

**TC
İNÖNÜ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜRBİN-JENERATÖR SİSTEMİNİN NEURO-FUZZY
DENETLEYİCİ İLE KONTROLÜ**

SÜMEYRA KAVRUK

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK ELEKTRONİK ANABİLİM DALI**

**MALATYA
2005**

Fen Bilimleri Enstitü Müdürlüğü' ne

Bu çalışma jürimiz tarafından Elektrik Elektronik Anabilim dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

(imza)

Prof.Dr.Teymuraz Abbasov
Başkan

(imza)

Yrd.Doç.Dr.M.Emin Tağluk
Üye

(imza)

Yrd.Doç.Dr.Ö.Faruk Özgüven
Üye

ONAY

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım

--- /--- /---

Prof. Dr. Ali Şahin
Enstitü Müdürü

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TÜRBİN-JENERATÖR SİSTEMİNİN NEURO FUZZY DENETLEYİCİ İLE KONTROLÜ

Sümevra Kavruk

İnönü Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Elektronik Anabilim Dalı

54 + ix sayfa

2005

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ö. Faruk Özgüven

Bu tezde, neuro-fuzzy kontrol tekniğı kullanılarak hidroelektrik güç santrali için hidro-türbin hız kontrolü gerçekleştirilmiştir.

Neuro-fuzzy kontrol tekniğinin yapı taşları olan fuzzy lojik ve sinir ağıları incelenmiş ve fuzzy lojik kontrol ile yapay sinir ağılarıyla kontrol teknikleri ele alınmıştır. Neuro-fuzzy kontrol metodu olarak ANFIS metodu seçilmiştir. ANFIS yapısı ve ANFIS öğrenme algoritması incelenmiştir.

Hidrolik sistem parametreleri incelenip hidro-türbin hız kontrolü için neuro-fuzzy kontrol tekniğı uygulanmıştır.

ANAHTAR KELİMELELER: Sinir ağıları, fuzzy,ANFIS, türbin, hidroelektrik, jeneratör

ABSTRACT

Ms.D.Thesis

CONTROLLING TURBINE-GENERATOR SYSTEM USING NEURO-FUZZY CONTROLLER

Sümeysra Kavruk

İnönü University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical Electronical

54 + ix pages

2005

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Ö. Faruk Özgüven

In this thesis study, hydro-turbine speed control was achieved for hydroelectric power plant by using neuro-fuzzy control method.

Fuzzy logic and neural network that are base of neuro-fuzzy control method were examined. Then Fuzzy logic control and neural network control were examined. ANFIS method was chosen as neuro-fuzzy control method. ANFIS structure and ANFIS learning procedure were examined.

Hydrolic system paremeters were examined and neuro-fuzzy control method was applied for hydro-turbine speed control.

KEYWORDS : Neural network, fuzzy, ANFIS, turbine, hydroelectric, generator

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın hazırlanması esnasında her zaman yardımlarını gördüğüm danışmanım Yrd. Doç. Dr. Ö. Faruk Özgüven' e ve baştan beri çalışmamı destekleyen, beni teşvik eden tüm hocalarıma, ayrıca Elektrik Elektronik Mühendisliği bölüm başkanı Prof. Dr. Hafız ALİSOY' a en içten teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ONAY.....	i
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
TEŞEKKÜR.....	iv
İÇİNDEKİLER.....	v
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	vii
1. GİRİŞ.....	1
2. FUZZY KAVRAMI.....	3
2.1. Fuzzy Kümelerde İşlemler.....	6
2.1.1. Bileşim işlemi.....	6
2.1.2. Kesişim işlemi.....	6
2.1.3. Evrik işlemi.....	7
2.1.4. Bağlantı işlemi.....	8
2.2. Fuzzy Lojik Kontrol Mekanizması.....	9
2.2.1. Sugeno Takagi Çıkarım Modeli.....	10
2.2.2. Ağırlık Ortalaması.....	11
3. YAPAY SİNİR AĞLARI.....	12
3.1. Sinir Hücrelerinin Biyolojik Yapısı.....	14
3.2. Sinir hücresinin Matematiksel Modeli.....	15
3.3. Aktivasyon Fonksiyonu.....	16
3.4. Y.S.A' ın Yapısı.....	18
3.5. Y.S.A' ın Öğrenmesi.....	20
3.6. Geri Yayılım Algoritması.....	21
3.7. Delta Kuralı.....	21
4. NEURO-FUZZY KONTROL.....	26
4.1. ANFIS Modeli.....	28
4.2. ANFIS Öğrenme Algoritması.....	30
5. ANFIS KONTROL METODU KULLANARAK HİDRO ELEKTRİK TÜRBİN KONTROLÜ.....	33
5.1. Hidrolik Sistem Parametreleri.....	33
5.2. Jeneratör Modeli Transfer Fonksiyonu.....	36

5.3.	ANFIS Modelinin Eğitilmesi.....	37
5.4.	Kontrol Uygulaması.....	45
6.	SONUÇLAR.....	49
7.	KAYNAKLAR.....	51
8.	ÖZGEÇMİŞ.....	54

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1: (a) Kesin kümelerin sınır gösterimi.....	4
(b) Fuzzy kümelerin sınır gösterimi.....	4
Şekil 2.2: (a) Ayrık fuzzy küme üyelik fonksiyonu.....	5
Şekil 2.3: Fuzzy işlemlerinin grafiksel gösterimi.....	8
Şekil 2.4: Ağırlık ortalaması metoduyla Defuzzification.....	12
Şekil 3.1: Sinir hücresinin biyolojik yapısı.....	14
Şekil 3.2: Sinir hücresinin matematiksel modeli.....	15
Şekil 3.3: Tek katlı sinir ağı (Perceptron).....	19
Şekil 3.4: Çok katlı sinir ağı.....	20
Şekil 3.5: W_{ij} ağırlıklı tek katlı ağ.....	21
Şekil 3.6: İki katlı sinir ağı.....	23
Şekil 4.1: Neuro-Fuzzy sistem modeli.....	27
Şekil 4.2: İki girişli tek çıkışlı ANFIS modeli.....	29
Şekil 5.1: Hidro-Türbin hız kontrol blok diyagramı.....	33
Şekil 5.2: Jeneratör modeli blok diyagramı.....	36
Şekil 5.3: ANFIS eğitim modeli.....	37
Şekil 5.4: ANFIS eğitim modeli blok diyagramı.....	38
Şekil 5.5: Sistem girişi, x' in (random fonk.) zamana göre değişimi.....	39
Şekil 5.6: Sistem çıkışı, y' nin zamana göre değişimi.....	39
Şekil 5.7: Giriş ve çıkış arasındaki hata, e' in zamana göre değişimi.....	40
Şekil 5.8: Hatanın değişimi, ce' in zamana göre değişimi.....	40
Şekil 5.9: Sistem çıkışının ANFIS editöründe örneklenmiş hali.....	41
Şekil 5.10: Eğitim hatası.....	42
Şekil 5.11: Eğitim veri kümesi ve eğitim işlemi kontrolü.....	42
Şekil 5.12: Fuzzy lojik denetleyici modeli.....	42
Şekil 5.13: Üyelik fonksiyonları.....	43
Şekil 5.14: Eğitim sonucu oluşan kurallar.....	43
Şekil 5.15: Yüzey şekli.....	44
Şekil 5.16: Hidro-türbin hız kontrolü simulasyon devresi.....	45
Şekil 5.17: Hidro-türbin hız kontrolü çıkış sinyali.....	46
Şekil 5.18: Çıkış sinyali büyültüldüğünde çıkış sinyali.....	46
Şekil 5.19: Çıkış sinyali küçültüldüğünde çıkış sinyali.....	47

Şekil 5.20: Giriş sinyali büyütüldüğünde çıkış sinyali.....	48
Şekil 5.18: Giriş sinyali küçültüldüğünde çıkış sinyali.....	48

SİMGELER VE KISALTMALAR

$\square$	Öğrenme katsayısı
$\square$	Üyelik fonk.
D	İnme sabiti
E	HATA
K_p	Suyun Sabit Durum Hızı
M	Birim Atalet Sabiti
O	Hesaplanan çıkış
T_e	Dalga Yayılma Zamanı
T_s	Geçit Servo Motor Zaman Sabiti
T_p	Kılavuz Servo Motor Zaman Sabiti
T_w	Su Başlama Sabiti
W	Ağırlık
X	Giriş
Y	Beklenen Çıkış
Z_p	Oluğun Dalga Empedansı
YSA	Yapay Sinir Ağları
ANFIS	Adaptive Neural Network Based Fuzzy Inference System

1. GİRİŞ

Günümüzde kontrol adına yapılan pek çok çalışmanın amacı, denetleyici mekanizmasının mümkün olduğu kadar insanı aratmayacak şekilde çalışmasıdır. Yani akıllı kontrol...

Akıllı kontrol kuramı aşağıda verilen 3 temel madde üzerine oturtulmuştur;

- i) Kullanılan yapay elemanlar sayesinde elde edilen uzmanlaşmış sistemler,
- ii) Karar verme için kullanılan fuzzy hesaplamalar,
- iii) Sinir ağı yapısıyla sağlanan eğitilebilme özelliği.

Akıllı kontrol için kullanılan fuzzy yaklaşım, fuzzy kümeler ve fuzzy çıkarım sistemleri üzerine kurulmuştur. Fuzzy denetleyicide bütün parametreler fuzzy kümeler ve fuzzy bağıntı denklemleri ile ifade edilir. Oluşturulan sözel kurallardan yapılan fuzzy çıkarım neticesinde sisteme karar verme özelliği kazandırılır. Sistem mevcut konuda uzmanlık kazanır.

Akıllı kontrolün bir diğer önemli alanı sinir ağlarıdır. Sinir ağının eğitilebilir olması, sisteme örnekleri tanıma özelliği kazandırır. Sistemin öğrendiklerinden yola çıkarak genelleme yapabiliyor olması ona geniş bir kullanım alanı sağlar. Ayrıca paralel ağ yapısı nedeniyle bilgiyi paralel işlemesi neticesinde, daha sağlıklı sonuçlar elde edilir.

Gerek fuzzy kontrol olsun gerekse sinir ağlarıyla kontrol sahip oldukları iyi ve zayıf özellikleriyle gayet güçlü tekniklerdir. Ancak daha akıllı bir kontrol tekniği elde edebilmek için, fuzzy ve sinir ağlarını bir arada kullanarak, her iki tekniğin avantajlarını birleştirip, dezavantajlarını bertaraf etmek mümkündür [1,2]. Böylece elde edilen Neuro-Fuzzy teknikle sistem, hem karar verebilme yeteneğine hem de eğitilebilme yeteneğine sahip olur. Hem uzmanlık kazanabilir, hem de paralel işlem yapısına kavuşur. Bunun yanında fuzzy kuralların oluşturulma zorlukları ve sinir ağının karmaşık yapısının neden olduğu problemler sorun olmaktan çıkar. Neuro fuzzy kontrol tekniği sahip olduğu avantajlardan ötürü, yaygın olarak kullanılan diğer kontrol tekniklerinin (PID ... vb) iyileştirilmesi için , onlarla birlikte kullanılabilir [3, 4, 5].

Bu çalışmada fuzzy lojik kavramının temelini oluşturan fuzzy işlemler, fuzzy kümeler ve fuzzy çıkarım sistemleri ele alınmıştır. Fuzzy kuralların oluşturulması ve fuzzy kurallardan sistem çıkarımlarının yapılması incelenmiştir [6, 7]. Ayrıca sinir

hücresinin biyolojik ve matematiksel modeli, sinir ağı yapısı, geri besleme algoritması ve delta kuralı incelenmiştir.

Fuzzy ve sinir ağlarından sonra, neuro-fuzzy teknikler ele alınmıştır [8,9]. Seçilin neuro-fuzzy kontrol tekniği ANFIS, detaylı bir şekilde incelenmiştir. ANFIS, step motor kontrolü, tank sıvı seviyesi kontrolü ... vb uygulamaların gerçekleştirildiği yaygın bir neuro-fuzzy tekniğidir [10, 11, 12].

Neuro-fuzzy kontrol teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiş gaz, rüzgar, ... vb çeşitli türbin kontrolü çalışmaları vardır [13, 14]. Bununla beraber pek çok farklı kontrol tekniği kullanılarak gerçekleştirilmiş hidrolik sistem kontrolleri de mevcuttur [15,16]. Bu çalışmada hidrolik sistem parametreleri elde edilmiş ve ANFIS kontrol tekniği hidrolik güç santraline uygulanarak hidro türbin hız kontrolü sağlanmıştır.

2. FUZZY KAVRAMI

60'lı yıllar boyunca Prof. Dr. Lütfi Zadeh, rast geleliğin farklı bir biçimi olan, kesin olmama hali üzerinde durmuştur. 'Belirsizlik' yani 'kesin olmama' kavramına dayanan bu önermeye 'Fuzzy lojik' ismini vermiştir. Bu  nermeyle, insan dilinin doğasında bulunan 'belirsizliğe' matematiksel bir yaklaşım getirmiştir.

Klasik mantıkta her şey binary kodlar üzerine kurulmuştur. Oysa dünyamızda pek çok şey binary değildir. Yani insanları 'iyi' ve 'kötü' diye iki gruba kesin sınırlarla ayıramayız. İyilik ve kötülük kutuplarının arasında pek çok derece mevcuttur. Yani hayat sadece 'siyah-beyaz' üzerine kurulmamıştır. Doğada gri de vardır ve Fuzzy doğadaki gri'nin bilim ve endüstride kullanılmasıdır.

Fuzzy lojiğin (Bulanık mantığın) genel  zellikleri Zadeh tarafından şu şekilde ifade edilmiştir [17]:

- 1) Fuzzy lojik'te kesin değerlere dayanan düşünce yerine yaklaşık düşünce kullanılır.
- 2) Her şey $[0,1]$ aralığında belirli bir derece ile gösterilir.
- 3) Fuzzy lojik'te bilgi büyük, küçük, az, çok... gibi dilsel ifadeler şeklindeir.
- 4) Fuzzy  ıkarım işlemi dilsel ifadeler arasında tanımlanan kurallar ile yapılır.
- 5) Her mantıksal sistem fuzzy olarak ifade edilebilir.
- 6) Matematiksel modeli çok zor elde edilen sistemler için de çok uygundur.

Günlük hayatımızda 'kontrol' olarak niteleyebileceğimiz pek çok şey yaparız. Örneğin bisiklete bineriz. Bunu yapabilmemiz için elimizde deney sonuçları ya da bir diferansiyel denklem sistemi yoktur. Bu kontrolü basit kurallarla eğitilip uzmanlık kazanarak sağlarız. Kazanılan uzmanlık sayesinde, herhangi bir çaba içerisine girmeden, hislerimizle hareketimizi kontrol edebiliriz.

İnsanların herhangi bir sistemi kontrol ederkenki düşünce ve sezgilerine bağlı davranışlarını temel alan Fuzzy lojik kontrol, makinelere insanların özel verileri işleyebilme yeteneğini ve insanların deneyimlerinden ve  nsezilerinden yararlanarak çalışma yeteneğini kazandırır. Bu yetenek kazandırılırken sembolik ifadeler kullanılır.

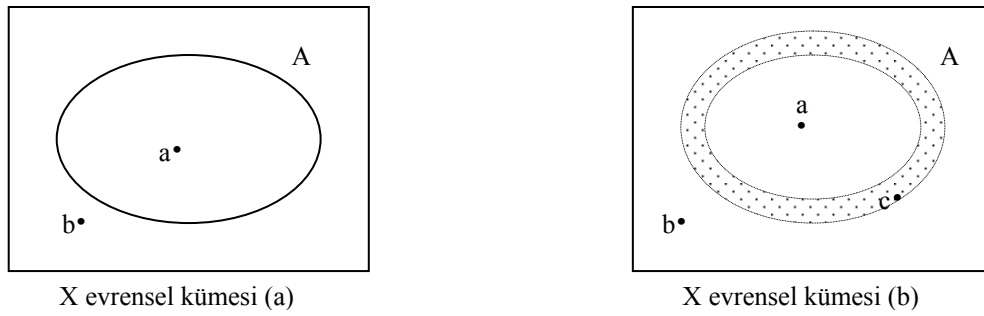
Bisiklet örneğiyle devam edecek olursak:

Eğer bisiklet sağa doğru yönelmiş ise

O halde tekerlekleri sola  evir.

Eğer-O halde (if-then) yapısındaki kurallar, fuzzy kontrol sisteminin temelini oluşturmaktadır [18]. Kurallarda kullanılan ‘büyük, küçük, sıcak, kısa, ... vb.’ sözel sembolik ifadeler fuzzy kümelerle dönüştürülür. Fuzzy kümelerin bir araya getirilmesi ve bu kümeler üzerinde yapılan işlemlerle, eğer – o halde kuralları matematiksel olarak biçimlendirilir.

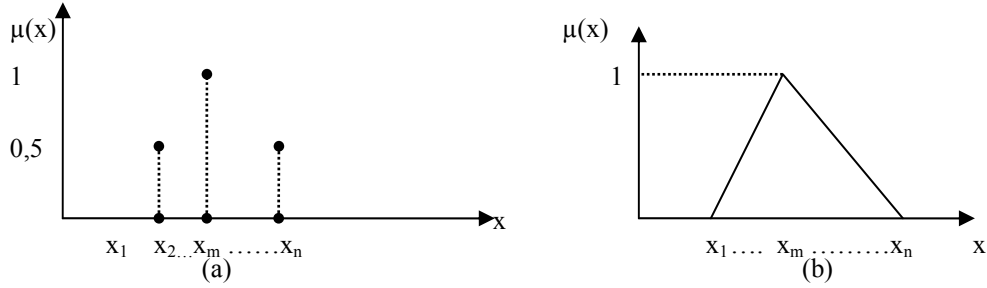
Bu kuralların sözel olarak, kelimelerle ifadesi kolaydır. Fakat sözel notasyonlarla ifade edilen ‘Fuzzy’liğin’ kontrol teorisinde kullanılması için matematiksel bir yol gerekmektedir. Fuzzy kavramının matematiksel modeli ilk defa 1965 yılında Zadeh tarafından ‘Fuzzy kümeler’ kuramıyla oluşturulmuştur. Zadeh kesin bir üyelik kriteri tanımlamasına sahip olmayan nesneleri matematiksel olarak sınıflandırırken ‘üyelik derecesi’ kavramını kullanmıştır.



**Şekil 2.1. (a) Kesin kümelerin sınır gösterimi
(b) Fuzzy kümelerin sınır gösterimi**

Şekil 2.1.(a) X evrensel kümesinin içerisinde sınırları kesin olarak belli olan bir A kümesini göstermektedir. Açıkça bellidir ki, a A kümesinin elemanıdır, b ise elemanı değildir. O halde a’ nın A kümesi içindeki üyeliği 1 ile b’ nin üyeliği ise 0 ile gösterilir. Şekil 2.1.(b)’ deki A kümesi bir Fuzzy kümedir ve sınırları kesin değildir. Burada a, A kümesinin elemanıdır. b ise A kümesinin elemanı değildir, Ancak c noktası için A kümesinin elemanıdır ya da A kümesinin elemanı değildir diyemiyoruz. Bu durumda A kümesinin elemanı olan a noktasının ağırlığı 1 A kümesinin elemanı olmayan b noktasının ağırlığı 0 ise, A kümesinin elemanı olup olmadığı konusunda kesin bir şey söyleyemediğimiz c noktasının üyelik derecesinin de $[0,1]$ arasında bir değerde olması gerekmektedir.

