

KIRIKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK ANABİLİM DALI
YÜKSEK LİSANS TEZİ

TERMİK SANTRALLERDE ADAPTİF
BULANIK MANTIK DENETİMİ

Murat BÜTÜN

ŞUBAT 2010

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı Murat BÜTÜN tarafından hazırlanan TERMİK SANTRALLERDE ADAPTİF BULANIK MANTIK DENETİMİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Ediz POLAT

Ana Bilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY _____

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tolga EREN _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Doç. Dr. Burak BİRGÖREN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ÖZET

TERMİK SANTRALLERDE ADAPTİF BULANIK MANTIK DENETİMİ

BÜTÜN, Murat

Kırıkkale Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı, Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ

Şubat 2010, 86 sayfa

Enerji santralleri üretim aşamalarında çeşitli iç ve dış bozucu faktörlerden etkilenmektedir. Termik santrallerde klasik kontrol sistemlerinin, parametre değişimlerine ve bozucu etkilere karşı performansları, yeni kontrol sistemlerine oranla her zaman istenen düzeyde olamamaktadır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte enerji santrallerinin güçlerinin büyümesi ve daha kompleks santral yapılarının oluşmasıyla optimal, esnek kontrol sistemlerine ihtiyaç artmaktadır.

Günümüzde birçok farklı kontrol yöntemleri kullanılmakta ve geliştirilmektedir. Bu tez çalışmasında bir termik elektrik santralının güç ve entalpi çıkışlarının bulanık mantık PI ve klasik PI yöntemleriyle kontrol edildiği fakat ölçümlerin ideal ve girişlerin sınırsız varsayıldığı önceki bazı çalışmalar, sınırlayıcı ve bozucu etkiler modellere dahil edilerek tekrarlanmıştır. Simülasyon sonuçları, bulanık mantık PI kontrolörün işletme şartları altında, ani referans değişimlerine verdiği hızlı cevaplarla diğer kontrolörden daha iyi bir performansa sahip olduğunu doğrulamıştır. Sınırlı giriş ve gürültülü ölçümlerle sağlanan bu performans, yöntemlerin gerçekçiliğini ortaya koymuştur. Daha sonra, sistemde meydana gelebilecek değişimler düşünülerek adaptif denetim uygulanmıştır. Burada da modele sınırlayıcı ve bozucu etkiler katılmıştır. Adaptif denetim, bazı parametreleri tahmin ettiği için, işletme şartlarında (kazan kirlenmesi v.b.) zaman içerisinde oluşabilecek bazı değişimlere uyum sağlayabilecek yapıdadır. Adaptif denetimde, gürültülü ölçüm ve sınırlı girişler altında bazı parametreler doğru tahmin edilmiş ve bu tahminler kullanılarak istenilen

kontrol sağlanmıştır. Bu adaptif denetimde parametre tahminleri projeksiyon algoritmasıyla yapılmıştır. Sistem denetimi ise, ayrı ayrı hem bulanık mantık PI, hem de klasik PI yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçları bulanık mantık PI kontrolörün, klasik PI kontrolöre göre adaptif kontrolde de referanslardaki değişimlere daha hızlı cevap verdiğini ve daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler : Termik Güç Santrali Kontrolü, Adaptif Bulanık Mantık Kontrolü, Kazan Kontrolü, Adaptif Termik Santral Kontrolü.

ABSTRACT

ADAPTIVE FUZZY LOGIC CONTROL IN THERMAL POWER PLANTS

BÜTÜN, Murat

Kırıkkale University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical & Electronics Engineering, Master Thesis

Supervisor: Asst. Prof. Dr. Ata SEVİNÇ

February 2010, 86 pages

Power plants are affected by various internal and external disturbances during production stages. In thermal power plants, the performance of conventional control systems against parameter variations and disturbances are not always as good as desired when compared to newer control systems'. There is an increasing need for flexible control systems that incorporate several optimums as the power plants continuously get larger in installed capacity, and more complicated in technology.

Many control systems are being used and evaluated nowadays. In this study, some recent studies where power and enthalpy outputs of a thermal power plant are controlled with fuzzy logic PI and conventional PI methods assuming ideal measurements and unlimited inputs have been repeated including the disturbance and limiting effects into the models. Simulation results have verified that fuzzy PI controller has a better performance with a quicker response than the other to sudden reference changes under operating conditions. The performance achieved under limited entries and noisy measurements has shown the practicability of the methods. Then, considering the possible variations in the system, adaptive control has been implemented. Again, the disturbance and limiting effects have been added into the models. Since it estimates some of the parameters, the adaptive control copes with some possible variations in the system under operating conditions during time like boiler inquisition. In the adaptive control, some parameters have been correctly estimated under limited inputs and noisy measurements and desired control has been

achieved utilizing these predictions. The parameter predictions in the adaptive control have been performed with projection algorithm. The system control has been realized both by fuzzy logic PI and conventional PI methods. Simulation results show that the fuzzy logic PI has a better performance than its conventional counterpart, responding more rapidly to the reference variations in the adaptive control too.

Keywords: Thermal Power Plant Control, Adaptive Fuzzy Logic Control, Boiler Control, Adaptive Thermal Plant Control.

