T.C.
İSTANBUL ÜNİVERSİTESİ-CERRAHPAŞA
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MODERN KONTROL YÖNTEMLERİNİN ENERJİ ÜRETİM SANTRALLERİNDE UYGULANMASI

Rahma TABAKH

DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Hasan TİRYAKİ

II. DANIŞMAN
Dr. Öğr. Üyesi Nevra BAYHAN

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programı

İSTANBUL 2020

Bu çalışma, 29.06.2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Programında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Dr. Öğr. Üyesi Hasan TİRYAKİİ(Danışman)
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi Rana ORTAÇ KABAOĞLU
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşasi
Mühendislik Fakültesi

Dr. Öğr. Üyesi İbrahim EKE
Kırıkkale Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

Doç. Dr. Yasin ÖZÇELEP
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşasi
Mühendislik Fakültesi

Prof. Dr. Ertuğrul ÇAM
Kırıkkale Üniversitesi
Mühendislik Fakültesi

20.04.2016 tarihli Resmi Gazete'de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince; Bu Lisansüstü teze, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa'nın abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün belirlemiş olduğu ölçütlere uygun rapor alınmıştır.

Bu tez, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Bilimsel Araştırma Projeleri Yürütücü Sekreterliğinin ..... numaralı projesi ile desteklenmiştir.
Bu tez, ... numaralı ..... projesi ile desteklenmiştir.

ÖNSÖZ

Eğitim hayatım boyunca eksiğini hisstermeyen sevgili babam Rachid TABAKH'a, ve beni çalışmaya teşvik etmeyi bırakmayan sevgili annem Rafika Ben Hmiden'e, kardeşlerim Yosra, Takoua, Ahmed Abd Rahim, Mohamed ANAS ve tüm aileme ve bu günlere gelmeme yardım eden herkese bu çalışmamı adıyorum.

Her şeyden önce, bu tez çalışmasını, her zaman bana gösterdiği güvenini tamamlamama yardımcı olan bilgeliği, cömertliği ve sonsuz sabrı nedeniyle tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Hasan TİRYAKİ 'ya yürekten teşekkür etmekle başlamak istiyorum. Tez çalışmam boyunca değerli bilgileriyle öncülük ettiği, cesareti ve yardımseverliği icin sonsuz teşekkürlerimi sunuyorum. Ayrıca bana yardım ve rehberlik eden değerli Dr. Öğr. Üyesi Nevra BAYHAN'a da teşekkürlerimi sunuyorum.

Bu araştırmanın başarısına katkıda bulunan sevgili dostlarım, Ali Musab, Kaancan, Ece ve Sultan'a sürekli destekleri ve yapıcı önerileri için şükranlarımı sunuyorum.

Ayrıca lisansüstü çalışmalarda ilerleme ve en üst düzey bilimsel araştırmalara erişim için en iyi koşulları hazırlayan İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Mühendislik Fakültesi ve Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü yetkililerine teşekkür ediyorum. Ayrıca bana tüm bu olanakları sağlayan Turkiye Cumhuriyeti'ne sonsuz teşekkürlerimi sunuyor, bilim, bilgi ve medeniyet alanında dünyanın en önde gelen ülkesi olmasını temenni ediyorum.

Haziran 2020 Rahma TABAKH

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ ..... **iv**
İÇİNDEKİLER ..... **v**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **vii**
TABLO LİSTESİ ..... **x**
SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ ..... **xi**
ÖZET ..... **xv**
SUMMARY ..... **xvii**
1. GİRİŞ **1**
2. GENEL KISIMLAR **4**
3. MALZEME VE YÖNTEM **9**
3.1. MATEMATİKSEL MODELLER 9
3.1.1. Hidroelektrik Santralin Modellenmesi 9
3.1.1.1. Jeneratör Mekanik Modeli *9*
3.1.1.2. Türbin Modeli *12*
3.1.2. Doğal Gaz / Fuel-Oil Türbini Santralinin Modellenmesi 13
3.1.2.1. Türbin ve Bağlantılı Sistemlerin Modellenmesi *13*
3.1.2.2. Jenerator için Genelleştirilmiş Basit Matematiksel Model *20*
3.2. KONTROL YÖNTEMLERİ 25
3.2.1. Klasik Kontrol Yöntemleri 26
3.2.1.1. Sistemin Cevap Eğrisi Yöntemi *26*
3.2.1.2. PID Kontrolör *27*
3.2.1.3. PI Kontrolör *29*
3.2.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması 30
3.2.2.1. Başlangıç Gıda Kaynaklarının Üretilmesi *32*
3.2.2.2. İşçi Arılar Aşaması *32*
3.2.2.3. Gözcü Arılar Aşaması *33*
3.2.2.4. İzci Arılar Aşaması *34*
3.2.2.5. YAK'nın Algoritması *34*
3.2.3. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu 36
3.2.3.1. PSO Algoritması *36*

3.2.3.2. PSO'nun Geometrik Gösterimi *42*
3.2.4. Karınca Kolonisi Optimizasyonu 44
3.2.4.1. Karınca Sistemi *45*
3.2.4.2. Karınca Koloni Sistemi *47*
3.2.4.3. Maksimum Minimum Karınca Sistemi *47*
3.2.5. Bulanık Mantık Kontrolör 49
3.2.5.1. Bulanık Mantık Sistemi *49*
3.2.5.2. Parametreleri Bulanık Mantık İle Belirlenen PI Kontrolör *52*
3.2.6. Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi 53
3.2.6.1. Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemin Yapısı *53*
3.2.6.2. Hibrit Öğrenme Algoritması *56*
3.2.6.3. Geri Yayılım Algoritması *57*
4. BULGULAR **59**
4.1. SİMÜLASYON MODELLERİ 59
4.1.1. Hidroelektrik Santrali için Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi 59
4.1.1.1. Hidroelektrik Santral için PI ve PID Kontrolör *59*
4.1.1.2. Hidroelektrik Santral için FGPI Kontrolör *59*
4.1.1.3. Hidroelektrik Santral için ANFIS-PI Kontrolör *62*
4.1.1.4. Hidroelektrik Santral için ANFIS-PID Kontrolör *68*
4.1.2. Doğal Gaz Türbini Santralinin Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi 73
4.1.2.1. Doğal Gaz Türbini Santrali için PI ve KKO-PI Kontrolör *73*
4.1.2.2. Doğal Gaz Türbini Santrali için FGPI Kontrolör *74*
4.1.2.3. Doğal Gaz Türbini Santrali için ANFIS-PI Kontrolör *75*
4.1.3. Fuel-Oil Santralinin Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi 79
4.1.3.1. Fuel-Oil Santrali için PI, YAK-PI, PSO-PI ve KKO-PI Kontrolör *79*
4.1.3.2. Fuel-Oil Santrali için ANFIS-PI Kontrolör *80*
4.2. SİMÜLASYON SONUÇLARİ 83
5. TARTIŞMA VE SONUÇ **95**
KAYNAKLAR **98**
ÖZGEÇMİŞ **109**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 3.1: Açısal hız ve güç farkı arasındaki transfer fonksiyonuna ait blok diyagram. 11

Şekil 3.2: Açısal hız, güç farkı ve yük arasındaki transfer fonksiyonuna ait blok diyagram. 12

Şekil 3.3: Basit Doğal Gaz / Fuel-Oil türbini [54]. 14

Şekil 3.4: Doğal Gaz / Fuel-Oil türbini Brayton çevrimi [55].....15

Şekil 3.5: Carnot ve Brayton döngüleri verimliliklerinin karşılaştırılması [55].....16

Şekil 3.6: Yanma odasının prensip şeması. 17

Şekil 3.7: Basitleştirilmiş doğal gaz / fuel-oil türbini modeli. 19

Şekil 3.8: Türbin jeneratör sisteminin fiziksel modeli. 21

Şekil 3.9: Türbin jeneratör sisteminin basitleştirilmiş blok diyagramı. 23

Şekil 3.10: Dönen yük ve kütlenin blok diyagramı. 24

Şekil 3.11: Frekans değişimi çıkışlı jeneratör modeli. 24

Şekil 3.12: Sadeleştirilmiş jeneratör modeli. 25

Şekil 3.13: Sistemin cevap eğrisi metodu için kullanılan parametreler. 26

Şekil 3.14: Kapalı çevrim Klasik dinamik kontrolör sistemi. 27

Şekil 3.15: PID kontrolörün blok diyagrami. 29

Şekil 3.16: PI kontrolörün blok diyagrami. 30

Şekil 3.17: Basitleştirilmiş yem arama mekanizması. 31

Şekil 3.18: Yapay arı kolonisi akış diyagramı. 35

Şekil 3.19: $Gbest$ akış diyagramı. 39

Şekil 3.20: $Lbest$akış diyagramı. 41

Şekil 3.21: İki boyutlu bir arama alanındaki parçacık için konum ve hız güncellemesi. 42

Şekil 3.22: PSO algoritmasının akış diyagramı. 43

Şekil 3.23: Feromon bazlı stokastik mekanizma. 44

Şekil 3.24: Karınca kolonisi optimizasyonun çalışma mekanizması. 45

Şekil 3.25:Karınca Koloni Optimizasyonun akış diyagramı. 48

Şekil 3.26: Bulanık kontrolörünün yapısı. 49

Şekil 3.27: FGPI kontrolörün akış şeması. 52

Şekil 3.28:Uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık çıkarım sistem yapısı. 54

Şekil 3.29: ANFIS'in akış diagramı. 58

Şekil 4.1:FGPI kontrolörün uygulama blok diyagramı. 60

Şekil 4.2: FGPI kontrolörün Hidroelektrik için giriş ve çıkışlarına ait üyelik fonksiyonları; (a) e girişi, (b) de girişi, (c) KI çıkışı, (d) KP çıkışı. 61

Şekil 4.3: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PI kontrolünün blok diyagramı. 63

Şekil 4.4:ANFIS-PI kontrolör için veri toplama sistemi. 64

Şekil 4.5: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_P girişi. 65

Şekil 4.6: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_I girişi. 65

Şekil 4.7:Çıkış kontrolör sinyali. 66

Şekil 4.8:Hidroelektrik santral için ANFIS-PI eğitim hatası. 67

Şekil 4.9: Hidroelektrik santral için ANFIS-PI doğrulama hatası. 68

Şekil 4.10: Hidroelektrik santral için ANFIS-PID kontrolünün blok diyagramı. 69

Şekil 4.11:ANFIS-PID kontrolör için veri toplama sistemi. 69

Şekil 4.12: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PID kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_P girişi. 70

Şekil 4.13: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PID kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_I girişi. 70

Şekil 4.14: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PID kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_D girişi. 71

Şekil 4.15:Çıkış kontrolör sinyali. 71

Şekil 4.16: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PID eğitim hatası. 72

Şekil 4.17: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PID doğrulama hatası. 73

Şekil 4.18:FGPI kontrolörün Doğal Gaz için giriş ve çıkışlarına ait üyelik fonksiyonları; (a) e girişi, (b) de girişi, (c) K_I çıkışı, (d) K_P çıkışı. 74

Şekil 4.19: Doğal Gaz Türbini santrali için ANFIS-PI kontrolünün blok diyagramı. 76

Şekil 4.20: Doğal Gaz Türbini santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_P girişi. 76

Şekil 4.21: Doğal Gaz Türbini santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_I girişi. 77

Şekil 4.22:Çıkış-Kontrolör sinyali. 77

Şekil 4.23: Doğal Gaz Türbin santrali için ANFIS-PI eğitim hatası. 78

Şekil 4.24: Doğal Gaz Türbin santrali için ANFIS-PI doğrulama hatası. 79

Şekil 4.25:Fuel-Oil santrali için ANFIS-PI kontrolünün blok diyagramı. 80

Şekil 4.26:Fuel-Oil santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_P girişi. 81

Şekil 4.27:Fuel-Oil santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_I girişi. 81

Şekil 4.28: Çıkış-Kontrolör sinyali. 81

Şekil 4.29:Fuel-Oil santrali için ANFIS-PI eğitim hatası. 82

Şekil 4.30:Fuel-Oil santrali için ANFIS-PI doğrulama hatası. 83

Şekil 4.31: Hidroelektrik santrali simülasyon sonuçları. 84

Şekil 4.32: Hidroelektrik santrali simülasyon sonuçları grafiğinin yakınlaştırılmış grafiği. 85

Şekil 4.33:Doğal Gaz türbini santrali simülasyon sonuçları. 87

Şekil 4.34: Doğal Gaz türbini santrali yakınlaştırılmış pozitif kısım simülasyon sonuçları. 88

Şekil 4.35: Doğal gaz türbini santrali yakınlaştırılmış negatif kısım simülasyon sonuçları. 89

Şekil 4.36: Fuel-Oil santrali Simülasyon Sonuçları. 91

Şekil 4.37: Fuel-Oil santrali yakınlaştırılmış pozitif kısım simülasyon sonuçları. 92

Şekil 4.38: Fuel-Oil santrali yakınlaştırılmış pozitif kısım simülasyon sonuçları. 93

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 3.1:Basitleştirilmiş Doğal Gaz türbini Parametre Değerleri [57]. 20

Tablo 3.2: Basitleştirilmiş Fuel-Oil Türbini Parametre Değerleri [57]. 20

Tablo 3.3: Jeneratör basitleştirilmiş parametre değerleri. 25

Tablo 3.4: PI ve PID kontrolör parametreleri için hesaplama tablosu. 27

Tablo 3.5: Standart Yapay Arı Kolonisi algoritması. 36

Tablo 3.6: ANFIS çıkarım sistem yapısının farklı katmanları. 56

Tablo 4.1:Hidroelektrik santral için kullanılan kontrolör parametreleri. 59

Tablo 4.2: Hidroelektrik santral için K_p parametrelerinin kuralları. 62

Tablo 4.3: Hidroelektrik santral için K_I parametrelerinin kuralları. 62

Tablo 4.4: Doğal Gaz Türbini Santrali için kontrolör parametreleri. 74

Tablo 4.5: Doğal Gaz Türbini santrali için K_P parametrelerinin kuralları. 75

Tablo 4.6: Doğal Gaz Türbini santrali için K_I parametrelerinin kuralları. 75

Tablo 4.7:Fuel-Oil Santrali için kontrolör parametreleri. 80

Tablo 4.8:Hidroelektrik santral simülasyonu sonuçlarının karşılaştırılması. 86

Tablo 4.9: Doğal Gaz türbini santrali simülasyonu pozitif kısım sonuçlarının karşılaştırılması 90

Tablo 4.10: Doğal Gaz türbini santrali simülasyonu negatif kısım sonuçlarının karşılaştırılması 90

Tablo 4.11:Fuel-Oil santrali simülasyonu pozitif kısım sonuçlarının karşılaştırılması 94

Tablo 4.12:Fuel-Oil santrali simülasyonu negatif kısım sonuçlarının karşılaştırılması. 94

SİMGE VE KISALTMA LİSTESİ

Simgeler	Açıklama
a	: Yakıcı sistemi kazanım sabiti
b	: Yakıcı sistemi zaman sabiti
c	: Pozitif hızlanma sabiti
c	: Üyelik Fonksiyonun merkezi
D	: Sönüm sabiti
d_i	: i. istenilen çıkış vektörü bileşeni
e	: Hata
f_1	: Nominal güç çıkışında frekans
f_2	: Yük olmayan durumda frekans
G	: Dağıtıcının pozisyonu
G_{best}	: j boyutunda t zamanına göre partikül i'in küresel en iyi pozisyonu
J	: Türbin ve jeneratör toplam eylemsizlik momenti
K_D	: Türev kazancı
K_d	: Hız regülatörü kazancı
K_I	: İntegral kazancı
K_P	: Oransal kazanç
K_s	: Sistem kazancı
L_k	: Karınca k tarafından atılan turun uzunluğu
L_{best}	: En iyi karıncanın tur uzunluğu
M	: Jeneratör zaman (gecikme) sabiti
m	: Karınca Sayısı
n	: Giriş sayısı
N(L)	: İlgili katmandaki yapay sinir hücresi sayısı
$N(s^p)$	: Mümkün elemanlar kümesi
O_i^1	: Birinci katman
O_i^2	: İkinci Katman
O_i^3	: Üçüncü katman
O_i^4	: Dördüncü katman
O_i^5	: Beşinci katman
P	: Kazandaki buharın basıncı

$\mathbf{p}$: Bulanık giriş altküme sayısı

$\mathbf{P_0}$: Nominal basınç

$\mathbf{P_{best,i}^t}$: j boyutundaki t parçacığının kişisel zaman içindeki en iyi konumu

$\mathbf{P_{jn}}$: Jeneratör biriminin nominal etken çıkış gücü

$\mathbf{P_m}$: Mekanik türbin gücü

$\mathbf{R}$: Hız regülatör sabiti

$\mathbf{t}$: Zaman

$\mathbf{T_a}$: İvmelendirme torku

$\mathbf{T_d}$: Ölü zaman gecikmesi

$\mathbf{T_e}$: Elektromanyetik tork

$\mathbf{T_{e0}}$: Elektriksel tork

$\mathbf{T_FOT}$: Türbin dinamik karakteristiklerine ilişik zaman sabiti

$\mathbf{T_GT}$: Türbin dinamik karakteristiklerine ilişkili zaman sabiti

$\mathbf{T_K}$: Kuvvenlendirme zaman sabit

$\mathbf{T_{m0}}$: Mekanik tork

$\mathbf{T_m}$: Mekanik tork

$\mathbf{T_s}$: Sistemin zaman sabiti

$\mathbf{T_w}$: Sabit su zamanı

$\mathbf{T_Y}$: Yanma odası zaman sabiti

$\mathbf{v_{ij}^t}$: t zamanında j boyutundaki partikül i'in hız vektörü

$\mathbf{w_0}$: Açısal hızın ilk değeri

$\mathbf{x}$: Giriş değişkeni

$\mathbf{X}$: Hız regülatörü birincil zaman sabiti

$\mathbf{x_{ij}^t}$: t zamanında j boyutundaki konum vektörü veya i parçacığı

$\mathbf{X_{L,i}}$: i. ANFIS çıkış vektörü

$\mathbf{x_{minj}}$: j 'nin alt sınır

$\mathbf{x_{maxj}}$: j 'nin üst sınır

$\mathbf{Y}$: Hız regülatörü ikincil zaman sabiti

$\boldsymbol{\tau_0}$: Feromonun başlangıç değeri

$\boldsymbol{\tau_i}$: İntegral zamanı

$\boldsymbol{\tau_d}$: Türev zamanı

$\boldsymbol{\tau_{max}}$: Üst sınır

$\boldsymbol{\tau_{min}}$: Alt sınır

$\Delta\boldsymbol{\tau_{ij}^k}$: Karınca k tarafından kenara (i, j) salgılanan feromon miktarı

φ : Feromon bozulma katsayısı

σ : Üyelik Fonksiyonun genişliği

δ_0 : Faz açısının ilk değeri

δ_m : Rotorun mekanik tork açısı

ρ : Buharlaşma Oranı

ω : Atalet Katsayısı

Kısaltmalar	**Açıklama**
ANFIS	: Adaptive neuro-fuzzy inference system
ANFIS-PI	: Adaptive neuro-fuzzy inference system yöntemiyle optimize edilmiş PI kontrolör
ANFIS-PID	: Adaptive neuro-fuzzy inference system yöntemiyle optimize edilmiş PID kontrolör
DOF	: Degree of Freedom
DFIG	: Doubly fed induction generator
FFOPID	: Fuzzy fractional order PID controller
FOPID	: Fractional order PID controller
FGPI	: Fuzzy Gain Scheduled PI controller
FOTS	: Fuel-oil türbini santrali
GA	: Genetik algoritma
GTS	: KiloHertz
KKO	: Karınca kolonisi optimizasyonu
KKO-PI	: Karınca kolonisi optimizasyonu yöntemiyle optimize edilmiş PI kontrolör
km	: kilometer
KS	: Karınca sistemi
kV	: kilovolt
hz	: Hertz
MW	: Mega Watt
NB	: Negatif büyük
NFS	: Neural fuzzy system
NK	: Negatif küçük
NO	: Negatif orta
PI	: Proportional-Integral Controller
PID	: Proportional-Integral-Derivative Controller

PB	: Positif büyük
PK	: Positif küçük
PO	: Positif orta
PSO	: Parçacık Sürüsü Optimizasyonu
PSO-PI	: Parametreleri Parçacık Sürüsü Optimizasyonu yöntemiyle optimize edilmiş PI kontrolör
S	: Sıfır
SN	: Besin kaynaklar
sn	: Saniye
SNN	: Spiking neurak network
YAK	: Yapay Arı Kolonisi
YAK-PI	: Parametreleri Yapay Arı Kolonisi yöntemiyle optimize edilmiş PI kontrolör

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

MODERN KONTROL YÖNTEMLERİNİN ENERJI ÜRETİM SANTRALLERİNDE UYGULANMASI

Rahma TABAKH

İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Hasan TİRYAKİ

II. Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Nevra BAYHAN

Türkiye'de enerji üretim santrallerinin çoğunda halen konvansiyonel kontrol yöntemleri kullanılmaktadır. Ancak santrallerin çalışma zamanlarının çok olmasının sonucu olarak bahsi geçen konvansiyonel kontrol yöntemleri santrallerin sürekli değişen dinamiklerine yeterli cevabı sağlayamamaktadır. Bu sebeple günümüz teknolojisi için büyük önem arz eden enerji üretim santralleri için modern kontrol yöntemlerinin kullanılması elzemdir.

Bu amaçla bu tez çalışmasında; bir Hidroelektrik Santrali, bir Doğal Gaz Türbini Santrali ve bir Fuel-Oil Türbini Santrali için modelleme yapılmıştır. Ardından söz konusu santrallerin kontrolü için konvansiyonel kontrol yöntemlerinden Proportional-Integral PI, Proportional-Integral-Derivative PID kontrolörlerin yanı sıra Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Karınca Kolonisi Optimizasyonu ve Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu yöntemleriyle optimize edilmiş PI kontrolör, Bulanık Mantık Denetleyici, Bulanık Mantık-PI Denetleyici ve Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi gibi en uygun modern kontrol yöntemleri kullanılarak karşılaştırmalı bir şekilde uygulanmıştır.

Elde edilen simülasyon sonuçları, çalışılan tüm santrallerde Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sisteminin doğruluğunu ve kullanışlılığını göstermiştir. Ayrıca Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sisteminin diğer kontrolörler arasında en az oturma zamanı verdiği görülmüştür. Sonuç olarak,

enerji üretim sektörü için modern kontrol yöntemlerinden Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi bir çözüm olarak sunulmuştur.

Haziran 2020, 109 sayfa.

Anahtar kelimeler: ANFIS, FGPI, KKO, PSO, YAK, Aktif Güç-Frekans Kontrolü, Elektrik Üretim Santrallerinin Modellenmesi, Modern Kontrol ve Optimizasyon Yöntemleri

SUMMARY

M.Sc. THESIS

APPLICATION OF MODERN CONTROL METHODS IN POWER PLANTS

Rahma TABAKH

Istanbul University-Cerrahpasa

Institute of Graduate Studies

Department of Electrical and Electronic Engineering

Supervisor : Assist. Prof. Dr. Hasan TİRYAKİ

Co-Supervisor : Assist. Prof. Dr. Nevra BAYHAN

Conventional control methods are still used in the majority of power plants in Turkey. However, as a result of the high operating times of the plants, the conventional control methods mentioned cannot provide sufficient response to the constantly changing dynamics of the plants. For this reason, it is essential to use modern control methods for power plants, which are of great importance for today's technology.

For this purpose, in this thesis study; Hydroelectric Power Plant, Fuel Oil Power Plant and Natural Gas Turbine Power Plant, are modelled and performed for active power control.

Thereafter, by obtaining the mathematical model of the power plant for active power control, a conventional control methods Proportional-Integral (PI), Proportional-Integral-Derivative (PID) controllers, as well as Particle Swarm Optimization (PSO), Ant Colony Optimization (KKO) and Artificial Bee Colony optimization (YAK) methods based on PI controller , also Fuzzy Logic Controller based on PI (FGPI) and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System are applied comparatively using the most appropriate modern control.

The simulation results obtained have demonstrated the accuracy and the usefulness of ANFIS controller for active power frequency control in all the proposed power plants. As it is seen from the results that ANFIS gives a settling time least among all the other controllers.

Research results also show that ANFIS gives the least sitting time among other controllers. Thus, a new perspective was brought to our country and the world for the energy production sector, and the best solution was offered in the interconnected system.

June 2020, 109 pages.

Keywords: ANFIS, FGPI, ACO, PSO, ABC, Active Power-Frequency Control, Modeling of Electricity Generation Plants, Modern Control and Optimization Methods

1. GİRİŞ

Yirmi birinci yüzyılın başından itibaren toplumlar yoğun bir enerji ihtiyacı ile karşı karşıya kalmıştır. Enerji tüketimindeki payı sürekli yükselen elektrik enerjisine yönelik talep, küresel ekonomik büyümeye paralel olarak geleceğin enerjisi olma yolunda hızla ilerlemektedir. Yıllık enerji ihtiyacı her 10 senede bir iki katına çıkan Türkiye [1], konvansiyonel kontrol yöntemleriyle kontrol edilen hidroelektrik, doğal gaz türbini ve fuel-oil türbini santralleri gibi çeşitli enerji üretim santrallerine sahiptir. Bu tezin amacı bugün ve gelecekte, değişen dinamiklere uyumluluğun arttırılabilmesi için enerji üretim santrallerinde modern kontrol yöntemlerinin uygulanmasıdır.

Artan ihtiyaç ve değişken enerji talebi ile birlikte, Türkiye elektrik kurulu gücünün yaklaşık %60'ını oluşturan hidroelektrik, doğal gaz türbini ve fuel-oil türbini santrallerinin doğru teknolojiler ile maksimum düzeyde kullanılması enerji kalitesi ve güvenliği açısından kritik öneme sahiptir [2].

Türkiye'nin elektrik üretiminde önemli bir payı olan doğal gaz santralleri ve ekonomik olarak yapılabilir potansiyelinin %70'ten fazlası tamamlanmış hidroelektrik santrallerin [3], değişken üretim özellikli karma enerji santralleriyle uyumluluğu da göz önünde bulundurularak, modern kontrol yöntemleri MATLAB/Simulink ile karşılaştırmalı olarak uygulanmıştır.

Bir asırdan daha önceki keşfinden bu yana dünyanın parlayan yıldızı olan elektrik enerjisi, tüm enerji çeşitlerinden farklı yöntemlerle elde edilebilmektedir. Bu özelliği sayesinde en güvenilir ve evrendeki en üstün enerji formu olarak yüzyıllarca parlamaya devam etmesi beklenmektedir. German Advisory Council on Global Change tarafından dünya enerji potansiyeli grafiği 2003'te yayınlanmıştır. Yapılan hesaplamalara göre tüm hidroelektrik potansiyelinden 200 kat daha fazla rüzgâr ve 2850 kat daha fazla güneş enerjisi potansiyeli bulunmaktadır. Tüm yenilenebilir enerji kaynaklarının mevcut küresel enerji ihtiyacının 3078 katı olması küresel enerji üretim santrallerinin bu yöne hareket edeceğinin işaretçisi olmaktadır [4].

Dünya Barajlar Komisyonu'nun [5] yayınladığı final raporunda ise bazı büyük barajlı hidroelektrik santrallerin termik santraller kadar sera gazı salınımında bulunduğu ortaya konulmaktadır. Bu nedenle daha sürdürülebilir olan Pompaj Depolamalı Rüzgâr Santralleri

şebeke düzenleme ve pik yüklere cevap verebilme özellikleri sayesinde ön plana çıkmaya başlamıştır. Bu yöntemle ekstra esneklik için herhangi bir zamanda talep edilen enerji rezervi olan bir santral sağlanabilmektedir [6].

World Energy Council Dünya Enerji Görünümü Raporu [7] da elektrik şebekeleri için yeni parolanın esneklik olduğunu belirtmiştir. Türkiye'nin esneklik planları incelendiğinde gerekli çalışmaların başlatıldığı görülmektedir. İngiltere Ulusal Şebekesi'nde pilot proje olarak çalıştırılan ve milisaniyeler içerisinde frekans düzenleme ile yedek güç desteği verebilen Demand Response Module [8] projesi, yapımı devam eden batarya üretim tesisi [9] ile 2019 yılında yayınlanan Elektrik Depolama Faaliyetleri Yönetmeliği Taslağı [10] mühendislik çalışmaları ile tedarik ve altyapının hazırlandığına işaret etmektedir.

Uluslararası Enerji Ajansı verilerine göre enerji depolama yatırımlarının şebeke ve sayaç sonrasında yalnızca 2018 yılında %45 artarak 4 milyar ABD Dolarının üzerine çıktığını raporlamıştır [11]. Dünya Enerji Konseyi'de depolama çözümlerinin 2023 yılına kadar endüstrinin ve ulaşımın düşük maliyetli bataryalar ile dönüşümü ivmelendireceğine atıfta bulunmaktadır [12].

Türkiye'nin doğalgazdan elektrik üretimi düşerken 81 iline yayılmış [13] boru hatları 3 seviyeli talep yanıt sistemlerine entegre edilerek kullanılabilme potansiyeli barındırmaktadır. Bu nedenle geleceğin enerji sistemlerinde anahtar esneklik üzerine kurulu olacaktır.

Bir Rüzgar çiftliğinde yapay sinir ağlarıyla kısa süreli elektrik üretim tahmininde meteorolojik verilere eklenen %20 rastgele hatanın bile tahmin sonuçları üzerinde en fazla %2,69 oranında bir ortalama hata artışına neden olduğu görülmüştür [14]. Türkiye'nin kısa dönem elektrik yük tahmini üzerine yapılan başka bir çalışma [15] Adaptif Nöro-Bulanık Çıkarım Sistemi (ANFIS) metodunun yapay sinir ağlarının öğrenme yeteneğiyle, bulanık mantığın birleşiminden oluşmasının daha düşük hata oranına sahip olduğunu göstermektedir.

Uzun vadeli gelecekte Fransa'nın Linky [16] akıllı sayaçları gibi çözüm yöntemleriyle mikro-şebeke ölçeğinde tüketim kontrolü yapılabilir. Hidrojen yakıtlı araçların artmasıyla kurulacak hidrojen üretim istasyonları fazla yükü hidrojene çevirebilme potansiyeline sahiptir. Başka bir ifadeyle sistem dengesini sağlamak için elimizde potansiyel bir çok enstrüman bulunmaktadır [17].

Modern toplumlar için elektrik güvenliği ve esnek enerji sistemlerinin yaşamın temel taşı olduğu bu dönemlerde ANFIS kontrolünün konvansiyonel ve değişken üretimli santrallerin olduğu enterkonnekte sistemde en düşük hata payına sahip olması en iyi çözümü sunmaktadır. Bu çalışmada incelenen hidroelektrik, doğal gaz türbini ve fuel-oil türbini santrallerinin ANFIS-PI kontrolü ile diğer yöntemlerden çok daha iyi sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır.

Yapmış olduğum bu tez çalışması dört bölümden oluşmaktadır. Bu bölümlerde bahsedilen konular kısaca şu şekildedir;

İkinci bölümde, genel kısımlar başlığı altında literatür taraması yapılmıştır. Enerji üretim santrali ve kontrol yöntemleri hakkında önceden yapılmış çalışmalar detaylı olarak incelenmiştir.

Üçüncü bölümde, yöntem ve malzeme başlığı altında, hidroelektrik, doğal gaz türbini ve fuel-oil türbini santralleriyle ilgili matematiksel modeller incelenmiş, kullanılan kontrol yöntemleri tek tek açıklanmıştır.

Dördüncü bölümde, bulgular başlığı altında, simülasyon modellerinde kullanılan parametreler belirlenmiş, simülasyon sonuçları tablolar ve grafikler şeklinde karşılaştırılmıştır.

Beşinci bölümde, tartışma ve sonuç başlığı altında, elde edilen sonuçlar karşılaştırılmış ve yorumlanmıştır.

2. GENEL KISIMLAR

Dong Hwa ve arkadaşları 2004 yılında yaptıkları çalışmada, Kore'deki Gun-san gaz türbininin çalışma verilerinden transfer fonksitonunun elde edilmesini incelemişler, ağ dosya sistemi (NFS) tarafından yeni bir iki-dereceli özgürlük (2-DOF) PID kontrol ayarlaması Guns-san gaz türbininin değişken çeşitliliğine optimum kontrol tasarlamışlardır. ANFIS tabanlı kontrol yöntemi değişkenlerin sürekli değiştiği santral için etkili olmuştur. NFS yöntemiyle elde edilen sonucun geleneksel PID veya 2-DOF PID kontrolünden daha iyi bir sonuç olduğunu göstermişlerdir [18].

M. Mordjaoui ve B. Boudjema tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada, sunulduğu üzere ANFIS yaklaşımının haftalık yük tahminini doğru bir şekilde tahmin edebildiği gibi güç dalgalanmalarındaki hızlı değişimlerden de etkilenmediğini göstermişlerdir [19].

Dhanalakshmi ve Palaniswami tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada, rüzgar-mikro hidro-dizel hibrit güç sisteminin frekans kontrolü için ANFIS kontrolör uygulaması yapılmıştır [20].

V.Kushwaha ve arkadaşlarının 2016 yılında yaptığı çalışmada, yük frekansına dayalı, uyarlanabilir nöro bulanık bir yöntem oluşturulmuş ve performansı hidro termal güç sistemi için PID ve bulanık tabanlı kontrolörler ile karşılaştırılmıştır [21].

V. Nath ve D. K. Sambariya tarafından yapılan 2016 yılında çalışmada, çok alanlı bir güç sistemi için, yük frekansını kontrol etmek amacıyla uyarlanabilir bir nöro bulanık kontrolör tasarlanmıştır ve sonuçlar PID kontrolör ile karşılaştırılmıştır [22].

F. K. Abo-Elyousr tarafından 2016 yılında yapılan çalışmada, PI kontrolörün parametrelerinin optimum ayarı için karınca kolonisi algoritması, yük frekansı kontrolörleri oluşturmak için uygulanmıştır. İki bölgeli frekans kontrolünde, çift beslemeli bir indüksiyon jeneratörünün matematiksel bir modeli oluşturulmuştur. Sonuçlar, karınca kolonisi kontrolörünün sistem frekansı performansını artırma yeteneğini göstermiştir [23].

Kumar ve arkadaşları tarafından 2016 yılında yaptıkları çalışmada, yük frekansı kontrolü için gaz türbini santralinin küçük sinyal modellemesi uygulanmıştır. PI kontrolünün parametreleri, Ziegler Nichols, genetik algoritma ve bulanık kazanç zamanlaması (FGS) olmak üzere üç farklı

yöntem kullanılarak ayarlanmıştır. Sonuç olarak, FGS yönteminin gaz türbini tesisinin küçük sinyal modeli için en iyi sonuçları sunduğu yanıtlardan gözlemlenmiştir [24].

Ayman Alhejji tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada, yük tesisi ile güç üretimi arasında iyi bir uzlaşma sağlamak için sistem tesisinin yük frekans kontrolü sağlayan parametrik belirsizliğini tahmin etmek için bir L1 adaptif kontrol (L1-AC) tekniği sunulmuştur [25].

Kamble ve Akolkar tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada, mikro hidroelektrik santralinin yük frekansı kontrolü için bulanık mantık kontrolörü kullanımı gerçekleştirilmiştir. Söz konusu kontrolör, üç temel işlevi olan bulanık mantık üzerine kurulmuştur. Bunlardan ilki, kullanıcı yükünü değiştirmesine rağmen tesisin frekans çıkışının düzenlenmesidir. İkincisi, ihtiyaç duyulan suyun israfının kısıtlanmasıdır. Üçüncüsü ise mini şebekeyi belirli ilgili kalkışlara göre öncelik sırasına göre ayırarak elektrik dağıtımının yönetilmesidir [26].

D. Kumar ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada, rüzgar enerjisi sisteminin dalgalanmasını kontrol etmek için PID kontrolörüne dayanan yapay arı kolonisi (ABC) uygulanmıştır. Kontrol parametreleri ABC algoritması kullanılarak yapılandırılmış ve bir mininum dalgalanması sonucu elde edilmiştir [27].

D.Srivastava ve M. M. Tripathi tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, çok alanlı bir hibrit güç sistemi için uyarlanabilir bir nöro bulanık çıkarım sistemi oluşturulmuştur. Uyarlanabilir nöro bulanık tabanlı kontrolörün yük frekansı kontrolü sonuçları PI ve bulanık kazançlı PI kontrolöler ile karşılaştırılmıştır [28].

W. Eshetu, P. Sharma ve C. Sharma tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada ANFIS'e dayanan akıllı bir yük frekansı kontrolü, yalıtılmış PV-mikro rüzgar güneşi üzerine uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar konvansiyonel PID kontrolör ve bulanık mantık kontrolör ile karşılaştırılmıştır [29].

M. K. Bhaskar ve arkadaşları tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, çok bölgeli güç sistemi için PID, bulanık mantık ve ANFIS kontrolörler kullanılarak karşılaştırmalı bir otomatik üretim kontrolü performansı analizi sunulmuştur [30].

S. Makhloufi, M. Debbache ve S. Boulahchiche tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, rüzgar enerjisi sisteminin PV güç çıktılarını tahmin etmek için bir ANFIS yapısı kullanılmıştır [31].

M.A. Soliman ve arkadaşları tarafından 2018 yılında yapılan çalışmada, değişken hız performansını artırmak için şebekeye bağlı bir rüzgar jeneratörüne bir ANFIS-GA (adaptif nöro bulanık çıkarım sistemi-genetik algoritma) kontrolörü uygulanmıştır [32].

Shaker ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, yük frekansı kontrolü için birbirine bağlı çok alanlı güç sistemi için gelişmiş bir kontrol yöntemi geliştirilmiştir. Farklı tiplerde PID, Fractional order PID (FOPID), Fuzzy-PID (FPID) ve Fuzzy fractional order PID (FFOPID) kontrolörleri uygulanmıştır [33].

Aluko ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, yükü bozarak sistemi kararlı duruma getirmek için uygun atalet tepkisi sağlamak için bulanık mantık denetleyicisi kullanılarak gelişmiş çok alanlı güç sistemleri frekans kontrolü uygulanmıştır [34].

Berwal ve Singh tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, birbirine bağlı güç sistemlerinin otomatik yük frekans kontrolüne ANFIS kontrolörünün bir uygulaması kullanılmıştır [35].

Z Wang, H He ve Yan Sun tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, Filippov çözeltisi ve pürüzsüz olmayan analiz kullanılarak zamanla değişen yükler altında güç sistemlerinin sağlam frekans kontrol yöntemi önerilmiştir [36].

Al.Mamun ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, güç sisteminin geliştirilmiş yük frekans kontrolü sunulmuş ve yük frekans kontrolüne dayalı aktif bozulma reddi kontrolü (ADRC) performansı, yük frekans kontrolüne dayalı PID ile karşılaştırılmıştır [37].

Amitkumar, Gupta ve Appasani tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, bir PID kontrolör parametresi, hibrit hidro-termik güç sistemlerinin yük frekansı kontrolü için genetik algoritma ve parçacık sürüsü optimizasyonu gibi çeşitli optimizasyon yöntemleri kullanılarak istenen değere optimize edilmiştir [38].

A.K. Singh, P.Ahmad ve N.Singh tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, yük frekansı kontrolü için bir Bulanık-PID kontrol sistemi tasarlanmış ve hibrit güç sisteminde frekans

kontrolüne ulaşmak için PID'nin kazanç parametrelerini optimize etmek için genetik algoritma uygulanmıştır [39].

R.Doley ve S.Ghosh tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, bulanık tabanlı kontrolörler ve PID uygulamaları kullanılarak performansları tek ve çift bölgeli güç sistemlerinin yük frekansı kontrolü için karşılaştırılmıştır [40].

Chen ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, çok alanlı sistemlerin yük frekansı kontrolü için gelişmiş bir karınca koloni optimizasyonu, optimize edilmiş bulanık PID kontrolörü tasarlanmıştır. Duyarlılık analizi, önerilen kontrol sürecinin sağlamlığını göstermek için çok çeşitli çalışma koşulları ve sistem parametreleri altında gerçekleştirilmiştir [41].

W Yinsha ve arkadaşı tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, iki kat beslemeli indüksiyon jeneratörü rüzgar türbini bulunan çok bölgeli otomatik üretim kontrol sistemi için bulanık kontrolörle birleştirilmiş parçacık sürü optimizasyonu algoritması önerilmiştir [42].

Zhi tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, önerilen sistemin stabilitesini ve hızını sağlamak için tek fazlı invertör için ABC'ye dayalı bir PID kontrolörü uygulanmıştır. Kontrol sisteminin dinamik performansında bir iyileşme gözlenmiştir [43].

S.Prainetr ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, bir sıcaklık kontrolü için karınca kolonisi optimizasyonuna dayanan bir PID kontrolörü tasarlanmış ve Ziegler-Nichols yöntemi ile parametreleri hesaplanan PID kontrolör ile karşılaştırılmıştır [44].