Kısaca bir elemanın herhangi bir kümeye ait olma derecesinden ya da o küme içerisindeki ağırlığından bahsediliyorsa, söz konusu olan küme ‘Fuzzy’ kümedir. Fuzzy kümeler ayrık küme ya da sürekli küme olabilirler.



Şekil 2.2. (a) Ayrık fuzzy küme üyelik fonksiyonu
(b) Sürekli fuzzy küme üyelik fonksiyonu

Şekil 2.2.(a)'daki gibi bir ayrık kümenin matematiksel ifadesi, aşağıdaki gibidir:

$$X = \left[\frac{\mu x(x_1)}{x_1} + \frac{\mu x(x_2)}{x_2} + \dots + \frac{\mu x(x_m)}{x_m} + \dots + \frac{\mu x(x_n)}{x_n} \right] \quad (2.1)$$

$$\Rightarrow X = \left[\sum_{i=1}^n \frac{\mu x(x_i)}{x_i} \right] \quad (2.2)$$

Burada toplama işlemi bileşim anlamındadır, bölüm ifadesi ise sadece bir gösterimdir.

Şekil 2.2.(b)'deki gibi sürekli bir fuzzy kümenin matematiksel ifadesi de aşağıdaki gibidir.

$$X = \left\{ \int \frac{\mu x(x_n)}{x_n} \right\} \quad (2.3)$$

Buradaki integral ifadesi de bir gösterimdir.

2.1. Fuzzy Kümelerde İşlemler

Klasik kümeler için kullanılan bütün kavramlar fuzzy kümeler için de kullanılabilir ve klasik kümelerde gerçekleştirilen bütün işlemler, fuzzy kümelerde de gerçekleştirilebilir. Klasik kümelerde kullanılan bazı kavramların fuzzy kümelerdeki ifadeleri şu şekildedir [19].

Eğer bütün $x \in X$ için $\mu_x(x) = 0$ ise o fuzzy küme boş kümedir. Eğer bütün $x \in X$ için $\mu_x(x) = 1$ ise o fuzzy küme evrensel kümedir.

Eğer bütün $x \in X$ için $\mu_A(x) = \mu_B(x)$ ise A ve B kümeleri bir birine eşittir. Eğer bütün $x \in X$ $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$ ise A kümesi B kümesinin alt kümesidir. Yani $A \subseteq B$.

Klasik kümelerde uygulanan işlemlerin, fuzzy kümelerde uygulanması ise şu şekildedir.

2.1.1. Bileşim işlemi

Fuzzy A ve fuzzy B kümelerinin bileşimi, fuzzy C kümesini verir. C kümesi de A ve B kümelerinin bulunduğu evrensel kümenin alt kümesidir.

$C = A \cup B$ (ya da $C=A+B$)’dir.

C kümesinin herhangi bir $x \in X$ için elemanlarının üyelik derecesi, A ve B kümelerinden üyelik derecesi büyük olanının değerine eşittir.

$$\begin{aligned}\mu_C(x) &= \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \\ &= \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad x \in X\end{aligned}\tag{2.4}$$

2.1.2. Kesişim işlemi

Fuzzy A ve fuzzy B kümelerinin kesişimi, aynı evrensel kümenin alt kümesi olan fuzzy C kümesini verir.

$C = A \cap B$ (ya da $C = A - B$)

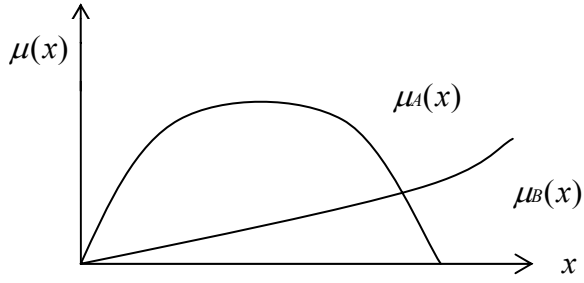
C kümesinin herhangi bir $x \in X$ elemanlarının üyelik derecesi, A ve B kümelerinden üyelik derecesi küçük olanının değerine eşittir.

$$\begin{aligned}\mu_C(x) &= \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \\ &= \min[\mu_A(x), \mu_B(x)], x \in X\end{aligned}\tag{2.5}$$

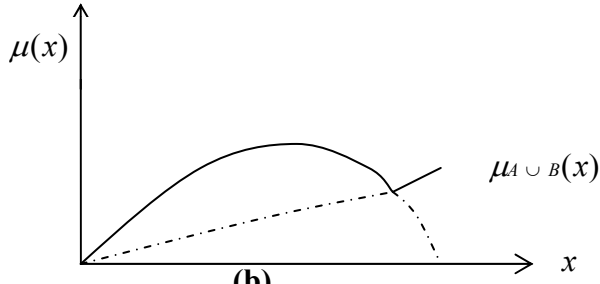
2.1.3. Evrik işlemi

Fuzzy A kümesinin evriği, fuzzy $\bar{A}$ kümesidir. $\bar{A}$ kümesinin üyelik fonksiyonunun matematiksel ifadesi, herhangi bir $x \in X$ için aşağıdaki gibidir:

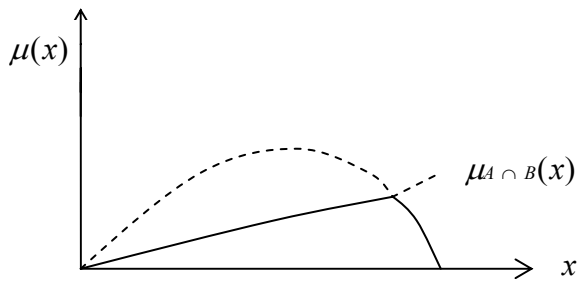
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)\tag{2.6}$$



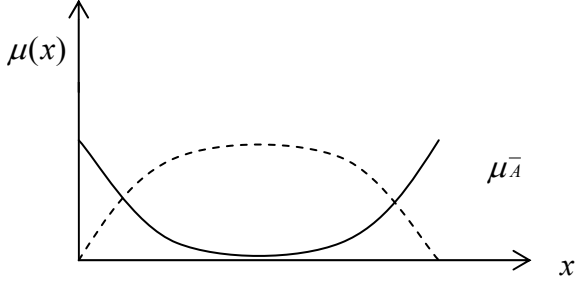
(a)



(b)



(c)



(d)

Şekil 2.3. Fuzzy işlemlerinin grafiksel gösterimi

(a): A ve B kümelerinin üyelik fonksiyonları $\mu_A(x)$ ve $\mu_B(x)$

(b): A ve B kümelerinin bileşiminden oluşan fuzzy kümenin üyelik fonksiyonu, $\mu_{A \cup B}(x)$,

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

(c): A ve B kümelerinin kesişiminden oluşan fuzzy kümenin üyelik fonksiyonu, $\mu_{A \cap B}(x)$,

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$$

(d): A kümesinin evriği $\bar{A}$ kümesinin üyelik fonksiyonu, $\mu_{\bar{A}}(x)$

2.1.4. Bağntı İşlemi

Fuzzy A ve Fuzzy B kümeleri arasındaki bağıntı kartezyen çarpımı ile ifade edilir.

$$R \longrightarrow A \times B$$

Burada bağıntı kümesinin herhangi bir (a,b) elemanı için üyelik fonksiyonu değeri, A ve B kümelerinin (a) ve (b) elemanları için olan üyelik fonksiyonu değerlerinden minimum olanına eşittir.

$$\mu_{R(a,b)} = \min(\mu_A(a), \mu_B(b)) \quad (2.7)$$

$R \longrightarrow X \times Y$ ve $S \longrightarrow Y \times Z$ olsun, aralarında ortak küme bulunan iki bağıntı arasındaki bağıntı kompozisyonu verir.

$T = R \circ S$ şeklinde gösterilir. $T \longrightarrow X \times Y'$ i verir.

Kompozisyon' un üyelik fonksiyonu iki şekilde hesaplanabilir.

i) max-min kompozisyon

$$\begin{aligned}\mu_T(x, z) &= \bigvee_{y \in Y} (\mu_R(x, y) \wedge \mu_S(y, z)) \\ &= \sup_{y \in Y} (\mu_R(x, y), \mu_S(y, z))\end{aligned}\tag{2.8}$$

ii) max-çarpım kompozisyonu

$$\mu_T(x, z) = \bigvee_{y \in Y} (\mu_R(x, y) \cdot \mu_S(y, z))\tag{2.9}$$

Bu hesaplamalardaki $y \in Y$ ifadesi, herhangi x ve z noktaları için x ' den z ' ye yapılan hesaplamaların bütün y noktaları için yapılması anlamına gelir.

2.2. Fuzzy Lojik Kontrol Mekanizması

Fuzzy lojik kontrol sistemini gerçekleştirirken, yapılan işlem basamakları vardır. Bu işlem basamaklarından ilki fuzzy' leştirmedir. Bu işlemde kontrol edilecek sistemi tanımlayan sayısal değerler ve giriş değişkenleri, büyük, küçük, kısa, güzel... gibi sözel sembollere dönüştürülür. Sözel olarak sembolize edilmiş olan bu değişkenlere oluşturdukları fuzzy kümeyi tanımlayan üyelik fonksiyonu üzerinde 'çok büyük, az, kısa, ılık,...' gibi dereceler verilir. Sistemin ihtiyacına göre üyelik fonksiyonları üçgen, yamuk, çan eğrisi, ... vb gibi seçilebilir.

Sistem parametreleri sözel ifadelerle sembolize edilip, üyelik fonksiyonu üzerinde tanımlandıktan sonra, sistemin giriş ve çıkış parametreleri arasındaki ilişkiyi ifade eden bir kural tabanı oluşturulur. Kural tabanındaki kurallar, daha önceki deneyimlere ve uzman bilgilerine dayanılarak oluşturulur. Kaç tane kural olacağı tasarımcıya bağlıdır. Kurallar Eğer-O halde (IF-THEN) yapısındadır.

Eğer $x = A$ ise O halde $y=B$ ' dir

şeklindeki bir kural ile x girişinin değerine göre y çıkışının değeri belirlenir. Kuralların yapısı ve kurallardan bir sonuca varılması aşağıdaki önermelerde olduğu gibidir.

Önerme 1: Hava yağmurlu ile şemsiye kullanırım.

Önerme 2: Hava yağmurlu

Sonuç: Şemsiye kullanırım

İlk önermede giriş ve çıkış arasındaki bağıntı, ikinci önermede ise giriş verilmiş ve bu iki önermeden sonuç çıkarılmıştır. Yani,

kural 1: Eğer $x=A$ ise o halde $y = B$ 'dir.

kural 2: $x = \tilde{A}$ 'dür.

Çıkarım: $y = \tilde{B}$ 'dür.

Burada A , B , $\tilde{A}$, $\tilde{B}$ fuzzy kümelerdir. İlk kural $R \rightarrow Ax B$ bağıntısını verir. İkinci kural herhangi bir $\tilde{A}$ girişidir. Bu durumda bu $\tilde{A}$ girişine karşı sistemin verdiği $\tilde{B}$ çıkışı, $\tilde{A}$ ve R bağıntısının kompozisyonuyla elde edilir.

$$\begin{aligned} R(x, y) &= A(x) \wedge B(y) \\ \tilde{B}(y) &= (Ro\tilde{A})(x) = \bigvee_{x \in X} [\tilde{A}(x) \wedge A(x) \wedge B(y)] \end{aligned} \quad (2.10)$$

Karar verme, yani çıkarım mekanizması fuzzy kontrol sisteminin en önemli kısmıdır. İnsanın karar verme ve eldeki verilerden sonuç çıkarma yeteneğine benzetilen bir yol kullanılır. Fuzzy kurallar ve sözel olarak sembolize edilmiş sistem parametrelerinden, bir çıkarım yapılarak sonuçta fuzzy veriler elde edilecektir.

En çok kullanılan çıkarım sistemi metodları, 'Mamdani, Larsen, Takagi-Sugeno ve Tsukamoto' metodlarıdır. İleriki aşamalarda Takagi-Sugeno modeli kullanılacaktır.

2.2.1. Sugeno Takagi çıkarım modeli

Takagi ve Sugeno tarafından ileri sürülmüş olan giriş-çıkış veri kümesinden fuzzy geliştirme sistematığıdır. TSK çıkarım modeli için kural biçimi aşağıdaki gibidir [20].

Ri: Eğer $x_1=A_{i1}$ ise ve $x_2=A_{i2}$ ise ve ... ve $x_k=A_{ik}$ ise

O halde $y = f_i (x_1, x_2 \dots x_k)$.

ya da

Ri: Eğer $x_i=A_i$ ise o halde $y=f_i(x)$ 'dir.

Burada $i= 1,2,...n$ 'dir. $f_1, f_2, \dots, f_n$. $x=X_1 \times X_2 \times \dots \times X_k \rightarrow R$ bağımlı fonksiyonlardır.

$A_i = \bigwedge_{j=1}^k A_{ij}$ 'dir.

Bu kuralların kombine edilmesiyle, sistemden çıkarılan sonuç ifade aşağıdaki şekildedir:

$$Y(x) = \frac{A_1(x)f_1 + A_2(x)f_2 + \dots A_n(x)f_n(x)}{A_1(x) + A_2(x) + \dots A_n(x)} \quad (2.11)$$

Karar verme mekanizmasında elde edilen çıkarım sonucu, fuzzy küme şeklindedir. Sonucun sistem tarafından kullanılabilmesi için girişte olduğu gibi sayısal parametrelere dönüştürülmesi lazımdır. Karar verme mekanizmasından gelen fuzzy bilgilerin, sistem tarafından kullanılabilecek gerçek değerlere dönüştürülmesi işlemine 'Defuzzification' denir.

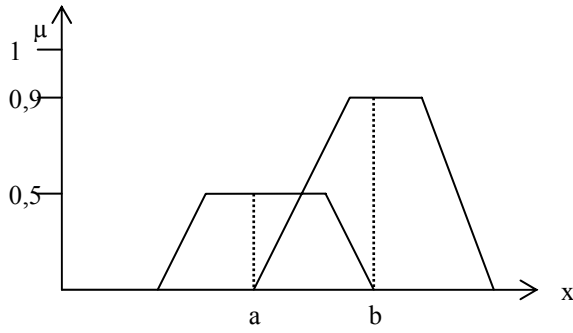
En çok kullanılan 'Defuzzification' yöntemleri: Max üyelik yöntemi, ağırlık merkezi yöntemi, ağırlık ortalaması yöntemi ve mean – max üyelik yöntemidir. Sugeno Takagi çıkarım modeli için, ağırlık ortalaması yöntemi kullanılır.

Ağırlık ortalaması

Ağırlık ortalaması metoduyla, girişlerden elde edilen bütün fuzzy değerler ve üyelik değerleri kullanılarak netleşmiş bir sonuç elde edilir. Bu metod simetrik çıkış üyelik fonksiyonları için geçerlidir. Aşağıdaki cebirsel ifadeler kullanılarak sonuç elde edilir.

$$x^* = \frac{\sum \mu_A(\bar{x}) \cdot \bar{x}}{\sum \mu_A(\bar{x})} \quad (2.12)$$

Bu metotta netleşmiş sonuç, çıkışta yer alan üyelik fonksiyonlarının her birisinin ayrı ayrı maksimum üyelik değeri ile biçimlenir.



$$x^* = \frac{a(0.5) + b(0.9)}{0.5 + 0.9}$$

Şekil 2.4. Ağırlık ortalaması metoduyla defuzzification

Şekilde de görüldüğü gibi netleşmiş sonucu elde etmek için, grafikte yer alan iki çıkış üyelik fonksiyonunun maksimum değerleri kullanıldı.

3. YAPAY SİNİR AĞLARI

Sinir ağıları, ya da daha özel bir ifadeyle yapay sinir ağıları kavramı, insan beynin çalışma ilkelerinin matematiksel olarak taklit edilmesidir. Öğrenme, hatırlama, düşünme gibi tüm insani davranışların temelinde sinir hücreleri bulunmaktadır. Beynin çalışma sisteminde insanları cezbeden biyolojik sinir hücrelerinin yani nöronların eğitilebilme ve öğrenebilme yetenekleridir. Tüm bu insani yeteneklerin tasarlanan insan yapımı kontrol sistemlerine aktarılabilmesi için geliştirilen yapay Sinir Ağları (Y.S.A) beynin bilgi işleme yöntemine uygun olarak bir öğrenme sürecinden sonra bilgiyi toplama, hücreler arasındaki bağlantı ağırlıklarıyla bu bilgiyi saklama ve genelleme yeteneğine sahip paralel dağılmış bir işlemcidir.

Y.S.A' nın hesaplama ve bilgi işleme gücü dört temel avantaja dayanmaktadır [21]. Bunlar, sistemin paralel dağılmış yapısı, genelleme ve öğrenebilme yeteneği, doğrusal olmama özelliği ve uyarlanabilirliktir.

Y.S.A sistemi paralel bir dağılım göstermektedir. Yani pek çok sinir hücresi eş zamanlı olarak çalışır. Bütün işlemler pek çok sinir aktivitesinin bir araya gelmesinden oluşur. Bu da ağına sahip olduğu bilginin ağıdaki bütün bağlantılar üzerinde dağılmasını sağlar. Böylece sistem içerisinde herhangi bir sinir hücresi ya da bazı bağlantılar devre dışı kaldığında, bu olumsuz durum sistem sonucunu etkileyebilecek kadar büyük bir dezavantaja dönüşmez. Paralel çalışma yapısı sayesinde Y.S.A' nın hatayı tolere etme yeteneği yüksektir.

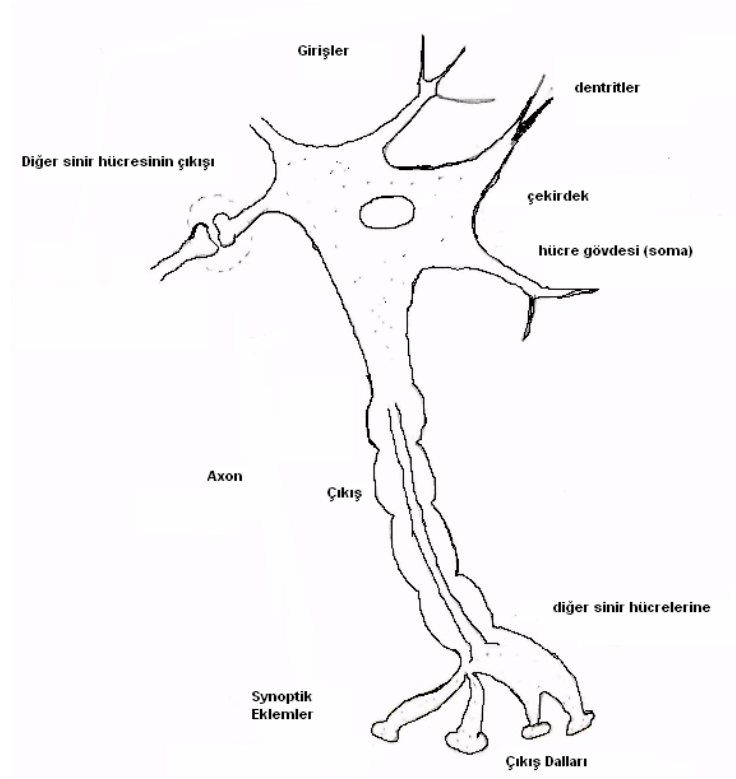
Y.S.A' nın kontrol edeceği sisteme uygun hale gelebilmesi için eğitilmesi gerekir. İlgilendiği problemle ilgili giriş-çıkış verilerinden oluşan eğitim kümesi kullanılarak, eğitimden geçirilen Y.S.A problemi öğrenmiş olur. Bunun yanında Y.S.A eğitim ve öğrenme sürecinde karşılaşmadığı problemleri de eğitim sırasında öğrendiklerinden genelleme yaparak çözebilme yeteneğine sahiptir.