TEŞEKKÜR

Tez alıŐmalarımnda yardımlarını hibir zaman esirgemeyen ve alıŐmalarımıla ilgili her konuda beni yönlendiren Sayın Yrd. Do. Dr. Ata SEVİNÇ'e, manevi desteğiyle benim için vazgeilmez olan aileme ve niŐanlıma, her zaman manevi desteklerini benden esirgemeyen dostlarım Sayın Cengiz KÜÇÜK ve Sayın Murat KANDAZ'a teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	i
ABSTRACT	iii
TEŞEKKÜR	v
İÇİNDEKİLER	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Problem Tanımı.....	1
1.2. Literatür Özeti.....	2
1.3. Tezin Ana Hatları.....	6
2. TERMİK SANTRALLER VE KONTROL YÖNTEMLERİ	8
2.1. Termik Santraller.....	8
2.1.1. Termik Santrallerin Tarihçesi ve Gelişimi.....	8
2.1.2. Termik Santrallerin Genel Yapısı.....	9
2.1.3. Bir Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali'nin Temel Elemanları..	12
2.1.4. KÇDG/CHP Santrallerinde Otomatik Kontrol.....	17
2.2. Kontrol Yöntemleri.....	18
2.2.1. PID Kontrol Yöntemi.....	18
2.2.2. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Kontrol Yöntemi.....	20
2.2.2.1. Genel.....	20
2.2.2.2. Bulanık Mantık Küme Teorisi ve Üyelik Derecesi.....	20
2.2.2.3. Üyelik Fonksiyonu.....	21
2.2.2.4. Dilsel Değişkenler.....	22
2.2.2.5. Bulanık Kontrol Sistemleri.....	23
2.3. Santral Modeli ve Denetleyici Sistemler.....	24
2.3.1. Giriş.....	24
2.3.2. Çok Girişli ve Çok Çıkışlı Sistemlerin Transfer Fonksiyonları (MIMO).....	26
2.3.3. Kullanılan Modele Ait Transfer Fonksiyonları.....	28

2.3.4. Ayırıcı (Decoupler) Sistemin Modellenmesi.....	29
2.4. Santral Modeli İçin Denetleyiciler.....	31
2.4.1. Giriş.....	31
2.4.2. PI Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi.....	31
2.4.3 Bulanık Mantık Kontrolörün Tasarımı.....	32
2.4.3.1 Giriş ve Çıkış Değişkenlerinin Aralıklarının Belirlenmesi.....	32
2.4.3.2 Bulanık Kuralların Çıkarımı.....	33
2.4.3.3 Bulanık Çıkış Değerlerinin Durulaştırılması.....	35
2.5. Parametre Tahmini.....	38
2.5.1. Giriş.....	38
2.5.2. Projeksiyon Algoritması.....	38
3. TERMİK SANTRALLERDE ADAPTİF DENETİM.....	40
3.1. Giriş.....	40
3.2. Kontrolörlerin Güç Santralının Modeline Uygulanması.....	42
3.2.1. PI ve Bulanık Mantık PI Kontrolörlerinde Limit Etkisi.....	43
3.2.2. PI ve Bulanık Mantık PI Kontrolörlerinde Gürültü Etkisi.....	49
3.3. Sistem Parametrelerinin Tahmin Edilmesi.....	52
3.4. Adaptif Denetim.....	60
3.4.1. Gürültüsüz Şartlarda Adaptif Denetim.....	60
3.4.2. Gürültülü Şartlarda Adaptif Denetim.....	71
4. SONUÇ VE ÖNERİ.....	79
KAYNAKLAR.....	81

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>ŞEKİL</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Bir termik santralinin akış şeması.....	9
2.2. Standart kombine çevrim sistemi.....	11
2.3. Bir kojenerasyon (CHP) sistemi.....	12
2.4. Gaz türbini.....	13
2.5. Bir kazanın şematik diyagramı.....	15
2.6. Bir buhar türbini.....	16
2.7. Sistemin birim basamak cevap eğrisi.....	19
2.8. Klasik mantık ile bulanık mantığın karşılaştırılması.....	21
2.9. Üçgen üyelik fonksiyonu.....	22
2.10. Şematik diyagram, Güç santrali ve Matematiksel modeli.....	25
2.11. İki giriş ve çıkış değişkenli prosesin blok diyagramı.....	27
2.12. Kullanılan santral modelinin blok diyagramı.....	27
2.13. Kullanılan ayırma sistemi.....	30
2.14. Model için kullanılan güç hatası ve değişimi.....	32
2.15. Model için kullanılan entalpi hatası ve değişimi.....	33
2.16. Güç hata sinyalinin girişe verdiği cevap.....	34
2.17. Bulanık mantık kuralının uygulanması.....	36
2.18. Model için kullanılan kazanç değişkenlerinin aralıkları, (a) güç kazanç değerleri, (b) entalpi kazanç değerleri.....	37
3.1. Modeli alınan sistemin kontrol blok diyagramı.....	40
3.2. Ayırıcı (Decoupler) sisteminin blok diyagramı.....	41
3.3. Kazan sisteminin blok diyagramı.....	41
3.4. Sisteme uygulanan PI kontrolörler, (a) güç kontrolü (b) entalpi kontrolü.....	42
3.5. Sisteme uygulanan bulanık mantık PI kontrolörler, (a) güç kontrolü, (b) entalpi kontrolü.....	43
3.6. Sisteme uygulanan limit blok diyagramları, (a) yakıt limit, (b) su limit	44
3.7. Limitli model için güç çıkışları, (a) PI kontrolör, (b) bulanık mantık PI kontrolör.....	46

