üretebileceği aktif güç değeri 75 MW'tır. HES'e ait göl havzası kısıtlı olup en yüksek net düşü değeri 38,5 m'dir. Bu nedenle santralin rezervuarında gün içerisinde en düşük ve en yüksek seviyeler görülmektedir. Bu da üretilen gücü doğrudan etkilemektedir.

### 4.2. Göl seviyesinin Aktif Güç Çıkışı Üzerindeki Etkisi

Bu çalışmada HES'in aktif güç üretiminin değişimi üzerinde etkili olan çevresel etkiler de incelenmiştir. Çevresel etki olarak net düşü, yan dere potansiyeli, akarsu rejimi ve iletim hattı etkisi gibi etkiler dikkate alınmıştır. Çalışmanın temel konusu olarak net düşü değişim hızı olarak seçilmiş ve MATLAB YSA araç kutusu (nntool) kullanılarak sonuçlar analiz edilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda en iyi sonuç alınan YSA yapıları ve bunlara ait gerçek çıkış değerleri grafikler ve çizelgeler halinde gösterilmiştir. YSA yapılarının belirlenmesinde kullanılan veri tiplerinin herhangi bir anda santralde ortaya çıkabilecek değerleri Çizelge 4.1'de verilmiştir.

### 4.3. Eğitim Verilerinin Seçilme ve Sisteme Dahil Edilme Yöntemi

HES'e ait veriler, SCADA üzerinden elde edilerek tasarlanan YSA'ların eğitiminde kullanılmıştır. Senkron generatörler, senkron olduğu hat ile tamamıyla etkileşim içerisinde çalışmaktadır. Etki düzeyi değişmekle birlikte tüm hat dinamikleri senkron generatörleri de etkilemektedir. Santralin üretim planı aktif güç üzerinden yapıldığından önemli olan  $P_{SET}$  (hedef üretim) değerinin en iyi şekilde sağlanmasıdır. Sonuç olarak planlanan saat içerisindeki üretim kalitesi bu hedef üretim değeriyle ölçülür. YSA modelinin kullanılmasındaki amaç hedeflenen aktif güç değerini en küçük hata ile üretebilmektir. Bu nedenle  $P_{SET}$  değeri ile  $P_{NET}$  değeri eşitlenir. Bu şekilde kontrol dışında kalan dinamiklerin etkisinden hız regülatörünü kurtarmak amaçlanmıştır. Senkron generatörün aktif çıkış gücü, en çok düşü yüksekliği ve iletim hattı üzerindeki frekans değişimine duyarlıdır.

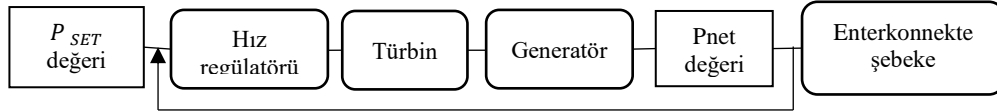
**Çizelge 4.1.** YSA eğitiminde kullanılan örnek santral değerleri.

YSA GİRİŞ DEĞERLERİ					YSA HEDEF DEĞERİ
TÜRBİN AYAR KANADI AÇIKLIĞI (%)	AKTİF GÜÇ ANİ DEĞERİ (MW)	NET AKTİF GÜÇ DEĞERİ (MW)	BARA FREKANSI (Hz)	NET DÜŞÜ (m)	AKTİF GÜÇ SET DEĞERİ (MW)
87	57	57	50	36	57
93	57	57	50	35	57
83	57	57	50	37	57
89	58	58	50	36	58
89	58	58	50	36	58
89	58	58	50	36	58
90	59	59	50	36	59
90	59	59	50	36	59
90	59	59	50	36	59
91	59	59	50	36	59
91	59	59	50	36	59

Eğitilecek YSA modelinde kullanılacak SCADA verilerinin seçimi açısından bu önemlidir. Bu nedenle uygulamada kullanılacak SCADA verileri aktif güç üretimi ile ilgili olmalıdır. Dolayısıyla net düşü gibi aktif güç üretimini etkileyen diğer parametrelerde eğitime katılmalıdır. Farklı SCADA verileri içinde benzer çalışma çeşitlendirilebilir. Net düşü etkisinin gözlenebilmesi için eğitim ve test verisi olarak bu çalışmada, göl kotunun çok farklı seviyelerde olduğu ve her iki senkron generatörün tek başına çalıştığı bir aylık verinin kullanılması tercih edilmiştir.

Kullanılacak giriş ve çıkış verileri dakikalık olarak santraldeki SCADA sistemi üzerinden elde edilmiştir. Önce yaklaşık 43200 veri içerisinde generatörlerin devrede olmadığı veriler çıkarılmıştır. Sonra çizelge 4.1’de belirtilen YSA için kullanılacak altı veri tipinden herhangi birinin eksik olduğu ve her iki generatörün beraber çalıştığı veri satırları çıkarılmıştır. Bunu nedeni, senkron generatörlerin yalnız ve birlikte çalışmaları durumunda  $P_{SET}$  ve  $P_{NET}$  değerleri arasındaki farkın değişme göstermesidir. Daha sonra her iki generatöre ait veriler giriş, hedef ve test verisi olarak üçe ayrılmıştır. Bu veriler ayrıldıktan sonra YSA’ da hedef verisi olarak  $P_{SET}$ , diğer veri tipleri olan türbin ayar kanat açıklığı (GV),  $P_{ANI}$ ,  $P_{NET}$ , bara frekansı (F), net düşü (NH) ise giriş verileri olarak kullanılmıştır.

Şekil 4.1’de SCADA üzerinde operatör tarafından girilen aktif güç set değerinin sistemdeki izlediği yol verilmiştir. Geri beslemeli kontrol sistemi, aktif güç set değerini sağlayacak şekilde sürekli türbin hızını kontrol etmektedir.