Bui ve arkadaşları tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, sistemin dinamik voltaj stabilitesini artırmak için şebekeye bağlı rüzgar enerjisi sistemi için bir ANFIS kontrolörü uygulanmıştır [45].

I. K. Amin, M. N. Uddin ve M. Marsadek tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, rüzgar enerjisi üretimi için çift beslemeli indüksiyon jeneratörüne ANFIS kontrolörü uygulanmıştır [46].

A.Isa ve C. Sourkounis tarafından 2019 yılında yapılan çalışmada, ANFIS ve yapay sinir ağı kontrolörleri, aktarma hatlarının korunması için algoritma oluşturmak için kullanılmıştır. Veriler, 2kHz örnekleme frekansında 400kV, 50Hz, 100Km iletim hattı kullanılarak

çıkarılmıştır. Sonuçlar, yapay sinir ağına kıyasla ANFIS'in en az hataya ve daha fazla doğruluğa sahip olduğunu göstermiştir [47].

Surjandari ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptığı çalışmada, ANFIS yöntemi, arama alanı boyutunu en aza indirebilme kabiliyeti nedeniyle seçilmiştir. Kontrolör, x-ışını floresans (XRF) (bu kısaltmayı açmalısın) sonucunu analiz etmek için uygulamıştır ve saprotlit cevheri kompozitlerinin optimal bir faktör kombinasyonu elde edilmiştir [48].

M. M. İsmail ve A. F.Bendary tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada, PV dizi sisteminde 3 fazlı şebeke için talebe dayalı üretilen elektriği arttırmak amacıyla piller için en iyi kullanımı sağlamak üzere iki ANFIS kontrolör kullanılmıştır [49].

S. Sharma ve arkadaşları tarafından 2020 yılında yapılan çalışmada, bir fotovoltaik sistem için, maksimum güç noktası izlemesine bir ANFIS kontrolörü uygulanmıştır. İklim verileri denetleyiciyi tasarlamak için güneş fotovoltaik girişi olarak kullanılmıştır. Sonuçlar bulanık mantık denetleyicisi ile karşılaştırılmış ve ANFIS'in daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir [50].

3. MALZEME VE YÖNTEM

3.1. MATEMATİKSEL MODELLER

Modellerde kullanılan her değişken için zaman sabitleri gerekli hale gelir. Buna göre, aşağıda sabit çıkış değerleri değiştirilebilen santraller ve santrallerin bileşenleri ile ilgili matematiksel modeller bulunmaktadır.

3.1.1. Hidroelektrik Santralin Modellenmesi

Elektrik enerjisi kullanıcısına kaliteli elektrik hizmeti sağlamak için güç sistemi stabil ve güvenilir kalmalıdır. Elektrik güç sistemleri, aslında doğrusal olmayan ve karmaşık dinamik sistemlerdir. Güç şebekesi içindeki hidroelektrik santrallerinde, normal çalışma sırasında, yükteki küçük değişikliklere erişilebilir olduğu için doğrusallaştırılmış model kullanılabilir. Hidroelektrik santral modellemesi mekanik jeneratör modeli ve türbin modeli olmak üzere iki kısımda incelenmiştir.

3.1.1.1. Jeneratör Mekanik Modeli

Jeneratör dinamik davranışı güç sisteminde önemlidir. Jeneratör, mekanik gücü uygun bir frekansta ve gerilimde elektrik gücüne dönüştürür. Sistem frekansı ile aktif güç dengesinin birbirine bağlanması düşünüldüğünde, yük frekansı kontrolü güç sistemlerinde yaygın olarak kullanılır.Bu modeli oluşturmak için hareket ve salınım denklemleri kullanılır.

Mekanik denklemleri bilinen jeneratörün elektriksel modeli, rotasyonel eylemsizlik salınım denklemleri yardımıyla kullanılabilir. Bu nedenle elektrik üreten parça, küçük parçalayıcılara hızlı tepki verebilen doğrusal diferansiyel denklemlerle modellenmiştir.

Salınım denklemi, makinenin rotor tork açısını, elektromanyetik torkla şaft torku arasında fark olan hızlanma torku ile karşılaştırır. Jeneratör hızı, mekanik torkla elektriksel tork arasında bir denge verildiğinde ayarlanır. Bazı tork farkları sistemin hızlanmasına ya da yavaşlamasına neden olur. Dönen bir cisimde hareket denklemi;

$$T_a = M \propto = M\frac{d\omega}{dt} = M\ \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m - T_e \tag{3.1}$$

Burada;

T_a : ivmelendirme torku

M : türbin ve jeneratör toplam eylemsizlik momenti

$\propto$: açısal ivme

ω : açısal hız

δ_m: rotorun mekanik tork açısı

t : zaman

T_m: mekanik tork

T_e: elektromanyetik tork

olarak tanımlanmıştır. Elektrikli tork açısal hızını kullanarak, hareket denklemi birim değerdedir;

$$M\ \frac{d\bar{\omega}}{dt} = \bar{T}_m - \bar{T}_e \tag{3.2}$$

Denklem (3.2), tork yerine elektrik ve mekanik güç cinsinden düzenlenmelidir. Torkla ilişkili elektriksel güç denklemi $P = \omega\, T$ olarak ifade edilir. Çalışma noktasındaki küçük salınımlar ve ikinci terimler ihmal edilerek,

$$\Delta\bar{P} = \bar{\omega}_0 \Delta\bar{T} + \bar{T}_0 \Delta\bar{\omega} \tag{3.3}$$

elde edilir. Denklem (3.3)'te elektriksel ve mekanik güç ile tork ifadeleri yer değiştirirse;

$$\Delta\bar{P}_m - \Delta\bar{P}_e = \bar{\omega}_0(\Delta\bar{T}_m - \Delta\bar{T}_e) + (\bar{T}_{m0} - \bar{T}_{e0})\Delta\bar{\omega} \tag{3.4}$$

elde edilir. Burada;

$\Delta\overline{P_m}$: normalize edilmiş mekanik güç değişimi

$\Delta\bar{P}_e$: normalize edilmiş elektriksel güç değişimi

$\Delta\overline{T_m}$: normalize edilmiş mekanik tork değişimi,

$\Delta\overline{T_e}$: normalize edilmiş elektriksel tork değişimi,

$\overline{T_{m_0}}$: normalize edilmiş başlangıç mekanik torku

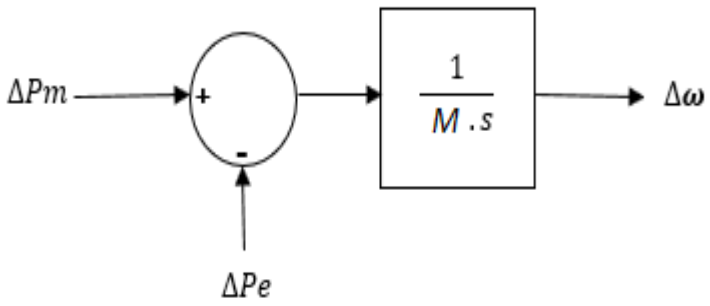
$\overline{T_{e_0}}$: normalize edilmiş başlangıç elektriksel torku

olarak tanımlanmıştır.

Kararlı durumda elektriksel tork, mekanik torka eşdeğerdir ($T_{e0} \cong T_{m0}$). Buna göre (3.2) ve (3.3) denklemleri birleştirilerek hız değişimi, elektriksel güç ve mekanik gücü arasındaki ilişki,

$$\Delta\bar{P}_m - \Delta\bar{P}_e = Ms\Delta\bar{\omega} \tag{3.5}$$

olarak elde edilir. Şekil 3.1'de, enklem (3.5) 'in blok diyagramını gösterilmiştir.



Şekil 3.1: Açısal hız ve güç farkı arasındaki transfer fonksiyonuna ait blok diyagram.

Bazı durumlarda, yerel yükü ve izole yük kaynağını besleyen jeneratör güç özelliklerini dikkate almak için daha kapsamlı bir jeneratör modeli gereklidir. En yaygın olarak kullanılan statik model, aktif gücü sabit bir akım ve reaktif gücü ise sabit bir empedans olarak tanımlar. Yerel yükler ile izole yükler çeşitli elektriksel bileşenlerden oluşur. Cihazın kısa süreli stabilitesi söz konusu olduğunda durağan yük modeli denklemlerinin kullanımı yeterli olacaktır. Elektriksel güçteki değişim bu durumda aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\Delta\overline{P_e} = \Delta\bar{P}_L + \Delta\overline{P_D} \tag{3.6}$$

Burada $\Delta\bar{P}_L$ yükteki normalize edilmiş değişim ve $\Delta\bar{P}_D$ sönümlemeye bağlı olarak elektriksel güçteki normalize edilmiş değişim olarak tanımlanmıştır. İkinci derece terimleri denklem (3.6)'da göz ardı edilir ve küçük sinyalin analizi için denklem (3.7) elde edilir [51].

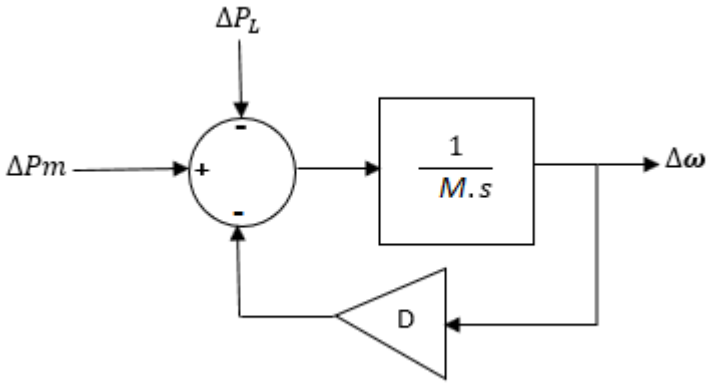
$$\Delta\overline{P_D} = D\Delta\bar{\omega} \rightarrow D = \frac{\Delta\overline{P_D}}{\Delta\bar{\omega}} \tag{3.7}$$

Sönüm sabiti (D), verilen yüzdesel yük değişimi için frekansta veya açısal hızda oluşan yüzdesel değişimdir. Tipik değeri %1-2 civarındadır. Örneğin %1'lik bir yük değişiminde %1'lik bir frekans değişimi varsa D=1/1=1 olur. Buna göre (3.5), (3.6) ve (3.7) denklemleri birleştirilirse çıkışı açısal hız veya frekans olan bir jeneratörün doğrusallaştırılmış ve basitleştirilmiş modeli;

$$\Delta\overline{P_m} - \Delta\overline{P_L} = (Ms + D)\Delta\bar{\omega} \tag{3.8}$$

elde edilir [51].

Şekil 3.2'de denklem (3.8) blok diyagramını gösterilir.



Şekil 3.2: Açısal hız, güç farkı ve yük arasındaki transfer fonksiyonuna ait blok diyagram.

Bu çalışmada tek bölgeli olarak çalışan bir hidroelektrik santralde uygulama yapıldığı için yük değişiminin olmadığı veya yükün sabit olduğu ($\Delta P_L = 0$) kabul edilmiştir [51].

3.1.1.2.Türbin Modeli

Souza ve arkadaşları yapmış oldukları hidrolektrik enerji üretim sistemi ile ilgili çalışmada sistemin doğrusal olmayan ve yüksek dereceli bir davranış sergilediğini göstermişlerdir. Hidroelektrik türbin modellellerinde iki varsayım ele almışlardır. Bunlardan birincisi suyun sıkıştırılabilir oluşunun ihtimali, ikincisi ise elastik su yükü etkileridir. Türbin dinamiğini incelerken su yükünün etkilerini de ilave etmişlerdir. Türbin girişi ve baraj arasındaki cebri boru, modelin bu etkilerini zorlaştırır. Souza ve arkadaşları türbin-cebri boru matematiksel

modelini doğrusal ve doğrusal olmayan modeller için incelemişlerdir. Elde ettikleri modelde türbin kontrolünün önemli olduğunu söylemişlerdir. Çalışmalarında doğrusallaştırılmış model üzerine çalışmışlardır [53].

Bu model, kontrol sistemlerinin küçük sinyal analizi ve tasarımı çalışmalarında kullanılmaktadır. Su yükünün elastik olmayan transfer fonksiyonu, cebri boru türbininin temel denklemlerinin doğrusallaştırılmasıyla elde edilebilir. Ayrıca, mekanik mukavemetteki küçük gelişmeler, distribütörün açılmasındaki değişikliklerden kaynaklanmaktadır [53]. Bu sonuçlar birinci dereceden transfer fonksiyonu denkleminde denklem (3.9) 'da gösterilir;

$$\frac{\Delta P_m(s)}{\Delta G(s)} = \frac{1-T_w s}{1+\frac{1}{2}T_w s} \tag{3.9}$$

Burada;

ΔP_m : türbin mekanik gücündeki değişim

T_w : Sabit su zamanı

ΔG : türbin su girişi dağıtıcı pozisyonu

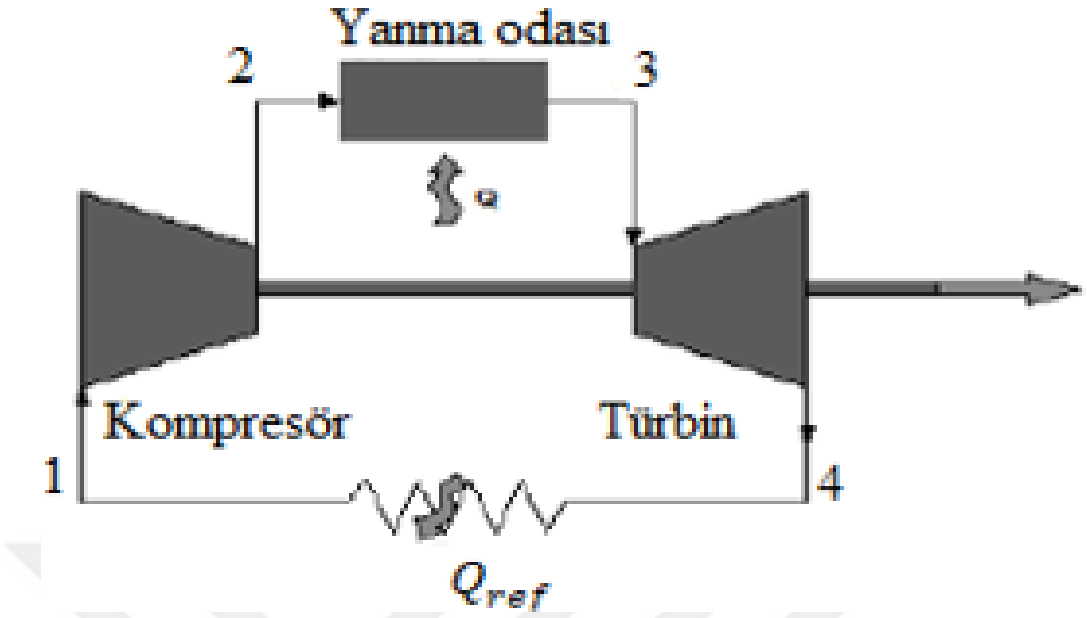
olarak tanımlanmıştır.

3.1.2. Doğal Gaz / Fuel-Oil Türbini Santralinin Modellenmesi

Yapılan deneysel modelleme çalışmalarında elektrik üretimi için kullanılan enerji kaynağının doğal gaz veya fuel-oil olması durumlarında türbin ile jeneratör sistemlerinde herhangi bir farklılık olmadığı ancak hız regülatörü, yakıcı ve yanma odası sistemlerinin oluşturulan transfer fonksiyonu katsayılarında değişiklik olduğu görülmüştür [54].

3.1.2.1. Türbin ve Bağlantılı Sistemlerin Modellenmesi

Doğal Gaz / Fuel-Oil türbini terimi için iki tanım vardır. Bunlardan biri yanma odası, kompresör ve türbinden oluşan sistemdir. Diğeri ise sadece türbindir. Şekil 3.3'te gösterilen basit bir doğal gaz / fuel-oil türbininde olduğu gibi hava kompresöre girer, sıkıştırılır ve daha sonra yanma için yanma odasına gönderilir.



Şekil 3.3: Basit Doğal Gaz / Fuel-Oil türbini [54].

Şekil 3.3'te görüldüğü üzere yüksek basınçlı sıcak hava yanma odasında gazla yakılır. Ortaya çıkan ürünler türbin tarafından kullanılır ve çalışmalar yapılır. Türbin çalışmalarının çoğu kompresörü çalıştırmak için kullanılırken bazıları yardımcı ekipman için kullanılır. Geri kalanı elektrik santralindeki net işe eşittir. En basit ve temel model Doğal Gaz / Fuel-Oil için hava standardı varsayımlarına dayanan modeldir.

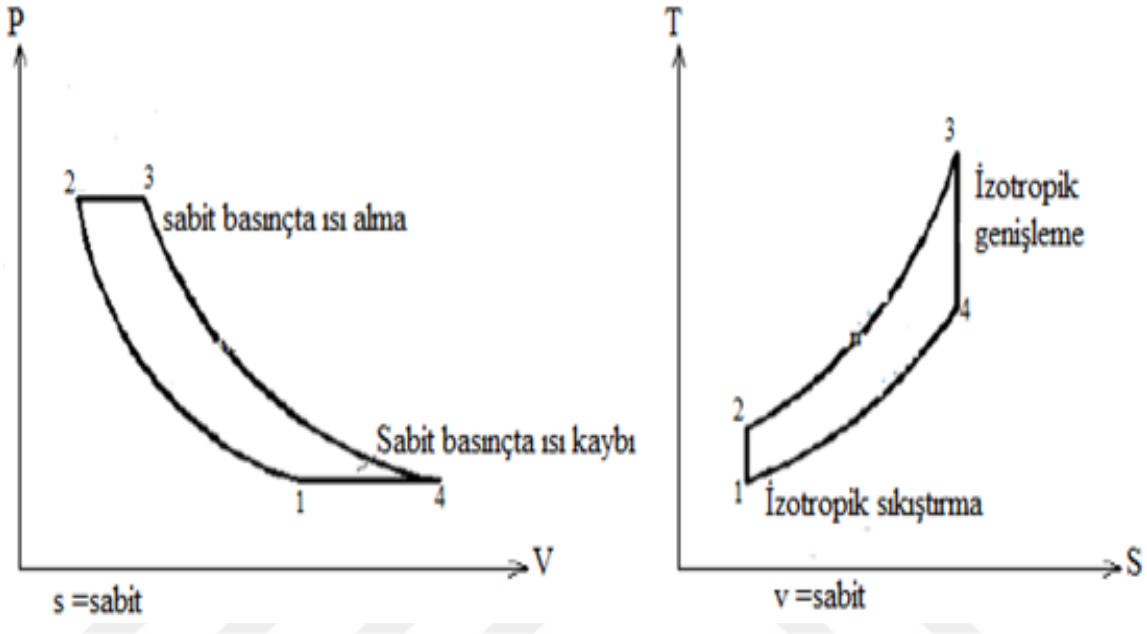
Bu modelde;

- İşi yaratan ortam havadır ve döngü sırasında ideal durumundadır.
- Yanma işlemi dikkate alınmaz; ortamın bir dış kaynak tarafından sabit bir basınçla ısıtıldığı varsayılmaktadır.
- Egzoz ve kompresör emisyonları dikkate alınmaz; türbinden çıkan ortamın sabit bir basınçla bir dış kaynağı ısıttığı ve daha sonra kompresöre girdiği varsayılmaktadır.

Türbin, kompresör ve yanma odası gibi sistemler açık, sürekli akışlı sistemlerdir. Ancak santral kapalı sistem olarak kabul edilir. Hava standartlarının varsayımlarına dayanan döngüler ideal hava döngüleri olarak adlandırılır. Bu varsayımlara sahip modellerin başka varsayımları da vardır; yani tüm fazların veya bazı fazların tersinir olabileceği varsayılmaktadır. Belirli durumlarda, yaklaşık sonuçların elde edileceği şekilde oda sıcaklıkları için spesifik ısı verimliliğinin sabit olduğu varsayılır. Yukarıda zikredilen

varsayımlarla oluşturulan modele, soğuk hava standart varsayımlarına sahip model adı verilmektedir. Tasarımdaki çeşitli adımlar için farklı model tipleri kullanılabilir [54].

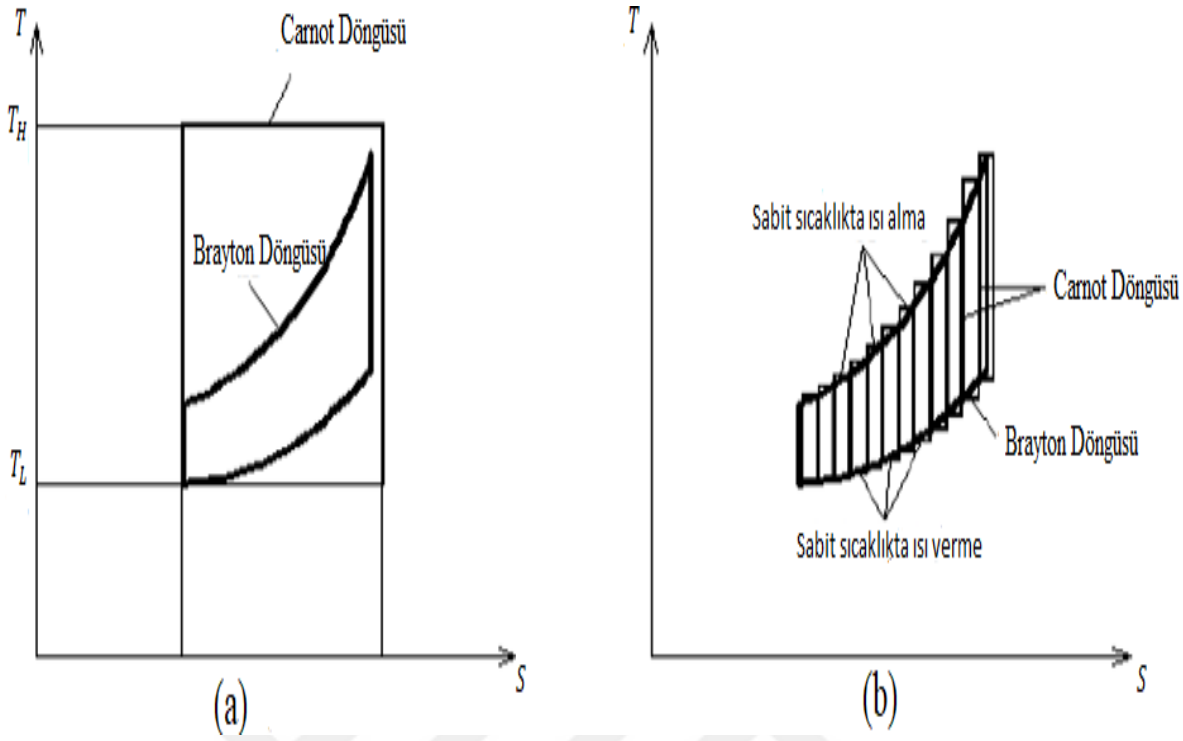
Şekil 3.4'te gösterilen Brayton Döngüsü, hava standardı varsayımları ile tasarlanmış basit bir doğal gaz / fuel-oil türbini döngüsüdür.



Şekil 3.4: Doğal Gaz / Fuel-Oil türbini Brayton çevrimi [55].

Şekil 3.4'te, döngünün akış, P-V ve T-s diyagramları gösterilmektedir. Genişleme ve sıkıştırma işlemleri izotropiktir. Isı değişimleri sabit basınç altında gerçekleştirilir.

Termodinamiğin birinci yasası Doğal Gaz / fuel-oil türbini çevrimine uygulandığında, türbin çalışması, kompresör çalışması, net çalışma ve verimlilik elde edilir. Spesifik ısı kapasitelerinin sabit olduğu varsayılırsa, verimliliğin basınç oranının bir fonksiyonu olduğu görülebilir. Verimlilik en yüksek sıcaklığa bağlı değildir. Bununla birlikte, özgül ısı kapasiteleri değişken ise, verimlilik sıcaklığa bağlıdır[54]. Şekil 3.5'te Brayton ve Carnot çevrimlerinin verimleri karşılaştırılmıştır.



Şekil 3.5: Carnot ve Brayton döngüleri verimliliklerinin karşılaştırılması [55].

Şekil 3.5'te, aynı sıcaklık aralığı, ısı değişimi sırasında aynı entropi değişiklikleri ile çalışan Carnot ve Brayton döngüleri aynı T-s diyagramında gösterilmektedir. Küçük Carnot döngülerinden oluşan Brayton döngüsü, bu küçük döngülerin verimliliği, Brayton döngüsünün maksimum ve minimum sıcaklıkları arasında çalışan Carnot döngülerinden daha azdır. Bu nedenle, Brayton döngüsünün verimliliği, Brayton döngüsüyle sıcaklık bakımından özdeş aralıkta çalışan Carnot döngüsünün verimliliğinden daha azdır. Bu çalışmada model Carnot çevrimi ile oluşturulmuştur [54].

Yük değiştikçe üretilen güç sürekli olarak değişir. Üretilen güç ve tüketim arasındaki tutarsızlık, doğrudan türbin hızına, yani frekansa yansır. Yük dengesizse, frekansı sabit tutmak için üretilen gücün değişken olması gerekir.

Bu durum hız regülatörü tarafından kontrol edilir. Frekansı düzenlemek, üretimi ayarlamak için kullanılır. Aynı zamanda doğal gaz türbininin yanma odasına giren gaz miktarını da kontrol eder. Bu, güç ve hız hatası sıfıra eşit olana kadar devam eden kapalı bir döngüdür. Gaz miktarı, regülasyon valfi olan kontrol valfi tarafından kontrol edilir. Kontrol vanasının önüne seri olarak bağlanan ikinci vanaya stop vanası denir. Bu bir acil durum vanasıdır ve açık veya kapalıdır. Koruma sistemi çalışıyorsa, stop vanası gaz akışını önler [54,56].

Hız regülatörü orantısal ve türev (PD) kontrolör karakteristiğine sahiptir. Kontrol transfer devresi tarafından aktif edildiği zaman yakıt kontrol vanasını kontrol ederek türbin hızını ayarlanılan hız değerine çeker. Hız regülatörünün transfer fonksiyonu denklem (3.10)'de verildiği gibidir [54].

$$F(s) = K_d \left[\frac{Xs+1}{Ys+1}\right] \tag{3.10}$$

Burada;

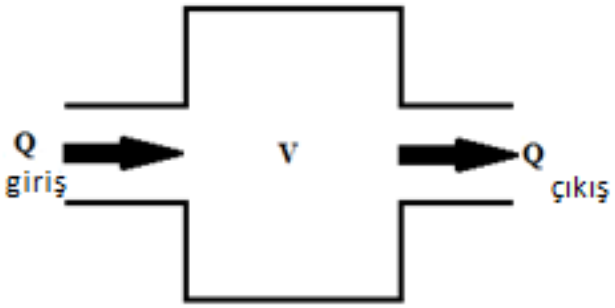
K_d: hız regülatörü kazancı

X: hız regülatörü birincil zaman sabiti

Y: hız regülatörü ikincil zaman sabiti

olarak tanımlanmıştır.

Yakıcı ve yanma odası blokları birbirlerine çok benzerdir. Yanma odasında giriş olarak yakıt-hava karışımı ve çıkış olarak türbinin egzoz gazı kullanılır. Yakıcı ve yanma odasının prensip şeması Şekil 3.6'de verilmiştir [54].



Şekil 3.6: Yanma odasının prensip şeması.

Şekil 3.6'a göre yakıcı ve yanma odası blokları için süreklilik denklemi;

$$\frac{dW}{dt} = V\frac{d\rho}{dt} = Q_{giriş} - Q_{çıkış} \tag{3.11}$$

biçimindedir. Burada;

W: yanma sonucu oluşan egzos gazının ağırlığı (kg)

V: yanma odasının hacmi (m^3)

ρ: yanma sonucu oluşan egzos gazının yoğunluğu (kg/m^3)

$Q_{giriş}$: yakıt-hava karışımının debisi (kg/s)

$Q_{çıkış}$ yanma sonucu oluşan egzos gazının debisi (kg/s)

t: zaman (s)

olarak tanımlanmıştır.

Yanma odasından çıkan egzoz gazı akışlarının doğrudan kazan basıncı ile ilişkili olduğu varsayılarak,

$$Q_{out} = P\frac{Q_0}{P_0} \tag{3.12}$$

olur.

Burada;

P: yanma odasındaki egzos gazının basıncı (kPa)

P_0: nominal basınç (kPa)

Q_0: yanma odasındaki nominal egzos gazı çıkış değeri

olarak tanımlanmıştır. Yanma odasında sabit sıcaklık olduğunda,

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{dP}{dt}\frac{\partial\rho}{\partial P} \tag{3.13}$$

olur. Denklem (3.13)'de gösterildiği üzere egzos gazı yoğunluğunun zamana göre değişimi, egzos gazı basıncının zamana göre değişimi ile egzos gazı yoğunluğunun basınca göre değişiminin çarpımı şeklinde ifade edilebilir. Belirli bir sıcaklıkta ($\frac{\partial\rho}{\partial P}$), basıncı başına egzoz gazı yoğunluğundaki değişiklik buhar cetvellerinden hesaplanabilir. Son üç denklemden;

$$Q_{in} - Q_{out} = V\frac{\partial\rho}{\partial P}\frac{dP}{dt} = V\frac{\partial\rho}{\partial P}\frac{dP_0}{Q_0}\frac{dQ_{out}}{dt} = T_C\frac{dQ_{out}}{dt} \tag{3.14}$$

bulunur. Burada,

$$T_C = \frac{dP_0}{Q_0} V \frac{\partial \rho}{\partial P} \tag{3.15}$$

dir. Denklem (3.15) Laplace formunda düzenlendiği zaman;

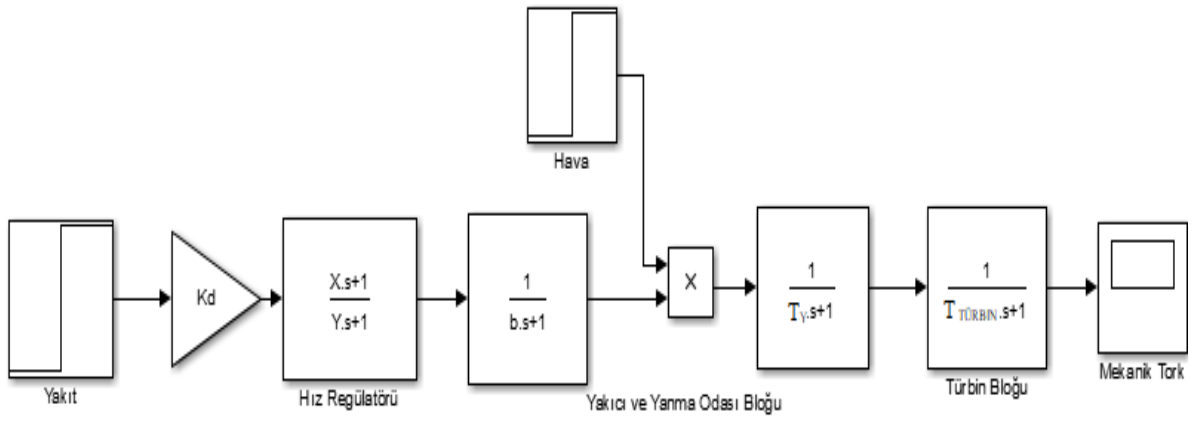
$$Q_{in} - Q_{out} = T_C s Q_{out} \tag{3.16}$$

ya da ;

$$\frac{Q_{out}}{Q_{in}} = \frac{1}{T_C s + 1} \tag{3.17}$$

olarak yazılabilir. Bu denklem yanma odasının transfer fonksiyonunu gösterir. Burada *s* laplace operatörü ve T_C ise yanma odasının zaman (gecikmesi) sabitidir. Yakıcı ve yanma odası blokları birbirlerine çok benzer olduğu için yakıcı sistemin transfer fonksiyonu da benzer şekilde elde edilebilir [54]. Benzer şekilde doğal gaz / fuel-oil türbini için de rahatlıkla bir transfer fonksiyonu tanımlanabilir. Bir doğal gaz türbini, giren egzos gazının basıncı, sıcaklığı ve debisine bağlı olarak çıkışta mekanik tork üretir. Elbette doğal gaz / fuel-oil türbini için de bir zaman sabiti (gecikmesi) belirlenmesi gerekir [54].

Yukarıdaki bilgiler ışığında, genelleştirilmiş doğal gaz /fuel-oil türbini modeli basitleştirilerek Şekil 3.7'deki gibi düzenlenmiştir [57];



Şekil 3.7: Basitleştirilmiş doğal gaz / fuel-oil türbini modeli.

Burada;

K_d: Hız regülatörü kazanımı

X: Hız regülatörü birincil zaman sabiti

Y: Hız regülatörü ikincil zaman sabiti

b: Yakıcı sistemi zaman sabiti

T_Y: Yanma odası zaman sabiti

$T_{TÜRBIN}$: Türbin dinamik karakteristiklerine ilişkili zaman sabiti

olarak tarif edilebilir. Bu parametreler için hesaplanan değerler Doğal Gaz ve Fuel-Oil türbini modeli için aşağıdaki gibi tablo 3.1 ve 3.2 de verilmiştir;

Tablo 3.1:Basitleştirilmiş Doğal Gaz türbini Parametre Değerleri [57].

Parametre	**K_d**	**X**	**Y**	**b**	**T_Y**	**$T_{TÜRBIN}$**
Değer	1	0.65	0.1	0.05	0.4	0.1

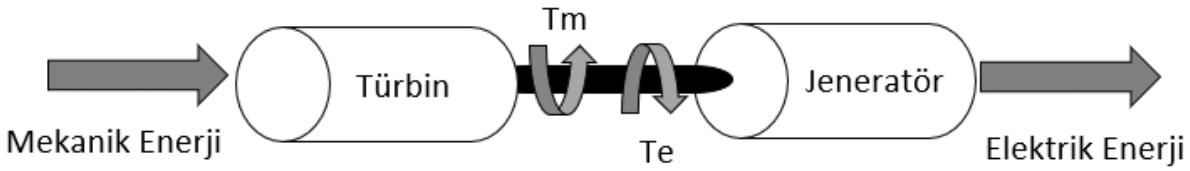
Tablo 3.2: Basitleştirilmiş Fuel-Oil Türbini Parametre Değerleri [57].

Parametre	**K_d**	**X**	**Y**	**b**	**T_Y**	**T_{FOT}**
Değer	1	0.73	0.01	0.15	0.45	0.1

İstanbul Doğal Gaz Kombine Çevrim A Santrali'nde kullanılan bir doğal gaz / fuel-oil türbininin deneysel ölçümleri neticesinde mekanik tork elde edebilmek için en önemli parametrelerin Şekil 3.7'de gösterilen hız regülatörü kazanç katsayısı, hız regülatörü bloğu, yakıcı ve yanma odası blokları ile türbin bloğu olduğu anlaşılmıştır. Bunların dışındaki diğer parametreler deneysel dinamik model oluşturma aşamasında ihmal edilmiştir [54].

3.1.2.2.Jenerator için Genelleştirilmiş Basit Matematiksel Model

Güç sistemleri için jeneratörler, iki zıt momentuma sahip büyük kütleler olarak tanımlanabilir. Şekil 3.8'da verildiği gibi düşünülebilir;



Şekil 3.8: Türbin jeneratör sisteminin fiziksel modeli.

Şekil 3.8'da gösterildiği üzere, mekanik momentum (Tm) rotor hızını hızlandırır. Aksine, yükün (Te) elektriksel momentumu rotor hızını yavaşlatır. Bu iki momentum eşit olduğunda, sistem sabit hıza sahiptir ($w = w0$). Elektrik yükü arttığında, $Te > Tm$ ve jeneratör yavaşlar. Böyle bir durumda jeneratör operatör tarafından hızlandırılır veya tersi de geçerlidir. Tüm bu işlemler sürekli tekrarlanır çünkü yük asla sabit değildir [58, 59]. Jeneratör için denklemler aşağıdaki gibidir;

$$T_{net} = I \propto \tag{3.18}$$

$$M = I\omega \tag{3.19}$$

$$P_{net} = P_m - P_e = \omega T_{net} = \omega(I \propto) = M \propto \tag{3.20}$$

Burada;

T_{net} : makinenin net ivmelendirme momenti

I : makinenin eylemsizlik momenti

$\propto$: açısal ivme

M: makinenin açısal momentum

ω: açısal hız, P_m mekanik güç

P_e: elektriksel güç

P_{net} : net ivmelendirme gücü

olarak tanımlanmıştır.

Başlangıç durumunda sadece bir döner makine olduğunu ve hızının w_0 olduğunu, faz açısının δ_0 olduğunu varsayalım. Artan talep veya elektriksel ve mekaniksel kesintileri nedeniyle, Tm ve Te farklılık gösterecektir. Bu durum jeneratör hızında bir azalmaya veya artışa neden olacaktır [60, 61]. Artan hız;

$$\omega = \omega_0 + \propto t \tag{3.21}$$

ise,

$$\Delta\delta = \int(\omega_0 + \propto t)dt - \int \omega_0 dt = \omega_0 t + \frac{1}{2} \propto t^2 - \omega_0 t = \frac{1}{2}\alpha t^2 \tag{3.22}$$

olur. Burada ω_0 başlangıç açısal hızı, $\Delta\delta$ jeneratör faz açısı sapması ve t ise zamandır.

Nominal açısal hızdan sapma Δw ise,

$$\Delta\omega = \alpha t = \left(\frac{d}{dt}\right)(\Delta\delta) \tag{3.23}$$

şeklindedir. Hız sapması, faz açısı sapması ve net ivme momenti arasındaki bağlantı ise,

$$T_{net} = I\alpha = I\left(\frac{d}{dt}\right)(\Delta\omega) = I\left(\frac{d^2}{dt^2}\right)(\Delta\delta) \tag{3.24}$$

olur. Buna göre denklem (3.20) ve denklem (3.24) birleştirilirse net güç ile frekans değişimi arasındaki ilişki,

$$P_{net} = P_m - P_e = \omega T_{net} = \omega I\left(\frac{d}{dt}\right)(\Delta\omega) = M\frac{d\Delta\omega}{dt} \tag{3.25}$$

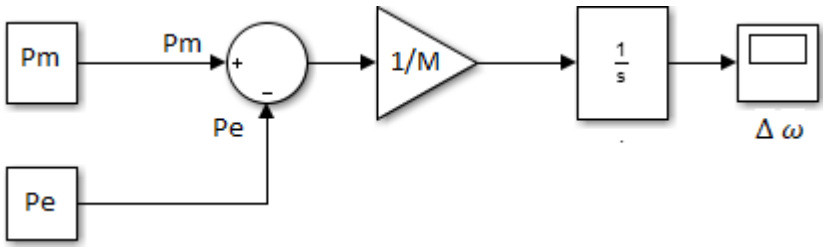
olur. Bu denklem Laplace formunda düzenlenir ise;

$$P_m - P_e = Ms\Delta\omega \tag{3.26}$$

halini alır. Bu denklemden $\Delta\omega$ çekilirse;

$$\Delta\omega = \frac{1}{Ms}(P_m - P_e) \tag{3.27}$$

Bu denklemin blok diyagramı aşağıda gibi gösterilmiştir;



Şekil 3.9: Türbin jeneratör sisteminin basitleştirilmiş blok diyagramı.

Frekans değişikliğine ($\Delta\omega$) ve dolayısıyla yükteki değişime (ΔP_L) bağlı olarak elektriksel güç aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$P_e = \Delta P_L + \Delta P_D \tag{3.28}$$

Burada ΔP_L yükteki değişim ve ΔP_D sönümlemeye bağlı olarak elektriksel güçteki değişim olarak tanımlanmıştır. Sönümlemeye bağlı olarak güçte oluşan değişim aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [51].

$$\Delta P_D = D\Delta\omega \rightarrow D = \frac{\Delta P_D}{\Delta\omega} \tag{3.29}$$

Sönümleme sabiti (D), verilen yüzde yükündeki değişiklik için frekansta veya açısal hızda meydana gelen yüzde değişimidir. Tipik değer yüzde 1 ila 2 arasındadır. Örnek olarak, yüzde 1'lik yük değişikliğinde yüzde 1'lik bir frekans değişimi meydana gelirse, D = 1/1 = 1'dir.

Buna göre (27), (28) ve (29) denklemlerileri birleştirilirse çıkışı açısal hız veya frekans olan bir jeneratörün doğrusallaştırılmış ve basitleştirilmiş modeli;

$$\Delta P_m - \Delta P_L = (Ms + D)\Delta\omega \tag{3.30}$$

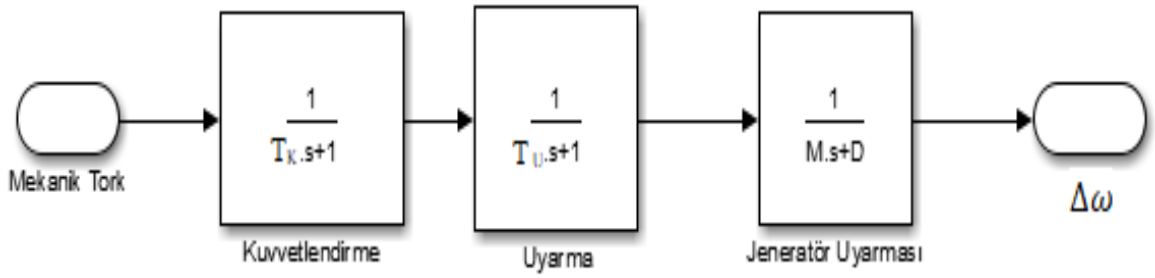
elde edilir [51]. Şekil 3.10, denklem (3.30)'in blok diyagramını göstermektedir



Şekil 3.10: Dönen yük ve kütlenin blok diyagramı.