Y.S.A' nın temel birimi olan sinir hücresi doğrusal olmayan bir elemandır. Dolayısıyla Y.S.A' da doğrusal olmayan bir yapıya sahiptir. Bu sayede doğrusal olmayan karmaşık problemlerin çözümü daha kolay hale gelmektedir.

Belli bir amaç için eğitilmiş olan Y.S.A, şartlar değiştiğinde tekrar eğitilebilir. Şayet değişim devamlı ise, eğitim de devamlı olabilir. Bu özelliği ile Y.S.A uyarlanabilir bir yapıya sahiptir.

3.1. Sinir Hücrelerinin Biyolojik Yapısı

Sinir ağı içerisinde her bir sinir hücresi komşu sinir hücreleriyle alış-veriş halindedir. Onlardan bazı bilgiler alır. Bu bilgileri kendi biyolojik yapısı içerisinde değerlendirerek bir çıktıya dönüştürür ve çıktıyı diğer sinir hücrelerine aktarır. Çalışma prensibi basitçe bu şekilde olan sinir hücresinin biyolojik yapısı şekil.3.1’ deki gibidir [22].



Şekil 3.1. Sinir hücresinin biyolojik yapısı

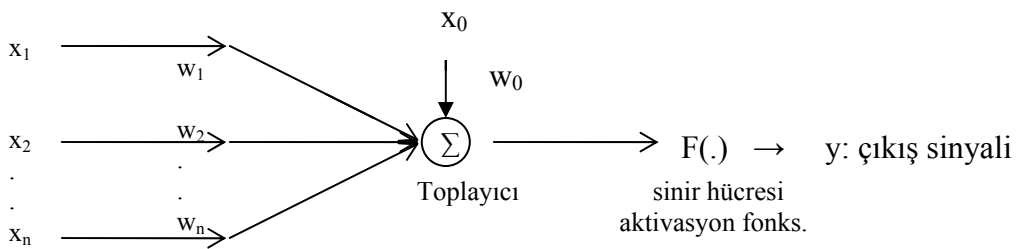
İnsan beyinde 10 milyar sinir hücresi ve bu hücreler arasında 60 trilyon synaptik birleştirme denilen sinirler arası bağ vardır. Bir sinir hücresi hücre gövdesi (Soma), axonlar, dendritler ve synaptik eklemlerden meydana gelir. Dendritler synaptik eklemlerden aldıkları elektriksel darbeler şeklindeki giriş sinyallerini toplayıp soma’ ya getiren dallardır. Hücrenin sorumlu olduğu fonksiyonlar somada gerçekleştirilir. Eğer belli bir eşik değerini aşacak kadar darbe sinyali somaya ulaşmışsa, soma bu sinyallerin

işlenmesiyle elde ettiği çıkış sinyalini axon' a ulaştırır. Axon çıkış sinyalini diğer sinir hücrelerinin dentritlerine bağlayan synaptik eklemlere taşır. Synaps' lar geçmiş tecrübeleri depolamak için uzun dönem hafızalar içerirler.

3.2. Sinir Hücresinin Matematiksel Modeli

Yapay sinir ağını oluşturan yapay sinir hücreleri biyolojik sinir hücresinin matematiksel modelidir. Biyolojik sinir hücreleri herhangi bir sinir sisteminde bilgi işlem ünitesinin ilk birimidirler. Tek başlarına ele alındıklarında basit işlevlere sahip minik işlemcilerdir. Sinir hücresinin dolayısı ile sinir ağının matematiksel olarak modellenmesi esnasında aşağıdaki maddeler göz önünde bulundurulur.

- 1) Sinir hücreleri, enformasyon işleminin gerçekleştiği sinir sisteminin ilk ünitesidir.
- 2) Giriş bilgisi, iletişim hatları aracılığıyla, sinir hücreleri arasında geçiş yapabilen sinyaller biçimindedir.
- 3) Her iletişim hattı, iletilen sinyalle çapılan bir ağırlığa sahiptir.
- 4) Her sinir hücresi kendi içerisinde bir ara işleme sahiptir. Buradaki aktivasyon fonksiyonunda, giriş sinyallerinin ağırlıklandırılmış toplamaları yerine koyularak o sinir hücresi için bir çıkış sinyali elde edilir.



Şekil .3.2. Sinir hücresinin matematiksel modeli

Şekil.3.2' de matematiksel modeli verilmiş olan biyolojik sinir hücresinin matematiksel modelleme karşılıkları aşağıdaki gibidir:

nöron (sinir hücresi)	→ işlemci eleman
dentrit	→ toplama fonk.
Soma	→ tasvir (aktivasyon) fonk.
Axonlar	→ yapay sinir hücresi çıkışları
Synapslar	→ hat ağırlıkları

Sinir hücresinin girişleri iletişim hatları üzerinde ağırlıklarla çarpılarak toplayıcıya gelir. Ağırlıklarla çarpılmış bütün giriş sinyalleri toplayıcıda toplanır. Bu toplam eşik değerini aştığı takdirde, aktivasyon fonksiyonunda işleme tabi tutularak sinir hücresinin çıkış sinyali elde edilir.

Toplayıcı çıkışı:

$$s = \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i + w_0 \cdot x_0 \Rightarrow w_0 x_0 = -b \quad (3.1)$$

Sinir hücresi çıkışı:

$$y = f\left(\sum_{i=1}^n w_i x_i - b\right) \quad (3.2)$$

Her bir giriş sinyalinde meydana gelen bir değişim sinir hücresinin çıkış sinyalinde bir değişim meydana getirir. Oluşacak bu değişim iletişim hatlarındaki ağırlıklara, sinir hücresinin eşik değerine ve aktivasyon fonksiyonunun tipine bağlıdır. Pratikte eşik değerinin çıkışa etkisi iletişim hattının ağırlığı $w_0 = -b$ ve giriş değeri $x_0 = +/-1$ olan bir düğüm varmış gibi düşünülerek hesaplanır.

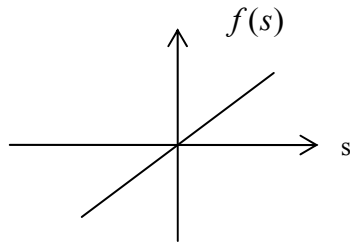
3.3. Aktivasyon Fonksiyonu

Aktivasyon fonksiyonu sinir hücresinin davranışını belirleyen temel özelliklerden biridir. Her bir sinir hücresi bir aktivasyon fonksiyonuna sahiptir. Sinir hücresine gelen giriş bilgileri, bağlantı ağırlıklarıyla çarpılıp toplanarak aktivasyon fonksiyonundan geçirilir. Aktivasyon fonksiyonundan geçirilir. Aktivasyon fonksiyonu çıkış bilgilerinin normalize edilmesi ve lineerlik ve nonlineerlik kazandırılması açısından önem taşır.

Aktivasyon fonksiyonunun modeli sinir ağı sistemindeki istenilen çıkış sinyali tipinde seçilen bir fonksiyondur. Sinir ağındaki farklı sinir hücrelerinin sahip oldukları aktivasyon fonksiyonları farklı olabilir.

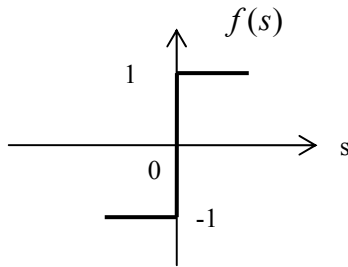
Yaygın olarak kullanılan aktivasyon fonksiyonları şunlardır;

1) Lineer



$$f(s) = s$$

2) Step

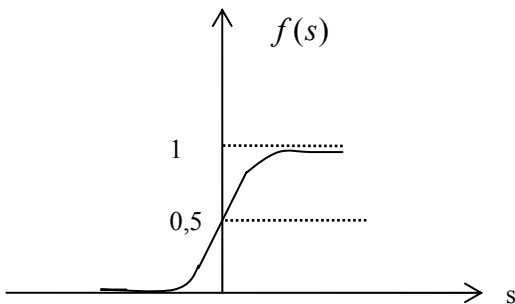


$$f(s) = 1, \quad s > 0$$

$$f(s) = -1, \quad s < 0$$

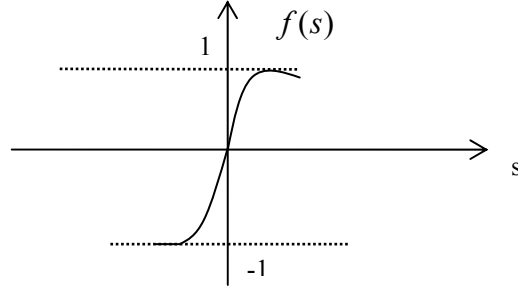
$$f(s) = 0, \quad s = 0$$

3) Sigmoidol



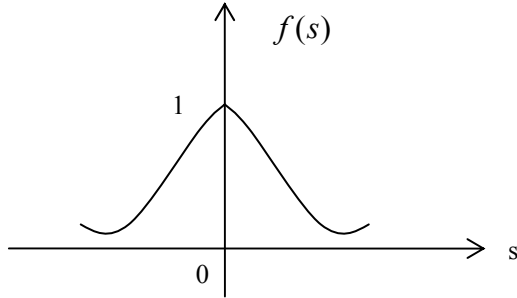
$$f(s) = \frac{1}{1 + \exp(-s)}$$

4) Hiperbolik Tanjant



$$f(s) = \frac{1 - \exp(-2s)}{1 + \exp(-2s)}$$

5) Radyal Tabanlı



$$f(s) = \exp(-s^2 / T)$$

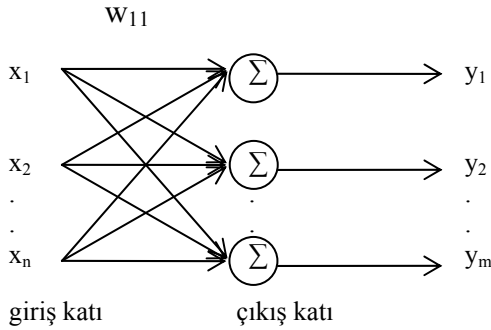
3.4. Y.S.A' nın Yapısı

Sinir ağı, birçok sinir hücresi katının bir araya gelmesiyle oluşur. Sadece bir giriş ve bir çıkış katından meydana gelen sinir ağı, tek katlı gibi işlem görür. Çünkü giriş katı herhangi bir hesaplama işlemine tabi tutulmaz. Bu tarz tek katlı sinir hücreleri perceptron olarak adlandırılır.

Genel olarak tek katlı sinir ağları çözüm için yeterli gelmezler. Daha çok, çok katlı sinir ağları kullanılır. Birden çok sinir hücresi katı olan ağlara çok katlı sinir ağı denir. Komşu katlardaki nöronlar (sinir hücreleri) arasında ağırlıklı bir hat vardır. Ancak aynı kattaki sinir hücreleri arasında böyle bir hat yoktur.

Giriş katı, giriş veri gruplarının ağı sunulduğu terminallerdir. Bu kattaki sinir hücresi sayısı, giriş veri sayısı kadardır. Çıkış katı, ağı en son katıdır. Bu kattaki sinir hücresi sayısı, ağı sunulan her verinin çıkış sayısı kadardır. Bu kattan elde edilen değerler yapay sinir ağının söz konusu problem için çıkış değeridir. Çok katlı sinir ağında, giriş ve çıkış katları arasındaki katlara saklı (hidden) kat denir. Sinir ağında, giriş bilgilerine göre sadece çıkış katındaki çıkış elde edilebilir, saklı katın çıkışı direk olarak elde edilemez. Ayrıca dışarıdan fiziksel olarak sadece giriş ve çıkış katına erişmek mümkündür, saklı katlara erişilemez. Bu nedenle saklı kat denilmiştir. Bir sinir ağında birden fazla saklı kat bulunabilir.

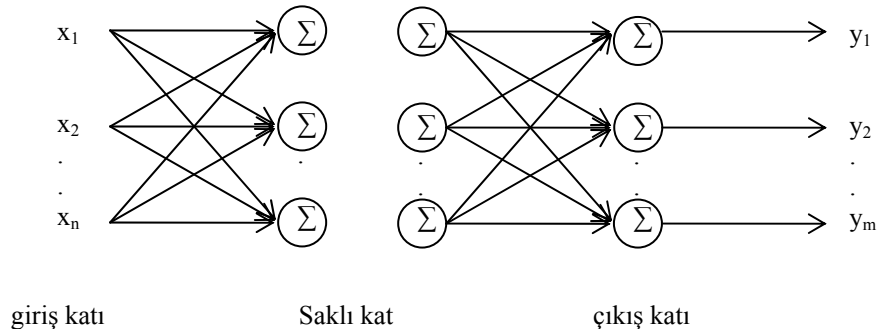
Saklı katlardaki sinir hücreleri, nonlinear davranışları nedeniyle sinir ağının toplam davranışındaki nonlinearliğin kaynağıdır. Bu nedenle saklı kat ağı temel işlevini gören katıdır. Saklı katlardaki sinir hücresi sayısı için herhangi bir belirleme tekniği yoktur. Bu katlardaki optimal sinir hücresi sayısına ulaşmanın tek yolu, deneme-yanılma metodudur. Eğer saklı katta gereğinden az sinir hücresi kullanılırsa, daha az hassas çıkış elde edilir. Aynı şekilde gereğinden fazla sinir hücresi kullanılırsa, aynı ağda yeni tip veri gruplarının işlenmesinde zorluklar meydana gelir.



Şekil 3.3. Tek katlı sinir ağı (Perceptron)

Şekil3.2’ de tek katlı sinir ağı modeli görülmektedir. Bu modelde çıkışlar aşağıdaki gibi hesaplanır [23].

$$\begin{aligned}
 y_1 &= f(x_1 \cdot w_{11} + x_2 \cdot w_{21} + \dots + x_n \cdot w_{n1}) \\
 y_2 &= f(x_1 \cdot w_{12} + x_2 \cdot w_{22} + \dots + x_n \cdot w_{n2}) \\
 &\vdots \\
 y_p &= f(x_1 \cdot w_{1p} + x_2 \cdot w_{2p} + \dots + x_n \cdot w_{np})
 \end{aligned}
 \Rightarrow y_j = f\left(\sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_{ij})\right) \quad (3.3)$$



Şekil 3.4. Çok katlı sinir ağı

Şekil.3.4’de çok katlı sinir ağı modeli görülmektedir.Çok katlı sinir ağında her bir sinir hücresi katının çıkışı, kendinden sonra gelen kat için giriş sinyali oluşturur. Tek katlı sinir ağında çıkışı elde etmek için yapılan işlem, çok katlı sinir ağında her bir kat için peş peşe uygulanarak çıkış katına kadar ulaşılır ve çıkış katında sistem çıkışı hesaplanır.

3.5. Y.S.A’ nın Öğrenmesi:

Y.S.A’ nın performansını etkileyen bir diğer faktör, Y.S.A’ nın eğitilmesidir. Eğitimin amacı tasarlanan Y.S.A sistemini mevcut probleme uygun hale getirmektir. Eğitici ve eğitici olmamak üzere iki tip öğrenim metodu vardır [21]. İki metod arasındaki fark istenen çıkış kümesinin olup olmamasıdır. Öğreticisiz öğrenmede eğitim veri kümesi, sadece giriş verilerinden oluşur. Y.S.A bu verilerden, daha önceki deneyimlerinden yola çıkarak genellemeler yapar ve eğitim sağlanmış olur. Öğreticili öğrenmede eğitim veri setinde giriş bilgileriyle birlikte bu girişlere karşı gelen istenilen çıkış bilgileri de yer alır. Yaygın olarak kullanılan metod öğreticili öğrenmedir.

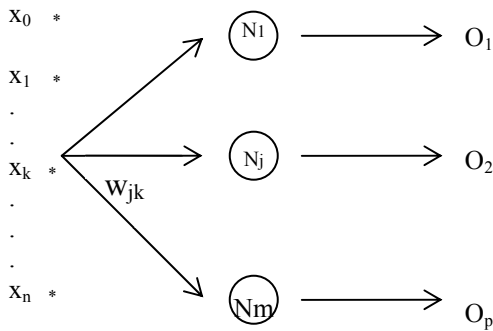
Eğitime başlarken hat ağırlıkları için rast gele değerler alınır. Sonra eğitim veri setinden bir x girişi sinir ağından geçirilir. Sinir ağı bir O çıkış değeri hesaplar. Bu çıkış değeri, eğitim veri setindeki x girişine karşılık gelen y istenilen çıkış değeriyle karşılaştırılır. Aradaki hata değeri E hesaplanır ($E= Y-O$). Bu hata değerine göre ağırlıklar yeniden güncellenir. Eğitim hata minimum değere ulaşınca kadar devam eder. Eğitim sonunda kontrol edilecek sistem için uygun Y.S.A elde edilir.

3.6. Geri Yayılım Algoritması

Günümüzde kullanılan en yaygın öğrenim algoritması, geri yayılım algoritmasıdır. Çok katlı, ileri beslemeli, öğreticili olarak eğitilen bir Y.S.A modelidir. Geri yayılım algoritmasında, hata sinyal değeri çıkış katından giriş katına doğru her kattaki düğümler toplam hatanın bir kısmını içerecek şekilde bütün katlara dağıtılır. Elde edilen hata sinyalleri temel alınarak, hat ağırlıkları her düğümde tekrar düzenlenir. Bu algoritma eğitim veri setindeki tüm giriş – çıkış verileri kullanılarak istenilen minimum hata değeri elde edilinceye kadar devam ettirilir.

3.7. Delta Kuralı

Delta kuralı tek katlı sinir ağlarında kullanılan bir öğrenim algoritmasıdır. Çok katlı sinir ağlarında kullanılan geri yayılım algoritmasındaki hesaplamalar delta kuralının genelleştirilmesiyle elde edilir [23]. Delta kuralını inceleyebilmek için şekil.3.5 ‘deki gibi bir perceptron ele alınsın.