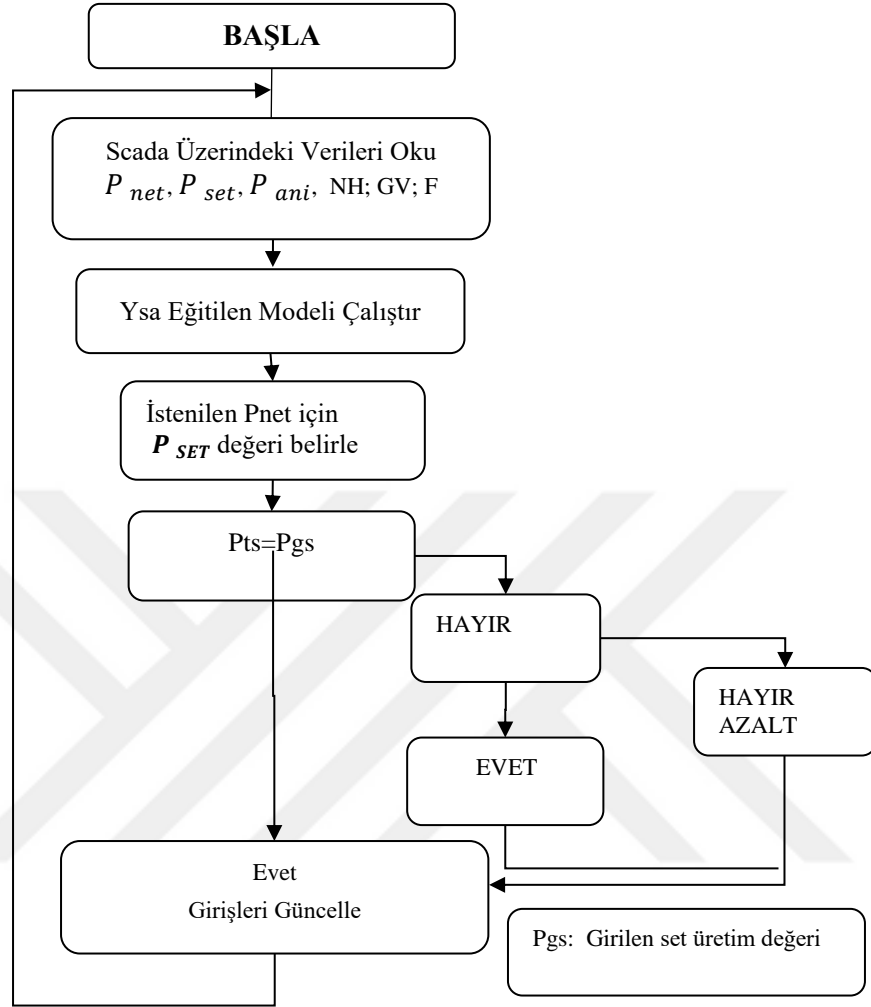


Şekil 4.1. Basitleştirilmiş  $P_{SET}$  değeri işleyiş düzeni.

#### 4.3.1. YSA ile $P_{SET}$ değeri tahmin etme

Elektrik üretim tesislerinde senkron generatörler ile üretilen aktif gücün net değeri bağlı bulunduğu bara frekansı, SCADA üzerinde set edilen değer, generatör üzerindeki reaktif güç, bara gerilimi, türbin ayar kanat açısı gibi durumlara bağlıdır. Ancak etki eden faktörler önem derecesi açısından sıralandığında ise set edilen değer, ani güç değeri, bara frekansı, net düşü ve su alma yeteneğinin bir göstergesi olarak türbin ayar kanat açıklığı olarak belirtilebilir.

Bu çalışmada kullanılan YSA'nın sistemdeki kullanım şeklinin akış diyagramı Şekil 4.2’de verilmiştir. Bu algorithmada aktif güç kontrol edilmek istendiğinden CADA üzerinden  $P_{NET}$ ,  $P_{SET}$ ,  $P_{ANI}$ , NH, GV ve F bilgileri okunur. YSA modeli, bu bilgileri kullanarak aktif güç çıkış değeri  $P_{NET}$  için  $P_{SET}$  değerinin ne olması gerektiği belirler. O andaki aktif güç set değeri tahmin edilenle aynı ise set değerinde değişiklik yapılmaz, fazla ise azaltılır, az ise artırılır. Bu kontrol sürekli olarak tekrar edilir. Sonuçta saatlik istenilen aktif güç üretim değeri bu şekilde sağlanmış olur.



**Şekil 4.2.** YSA ile SCADA  $P_{SET}$  değerini belirleyen algoritmanın akış diyagramı.

Bu çalışmada MATLAB Neural Network Toolbox ara yüzü kullanılarak belirli sayıda nöron içeren bir çok ağ yapısı denenmiştir. Denemelerin tümünde performans fonksiyonu olarak ortalama karesel hata (MSE) seçilmiştir. Altı, sekiz, on, yirmi ve elli sayılarında nöron içeren tek katmanlı ve farklı sayılarda nöron içeren iki katmanlı, gizli katman ve çıkış katmanında tan-sigmoid, log-sigmoid ve purline aktivasyon fonksiyonları kullanılan YSA'lar hem tranlm hem de traingdx eğitim fonksiyonu ile eğitilmiştir. Farklı olarak ikinci senkron generatörde, oluşturulan sayı gruplarındaki en iyi sonuçları veren YSA'lar ilave olarak, eğitim fonksiyonunun etkisini görebilmek için trainbr eğitim fonksiyonu ile de eğitilmiştir.

### 4.3.2. Birinci senkron generatörün tek başına çalışırken $P_{SET}$ değerini tahmin eden YSA

Uygulama yapılan HES'te, SCADA üzerinden işletmeci tarafından set edilmesi istenen aktif güç değeri, hız regülatörü kontrol sistemi tarafından PID kontrol ile net çıkış değeri olması sağlanır. Net aktif güç çıkış değeri saat içi toplam düşünüldüğünde set değerinden farklıdır. Bu örnekteki HES gibi, net düşüsü hızlı değişen HES'lerde değişen net düşü ile birlikte cebri boru ağzında su alma basıncıda değişeceğinden ayar kanat değişimi fazla olmaktadır. Aynı set değerini sağlayabilmek için her düşü seviyesinde farklı miktarda su atıldığından hız regülatörü zorlanmakta veya çalışma sınırları değişmektedir. Hatta bazı düşü seviyelerinde santral, normal üretim değerlerini bile sağlayamaz hale gelmektedir.

Eğitilecek YSA modelinde aktif güç üzerine iyileştirme veya kalibrasyon düşünüldüğünden, giriş bilgisi olarak kullanılacak değerlerin daha çok PFK'da kullanılan SCADA değerlerine benzer olması uygun görülmüştür. Bu amaçla herhangi bir santralin işletmede sürekli üretebileceği değerler olan  $P_{SET}$  değerleri, çıkış (hedef matrisi) olmak üzere;  $P_{ANI}$ ,  $P_{NET}$ , generator ayar kanadı, net düşü ve bara frekansı giriş matrisi olarak değerlendirilmiştir.

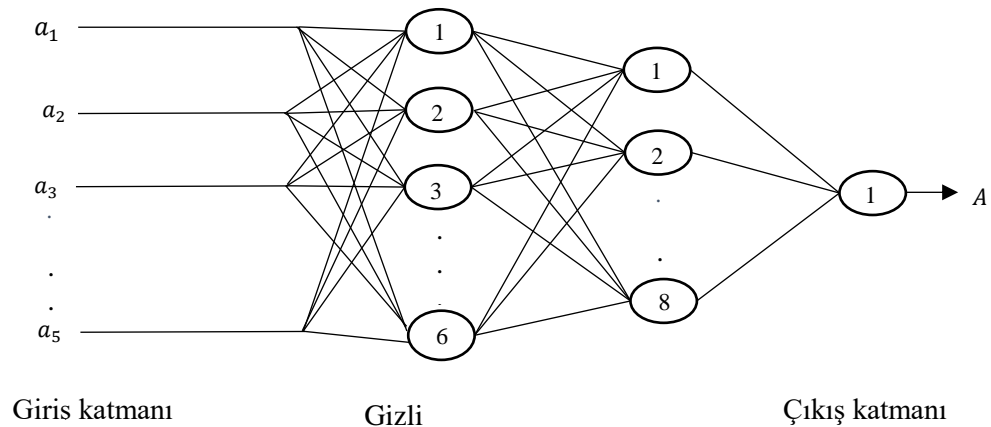
Birinci Senkron generatör için sadece birinci senkron generatörün çalıştığı anlardaki veriler kullanılmıştır. Eğitim için  $5 \times 2099$  giriş matrisi,  $1 \times 2099$  hedef matrisi elde edilmiştir. Eğitilen YSA'da  $5 \times 243$  test giriş verisi ve teste ait  $1 \times 243$  hedef verisi kullanılmıştır. Performans fonksiyonu olarak MSE kullanılarak tahmin yeteneği belirlenmiştir. Yapılan denemelerde en iyi sonuç alınan ağ yapısı; çok katmanlı, MSE performans fonksiyonu ve trainlm eğitim fonksiyonuna sahip gizli katmanlarında logaritmik-sigmoid ve çıkış katmanında da purline aktivasyon fonksiyonu kullanılan YSA modelidir. YSA kullanılırken santralin mevcut kontrol sistemine bir müdahale yapılmamıştır. Burada amaç, ikinci bir kontrol kademesi oluşturarak daha iyi sonuç almaktır.