3.8.	Limitli model için entalpi çıkışları, (a) PI kontrolör (b) bulanık mantık kontrolör.....	47
3.9.	Limitli ve gürültülü model için güç çıkışları, (a) PI kontrolör, (b) bulanık mantık PI kontrolör.....	50
3.10.	Limitli ve gürültülü model için entalpi çıkışları, (a) PI kontrolör, (b) bulanık mantık kontrolör.....	51
3.11.	Parametre tahmini modeli blok diyagramı.....	53
3.12.	Tahmin edici blok diyagramları, (a) estimator y_2 'den tahmin edici, (b) estimator y_1 'den tahmin edici.....	54
3.13.	y_2 'den tahmin edici sonuçları, (a) \hat{c}_1 , (b) \hat{a}_{21}	55
3.14.	y_2 'den tahmin edici sonuçları, (a) \hat{a}_{22} , (b) \hat{b}_{21}	56
3.15.	y_2 'den tahmin edici sonuçları, \hat{b}_{22}	57
3.16.	y_1 'den tahmin edici sonuçları, \hat{c}_0	57
3.17.	y_1 'den tahmin edici sonuçları, (a) \hat{a}_{11} , (b) \hat{a}_{12}	58
3.18.	y_1 'den tahmin edici sonuçları, (a) \hat{b}_{11} , (b) \hat{b}_{12}	59
3.19.	Adaptif sistem modeli blok diyagramı.....	61
3.20.	Kazanç değişkenlerinin aralıkları, (a) güç kazançları üyelik kümeleri, (b) entalpi kazançları üyelik kümeleri.....	62
3.21.	Adaptif denetleyici içi blok diyagramı.....	63
3.22.	Tahmin edicilerin blok iç diyagramları, estimator y_1 'den tahmin edici	63
3.23.	Tahmin edicilerin blok iç diyagramları, estimator y_2 'den tahmin edici	64
3.24.	Adaptif sistem için ayırıcı.....	65
3.25.	Bulanık mantık PI modelleri için, \hat{a}_{22} parametre yakınsaması.....	66
3.26.	Bulanık mantık PI modelleri için, \hat{b}_{11} parametre yakınsaması.....	67
3.27.	Limitli adaptif sistem modeli için güç çıkışları, (a) PI kontrolör (b) bulanık mantık PI kontrolör.....	68
3.28.	Limitli adaptif sistem modeli için entalpi çıkışları, (a) PI kontrolör (b) bulanık mantık PI kontrolör.....	69
3.29.	Gürültülü adaptif sistem için parametre tahminli model (Boiler+Estimator) içinin blok diyagramı.....	71
3.30.	Tahmin edicilerin iç blok diyagramları, (a) y_1 'den tahmin edici,	

(b) y_2 'den tahmin edici.....	72
3.31. Bulanık mantık PI modeli için, (a) \hat{b}_{11} yakınsaması, (b) \hat{a}_{22} yakınsaması.....	74
3.32. Gürültülü ve limitli adaptif sistem modeli için güç çıkışları, (a) PI kontrolör, (b) bulanık mantık PI kontrolör.....	76
3.33. Gürültülü ve limitli adaptif sistem modeli için entalpi çıkışları, (b) PI kontrolör, (b) bulanık mantık PI kontrolör.....	77

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>ÇİZELGE</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Güç ve Entalpi çıkışları için K_p parametrelerinin kuralları.....	35
2.2 Güç ve Entalpi çıkışları için K_1 parametrelerinin kuralları.....	35
3.1 Limitli model için güç ve entalpi sonuçları.....	48
3.2 Limitli adaptif model için güç ve entalpi sonuçları.....	70

Elektrik-Elektronik Anabilim Dalı Murat BÜTÜN tarafından hazırlanan TERMİK SANTRALLERDE ADAPTİF BULANIK MANTIK DENETİMİ adlı Yüksek Lisans Tezinin Anabilim Dalı standartlarına uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Ediz POLAT

Ana Bilim Dalı Başkanı

Bu tezi okuduğumu ve tezin **Yüksek Lisans Tezi** olarak bütün gereklilikleri yerine getirdiğini onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ

Danışman

Jüri Üyeleri

Başkan : Yrd. Doç. Dr. Murat LÜY _____

Üye (Danışman) : Yrd. Doç. Dr. Ata SEVİNÇ _____

Üye : Yrd. Doç. Dr. Tolga EREN _____

...../...../.....

Bu tez ile Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onaylamıştır.

Doç. Dr. Burak BİRGÖREN

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

1. GİRİŞ

1.1. Problem Tanımı

Çağımızda, üretim yapan tüm tesislerde elektrik enerjisi vazgeçilmez olmuştur. Her üretim sektöründe farklı hammaddeler kullanılırken hemen hemen hepsinin ortak girdisi elektrik enerjisidir. Ülkemiz gelişmekte olan bir ülke olduğu için ortalama her sene 3000 MW gibi büyük bir güç gerekmektedir. Günümüzde bulunan ekonomik kriz durumu bu yatırımları birkaç yıl ötelemiş bulunsa da ekonomik veriler düzeldiğinde ihtiyaç her sene artarak devam edecektir.

Elektrik enerjisinde üretim ve tüketim dengesi olmak zorundadır. Bilindiği gibi günümüzde elektrik enerjisi büyük miktarlarda depolanamamaktadır. Üretim ve tüketim dengesi göze alındığında sistemin uyumlu bir şekilde çalışması gerekmektedir. Elektrik enerjisi sistemlerinde frekans kontrolü ile üretim ve tüketim dengesi kurulmaktadır. Frekans değerinin istenilen değerde (50 veya 60 Hz) olması üretim ve tüketim dengesini, istenilen kalitede enerjiyi beraberinde sağlamaktadır. Burda öne çıkan konu üretimin istenilen değerlerde olmasıdır; çünkü tüketim değişkendir. Enerji üretim santrallerinin sürekliliği ve istenilen değerlerde hızlı bir şekilde devreye girmesi bu açıdan çok önemlidir. Enerji santrallerinin kısa sürede devreye girmeleri ve sisteme adapte olmaları üretim cihazlarının teknolojileri, kullanılan yardımcı ekipmanlar yanında kontrol sistemlerinin istenilen değerlere hızlı ve kaliteli cevap vermesiyle doğrudan ilgilidir. Enerji üretim santrallerinin yapısı karışık olduğu gibi, kontrol teknikleri açısından da oldukça zor ve kompleks bir süreç işlemektedir.