Şekil 3.5. w_{ji} ağırlıklı tek katlı ağ

Eğitim veri setinde n adet x girişinden her birisi için q adet değer biliniyor ve bu q adet giriş için her bir çıkış düğümüne ait q adet çıkış biliniyor. Her x^q değeri için elde edilen O^q değerleri ise Y.S.A' nın mevcut hali için hesaplanmış çıkış değerlerini oluşturuyor. Hata, olması gereken çıkış ile elde edilen çıkış arasındaki farktır. Bütün x^q lar için elde edilen hataların toplamı;

$$E = \sum_{q=1}^n E^q \quad (3.4)$$

$$E^q = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n (y_i^q - o_i^q)^2 \quad (3.5)$$

$E^q \rightarrow$ delta kuralı tarafından minimize edilmiş hata

Birbirini takip eden iki kattaki k ve j düğümler arasındaki w_{jk} ağırlıkları güncellenerek hata minimum hale getirilir. Hat ağırlıklarının güncellenmesi ve hatanın hat ağırlıklarına göre değişimi aşağıdaki gibidir.

$$w_{jk} \rightarrow w_{jk} + \Delta w_{jk} \quad (3.6)$$

$$\Delta w_{jk} = \eta \frac{\partial E}{\partial w_{jk}} : \quad (3.7)$$

$\eta \rightarrow$ öğrenme katsayısıdır.

$$\Delta^q w_{jk} = \frac{\partial E^q}{\partial w_{jk}} = \frac{\partial}{\partial w_{jk}} \left(\frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (y_i^q - o_i^q)^2 \right) \quad (3.8)$$

$$= \frac{\partial}{\partial w_{jk}} \left\{ \frac{1}{2} \left[(y_1^q - o_1^q)^2 + \dots + (y_3^q - o_3^q)^2 + \dots + (y_m^q - o_m^q)^2 \right] \right\}$$

Burada sadece $k=j$ iken türev söz konusudur. $i \neq j$ iken $\frac{\partial}{\partial w_{jk}} (y_i^q - o_i^q)^2 = 0$ 'dır.

$$\text{Ayrıca } o_j^q = f_j \left(\sum_{i=0}^n w_{ji} x_i^q \right) \quad (3.9)$$

$$\Rightarrow \Delta^q w_{jk} = -(y_j^q - o_j^q)^2 \cdot \frac{\partial}{\partial w_{jk}} f_j \left(\sum_{i=0}^n w_{ji} x_i^q \right) \quad (3.10)$$

Böylece

$$\Delta^q w_{jk} = \frac{\partial E^q}{\partial w_{jk}} = x_k^q \cdot (O_j^q - y_j^q) \cdot f_j' \left(\sum_{i=0}^n w_{ji} \cdot x_i^q \right) \quad (3.11)$$

$$= \delta_j^q \cdot x_k^q$$

$$\delta_j^q = (O_j^q - y_j^q) f_j' \left(\sum_{i=0}^n w_{ji} \cdot x_i^q \right) \quad (3.12)$$

Burada

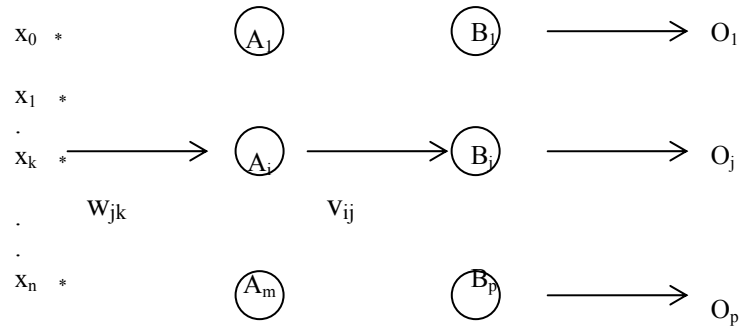
$$\Delta w_{jk} = \sum_{q=1}^n \Delta^q w_{jk} = -\eta \sum_{q=1}^n \frac{\partial E^q}{\partial w_{jk}} = \sum_{q=1}^n -\eta \cdot \delta_j^q \cdot x_k^q \quad (3.13)$$

Bu durumda güncellenmiş ağırlık;

$$w_{jk} = w_{jk} + \Delta w_{jk}$$

$$w_{jk} = w_{jk} + \sum_{q=1}^n -\eta \cdot \delta_j^q \cdot x_k^q \quad (3.14)$$

Genellenmiş delta kuralının geri besleme algoritmasında kullanılması,



Şekil 3.6. İki katlı sinir ağı

Delta kuralını kullanarak çıkış düğümü i düğüm olduğunda O_i çıkışını hesaplamak mümkündür. Ancak çok katlı sinir ağlarında saklı katların çıkışı için herhangi bir y beklenen çıkış değerine sahip değiliz. Ayrıca sistemden elde edilen O

çıkış değeri de çıkış katına aittir. Bu durumda saklı katlarda hata analizi yapabilmek için delta kuralının tüm katlar için genelleştirilmesi gerekir.

Şekil3.6' da iki katlı sinir ağı modeli gösterilmiştir. Saklı kattaki i . düğüm ve çıkış katındaki j . düğüm arasındaki hat ağırlığını V_{ji} , giriş katındaki k . düğüm ve saklı kattaki i . düğüm arasındaki hat ağırlığını w_{ik} olarak alalım. V_{ij} ' nin güncellenmesi delta kuralında olduğu gibidir.

$$\Delta V_{ji} = \sum_{j=1}^n \Delta^q V_{ji} = -\eta \sum_{j=1}^n \frac{\partial E^q}{\partial V_{ji}} \quad (3.15)$$

$$\Delta V_{ji} = \sum_{j=1}^n -\eta \cdot \delta_j^q \cdot z_i^q \quad (3.16)$$

Saklı kattaki i düğümün girişi olan z_i^q , aynı zamanda giriş katındaki k düğümün çıkışı O_k^q , dur.

$$z_i^q = \hat{f} \left(\sum_{k=0}^n w_{ik} \cdot x_k^q \right)$$

$$\delta_j^q = (O_j^q - y_j^q) f_j' \left(\sum_{k=0}^m w_{jk} \cdot z_k^q \right) \quad (3.17)$$

w_{ik} şu şekilde güncellenir.

$$\Delta^q w_{jk} = -\eta \sum_{q=1}^n \frac{\partial E^q}{\partial w_{ik}} = \frac{\partial E^q}{\partial w_{ik}} = \frac{\partial E^q}{\partial O_i^q} \cdot \frac{\partial O_i^q}{\partial w_{ik}} \quad (3.18)$$

O_i^q : saklı katdaki i düğümün çıkışıdır. Aynı zamanda çıkış katındaki j düğümün girişidir.

$$O_i^q = f_i \left(\sum_{\ell=0}^n w_{i\ell} \cdot x_\ell^q \right) = z_i^q$$

$$\frac{\partial O_i^q}{\partial w_{ik}} = f_i' \left(\sum_{\ell=0}^n w_{i\ell} \cdot x_\ell^q \right) \cdot x_k^q \quad (3.19)$$

Burada, O_i^q saklı katın çıkışı olduğu için $\delta_i^q = \frac{\partial E^q}{\partial O_i^q}$ hesaplanırken,

$$\delta_i^q = \frac{\partial E^q}{\partial O_i^q} = \sum_{j=1}^p \frac{\partial E^q}{\partial O_j^q} \cdot \frac{\partial O_j^q}{\partial O_i^q}$$

olarak alınır.

O_j^q : çıkış katındaki j düğümün çıkışı olduğu için $\frac{\partial E^q}{\partial O_j^q}$ bir önceki hesaplamada

mevcut. Bu durumda:

$$\begin{aligned} \frac{\partial O_j^q}{\partial O_i^q} \frac{\partial O_j^q}{\partial x} &= \frac{\partial x}{\partial z_i^q} & : O_i^q &= z_i^q \\ \frac{\partial O_j^q}{\partial x} &= f_j' \left(\sum_{t=0}^m v_{jt} \cdot z_t^q \right) & , \frac{\partial x}{\partial O_i^q} &= v_{ji} \\ \frac{\partial O_j^q}{\partial O_i^q} &= f_j' \left(\sum_{t=0}^m v_{jt} \cdot z_t^q \right) v_{ji} \end{aligned} \quad (3.20)$$

Bu durumda delta kuralı ile çıkış katı için hesaplanmış olan δ 'nın geriye doğru yayılımı δ 'nın hesaplanması şu şekildedir.

$$\begin{aligned} \delta_i^q &= \frac{\partial E^q}{\partial O_i^q} = \sum_{j=1}^p \frac{\partial E^q}{\partial O_j^q} - \frac{\partial O_j^q}{\partial O_i^q} \\ \delta_i^q &= f_i' \left(\sum_{k=0}^m w_{ik} \cdot x_k^q \right) \cdot \sum_{j=1}^p v_{ij} \delta_j^q \end{aligned} \quad (3.21)$$

w_{ik} ağırlığının güncellenmesi için δ_i^q değeri yerine koyulur.

$$\Delta^q w_{ik} = -2 \delta_i^q \cdot O_k^q$$

$$w_{ik}^q = w_{ik} + \Delta^q w_{ik}$$

Ağırlıkları güncellenmiş yeni Y.S.A kullanılarak, eğitim veri setindeki bir sonraki x^q değeri için Y.S.A' nın çıkışı tekrar hesaplanır. Hata istediğimiz değerde ise Y.S.A' nın eğitimi tamamlanmış demektir. Hata istenilen değerde değilse, istenilen hata değeri elde edilinceye kadar bu iterasyon devam eder.

4. NEURO-FUZZY KONTROL

Buraya kadar denetleyici mekanizmalar için kullanılan metotlardan ikisi olan Fuzzy Lojik ve Sinir Ağları metotları incelendi. Genel olarak veri kurallardan oluşmuş ise fuzzy, sayılardan oluşmuş ise sinir ağları kullanılır. Her iki metodun da ayrı ayrı avantajları vardır.

Sinir ağları öğrenme ve örnekleri tanımada iyi iken, kararların nasıl alınacağı konusunda iyi değildir. Bulanık mantık (fuzzy lojik) ise karar almada iyi iken, karar alma sürecinde kuralları kendiliğinden oluşturamaz.

Bu iki metodun birleştirilmesi ile özelde kontrolde genelde ise zeka teknolojilerinde, her iki metodun da avantajlarını kapsayan, her ikisinden de daha iyi çalışan ve her iki metodun da bir takım sınırlamalarından arındırılmış neuro-fuzzy teknikler elde edilmiştir. Bu yeni metotlar sinir ağlarının öğrenme yeteneği, en uygununu bulma ve bağlantılı yapılar gibi özelliklerine sahiptir. Bununla birlikte bulanık mantığın insan gibi karar verme, uzman bilgisi sağlama kolaylığı gibi üstünlüklerine sahiptir [24].

Neuro-fuzzy kontrol için çeşitli teknikler vardır. Bunlardan biri fuzzy kavramları sinir ağının içerisine yerleştirmektir. Böylece fuzzy giriş çıkışların olduğu, eğitim için bir analog geri besleme algoritmasının geliştirildiği fuzzy-neural sistem elde edilir. Bir diğer teknik de sinir ağlarının fuzzy modellemede kullanılmasıdır. Böylece sinir ağının kabiliyetleri ile geliştirilmiş bir fuzzy çıkarım sistemi oluşturulur.

Bir fuzzy kural aşağıdaki yapıdadır :

‘ if x is A then y is B ’ --- ‘Eğer x A ise o halde y B’dir’

Burada A ve B birer fuzzy küme yada birden fazla fuzzy kümenin çarpımıdır. Eğer $x = (x_1, \dots, x_n)$ şeklinde birden fazla giriş varsa o halde , ‘x A ise ‘ ifadesi ‘ $x_1 A_1$ ise , , , , $x_n A_n$ ise ‘ şeklinde olur.

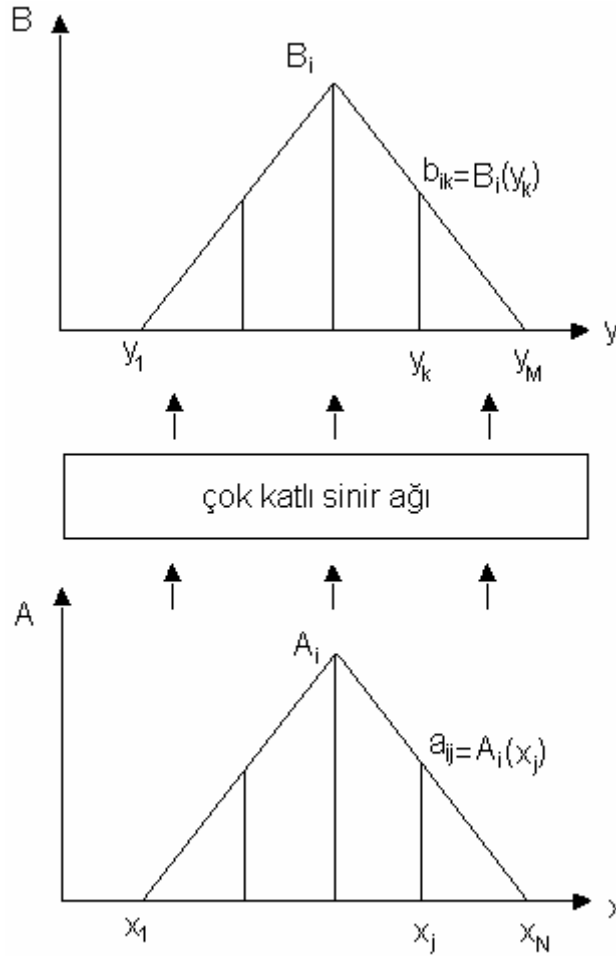
Bu bilgiler ışığında ‘şekil.4.1’ deki gibi bir yapı düşünülürse ;

R_i : Eğer $x = A_i$ ise o halde $y = B_i$ ‘dir

$i = 1, \dots, n$. A_i ve B_i fuzzy kümelerin çarpımıdır ve aşağıdaki gibi elde edilir.

$$A^i(x) = \left(\prod_{j=1}^N A_j^i \right)(x) = \bigcap_{j=1}^N A_j^i(x_j) \quad (4.1)$$

$$B^i(y) = \left(\prod_{k=1}^M B_k^i \right)(y) = \bigcap_{k=1}^M B_k^i(y_k) \quad (4.2)$$



Şekil 4.1. Neuro-fuzzy sistem modeli

Burada $i=1, \dots, n$ 'e kadar her fuzzy kural çok katlı sinir ağı için bir eğitim grubudur. Kuralların ilk kısmı sinir ağının girişini, ikinci kısmı ise sinir ağının o girişe karşı beklenen çıkışını oluşturur. Bu giriş ve çıkış çiftleri ile eğitilen sinir ağı, çıkışları bilinmeyen girişlere uygulanabilir hale gelir.

4.1. ANFIS Modeli

Fuzzy ve sinir ağlarının bir arada kullanılmasına en iyi örneklerden biri ANFIS'dir. Açılımı yapay sinir ağı tabanlı fuzzy çıkarım sistemleridir (Adaptive Neural Network Based Fuzzy Inference Systems) . ANFIS metodu Sugeno-Takagi çıkarım modeli üzerine oturtulmuştur [25].

Sadece iki kural içeren basit bir kural tabanı oluşturulsun;

$R_1 = \text{Eğer } x_1=A_1 \text{ ise ve } x_2=B_1 \text{ ise ,o halde } y = f_1(x) \text{'dir}$

$R_2 = \text{Eğer } x_1=A_2 \text{ ise ve } x_2=B_2 \text{ ise ,o halde } y = f_2(x) \text{'dir}$

Burada A_i ve B_i fuzzy kümelerdir.

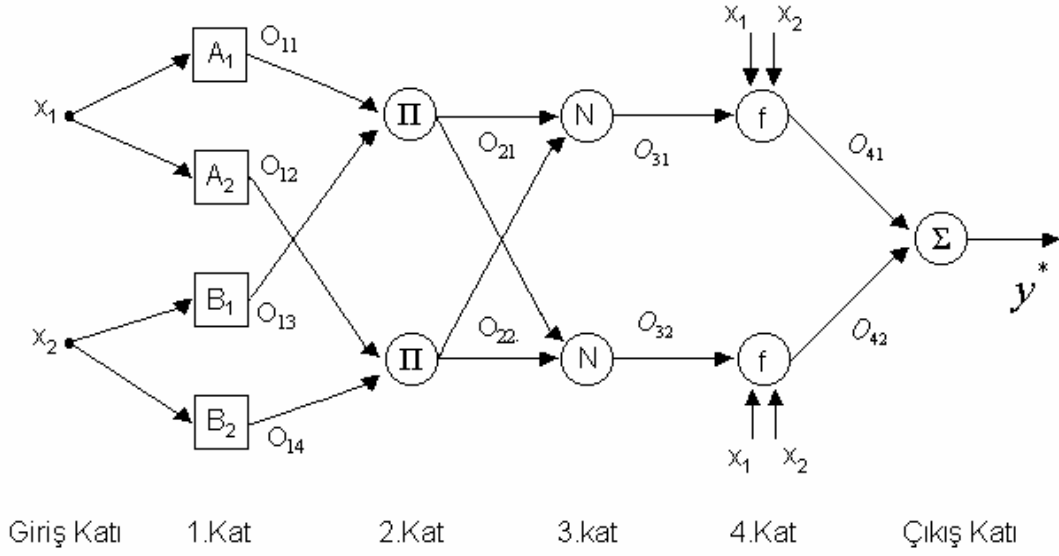
$$f_1(x) = z_{11}x_1 + z_{12}x_2 + z_{13}$$

ve $f_2(x) = z_{21}x_1 + z_{22}x_2 + z_{23}$ 'dir.