Eğitim için tasarlanan YSA'ların tek katmanlı, gizli katman nöron sayısı altı, sekiz, on, yirmi, elli olan; farklı nöron sayılarına sahip çok katmanlı ve kaskat yapılı olmak üzere hem eğitim hem de aktivasyon fonksiyonları değiştirilerek denemeler yapılmıştır. Sonunda nöron sayısına ve eğitim fonksiyonuna göre gruplandırılan YSA'lardan en iyi sonuç veren tasarımlar çizelge 4.2'de verilmiştir. Tüm sonuçlar içerisindeki en iyi hata çıktısı çizelge 4.2 üzerinde koyu harflerle gösterilmiştir. Bu çalışmada hedef yaklaşık % 5'in altında tahmin yapabilmek için elde edilen en iyi sonuçta ise hata %1'in de çok altındadır.

Birinci senkron generatör için aktif güç set değeri tahmini yapan YSA yapısı Şekil 4.3 ile verilmiştir.

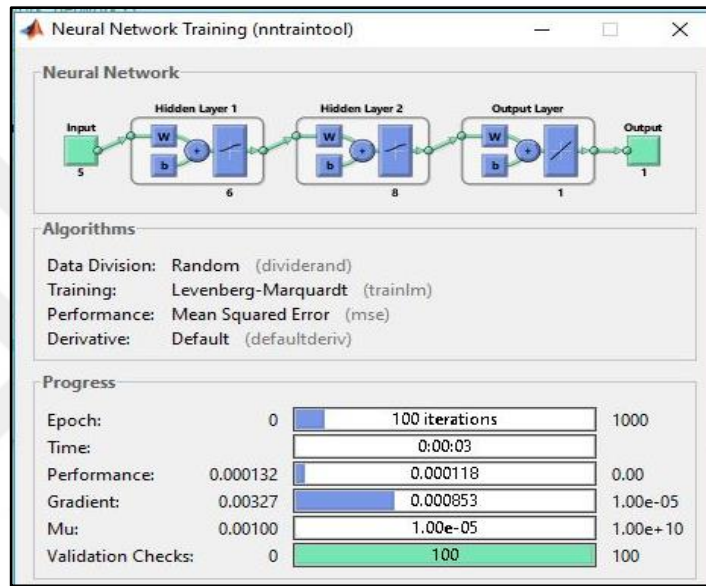
**Çizelge 4.2.** Birinci senkron generatör set değeri tahmini için % hata tablosu.

En İyi Sonuçlar için % Hata Matrisi			
Gizli Katman nöron Sayısı	Eğitim Fonksiyonu	Gizli Katman-Çıkış Katmanı Fonksiyonları	% Hata Değeri
6	Traindx	Log-Tan	0,002207677
	Trainlm	Tan-Pur	0,000394323
8	Trainlm	Tan-Tan	0,000317357
	Traindx	Tan-Pur	0,000518495
10	Trainlm	Tan-Tan	0,000341589
	Traindx	Pur-Pur	0,000568945
20	Trainlm	Log-Tan	0,000268860
	Traindx	Tan-Pur	0,000513125
50	Traindx	Tan-Tan	0,000550339
6	Trainlm (Kaskat)	Tan-Tan	0,000393421
6/8	Traindx	log-log-Çıkış Katmanı log	0,000396124
6/8	Trainlm	Log-Log-Çıkış Katmanı Pur	0,000211261

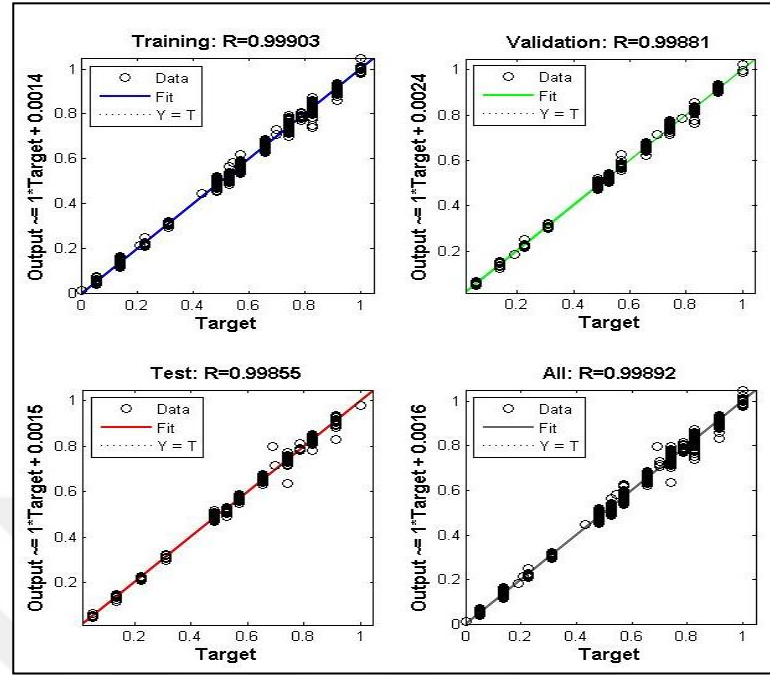


**Şekil 4.3.** Birinci senkron generatör  $P_{SET}$  değeri tahmini yapan YSA [logaritmik-sigmoid (6 nöron), logaritmik-sigmoid (8 nöron), lineer (1 nöron)].

Seçilen ağın birinci gizli katmanında 6 nöronlu logaritmik-sigmoid, ikinci gizli katmanında 8 nöronlu logaritmik-sigmoid ve çıkış katmanında tek nöronlu lineer aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. Şekil 4.4’de YSA’nın Matlab/nnTool ile tasarlanan genel yapısı ve Şekil 4.5’de eğitim, onaylama ve test gruplarını bir arada gösteren ve Matlab/nnTool çıktısı olan regresyon uyum eğrileri verilmiştir. Tasarlanan ağ ayrıca eğitim dosyalarında hiç bulunmayan işletme durumları içinde test edilmiştir. Bu test işleminin sonuçları Çizelge 4.3’de verilmiştir.