Santral dinamiği, kazanın kirlenmesi, ani yük ihtiyaç değişimleri, yakıt kalitesindeki düşüşler gibi birçok nedenden dolayı her an değişime uğrayabilir. Klasik kontrol yöntemleri bu değişimlere hızlı bir şekilde karşılık verememektedir. Bu yüzden enerji üretim-tüketim dengesinin hızlı ve kararlı olması, ekonomik enerji üretimi vb. önemli konular göz önüne alındığında modern kontrol yöntemlerinin enerji santrallerinde kullanılması gerekmektedir. Bu yüzden, bulanık mantık kontrolörler

ile çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bulanık mantık kontrolör ile sistemde daha küçük hata payı oluşmakta ve daha hızlı istenen kontrol sinyaline ulaşılmaktadır. Dolayısı ile hızlı, kararlı ve ekonomik enerji üretimine doğrudan etkisi bulunmaktadır. Enerji santrallerinde zamanla işletme şartları değişmektedir (kazan kirlenmeleri v.b.). Sistemler analiz edilirken, değişen şartlar da göz önüne alınarak kontrol sisteminin şartlara adaptasyonu düşünülmelidir. Bazı adaptasyon yöntemlerinde yalnız kazançların değişen şartlara uyum sağlamasıyla yetinilirken daha gelişmiş olanlarda değişen parametrelerin bazılarının yada hepsinin tahmin edilmesi de sağlanır.

1.2. Literatür Özeti

Yeni güç santral dizaynı ve çalışmaları için sistem modelleri geliştirmek üzere Nicholson ve Anderson tarafından türbin-kazan alanında, dinamik kontrol ve optimizasyonu çalışmaları yapılmıştır. (1, 2) İlk olarak 1965 yılında Zadeh tarafından bulanık mantık teorisi ileri sürülmüştür. (3) Ardından kömür yakıtlı büyük güç santrallerinin modellenmesi ile ilgili 1970 ve 1971 yıllarında çalışmalar devam etmiştir. (4, 5)

1971 yılında Laubli, Fenton tarafından kazan, türbin, jeneratör ve şalt sistemleri teorik ilişkileri, süperkritik basınçlı kazan için incelenmiştir. Süperkritik kazan sistemi için açık ve kapalı döngü testleri için bilgisayar simülasyonu çalışmaları yapılmıştır. (6)

Bulanık mantık uygulamasını ilk olarak 1974 yılında Mamdani bir dinamik santralin kontrolü için yapmıştır. (7) Bir yıl sonra Mamdani ve Assilian, ilk bulanık mantık kontrolörü tasarlayarak bir santraldaki buhar makinesini başarıyla kontrol etmişlerdir. Mamdani ve Assilian'ın çalışmalarında tanımlanmış olan ilk bulanık mantık kontrolör, hata ve hata değişimlerini giriş olarak alan iki girişli bulanık PI kontrolörden oluşmaktaydı. (8)

Kickert ve Lemke yaptıkları çalışmada daha önce ileri sürülen bulanık mantık küme

teorisini sıcak su tesisi kontrol sisteminde uygulamışlardır. (9)

Bell vd. tarafından 500 MW kömür yakıtlı enerji santrali dinamik davranışı için doğrusal olmayan matematiksel model geliştirilmiş ve yapılan çalışmalarda enerji santralinin nominal kapasitesinin %50 yük değişimine uygulanmıştır. (10)

Lausterer vd. tarafından kazan modeli için santral verileri alınarak testler gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda 30 sn'den daha uzun sürede, güvenlik sınırları dışında buhar basıncı, dom seviyesi ve buhar sıcaklığı gibi iç parametreleri ile bir sapma değerlendirmesi çalışması yapılmıştır. (11)

Li ve Lau servo motor pozisyon kontrolü için bulanık mantık denetleyicisi kullanmışlardır. Yapılan çalışmalarda sistem parametreleri veya yük bozuklukları, sistem oransal-integral-türev (PID) kontrolörün değişiklik olduğu ölçüde etkilendiği görülmüş ve PID kontrol için yeniden sistem ayarları gerektiği vurgulanmıştır. Bulanık mantık denetleyici ise sistem parametreleri ve yük bozukluklarında istenen referans değeri elde edebilmiştir. (12)

Unbeauhen ve Kocaarslan yapmış oldukları çalışmada 765 MW bir kombine blok güç santrali için (112,5 MW ve 652,5 MW iki bloktan oluşan) sistemi örnek almışlar ve gerçek ölçümlerle model oluşturmuşlardır. Elde edilen veriler sonucunda oluşturulan modeli referans alarak adaptif kontrol stratejisini karşılamışlardır. (13)

Ying, bulanık mantık denetleyiciler ve konvensiyonel denetleyiciler arasında, yapısal ilişki üzerine etkili ve sistematik bir kontrol sistemi teorisi çalışmasını gerçekleştirmiştir. Bulanık mantık ve operator kullanarak gerekli ve yeterli koşullarda geri-beslemeli sistemler oluşturmuştur. (14)

Ambuel vd. tarafından hidrolik motor kontrolü için PI ve bulanık mantık PI kontrolörler kullanılmıştır. Gerçek zamanlı bir IBM PC AT veya eşdeğer bir sistemde çalışacak yazılım geliştirmişlerdir. (15)