Yük sönüm etkisinin eklenmesiyle jeneratör uyarması yukarıdaki şekilde özetlenmiş olur. Bu çalışmada tek bölgeli olarak çalışan bir enerji santralinde uygulama yapıldığı için yük değişiminin olmadığı veya yükün sabit olduğu ($\Delta P_L = 0$) kabul edilmiştir.

Böylece jeneratör uyarması yukarıdaki gibi özetlenir. Bununla birlikte, otomatik voltaj regülatörünün kuvvetlendirme ve uyarma blokları jeneratör uyarmasından önce eklenirse aşağıdaki gibi yukarıdaki şeklin detaylı modeli elde edilir. Benzer şekilde kuvvetlendirici ve uyarma blokları için de rahatlıkla bir transfer fonksiyonu tanımlanabilir. Elbette hem kuvvetlendirme (T_F) hem de uyarma (T_{Ex}) için de birer zaman sabiti (gecikmesi) belirlenmesi gerekir. Bu eklemelerle birlikte Şekil 3.10 aşağıdaki Şekil 3.11'a dönüşür;



Şekil 3.11: Frekans değişimi çıkışlı jeneratör modeli.

Çıkış frekansında bir farkı olan bir jeneratör modeli yukarıda özetlenmiştir. Bu çalışmada olduğu gibi jeneratör çıkışının aktif güç olarak kullanılması gerektiği durumlarda Şekil 3.11'de görülen modele denklem (3.31)'de verilen hız regülasyon sabiti eklenmelidir.

$$R = \frac{\Delta\omega}{P_{gn}} = \frac{\Delta f}{P_{gn}} = \frac{f_2 - f_1}{P_{gn}} \tag{3.31}$$

Burada,

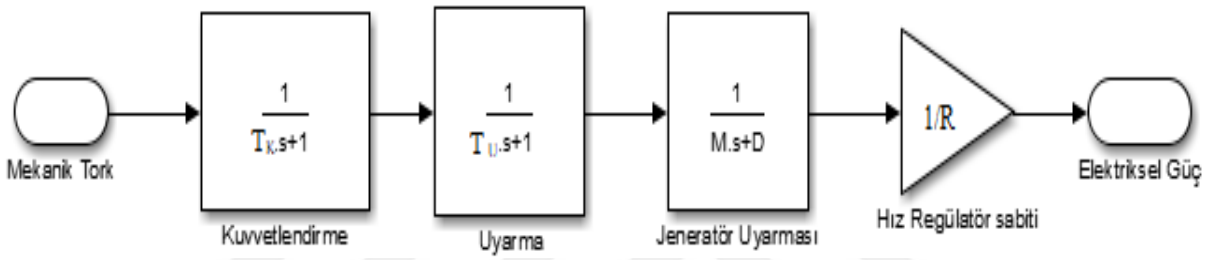
R: Hız regülatör sabiti (Hz/MW)

P_{jn}: Jeneratör biriminin nominal etken çıkış gücü (MW)

f_2: Yük olmayan durumda frekans (Hz)

f_1: Nominal güç çıkışında frekans (Hz)

olarak tanımlanmıştır. Hız regülasyon sabiti, üretim ünitesinin hız çıkış gücü karakteristiğini belirler. R, hız ($\Delta\omega$) veya frekans bozulmasının (Δf) güç jeneratör ünitesinin nominal aktif çıkış gücü (P_{gn}) oranına eşittir. Bu durumda aktif bir güce sahip bir jeneratör modeli, sisteme regülatör sabiti eklenerek Şekil 3.12'deki gibi elde edilebilir;



Şekil 3.12: Sadeleştirilmiş jeneratör modeli.

Aşağıdaki tabloda, bu parametrelerin tipik hesaplanmış değerleri verilmiştir[58];

Tablo 3.3: Jeneratör basitleştirilmiş parametre değerleri.

Parametre	**T_K**	**T_U**	**M**	**D**	**R**
Değer	0.25	1	0.1	1	1

Tablo 3.3'te verilen değerler literatürdeki bir çok çalışmada basitleştirilmiş ve doğrusallaştırılmış jeneratör parametreleri olarak kullanılmaktadır.

3.2. KONTROL YÖNTEMLERİ

Her bir kontrol sisteminin temel amacı, sistemin değişkenlerini ve durumunu çeşitli dönemlerde kullanmak için sistemin kontrol parametreleriyle uyumlu bir şekilde davranmasını sağlamaktır. Sistem, bir görevi gerçekleştirmek için birlikte çalışan parçalardan oluşur. Kontrol sistemlerinde hem girişler hem de çıkışlar vardır. Girişler kontrolörde işlenir ve kontrol edilen sistem uygun çıkışı üretir. Bu çıkış sistem kontrolü için bir sinyal görevi görür.

3.2.1. Klasik Kontrol Yöntemleri

Bu araştırmada standart kontrolörlerden biri olan PI (Proportional-Integrator) ve PID (Proportional-Ingtegrator-Derivative) kontrolörler kullanılmış ve parametreleri, Sistemin Cevap Eğrisi yöntemiyle hesaplanarak optimize edilmiştir.

3.2.1.1. Sistemin Cevap Eğrisi Yöntemi

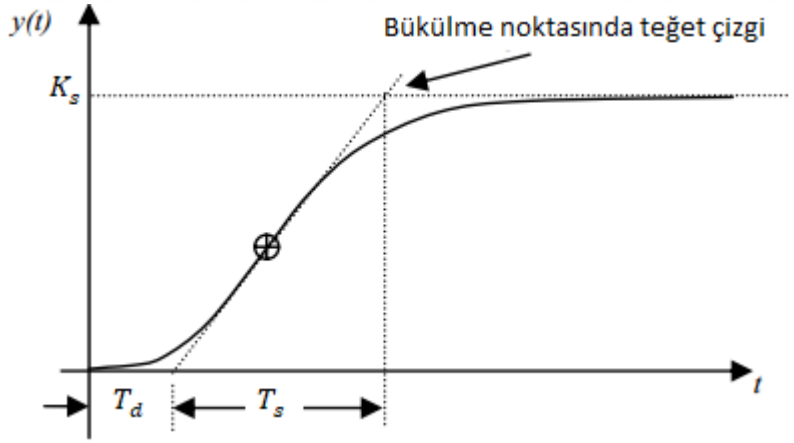
Ziegler ve Nichols [65], proses endüstrisinde, çok sayıda prosesin adım tepkilerinin bir adım tepkisi sergilediğini fark ettiler. Buna sistemin cevap eğrisi adını verdiler ve üç parametre ile T_d,T_s ve K_s karakterize ettiler. Bunlar;

T_d : Ölü zaman gecikmesi

T_s : Sistemin zaman sabiti

K_s : Sistem kazancı

şeklindedir.



Şekil 3.13: Sistemin cevap eğrisi metodu için kullanılan parametreler.

Parametreler, eğimin maksimum olduğu noktaya teğet bir çizgi çizilerek grafiksel olarak belirlenebilir. T_d parametresi bu çizginin dikey eksen kesişimiyle ve T_s yatay eksen kesişme ile belirlenir. Bu model saf bir entegratöre sahiptir, bu nedenle sürecin kararlı durum değerini yakalamaz [66]. PI ve PID kontrolörlerinin parametreleri Tablo 3.4'de gösterilmiştir

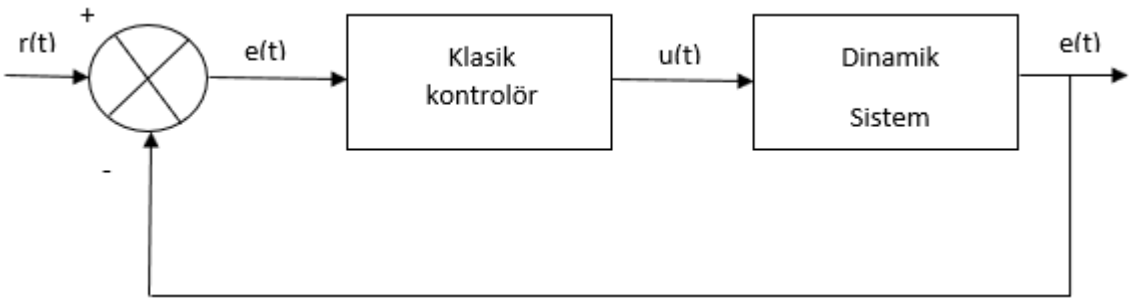
Tablo 3.4: PI ve PID kontrolör parametreleri için hesaplama tablosu.

Kontrolör Tipi	K_p	$T_i = K_p/K_i$	$T_d = K_d/K_p$
PI	$\frac{0.9T_s}{K_s.T_d}$	$3.33T_d$	-
PID	$\frac{1,2T_s}{K_s.T_d}$	$2T_d$	$0,5T_d$

Tablo 3.4'deki PI ve PID sistem cevap eğrisi yöntemine göre kullanılarak hesaplanır.

3.2.1.2. PID Kontrolör

Belki de en çok kullanılan geri besleme kontrol sistemi, PID kontrolörüdür. PID, Oransal-İntegral-Türev için kullanılan ve bir kontrol sinyali üretmek için hata sinyalinde kullanılan üç kelimeyi ifade eden bir terimdir. Şekil 3.14'da kapalı çevrim klasik dinamik kontrolör sistemi gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Kapalı çevrim Klasik dinamik kontrolör sistemi.

Eğer Şekil 3.14'taki sistemine gönderilen u(t) kontrol sinyali ise, y(t) ölçülen çıktı ve r(t) istenen çıktı ve hata e(t) = r(t) - y(t) olur [67].

PID kontrolörünün genel gösterimi

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau + K_d \frac{d}{dt} e(t) \tag{3.32}$$

şeklindedir. PID kontrolörünün transfer fonksiyonu, denklem (3.32)'nin Laplace dönüşümü alınarak

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d \mathrm{s}) \tag{3.33}$$

bulunabilir [67, 71]. Burada;

K_p: Oransal kazanç, ayar parametresi

K_i: İntegral kazanç, bir ayar parametresi

K_d: Türev kazanç, ayar parametresi

e: Hata = Ayar Noktası

t: Anlık zaman

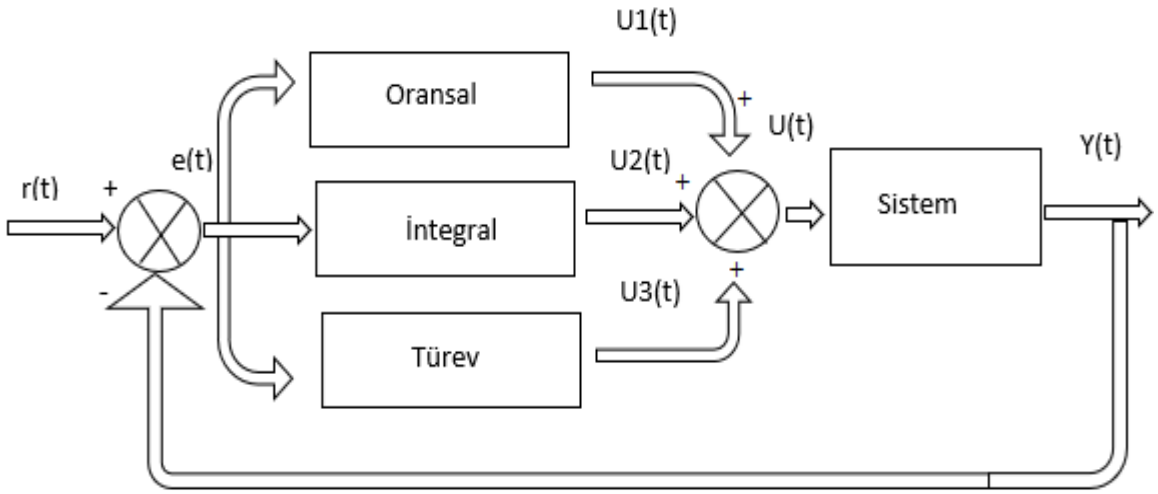
τ_i: İntegral zamanı

τ_d: Türev zamanı

şeklindedir. “Üç terim" için işlevsellikler aşağıda gösterilmiştir.

- Orantılı terim, tüm geçişlerin kazanç faktörü yoluyla hata sinyali ile orantılı olarak etkili bir kontrol eyleminin sağlanmasıdır.
- İntegral terimi, düşük frekanslar için entegratör ayarı ile kararlı durum hatalarının azaltılmasıdır.
- Türev terimi yüksek frekanslı farklılaştırıcı telafisi yoluyla geçici yanıtın iyileştirilmesidir[65,68,69,70,71, 72,73].

Aşağıdaki şekil 3.15 temel PID kontrolörün blok şeması gösterilmiştir;



Şekil 3.15: PID kontrolörün blok diyagrami.

Şekil 3.15'teki PID kontrolör sistemi üç terimden oluşmaktadır. Bu terimler sırası ile oran, integral ve türevdir. Girişe uygulanan sinyalin çıktısı bu üç terime bağlıdır.

3.2.1.3.PI Kontrolör

PI kontrolör iki avantaj sağlar: birincisi oransal etki (P) nedeniyle hızlı tepki ve ikincisi İntegral (I) etkisi nedeniyle sıfır kararlı durum hatasıdır. PID kontrolörünün genel gösterimi;

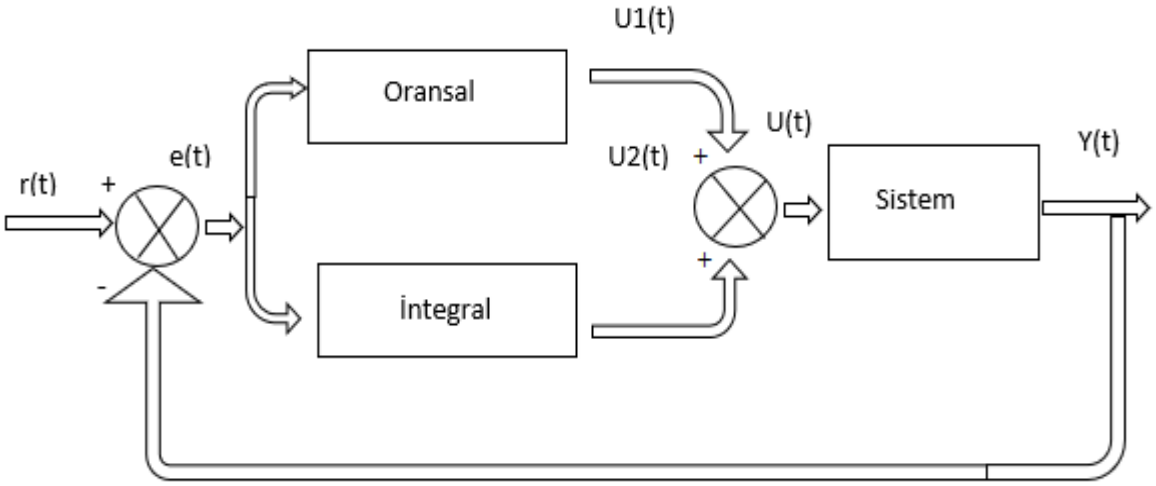
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau)d\tau \tag{3.34}$$

şeklindedir. PI kontrolörünün transfer fonksiyonu, denklem (3.34)'ün Laplace dönüşümü alınarak

$$\frac{u(s)}{e(s)} = K_p(1 + \frac{1}{\tau_i s}) \tag{3.35}$$

bulunabilir [67, 71].

Aşağıdaki şekil 3.16 temel PI kontrolörün blok şeması gösterilmiştir;



Şekil 3.16: PI kontrolörün blok diyagrami.

Şekil 3.16'daki PI kontrolör sistemi iki terimden oluşmaktadır. Bu terimler sırası ile oran ve integraldir. Girişe uygulanan sinyalin çıktısı bu iki terime bağlıdır.

3.2.2. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Yapay arı kolonisi algoritması ilk olarak 2005 yılında Derviş Karaboğa tarafından önerilmiştir [74]. İş bölümü ve kendi kendini örgütleme arı kolonisinin ana bileşenleridir. Kapsanan birimlerin her biri kendi kendini organize eden bir çerçevede yerel uyaranlara bireysel olarak yanıt verebilir ve herhangi bir merkezi düzenleme olmadan iş bölümü yoluyla genel bir görev elde etmek için birlikte hareket edebilir.

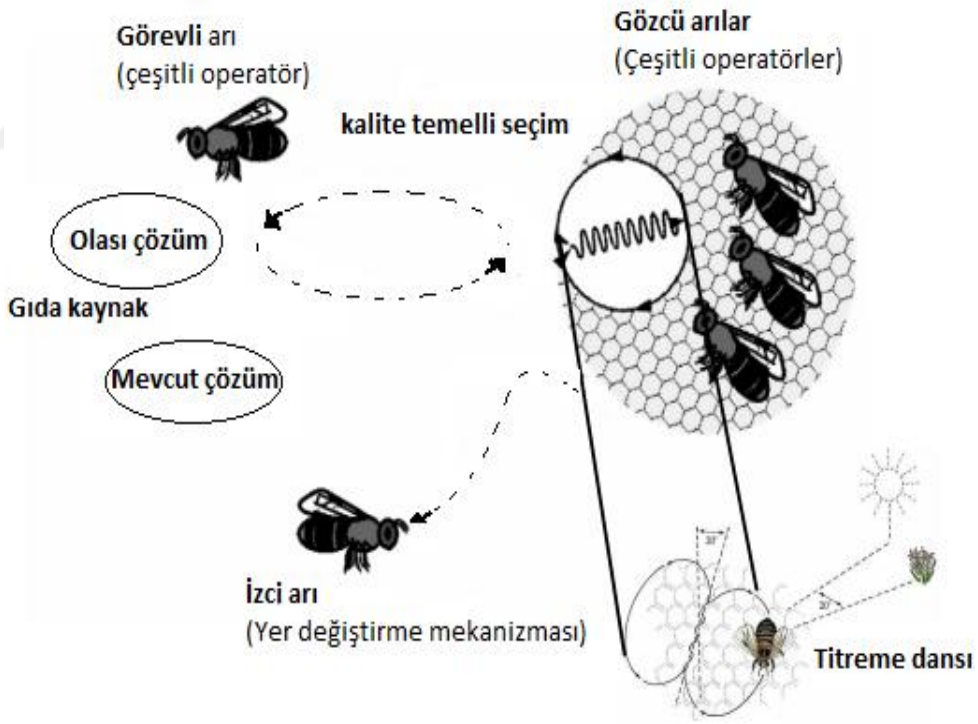
Yapay arı kolonisinin çalışma prensibi üç ana bölümden oluşur;

- Gıda kaynakları: Arıların kovan çevresindeki gıda kaynaklarını bulma ve nektarı bu gıda kaynaklarından kovana aktarma görevi vardır. Arılar için bir gıda kaynağının kalitesi, kovandan uzaklığı ve nektarı çıkarmak için harcanan enerji önemlidir.
- Görevli arılar ya da işçi arılar, kovan ile gıda kaynağı arasında nektar taşımakla görevlendirilir. Gıda kaynağının kalitesi ve yeri hakkındaki bilgileri, ziyaret ettikleri gıda kaynağıyla ilgili diğer arılara iletmekten de sorumludurlar. Görevli arılar, gıda kaynağı bitene kadar görevlerine devam ederler.
- Görevsiz arılar ya da işsiz arılar, izci arılar ve gözcü arılar olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir. İzci arılar ulaşılan kovana bitişik yeni yiyecek kaynakları ararlar. Gözcü arılar, sömürü için bir yiyecek kaynağı bulmak için arı kovanı dansını analiz eder.

Dans için farklı dans tipleri mevcuttur. Sergilenen danslar kovandan kaynağa olan mesafeye göre değişir. Bu tür danslar kuyruk dansı (waggle dans), dairesel dans (round dance) ve titreme dansı (tremble dance) olarak sınıflandırılabilir.

- Kuyruk dansı, diğer arılara güneş ışığına ilişkin besin kaynağının yerini anlatır ve çalışan arılar, kaynak kovandan uzakta ise bu tür dansı seçer. Dans hızı, kovandan gıda kaynağına olan mesafeyi ifade eder.
- Dairesel dans, gıda kaynağının yönünü anlatmaz, ancak gıda kaynağı kovana yakın olduğunda arı bu dansı yapar.
- Titreme dansı, bir arı nektarı boşaltmak için daha uzun bir zaman aldığında titremeye başlar ve gıda kaynağının mevcut karlılığından emin olmadığını gösterir, çünkü başkalarını uyarmak çok zaman almıştır.

Bu akıllı yem arama mekanizması şekil 3.17'de gösterilmiştir.



Şekil 3.17: Basitleştirilmiş yem arama mekanizması.

Şekil 3.17’de gösterildiği gibi arılar ile gıda kaynağı arasındaki ilişki anlatılmıştır.

3.2.2.1.Başlangıç Gıda Kaynaklarının Üretilmesi

Yapay arı kolonisi algoritmasında yapılması gereken ilk adım, gıda kaynaklarının aranan çözelti boşluğuna yerleştirilmesidir. D. Karaboga [74] ilk başta her bir besin kaynağının xi 'nin D-boyutlu bir vektör olduğu besin kaynakları (SN) için sürekli dağıtılan bir sürü düşünmüştür. Aşağıda besin kaynaklarını bulmak için denklem bulunmaktadır [74,75];

$$x_{ij} = x_{minj} + rand[0,1](x_{maxj} - x_{minj}), \forall j = 1,2,\dots,D, i = 1,2,\dots SN \quad (3.36)$$

Burada;

x_{minj} : j 'nin alt sınır

x_{maxj} : j 'nin üst sınır

şeklindedir ve rand [0,1] belirli bir aralıkta [0,1] eşit olarak dağıtılmış rasgele sayıyı gösteren bir değerdir .

3.2.2.2. İşçi Arılar Aşaması

Bu adımda, çalışan arılar mevcut çözümü bireysel deneyim bilgilerine ve yeni çözümün uygunluk (fitness) değerine göre ayarlar. Eski gıda kaynağının uygunluk değeri yeni gıda kaynağından düşükse, çalışan arı yenisiyle güncellenir ve eskisi yok sayılır [75].

Durum güncelleme denklemi aşağıdaki denklem (3.37) 'da gösterilmiştir.

$$v_{ij} = x_{ij} + \emptyset_{ij}.(x_{ij} - x_{kj}) \quad (3.37)$$

Burada, $\emptyset_{ij}.(x_{ij} - x_{kj})$ adım boyutu olarak tanımlanır, x_i bir arının mevcut pozisyonunu temsil eder, x_k rastgele seçilen arıdır ve $\emptyset_{ij}$[–1, 1] arasında rastgele bir sayıdır. $k \in \{1,2,\dots,SN\}$ ve $j \in \{1,2,\dots,D\}$ rastgele seçilen iki endeksi temsil eder. k, adım boyutunun önemli bir katkısı olması için i'den farklı olmalıdır. $x_i$ve x_j arasındaki fark azaldıkça, yani çözeltiler özdeş olduğu için, x_{ij} parametresindeki değişiklik miktarı (3.37) denkleminden görülebildiği gibi azalır. Bunun yanı sıra, bölgesel olarak optimal çözüme yaklaştıkça değişim miktarı uyarlanabilir şekilde azalmaktadır. Bu sürecin bir sonucu olarak, oluşturulan v_{ij}

önceden belirlenmiş parametre limitlerini aşarsa, j parametrenin üst veya alt limit değerlerine kaydırılır.

$$v_{ij} = \begin{cases} x_j^{min}, & v_{ij} < x_j^{min} \\ v_{ij}, & x_j^{min} \leq v_{ij} \leq x_j^{max} \\ x_j^{max}, & v_{ij} > x_j^{max} \end{cases} \quad (3.38)$$

Sınırlar boyunca üretilen parametre vektörü yeni bir kaynak sağlar ve kalitesini ölçer ve bir uygunluk değeri atar.

$$fitness_i = \begin{cases} \frac{1}{1+f_i} & f_i \geq 0 \\ 1 + abs(f_i) & f_i < 0 \end{cases} \quad (3.39)$$

Burada f_i, v_i değerini gıda kaynağı ile uygunluk değerini tanımlar. Uygunluğun değerini belirlerken sorunun karmaşıklığı ön plana çıkmaktadır, yani uygunluğun ölçülmesi, sorunun minimalizasyon veya maksimizasyon olup olmadığına göre yapılır. Seçilen gıda kaynağının çözüm değeri, uygunluk değerine göre belirlenmelidir. Elde edilen çözelti önceki çözeltiden daha kötüyse, sayaç artırılacak ve varsayılan sınır değeri ile karşılaştırılacaktır. Bu nedenle, önceki çözüm değerinden daha iyi bir çözelti değeri elde edilirse sayaç sıfırlanır.

3.2.2.3.Gözcü Arılar Aşaması

İşçi arıların fazı tamamlandıktan sonra, gözcü arıların aşaması başlar. Bu aşamada, tüm işçi arılar, kovandaki gözcü arılarla güncellenmiş çözümlerin (gıda kaynakları) uygunluk bilgilerini (nektar) ve konum bilgilerini paylaşırlar.

Gözcü arılar mevcut bilgileri değerlendirir ve p_i olasılığı olan fitness (uygunluk) ile ilgili bir çözüm seçerler. Pi olasılığı aşağıdaki ifade (3.40) kullanılarak belirlenebilir.

$$p_i = \frac{fit_i}{\sum_{i=1}^{SN} fit_i} \quad (3.40)$$

Burada fit_i, i'inci çözümün uygunluk değeridir. İşçi arıların bir önceki aşamasına benzer şekilde, gözcü arı hafızasındaki pozisyonda bir değişiklik üretir ve aday kaynağın uygunluğunu test eder. Kondisyon bir öncekinden daha yüksekse, arı yeni pozisyonu ezberler, eski pozisyonu yok sayar.

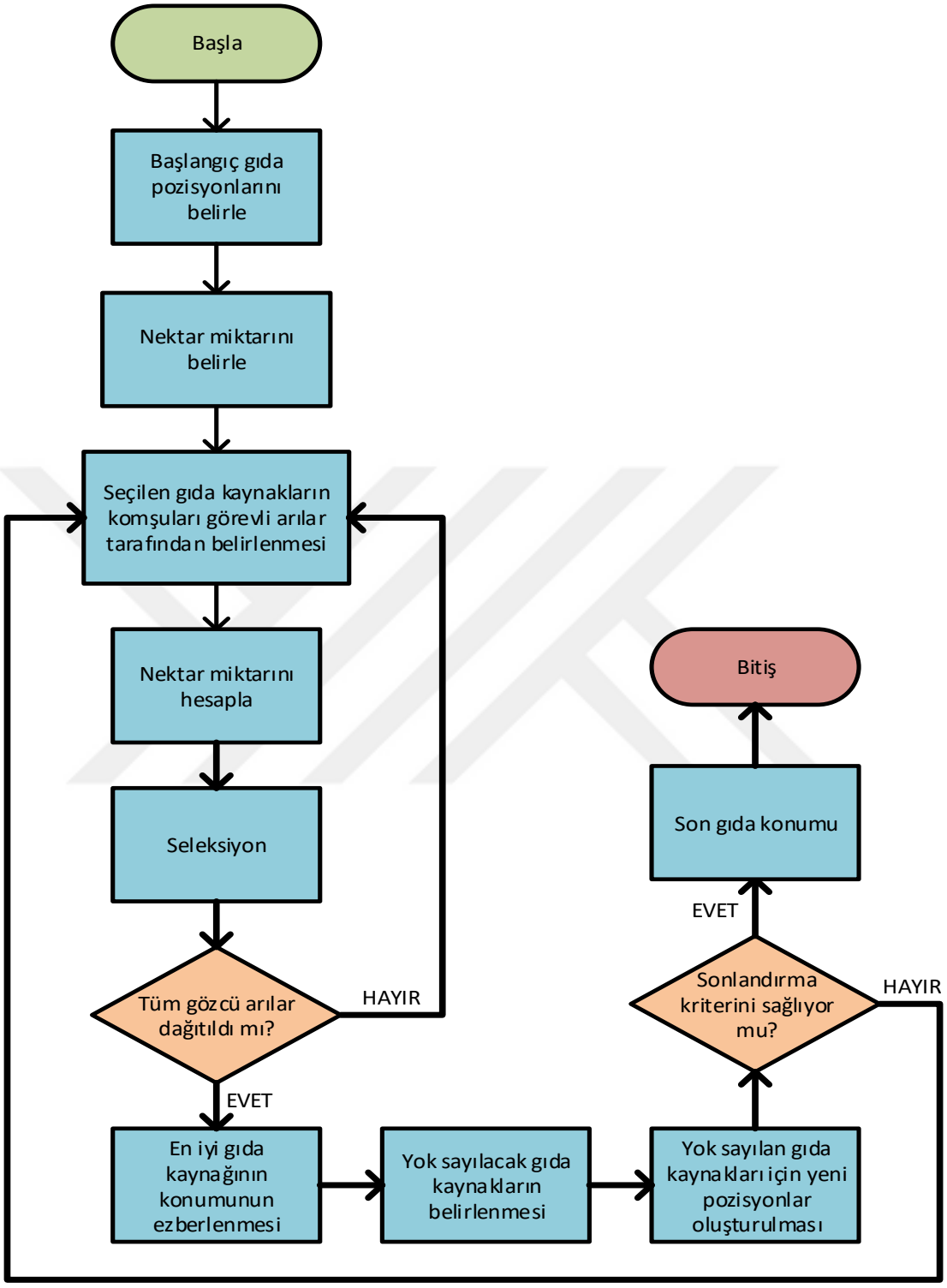
3.2.2.4.İzci Arılar Aşaması

İzci arılar aşaması, gıda kaynağı konumu belirtilen sayıda döngü için güncellenmediğinde ve gıda kaynağının yok sayıldığı varsayıldığında başlatılır. Bu adım sırasında yok sayılmış gıda kaynağı ile ilişkili arı, işçi arı olur ve arama alanı içindeki gıda kaynağı, rasgele seçilen gıda kaynağı ile değiştirilir.

İzci arı, denklem (3.36) yardımıyla yeni bir gıda kaynağı üretir[76,77,78].

3.2.2.5.YAK'nın Algoritması

YAK algoritmasının ana adımları akış diyagramında aşağıdaki şekil (3.18)'de özetlenmiştir [75].



Şekil 3.18: Yapay arı kolonisi akış diyagramı.

Şekil 3.18'deki gösterilen YAK algoritması sayesinde gıda konumları elde edilir ve algoritmasının ayrıntılı kod dizisi şeklinde Tablo 3.5'te verilmiştir [7].

Tablo 3.5: Standart Yapay Arı Kolonisi algoritması.

1	i = 1, 2,…, SN için SN gıda kaynağı konumlarını x_i başlat.
2	(3.39) kullanarak gıda kaynağının her yerinin uygunluğunu belirle.
3	Tekrarla.
4	vi'yi kullanarak yeni bir gıda pozisyonu oluşturmak için her bir gıda pozisyonunu xi kes (3.37).
5	(3.39) kullanarak her yeni çözeltiyi vi belirleyin. Vi, xi'den daha iyiyse vi'yi xi yerine koymayı düşün.
6	(3.40) kullanarak her gıda kaynağı için konum xi ile ilişkili olasılık pi'yi hesapla.
7	Orantılı olarak pi oranına bağlı olarak, gözlemlenen her arı için bir besin kaynağı xi'ye ata.
8	Her gözcü arının gıda kaynağını x (3.37) kullanarak bozarak yeni gıda pozisyonu vi oluştur.
9	Her yeni çözeltiyi vi (3.39) ile belirleyin. Vi, xi'den daha iyiyse vi'yi xi yerine koymayı düşün.
10	Son limit döngülerindeki bir gıda kaynağı ilerlemediyse, (3.36) tarafından oluşturulan gıda kaynağı xi ile rastgele yerleştirilmiş yeni bir izci arı ile değiştir.
11	Şimdiye kadar bulunan gıda kaynağının en iyi yerini ezberle.
12	Çevrim sayacını ayarlama C = C + 1.
13	C = Maksimum döngü sayısı (MCN) kadar.
14	Şimdiye kadar bulunan gıda kaynağı için en iyi yeri seç.

3.2.3. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO), ilk kez 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından tanıtılan popülasyon tabanlı bir optimizasyon yöntemidir [79]. PSO'nun temel konsepti ilk önce hayvanların optimizasyon problemlerini çözmek için kuş sürüsü gibi sosyal eylemlerinin simülasyonundan etkilenmiştir. PSO'da bir sürü popülasyonu temsil ederken bir partikül popülasyonun her bir üyesini ifade etmektedir [79,80].

3.2.3.1.PSO Algoritması

Temel PSO'da, her parçacık D boyutlu bir alanda sayısal optimizasyon problemine potansiyel bir çözüm olarak kabul edilir. Her parçacığın bu arama alanında kendisine ait bir konumu ve

hızı vardır. Parçacık yeri $X_i = x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id}$ ile tanımlanır. Bir parçacığın hızı $V_i = v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{id}$olarak tanımlanır. Her parçacık, parçacığın şimdiye kadar karşılaştığı en iyi yeri koruyan bir yerel belleğe (p_{best}) sahiptir. Global olarak paylaşılan (g_{best}) bellek, şu ana kadar bulunan en iyi global konumu temsil ediyor. Bu tür bilgiler, aşağıdaki denklemi kullanarak her bir parçacığın uçuş hızı ile ilgilidir;

$$v_i = v_i + \varphi_1 \times rand \times \left(p_{best,i} - x_i\right) + \varphi_2 \times rand \times (g_{best} - x_i) \quad (3.41)$$

Sonra güncellenen pozisyon aşağıdaki gibidir;

$$x_i = x_i + v_i \quad (3.42)$$

Burada φ_1 ve φ_2 hız değişkeni için yaklaşımın verimliliğini artıran bir üst sınır tanımlayan pozitif sabitlerdir.

3.2.3.1.1. Küresel En İyi PSO

En iyi küresel PSO (veya g_{best} PSO), her parçacığın tüm sürü içindeki konumunun en uygun parçacık tarafından belirlendiği bir yöntemdir. Tüm parçacıklardan sürülerde toplanan sosyal bilginin toplandığı yıldız sosyal ağının bir topolojisini kullanır [81,82].

Her bir parçacık, i∈[1,…,n] burada n>1, x_i arama alanında bir konuma, geçerli bir hıza, v_i ve arama alanında kişisel en iyi konuma sahiptir, $p_{best,i}$. $p_{best,i}$ 'nin kişisel en iyi konumu, arama alanında, I parçacığının, bir minimizasyon sorunu göz önünde bulundurularak, objektif işlev f tarafından hesaplanan en düşük değere sahip olduğu konuma karşılık gelir.

$$P_{best,i}^{t+1} = \begin{cases} P_{best,i}^{t} \text{ eğer } f(x_i^{t+1}) > P_{best,i}^{t} \\ x_i^{t+1} \quad \text{eğer } f(x_i^{t+1}) \leq P_{best,i}^{t} \end{cases} \quad (3.43)$$

Burada $f: \mathbb{R}^n \to \mathbb{R}$ uyumluluk fonksiyonudur. En iyi küresel pozisyon, zaman adımında şu şekilde belirlenir;

$$G_{best} = min\{P_{best,i}^{t}\}, burada\ i \in [1, \dots, n] \text{ ve } n > 1 \quad (3.44)$$

Parçacığın gbest PSO'sunun hızı şu şekilde tanımlanır;

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^{t} + c_1 r_{1j}^{t}\left[P_{best,i}^{t} - x_{ij}^{t}\right] + c_2 r_{2j}^{t}[G_{best} - x_{ij}^{t}] \quad (3.45)$$

Burada,

v_{ij}^{t} : t zamanında j boyutundaki partikül i'in hız vektörü

x_{ij}^{t} : t zamanında j boyutundaki konum vektörü veya i parçacığı

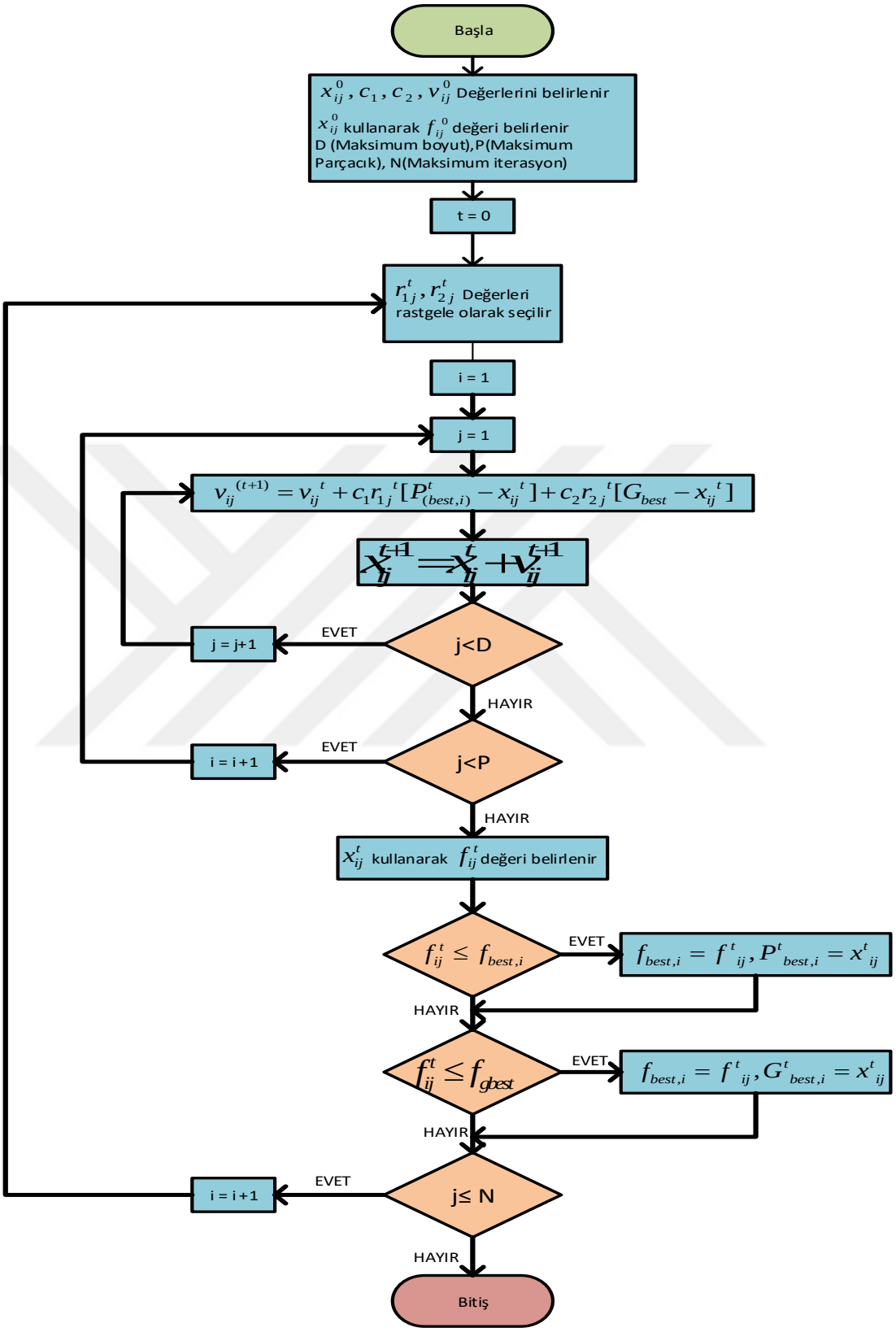
$P_{best,i}^{t}$: j boyutundaki t parçacığının kişisel zaman içindeki en iyi konumu

G_{best} : j boyutunda t zamanına göre partikül i'in küresel en iyi pozisyonu

c_1, c_2 : pozitif hızlanma sabitleri

r_{1j}^{t}, r_{2j}^{t} : t zamanında eşit dağılımlı U(0,1) dağılımından rastgele sayılar

olarak tanımlanmıştır ve bu süreç aşağıdaki akış şeması (3.19)'da gösterildiği gibidir.



Şekil 3.19: G_{best} akış diyagramı.