Şekil 4.4. Seçilen ağın nnTool genel yapısı.



Şekil 4.5. YSA Modeli için regresyon analizi.

**Çizelge 4.3.** Birinci senkron generatör  $P_{SET}$  değeri tahmin sonuçları (logaritmik-sigmoid (6 nöron), logaritmik-sigmoid (8 nöron), lineer (1 nöron)).

Giriş Değerleri					Hedef
Gerçek Çıkış	Logaritmik-Sigmoid (6 Nöron), Logaritmik-Sigmoid (8 Nöron), Lineer (1 Nöron)	% Hata Oranı	Gerçek Değer (MW)	Tahmin Değeri (MW)	Fark Üretim Set Değeri (MW)
1	1,014789	0,000219	59,00	59,11	0,11
0,913793	0,903115	0,000114	58,34	58,26	0,08
0,827586	0,819391	6,72E-05	57,69	57,63	0,06
0,827586	0,824509	9,47E-06	57,69	57,67	0,02
0,827586	0,830041	6,03E-06	57,69	57,71	0,02
0,827586	0,828735	1,32E-06	57,69	57,70	0,01
0,741379	0,715188	0,000686	57,03	56,84	0,20
0,741379	0,767407	0,000677	57,03	57,23	0,20
0,741379	0,742443	1,13E-06	57,03	57,04	0,01
0,655172	0,673773	0,000346	56,38	56,52	0,14
0,655172	0,671649	0,000271	56,38	56,50	0,13
0,655172	0,667231	0,000145	56,38	56,47	0,09
0,568966	0,552653	0,000266	55,72	55,60	0,12
0,568966	0,569844	7,71E-07	55,72	55,73	0,01
0,525862	0,50149	0,000594	55,40	55,21	0,19
0,525862	0,526313	2,03E-07	55,40	55,40	0,00
0,482759	0,494246	0,000132	55,07	55,16	0,09
0,482759	0,490696	6,3E-05	55,07	55,13	0,06
0,310345	0,322533	0,000149	53,76	53,85	0,09
0,224138	0,218509	3,17E-05	53,10	53,06	0,04
0,224138	0,225523	1,92E-06	53,10	53,11	0,01
0,224138	0,223095	1,09E-06	53,10	53,10	0,01
0,137931	0,12259	0,000235	52,45	52,33	0,12
0,051724	0,041222	0,00011	51,79	51,71	0,08
0,051724	0,053317	2,54E-06	51,79	51,81	0,01
MSE		<b>0,0001653</b>			<b>0,076</b>

Burada aktif güç set değeri ortalama 0,076 MW fark ile tahmin edilebilmektedir. Buradaki %0,129 hata istenilen net aktif güç çıkışında çok daha iyi sonuç verecektir. Bu şekilde sistem istenilen net aktif güç çıkışı için olası aktif güç set değerini belirleyerek daha az dengesizlik üretimi ile arz güvenliğine katkı sağlanacaktır.

### 4.3.3. İkinci senkron generatör tek başına çalışırken $P_{SET}$ değeri tahmini yapan YSA

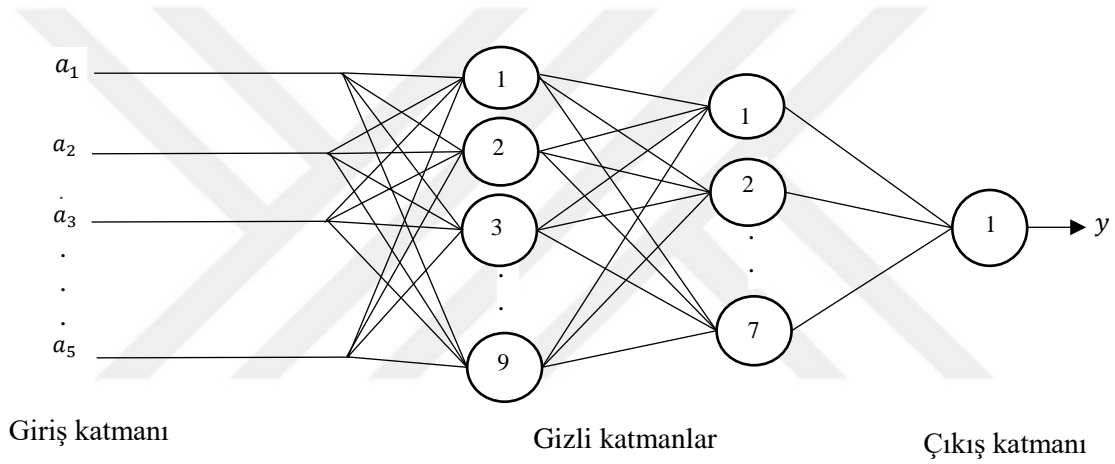
İkinci senkron generatörde de kullanılan veri tipleri ve verilerin elde edilme yöntemi birinci senkron generatör ile aynıdır. İkinci Senkron generatör için de benzer şekilde sadece ikinci senkron generatörün çalıştığı anlardaki veriler kullanılmıştır. Eğitim için 5x1580 giriş matrisi, 1x1580 hedef matrisi elde edilmiştir. Eğitilen YSA'da 5x165 test giriş verisi ve teste ait 1x165 hedef verisi kullanılmıştır. Performans fonksiyonu olarak MSE kullanılarak tahmin yeteneği belirlenmiştir. Yapılan denemelerde en iyi sonuç alınan YSA ağ yapısı; çok katmanlı, MSE performans fonksiyonu ve traingdx eğitim fonksiyonuna sahip gizli katmanlarında ve çıkış katmanında tanjant-sigmoid aktivasyon fonksiyonu kullanılan yapıdır.

Çizelge 4.4'de tasarlanan YSA'ların nöron sayıları ve eğitim fonksiyonları dikkate alınarak gruplanmıştır ve her grup için en iyi hata değeri çıktıları verilmiştir. Tüm sonuçlar içerisindeki en iyi hata çıktısı Çizelge 4.4 üzerinde koyu harflerle gösterilmiştir. Birinci senkron generatördeki duruma benzer şekilde, ikinci senkron generatör içinde hedef tahmin yaklaşık %5'in ve hata da %1'in altındadır.