Bu durumda $x = (x_1, x_2)$ sayısal girişlerine karşılık Sugeno-Takagi çıkarım mekanizmasının oluşturacağı sayısal çıkış ;

$$y^* = \frac{A_1(x_1)B_1(x_2)f_1(x) + A_2(x_1)B_2(x_2)f_2(x)}{A_1(x_1)B_1(x_1) + A_2(x_2)B_2(x_2)} \quad (4.3)$$

Şelil.4.2' de bir ANFIS modeli görülmektedir. Bu model adım adım takip edildiğinde [17];



Şekil.4.2. İki girişli tek çıkışlı ANFIS modeli

0. kat (x_1, x_2) girişlerinin bulunduğu kattır. (x_1, x_2) 1. katın girişleridir, bu durumda 1. katın çıkışları ;

$$(O_{11}, O_{12}, O_{13}, O_{14}) = (A_1(x_1), A_2(x_1), B_1(x_2), B_2(x_2)) \quad (4.4)$$

A_i ve B_i ($i = 1, 2$) üyelik fonksiyonlarıdır. Üçgensel yada gauss fonksiyonları olarak seçilebilir. 1. katın çıkışları 2. katın girişleridir. 2. kat bir takım birleştirme işlemleri ile ifade edilen fuzzy sınır hücreleri içerir. Sugeno-Takagi çıkarım mekanizmasındaki gibi çarpma işlemi kullanarak 2. kat çıkışları ;

$$(O_{21}, O_{22}) = (A_1(x_1) \cdot B_1(x_2), A_2(x_1) \cdot B_2(x_2)) \quad (4.5)$$

3. kat normalizasyon katıdır. 3. kat çıkışları ;

$$\begin{aligned} (O_{31}, O_{32}) &= \left(\frac{O_{21}}{O_{21} + O_{22}}, \frac{O_{22}}{O_{21} + O_{22}} \right) \\ &= \left(\frac{A_1(x_1)B_1(x_2)}{A_1(x_1)B_1(x_2) + A_2(x_1)B_2(x_2)}, \frac{A_2(x_1)B_2(x_2)}{A_1(x_1)B_1(x_2) + A_2(x_1)B_2(x_2)} \right) \end{aligned} \quad (4.6)$$

4. kat fuzzy sinir hücrelerinin çıkışıdır ;

$$(O_{41}, O_{42}) = (O_{31}f, O_{32}f_2)$$

$$= \left(\frac{A_1(x_1)B_1(x_2)(z_{11}x_1 + z_{12}x_2 + z_{13})}{A_1(x_1)B_1(x_2) + A_2(x_1)B_2(x_2)}, \frac{A_2(x_1)B_2(x_2)(z_{21}x_1 + z_{22}x_2 + z_{23})}{A_1(x_1)B_1(x_2) + A_2(x_1)B_2(x_2)} \right) \quad (4.7)$$

Son olarak çıkış katı fuzzy sinir hücreleri çıkışlarının toplamıdır ;

$$y^* = (O_{41} + O_{42}) = \left(\frac{A_1(x_1)B_1(x_2)(z_{11}x_1 + z_{12}x_2 + z_{13}) + A_2(x_1)B_2(x_2)(z_{21}x_1 + z_{22}x_2 + z_{23})}{A_1(x_1)B_1(x_2) + A_2(x_1)B_2(x_2)} \right) \quad (4.8)$$

4.2. ANFIS Öğrenme Algoritması

ANFIS öğrenme algoritmasının temelinde, geri yayımlı hata analizi vardır. Herhangi bir k. eğitim grubu için karesel hata ;

$$E^k = 1/2 (O^k - y^k)^2 \quad (4.9)$$

O^k : sistemden hesaplanmış olan çıkış, y^k : sistemin girişine göre elde edilmesi beklenen çıkıştır. Standart öğrenme algoritması, fuzzy kuralın çıkış kısmında yer alan Z_i^j ($j = 0, 1, \dots, n$) parametrelerini öğrenmek için kullanılır.

Öğrenme algoritmasının incelenebilmesi için, iki kural tabanlı, tek giriş ve tek çıkış bir sistem ele alınsın ;

$R_1 = \text{Eğer } x_1 = A_1 \text{ ise, o halde } y = z_1$ 'dir

$R_2 = \text{Eğer } x_1 = A_2 \text{ ise, o halde } y = z_2$ 'dir

A_1 ve A_2 sigmoid fonksiyon olarak alınsın ;

$$A_1(x) = \frac{1}{1 + e^{b_1(x-a_1)}} \quad A_2(x) = \frac{1}{1 + e^{b_2(x-a_2)}} \quad (4.10)$$

Verilen eğitim kümesine $[(x^1, y^1), \dots, (x^k, y^k)]$ dayanarak, bu kümedeki giriş-çıkış çiftlerinin elde edilmesini sağlayacak olan fuzzy kurallardaki üyelik fonksiyonlarının ve fuzzy kuralların çıkış kısmının elde edilmesi isteniyor. Yani, sigmoid üyelik fonksiyonlarını oluşturan a_1, a_2, b_1, b_2 parametrelerinin ve kuralın çıkış kısmındaki z_1, z_2 değerlerinin bulunması isteniyor.

Herhangi bir k. eğitim grubu için hata ;

$$Ek = Ek(a_1, b_1, a_2, b_2, z_1, z_2) = \frac{1}{2} (Ok(a_1, b_1, a_2, b_2, z_1, z_2) - y^k)^2 \quad (4.11)$$

Şeklinde. Uygun olan $a_1, a_2, b_1, b_2, z_1, z_2$ parametrelerini bulmak için aşağıdaki gibi bir iterasyon uygulanır [17].

$$z_i(t+1) = z_i(t) - \eta \frac{\partial E^k}{\partial Z_i} = z_i(t) - \eta (O^k - y^k) \frac{A_i(x^k)}{A_1(x^k) + A_2(x^k)} \quad (4.12)$$

$$a_i(t+1) = a_i(t) - \eta \frac{\partial E^k}{\partial a_i} \quad (4.12)$$

$$b_i(t+1) = b_i(t) - \eta \frac{\partial E^k}{\partial b_i} \quad (4.1)$$

Burada $\eta > 0$: öğrenme kat sayısıdır. t, iterasyon indisidir

$a_1 = a_2 = a$ ve $b_1 = b_2 = b$ olduğu varsayılın, böylece işlemler daha da basitleşir. Bu durumda, $A_1(x) + A_2(x) = 1$ olur.

$$z_i(t+1) = z_i(t) - \eta (O^k - y^k) A_i(x^k) \quad (4.14)$$

$$a(t+1) = a(t) - \eta \frac{\partial E^k(a, b)}{\partial a} \quad (4.15)$$

$$b(t+1) = b(t) - \eta \frac{\partial E^k(a, b)}{\partial b} \quad (4.16)$$

Burada ;

$$\frac{\partial E^k(a, b)}{\partial a} = (O^k - y^k) \frac{\partial O^k}{\partial a} = (O^k - y^k) \frac{\partial}{\partial a} (z_1 A_1(x^k) + z_2 A_2(x^k)) \quad (4.17)$$

$$= (O^k - y^k) \frac{\partial}{\partial a} (z_1 A_1(x^k) + z_2 (1 - A_1(x^k))) \quad (4.18)$$

$$= (O^k - y^k) \frac{\partial}{\partial a} ((z_1 - z_2) A_1(x^k) + z_2) \quad (4.19)$$

$$= (O^k - y^k) ((z_1 - z_2) \frac{\partial}{\partial a} A_1(x^k)) \quad (4.20)$$

$$= (O^k - y^k) (z_1 - z_2) b \frac{e^{b(x^k - a)}}{(1 + e^{b(x - a)})^2} \quad (4.21)$$

$$= (O^k - y^k) (z_1 - z_2) b A_1(x^k) (1 - A_1(x^k)) \quad (4.22)$$

$$\frac{\partial E^k(a, b)}{\partial a} = (O^k - y^k) (z_1 - z_2) b A_1(x^k) A_2(x^k) \quad (4.23)$$

Olarak ifade edilir. Benzer şekilde ;

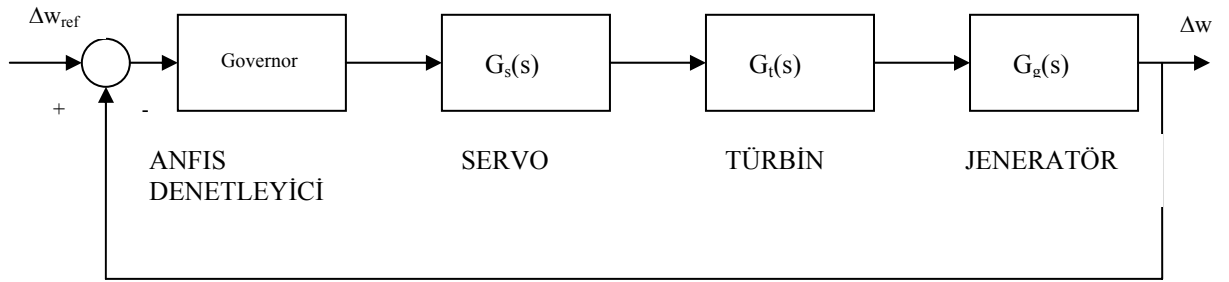
$$\frac{\partial E^k(a, b)}{\partial b} = -(O^k - y^k) (z_1 - z_2) (x^k - a) A_1(x^k) A_2(x^k) \quad (4.24)$$

Bu iterasyon uygun parametre değerleri bulununcaya kadar devam eder. İterasyon sonunda elde edilen parametre değerleri ile ANFIS modeli eğitilmiş halini alır. Artık bu model özelliklerine göre eğitilmiş olduğu problemin kontrolünde kullanılacak haldedir.

5. ANFIS KONTROL METODU KULLANILARAK HİDROELEKTRİK TÜRBİN KONTROLÜ

Neuro-Fuzzy kontrol tekniği olarak konu edinilen ANFIS metodunun teorisi bir önceki bölümde incelendi. Bu bölümde ANFIS metodu kullanılarak hidroelektrik güç santralinde hidro-türbin hız kontrolü ele alınacak.

Güç sistemlerinde hız kontrolü için kullanılan özel bölümler, governor yani yönetici bölümleridir. Hidro-türbin sistemine uygun olarak elde edilmiş olan ANFIS kontrol sistemi, hidro-türbin hız kontrolü için governor olarak kullanılır. Böylece ANFIS kontrol tekniği ile hidro-türbin hız kontrolü sağlanmış olur



Şekil.5.1. Hidro-Türbin Hız Kontrol Blok Diyagramı

Kullanılacak olan kontrol sisteminin blok diyagramı şekil.5.1’ de gösterilmiştir. Burada, Δw_{ref} : istenilen referans hızdır, Δw : hız değişimidir. $G_s(s)$, $G_t(s)$ ve $G_g(s)$ sırasıyla servo motor modelinin, türbin modelinin ve jeneratör modelinin transfer fonksiyonlarıdır. Su, türbin, yük, hız ve yük açısı gibi bozulmalar ihmal edilmiştir [26].

5.1. Hidrolik Sistem Parametreleri

Hidro-türbin hız kontrol problemlerinde, önemli olan bağıntı, türbin içerisindeki birim başına düşen yüksek basınç (H_t) ve oluk içerisindeki su hızının (V) oranıdır. Türbin kılavuz vanaları kapatıldığında, su hızı anlık olarak değiştirilemez, bunun nedeni suyun ataletidir. Bu da türbin içerisinde basınç artmasına neden olur. Oluklardaki su hızı değişiminden dolayı meydana gelen bu olaya ‘su çekici’ fenomeni adı verilir.

Suyun sıkıştırılabilirliği ve oluğun imal edildiği çeliğin elastikiyetinden dolayı sudaki bu basınç yayılır.

Türbin içerisindeki yüksek basınç artışının (ΔH_t), Suyun hızının artışına (ΔV) oranı aşağıdaki gibidir [26,27].

$$\frac{\Delta H_t(s)}{\Delta V(s)} = -\Omega_p - 0.5Z_p \tanh(T_e s) \quad (5.1)$$

Burada, s : laplace frekans ifadesi, Ω_p : oluğun sürtünme faktörü, Z_p : oluğun normalize edilmiş dalga empedansı ve T_e : dalga yayılma zamanıdır.

$$Z_p = \frac{T_w}{T_e} \quad (5.2)$$

T_w : su başlama zamanıdır.

$$T_w = \frac{LQ_{base}}{H_{tbase}A_g g} \quad (5.3)$$

$$T_e = \frac{l}{a} \quad (5.4)$$

Burada, l : oluğun boyu, A_p : oluğun kesiti, H_{tbase} ve Q_{base} sırasıyla , su basıncının ve su akış oranının birim başına düşen temel değerleri ve g : ağırlığa bağlı olan ivmedir. Dalga yayılma zamanı T_e , oluğun boyu l ye ve su dalgasının hızı a 'a bağlıdır

Sürtünme faktörü Ω_p , sürtünme katsayısı k_p ' ye ve suyun sabit-durum hızı V_o ' a bağlıdır.

$$\Omega_p = 2k_p |V_o| \quad (5.5)$$

Denklem (5.1)' deki tanjant hiperbolik fonksiyonu ($\tanh$), sonsuz çarpım genişlemesi kullanılarak ifade edilebilir. Buna göre,

$$\tanh(T_e s) = \frac{sT_e \prod_{n=1}^{\infty} \left[1 + \left(\frac{sT_e}{n\pi} \right)^2 \right]}{\prod_{n=1}^{\infty} \left[1 + \left(\frac{2sT_e}{(2n-1)\pi} \right)^2 \right]} \quad (5.6)$$

Su hızındaki ve mekanik güçteki artış aşağıdaki şekilde ifade edilir.

$$\Delta V(s) = 0.5\Delta H_t(s) + \Delta G(s) \quad (5.7)$$

$$\Delta P_m(s) = \Delta H_t(s) + \Delta G(s) \quad (5.8)$$

Denklem (5.1), (5.7) ve (5.8) birleştirilerek, türbin modeli transfer fonksiyonu $G_t(s)$ elde edilir [26]. $G_t(s)$ elde edilirken su çekici etkileri, sürtünmenin neden olduğu basınç kaybı ve esnek olmayan oluk etkileri göz önünde bulundurulur.

$$G_t(s) = \frac{1 - \Omega_p - Z_p \tanh(T_e s)}{1 + 0.5\Omega_p + 0.5Z_p \tanh(T_e s)} \quad (5.9)$$

Burada sistem parametreleri; $k_p=1$, $T_w=2.23'$ dür. Üçüncü dereceden türbin modeli transfer fonksiyonu olarak, aşağıdaki transfer fonksiyonu kullanılabilir [26].

$$G_t(s)_{n=1} = \frac{-0.28246s^3 + 0.71265s^2 - 15.6028s + 9.8413}{0.14123s^3 + 0.71572s^2 + 7.80143s + 9.8837} \quad (5.10)$$

Servo motor modeli transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$G_s(s) = \frac{1}{(T_p s + 1)(T_s s + 1)} \quad (5.11)$$

Burada, T_p ve T_s sırasıyla kılavuz ve geçit servo motor zaman sabitleridir. $T_p=0.01$ ve $T_s=0.5$. Bu durumda,

$$G_s(s) = \frac{1}{0.005s^2 + 0.51s + 1} \quad (5.12)$$

5.2. Jeneratör Modeli Transfer Fonksiyonu

Yaygın olarak 3. dereceden senkron jeneratör modeli kullanılır. Aşağıda bu modeli tanımlayan cebirsel denklemler verilmiştir [28].

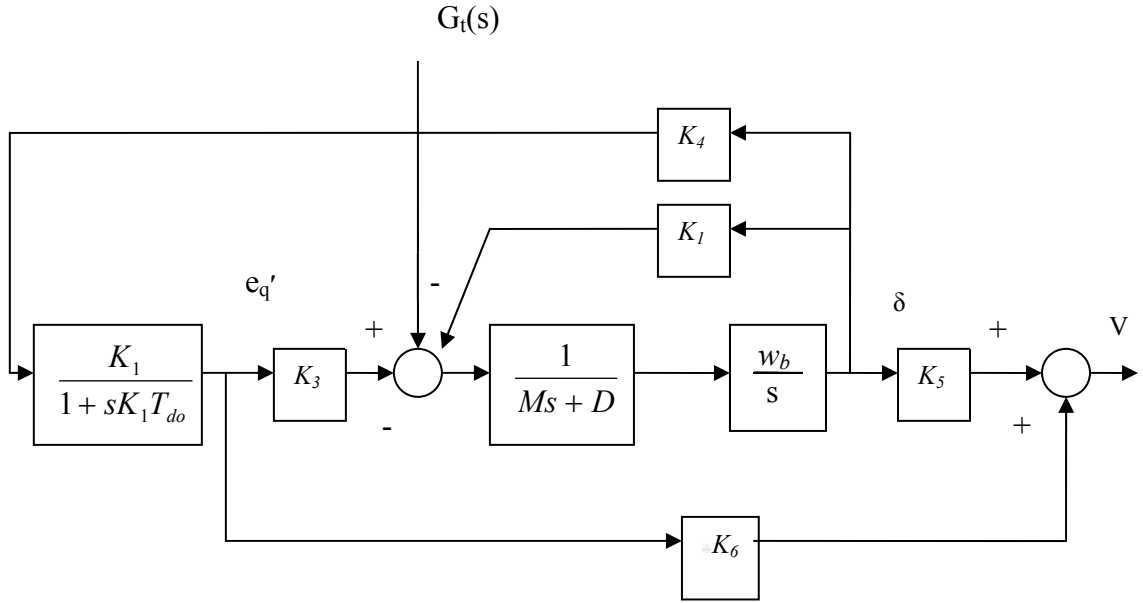
$$\frac{dw}{dt} = \frac{1}{M} (T_m - T_e - D_w) \quad (5.13)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = w - (w - 1) \quad (5.14)$$

$$\frac{de_{q'}}{dt} = \frac{1}{T_{do'}} (E_{FD} - e_{q'} - (x_d - x_{d'})i_d) \quad (5.15)$$

$$T_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (5.16)$$

$$V_t = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} \quad (5.17)$$



Şekil.5.2. Jeneratör Modeli Blok Diyagramı

Şekil.5.2' de jeneratör modeli blok diyagramı görülmektedir [29]. Elde edilen jeneratör modeli transfer fonksiyonu aşağıdaki gibidir.

$$G_g(s) = \frac{wb[K_5(1+sK_3) + K_6K_4K_3]}{((Ms+D)s + K_1w_b)(1+sK_3T_{do}) - w_bK_2K_3K_4} \quad (5.18)$$

Burada sistem sabitleri; $K_1=0.6851$, $K_2=0.9962$, $K_3=0.5816$, $K_4=0.6862$, $K_5=0.815$, $K_6=0.6239$, $T_{do}=6.5$, $M=7$, $D=0$ 'dır.

$$G_g(s) = \frac{-0.3079wbs + 0.24887 - 0.6815wb}{26.446s^3 + 7s^2 + 2.588s - 1.0788} \quad (5.19)$$

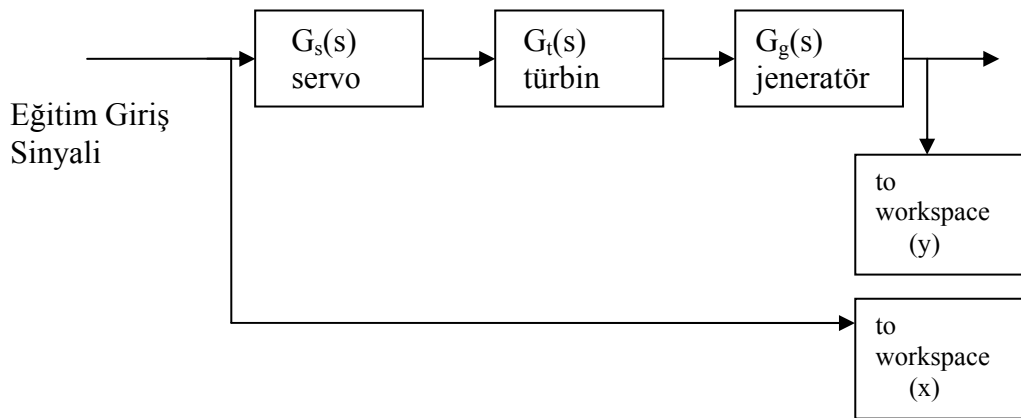
$w_b=1$ olarak alındığında,

$$G_g(s) = \frac{0.3079s - 0.43263}{26.446s^3 + 7s^2 + 2.588s - 1.0788} \quad (5.20)$$