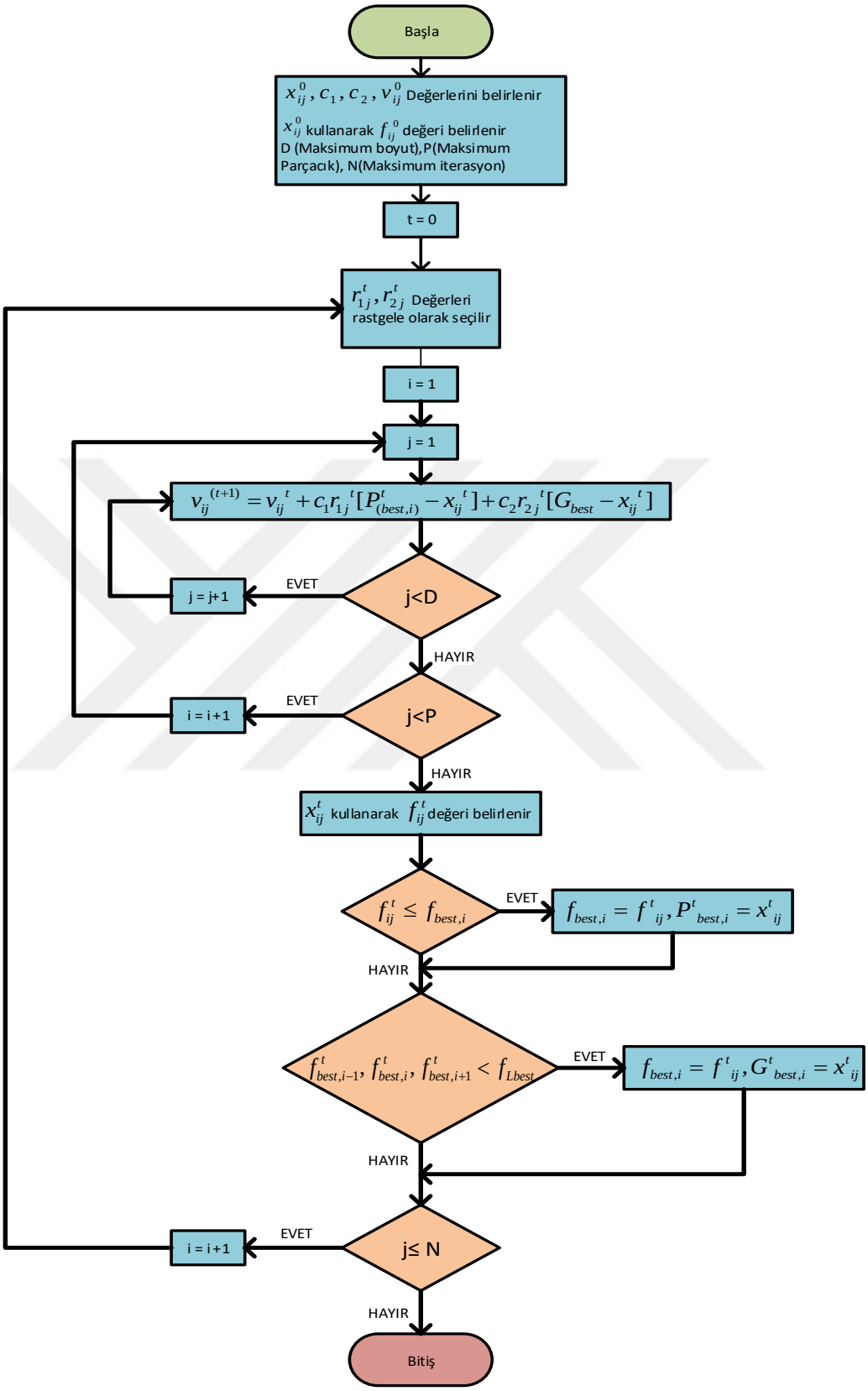
Şekil 3.19'da küresel en iyi PSO algoritması verilmiştir.

3.2.3.1.2. Yerel En İyi PSO

En iyi yerel PSO (veya en iyi PSO) yöntemi, sadece her parçacığın, komşularından seçilen en uygun parçacığın etkilenmesine izin verilir ve halkanın sosyal topolojisini temsil eder. Burada bu sosyal bilgi parçacık topluluğu içinde paylaşılmış ve yerel çevre bilgisini ifade etmiştir [80,82,83]. Bu durumda, partikül i hızları denklem 3.46'daki gibidir.

$$v_{ij}^{t+1} = v_{ij}^{t} + c_1.r_{1j}^{t}\left[P_{best,i}^{t} - x_{ij}^{t}\right] + c_2.r_{2j}^{t}[L_{best} - x_{ij}^{t}] \quad (3.46)$$

Burada, $Pbest_i$, t boyunca herhangi bir parçacığın parçacık komşuluğuna sahip olduğu en iyi konumdur. ve bu süreçte aşağıdaki akış şeması (3.20)'da gösterildiği gibidir.

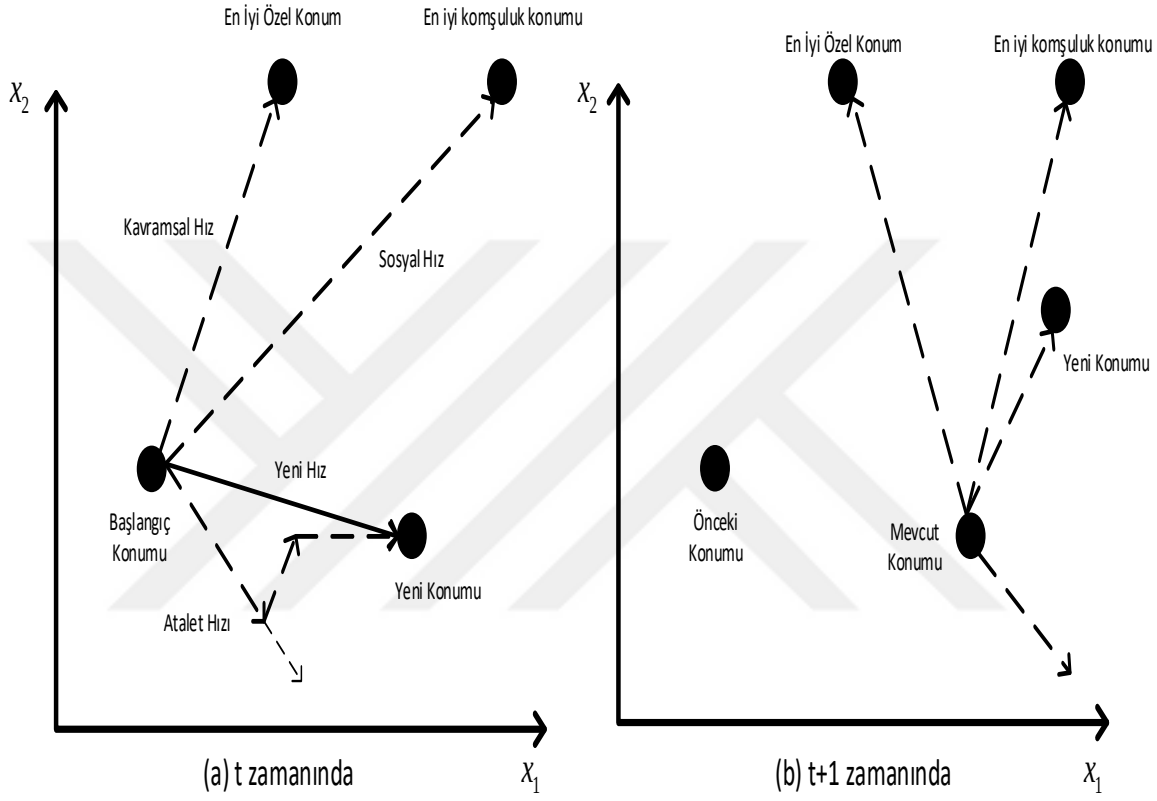


Şekil 3.20: L_{best} akış diyagramı.

Şekil 3.20'de yerel en iyi PSO algoritması verilmiştir.

3.2.3.2.PSO'nun Geometrik Gösterimi

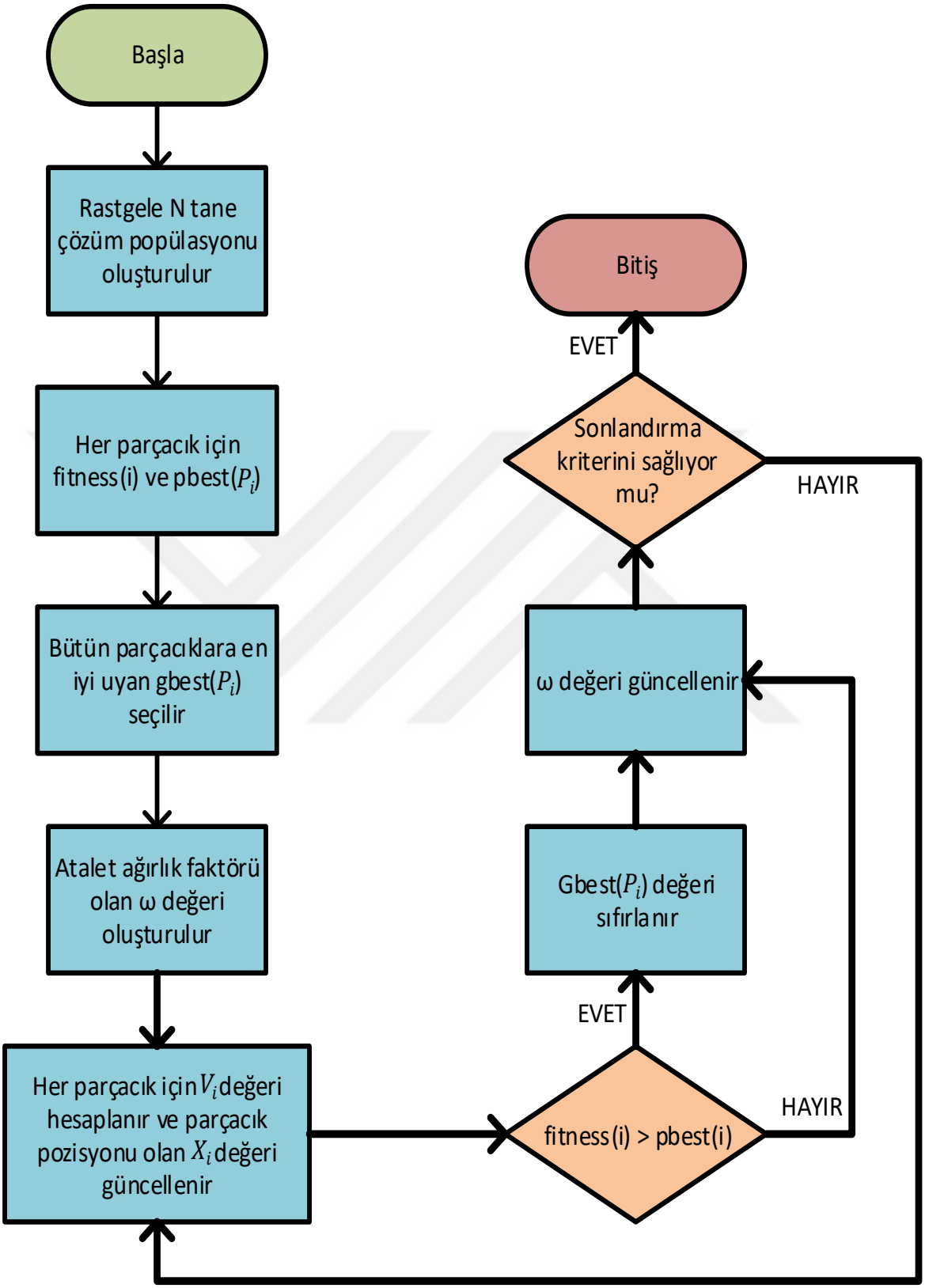
Parçacık güncelleme hızı, (3.45) ve (3.46) 'de tanımlandığı gibi üç bölümden oluşur. İki boyutlu bir arama alanı içinde tek bir parçacık hareketi şeklinde düşünülebilir [79]. Şekil 3.21'de parçacığın hareketi gösterilmektedir.



Şekil 3.21: İki boyutlu bir arama alanındaki parçacık için konum ve hız güncellemesi.

Şekil 3.21'de üç hız bileşeninin parçacığı zaman adımlarında ve sırasıyla küresel en iyi konuma doğru nasıl hareket ettirdiğini göstermektedir.

PSO algoritmasının ana adımları aşağıdaki gösterilen akış diyagramı 3.22'de özetlenmiştir.

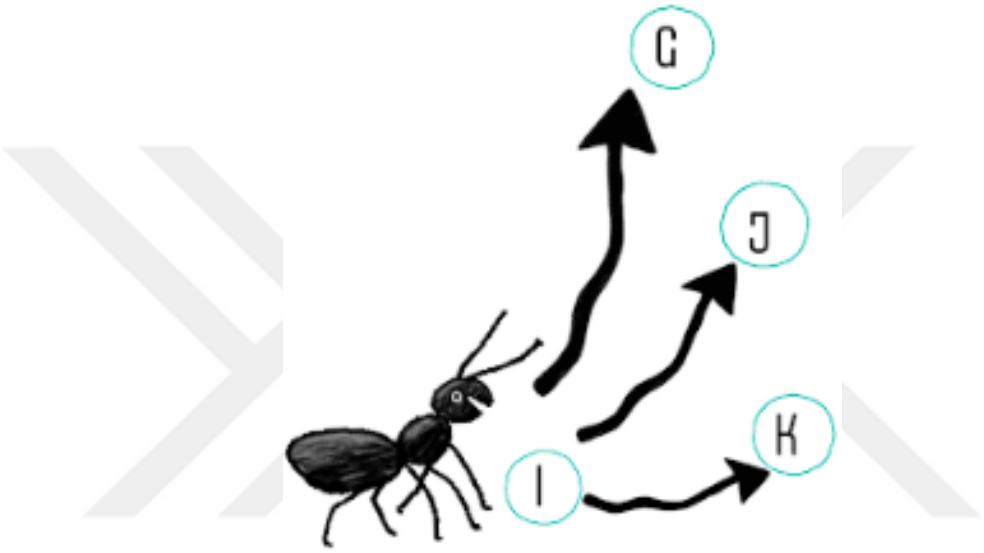


Şekil 3.22: PSO algoritmasının akış diyagramı.

Sekil 3.22'de PSO algoritmasının akış şeması gösterilmiştir.

3.2.4. Karınca Kolonisi Optimizasyonu

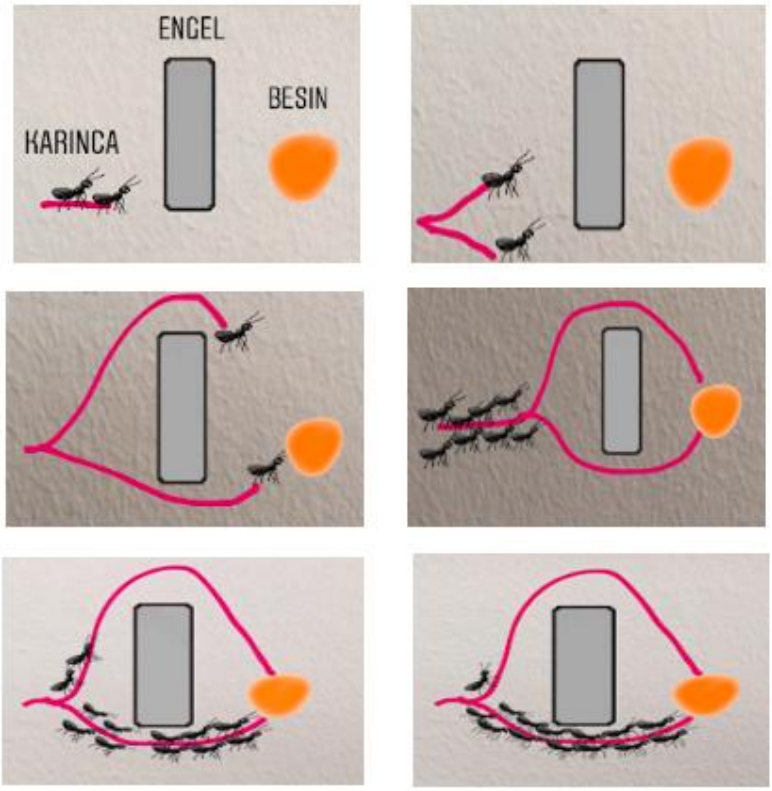
1990'ların başında Marco Dorigo karınca kolonisi optimizasyonunu (KKO) geliştiren ilk kişi oldu [84,85]. Karınca kolonisi optimizasyonu, temel olarak doğadan ilham alan, özellikle yiyecek kaynakları ve yuva arasındaki en kısa ve en hızlı yolları arama mekanizmasından esinlenen bir optimizasyon algoritmasıdır. Şekil 3.23'te feromon bazlı stokastik mekanizma gösterilmiştir.



Şekil 3.23: Feromon bazlı stokastik mekanizma.

Şekil 3.23'te eğer "J" yeri henüz bulunamamışsa, karınca yönü seçmek için stokastik bir mekanizma kullanır. Şekil 3.23'deki "I" yerindeki bir karınca feromonla orantılı bir olasılıkla seçebilir.

Şekil 3.24'te KKO'nun çalışma mekanizması gösterilmiştir.



Şekil 3.24: Karınca kolonisi optimizasyonun çalışma mekanizması.

Şekil 3.24'te gösterildiği gibi, karıncalar yiyecek ararken ilk önce yuvalarını çevreleyen alanı rastgele bir şekilde ararlar. Karıncalar kimyasal bir feromon izini koklayabildiğinden dolayı feromon yiyeceğe giden yola bırakılır. Doğru yolu seçmek için, ağır feromon konsantrasyonları ile karakterize edilen olasılık yollarını seçerler. Bir karınca bir besin kaynağı bulduğunda, yiyeceğin kalitesini ve miktarını analiz eder ve bazılarını yuvaya geri götürür. Yuvalamanın dönüş yolunda, yerde kalan feromon miktarı, yiyeceğin kalitesine ve miktarına bağlı olarak değişebilir. Bu nedenle, feromon izleri diğer karıncaları yiyecek kaynağını bulmaya yönlendirecektir.

3.2.4.1.Karınca Sistemi

En temel karınca kolonisi optimizasyonu algoritmasına karınca sistemi (KS) [84] denir. Kenar komşusu olan şehirler i ve j ile bağlantılı feromon τ_{ij} aşağıdaki (3.47) gibi güncellenir;

$$\tau_{ij} = (1-\rho) \times \tau_{ij} + \sum_{k=1}^{m} \Delta\tau_{ij}^{k} \tag{3.47}$$

Burada;

ρ: Buharlaşma Oranı

m: Karınca Sayısı

$\Delta\tau_{ij}^{k}$: Karınca k tarafından kenara (i, j) salgılanan feromon miktarı

$\Delta\tau_{ij}^{k}$ denklem 3.48'deki gibidir.

$$\Delta\tau_{ij}^{k} = \begin{cases} Q/L_k \text{ eğer karınca k tur atarken } (i,j) \text{ kenarından geçtiyse,} \\ 0 \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \text{yoksa} \end{cases} \tag{3.48}$$

Burada;

Q: Sabit

L_k : Karınca k tarafından atılan turun uzunluğu

olarak tanımlanmıştır. Karıncalar, bir çözüm oluşturulurken stokastik bir süreçle ulaşılacak ilgili alanı seçerler. Eğer karınca k alan I'da ise ve şu ana kadar kısmi çözüm olan s^p oluşturulmuşsa, j alanına hareket etme olasılığı (3.49) şekilde verilir;

$$p_{ij}^{k} = \begin{cases} \dfrac{\tau_{ij}^{\alpha} \times \eta_{ij}^{\beta}}{\sum c_{il \in N(s^p)} . \tau_{il}^{\alpha} \times \eta_{il}^{\beta}} \text{ eğer } c_{il} \in N(s^p), \\ 0 \qquad\qquad\qquad\qquad\qquad\qquad \text{yoksa} \end{cases} \tag{3.49}$$

Burada;

$N(s^p)$: Mümkün elemanlar kümesi

l: Ziyaret edilmemiş alan

α, β: Sezgisel bilgiye karşı feromon kontrol parametreleri

η_{ij} şöyle (3.50)'da gibi verilir;

$$n_{ij} = \frac{1}{d_{ij}} \tag{3.50}$$

Burada d_{ij}, i ve j alanları arasındaki mesafedir.

3.2.4.2.Karınca Koloni Sistemi

Karınca Koloni Optimizasyonu, karınca sisteminin bir gelişmiş versiyonudur ve en popüler olan ve yaygın olarak kullanılan KKO algoritmalarından biridir. Feromonu güncellemek için yapı sonunda yerel bir feromon değiştirilir[86,87]. Her inşaat aşamasından sonra yerel feromon güncellemesi tüm karıncalar tarafından gerçekleştirilir;

$$\tau_{ij} = (1 - \varphi) \times \tau_{ij} + \varphi \times \tau_0 \tag{3.51}$$

Burada ;

φ : Feromon bozulma katsayısı ($\varphi \in (0,1]$)

τ_0 : Feromonun başlangıç değeri

olarak tanımlanmıştır. Çevrimdışı feromon güncellemesi, her iterasyonun sonunda, en iyi iterasyon veya şimdiye kadarki en iyi iterasyon olabilen sadece bir karınca tarafından gerçekleştirilir [88]. Güncellemenin denklemi farklıdır ve aşağıda (3.52) gösterilmiştir.

$$\tau_{ij} = \begin{cases} (1 - \rho) \times \tau_{ij} + \rho \times \Delta\tau_{ij} & eğer \text{(i,j) en iyi tura aitse,} \\ \tau_{ij} & yoksa \end{cases} \tag{3.52}$$

Burada;

$\Delta\tau_{ij} = 1/\, L_{best}$ ve : L_{best}, : $L_{i,best}$ veya : L_{best} olabilir.

L_{best}, en iyi karıncanın tur uzunluğu olarak tanımlanmıştır.

3.2.4.3.Maksimum Minimum Karınca Sistemi

Maksimum minimum karınca sistemi, en iyi karıncanın feromon izlerini ve feromonun değerinde bir sınırı güncellediği değiştirilmiş ve geliştirilmiş karınca sistemidir [89]. Denklem (3.53)'te olduğu gibi uygulanır.

$$\tau_{ij} = \left[(1 - \rho) \times \tau_{ij} + \Delta\tau_{ij}^{best}\right]_{\tau_{min}}^{\tau_{max}} \tag{3.53}$$

Burada,

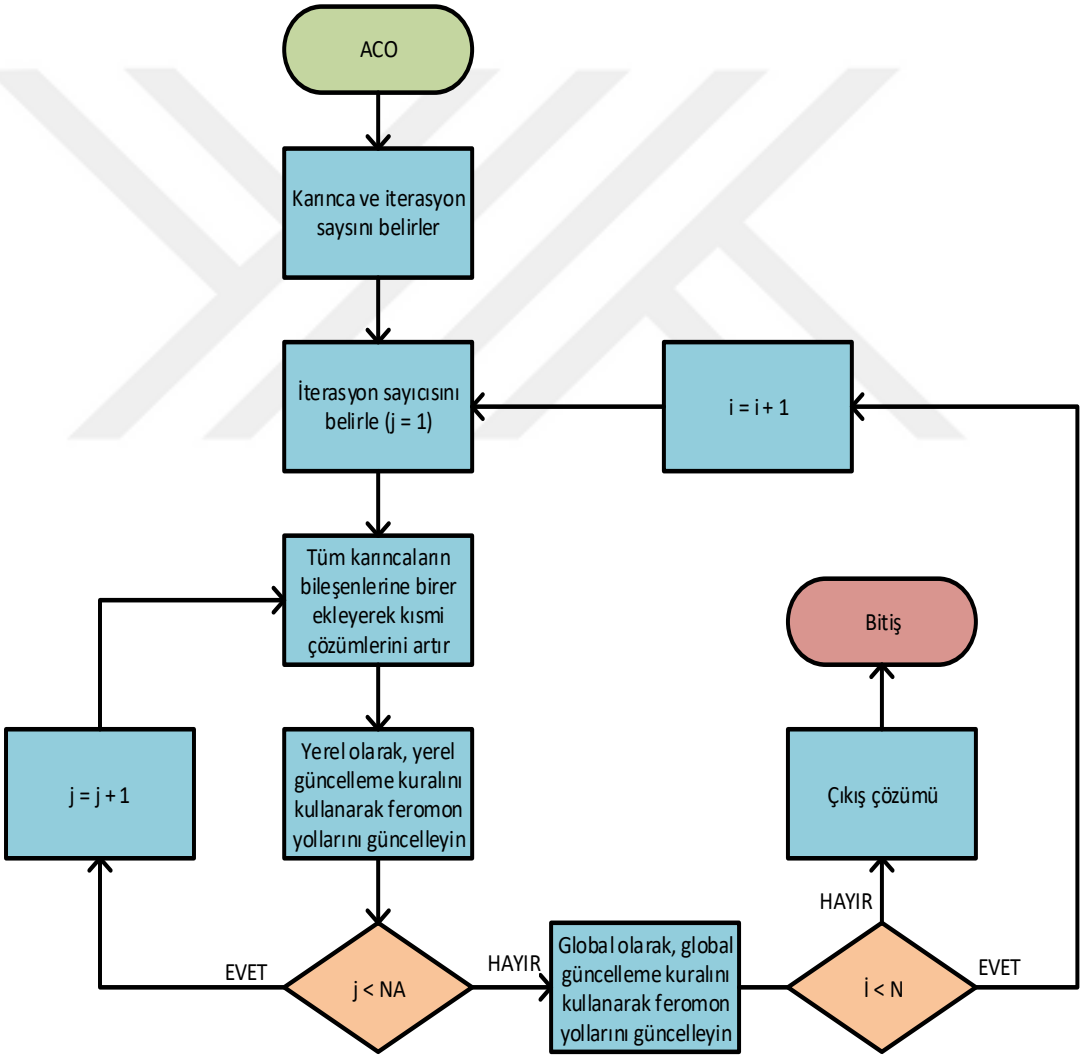
τ_{max}: Üst sınır

τ_{min}: Alt sınır

$\Delta\tau_{ij}^{best}$ aşağıdaki (3.54) gibi tanımlanır,

$$\Delta\tau_{ij}^{best} = \begin{cases} 1/L_{best} & eğer(\text{i,j}) \text{ en iyi tura aitse,} \\ 0 & yoksa \end{cases} \quad (3.54)$$

KKO algoritmasının ana adımları aşağıdaki (3.25)'te akış diyagramında özetlenmiştir.



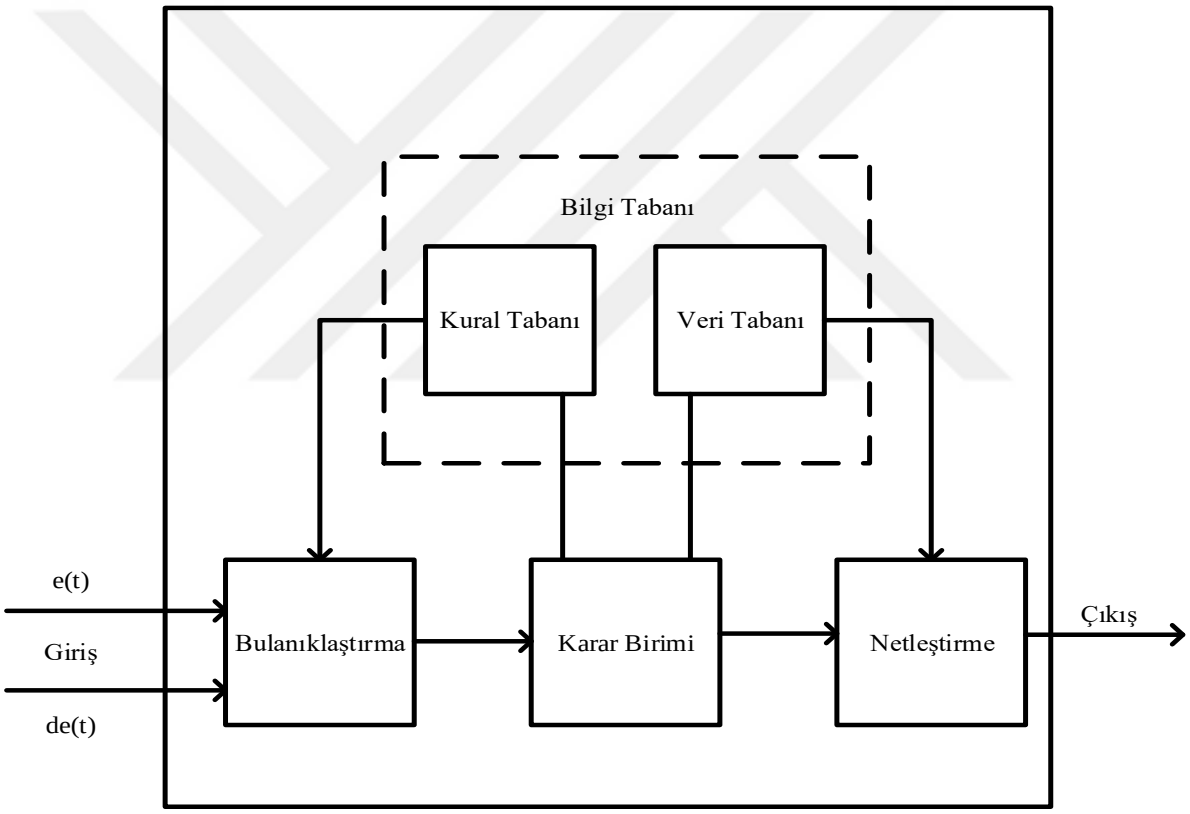
Şekil 3.25:Karınca Koloni Optimizasyonun akış diyagramı.

Şekil 3.25'te KKO algoritması ana adımları anlatılmıştır.

3.2.5. Bulanık Mantık Kontrolör

3.2.5.1.Bulanık Mantık Sistemi

Bulanık mantık, klasik setler teorisinin genelleştirilmesi olan matematiksel bulanık kümeler teorisine dayanarak Lotfi Zadeh tarafından 1965 yılında geliştirilmiştir ve Boole mantığının bir evrimidir. Bu mantık sisteminde bir koşulun doğrulanmasında derece kavramını tanıtarak, bir koşulun doğru veya yanlış dışında bir durumda olmasına izin verilebilir. Bulanık mantık, yanlışlık ve belirsizlikleri göz önünde bulundurarak, çok kayda değer bir esneklik sağlar ve bunu mümkün kılar [90]. Şekil 3.26'da bulanık mantık kontrolörünün yapısı verilmiştir.



Şekil 3.26: Bulanık kontrolörünün yapısı.

Şekil 3.26'da gösterildiği gibi bulanık sistem kavramı girdilerin bulanık değerlere dönüştürülmesi (bulanıklaştırma), kuralların değerlendirilmesi (karar birimi) ve kuralların sonucunun dijital çıktı değerine dönüştürülmesi (netleştirme) olarak üç ana aşamadan oluşur. Bulanıklaştırma adı verilen ilk adım, geleneksel verileri bulanık verilere veya üyelik fonksiyonlarına dönüştürür. İkinci adım, bulanık çıktıyı elde etmek için üyelik fonksiyonlarını

kurallarla birleştirir. Üçüncü adım ise çıkarımın bulanık sonucunun kesin bir nihai çıktı değerine dönüştürülmesinden oluşur [91,92].

3.2.5.1.1. Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma, Bulanık Mantık kontrolöründeki dijital girişleri X_i'yi [0,1] aralığında bir dizi üyelik değerine karşılık gelen bulanık kümeler U_{xi}'ye dönüştüren ilk adımdır. Üyelik fonksiyonu, her bir girişin katılım genliğinin grafik temsilidir. Birçok üyelik fonksiyonu vardır. Bunlar arasında, pratikte en yaygın kullanılan ikisi üçgen ve trapezoidal fonksiyonlarıdır. Her dilsel değişken için tanımlanacak üyelik fonksiyonlarının sayısı insan uzmanlığı kullanılarak belirlenir [93,94].

Daha önce açıklandığı gibi bir bulanık küme tamamen üyelik fonksiyonları tarafından parametrelendirilir. Üyelik Fonksiyonları, gerekli karmaşıklık ile parametreleştirilebilen bir matematiksel formül kullanılarak ifade edilir. Bunlar ayrıca tek boyutlu veya çok boyutlu olabilir. Aşağıda tek girişli tek boyutlu parametreli üyelik fonksiyonlarına birkaç örnek verilmiştir [92].

- Üçgen Üyelik Fonksiyonu, aşağıda (3.55) 'te gösterildiği gibi üç ana parametre {a, b, c} ile karakterize edilir.

$$\text{üç}gen(x;a,b,c) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \le x \le b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \le x \le c \\ 0, & c \le x \end{cases} \tag{3.55}$$

- Trapezoidal Üyelik Fonksiyonu, aşağıda (3.56) 'da gösterildiği gibi dört ana parametre {a, b, c, d} ile karakterize edilir.

$$\text{trapezoidal}(x;a,b,c) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \le x \le b \\ 1, & b \le x \le c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \le x \le d \\ 0, & d \le x \end{cases} \tag{3.56}$$

Burada {a,b,c,d}, ilişkili trapezoidal üyelik fonksiyonun dört köşesinin x koordinatlarını tanımlayan parametrelerdir (a <b <c <d).

- Gauss Üyelik Fonksiyonu; aşağıda (3.57) 'de gösterildiği gibi iki ana parametre $\{c, \sigma\}$ ile karakterize edilir.

$$gauss(x; c, \sigma) = e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-c}{\sigma}\right)^2} \quad (3.57)$$

Burada,

c: Üyelik Fonksiyonun merkezi

σ: Üyelik Fonksiyonun genişliği

olarak tanımlanmıştır.

3.2.5.1.2. Kural Tabanı

Bulanık mantıkta kurallar, uzmanın sistemin dinamiklerini ve davranışını anlamasına dayanarak formüle edilir. Bu kurallar, giriş bulanık kümeleri ile ilgili kontrol bulanık kümeleri arasındaki ilişkiyi belirtir. Genel olarak, bir kural talimat şeklini alır.

IF x is a AND y is b THEN z is c

Sonuç olarak, tanımlanan kuralların sayısı doğrudan her girdi ve çıktı değişkeni için tanımlanan alt kümelerin sayısına bağlıdır. Sistemde n giriş ve çıkış değişkenleri X_i olarak tanımlanırsa ve bu değişkenlerin her söylem evreni için bulanık alt kümeleri varsa, maksimum kural sayısı aşağıdaki ilişki (3.58) ile tanımlanır [92,95].

$$r_{max} = \prod_{i=1}^{n} m_i \quad (3.58)$$

3.2.5.1.3. Bulanık Çıkarım Sistemi

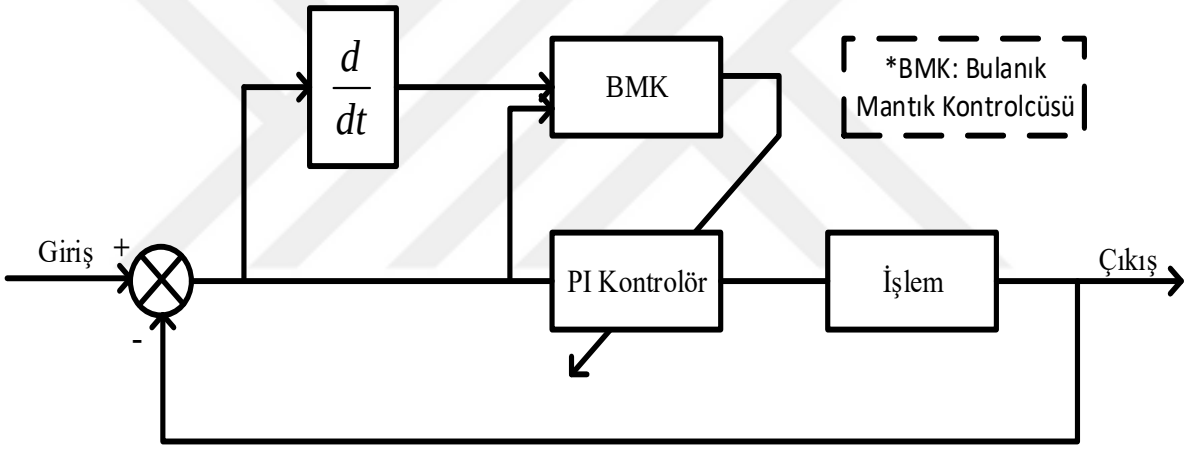
Çıkarım mekanizması, bulanık mantık algoritmasında sistemin kontrolünün en iyi şekilde yorumlanması ve uygulanması ile bilginin yorumlanması ve uygulanmasında uzman karar vermeyi taklit eden anahtar unsurdur. Hangi kuralların uygulanacağına karar verdikten sonra yapılması gereken bu adım çıktı değişkeninin bulanık kümelere üyelik derecelerini tanımlamaktan ibarettir. Bu üyelik derecelerini hesaplamak için Mamdani ve Takagi-Sugeno olmak üzere iki temel yöntem vardır. Bu aşamaya ulaşmaya izin veren birçok yöntem bulunmaktadır. Aralarındaki fark esas olarak bulanık operatörlerin (ve, veya ve değil mantık kapıları) gerçekleştirilmesi ile tanımlanır [96].

3.2.5.1.4. Netleştirme

Netleştirme bulanık mantıktaki son adımdır. Çıkarma motorunun çıkışları kontrol edilerek işleme uygulanmadan önce çıktının fonksiyonlarına ait dereceler olarak dönüştürülmelidir. Ardından yapılması gereken, bu bulanık değerleri kullanılabilecek gerçek değişkenlere dönüştürmekten ibarettir. İstenen çıktının biçimine, kontrol tipine, çıktının üyelik fonksiyonlarının tipine bağlı olarak ağırlık merkezi yöntemi, maksimum merkez yöntemi ve ortalama-maksimum yöntemi olmak üzere üç temel netleştirme yöntemi vardır [92].

3.2.5.2.Parametreleri Bulanık Mantık İle Belirlenen PI Kontrolör

Parametreleri bulanık mantık ile belirlenen PI (Fuzzy Gain Scheduled PI – FGPI) kontrolörün akış şeması Şekil 3.27'de gösterilmiştir.



Şekil 3.27: FGPI kontrolörün akış şeması.

Şekil 3.27'de gösterildiği gibi, genellikle dinamik çıkışı sistemin fonksiyonel parametrelerine göre doğrusal olmayan güç sistemleri için kontrolörlerin tasarımında kullanılan bir sistemdir. Bu genellikle sistemin dinamikleri ile çalışma parametreleri arasındaki fark verildiğinde uygulanır ve bunun için doğrusal bir zaman varyantı modeli yeterli değildir. Kazanç planlaması, farklı integral kazanç değerleri için adım frekansı sapma tepkisine bağlı olarak gerçekleştirilir. Büyük bir integral kazanım değeri durumunda, salınımının daha uzun sürmesine rağmen, sistemin maksimum aşım değeri azalır [97].

3.2.6. Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi

Uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık çıkarım sistemi (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System - ANFIS), 1992 yılında Jang tarafından önerilen bir uyarlanabilir ağ sınıfıdır. Bu sistem, doğrudan bağlantılarla birbirine bağlanan bir dizi yapay sinir hücresinden oluşur. Her yapay sinir hücresi parametreli bir fonksiyon modellemektedir; parametrelerinin değerlerinin değiştirilmesi, uyarlanabilir ağın toplam davranışı gibi işlevin de değişmesine neden olur. Düğümler işlevlerine göre uyarlanabilir düğümler (kare) ve sabit düğümler (dairesel) olmak üzere iki farklı tiptedir. ANFIS modelinin tasarımı; modelin geliştirilmesi, ağın öğrenilmesi ile sistemin onaylanması ve test edilmesi şeklinde üç aşamaya ayrılabilir [98, 99, 100, 101, 102, 103].

3.2.6.1.Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemin Yapısı

Uyarlanabilir Ağ Tabanlı Bulanık Çıkarım Sistemi, her katmanın bir bulanık çıkarım sisteminin bir basamağına karşılık geldiği 5 katmanlı birçok katmanlı algılayıcı tipi bir yapay sinir hücresi ağının kullanılmasını içeren, Takagi Sugeno tipinde uyarlanabilir bir yapay sinir hücresi ağı-bulanık çıkarım sistemidir. Burada bulanık çıkarım sisteminin iki giriş x_1 ve x_2 olduğu ve bir çıkış y olduğu varsayılmaktadır. Kural tabanının denklem (3.59) ve (3.60) 'ta gösterildiği şekilde aşağıdaki gibi iki bulanık Takagi-Sugeno kuralı içerdiği varsayılmaktadır [98,104,105,106].