**Çizelge 4.4.** İkinci senkron generatör set değeri tahmini için % hata tablosu.

En İyi Sonuç % Hata Matrisi			
Gizli Katman nöron Sayısı	Eğitim Fonksiyonu	Gizli Katman-Çıkış Katmanı Aktivasyon Fonksiyonları	% Hata Değeri
6	Traingdx	Log-tan	0,00102471
	Trainlm	Tan-pur	0,00049072
8	Trainlm	Tan-tan	0,00042254
	Traingdx	Tan-pur	0,00113394
10	Trainlm	Tan-tan	0,00030114
	Traingdx	Pur-pur	0,00109384
20	Trainlm	Tan-pur	0,00022388
	Traingdx	Tan-pur	0,00112980
50	Traingdx	Tan-tan	0,00111842
91/5	Traingdx	Tan-Tan-tan	0,00090581
9/7	Trainlm	Tan-Tan-tan	0,00018897

Seçilen ağın birinci gizli katmanında 9 nöronlu tanjant-sigmoid, ikinci gizli katmanında 7 nöronlu tanjant-sigmoid ve çıkış katmanında tek nöronlu tanjant-sigmoid aktivasyon fonksiyonları kullanılmıştır. İkinci senkron generatör için aktif güç set değeri tahmini yapan YSA yapısı Şekil 4.6 ile verilmiştir. Yapılan denemelerde en iyi sonuçları veren YSA'lar, eğitim fonksiyonu trainbr seçilerek eğitilmiştir ve önceki sonuçlar ile karşılaştırması çizelge 4.5'te verilmiştir. Şekil 4.7'de YSA'nın Matlab/nntool ile tasarlanan genel yapısı ve Şekil 4.8'de eğitim, onaylama ve test gruplarını bir arada gösteren ve Matlab/nntool çıktısı olan regresyon uyum eğrileri verilmiştir. Tasarlanan ağ ayrıca eğitim dosyalarında hiç bulunmayan işletme durumları içinde test edilmiştir. Bu test işleminin sonuçları çizelge 4.6'da verilmiştir.

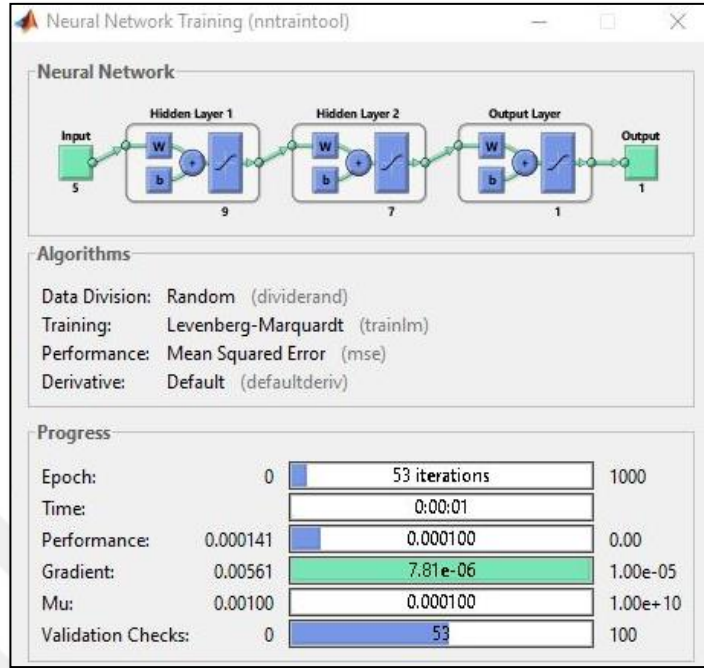


**Şekil 4.6.** Senkron Generatör 2'nin  $P_{SET}$  değerini tahmin eden YSA [tanjant-sigmoid (9 nöron), tanjant-sigmoid (7 nöron), tanjant-sigmoid (1 nöron)].

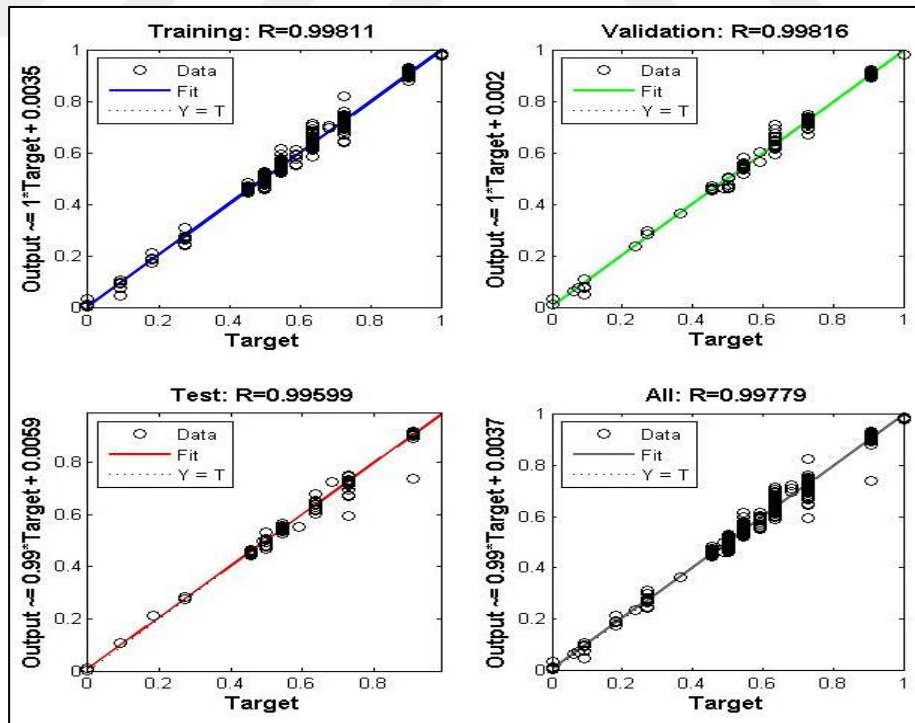
Çizelge 4.5'te verilen eğitim fonksiyonunda yapılan bu değişiklikle elde edilen hata kareleri arasındaki fark çok azdır. Ağın farklı varyasyonlarında trainbr eğitim fonksiyonu; traingdx veya trainlm eğitim fonksiyonlarından daha iyi veya kötü hata yüzdesi verebilir. Tasarlanan YSA ağları ve denemelerde elde ettiğimiz tahmin yeteneğini düşündüğümüzde trainbr eğitim fonksiyonu da kullanılabilir görünmektedir. Ancak tepki süresi ve performans beraber dikkate alındığında trainlm veya traingdx eğitim fonksiyonu kullanımının daha uygun olduğuna karar verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Aktif güç set değeri tahmininin trainbr fonksiyonu kullanıldığında % hata değişimi.

En İyi Sonuç % Hata Matrisi			
Gizli Katman nöron Sayısı	Eğitim Fonksiyonu	Gizli Katman-Çıkış Katmanı Fonksiyonları	% Hata Değeri
6	Train <sub>gdx</sub>	Log-log	0,001024712
	Train <sub>br</sub>		0,00064169
	Train <sub>lm</sub>	Tan-tan	0,000490728
	<b>Train<sub>br</sub></b>		0,000540674
8	Train <sub>lm</sub>	Tan-tan	0,000422541
	<b>Train<sub>br</sub></b>		0,000344893
	Train <sub>gdx</sub>	Tan-pur	0,001133945
	<b>Train<sub>br</sub></b>		0,000407693
10	Train <sub>lm</sub>	Log-tan	0,000301145
	<b>Train<sub>br</sub></b>		0,000368693
	Train <sub>gdx</sub>	Tan-pur	0,001093845
	<b>Train<sub>br</sub></b>		0,000398301
20	Train <sub>lm</sub>	Log-tan	0,00022388
	<b>Train<sub>br</sub></b>		0,000283809
	Train <sub>gdx</sub>	Tan-tan	0,001129802
	<b>Train<sub>br</sub></b>		0,000178334
50	Train <sub>gdx</sub>	Tan-tan	0,001118429
	<b>Train<sub>br</sub></b>		0,000211853
Çoklu Deneme (91+5)		Tan-tan-tan	0,000905814
	<b>Train<sub>br</sub></b>		0,001010505
Çoklu Deneme (9+7)		Tan-tan-tan	0,000188979
	<b>Train<sub>br</sub></b>		0,00012377



Şekil 4.7. Seçilen ağı nntool genel yapısı.