5.3. ANFIS Modelinin Eğitilmesi

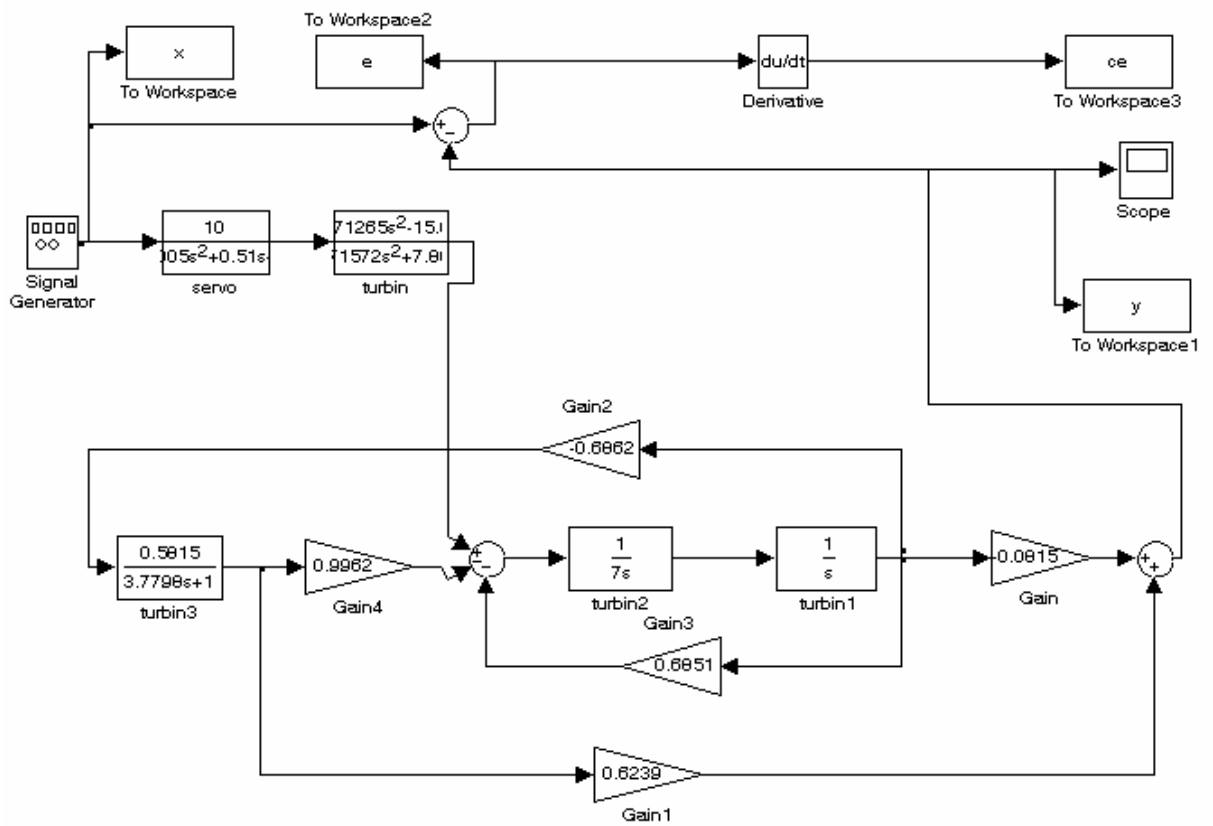
Transfer fonksiyonlarının elde edilmesi ile, hidro-türbin hız kontrolü için kullanılacak olan kontrol sistemi oluşturuldu. Kontrol sisteminde yer alacak ANFIS denetleyici mekanizmasının bu sisteme göre eğitilip kontrol için hazır hale gelmesi gerekiyor.

ANFIS denetleyici modelini eğitmek için ilk adım, bir eğitim veri kümesi oluşturmaktır. Eğitim veri kümesini elde edebileceğimiz bir model Şekil.5.3' de görülmektedir.



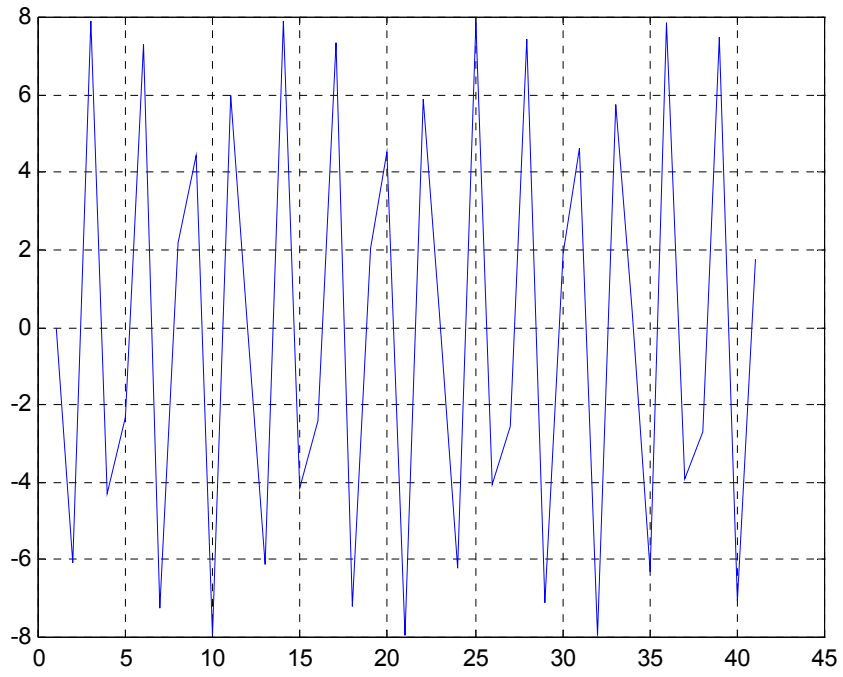
Şekil.5.3. ANFIS Eğitim Model

ANFIS Eğitim veri kümesinin, giriş değerleri ve bu girişlere karşılık gelen beklenen çıkış değerlerinden oluşması gerekir. Bununla birlikte çok girişli bir sistem eğitilmek isteniliyorsa, hata, hatanın değişimi gibi giriş parametreleri de kullanılabilir. Bunun için elde edilmiş olan transfer fonksiyonları şekil.5.3' deki modelde yerine koyularak, MATLAB-SIMULINK' de şekil.5.4' deki gibi bir blok diyagram oluşturuldu. Giriş sinyali olarak random fonksiyon uygulandı ve random fonksiyona karşılık gelen çıkış değerleri elde edildi.

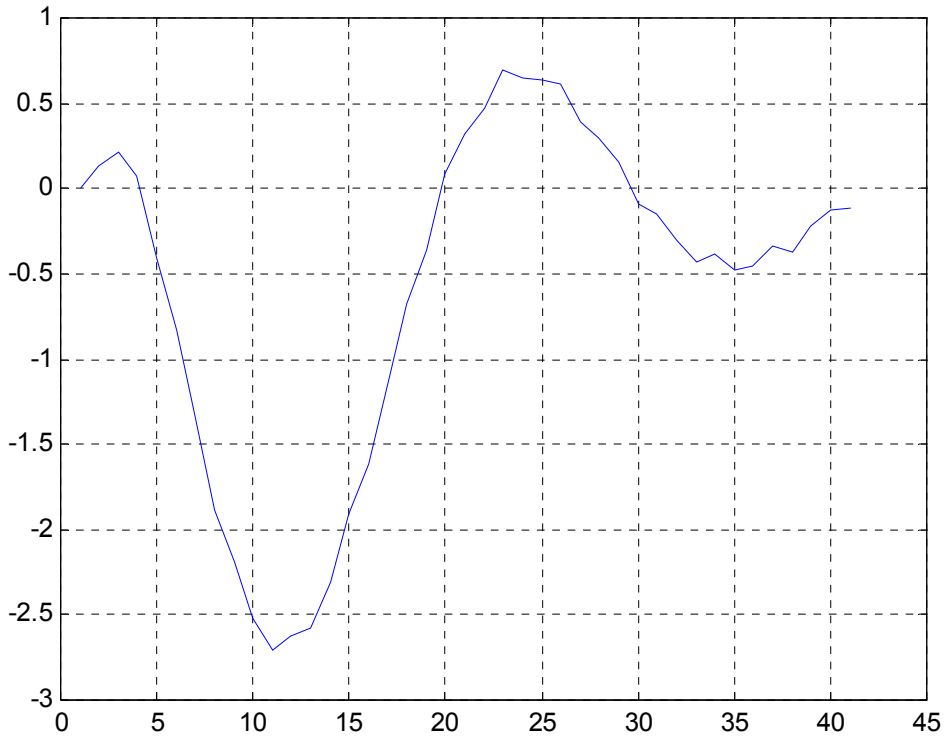


Şekil.5.4. ANFIS Eğitim Modeli Blok Diyagramı

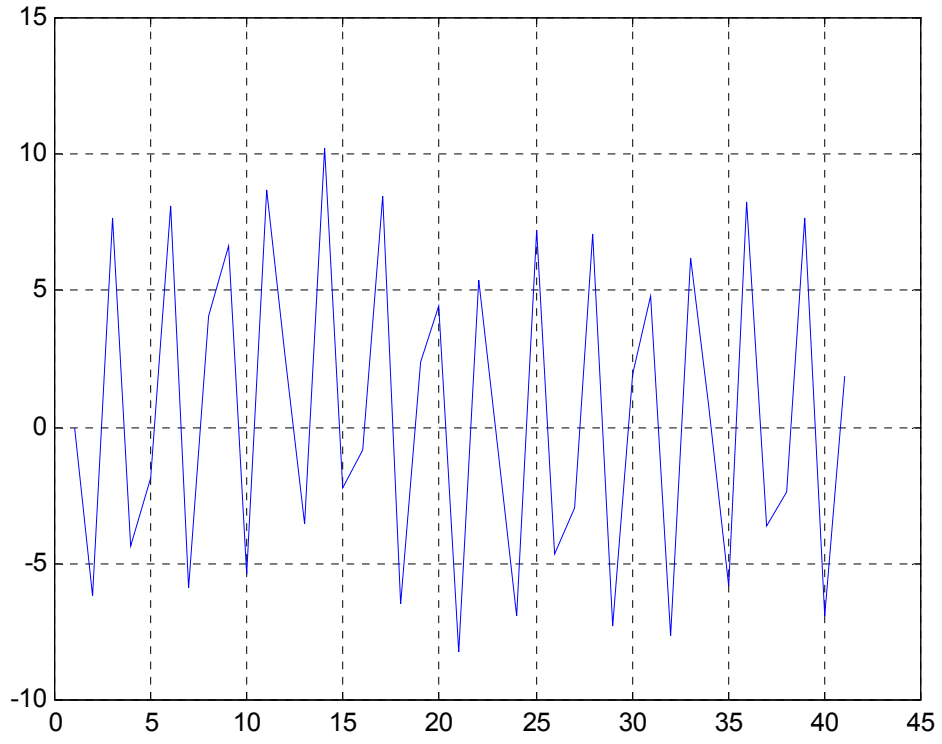
Şekil.5.4' deki blok diyagramın çalıştırılması ile sistem girişlerine karşılık gelen çıkışların yanı sıra giriş ve çıkış arasındaki hata ve hatanın değişimi de elde edilmektedir.



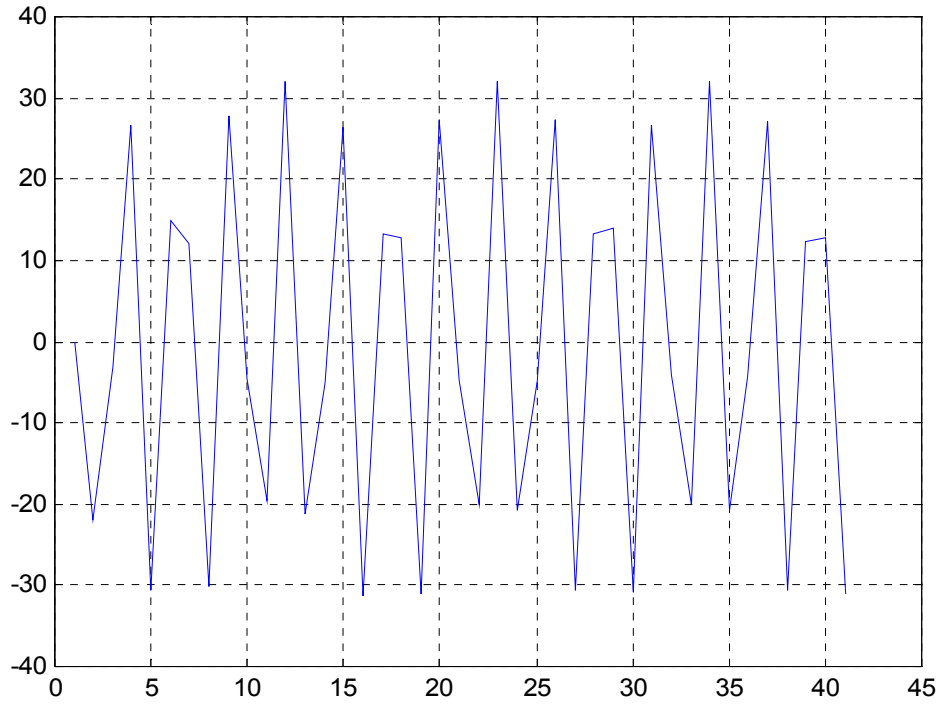
Şekil.5.5. Sistem Girişi, x' in (random fonk.) Zamana Göre Değişimi



Şekil.5.6. Sistem Çıkışı, y' in Zamana Göre Değişimi



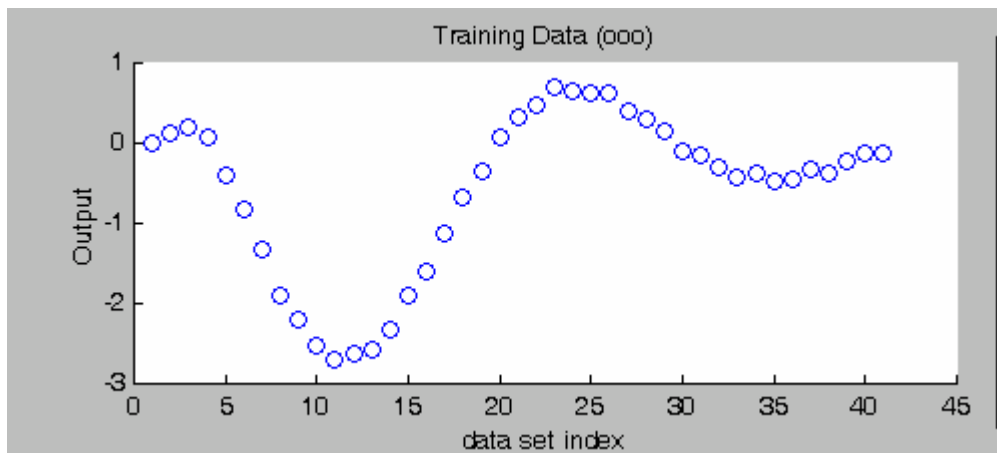
Şekil.5.7. Giriş ve Çıkış Arasındaki Hata, e' in Zamana Göre Değişimi



Şekil.5.8. Hatanın Değişimi ce' in Zamana Göre Değişimi

Eğitim veri kümesini oluşturmak için hazırlanmış olan simülasyonun çalıştırılması ile elde edilmiş olan x , y , e ve ce bilgileri, MATLAB’ da text dosyasına çevrilerek kaydedildi. Böylece e , ce ve y' i kullanarak iki giriş-tek çıkış bir ANFIS modelini eğitecek eğitim veri kümesi oluşturuldu.

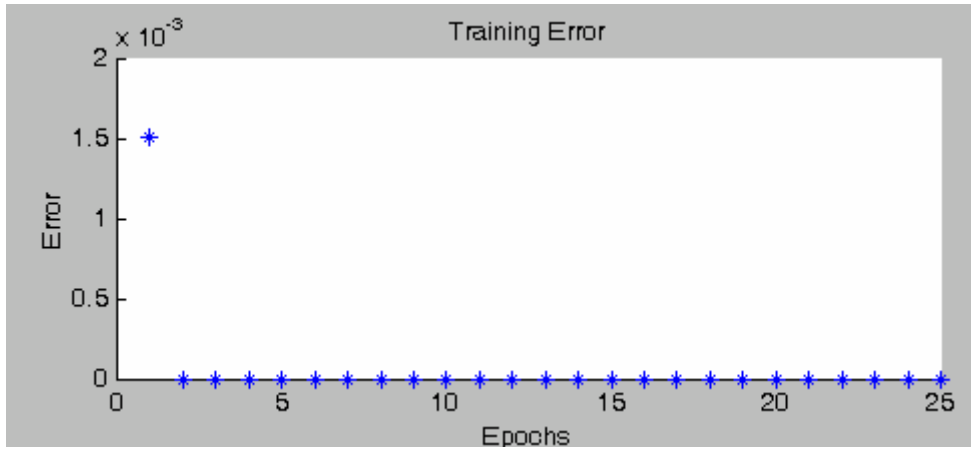
Eğitim işlemi için MATLAB-ANFIS editörü kullanıldı. Eğitime başlamadan önce text dosyası olarak kaydedilen eğitim veri kümesi ANFIS editörüne yüklendi. Şekil. 5.9’ da ANFIS editörüne yüklenmiş olan eğitim veri kümesine göre örneklenmiş çıkış sinyali görülmektedir. Bu çıkış sinyali eğitim veri kümesinde yer alan y çıkış sinyalinin aynısıdır.



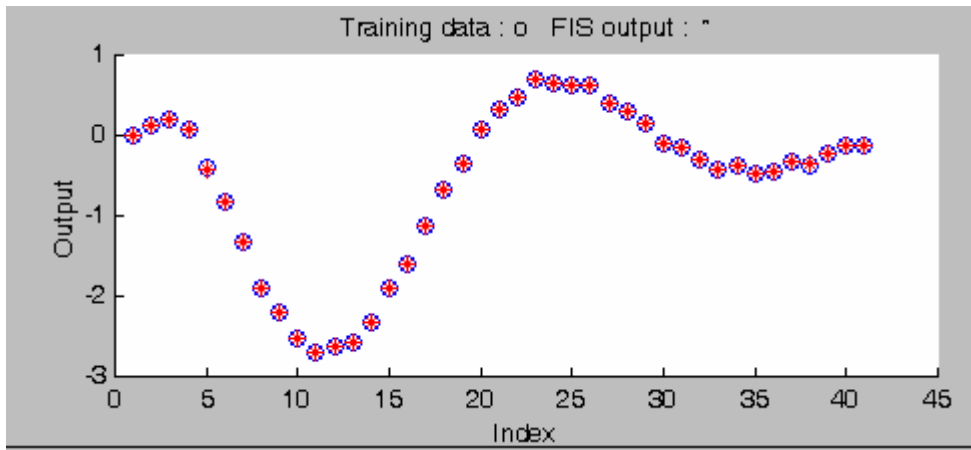
Şekil.5.9. Sistem Çıkışının ANFIS Editöründe Örneklenmiş Hali

Eğitime başlarken eğitim parametrelerine karar vermek gerekmektedir. Bu uygulamada üyelik fonksiyonu sayısı 5 olarak seçildi ve üyelik fonksiyonu tipi çan eğrisi olarak belirlendi. Eğitim için iterasyon sayısı 25 ve hata toleransı 0.01 olarak alındı.