Sugawara ve Suziki ev ve otomobil klima kontrolü için bulanık mantık sistemini

kullanmışlardır. Sistem bir dizi sıcaklığı otomatik olarak ayarlamak için gerçekleştirilmiştir. (16)

Armstrong yapmış olduğu çalışmada prosedürü tam olarak bulanık mantık içinde belirtirken, sınırlı ayrılabilir işlevi uygulayan bir bilgi tabanı tasarımı çalışmasını gerçekleştirmiştir. Doğrusal olmayan proses kontrolü için kontrolör tasarımı uygulamıştır. (17)

Bir güç santraline ait kazan kontrolü yapılan diğer bir çalışma olarak da Malki ve Chen'in yapmış oldukları uygulama gösterilebilir. Houston'da bir güç santraline ait buhar kazan kontrolü için bulanık PI kullanmışlardır. Yaptıkları çalışmada yakıt, yanma gazı ve su gibi üç kontrol değişkenini ayarlayarak, kazan çıkışındaki buhar akışı, basıncı ve sıcaklığını düzenlemeye çalışmışlardır. Çalışma sonucunda santral kazanının ısı ve sıvı seviye kontrolünü başarıyla yapmışlar, klasik PI ile bulanık PI'ı karşılaştırmışlardır. Kullanılan bulanık PI ile maksimum aşmaların azaldığını, cevap sürelerinin kısaldığını ve kalıcı-hal hata osilasyonlarının minimize edildiğini görmüşlerdir. (18)

Chang ve Fu yük frekans kontrolünde PI kontrolörü bulanık mantık kazanç planlamasında kullanmışlardır. Yapılan çalışmalar denetleyicinin sistemin performansını olumlu yönde etkilediğini göstermiştir. (19)

Güngör yapmış olduğu tez çalışmasında ideal sistem için üç farklı işletme şartları için bulanık mantık PI ve klasik PID kontrolörlerini karşılaştırmıştır. Yapılan çalışmalarda birinci modelde kazanın temiz ve santral çalışma kapasitesinin %95 olduğu durum incelenmiş, ikinci modelde kazanın temiz ve santral çalışma kapasitesinin %70 olduğu durum incelenmiş ve son olarak üçüncü modelde kazanın kirli ve santral çalışma kapasitesinin %70 olduğu durum incelenmiştir. Tez çalışmasında bulanık mantık PI kontrolörün tüm şartlar altında klasik PID kontrolör sistemine göre daha etkili cevaplar verdiğini göstermiştir. Bulanık mantık daha dayanıklı bir kontrol sağlamaktadır. (20)

Bir başka tez çalışması Tiryaki tarafından yapılmış olan, bir termik elektrik

santralinin güç ve entalpi çıkışlarını kontrol etmek amacıyla bulanık PI kontrolör ile bulanık mantık kontrolör ve PID kontrolörler çalışmasıdır. Bu çalışmalarda da birinci modelde kazanın temiz ve santral çalışma kapasitesinin %95 olduğu durum incelenmiş, ikinci modelde kazanın temiz ve santral çalışma kapasitesinin %70 olduğu durum incelenmiş ve son olarak üçüncü modelde kazanın kirli ve santral çalışma kapasitesinin %70 olduğu durum incelenmiştir. Bu çalışmada savunulan bulanık PI kontrolör, sistemin durumuna göre kendi parametrelerini de değiştirerek sisteme uyum sağlamakta ve sistemin istenen hızını korumaktadır. Yapılan çalışmada bulanık-PI kontrolör tüm şartlar altında klasik PID kontrolöre ve bulanık mantık kontrolöre göre daha etkili cevaplar vermiştir. Yani, bulanık mantık-PI kontrolör daha dayanıklı bir kontrol sağlamaktadır. (21)

Bu tez çalışmasında, Güngör (20) ve Tiryaki (21) çalışmalarının bir iki adım daha geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bulanık mantık PI ve klasik PI kontrolörler için öncelikle gürültü etkisi ve giriş limitleri dahil edilerek sistemler oluşturulmuş ve her iki kontrol sistemi davranışları incelenmiştir. Daha önce yapılan çalışmalar ise girişlerin sınırlanmadığı ve çıkışların tam ölçüldüğü ideal şartlarda yapılmıştır. (20, 21) Sistemin normal çalışma şartlarında ideal olması mümkün değildir, sistem bozucu etkilere maruz kalmaktadır. Bu tezin bir amacı da işletme şartlarını göz önünde bulundurarak çalışmalarını gerçekleştirmektir. Klasik PI ve bulanık mantık PI kontrolör ile yapılmış olan çalışmalarda kontrol sistemlerinin birbirlerine olan üstünlükleri karşılaştırılmıştır. Limit ve aynı zamanda bozucu etkili çalışmalarda üyelik fonksiyonu sınırlarını belirlemek ayrı çalışmaları beraberinde getirmiştir. Bulanık mantık PI sistemi, limitli ve bozucu etkili şartlar altında, sisteme verdiği hızlı cevaplarla diğer kontrolörden daha iyi bir performansa sahip olduğunu göstermiştir.

Kontrol sistemleri oluşturulduktan sonra parametre tahmin sistemi tasarlanmıştır. Tahmin edilen parametreler daha sonra her iki kontrolör içinde kullanılarak adaptif kontrolörler oluşturulmuştur.