Şekil 4.8. YSA Modeli için regresyon analizi.

**Çizelge 4.6.** Senkron Generatör 2'nin  $P_{SET}$  değeri tahmin sonuçları [tanjant-sigmoid (9 nöron), tanjant-sigmoid (7 nöron), tanjant-sigmoid (1 nöron)].

Giriş Değerleri					Hedef
Gerçek Çıkış	Tanjant -Sigmoid (9 Nöron), Tanjant -Sigmoid (7 Nöron), Tanjant - Sigmoid (1 Nöron)	% Hata Oranı	Gerçek Değer (MW)	Tahmin Değeri (MW)	Üretim Set Değeri Farkı (MW)
0,909	0,916073231	4,87528E-05	57,00	57,08	0,08
0,909	0,909708085	3,80907E-07	57,00	57,01	0,01
0,909	0,908245499	7,14718E-07	57,00	56,99	0,01
0,909	0,910123286	1,0658E-06	57,00	57,01	0,01
0,909	0,909999092	8,24796E-07	57,00	57,01	0,01
0,909	0,918185049	8,27034E-05	57,00	57,10	0,10
0,909	0,906020232	9,42906E-06	57,00	56,97	0,03
0,727	0,737449411	0,000103565	55,00	55,11	0,11
0,727	0,721651034	3,16034E-05	55,00	54,94	0,06
0,727	0,694746885	0,00105793	55,00	54,64	0,36
0,727	0,725439451	3,3609E-06	55,00	54,98	0,02
0,727	0,729033721	3,1011E-06	55,00	55,02	0,02
0,636	0,661839662	0,000649028	54,00	54,28	0,28
0,636	0,657001188	0,000425909	54,00	54,23	0,23
0,636	0,635742087	3,86323E-07	54,00	53,99	0,01
0,636	0,659351653	0,000528449	54,00	54,25	0,25
0,591	0,593495229	6,68811E-06	53,50	53,53	0,03
0,546	0,544782119	4,52157E-07	53,00	52,99	0,01
0,456	0,454142064	1,62724E-07	52,00	52,00	0,00
0,456	0,454257876	8,27011E-08	52,00	52,00	0,00
0,456	0,45425626	8,36332E-08	52,00	52,00	0,00
0,456	0,45839499	1,48189E-05	52,00	52,04	0,04
0,456	0,45428944	6,55435E-08	52,00	52,00	0,00
0,456	0,456377485	3,35634E-06	52,00	52,02	0,02
0,273	0,27492039	4,80976E-06	50,00	50,02	0,02
Hata Karelerinin Oranı		0,000119109			0,0684

Çizelge 4.6'dan görüldüğü üzere aktif güç set değeri ortalama 0,0684 MW fark ile tahmin edilebilmektedir. Bu değer net çıkış üzerinde daha az bir fark oluşturacaktır. Buradaki ortalama

% 0,12 hata beklenen aktif güç net çıkışı için çok daha iyi sonuç verecektir. Bu şekilde üretilmek istenen aktif güç değeri daha az dengesizlikle üretililecektir.

#### 4.4. Santral Kurulumundaki Değerlerle ve Güncel Değerlerin Karşılaştırılması

Senkron generatörler imal edilirken belirli standartlar gözetilir. Generatörün hangi net düşü aralığında hangi aktif güç çıkışı için ne kadar su kullandığını göstermek amacıyla verim grafiği oluşturulur. Prototip HILL-CHART olarak adlandırılan bu çoklu değer grafiğinde verim, net düşü, generatör aktif güç çıkışı, debi gibi değerlerin aralarındaki bağıntılar verilmiştir. Net düşü hızlı değişen bir santraldaki bu değerler göz önünde bulundurulduğunda bir takım karşılaştırmalar yapılabilir. Hill-Chart üzerindeki bazı işletme değerleri (net düşü, debi ve aktif güç gibi) çizelge 4.7’de, santralin kurulumundan 10 yıl sonraki benzer değerleri ise çizelge 4.8’de verilmiştir.

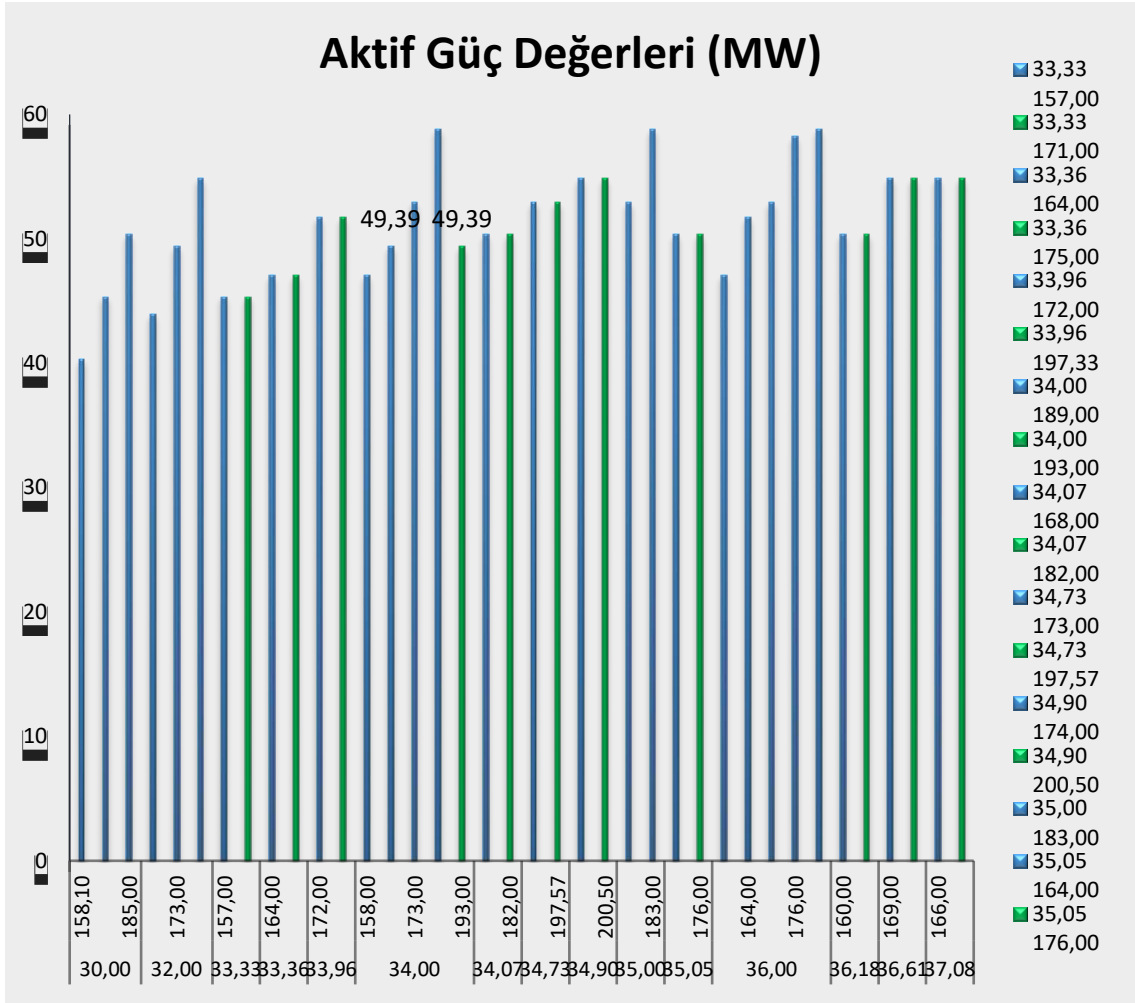
**Çizelge 4.7.** Hill-Chart üzerindeki bazı işletme değerleri.