Kural 1: IF x_1 is A_1 and x_2 is B_1 THEN $y_1 = p_1x_1 + q_1x_2 + r_1$ (3.59)

Kural 2: IF x_1 is A_2 and x_2 is B_2 THEN $y_2 = p_2x_1 + q_2x_2 + r_2$ (3.60)

Burada,

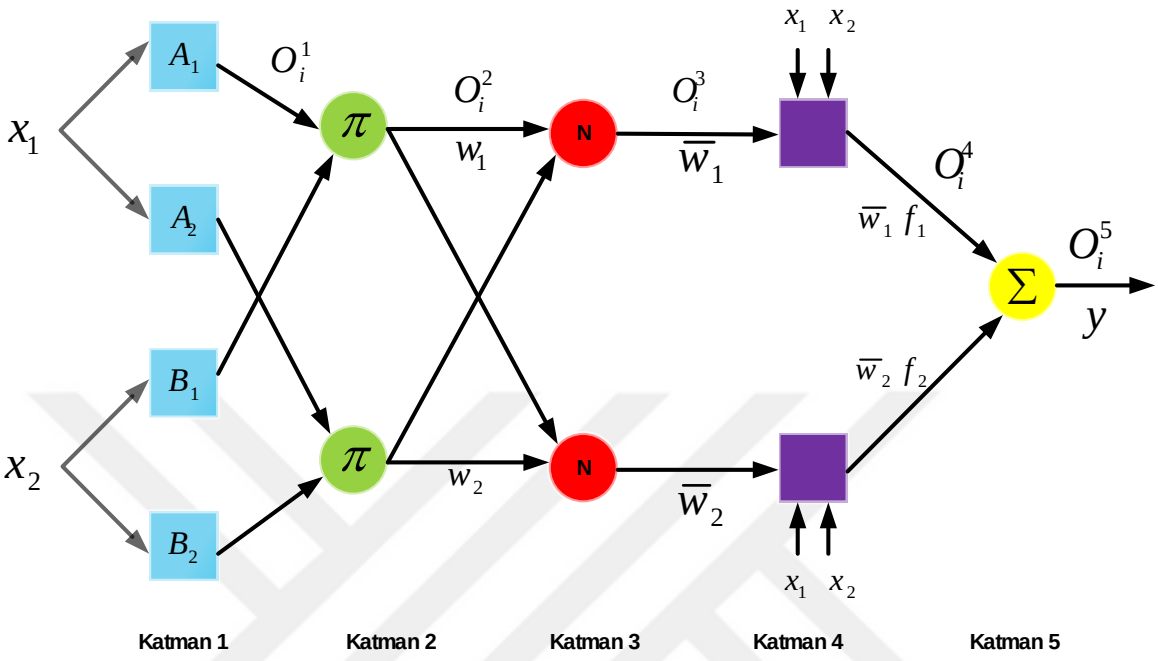
x_1 ve x_2 : Giriş değişkenleri

A_1,A_2,B_1ve B_2: Bulanık kümeleri

y_1 ve y_2: Tüm netleştirme yapay sinir hücrelerinin çıktıları

p, q ve r: Takagi-Sugeno bulanık çıkarım modelinin ardışık kısmının parametreleri

olarak tanımlanmakyadır. Jang, aşağıdaki şekil 3.28'de sunulan uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık çıkarım sistem yapısını tasarlamıştır.



Şekil 3.28:Uyarlanabilir ağ tabanlı bulanık çıkarım sistem yapısı.

Şekil 3.28'de gösterilen ANFIS'in temel yapısı aşağıdaki gibi tanımlanabilir [98, 99];

- İlk katman (Bulanıklaştırma Katmanı)

ANFIS tipi bir yapının ilk katmanı, gösterilen çıkarım sisteminde bulanık alt kümeler kadar çok yapay sinir hücresine sahiptir. Her yapay sinir hücresi, transfer fonksiyonu ile belirli bir bulanık alt kümenin gerçek derecesini hesaplar. Bu fonksiyonun seçimine ilişkin tek kısıt, farklılaşabilmesi ile ilgilidir. Bu katmanın her düğümü, (3.61) ve (3.62) denklemlerinde gösterildiği gibi bir işleve sahiptir.

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x_1);\ i = 1,2 \tag{3.61}$$

$$O_i^1 = \mu_{B_{i-2}}(x_2);\ i = 3,4 \tag{3.62}$$

Burada; x_1 ve x_2 ,giriş düğümleri, A_i ve B_{i-2}: μ_{A_i} ve $\mu_{B_{i-2}}$ üyelik işlevleri ile ilişkili dil terimleridir.

Birinci katmanın O_i^1 çıkışları bu nedenle x_1, x_2 giriş değişkenlerinin bulanık kümeleri A_i B_{i-2} 'ye ait olma derecelerini temsil eder.

Jang modelinde üyelik fonksiyonları denklem (3.63)'te verildiği gibi Gauss'lardır.

$$\mu_{A_i}(x) Ou\ \mu_{B_i}(x) = \exp\left(-\frac{(x_i - c_i)^2}{a_i}\right) \tag{3.63}$$

Seçime göre parametrelerin (a_i, b_i, c_i), öncülün parametrelerinin adı ile belirtildiği ve karşılık gelen üyelik işlevlerini tanımladığı. Aslında, üçgen veya yamuk gibi tüm sürekli ve türetilebilir fonksiyonlar kullanılabilir.

- İkinci Katman (Kural Katmanı):

İkinci katman, her bulanık kural için bir düğüm tarafından oluşturulur ve sinaptik ağırlıkları oluşturur. Bu sabit tip düğümler Π sembolü ile gösterilir ve her biri, denklem (3.64) 'te ele alınan kuralın ait olma derecesine karşılık gelen, girdilerinin ürününü (bulanık mantığın operatörü VE operatörü) üretir.

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(x); i = 1,2 \tag{3.64}$$

- Üçüncü katman (Normalizasyon Katmanı):

Üçüncü katman, kuralların aktivasyon derecesini normalleştirir. Bu katmandaki N ile gösterilen daire yapay sinir hücresidir. i. yapay sinir hücresi, i. yapay sinir hücresi ağırlığı ile i. yapay sinir hücresine kadar olan ağırlıkların toplamının oranını hesaplar. Buna ağırlıkların normalleştirilmesi denir ve ilişkideki (3.65) gibi temsil edilir. Bu katmanın tüm çıktılarına normal ağırlıklar denir.

$$O_i^3 = \overline{w_1} = \frac{w_i}{w_1 + w_2}\ ; i = 1,2 \tag{3.65}$$

Burada, $\overline{w_1}$ katman 3'ün normalize edilmiş çıktısını temsil etmektedir.

- Dördüncü katman (Netleştirme katmanı):

Bu katman, kuralların sonuç kısmının (p,q,r) parametrelerini belirlemek için kullanılır. Bu katmandaki her yapay sinir hücresinin fonksiyonu (3.66) 'da aşağıdaki gibidir.

$$O_i^4 = \overline{w_i} f_i = \overline{w_i}.(p_i x_1 + q_i x_2 + r_i)\ ; i = 1,2 \quad (3.66)$$

Burada, $(p_i, q_i\ , r_i\ )$ kurali i için çıkış parametreleri kümesidir ve f_i i'inci dereceden polinomdur.

- Beşinci katman (Toplama katmanı):

Beşinci katman, bir önceki katmanın çıktılarının toplamını hesaplayarak ANFIS çıktısını sağlayan tek bir yapay sinir hücresi içerir. Aynı zamanda ağın çıktısı olan çıktısı aşağıdaki ilişki ile belirlenir (3.67).

$$O_i^5 = y = \sum_{i=1} \overline{w_i}.f_i = \frac{\sum_{i=1} w_i f_i}{w_i}\ \ ;\ \ i = 1,2 \quad (3.67)$$

Yukarıda anlatılan katmanların özeti tablo 3.6'da gösterilmiştir.

Tablo 3.6: ANFIS çıkarım sistem yapısının farklı katmanları.

Katman	Katman Cinsi	Katmandaki Yapay Sinir Hücresi Sayısı
Katman 0	Giriş	n
Katman 1	Bulanıklaştırma	$(p \times n)$
Katman 2	Kural	p^n
Katman 3	Normalizasyon	p^n
Katman 4	Netleştirme	p^n
Katman 5	Toplama	1

Burada;

n: Giriş sayısı

p: Bulanık giriş altküme sayısı

olarak tanımlanmıştır.

3.2.6.2.Hibrit Öğrenme Algoritması

ANFIS yapısının parametrelerinin ayarlanması eğitim aşamasında gerçekleştirilir. Bunun için girdi ve çıktı dizilerini ilişkilendiren bir veri seti gereklidir. Bu aşamayı gerçekleştirmek için,

hibrit öğrenme algoritması yaygın olarak kullanılmaktadır. Karma öğrenme algoritması, hata dereceli indirgeme yöntemi ile en küçük kareler tahmin yönteminin bir kombinasyonudur. En küçük kare yöntemi doğrusal parametreleri ayarlarken, hata dereceli indirgeme yöntemi ise öncül değerleri ayarlar. Eğitim döngüleri belirlenen iterasyon sayısına ulaşılıncaya veya ANFIS tarafından istenen çıktı değeri ile üretilen ortalama hata önceden belirlenmiş bir değere ulaşıncaya kadar tekrarlanır. Dolayısıyla bu aşama, bu kümenin beklenen farklı davranışları en iyi şekilde temsil etmesi gerektiği anlamında veri kümesinin kalitesine bağlıdır.

ANFIS modeli, geleneksel sinir ağları için eleştirilen "kara kutu" etkisinden kurtulmayı, bulanık kurallar biçiminde mevcut olan işlevsiz bilgiyi ilişkilendirmeyi ve sinir ağlarından öğrenme kapasitesini korumayı mümkün kılar. ANFIS yapısının oluşturulmasında en önemli adımlardan biri bulanık çıkarım kurallarının oluşturulmasıdır. Bir çıkarım mekanizması kullanılarak kurallar, farklı girdi değişkenlerinin üyelik fonksiyonlarının kombinasyonları olarak tanımlanır. Girdi değişkenleri, her biri bir üyelik fonksiyonu ile karakterize edilen sınırlı sayıda dil değerine bölünmüştür [98,107,108].

3.2.6.3.Geri Yayılım Algoritması

Geri yayılım algoritması ağ ağırlıklarını güncellemek için hata dereceli indirgeme yöntemi kullanarak bir sistemin hem gerçek çıkışları hem de istenen çıkışları arasındaki hata faktörünü azaltan bir algoritmadır [109].

Öğrenme verilerinin girişi için E_m ölçüm hatası denklem (3.68)'de tanımlanmıştır.

$$E_m = \sum_{i=1}^{N(L)} \left(d_i - X_{L,i}\right)^2 \tag{3.68}$$

Burada;

$N(L)$: İlgili katmandaki yapay sinir hücresi sayısı

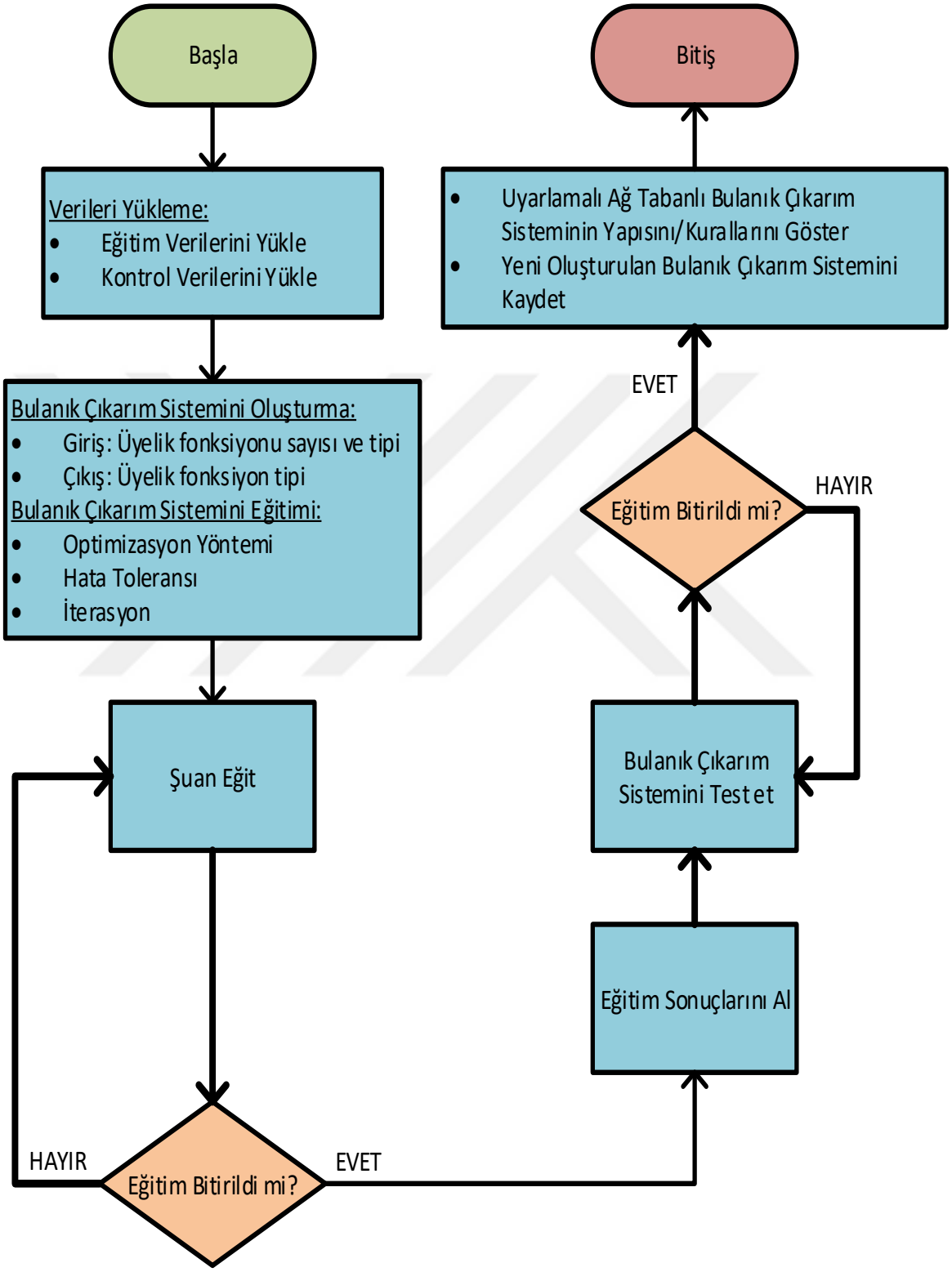
d_i: i. istenilen çıkış vektörü bileşeni

$X_{L,i}$: i. ANFIS çıkış vektörü

olarak tanımlanmıştır. Global hata ölçümü E, denklem (3.69)'da açıklanmaktadır.

$$E = \sum_{m=1}^{M} E_m \tag{3.69}$$

ANFIS'in ana adımları, Şekil 3.29'daki akış diyagramında özetlenmiştir.



Şekil 3.29: ANFIS'in akış diagramı.

Şekil 3.29'da ANFIS algoritmasının nasıl çalıştığı anlatılmıştır.

4. BULGULAR

4.1.SİMÜLASYON MODELLERİ

Bu tezde uygulanmış olan tüm enerji santrali modellemeleri MATLAB SIMULINK ile modellenmiştir[110].

4.1.1. Hidroelektrik Santrali için Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu kısımda PI, PID, FGPI, ANFIS-PI ve ANFIS-PID kontrolörler kullanılarak Hidroelektrik Santral modeline uygulanmıştır.

4.1.1.1.Hidroelektrik Santral için PI ve PID Kontrolör

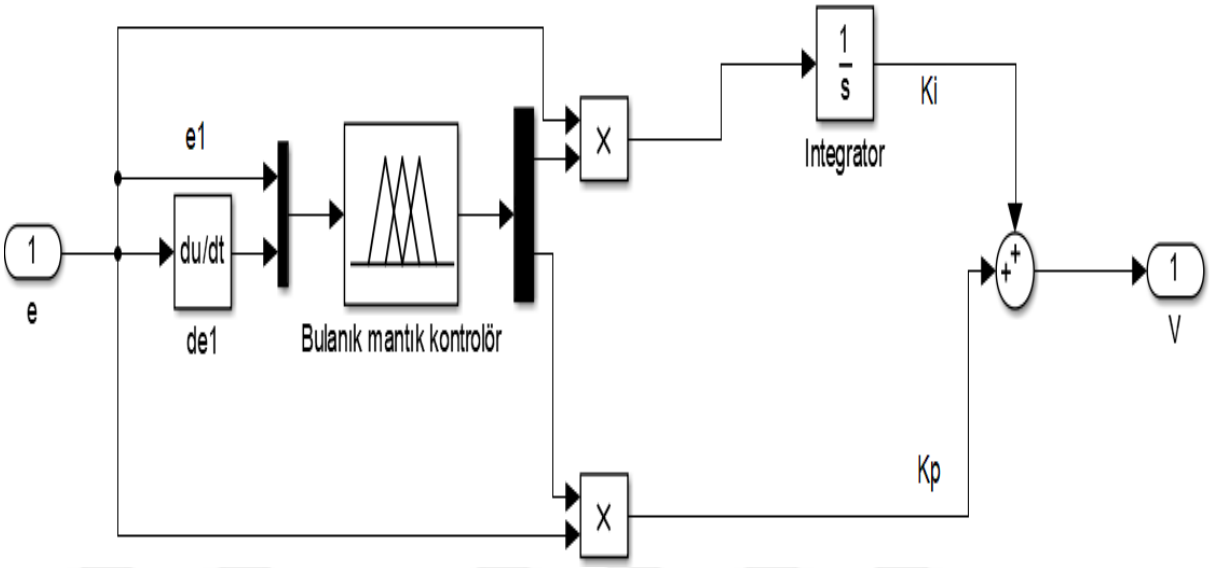
PI ve PID kontrolörlerinin kullanılacak parametreleri K_P , K_I ve K_D bir önceki bölümde belirtilen sistemin cevap eğrisi yöntemi kullanılarak ayrı ayrı hesaplanmış ve optimize edilmiştir. Söz konusu parametrelerin değerleri Tablo 4.1'de verilmiştir.

Tablo 4.1:Hidroelektrik santral için kullanılan kontrolör parametreleri.

Kontrolör Tipi	**Parametreler**		
	K_P	K_I	K_D
PID	1,60000	0,44400	1,44000
PI	1,20000	0,20000	-

4.1.1.2.Hidroelektrik Santral için FGPI Kontrolör

FGPI kontrolör, bulanık mantık kontrolörüne sahip bir PI'nin parametre değişikliklerini sağlayarak temel alınmıştır ve uygulama blok diyagramı şekil 4.1'de gösterildiği gibidir.

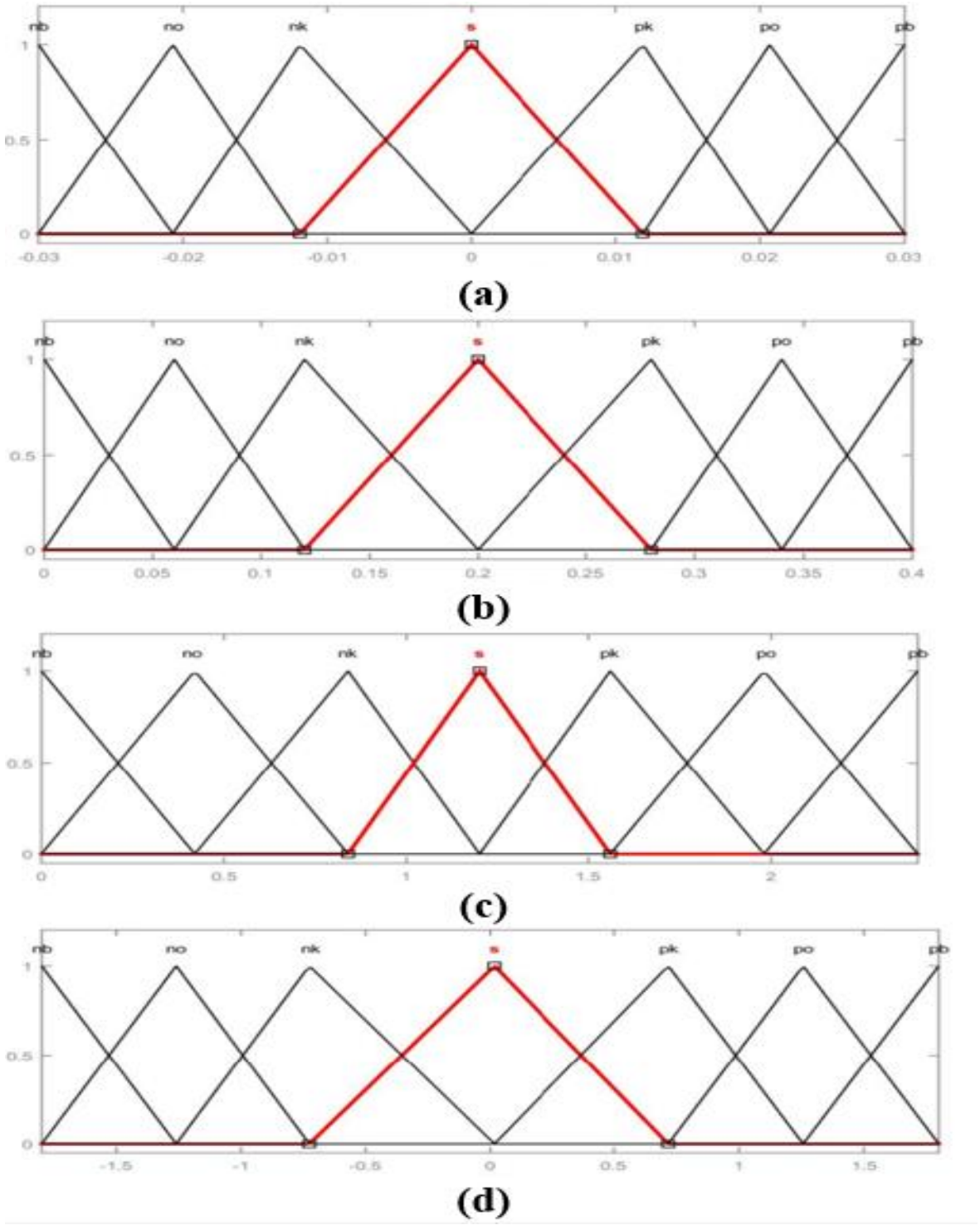


Şekil 4.1:FGPI kontrolörün uygulama blok diyagramı.

Şekil 4.1'de gösterilen FGPI kontrolörün girişleri hata (e) ve hatanın türevi (de) iken bulanık mantık kural tabanı yardımı ile sistem dinamiğindeki değişimlere duyarlı olarak işlenen K_I ve K_P çıkışları toplanarak kontrol sinyalini üretmektedir.

Bulanık mantık kontrolörünün değişiklik aralıkları yedi üyelik fonksiyonu kullanılarak tasarlanmıştır. Bu üyelik fonksiyonlarının başlıkları şöyledir: NB, NO, NK (negatif büyük, orta, küçük), S (sıfır), PK, PO, PB (pozitif küçük, orta, büyük) .

FGPI kontrolör için kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 4.2'de verilmiştir.



Şekil 4.2: FGPI kontrolörün Hidroelektrik için giriş ve çıkışlarına ait üyelik fonksiyonları; (a) e girişi, (b) de girişi, (c) K_I çıkışı, (d) K_P çıkışı.

Burada; e sistem hatası, de hatanın türevi ve K_p ile K_I, bulanık mantık kontrolör kullanılarak kontrol edilen PI kontrolörünün parametrelerini temsil eder.

K_p ve K_I üyelik fonksiyonlarına ait ilişkin kurallar tablo 4.2 ve 4.3'te gösterilmiştir;

Tablo 4.2: Hidroelektrik santral için K_p parametrelerinin kuralları.

e / de	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NO	NO	NK	S
NO	NB	NO	NO	NO	NK	S	PK
NK	NB	NO	NK	NK	S	PK	PO
S	NO	NO	NK	S	PK	PO	PO
PK	NO	NK	S	PK	PK	PO	PB
PO	NK	S	PK	PO	PO	PO	PB
PB	S	PK	PO	PO	PB	PB	PB

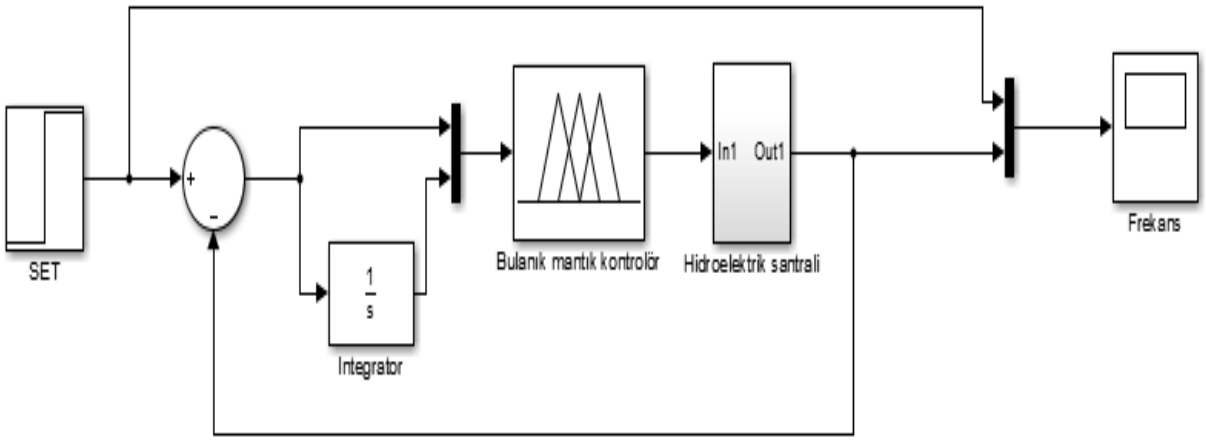
Tablo 4.3: Hidroelektrik santral için K_I parametrelerinin kuralları.

e / de	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	PB	PB	PB	PO	PO	PK	S
NO	PB	PO	PO	PO	PK	S	NK
NK	PB	PO	PK	PK	S	NK	NO
S	PO	PO	PK	S	NK	NO	NO
PK	PO	PK	S	NK	NK	NO	NB
PO	PK	S	NK	NO	NO	NO	NB
PB	S	NK	NO	NO	NB	NB	NB

Tablo 4.2 ve Tablo 4.3 birlikte incelendiğinde FGPI kontrolörün K_P ve K_I parametrelerine ilişkin kuralların simetrik olarak oluşturulduğu görülebilir.

4.1.1.3. Hidroelektrik Santral için ANFIS-PI Kontrolör

Hidroelektrik santralin frekans çıkışını kontrol etmek için şekil 4.3'de gösterildiği gibi ANFIS-PI blok diyagramı kullanılmıştır.

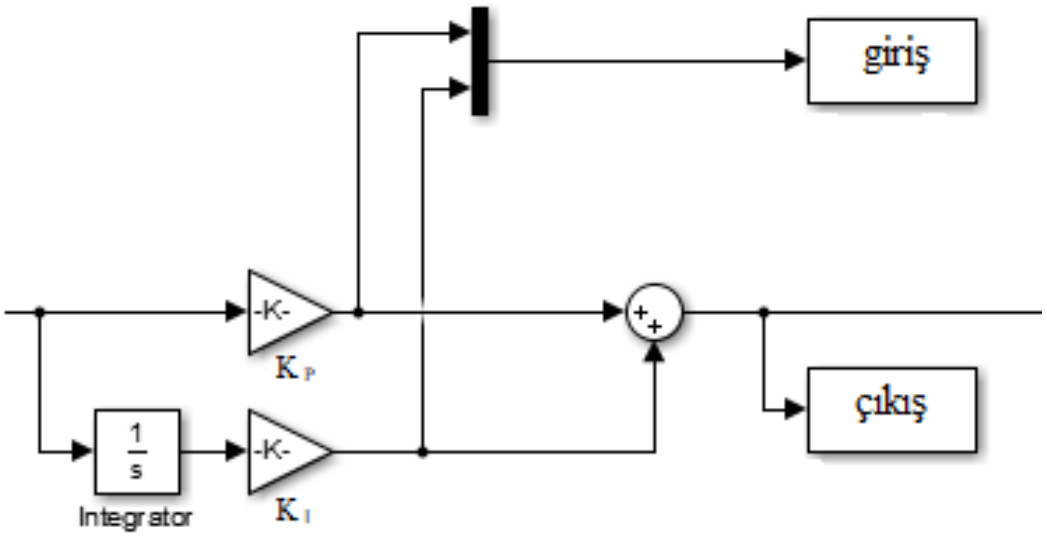


Şekil 4.3: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PI kontrolünün blok diyagramı.

Şekil 4.3'de görüldüğü üzere ANFIS-PI kontrolörün girişleri K_I ve K_P iken yapay sinir ağları tarafından kendiliğinden oluşturulan bulanık mantık kural tabanı yardımıyla sistem dinamiğindeki değişimlere duyarlı bir şekilde işlenen kontrol sinyali sisteme verilmektedir.

4.1.1.3.1. Veri Toplama ve Yükleme

Veriler toplayabilmek için, bu kısımda Şekil 4.4'te gösterildiği gibi kullanılan hidroelektrik santralin frekans modeline uygulanan klasik PI kontrolörünün zamanla değişen K_P ve K_I parametreleri girişler ve aynı kontrolörün zamanla değişen toplam çıkışı ise sistem çıkışı olarak alınmıştır.

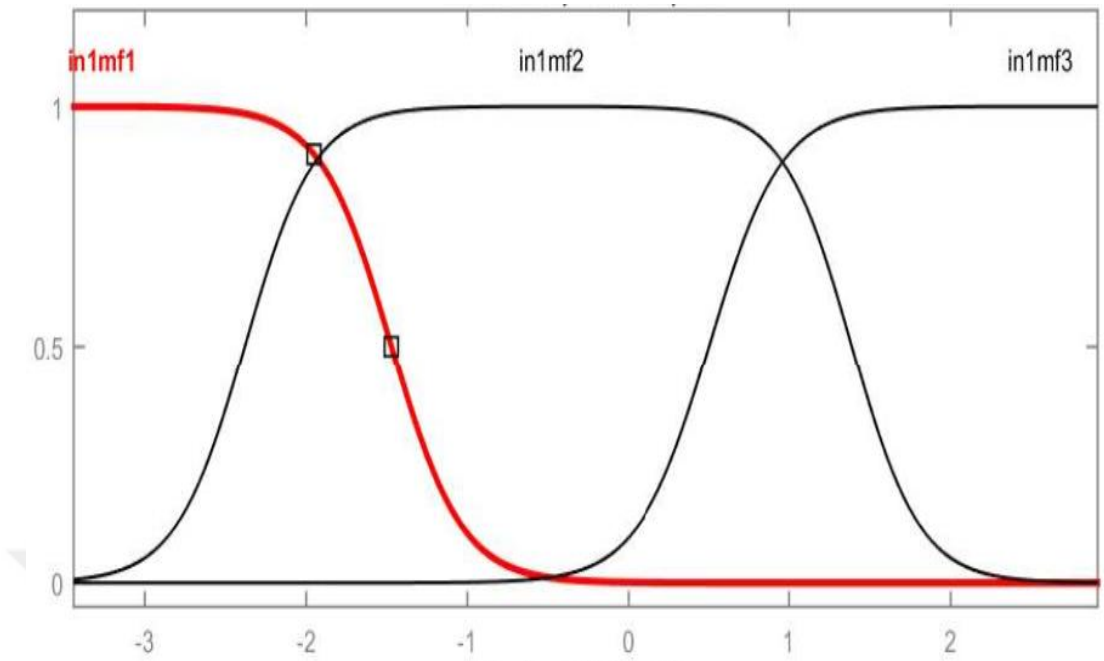


Şekil 4.4:ANFIS-PI kontrolör için veri toplama sistemi.

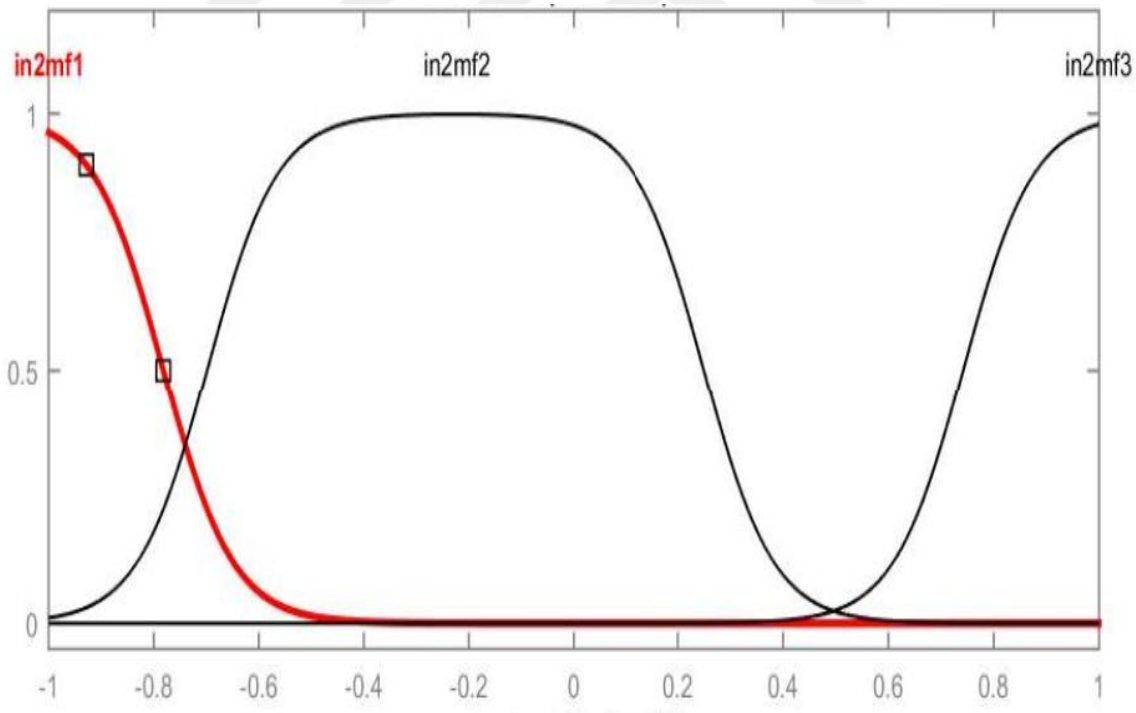
Şekil 4.4'te gösterilen yapıda verileri almak için örnekleme zamanı olarak 1 saniye seçilmiştir. Toplam 65 adet veri kullanılmıştır. Verilerin yaklaşık % 75'i oluşturulan Sugeno tabanlı ANFIS modelinin eğitimi ve geriye kalan kısmı ise sistemin doğruluğunu test etmek için kullanılmıştır.

4.1.1.3.2. Üyelik Fonksiyonlarının ve Mimarinin Belirlenmesi

Sugeno üyelik fonksiyonu parametreleri otomatik olarak seçilebilir. En uygun yapıyı bulabilmek için yapılan denemeler sonucunda üyelik fonksiyonu tipi olarak girişler için psigmf (2 adet sigmoidal üyelik fonksiyonunun çarpımı şeklinde kullanılan) fonksiyonu, çıkış için ise Şekil 4.7'de doğrusal tip seçilerek karma öğrenme algoritması kullanılmıştır. Girişlerin her biri için kullanılan üyelik fonksiyon sayısı 3tir. Şekil 4.5 ve 4.6'da bu kısımda kullanılan ANFIS-PI kontrolör için kullanılan üyelik fonksiyonları gösterilir.



Şekil 4.5: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_P girişi.



Şekil 4.6: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_I girişi.



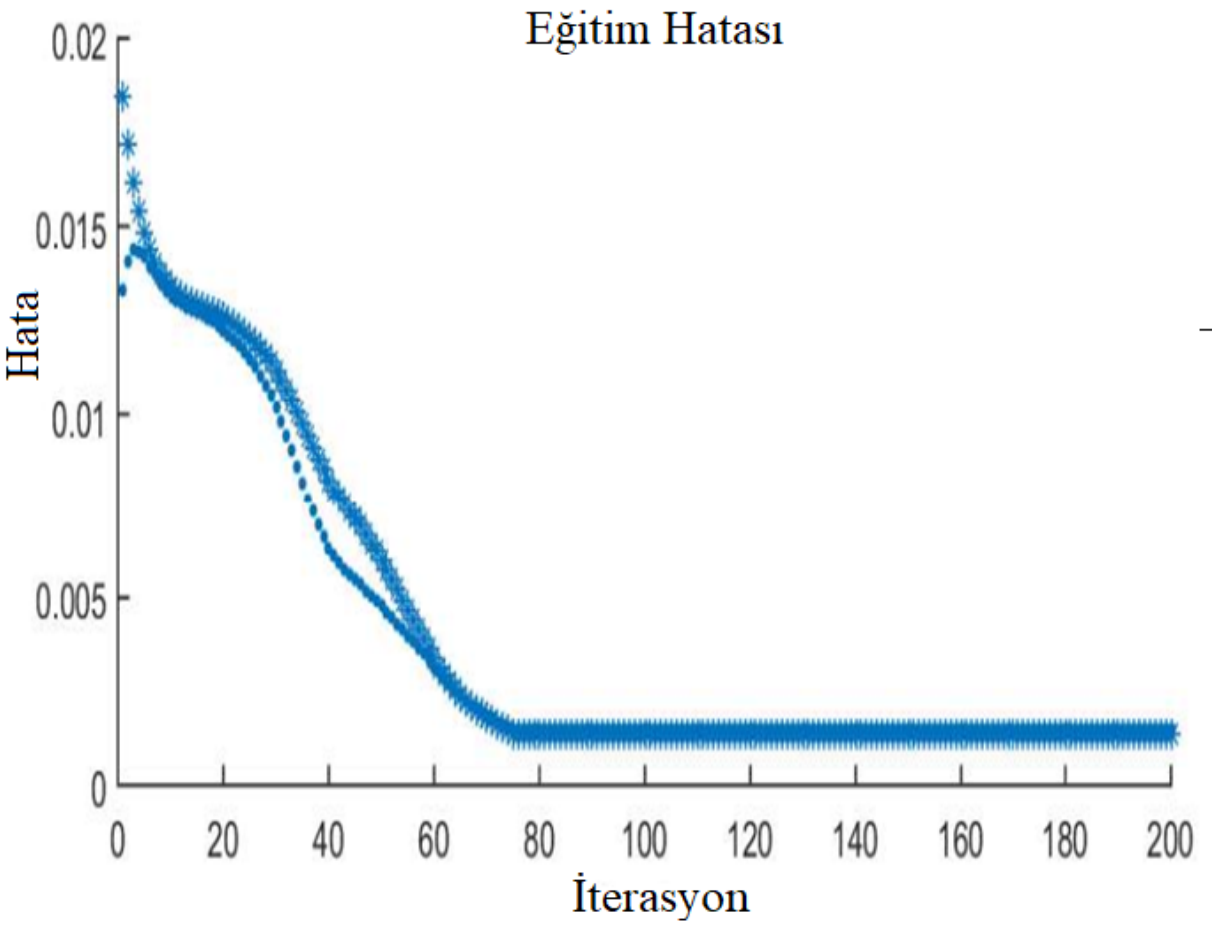
Şekil 4.7:Çıkış kontrolör sinyali.

Şekil 4.5, 4.6 ve Şekil 4.7'de eğitim ve doğrulama çalışmaları sonucunda otomatik olarak sistemin belirlediği aralık değerleri görülmektedir.

4.1.1.3.3. Eğitim

Modelden yapılmış bir öğrenme yöntemidir. Elde edilen sonuç minimum hatayı alana kadar model eğitilir. Başarılı bir eğitim ve doğrulama için doğru veri seti seçmek gerçekten gereklidir. Veri seti doğru seçilmezse doğrulama veri seti modeli doğrulayamaz. Doğrulama veri kümesi eğitim veri kümesinden farklı ise, model doğrulama veri özelliklerinden hiçbirini tanımlayamaz.

Bu kısımda ANFIS-PI kontrolörün eğitimi için seçilen epoch sayısı optimal olarak 200 seçilmiştir. Eğitim sırasında ve ilk epoch'ta minimum test hatasının değeri elde edilebilir. Doğru bir veri kümesi için, eğitim ilerledikçe test hatası azalmaya devam eder. Eğitim için durma kriteri hata toleransıdır. Eğitim verileri hatası bu toleransın ötesine geçtikten sonra eğitim sona erer. ANFIS-PI kontrolör eğitim hatalarının iterasyon sayısına göre durumları sırasıyla Şekil 4.8'de verilmiştir.