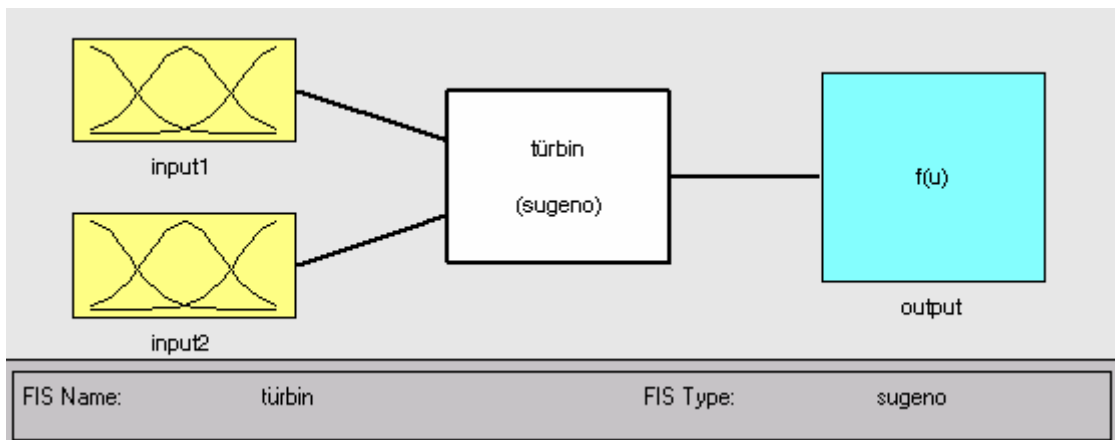
Belirlenen parametrelerle gerçekleştirilen eğitimin başarısı şekil.5.10 ve şekil.5.11’ de görülebilir. Şekil.5.10, eğitim hatasını göstermektedir. Hata ikinci iterasyondan itibaren arzu edilen seviyeye ulaşmıştır. Şekil.5.11’ de eğitim sonrası, eğitim başarısını ölçmek için yapılan kontrol işleminin sonucu görülmektedir. Bu şekle göre eğitim veri kümesi esas alınarak örneklenmiş çıkış ile , eğitim sonrası elde edilen çıkış birbiri ile birebir örtüşmektedir.



Şekil.5.10. Eğitim Hatası



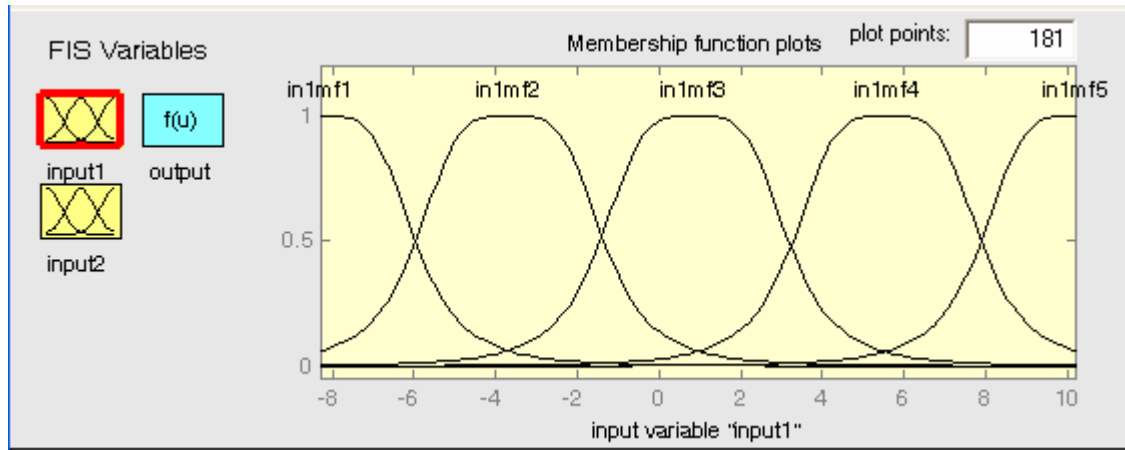
Şekil.5.11. Eğitim Veri Kümesi ve Eğitim İşlemi Kontrolü



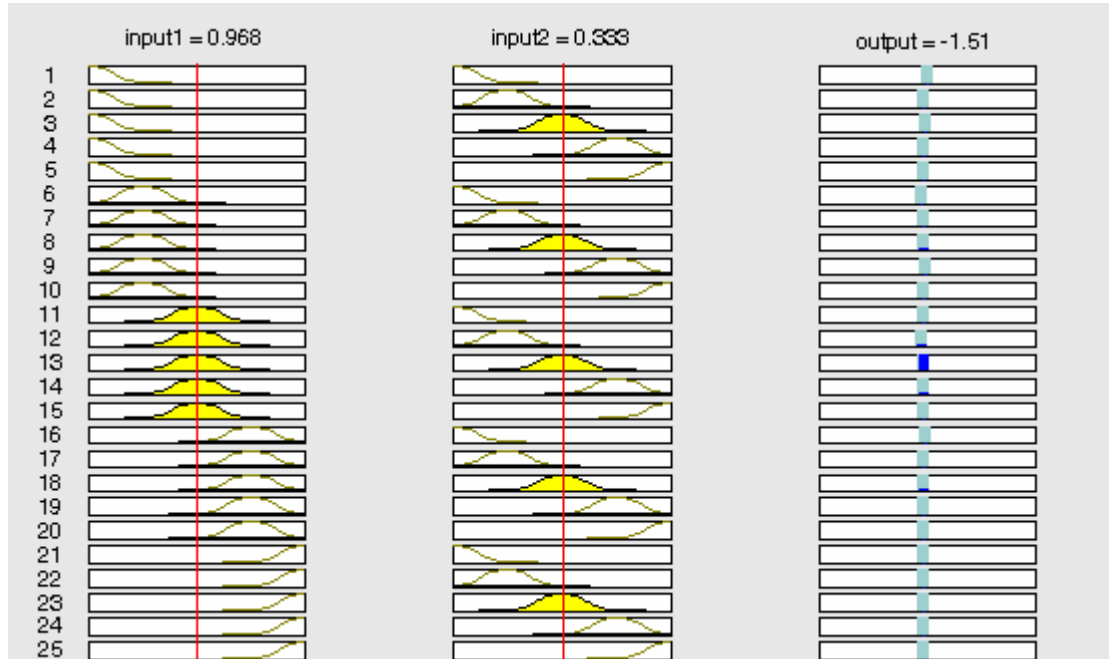
Şekil.5.12. Fuzzy Lojik Denetleyici Modeli

Eğitim işlemi tamamlandıktan sonra, elde edilen ANFIS modeli Türbin isimli bir iki giriş-tek çıkış fuzzy lojik denetleyici olarak kaydedildi.Şekil.5.12’ de Türbin Fuzzy lojik denetleyicisinin modeli görülmektedir.

Eğitim işlemi için seçilmiş olan üyelik fonksiyonları Şekil.5.13’ de görülmektedir. Üyelik fonksiyonlarını tanımlayan parametreler de eğitim esnasında hesaplanır. Bu uygulamada üyelik fonksiyonu tipi çan eğrisi olarak alındığı için, beklenen değer ve varyans parametreleri eğitim işlem ile hesaplanmıştır.



Şekil.5.13. Üyelik Fonksiyonları

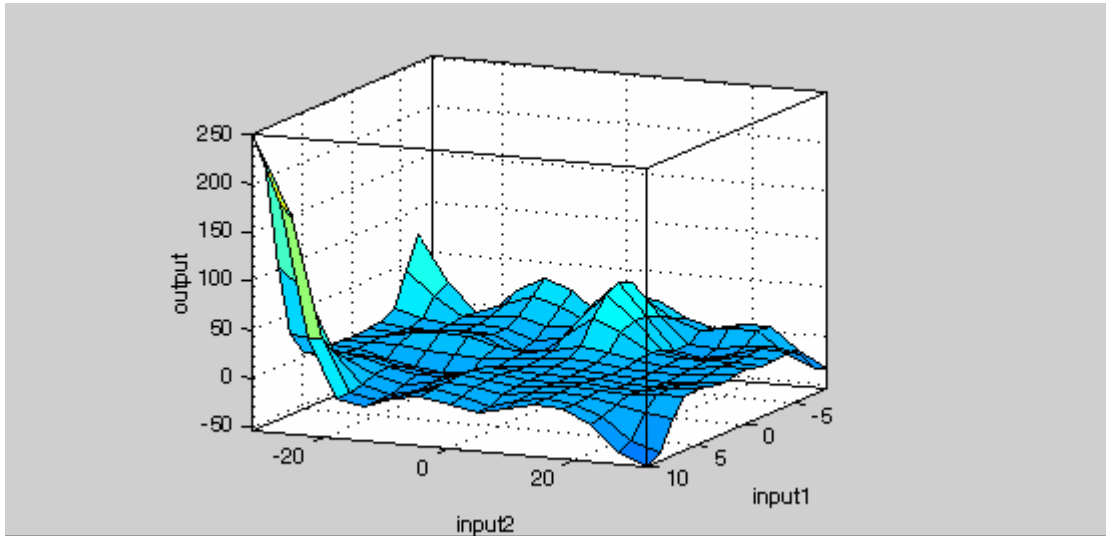


Şekil.5.14. Eğitim Sonucu Oluşan Kurallar

Eğitim için 5 adet üyelik fonksiyonu seçildiği ve sistem iki adet girişe göre eğitildiği için sonuçta 25 adet kural oluşur. Oluşan 25 kuraldan 3 tanesi aşağıda verilmiştir. Kuralların tamamı şekil.5.14' de görülmektedir.

Eğer $e = 2.306$ ise ve $ce = -15.9$ ise, o halde $y = 0.4384$ ' dür
Eğer $e = 2.306$ ise ve $ce = 0.165$ ise, o halde $y = -0.09697$ ' dır
Eğer $e = 2.306$ ise ve $ce = 16.19$ ise, o halde $y = -0.0639$ ' dur

Eğitilmiş sistem bilgileri ile çizilen yüzey şekli şekil.5.15' de verilmiştir. Input1 eksenini e i, input2 eksenini ce i ve output eksenini y i göstermektedir. Eksenlerdeki minimum ve maksimum değerler limit değerlerdir. Bu uygulamada simülasyon işleminde limitör kullanılmamıştır. Ancak limitör kullanarak eksenlerde sınırlama yapmak mümkündür. Yüzey şekli ağırlıklı olarak sıfır eksenini üzerinde oluşmuştur, bu yüzey kullanılacak kontrol yüzeyidir.

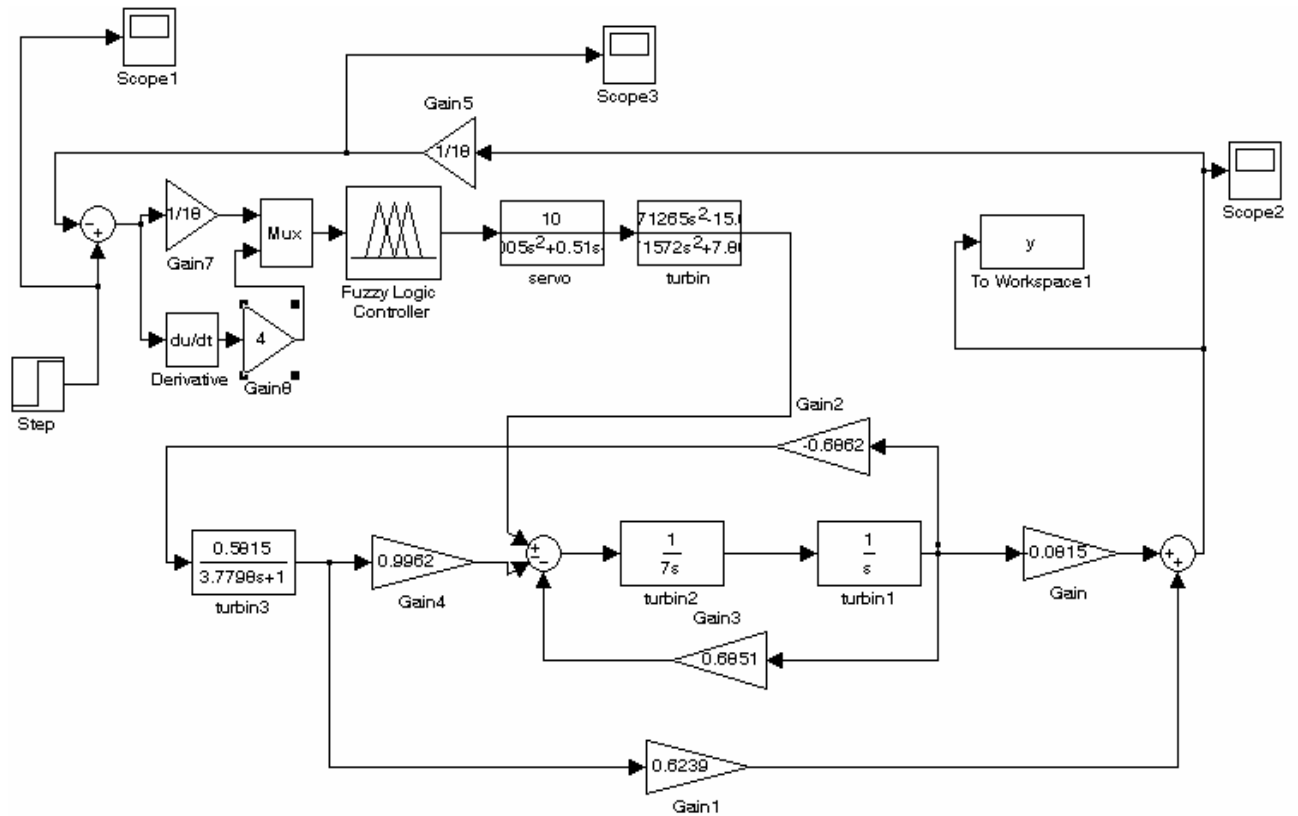


Şekil.5.15. Yüzey Şekli

5.4. KONTROL UYGULAMASI

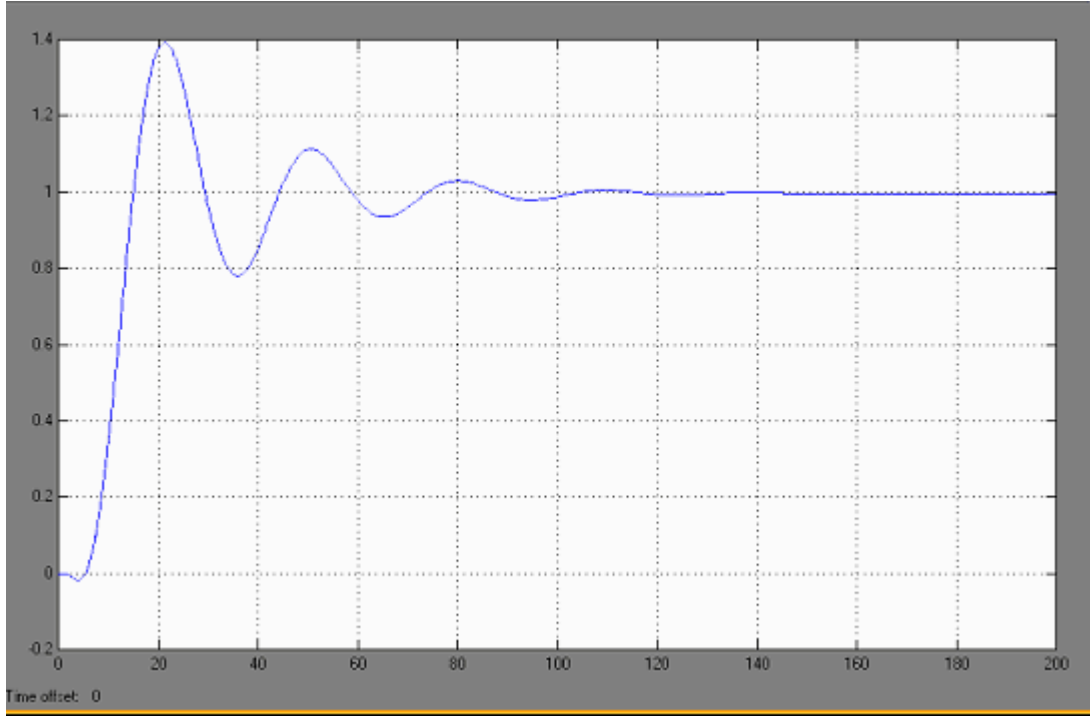
Eğitim işlemi tamamlandıktan sonra eğitilmiş ANFIS modeli Türbin fuzzy lojik denetleyicisi olarak kaydedildikten sonra, bu denetleyici kullanılarak hidro-türbin hız kontrolü mümkündür.

Kontrol için MATLAB-SIMULINK 'de şekil.5.16' deki gibi bir simülasyon oluşturuldu. Oluşturulan simülasyonda sistemi karakterize eden transfer fonksiyonlarının yanı sıra bu sistem için eğitilmiş fuzzy lojik denetleyici de yer almaktadır. Ayrıca kontrol işleminin daha hassas olabilmesi için, benzer pek çok kontrol uygulamasında olduğu gibi kazançlar kullanılmıştır.

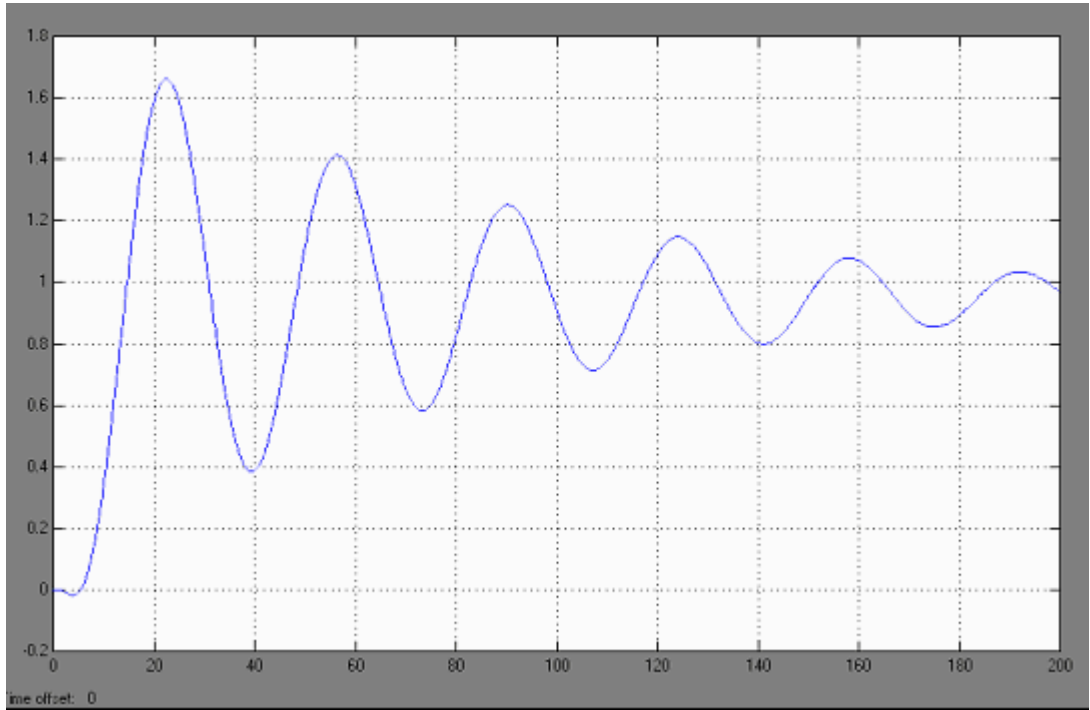


Şekil.5.16. Hidro-Türbin Hız Kontrolü Simülasyon Devresi

Giriş fonksiyonu olarak birim basamak fonksiyon uygulanmıştır. Kullanılan kazançlar deneme yanılma metoduyla belirlenmiştir. Bu koşullar altında çalıştırılan simülasyon devresi ile elde edilen çıkış şekil.5.17' de görülmektedir.