Net Düşü (m)	Senkron Generatör Debisi ( $m^3/s$ )	Senkron Generatör Aktif Gücü (MW)
30,00	158,10	40,29
30,00	170,00	45,32
30,00	185,00	50,36
32,00	156,60	43,90
32,00	173,00	49,38
32,00	189,00	54,87
33,33	157,00	45,32
33,36	164,00	47,05
33,96	172,00	51,74
34,00	158,00	47,04
34,00	165,00	49,39
34,00	173,00	52,92
34,00	189,00	58,80
34,07	168,00	50,36
34,73	173,00	52,92
34,90	174,00	54,87
35,00	169,00	52,92
35,00	183,00	58,80
35,05	164,00	50,36
36,00	153,00	47,04
36,00	164,00	51,74
36,00	166,00	52,92
36,00	176,00	58,21
36,00	178,00	58,80
36,18	160,00	50,36
36,61	169,00	54,87
37,08	166,00	54,87

**Çizelge 4.8.** Kurulumundan 10 yıl sonraki net düşü ve aktif güç değerleri.

Net Düşü (m)	Türbin Debisi ( $m^3/s$ )	Senkron Generatör Aktif Gücü (MW)
34,90	200,50	54,87
36,61	182,29	54,87
37,08	178,75	54,87
33,33	171,00	45,32
36,18	171,00	50,36
35,05	176,00	50,36
34,07	182,00	50,36
34,73	197,57	52,92
33,36	175,00	47,05
34,00	193,00	49,39
33,96	197,33	51,74

Çizelge 4.7 ve 4.8'den görüleceği gibi aynı net düşü ve aktif güç çıkışı için senkron generatör kurulum değerlerine göre farklı miktarda su kullanmaktadır. HES için başlangıçtaki ve 10 yıl sonraki işletme değerlerinin değişiminin gösterimi Şekil 0.9'da verilmiştir.



**Şekil 4.9.** HES için başlangıçtaki ve 10 yıl sonraki işletme değerleri farkı.

Şekil 4.9'da verilen çubuk grafikte aynı net düşü değerinde aynı enerjiyi üretmek için ünitenin farklı miktarda su kullandığı görülmektedir. Örneğin; başlangıçta 34,00 m net düşü değerinde 49,39 MWh enerji üretmek için saniyede  $165 m^3$  su kullanılmaktadır. On yıl sonra aynı net düşü değerinde aynı enerjiyi üretebilmek için  $193 m^3$  su kullanılmaktadır.

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

HES'lerin sahip olduğu tahrik gücünü belirleyen en temel değerlerden biri net düşü yüksekliğidir. Net düşü yüksekliği genelde kurulum aşamasında önemlidir. Ancak bazı santrallerde işletme sırasında kullanılan suyun yüksekliğinde hızlı değişimler olabilir. Bir santralin baraj tipi, rezervuardaki net düşü değişimini, rezervuarı besleyen kayakların çeşitliliğini, potansiyelini ve enerji üretiminde kullanılan su miktarını etkilemektedir.

Uygulama alanı olarak seçilen bu santralde, net düşü değişiminin dönemsel olarak farklılık göstermekle birlikte hızlı olduğu söylenebilir. Bu nedenle elektrik üretimi sırasında su basıncı önemli ölçüde değiştiğinden SCADA üzerinden set edilen aktif güç üretimi de olumsuz etkilenmektedir. Uygulama yapılan HES'teki hız regülatörü, PID kontrol yöntemiyle ayar kanatlarını kontrol etmektedir. Fakat net düşü değişiminin fazla olduğu anlarda, hedeflenen aktif güç değeri sağlanamamaktadır. Mevcut sistemde çok farklı net düşü değerlerinde, hedeflenen aktif gücün sağlanabilmesi için operatörün SCADA üzerindeki set değerlerine manuel olarak müdahale etmesi gerekebilir. HES'in kontrol sistemine müdahale edilmeden YSA tabanlı bir algoritma ile aktif güç üretimindeki bu dezavantajın ortadan kaldırabilmesi için alternatif bir çözüm önerilmiştir. Bu modelde, sistem üzerindeki elle müdahale gereksinimini kaldıracak YSA tabanlı bir algoritma ile daha hassas ve güvenli bir set değeri takibi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada mümkün olan en iyi hata yüzdesi performansı için mümkün olduğunca farklı sayıda nöron ve transfer fonksiyonuna sahip birçok YSA modeli kullanılmıştır. Çalışmada iyi sonuç alınacağı düşünülerek ileri beslemeli YSA kullanılmıştır. Her iki ünite için de ayrı ayrı olmak üzere en iyi sonucu veren YSA modelleri, regresyon analiz sonuçları, gerçek değer ve tahmin değeri karşılaştırılması yapan çizelgeler verilmiştir. Yapılan denemeler sonucunda tahmin edilen set değeri kullanıldığında üretilmek istenilen aktif güç üretiminin % 1'in çok altında bir hata ile üretilbileceği görülmüştür. HES'lerde her saat için üretilmek için taahhüt edilen bir enerji miktarı vardır. Bu çalışma sayesinde mali sorumlulukların yerine getirildiği, saatlik üretim için taahhüt edilen enerji miktarı üretilerek dengesizlik sorununun önemli ölçüde önüne geçilebilecektir.

İleride yapılacak çalışmalarda farklı eğitim fonksiyonları kullanılan daha fazla sayıda katman ve nöron içeren YSA'lar ve derin öğrenme modelleri tasarlanabilir. Söz konusu bu YSA'ların eğitiminde kullanılacak veriler yılın farklı dönemlerinde elde edilerek dönemsel farklılıkların etkileri analiz edilebilir. Önemli bir çevresel etki olan çöp faktörü bir şekilde YSA eğitimine katılarak bu olumsuz etki de engellenebilir veya azaltılabilir. Geliştirilecek yazılımlar

ile YSA, gerçek bir sisteme gerçek zamanlı uygulanarak sistemin performans değerlendirilmesi yapılabilir.