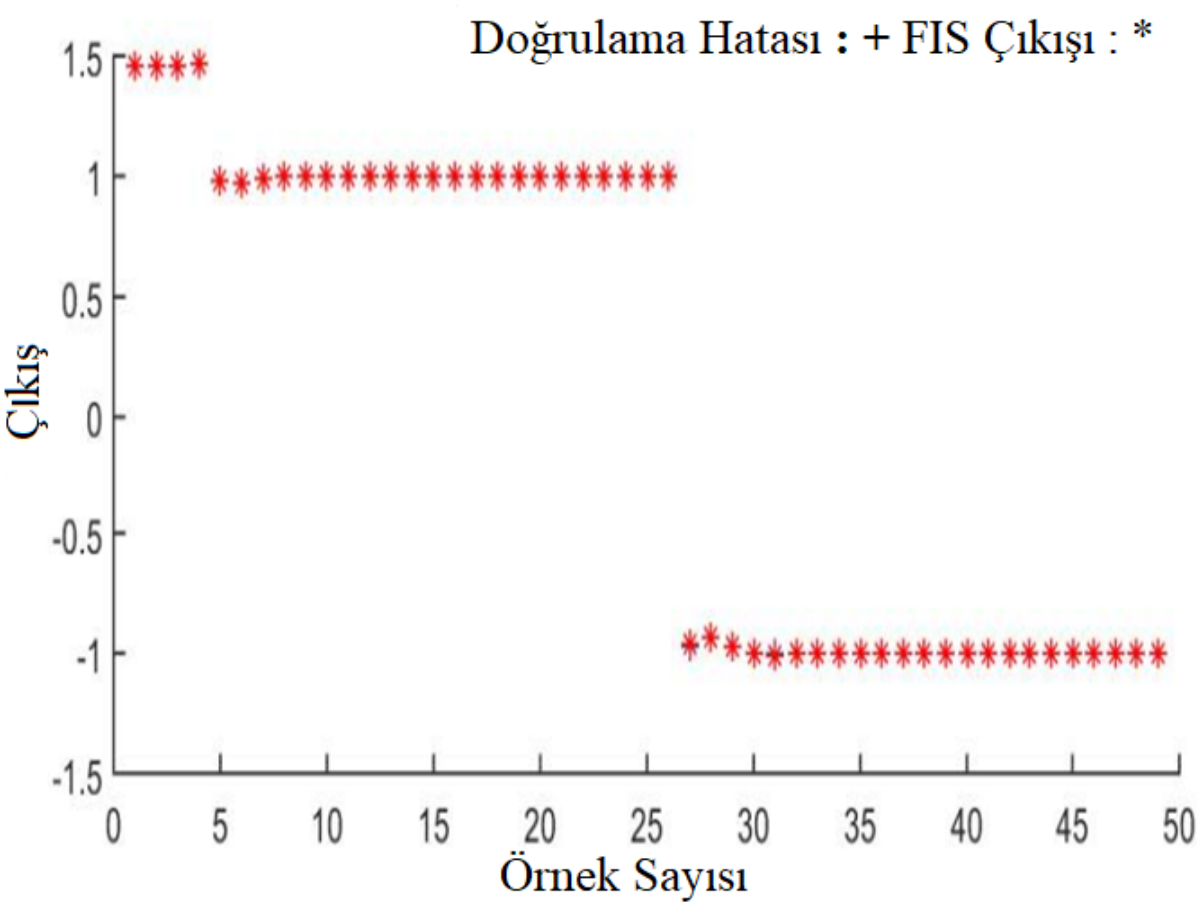


Şekil 4.8:Hidroelektrik santral için ANFIS-PI eğitim hatası.

Şekil 4.8'de gösterildiği gibi ANFIS-PI kontrolörün her bir girişi için 3 üyelik fonksiyonu kullanılması durumunda ortalama test hatası 0.0013753 olarak bulunmuştur.

4.1.1.3.4. Doğrulama

Doğrulama veri seti, ANFIS tarafından üretilen bulanık çıkarım modelinin genelleme kapasitesini test etmek ve modeli doğrulamak için kullanılır. Şekil 4.9'de kullanılan ANFIS-PI kontrolör için kullanılan doğrulama verilerinin hata grafiği gösterilmektedir.

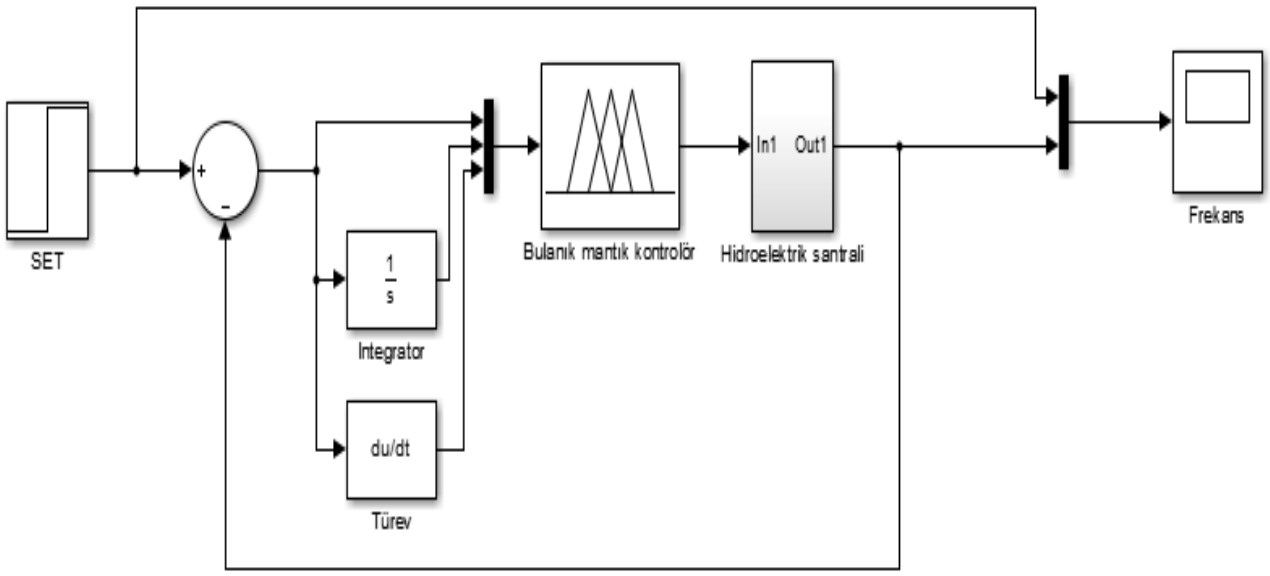


Şekil 4.9: Hidroelektrik santral için ANFIS-PI doğrulama hatası.

Şekil 4.9'da gösterildiği üzere ANFIS-PI kontrolörün doğrulama veri seti için ortalama test hatası 0.0015078 olarak bulunmuştur.

4.1.1.4.Hidroelektrik Santral için ANFIS-PID Kontrolör

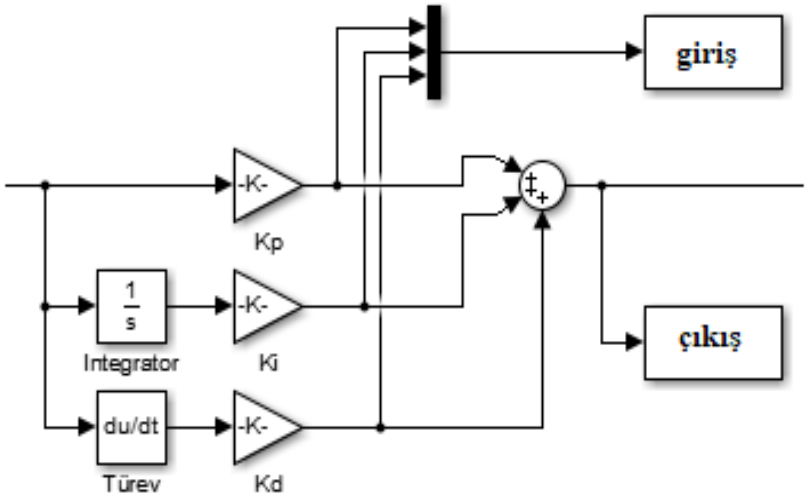
Hidroelektrik santralin frekans çıkışını kontrol etmek için şekil 4.10'da gösterildiği gibi ANFIS-PID blok diyagramı kullanılmıştır.



Şekil 4.10: Hidroelektrik santral için ANFIS-PID kontrolünün blok diyagramı.

Şekil 4.10'da görüldüğü üzere ANFIS-PID kontrolörün girişleri K_I, K_P ve K_D iken yapay sinir ağları tarafından kendiliğinden oluşturulan bulanık mantık kural tabanı yardımıyla sistem dinamiğindeki değişimlere duyarlı bir şekilde işlenen kontrol sinyali sisteme verilmektedir.

Şekil 4.11 verileri toplayabilmek için kullanılan yapıyı göstermektedir.

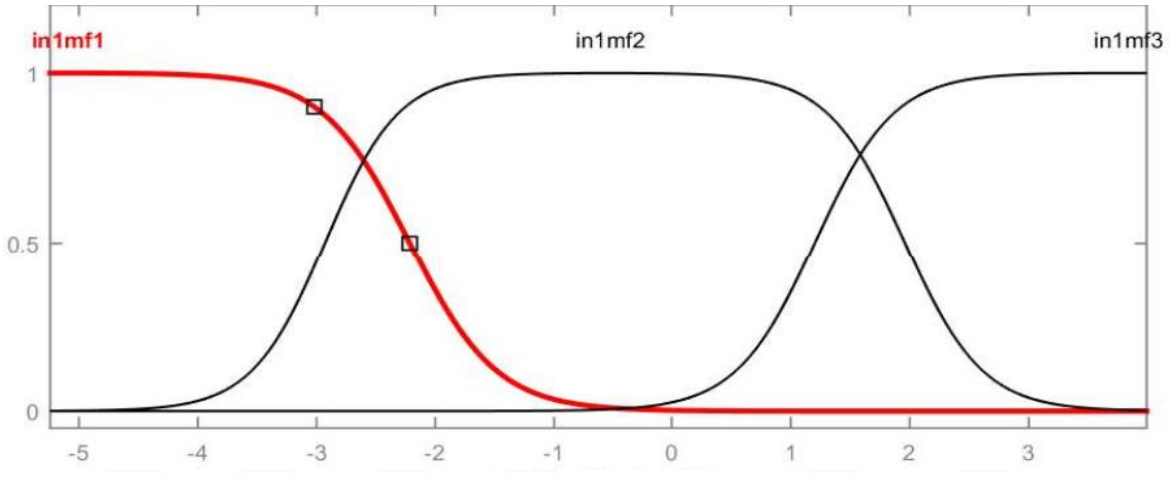


Şekil 4.11:ANFIS-PID kontrolör için veri toplama sistemi.

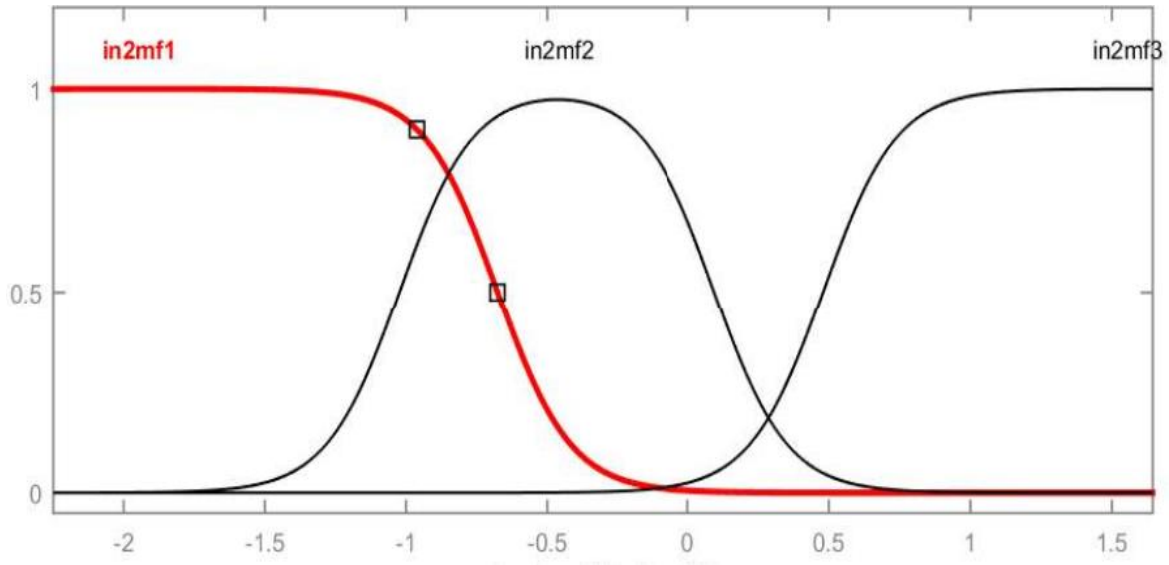
Şekil 4.11'de gösterildiği gibi kullanılan hidroelektrik santralin frekans modeline uygulanan klasik PID kontrolörünün zamanla değişen K_P, K_I ve K_D parametreleri girişler ve aynı

kontrolörün zamanla değişen toplam çıkışı ise sistem çıkışı olarak alınmıştır. Toplam 72 adet veri kullanılmıştır.

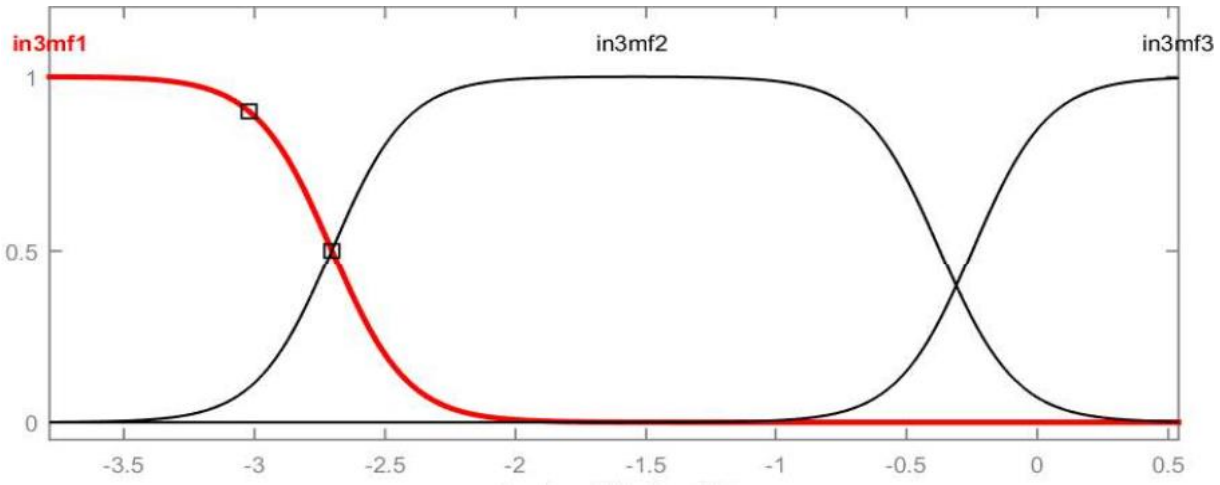
Şekil 4.12, 4.13 ve 4.14'te kullanılan ANFIS-PID kontrolör için kullanılan üyelik fonksiyonları, eğitim ve doğrulama çalışmaları sonucunda otomatik olarak sistemin belirlediği aralık değerleri görülmektedir. Fonksiyonu tipi olarak girişler için psigmf fonksiyonu, çıkış için ise Şekil 4.15'te doğrusal tip seçilerek karma öğrenme algoritması kullanılmıştır. Girişlerin her biri için kullanılan üyelik fonksiyon sayısı 3'tir.



Şekil 4.12: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PID kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_P girişi.



Şekil 4.13: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PID kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_I girişi.



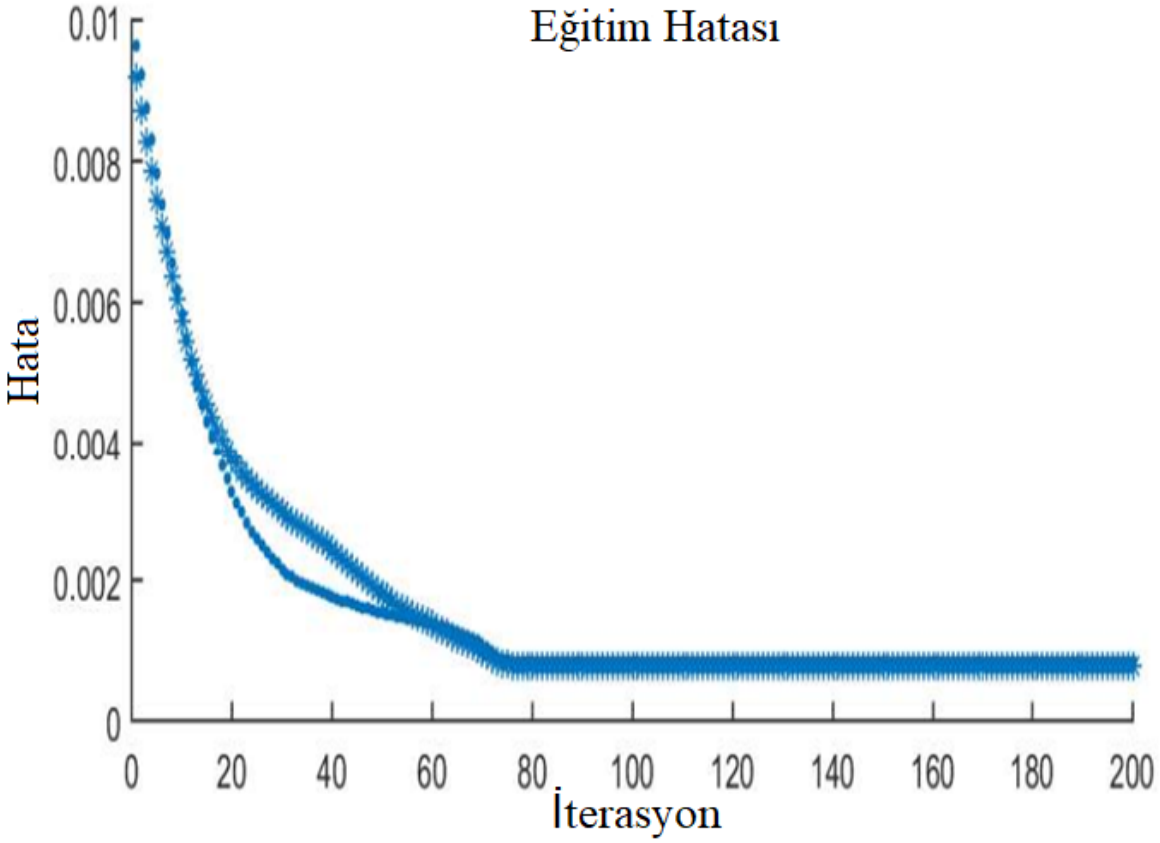
Şekil 4.14: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PID kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_D girişi.



Şekil 4.15:Çıkış kontrolör sinyali.

Şekil 4.12, 4.13, 4.14 ve Şekil 4.15'te eğitim ve doğrulama çalışmaları sonucunda otomatik olarak sistemin belirlediği aralık değerleri görülmektedir.

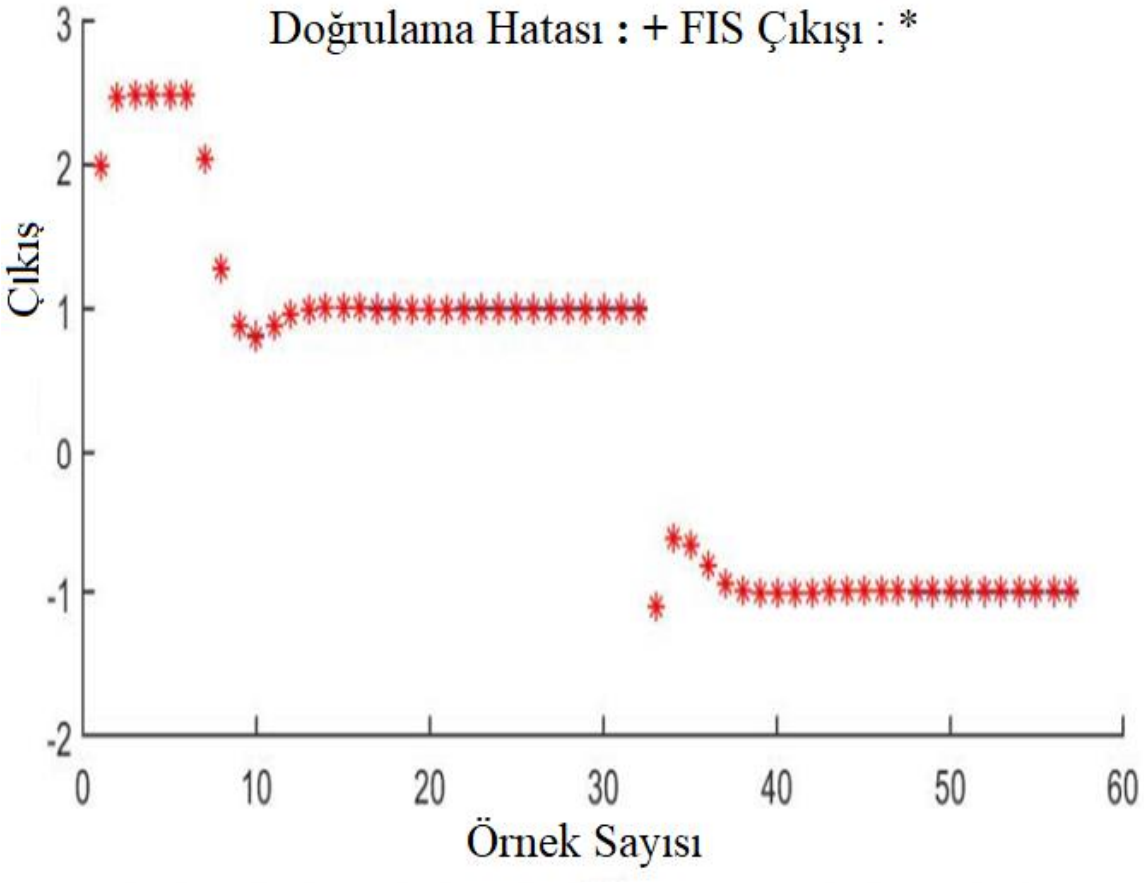
ANFIS-PID kontrolörün eğitimi için seçilen epoch sayısı optimal olarak 200 seçilmiştir. ANFIS-PID kontrolör eğitim hatalarının iterasyon sayısına göre durumları sırasıyla Şekil 4.16'da verilmiştir.



Şekil 4.16: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PID eğitim hatası.

Şekil 4.16'da gösterildiği gibi ANFIS-PID kontrolörün her bir girişi için 3 üyelik fonksiyonu kullanılması durumunda eğitim verilerinin ortalama test hatası 0.00076873 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.17'de kullanılan ANFIS-PID kontrolör için kullanılan doğrulama verilerinin hata grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.17: Hidroelektrik santrali için ANFIS-PID doğrulama hatası.

Doğrulama veri seti için ise ortalama test hatası 0.0008374 Şekil 4.17'de gösterildiği gibi bulunmuştur.

4.1.2. Doğal Gaz Türbini Santralinin Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu kısımda PI, KKO-PI, FGPI ve ANFIS-PI kontrolörler kullanılarak Doğal Gaz Türbini Santrali modeline uygulanmıştır.

4.1.2.1.Doğal Gaz Türbini Santrali için PI ve KKO-PI Kontrolör

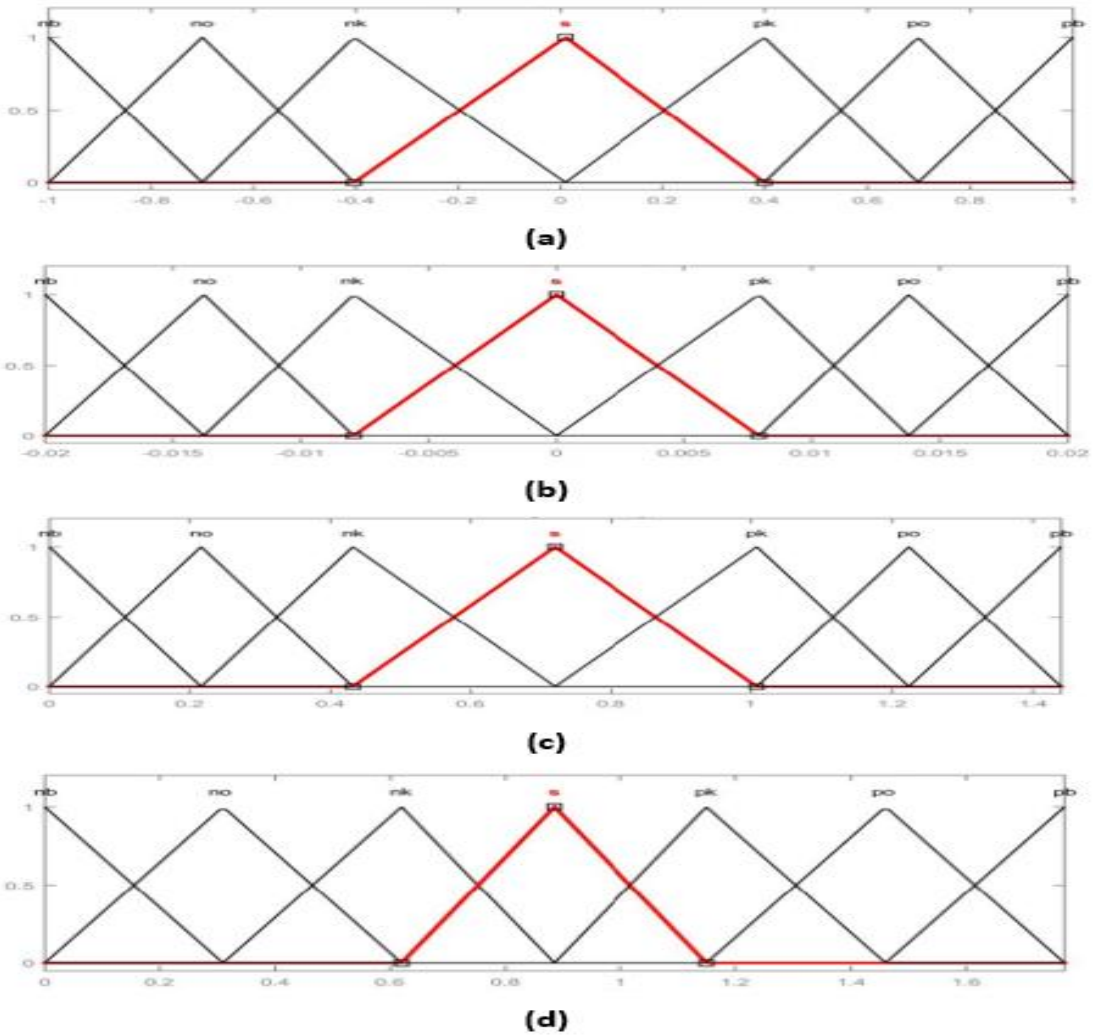
Doğal Gaz Türbini Santrali modeli için kullanılan ilgili K_P ve K_I parametreleri, optimize edilmiş ve aşağıdaki Tablo 4.4'de görüldüğü gibi belirlenmiştir.

Tablo 4.4: Doğal Gaz Türbini Santrali için kontrolör parametreleri.

Kontrolör Tipi	Parametreler	
	K_P	K_I
PI	0,88780	0,72000
KKO-PI	0,67725	0,88899

4.1.2.2.Doğal Gaz Türbini Santrali için FGPI Kontrolör

Doğal Gaz Türbini Santrali için FGPI kontrolörde kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 4.18'de verilmiştir.



Şekil 4.18:FGPI kontrolörün Doğal Gaz için giriş ve çıkışlarına ait üyelik fonksiyonları; (a) e girişi, (b) de girişi, (c) K_I çıkışı, (d) K_P çıkışı.

K_p ve K_I üyelik fonksiyonlarına ait ilişkin kurallar tablo 4.5 ve 4.6'da gösterilmiştir,

Tablo 4.5: Doğal Gaz Türbini santrali için K_P parametrelerinin kuralları.

e / de	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NB	NO	NO
NO	NO	NO	NO	NO	NO	NK	NK
NK	NK	NK	NK	NK	NK	S	S
S	S	S	S	S	S	PK	PK
PK	PK	PK	PK	PK	PK	PO	PO
PO	PO	PO	PO	PO	PO	PO	PB
PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB	PB

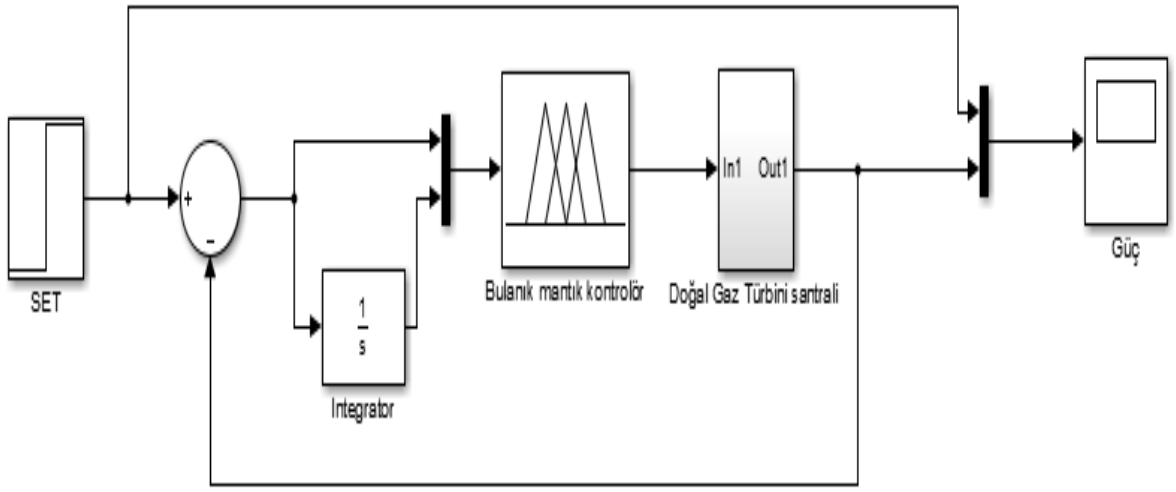
Tablo 4.6: Doğal Gaz Türbini santrali için K_I parametrelerinin kuralları.

e / de	NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PB	PO	PO
NO	PO	PO	PO	PO	PO	PK	PK
NK	PK	PK	PK	PK	PK	S	S
S	S	S	S	S	S	NK	NK
PK	NK	NK	NK	NK	NK	NO	NO
PO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NB
PB	NB	NB	NB	NB	NB	NB	NB

Tablo 4.5 ve Tablo 4.6 birlikte incelendiğinde FGPI kontrolörün K_P ve K_I parametrelerine ilişkin kuralların simetrik olarak oluşturulduğu görülebilir.

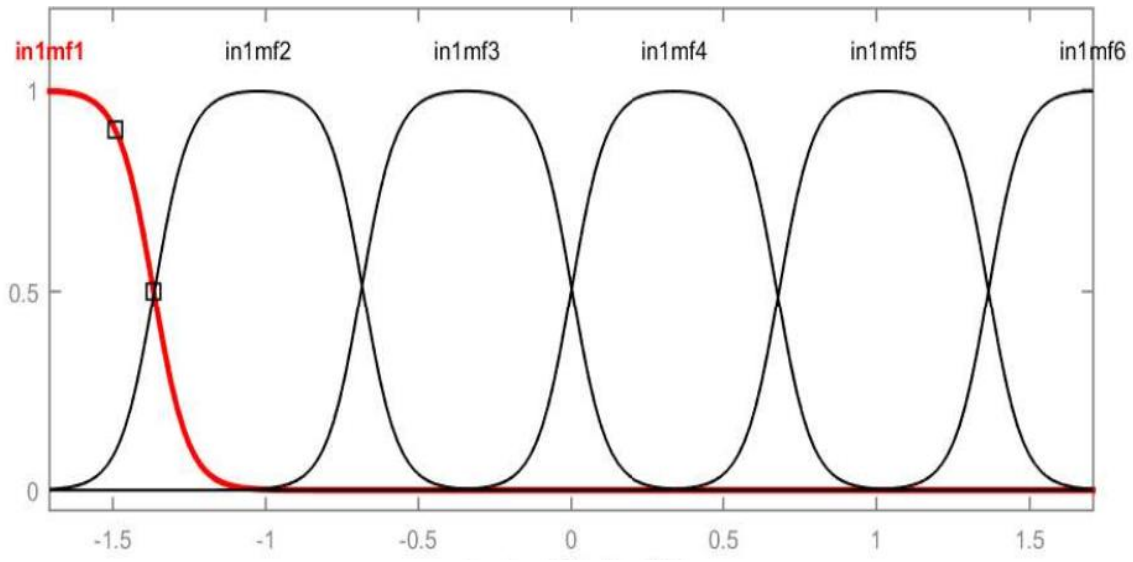
4.1.2.3.Doğal Gaz Türbini Santrali için ANFIS-PI Kontrolör

Doğal Gaz Türbin santralinin aktif güç çıkışını kontrol etmek için şekil 4.19'da gösterildiği gibi ANFIS-PI blok diyagramı kullanılmıştır.

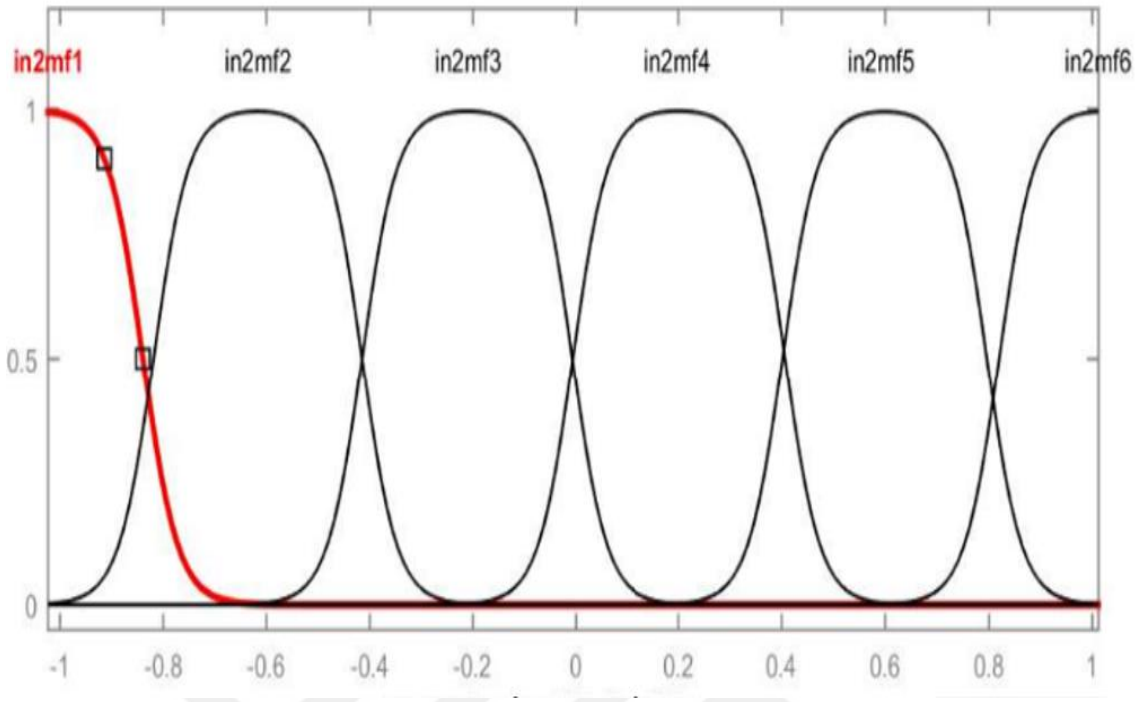


Şekil 4.19: Doğal Gaz Türbini santrali için ANFIS-PI kontrolünün blok diyagramı.

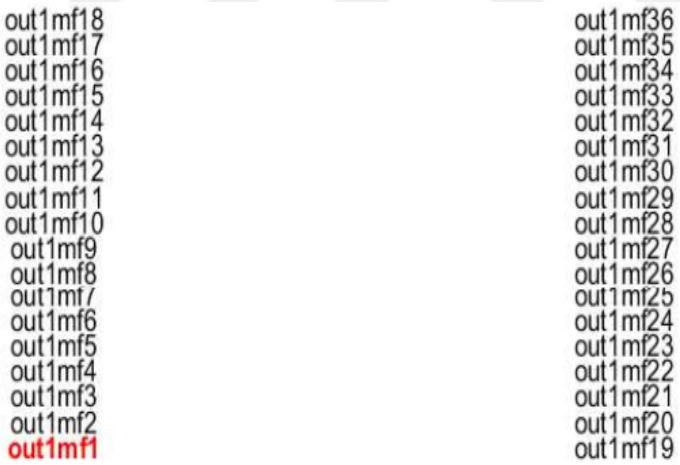
Toplam 1198 adet veri kullanılmıştır. Girişlerin her biri için kullanılan üyelik fonksiyon sayısı 6'dır. Şekil 4.20 ve 4.21'de kullanılan ANFIS-PI kontrolör için kullanılan üyelik fonksiyonları, eğitim ve doğrulama çalışmaları sonucunda otomatik olarak sistemin belirlediği aralık değerleri görülmektedir. Fonksiyonu tipi olarak girişler için dsigmf (2 adet sigmoidal üyelik fonksiyonunun farkı şeklinde kullanılan) fonksiyonu, çıkış için ise ise Şekil 4.22'de doğrusal tip seçilerek karma öğrenme algoritması kullanılmıştır.



Şekil 4.20: Doğal Gaz Türbini santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_P girişi.



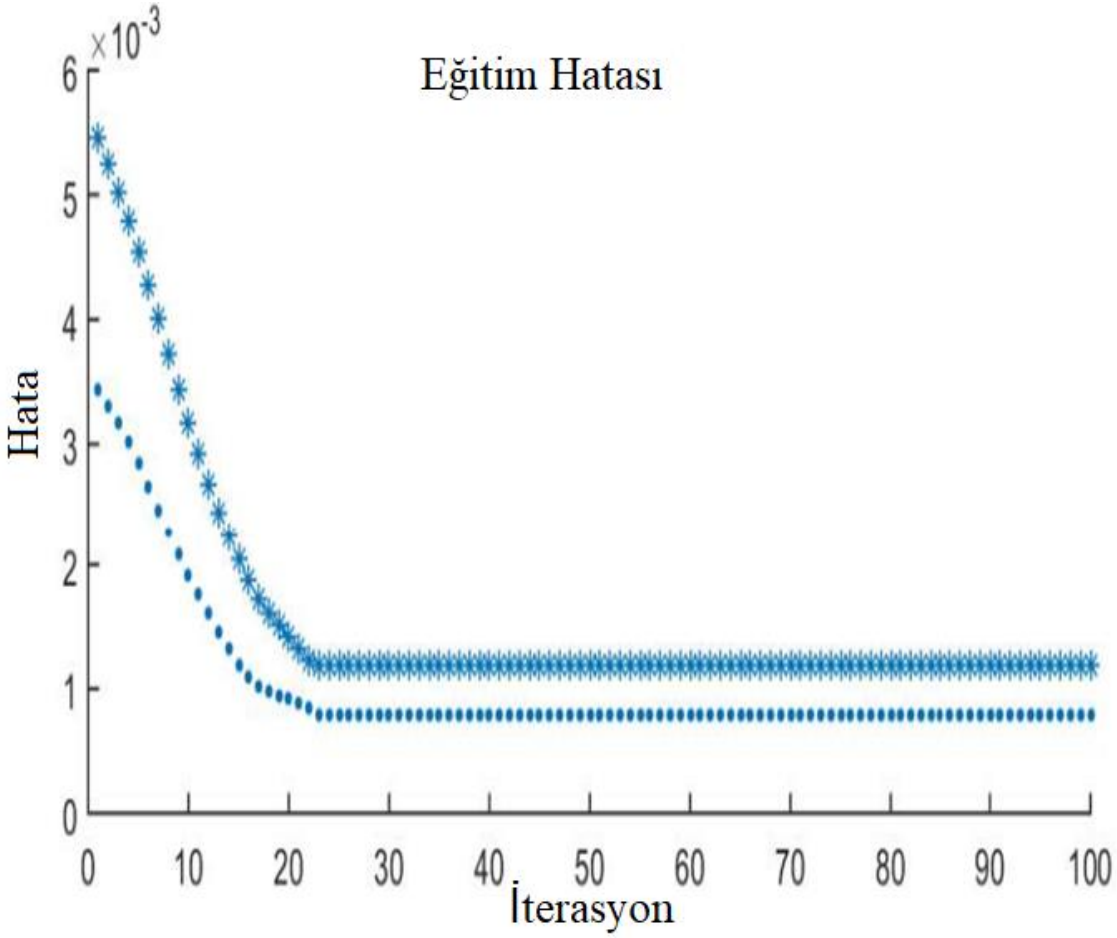
Şekil 4.21: Doğal Gaz Türbini santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_I girişi.



Şekil 4.22:Çıkış-Kontrolör sinyali.

Şekil 4.20, 4.21 ve Şekil 4.22'de eğitim ve doğrulama çalışmaları sonucunda otomatik olarak sistemin belirlediği aralık değerleri görülmektedir.