Tezin ana amacı, işletme şartları altında meydana gelebilecek (kazan kirlenmesi v.b.) değişimlerde ve önceki bazı çalışmaların (20, 21) aksine girişlerin sınırlı ve

ölçümlerin gürültülü olduğu durumlarda bile, değişen bazı sistem parametrelerini tahmin ederek sistemin istenen referans değerlerine ulaştırılmasıdır ve bu bir ölçüde başarılmıştır. Doğrusallaştırılmış sistem modelinin simülasyon ortamında gürültülü ölçümlerle başarıyla kontrol edilmesi, uygulanan yöntemin doğrusallığı bozan modelleme hatalarını da bir dereceye kadar tolere edebileceğini göstermektedir. Giriş değerlerinin belli limitlerle sınırlandırılması da yine yöntemin gerçekçiliğinin bir göstergesidir. Bu yönleriyle bu çalışma, önceki bazı çalışmalar (13, 20, 21) üzerine katkılarda bulunmaktadır. Limit ve aynı zamanda bozucu etkili çalışmalarda üyelik fonksiyonu sınırlarını belirlemek ayrı çalışmaları beraberinde getirmiştir. Adaptif denetim sisteminde öncelikle bulanık mantık PI ve klasik PI sistemi, limit etkisi dahil edilerek incelenmiştir. Her iki kontrol sistemi de istenilen referans değerlerine uyum sağlamıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda, limit etkili şartlar altında adaptif bulanık mantık PI sisteminin, sisteme verdiği hızlı cevaplarla diğer kontrolörden daha iyi bir performansa sahip olduğu gösterilmiştir. Daha sonra sisteme gürültü etkisi de dahil edilerek adaptif bulanık mantık PI kontrolörün, etki eden bozucu etkiye karşılık güç ve entalpi hatalarını klasik PI'dan daha iyi azalttığı görülmüştür.

Bu tez çalışmasında kullanılan santral modeli Almanya/Bochum'daki bir 750 MW'lık doğalgaz kombine güç santraline aittir. (13, 22)

1.3. Tezin Ana Hatları

Bu çalışmada limitli PI kontrolör ve limitli bulanık mantık kontrolörlerin gürültüsüz ve gürültülü performansları incelendikten sonra, özel test şartlarında olabildiğince çok sayıda parametrenin tahmin edilmesine çalışılmış ve özel şartlarda aynı anda 10 tane parametrenin tahmin edilmesi sağlanmıştır. Daha sonra gerçeğe yakın çalışma şartlarında tahmin edilen bazı parametrelerin kontrol sisteminin kullandığı sistem modelinde kullanılmasıyla adaptif kontrole geçilerek hem klasik PI hem bulanık mantık PI kontrol yöntemleri adaptif şartlarda karşılaştırılmıştır.

Bu girişten sonra, ikinci bölümde, termik enerji santralleri ve çalışma prensipleri hakkında bilgiler verilmiş ve enerji santrallerinde önemli bir yere sahip olan enerji

Üretim ekipmanları hakkında gerekli tanımlar yapılmıştır. Yine aynı bölümde, tezde performans karşılaştırılması yapılan PI kontrolör ve bulanık mantık PI kontrolörleri sisteminin tanımları verilmiştir. Santral modeli için denetleyiciler oluşturulmuş ve kullanılacak parametre tahmin yöntemi anlatılmıştır.

nc bölümde ise söz konusu elektriksel güç santralinin g-entalpi kontrolü limitli PI kontrolör ve bulanık mantık PI kontrolör ile gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde, tezde kullanılan söz konusu kontrol sistemlerinin limitli ve bozucu etkili modeller üzerindeki sonuçları karşılaştırılmıştır. Parametre tahmin yöntemi testleri özel şartlar altında incelenmiştir. Daha sonra gerçekçi şartlarda bazı parametre tahminlerinin de kullanılmasıyla, limitli PI ve limitli bulanık mantık PI kontrollerinin adaptasyonu sağlanmış, sonuçları karşılaştırılmıştır.

Dördüncü bölümde ise sonuç değerlendirmeleri ve daha sonraki çalışmalarla ilgili öneriler ele alınmıştır.

2. TERMİK SANTRALLER VE KONTROL YÖNTEMLERİ

2.1. TERMİK SANTRALLER

2.1.1. Termik Santrallerin Tarihçesi ve Gelişimi

Buhar santrallerinin gerçek anlamdaki gelişimi 1892'lerde türbinlerin gelişmesi ile başlamıştır. Bu senelerde yalnızca iç ihtiyaç için elektrik üretimi devri kapanmış ve önce bir binanın tümü, daha sonra da bir caddedeki binaların tümü için elektrik üretilmeye başlanmıştır.