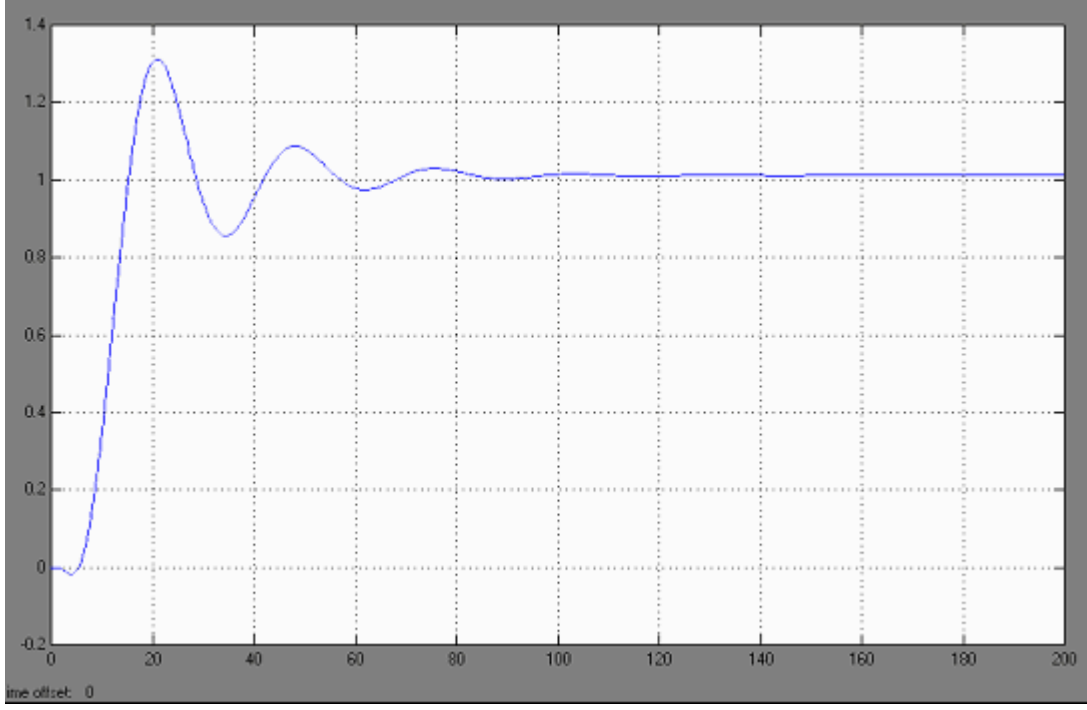
Şekil.5.17. Hidro-Türbin Hız Kontrol Çıkışı Sinyali



Şekil.5.18. Çıkış Kazancı Büyültüldüğünde Çıkış Sinyali

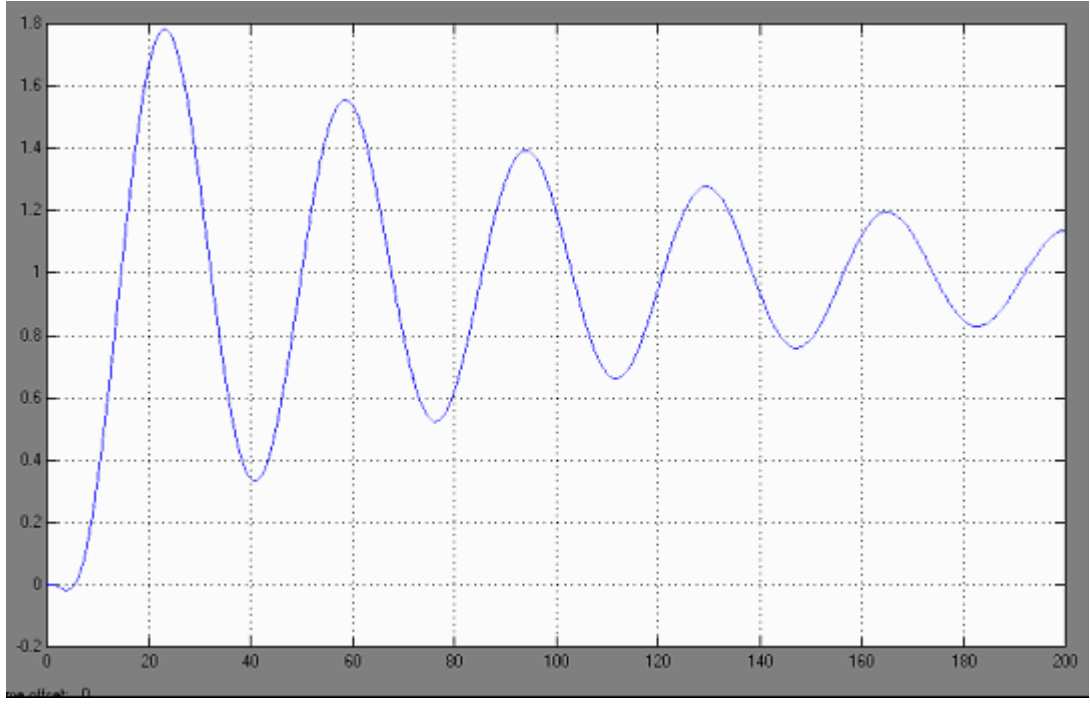
Deneme yanılma metodu ile ayarlanan sistem kazançlarında meydana gelecek değişikliklerin çıkış sinyaline etkileri şekil.5.18, şekil.5.19, şekil.5.20 ve şekil.5.21’ de görülmektedir. 1/18 olan çıkış kazancı büyültüldüğünde (1/10 olduğunda), elde edilen

sonuç şekil.5.18’ de verilmiştir. Çıkışta osilasyon meydana gelmekte ve kararsız bir hal almaktadır. Aynı kazanç küçültüldüğünde ($1/25$ olduğunda) ise, Sinyal daha kararlı bir hal almaktadır. Şekil.5.19, bu sinyali göstermektedir.

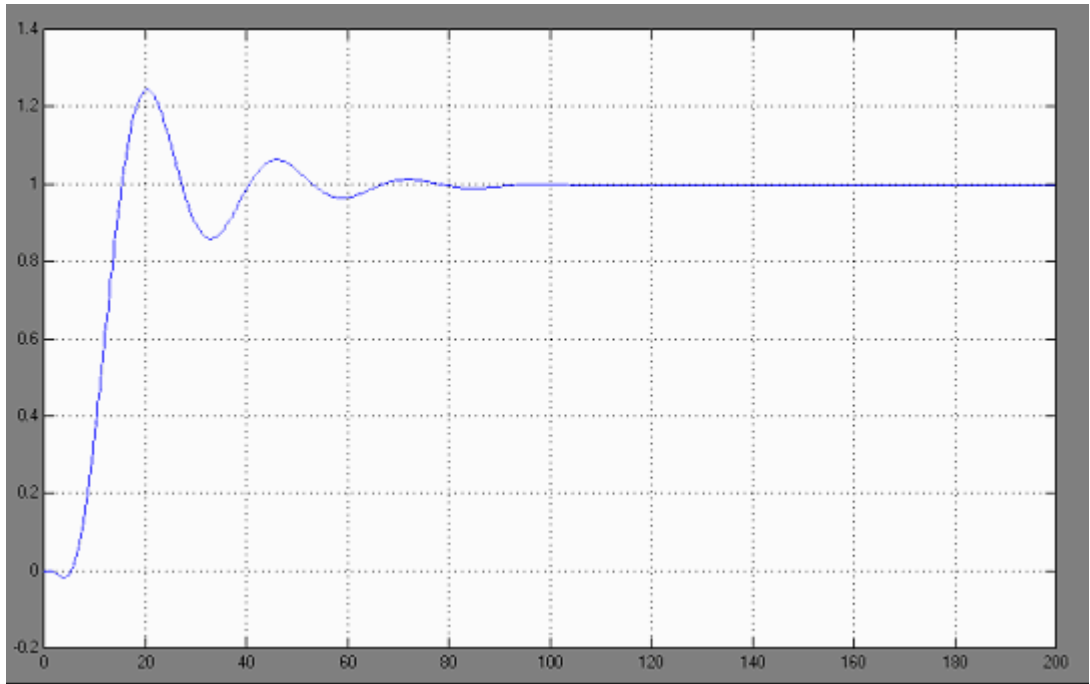


Şekil.5.19. Çıkış Kazancı Küçültüldüğünde Çıkış Sinyali

Benzer şekilde çıkış kazancı için yapılmış olan bu işlemler değeri 4 olan giriş kazancı içinde uygulanmıştır. Giriş kazancı büyütüldüğünde (8 olduğunda), oluşan çıkış sinyali şekil.5.20’ de görülmektedir. Sinyalde osilasyon meydana gelmiş ve kararsız bir hal almıştır. Giriş kazancı küçültüldüğünde (2 olduğunda) ise, sinyal daha kararlı bir hal almaktadır. Bu sinyal şekil.5.21’ de görülmektedir. Giriş kazancını değiştirmekle elde edilen kararlı durum, Çıkış kazancını değiştirmekle elde edilen kararlı duruma göre daha iyi bir performans vermektedir.



Şekil.5.20. Giriş Kazancı Büyültüldüğünde



Şekil.5.21. Giriş Kazancı Küçültüldüğünde

6. SONUÇLAR

Fuzzy kontrol ve sinir ağı ile kontrol tekniklerinin birleştirilmesi ile elde edilen bir Neuro-Fuzzy kontrol tekniği olan ANFIS, hidro-elektrik güç santraline hidro-türbin hız kontrolü için uygulandı.

Fuzzy kontrol tekniği, fuzzy küme teorisinden ve fuzzy çıkarım sistemlerinden elde edilmiş, başarılı bir kontrol tekniğidir. Bu tekniğe yapay sinir ağı ile kontrol tekniğinin yapay kontrol ve öğrenme kontrolü gibi özelliklerinin eklenmesiyle, bir Neuro-Fuzzy kontrol tekniği olan ANFIS kontrol tekniği elde edilmiştir.

ANFIS denetleyicilerin, sinir ağı ve/veya fuzzy denetleyicilere göre temel avantajları şunlardır.

- i) Sinir ağının izahı ve anlaşılması zor olan ağ yapısı kolaylaşır.
- ii) Fuzzy denetleyicinin düzenlenmesi esnasında oluşan problemler bertaraf edilir.
- iii) ANFIS denetleyici, kural sayısını ve üyelik fonksiyonlarını optimize ederek sistemin kontrol performansını artırır.
- iv) Sinir ağındaki bağlantı hatlarının geçici hafıza görevi yapması nedeniyle hafıza gereksinimlerini azaltır.
- v) Daha sağlam ve emniyetli olan ve geniş işlem koşulları altında bile iyi çalışabilen eğer-o halde(if-then) kuralları biçiminde fuzzy çözümler oluşturur.

Hidroelektrik güç santralinde, hidro-türbin hız kontrolü için ANFIS denetleyici kullanıldı. Bunun için hidro-türbin kontrol sistemi oluşturuldu ve bu sisteme uygun bir ANFIS denetleyici modeli eğitildi. Eğitilmiş ANFIS denetleyici ile hidro-türbin sisteminde başarılı bir hız kontrolü sağlanacağı gösterildi.

Bu uygulamada kural sayısı artırılarak daha hassas bir kontrol sağlanabilir. Bunun için giriş değişkenlerindeki üyelik fonksiyonu sayısını attırmak gerekir. Eğitim bölümünde yapılan bu değişikliğin uygulama bölümünde bir aksaklığa neden olmaması için, kontrol uygulamasında giriş ve çıkış kazançlarının tekrar ayarlanması gerekir. Üyelik fonksiyonu sayısının çok fazla olması da istenmeyen bir durumdur. Gereğinden fazla üyelik fonksiyonu sistemi yavaşlatır. Bu nedenle üyelik fonksiyonu için optimal bir sayı belirlenmelidir.

Bu uygulamada kullanılan kazançlar deneme yanılma metoduyla belirlenmiştir. Kazanç ayarlarıyla sistem cevabı arasında bir bağıntı olduğu görülmüştür. Konu ile ilgili başka kontrol uygulamalarında olduğu gibi bu sisteme kazanç ayarlama algoritması da dahil edilebilir. Bu durumda sistemin algoritması daha iyi bir hale getirilebilir. Ayrıca bilinen diğer kontrol teknikleri ile karşılaştırma yapılabilir.

Bu çalışmada simülasyon uygulaması yapılmıştır. Bir sonraki çalışma, bu sistemin algoritması kullanılarak gerçek bir sistem mikrodenetleyici ile çalıştırılabilir.

KAYNAKLAR

- [1] D.Nauck and R.Kruse, Neuro-Fuzzy Systems for Function Aproximation, Fuzzy Sets and Systems, 101 (1999) 261-271
- [2] Y. Wang and G. Rong, A selfOrganizing Neural-Network-Based Fuzzy System, Fuzzy Sets and Systems, 103 (1999) 1-11
- [3] J. Martens, G. Wets, J. Vanthienen and C.Mues, An Initial Comparison of a Fuzzy Neural Classifier and a Desicion Tree Based Classifier, Expert Systems with Applications, 15 (1998) 375-381
- [4] C. H. Lee and C. C. Teng, Tunning of PID Controllers for Unstable Processes Based on Gain and Phase Margin Specifications: a Fuzzy Neural Approach,Fuzzy Sets and Systems ,128 (2002) 95-106
- [5] T. Hiyama, M. Kugimiya and H. Satoh, Advanced PID Type Fuzzy Logic Power System Stabilizer, IEEE Transactions on Energy Conversion, 9:3 (1994) 514-520
- [6] D. Nauck and R. Kruse, Obtaining Interpretable Fuzzy Classification Rules from Medical Data, Artificial Intelligence in Medicine, 16 (1999) 149-169
- [7] D. D. Nauck, Fuzzy Data Analysis with NEFCLASS, International Journal of Approximate Reasoning, 32 (2003) 103-130
- [8] D. Nauck and R. Kruse , A Neuro uzzy Method to learn Fuzzy Classification Rules from Data, Fuzzy Sets and Systems, 89 (1997) 277-288
- [9] D. Zhang, Extended Neuro Fuzzy Models of the Multilayer Perceptrons, Fuzzy Sets and Systems, 142 (2004) 221-242
- [10] P. Melin and O. Castillo, Intelligent Control of a Stepping Motor Drive Using a Hybrid Neuro-Fuzzy Approach, Soft Computing , 8 (2004) 546-555
- [11] P. Melin and O. Castillo, Intelligent Control of a Stepping Motor Drive Using an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, Information Sciences , 170 (2005) 133-151
- [12] S. N. Engin, J. Kuvulmaz and V. E. Ömürlü, Fuzzy Control of an ANFIS model Representing a nonlinear liquid-level system, Neural Computing and Applications, (2004)
- [13] F. Jurado and J. R. Saenz, An Adaptive Control Scheme for Biomass-Based Diesel-Wind System, Renewable Energy,28 (2003) 45-57
- [14] F.Jurado, M. Ortega, A.Antonia and J. Carpio, Neuro-Fuzzy Controller for Gas Turbine in Biomass-Based Electric Power Plant, Electric Power Systems Research, 60 (2002) 123-135

- [15] K. H. Fasol, Stabilization and Re-engineering of a Hydro-electric Power Plant – A Case Study, *Control Eng. Practise*, 5:1 (1997) 109-115
- [16] H. Nilsson and L. Davidson, Validations of CFD Against Detailed Velocity and Pressure Measurements in Water Turbine Runner Flow, *Int. J. Numer. Meth. Fluids*, 41 (2003), 863-879
- [17] Ç. Elmas, *Bulanık Mantık Denetleyiciler*, Seçkin, Ankara, 2003, 23-50
- [18] C. T. Lin and G. Lee, Neural-Network-Based-Fuzzy Logic Control and Desicion System, *IEEE Transaction on Computers*, 40:12 (1991) 1320-1336
- [19] T. J. Ross, *Fuzzy Logic With Engineering Aplications*, McGraw Hill, New York, 1995
- [20] J. S. R. Jang and C. T. Sui, Neuro-Fuzzy Modeling and Control, *Proceeding of IEEE*, 83:3 (1995) 378-405
- [21] M. Ö. Efe ve O. Kaynak, *Yapay Sinir Ağları ve Uygulamaları*, Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul, 2000, 1-25
- [22] A. M. Ibrahim, *Introduction to applied Fuzzy Electronics*, Prentice Hall, New Jersey, 102-109
- [23] H. T. Nguyen, N. R. Prasad, C. L. Walker and E. A. Walker, *A First Course in Fuzzy and Neural Control*, Chapman and Hall/CRC, London, 2003
- [24] H. M. Lee and B. H. Lu, A Neural-Network Model with Fuzzy Inference, *IEEE*, (1994) 1583-1588
- [25] J. S. R. Jang, ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System, *IEEE Transactions on Syatems*, 23:3 (1993) 665-685
- [26] İ. Eker, Governors for Hydro-Turbine Speed Control in Power Generation: A SIMO Robust Design Approach, *Energy Conversion and Management*, 45 (2005) 2207-2221
- [27] S. P. Mansoor, D. I. Jones, D. A. Bradley, F. C. Aris and G. R. Jones, Reproducing Osicilatory Behaviour of a Hydroelectric Power Station by Computer Simulation, *Control Engineering Practise*, 8 (2000) 1261-1272
- [28] M. Djukanovic, M. Novicevic, Dj. Dobrijevic, B. Babic, D. J. Sobajic, Y. H. Pao, Neural-Net Based Coordinated Stabilizing Control for the Exciter and Governor Loops of Head Hydropower Plants, *IEEE Transaction Energy Conversion*, 10:4 (1995) 760-767

[29] M. B. Djukanovic, M. S. Calovic, B. V. Vesovic, D. J. Sobajic, Neuro-Fuzzy Controller of Low Head Hydropower Plants Using Adaptive-Network Based Fuzzy Inference System, IEEE Transaction on Energy Conversion, 12:4 (1997) 375-381

ÖZGEÇMİŞ

03.10.1980 tarihinde Ankara’da dünyaya geldi. İlkokula Ankara’da başladı. Malatya kampus ilkokulunda, orta okulu Malatya Atatürk ortaokulunda, liseyi Turgut Özal Anadolu lisesinde tamamladı. 1998’ de girdiği İnönü Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Elektronik Mühendisliği bölümünden 2002 yılında fakülte ikincisi olarak mezun oldu. Halen Malatya’da özel bir kuruluşta elektrik elektronik mühendisi olarak çalışmaktadır.