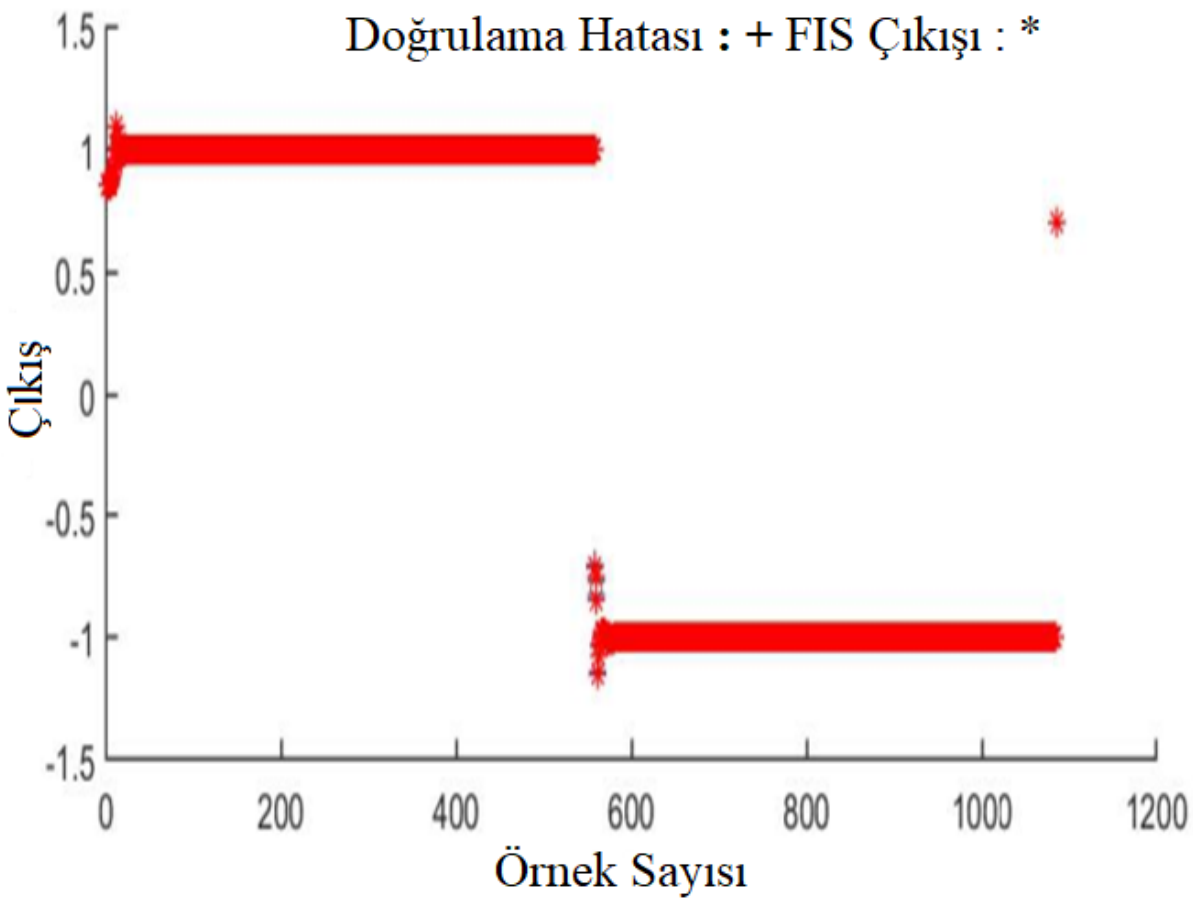
ANFIS-PI kontrolörün eğitimi için seçilen epoch sayısı optimal olarak 100 seçilmiştir. ANFIS-PI kontrolör eğitim hatalarının iterasyon sayısına göre durumları sırasıyla Şekil 4.23'te verilmiştir.



Şekil 4.23: Doğal Gaz Türbin santrali için ANFIS-PI eğitim hatası.

Şekil 4.23'te gösterildiği gibi ANFIS-PI kontrolörün her bir girişi için 6 üyelik fonksiyonu kullanılması durumunda eğitim verilerinin ortalama test hatası 0.0011869 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.24'te kullanılan ANFIS-PI kontrolör için kullanılan doğrulama verilerinin hata grafiği gösterilmektedir.



Şekil 4.24: Doğal Gaz Türbin santrali için ANFIS-PI doğrulama hatası.

Doğrulama veri seti için ise ortalama test hatası 0.0078103 Şekil 4.24'te gösterildiği gibi bulunmuştur.

4.1.3. Fuel-Oil Santralinin Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi

Bu kısımda PI, YAK-PI, PSO-PI, KKO-PI ve ANFIS-PI kontrolörler kullanılarak Fuel-Oil Santrali modeline uygulanmıştır.

4.1.3.1.Fuel-Oil Santrali için PI, YAK-PI, PSO-PI ve KKO-PI Kontrolör

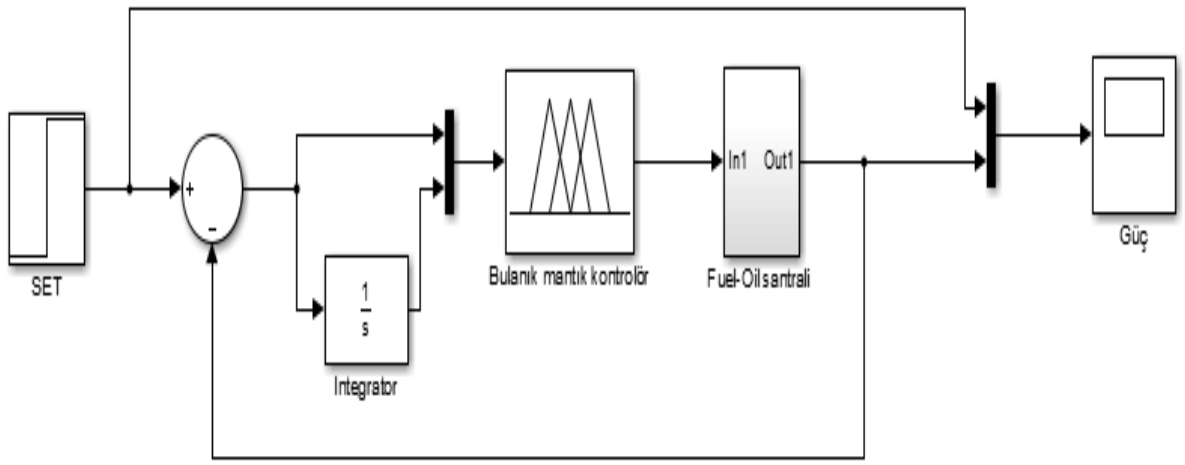
Fuel-Oil Santrali modeli için kullanılan ilgili K_P ve K_I parametreleri, optimize edilmiş ve aşağıdaki Tablo 4.7'de görüldüğü gibi belirlenmiştir.

Tablo 4.7:Fuel-Oil Santrali için kontrolör parametreleri.

Kontrolör Tipi	Parametreler	
	K_P	K_I
PI	0,90000	0,67515
YAK-PI	1,48190	0,89720
PSO-PI	1,19590	0,94580
KKO-PI	1,17870	1,10530

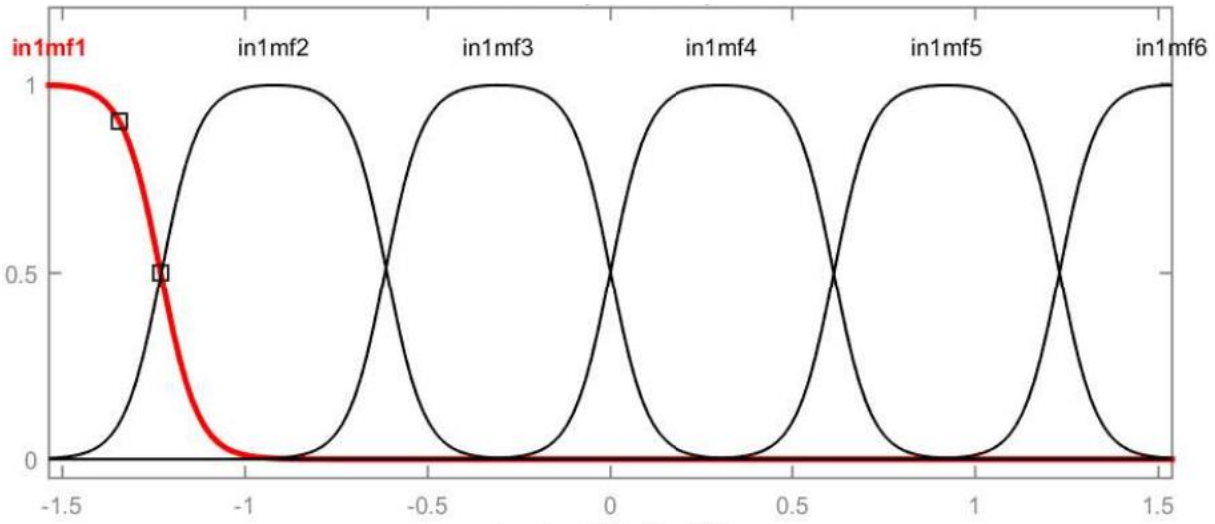
4.1.3.2.Fuel-Oil Santrali için ANFIS-PI Kontrolör

Fuel-Oil santralinin aktif güç çıkışını kontrol etmek için şekil 4.25'te gösterildiği gibi ANFIS-PI blok diyagramı kullanılmıştır.

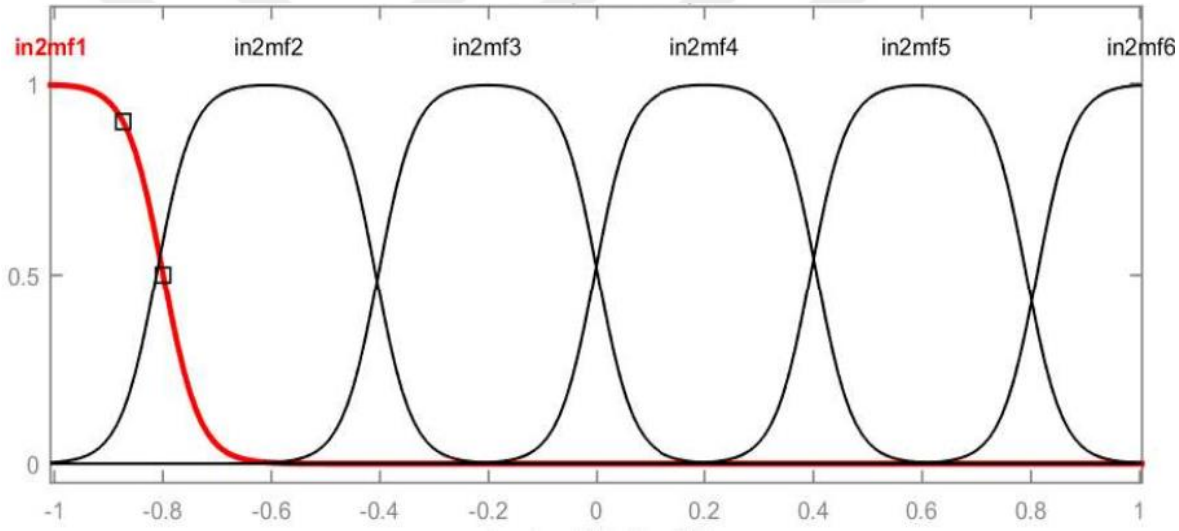


Şekil 4.25:Fuel-Oil santrali için ANFIS-PI kontrolünün blok diyagramı.

Toplam 6044 adet veri kullanılmıştır. Girişlerin her biri için kullanılan üyelik fonksiyon sayısı 6'dır. Şekil 4.26 ve 4.27'de kullanılan ANFIS-PI kontrolör için kullanılan üyelik fonksiyonları, eğitim ve doğrulama çalışmaları sonucunda otomatik olarak sistemin belirlediği aralık değerleri görülmektedir. Fonksiyonu tipi olarak girişler için dsigmf fonksiyonu, çıkış için ise Şekil 4.25'te doğrusal tip seçilerek karma öğrenme algoritması kullanılmıştır.



Şekil 4.26:Fuel-Oil santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_P girişi.



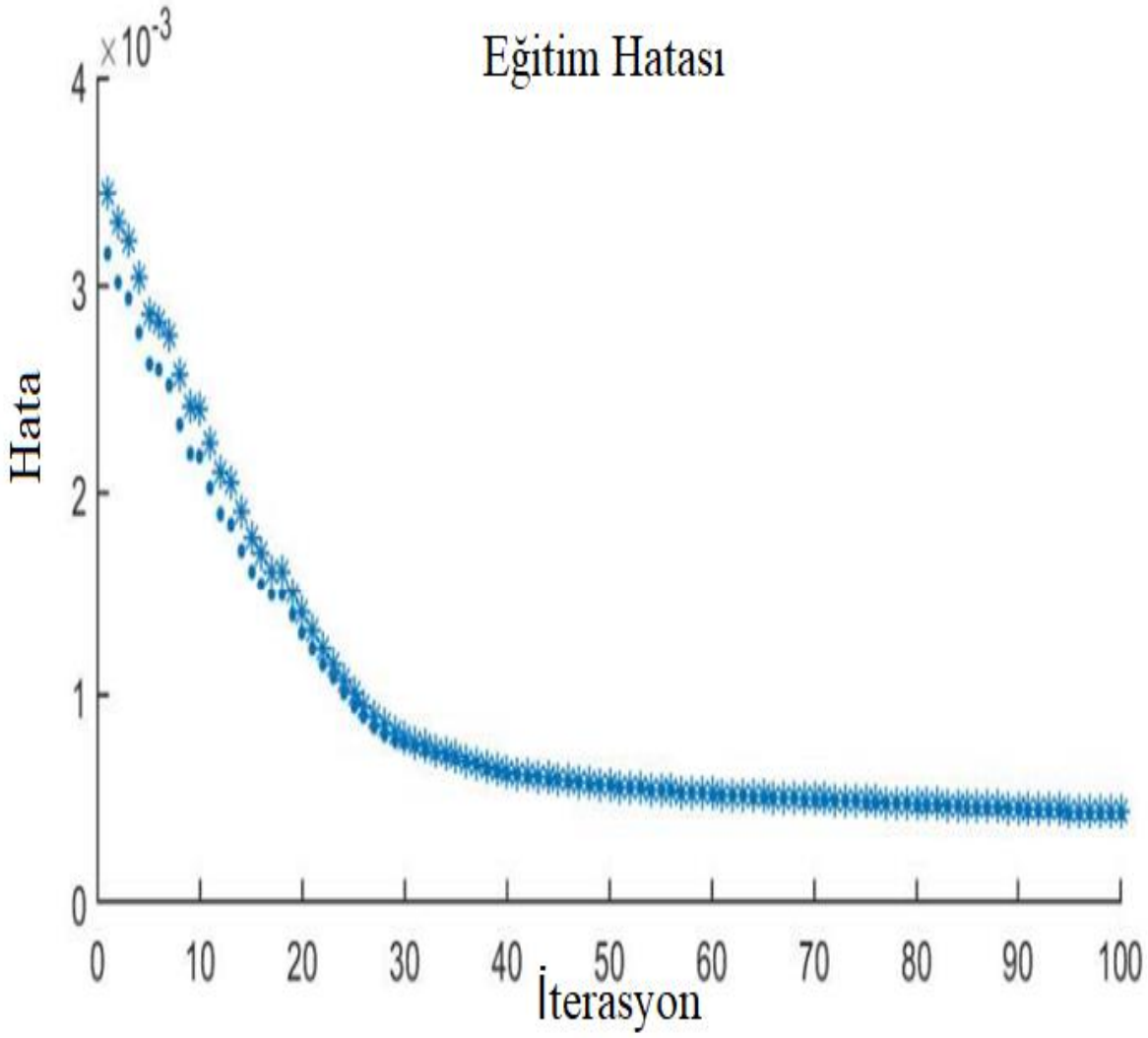
Şekil 4.27:Fuel-Oil santrali için ANFIS-PI kontrolörün girişlerine ait üyelik fonksiyonları; K_I girişi.



Şekil 4.28: Çıkış-Kontrolör sinyali.

Şekil 4.26, 4.27 ve Şekil 4.28'de eğitim ve doğrulama çalışmaları sonucunda otomatik olarak sistemin belirlediği aralık değerleri görülmektedir.

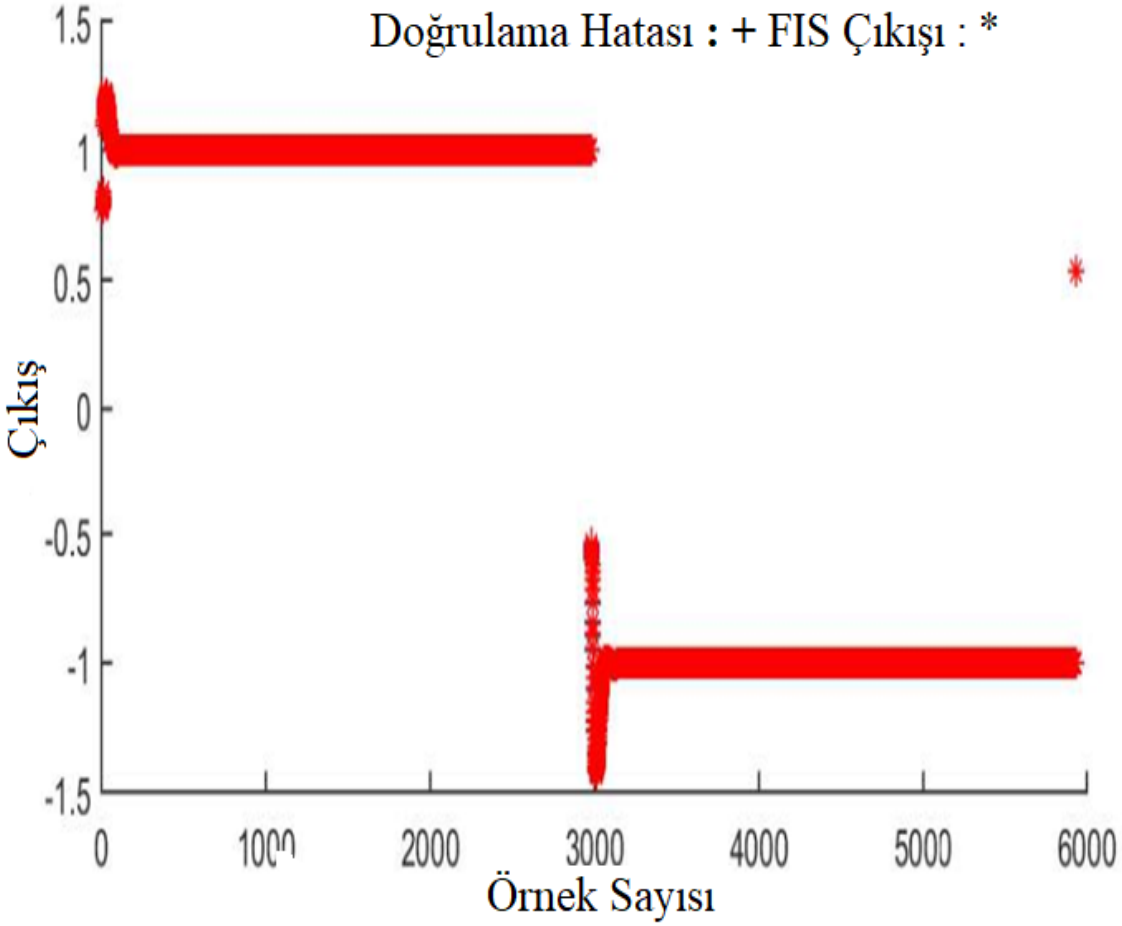
ANFIS-PI kontrolörün eğitimi için seçilen epoch sayısı optimal olarak 100 seçilmiştir. ANFIS-PI kontrolör eğitim hatalarının iterasyon sayısına göre durumları sırasıyla Şekil 4.29'da verilmiştir.



Şekil 4.29:Fuel-Oil santrali için ANFIS-PI eğitim hatası.

Şekil 4.29'da gösterildiği gibi ANFIS-PI kontrolörün her bir girişi için 6 üyelik fonksiyonu kullanılması durumunda eğitim verilerinin ortalama test hatası 0,00043217 olarak bulunmuştur.

Şekil 4.30’da kullanılan ANFIS-PI kontrolör için kullanılan doğrulama verilerinin hata grafiği gösterilmektedir.



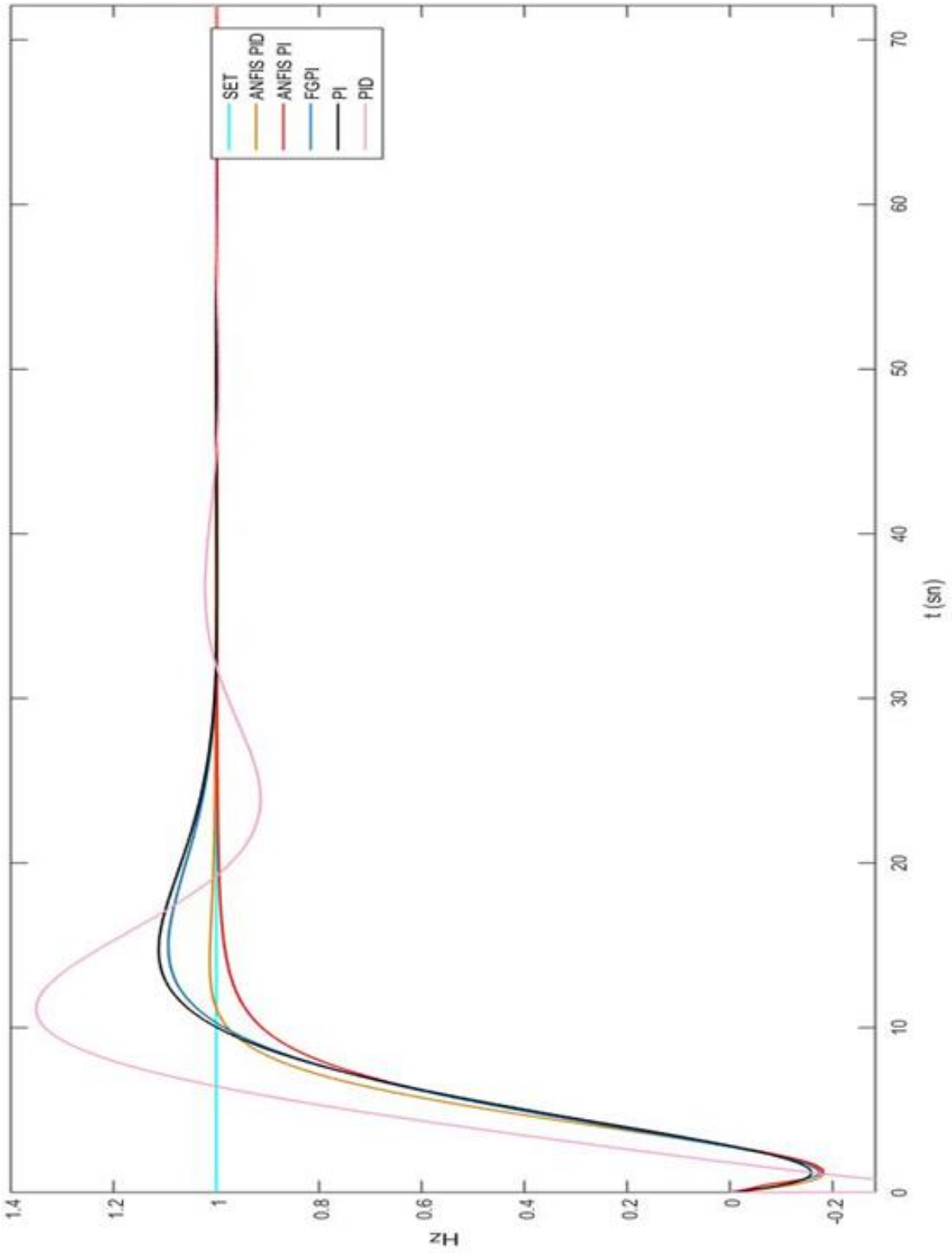
Şekil 4.30:Fuel-Oil santrali için ANFIS-PI doğrulama hatası.

Doğrulama veri seti için ise ortalama test hatası 0,00041822 Şekil 4.30'da gösterildiği gibi bulunmuştur.

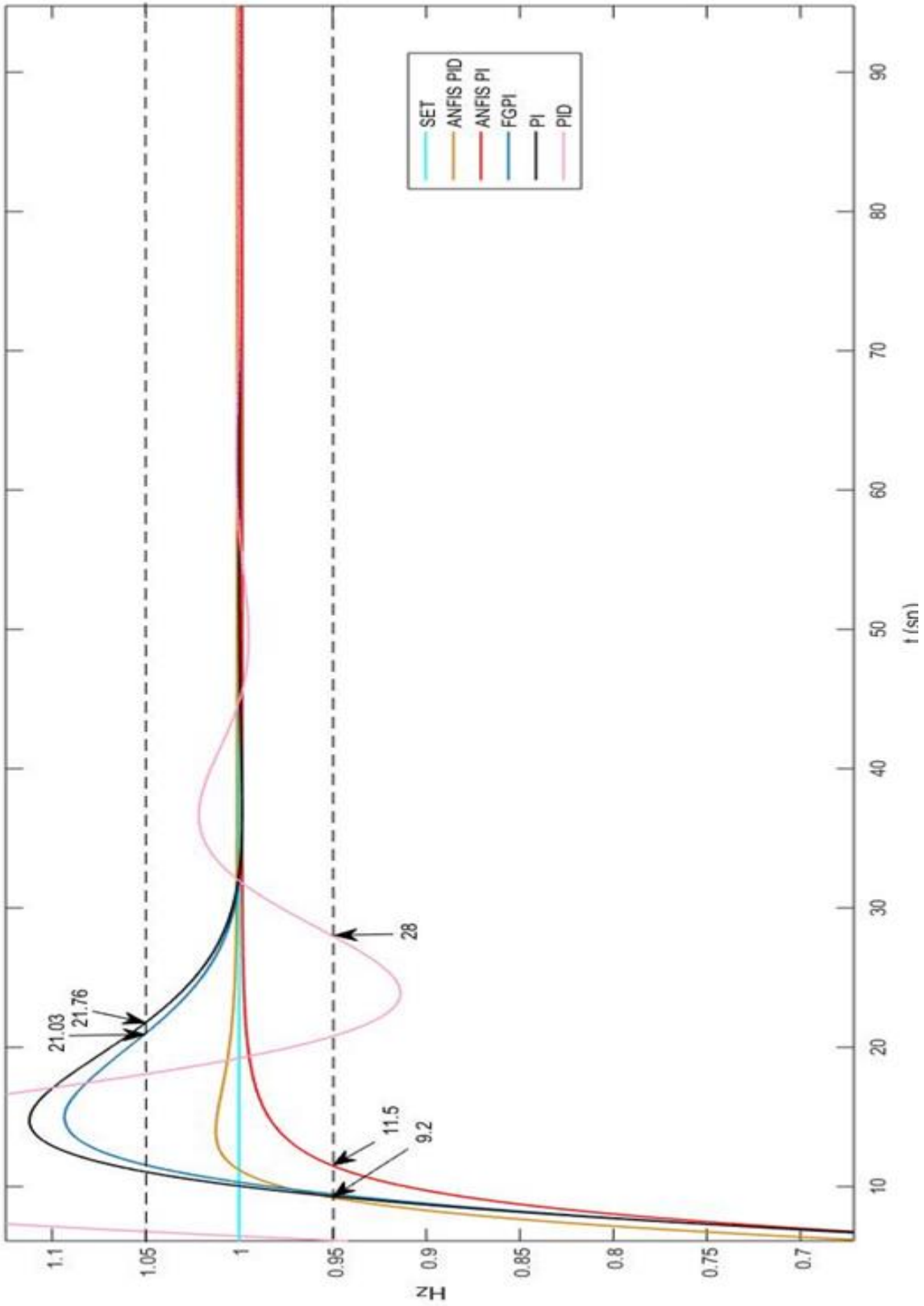
4.2.SİMÜLASYON SONUÇLARİ

Simülasyonda, Hidroelektrik santralin frekans çıkışı için istenen değer sembolik olarak 1 Hz alınmıştır.

Daha iyi bir değerlendirme yapabilmek için % 5’lik bir bant kullanılmış ve elde edilen çıkışlar Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'de gösterilmiştir.



Şekil 4.31: Hidroelektrik santrali simülasyon sonuçları.



Şekil 4.32: Hidroelektrik santrali simülasyon sonuçları grafiğinin yakınlaştırılmış grafiği.

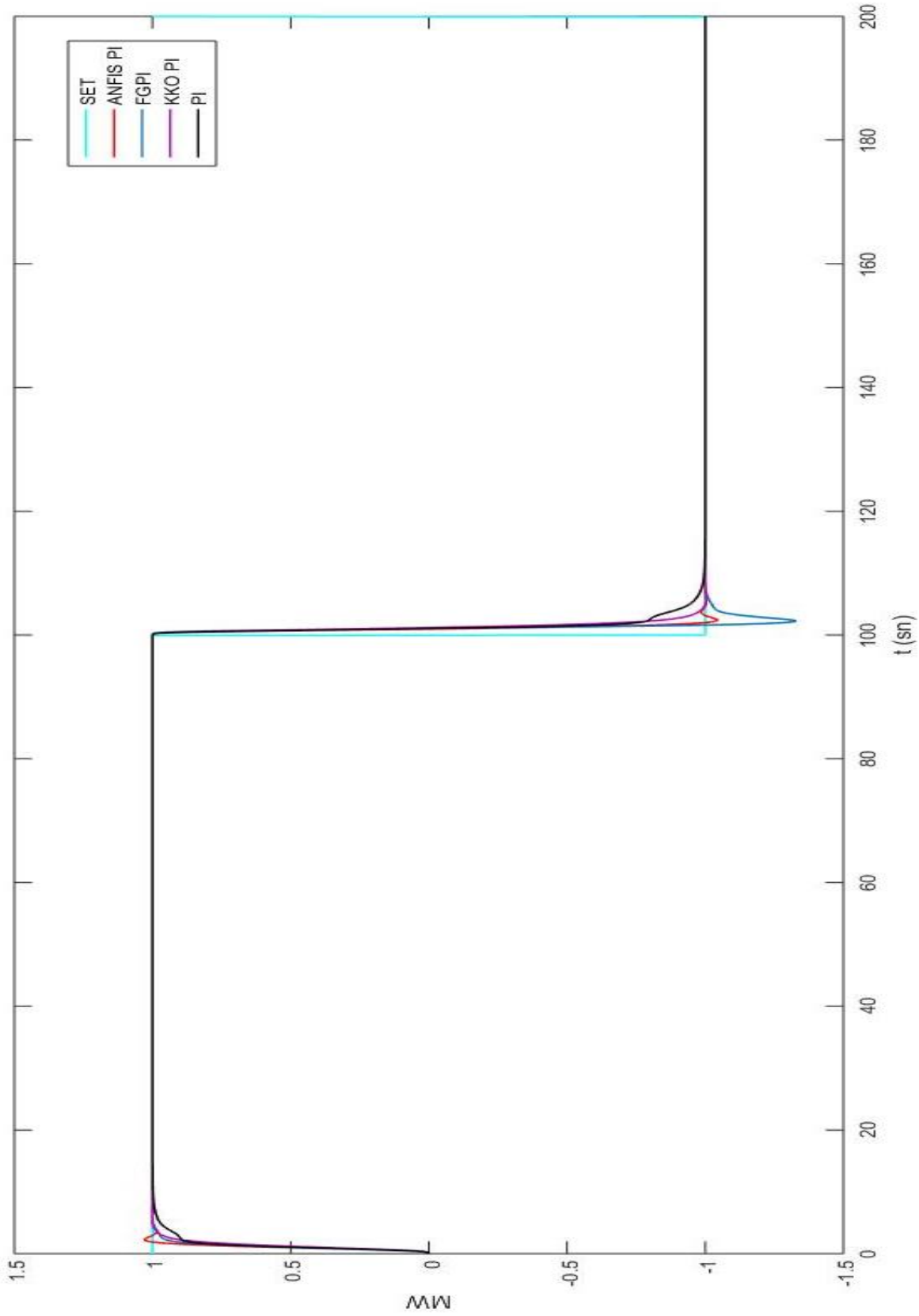
Hidroelektrik santral simülasyonundan elde edilen sonuçlar aşağıdaki Tablo 4.8'de özetlenmiştir;

Tablo 4.8:Hidroelektrik santral simülasyonu sonuçlarının karşılaştırılması.

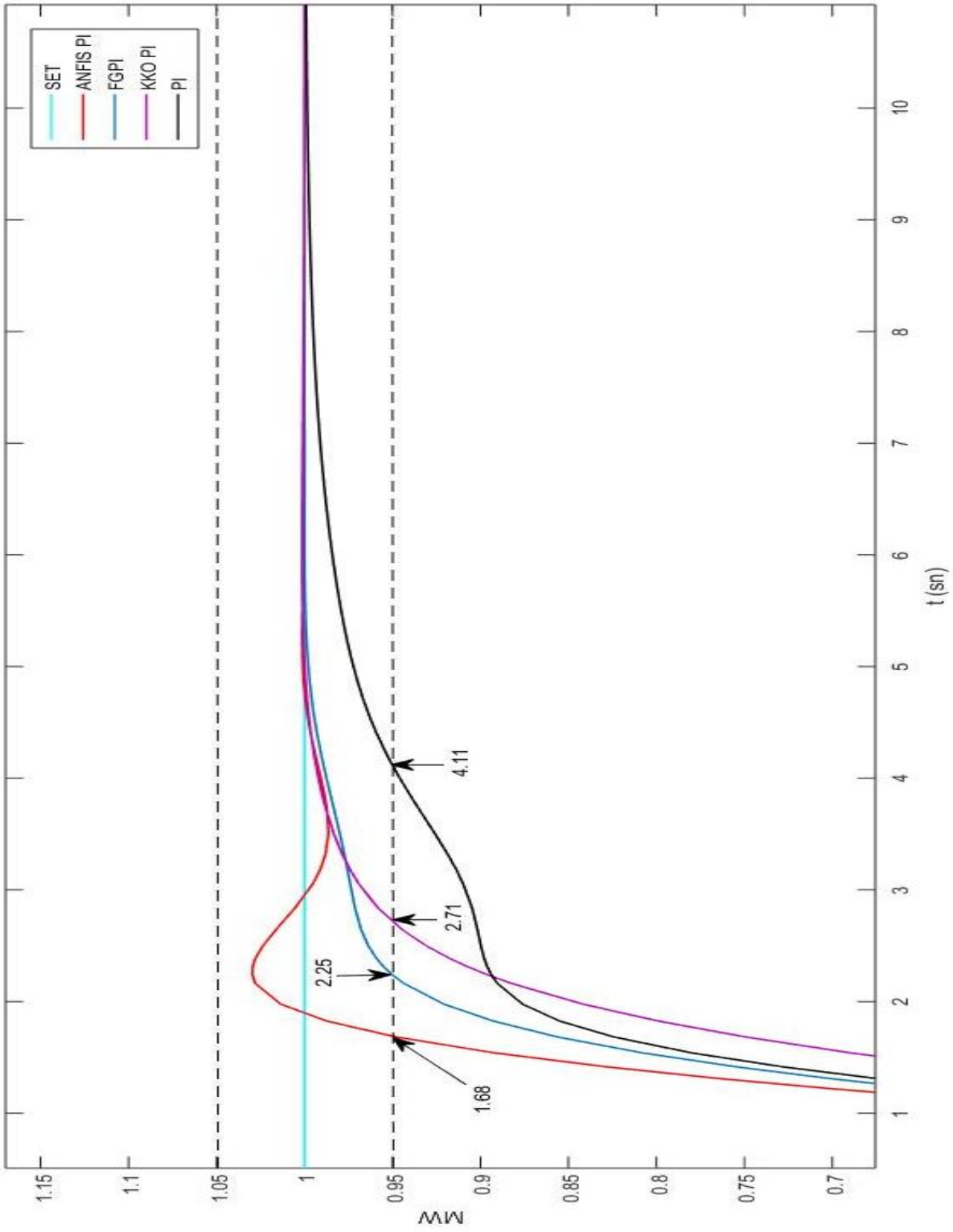
Hidroelektrik Santral	ANFIS PID	ANFIS PI	FGPI	PI	PID
Oturma Zamanı (sn)	9,20	11,50	21,03	21,76	28
Aşma Değeri (%)	1,20	0	9,40	11,20	35,04

Simülasyonda, Doğal Gaz Türbini santralinin aktif güç çıkışı için istenen değer sembolik olarak 0-100 saniye aralığı boyunca +1 MW ve 101-200 saniye aralığı boyunca -1 MW alınmıştır. Böylelikle kontrolörlerin değişen dinamiklere adatasyonunun daha net bir şekilde gözlenebilmesi amaçlanmıştır.

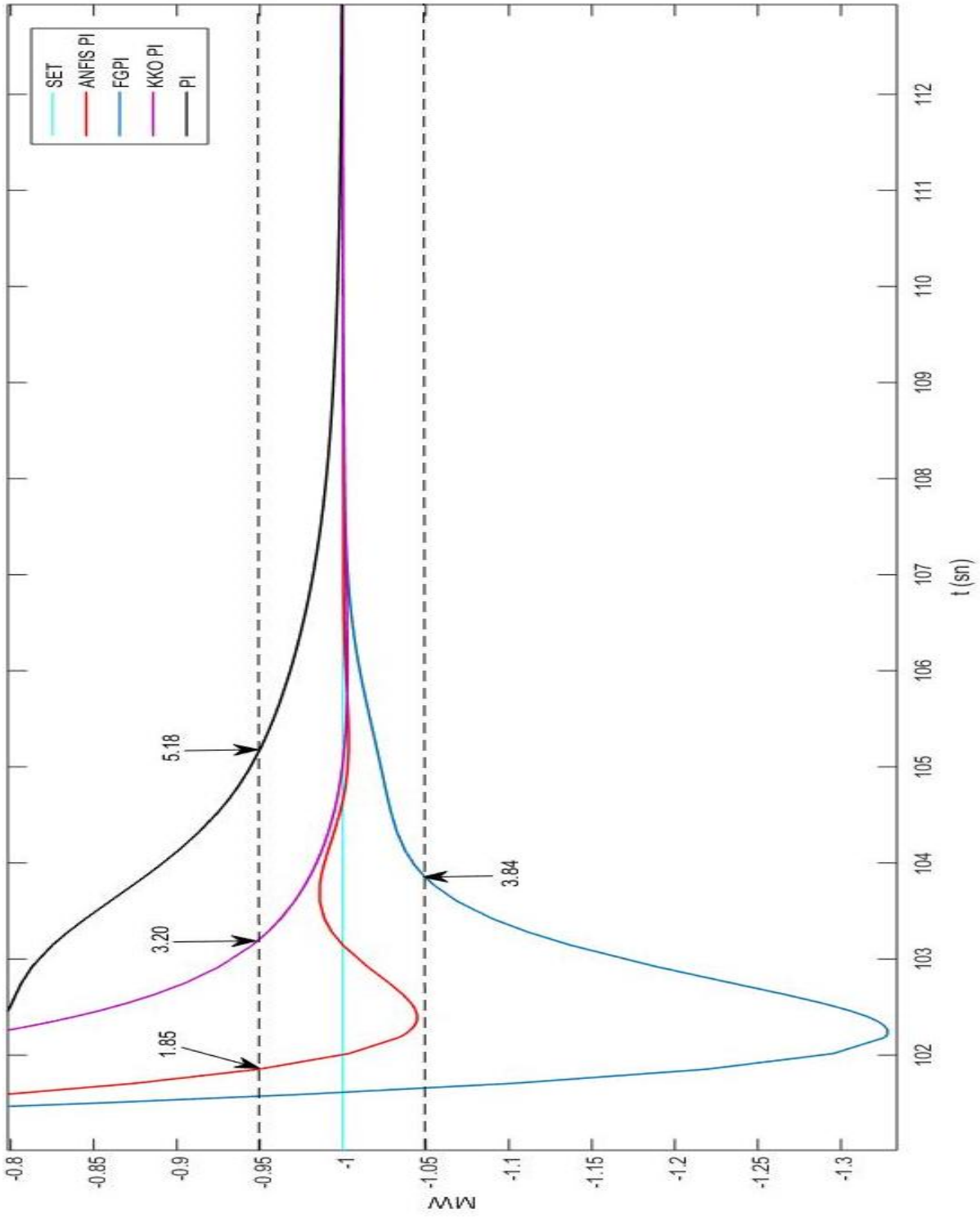
Daha iyi bir değerlendirme yapabilmek için % 5'lik bir bant kullanılmış ve elde edilen çıkışlar Şekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te gösterilmiştir.



Şekil 4.33:Doğal Gaz türbini santrali simülasyon sonuçları.



Şekil 4.34: Doğal Gaz türbini santrali yakınlaştırılmış pozitif kısım simülasyon sonuçları.



Şekil 4.35: Doğal gaz türbini santrali yakınlaştırılmış negatif kısım simülasyon sonuçları.

Doğal Gaz Türbini Santrali simülasyonundan elde edilen sonuçlar aşağıdaki Tablo 4.9 ve Tablo 4.10'da özetlenmiştir;

Tablo 4.9: Doğal Gaz türbini santrali simülasyonu pozitif kısım sonuçlarının karşılaştırılması.