## KAYNAKLAR DİZİNİ

Abdolmaleki, M., Ansarimehr, P. ve Ranjbar, A. M. (2007). "A robust fuzzy logic adaptive PI controller for hydro power plants", SICE Annual Conference. 17-20 September, 2592-2595.

Akçay, S. (2007). Hidroelektrik santrallerde güç frekans denetimi, Yüksek Lisans Tezi, Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 2005/1-10.

Arı, A. ve Berberler, M. E. (2017). Yapay sinir ağları ile tahmin ve sınıflandırma problemlerinin çözümü için arayüz tasarımı, *Acta Infologica*, 1(2),

Ayyagari, S.B. (2011). Artificialneural network basedfault location for transmission lines, University of Kentucky Master's Theses.

Başeşme, H. (2003), Hidroelektrik santraller ve hidroelektrik santral tesisleri, EÜAŞ Ankara.

Baydemir, S. (2013). "Küçük güçlü hidroelektrik santrallerinin güç ve frekans kontrolü", Yüksek Lisans Tezi, Tunceli Üniversitesi, Tunceli.

Beale, M. H., Hagan, M. T.ve Demuth, H. B. (2015). Neural network toolbox user's guide.

Bozali, B. (2012). Elektrik güç sistemlerinde kararlılık problemlerinin yerçekimi algoritması ile güncellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi, Düzce.

Brennen, E.C. (1995). Cavitation and Bubble Dynamics, Oxford University Press, Inc., 39-40.

Cebeci, M. E. (2008), The Effects Of Hydro Power Plants Governor Settings On The Turkish Power System Frequency, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 22-163.

Cilimkovic, M. (2015), Neural Networks and Back Propagation Algorithm, Institute of Technology. Blanchardstown, Dublin, İrlanda.

Çetin, N. S. (2006), Şebeke bağlantısız pm generatörlü rüzgâr türbinlerinin ysa ile sistem optimizasyonu, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi, 244 s. , İzmir.

Demirhan, A. Y. (2006), Küçük hidroelektrik santrallerde türbin tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul.

Dahamsheh, A. ve Aksoy, H. (2009), Kurak bölge aylık yağışlarının Markov zinciri eklenmiş koşullu ileri beslemeli geri yayılım yapay sinir ağları ile tahmini, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Eker, İ. , (2003), Robust Governor Design For Hydro Turbines Using A Multivariable-Cascade Control Approach, *Arabian Journal For Science And Engineering*, 28(2), 195-210.

### KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)

Gözde, H. Taplamacıoğlu, M. C. (2009), Nehir tipi bir hidroelektrik santralde klasik integral ve bulanık mantık tabanlı yük-frekans kontrolü karşılaştırması, EMO III. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu Bildirileri, 188.

Gözde, H (2010), Güç sistemlerinde yapay arı kolonisi algoritması yöntemi ile yük-frekans kontrolü optimizasyonu, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

Hagan, M. T., Demuth, H. B., Beale, M. H. ve Jesus, O. D., (2014), Neural Network Desing, 2nd Edition, eBook.

Hagan, M., Beale, M., Demuth, H. (2007), Neural Network Toolbox 5 User's Guide.

Haykin, S. (1994), Neural networks. A comprehensive foundation, Macmillan collage publishing Company, Inc., New York.

Kul, N. (2009), 1500 kVA Gücünde 6,3 kV Çıkış Gerilimli Jeneratör Grubu ve Yüksek Gerilim Kesicilerinin PLC-SCADA İle Uzaktan İzlenmesi, Yüksek lisans tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.

Kölmek, M. A. (2012), Türkiye elektrik dengeleme ve uzlaştırma piyasasındaki sistem gün öncesi fiyatının yapay sinir ağları kullanılarak modellenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 3s.

Michaud, F. ve Robert, G. (2010, April), Flatness-based control of an hydro power plant, 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference (MELECON), 1505-1509.

Markus, E. (1991), Micro Pelton Turbines. Swiss Center for Appropriate Tecnology, St. Gallen, Switzerland.

Martins, L. S., Martins, J. F., Pires, V. F. ve Alegria, C. M. (2005), A neural space vector fault location for parallel double location for parallel double-circuit distribution lines, *Electrical Power and Energy Systems*, Cilt:27, Sayı:3, s.22.

Nabiyev, V. V. (2010), *Yapay zeka: İnsan –Bilgisayar etkileşimi*, Seçkin yayıncılık, Ankara.

Nanda, J., Mishra, S., Mishra, P. G. ve Sajith, K. V. (2010), A novel classical controller for automatic generation control in thermal and hydrothermal systems, Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), 1-6.

Oysal, Y., Yılmaz, S. A. ve Köklükaya, E. (2004), Elektrik güç sistemlerinde dinamik bulanık ağ tabanlı bir yük frekans denetleyici tasarımı, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17(3), 101-114.

Paish, O. (2002), Small Hydro Power: Technology and Current Status, Renewable & Sustainable Energy Reviews.

**KAYNAKLAR DİZİNİ (devam)**

Nagpurwala, Q. H. (Session,15), Hydraulic Turbines. M.S. Ramaiah School of Advanced Studies, <https://tr.scribd.com/document/340795182/15-Hydraulic-Turbines-new031211-Compatibility-Mode-pdf>.

Sezer, K. O. (2008), Primer-sekonder frekans kontrolü ve Afşin-Elbistan B termik santrali uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.

Somaraki, M. (2003), A Feasibility Study of a Combined Wind - Hydro Power Station in Greece, Master of Science Thesis, University of Strathclyde, *Department of Mechanical Engineering*, Glasgow, Ocak 2003.

Yağan, Y. E. (2015), Havai dağıtım hatlarında yapay sinir ağları kullanılarak arıza analizi, Yüksek Lisans Tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya.

EPDK, (2017), Elektrik piyasası yan hizmetler yönetmeliği, 26.11.2017 tarihli ve 30252 Sayılı Resmi Gazete.

TEDAŞ, (2004), *UCTE İşletme El kitabı*, TEDAŞ Yayınları, 65.

TEDAŞ, (2005), *UCTE İşletme El kitabı*, TEDAŞ Yayınları, 68.

TEİAŞ, (2015), Elektrik Piyasası Yan Hizmetler Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına İlişkin Yönetmelik, 04.06.2015 tarihli ve 29376 sayılı Resmi Gazete.

Yolcubal, E. (2011), Hidroelektrik santrallerinde governör kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Yüksek, A. G. (2007), Hava kirliliği tahmininde çoklu regresyon analizi ve yapay sinir ağları yönteminin karşılaştırılması, Doktora Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Sivas.

## ÖZGEÇMİŞ

### Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ERAYDIN; Fatih.  
Doğum tarihi ve yeri : 13.08.1991 MURGUL  
e-mail : [fatih\\_eraudin@hotmail.com](mailto:fatih_eraudin@hotmail.com)

### Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek lisans	Dumlupınar Üniversitesi	
Lisans	Dumlupınar Üniversitesi	24.03.2013
Lise	Artvin Anadolu Lisesi	06.2009

### İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
5	Muratlı Barajı	Vardiya ve İşletme Amiri

**Yabancı Dil** : İngilizce

**Yayımlar**