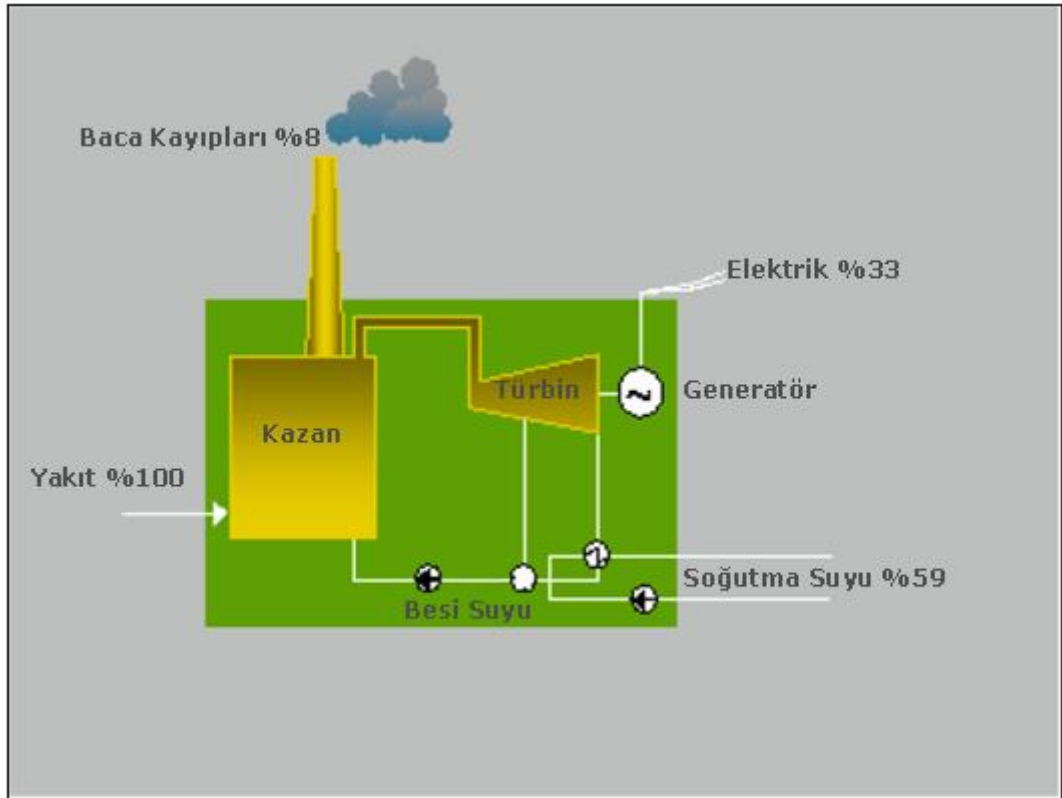
Buhar santrallerinin tarihsel gelişimi şöyle başlamıştır;

1804	İlk su borulu kazan	J.Stevens
1866	Dinamo	W.V.Simens
1882	İlk güç nakli	O.V.Miller
1882	İlk elektrik santrali(Newyork)	T.A.Edison
1883	Sabit basınç buhar türbini	C.G.Laval
1884	Aksiyal buhar türbini	C.A.Parson
1885/88	Alternatif akım makinası	Ferraris
1890	Yağlı transformatör	C.E.L.Brown
1891	Alternatif akım iletimi	O.V.Miller
1892	Kızgın buhar makinası	W.Schmind
1908	Radyal buhar türbini	B.Ljungström

Uygarlığın ilerlemesi, enerjinin kullanılabilmesiyle çok yakından ilgilidir. Bu nedenle yeterli miktarda enerjinin mümkün olan en düşük fiyatla halkın hizmetine sunulabilmesi, bir ülkenin endüstriyel gelişmesi ve hayat standardının yükselebilmesi için şarttır. İşte bu nedenle eski zamanlardaki küçük ve ilkel buhar santralleri tekniğin ilerlemesine paralel olarak yerlerini daima daha güçlü, daha modern ve daha ekonomik santrallere bırakmışlardır. (23)

2.1.2. Termik Santrallerin Genel Yapısı

Termik santralleri kömür santralleri, jeotermal santraller, nükleer santraller ve doğal gazla dayalı santraller olarak ayırabiliriz. Dördünde de ortak olarak bir buhar üretimine bağlı enerji üretimi mevcuttur. Bunlardan sadece doğalgaza dayalı doğalgaz kombine çevrim santrallerinde ilk enerji üretimi gaz türbininde olup, çıkan atıl gazdan kazanda elde edilen buhar diğer enerji üretim aşamasıdır. Buhar üretim prosesine bakacak olursak, ham (işlenmemiş) enerjinin kazan vasıtasıyla termal enerjiye, oluşan termal enerjinin buhar türbinleriyle mekanik enerjiye, mekanik enerjinin de jeneratörler vasıtasıyla elektrik enerjisine dönüştürüldüğünü görürüz. (Şekil 2.1) (24)



Şekil 2.1. Bir termik santralinin akış şeması

Ham enerji kazan sistemine girdiği zaman kazan içerisinde oluşturulan buhar farklı basınçlarda elde edilir. Elde edilen bu yüksek basınçtaki buhar, buhar türbininde

mekanik enerji elde edilirken kullanılarak ortaya çıkan çürük buhar yoğunlaştırıcı yardımıyla yoğuşturularak su haline getirilir. Daha sonra elde edilen kinetik enerjisini kaybetmiş çürük buhar kazan besleme pompalarıyla kazana gönderilerek döngü devam ettirilir. Kazan içerisinde buhar elde etmemize yarayan hammadde ise baca gazı olarak baca gazı arıtma tesisinden geçirilerek dışarı atılmaktadır. Buhar türbininden elde edilen mekanik enerji de jeneratör ile elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Yakıt enerjisinin % 8'i baca gazına, % 92'si yüksek basınçlı buhara verilir.