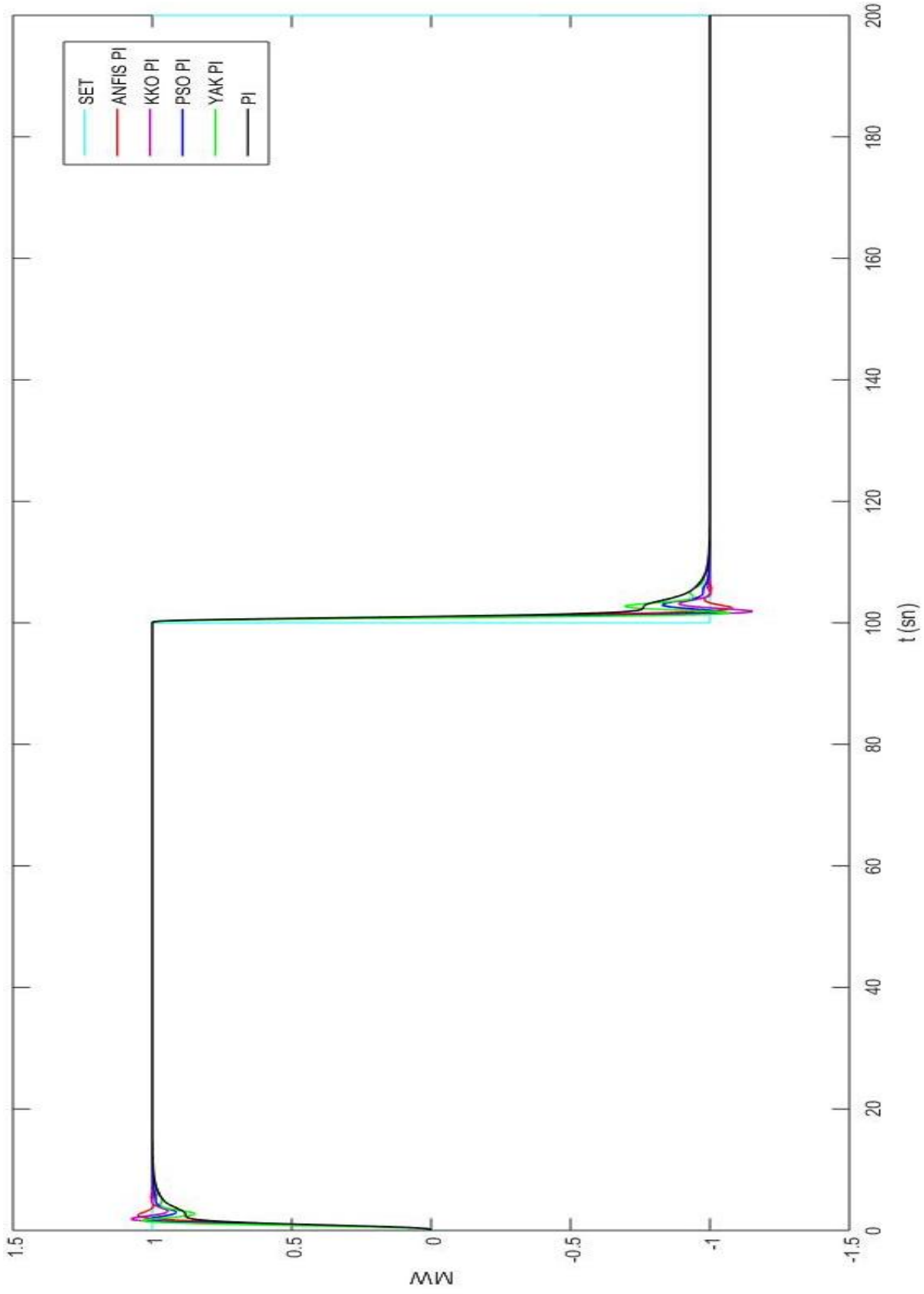
Doğal Gaz Türbin Santrali (+)	ANFIS PI	FGPI	KKO PI	PI
Oturma Zamanı (sn)	1,68	2,25	2,71	4,11
Aşma Değeri (%)	3	0	0	0

Tablo 4.10: Doğal Gaz türbini santrali simülasyonu negatif kısım sonuçlarının karşılaştırılması.

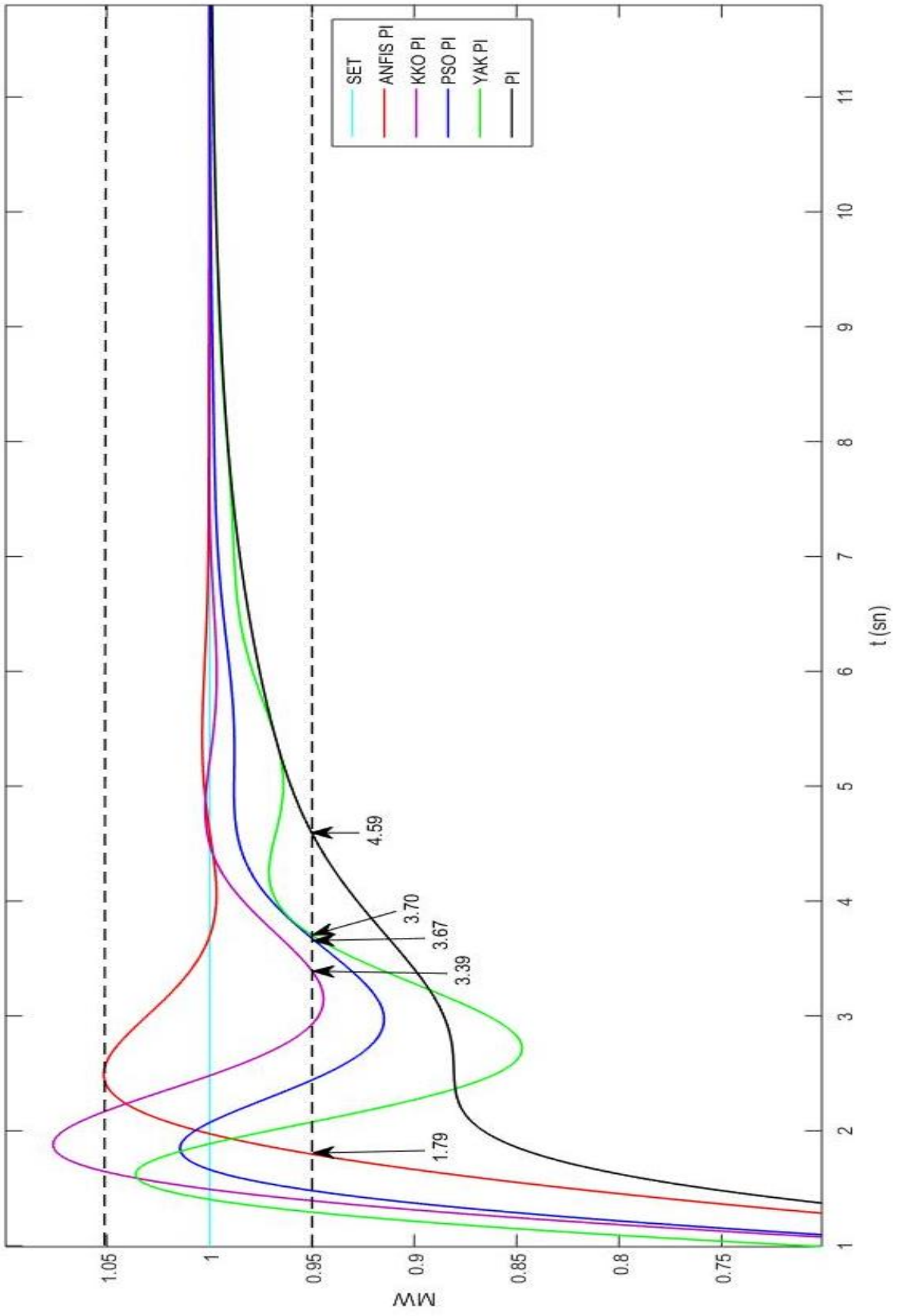
Doğal Gaz Türbin Santrali (-)	ANFIS PI	KKO PI	FGPI	PI
Oturma Zamanı (sn)	1,85	3,20	3,84	5,18
Aşma Değeri (%)	4,49	0	32,82	0

Simülasyonda, Fuel-Oil santralinin aktif güç çıkışı için istenen değer sembolik olarak 0-100 saniye aralığı boyunca +1 MW ve 101-200 saniye aralığı boyunca -1 MW alınmıştır.

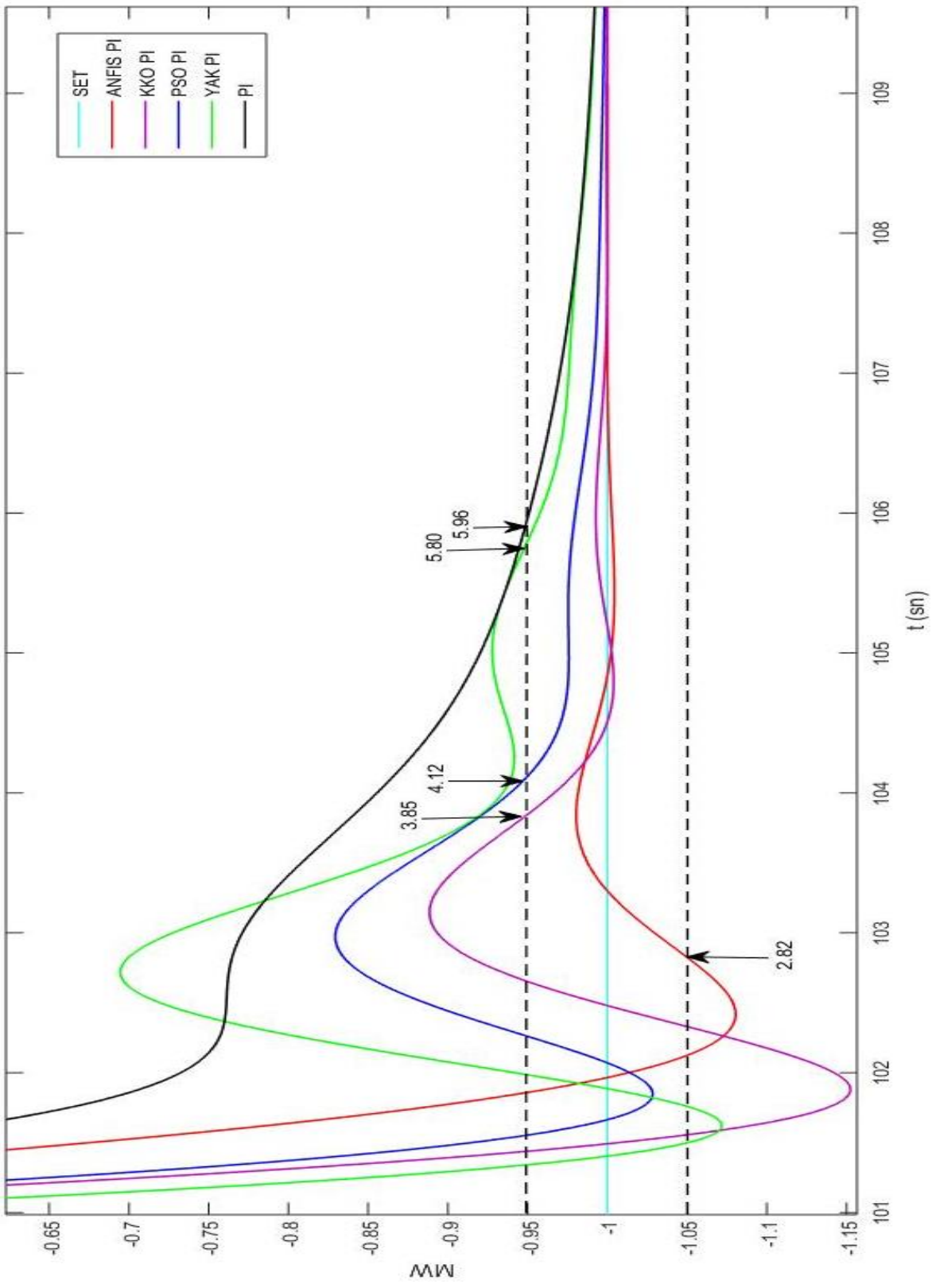
Daha iyi bir değerlendirme yapabilmek için % 5'lik bir bant kullanılmış ve elde edilen çıkışlar Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38'de gösterilmiştir.



Şekil 4.36: Fuel-Oil santrali Simülasyon Sonuçları.



Şekil 4.37: Fuel-Oil santrali yakınlaştırılmış pozitif kısım simülasyon sonuçları.



Şekil 4.38: Fuel-Oil santrali yakınlaştırılmış pozitif kısım simülasyon sonuçları.

Fuel-Oil simülasyonundan elde edilen sonuçlar aşağıdaki Tablo 4.11 ve Tablo 4.12'de özetlenmiştir;

Tablo 4.11:Fuel-Oil santrali simülasyonu pozitif kısım sonuçlarının karşılaştırılması.

Fuel-Oil Santrali (+)	ANFIS PI	KKO PI	PSO PI	YAK PI	PI
Oturma Zamanı (sn)	1,79	3,39	3,67	3,70	4,59
Aşma Değeri (%)	5	7,63	1,40	3,60	0

Tablo 4.12:Fuel-Oil santrali simülasyonu negatif kısım sonuçlarının karşılaştırılması.

Fuel-Oil Santrali (-)	ANFIS PI	KKO PI	PSO PI	YAK PI	PI
Oturma Zamanı (sn)	2,82	3,85	4,12	5,80	5,96
Aşma Değeri (%)	8,05	15,25	2,84	7,21	0

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu tezde Hidroelektrik, Doğal Gaz Türbini ve Fuel-Oil olmak üzere üç farklı santralde modern ve klasik kontrol yöntemleri uygulanmıştır.

Hidroelektrik santral için beş kontrolör metodu kullanılmıştır. Şekil 4.28 ve Tablo 4.8'de görüldüğü gibi, genel olarak sonuçlar değerlendirildiğinde, ANFIS tabanlı kontrolörlerin diğer kontrolörlerden çok daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir. PI kontrolörü bu noktada PID kontrolöründen çok daha iyidir ve FGPI kontrolöre yakın sonuçlar vermektedir. Sonuçlar oturma zamanı açısından karşılaştırıldığında PID, PI ve FGPI kontrolörler 20 saniyeden daha uzun sürede değerleri alırken PID kontrolör 28 saniye ile en kötü sonucu vermektedir. ANFIS tabanlı kontrolörleri karşılaştırıldığında ise, ANFIS-PID kontrolörün ANFIS-PI kontrolörden 2,3 saniye daha hızlı sonuç vererek en hızlı sonuca sahip olduğu ve 9,20 saniyelik bir oturma zamanı olduğu görülmektedir. Aşma değeri açısından, ANFIS-PI kontrolörün aşma değeri yokken ANFIS-PID kontrolörün %1,2 olduğu görülmektedir. Ancak, frekans kontrolü uygulamalarında hızlı bir tepki gerekli olduğu için bu aşma değeri kabul edilebilirdir. Bu nedenle hidroelektrik santral için, ANFIS tabanlı kontrolörler gibi modern kontrol tekniklerinin kullanılması çok daha uygundur.

Doğal Gaz türbini santrali için dört kontrolör kullanılmıştır. Daha verimli sonuçlar almak için; tüm kontrolörler hem pozitif hem de negatif set değerlerinde test edilmiştir. Pozitif kısımdan başlayarak, Şekil 4.30 ve Tablo 4.9'da sunulan sonuçlar değerlendirildiğinde, ANFIS tabanlı PI kontrolörün diğer kontrolörlerden çok daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmektedir. Sonuçlar oturma zamanı açısından karşılaştırıldığında, PI, KKO-PI ve FGPI kontrolörlerin 2 saniyeden daha uzun oturma değerlerine sahip olduğu açıkça görülebilir. PI kontrolör 4,11 saniye ile en yavaş sonucu verip son sırada yer alırken bu değer sırasıyla FGPI kontrolör için 2,25 saniye, KKO-PI kontrolör için 2,71 saniyedir. ANFIS-PI kontrolör FGPI kontrolörden 0,57 saniye daha hızlı olup 1,68 saniyelik bir oturma zamanı ile en hızlı sonuca sahiptir. Aşma değeri açısından, ANFIS-PI kontrolörün % 3'lük bir aşımı varken, diğer kontrolörlerin aşımı yoktur. Negatif kısım incelendiğinde ise, Şekil 4.31 ve Tablo 4.10'da görüldüğü üzere, negatif bir set değeri uygulansa bile, ANFIS-PI kontrolörün diğer tüm kontrolörlerden çok daha iyi sonuçlar verdiği açıkça görülmektedir. Sonuçlar oturma zamanı açısından karşılaştırıldığında, PI, FGPI ve KKO-PI kontrolörlerin 3 saniyeden daha uzun yerleşim değerlerine sahip olduğu açıkça

görülebilir. Burada kontrol metotları kendi arasında karşılaştırıldığında KKO-PI kontrolör FGPI kontrolörden 0,64 saniye daha hızlı sonuç gösterir. ANFIS-PI kontrolör ise 1,85 saniye oturma zamanı ile KKO-PI kontrolörden 1,35 saniye daha hızlı olup tüm kontrolörler içinde en hızlı sonuca sahiptir. Aşma değeri açısından ise, FGPI kontrolörün beklenmeyen % 32,82'lik aşımı, ANFIS-PI kontrolörün ise sadece % 4,49'luk aşımı ve diğer kontrolörlerin ise sıfır aşımı vardır. Fakat aktif güç kontrolü uygulamalarında hızlı bir tepki gerekli olduğu için böyle bir enerji santrali için ANFIS-PI kontrolör kullanılmasının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Fuel-Oil santrali için ise, beş kontrolör kullanılmıştır. Daha verimli sonuçlar almak için; tüm kontrolörler hem pozitif hem de negatif set değerinde test edilmiştir. Pozitif kısımdan başlayarak, Şekil 4.33 ve Tablo 4.11'de sunulan sonuçlar değerlendirildiğinde, ANFIS-PI kontrolörün diğer kontrolörlerden çok daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmektedir. Sonuçlar oturma zamanı açısından karşılaştırıldığında, PI, YAK-PI, PSO-PI, KKO-PI ve FGPI kontrolörlerin 3 saniyeden daha uzun yerleşim değerlerine sahip olduğu açıkça görülebilir. Bu değer; KKO-PI kontrolör için 3,39 saniye, PSO-PI kontrolör için 3,67 saniye, YAK-PI kontrolör için 3,70 saniye iken PI kontrolör için 4,59 saniye ile en kötü sonuç olarak son sırada yer alır. ANFIS-PI kontrolör 1,79 saniye oturma zamanı ile KKO-PI kontrolörden 1,6 saniye daha hızlıdır ve en hızlı sonuca sahiptir. Aşma değeri açısından, KKO-PI kontrolör %7,63 ile en yüksek değere ve ANFIS-PI kontrolör ise % 5 aşma oranına sahipken, PI kontrolörde aşma oranı yoktur. Negatif kısım incelendiğinde ise, Şekil 4.34 ve Tablo 4.12'de görüldüğü üzere, negatif bir set değeri uygulansa bile, ANFIS-PI kontrolörün diğer tüm kontrolörlerden çok daha iyi sonuçlar verdiği görülmektedir. Sonuçlar oturma zamanı açısından karşılaştırıldığında, PI, YAK-PI, PSO-PI ve KKO-PI kontrolörlerin 3 saniyeden daha uzun yerleşim değerlerine sahip olduğu açıkça görülebilir. ANFIS-PI kontrolör 2,82 saniye oturma zamanı ile KKO-PI kontrolörden 1,03 saniye daha hızlı olup en hızlı sonuca sahiptir. Aşma değeri açısından, KKO-PI kontrolör % 15.25 gibi beklenmeyen bir aşım oranına sahipken ANFIS-PI kontrolörün aşım oranı ise % 8.05'dir. Yukarıda da belirtildiği üzere aktif güç kontrolü uygulamalarında hızlı bir tepki gerekli olduğu için enerji santralleri için ANFIS-PI kontrolör kullanılmasının daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Bu tezin temel amacı; enerji santrallerinde kullanılan konvansiyonel kontrol yöntemlerinin yüksek çalışma süresine sahip olmaları ve enerji santrallerinin sürekli değişen dinamiklerine

yeterli cevap verememeleri sebebiyle enerji santralleri için modern bir kontrol yönteminin uygulanmasıdır. Farklı tipteki santrallerde çeşitli kontrol yöntemleri denendikten sonra elde edilen sonuçları özetlemek gerekirse, ANFIS tabanlı kontrolörlerin tüm koşullarda diğer kontrolörlerden çok daha iyi sonuçlar verdiği kanıtlanmıştır. ANFIS tabanlı kontrolörler, bulanık mantık ve yapay sinir ağlarının avantajlarını birleştirerek sistem verimliliğinde önemli bir iyileşme sunmaktadır.

Bu çalışma, gelecekteki çalışmalar için ilham kaynağı olabilir. Daha doğru sonuçlar elde etmek için ANFIS yapısı üzerinde test etmek ve performansını artırmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç vardır. Ayrıca yapay sinir ağları gelişen teknoloji ile daha alakalı ve daha ilginç hale gelmiştir. Üçüncü nesil yapay sinir ağının yeni bir konusu olan spiking yapay sinir hücresi ağları (SNN), beyin benzeri hesaplamalı nöromorfik mimarileri ile ilgili çekici olup gelecekteki çalışmalar için üzerinde çalışılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

[1]. http://ee.mam.tubitak.gov.tr/tr/arastirma-alanlari/santral-kontrol-teknolojileri

[2]. https://www.solar.ist/wp-content/uploads/2020/01/kurulu-guc-aralik-2019-1.pdf

[3]. https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2019/05/UgurCingiSunum.pdf

[4].https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Events/2014/Jul/15/19_From_scenarios_to_policy_and_market_development_Cairo_Egypt-1.pdf?la=en&hash=AFF4AB89AC93061ED7D603ECDFA6518816D11317

[5]. World Commission on Dams. Dams and development: A new framework for decision-making: The report of the world commission on dams. Earthscan, 2000.

[6]. https://www.mbrenewables.com/en/pilot-project/

[7]. https://www.dunyaenerji.org.tr/wp-content/uploads/2018/11/UEAWEO2018-TR.pdf

[8]. http://drm-demandresponse.com/

[9]. https://www.enerjiportali.com/283-milyar-tesvik-belgesi-alan-zorlu-elektrikli-batarya-sektorunde-yatirim-yapacak/

[10].https://www.enerjiportali.com/epdk-elektrik-depolama-faaliyetleri-yonetmeligi-taslagini-yayimladi/

[11]. https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2019/power-sector

[12].https://www.dunyaenerji.org.tr/dusuk-maliyetli-bataryalar-bircok-endustriyi-donusturmek-uzere/

[13]. https://www.botas.gov.tr/uploads/galeri/974460-aralik2019a3-harita.jpg

[14]. Cantürk, Selin. Bir rüzgar çiftliğinden yapay sinir ağlarıyla kısa süreli elektrik üretim tahmini. MS thesis. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2018.

[15]. Çevik, Hasan Hüseyin. Türkiye'nin kısa dönem elektrik yük tahmini. Diss. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 2013.

[16].https://www.enedis.fr/sites/default/files/Notice_compteur_Linky_Monophase_anglais.pdf

[17].https://www.hydrogenics.com/wp-content/uploads/renewable-projects-references---fueling-stations.pdf

[18]. Hwa, Kim Dong. "Neuro-fuzzy tuning of PID controller for control of actual gas turbine power." 2004 IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications, 2004. CIMSA.. IEEE, 2004.

[19]. Mordjaoui, M., and B. Boudjema. "Forecasting and modelling electricity demand using Anfis predictor." Journal of Mathematics and Statistics 7.4 (2011): 275-281.

[20]. Dhanalakshmi, R., and S. Palaniswami. "ANFIS based neuro-fuzzy controller in LFC of wind-micro hydro-diesel hybrid power system." International Journal of computer applications 42.6 (2012): 28-35.

[21]. Kushwaha, Varsha, et al. "Adaptive neuro-fuzzy based load frequency controller for three area inter-connected hydro-thermal power system." 2016 Second International Innovative Applications of Computational Intelligence on Power, Energy and Controls with their Impact on Humanity (CIPECH). IEEE, 2016.

[22]. Nath, Vivek, and D. K. Sambariya. "Design and performance analysis of adaptive neuro fuzzy controller for load frequency control of multi-power system." 2016 10th International Conference on Intelligent Systems and Control (ISCO). IEEE, 2016.

[23]. Abo-Elyousr, Farag K. "Load frequency controller design for two area interconnected power system with DFIG based wind turbine via ant colony algorithm." 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, 2016.

[24]. Kumar, S. Selva, R. Joseph Xavier, and S. Balamurugan. "Small signal modelling of gas turbine plant for load frequency control." 2016 Biennial International Conference on Power and Energy Systems: Towards Sustainable Energy (PESTSE). IEEE, 2016.

[25]. Alhejji, Ayman. "L 1 adaptive load frequency control of single-area electrical power system." 2017 4th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT). IEEE, 2017.

[26]. Kamble, Suhas Vilas, and S. M. Akolkar. "Load frequency control of micro hydro power plant using fuzzy logic controller." 2017 IEEE International Conference on Power, Control, Signals and Instrumentation Engineering (ICPCSI). IEEE, 2017.

[27]. Kumar, Dipesh, Anirban Mishra, and Kalyan Chatterjee. "Power and frequency control of a wind energy power system using artificial bee colony algorithm." 2017 Third International Conference on Science Technology Engineering & Management (ICONSTEM). IEEE, 2017.

[28]. Srivastava, Divyank, and M. M. Tripathi. "Novel intelligent controllers for Load Frequency Control of a Multi Area hybrid power System." 2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). IEEE, 2018.

[29]. kumarEshetu, Wondwosen, Pawan Sharma, and Charu Sharma. "ANFIS based load frequency control in an isolated micro grid." 2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). IEEE, 2018.

[30]. Bhaskar, Mukesh Kumar, Nidhi Singh Pal, and Vinod Kumar Yadav. "A Comparative Performance Analysis of Automatic Generation Control of Multi-Area Power System Using PID, Fuzzy and ANFIS Controllers." 2018 2nd IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES). IEEE, 2018.

[31]. Makhloufi, Saida, Mohammed Debbache, and Saliha Boulahchiche. "Long-term Forecasting of Intermittent Wind and Photovoltaic Resources by using Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (ANFIS)." 2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA). IEEE, 2018.

[32]. Soliman, Mahmoud A., et al. "Hybrid ANFIS-GA-based control scheme for performance enhancement of a grid-connected wind generator." IET Renewable Power Generation 12.7 (2018): 832-843.

[33]. Shaker, Hesham Khalaf, et al. "Advanced Control Techniques for an Interconnected Multi Area Power System for Load Frequency Control." 2019 21st International Middle East Power Systems Conference (MEPCON). IEEE, 2019.

[34]. Aluko, Anuoluwapo O., et al. "Frequency Control of Modern Multi-Area Power Systems Using Fuzzy Logic Controller." 2019 IEEE PES/IAS PowerAfrica. IEEE, 2019.

[35]. Berwal, Seema, and Balvinder Singh. "Load Frequency Control of a Renewable Source Integrated Four Area Power System using Hybrid Controller." (2019).

[36]. Wang, Zhenhua, Haibo He, and Yan Sun. "Robust Frequency Control of Power Systems Under Time-varying Loads." 2019 North American Power Symposium (NAPS). IEEE, 2019.

[37]. Al Mamun, Abdullah, et al. "Improved Load Frequency Control Of Two-Area Power System." 2019 1st International Conference on Advances in Science, Engineering and Robotics Technology (ICASERT). IEEE, 2019.

[38]. Jha, Amitkumar V., Deepak Kumar Gupta, and Bhargav Appasani. "The PI Controllers and its optimal tuning for Load Frequency Control (LFC) of Hybrid Hydro-thermal Power Systems." 2019 International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES). IEEE, 2019.

[39]. Singh, Ashish Kumar, et al. "Load Frequency Control of Single Area Hybrid Power System Using Fuzzy-PID (FPID) Controller." 2019 IEEE Students Conference on Engineering and Systems (SCES). IEEE, 2019.

[40]. Doley, Rinku, and Saradindu Ghosh. "Application of PID and Fuzzy based Controllers for Load Frequency Control of a Single–Area and Double–Area Power Systems." 2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE). IEEE, 2019.

[41]. Chen, Gonggui, et al. "An Improved ACO Algorithm Optimized Fuzzy PID Controller for Load Frequency Control in Multi Area Interconnected Power Systems." IEEE Access (2019).

[42]. Yinsha, Wang, Li Wenyi, and Li Zhiwen. "Research on PSO-Fuzzy Algorithm Optimized Control for Multi-area AGC System with DFIG Wind Turbine." 2019 14th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). IEEE, 2019.

[43]. Zhi, Ding. "Optimization of PID Controller for Single Phase Inverter Based on ABC." 2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). IEEE, 2019.

[44]. Prainetr, Supachai, et al. "Design Tuning PID Controller For Temperature Control Using Ant Colony Optimization." 2019 IEEE 2nd International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA). IEEE, 2019.

[45]. Bui, Van-Tri, et al. "Dynamic Voltage Stability Enhancement of a Grid-Connected Wind Power System by ANFIS Controlled Static Var Compensator." 2019 International Conference on System Science and Engineering (ICSSE). IEEE, 2019.

[46]. Amin, Ifte K., M. Nasir Uddin, and Marayati Marsadek. "ANFIS based Neuro-Fuzzy Control of DFIG for Wind Power Generation in Standalone Mode." 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). IEEE, 2019.

[47]. Isa, Abubakar, and Constantinos Sourkounis. "Development of Artificial Neural Network and Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Based Techniques and Algorithms for Protection of Transmission Line." IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Vol. 1. IEEE, 2019.

[48]. Surjandari, Isti, et al. "Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS) Method to Optimize The Reduction Process of Saprolite Ore Composites in Tube Furnace." 2019 16th International Conference on Service Systems and Service Management (ICSSSM). IEEE, 2019.

[49]. Ismail, Mohamed M., and Ahmed F. Bendary. "Smart battery controller using ANFIS for three phase grid connected PV array system." Mathematics and Computers in Simulation 167 (2020): 104-118.

[50]. Kumar, Sanjeev, et al. "Adaptive Neuro-fuzzy Control of Solar-Powered Building Integrated with Daylight-Artificial Light System." 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy (PESGRE2020). IEEE, 2020.

[51]. Kundur, Prabha, Neal J. Balu, and Mark G. Lauby. Power system stability and control. Vol. 7. New York: McGraw-hill, 1994.

[52]. Souza, O. H., N. Barbieri, and A. H. M. Santos. "Study of hydraulic transients in hydropower plants through simulation of nonlinear model of penstock and hydraulic turbine model." IEEE Transactions on Power Systems 14.4 (1999): 1269-1272.

[53]. De Jaeger, E., et al. "Hydro turbine model for system dynamic studies." IEEE Transactions on Power Systems 9.4 (1994): 1709-1715.

[54]. Çiftkaya, Birol. Elektrik Üretiminde Kullanılan Gaz Türbinlerinin İncelenmesi Ve Benzetimi. Diss. Fen Bilimleri Enstitüsü, 2010.

[55]. Jones, J.B., Dugan, R.E., 2003, Mühendislik Termodinamiği, Beta Basım, İstanbul, ISBN: 9789752952317.

[56]. Rowen, William I. "Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines." (1983): 865-869.

[57]. Rowen, William I. "Dynamic response characteristics of heavy duty gas turbines and combined cycle systems in frequency regulating duty." (1995): 6-6.

[58]. Demirören, Ayşen, and Lale Zeynelgil. Elektrik enerji sistemlerinin kararlılığı, kontrolü ve çalışması. Birsen Yayınevi, 2004.

[59]. Kakimoto, Naoto, and Kazuhiro Baba. "Performance of gas turbine-based plants during frequency drops." IEEE transactions on power systems 18.3 (2003): 1110-1115.

[60]. Dai, Yiping, et al. "Research on the primary frequency control characteristics of generators in power system." 2007 2nd IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. IEEE, 2007.

[61]. Dandeno, P. L. "IEEE guide for synchronous generator modeling practices in stability analyses." IEEE Std (1991): 1110-1991.

[62]. Yee, Soon Kiat, Jovica V. Milanovic, and F. Michael Hughes. "Overview and comparative analysis of gas turbine models for system stability studies." IEEE Transactions on power systems 23.1 (2008): 108-118.

[63]. Kakimoto, Naoto, and Kazuhiro Baba. "Performance of gas turbine-based plants during frequency drops." IEEE transactions on power systems 18.3 (2003): 1110-1115.

[64]. Rowen, William I. "Dynamic response characteristics of heavy duty gas turbines and combined cycle systems in frequency regulating duty." (1995): 6-6.

[65]. Ziegler, John G., and Nathaniel B. Nichols. "Optimum settings for automatic controllers." trans. ASME 64.11 (1942).

[66]. Paraskevopoulos, P. "Modern Control Engineering, ser." Control Engineering. Marcel Dekker (2002).

[67]. Ogata, Katsuhiko, and Yanjuan Yang. Modern control engineering. Vol. 5. Upper Saddle River, NJ: Prentice hall, 2010.

[68]. Bequette, B. Wayne. Process control: modeling, design, and simulation. Prentice Hall Professional, 2003.

[69]. Åström, Karl Johan, and Tore Hägglund. PID controllers: theory, design, and tuning. Vol. 2. Research Triangle Park, NC: Instrument society of America, 1995.

[70]. Pelusi, Danilo, and Raffaele Mascella. "Optimal control Algorithms for second order Systems." JCS 9.2 (2013): 183-197.

[71]. Basilio, João Carlos, and S. R. Matos. "Design of PI and PID controllers with transient performance specification." IEEE Transactions on education 45.4 (2002): 364-370.

[72]. Hamamci, Serdar E. "Stabilization using fractional-order PI and PID controllers." Nonlinear Dynamics 51.1-2 (2008): 329-343.

[73]. Kristiansson, Birgitta, and Bengt Lennartson. "Robust and optimal tuning of PI and PID controllers." IEE Proceedings-Control Theory and Applications 149.1 (2002): 17-25.

[74]. Karaboga, Dervis. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Vol. 200. Technical report-tr06, Erciyes university, engineering faculty, computer engineering department, 2005.

[75]. Karaboga, Dervis, and Bahriye Akay. "A comparative study of artificial bee colony algorithm." Applied mathematics and computation 214.1 (2009): 108-132.

[76]. Karaboga, Dervis, and Bahriye Basturk. "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm." Journal of global optimization 39.3 (2007): 459-471.

[77]. Karaboga, D., and B. A. H. R. İ. Y. E. Akay. "Proportional—integral—derivative controller design by using artificial bee colony, harmony search, and the bees algorithms." Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering 224.7 (2010): 869-883.

[78]. Karaboga, Dervis, and Bahriye Basturk. "On the performance of artificial bee colony (ABC) algorithm." Applied soft computing 8.1 (2008): 687-697.

[79]. Kennedy, J., and R. C. Eberhart. "Particle swarm optimization inProceedings of IEEE international conference on neural networks." Piscataway December (1995).

[80]. Kennedy, J., and R. C. Everhart. "A new optimizer using particle swarm theory. In proceedings of the sixth international symposium on micro machine and human science. Nagoya Japón." IEEE service center Piscataway, NJ (1995).

[81]. Li, Xiaodong, and Kalyanmoy Deb. "Comparing lbest PSO niching algorithms using different position update rules." IEEE congress on evolutionary computation. IEEE, 2010.

[82]. Poli, Riccardo. "Analysis of the publications on the applications of particle swarm optimisation." Journal of Artificial Evolution and Applications 2008 (2008).

[83]. van den Bergh, Frans, and Andries P. Engelbrecht. "A new locally convergent particle swarm optimiser." IEEE International conference on systems, man and cybernetics. Vol. 3. IEEE, 2002.

[84]. Dorigo, Marco. "Optimization, learning and natural algorithms." PhD Thesis, Politecnico di Milano (1992).

[85]. Dorigo, Marco, Vittorio Maniezzo, and Alberto Colorni. "Ant system: optimization by a colony of cooperating agents." IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics) 26.1 (1996): 29-41.

[86]. Dorigo, Marco, and Luca Maria Gambardella. "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem." IEEE Transactions on evolutionary computation 1.1 (1997): 53-66.

[87]. Gambardella, Luca M., and Marco Dorigo. "Ant-Q: A reinforcement learning approach to the traveling salesman problem." Machine Learning Proceedings 1995. Morgan Kaufmann, 1995. 252-260.

[88]. Gambardella, Luca Maria, and Marco Dorigo. "Solving symmetric and asymmetric TSPs by ant colonies." Proceedings of IEEE international conference on evolutionary computation. IEEE, 1996.

[89]. Stutzle, T., and H. Hoos. "Max-Min Ant System, Future Generation Computer Systems." (2000): 889-914.

[90]. Zadeh, Lotfi A. "Fuzzy sets." Information and control 8.3 (1965): 338-353.

[91]. Dadios, Elmer, ed. Fuzzy Logic: Controls, Concepts, Theories and Applications. BoD–Books on Demand, 2012.

[92]. Passino, Kevin M., Stephen Yurkovich, and Michael Reinfrank. Fuzzy control. Vol. 42. Menlo Park, CA: Addison-wesley, 1998.

[93]. Rani, SPJ Vasantha, P. Kanagasabapathy, and A. Sathish Kumar. "Digital fuzzy logic controller using VHDL." 2005 Annual IEEE India Conference-Indicon. IEEE, 2005.

[94]. Raviraj, V. S. C., and Paresh C. Sen. "Comparative study of proportional-integral, sliding mode, and fuzzy logic controllers for power converters." IEEE Transactions on Industry Applications 33.2 (1997): 518-524.

[95]. Borne, Pierre, et al. Introduction à la commande floue. 1998.

[96]. Dualibe, Carlos, Michel Verleysen, and P. Jespers. Design of analog fuzzy logic controllers in CMOS technologies: implementation, test and application. Springer Science & Business Media, 2007.

[97]. Chang, C. S., and Weihui Fu. "Area load frequency control using fuzzy gain scheduling of PI controllers." Electric Power Systems Research 42.2 (1997): 145-152.

[98]. Jang, Jyh-Shing Roger, Chuen-Tsai Sun, and Eiji Mizutani. "Neuro-fuzzy and soft computing-a computational approach to learning and machine intelligence [Book Review]." IEEE Transactions on automatic control 42.10 (1997): 1482-1484.

[99]. Jang, J-SR, and C-T. Sun. "Functional equivalence between radial basis function networks and fuzzy inference systems." IEEE transactions on Neural Networks 4.1 (1993): 156-159.

[100]. Jang, J-SR. "ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system." IEEE transactions on systems, man, and cybernetics 23.3 (1993): 665-685.

[101]. Lin, Chin-Teng, and C. S. Lee. Neural fuzzy systems: a neuro-fuzzy synergism to intelligent systems. Prentice-Hall, Inc., 1996.

[102]. Lin, C-T., and C. S. George Lee. "Neural-network-based fuzzy logic control and decision system." IEEE Transactions on computers 12 (1991): 1320-1336.

[103]. Abraham, Ajith. "Adaptation of fuzzy inference system using neural learning." Fuzzy systems engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. 53-83.

[104]. Nazmy, T. M., H. El-Messiry, and B. Al-Bokhity. "Adaptive neuro-fuzzy inference system for classification of ECG signals." 2010 The 7th international conference on informatics and systems (INFOS). IEEE, 2010.

[105]. Abraham, Ajith. "Adaptation of fuzzy inference system using neural learning." Fuzzy systems engineering. Springer, Berlin, Heidelberg, 2005. 53-83.

[106]. Zhao, Guangyao, Cuiyun Peng, and Xiting Wang. "Intelligent control for AMT based on driver's intention and ANFIS decision-making." 2008 7th World Congress on Intelligent Control and Automation. IEEE, 2008.

[107]. Wang, Li-Xin, and Jerry M. Mendel. "Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning." IEEE transactions on Neural Networks 3.5 (1992): 807-814.

[108]. Keshavarzi, Ali, et al. "Application of ANFIS-based subtractive clustering algorithm in soil cation exchange capacity estimation using soil and remotely sensed data." Measurement 95 (2017): 173-180.

[109]. Wang, L-X., and Jerry M. Mendel. "Back-propagation fuzzy system as nonlinear dynamic system identifiers." [1992 Proceedings] IEEE International Conference on Fuzzy Systems. IEEE, 1992.

[110]. Mathworks. "MATLAB R2015a [Computer software]." (2015).

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler	
Adı Soyadı	Rahma TABAKH
Doğum Yeri	TUNUS
Doğum Tarihi	12.07.1994
Uyruğu	❒ T.C. ☑ Diğer: Tunuslu
Telefon	0090 5050405214
E-Posta Adresi	tabakhrahma@gmail.com
Web Adresi	



Eğitim Bilgileri	
Lisans	
Üniversite	Pamukkale Üniversitesi
Fakülte	Mühendislik Fakültesi
Bölümü	Elektrik-Elektronik Mühendisliği
Mezuniyet Yılı	2018

Yüksek Lisans	
Üniversite	İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa
Enstitü Adı	Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Anabilim Dalı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı
Programı	Elektrik-Elektronik Mühendisliği

Makale ve Bildiriler