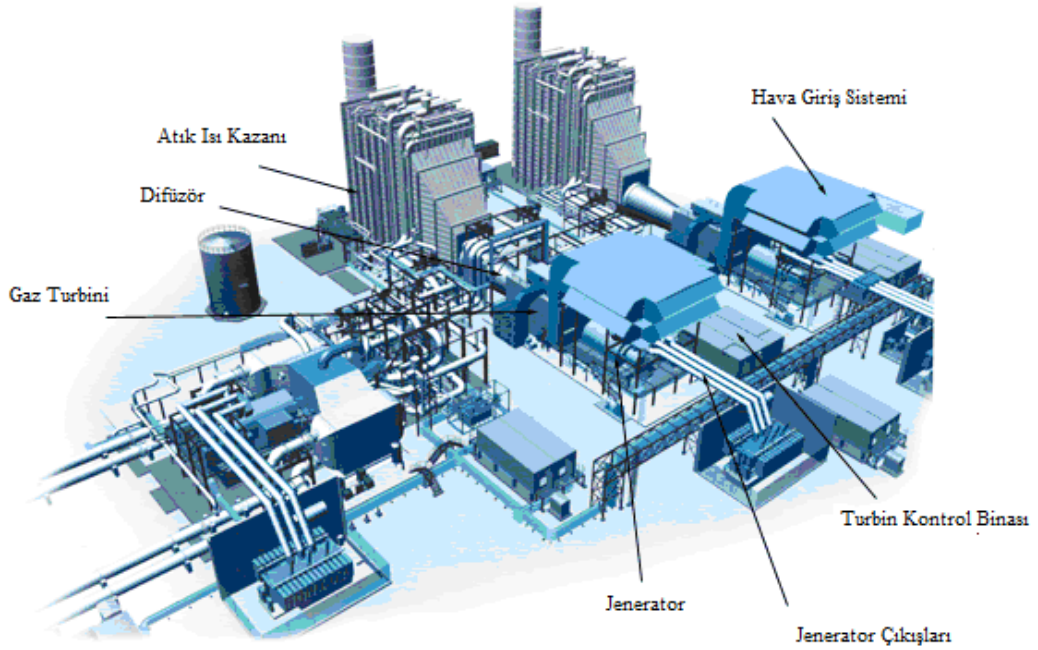
Güç santralleri, gerekli olan elektrik enerjisi dışında, termal enerjinin bazı temel formlarını üretmek için de tasarlanmış olabilir. Proses buharı üretmek için kullanılan bir çok endüstriyel santraller (örneğin bir kimya endüstrisindeki güç santralleri) yanında, bölgesel bir ısıtma için gerekli buharı sağlamak üzere ısı ve güç santralleri kullanılabilir. Görülebilir ki, tüm bu güç santralleri içerisinde, elektrik enerjisi, üretilen belirli bir üründür. Enerji üretimindeki bu değişiklikler, güç santrallerinin şu şekilde sınıflandırılmasına olanak verir;

- Yoğunlaştırma güç santralleri (sadece elektriksel enerji üretimi için)
- Isı ve güç santralleri (öncelikle ısı üretimi için) (co-generation santralleri)

Sıkça kullanılan bir diğer sınıflandırma kriteri, kullanılan yakıtı göredir. Ana olarak nükleer ve fosil yakıtlar olmak üzere iki sınıfa ayrılır. Fosil yakıtlar ise şu şekilde sınıflandırılabilir; katı yakıtlar (linyit, taş kömürü, vb.), sıvı yakıtlar (petrol) ve gaz yakıtlar (patlayan ocak gazı, havagazı, doğal gaz, vb.) (17)

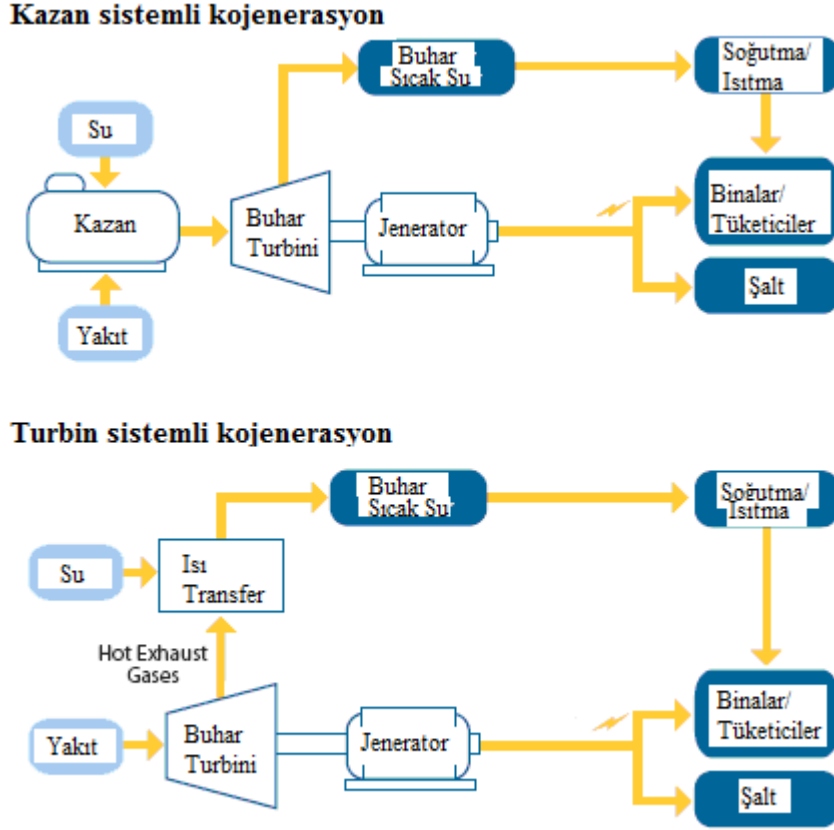
Kombine çevrim doğalgaz santralleri (KÇDS) adı verilen gaz ve buhar türbin çevrimlerinden oluşan güç santral sistemleri sadece elektrik üretimi için kullanılır. Üstelik türbinler bir çevrim içinde birbiriyle bağıntılı olmalıdır, bu sayede bu enerji bir türbin tipinden diğerine transfer edilebilir. Şekil 2.2'de bir kombine çevrim doğalgaz santrali şeması görülmektedir. (25)

Doğalgaz kombine çevrim santrallerinde gaz türbininden çıkan gaz atık ısı kazanında değerlendirilerek kazana su girdisiyle buhar enerjisi elde edilir. (Şekil 2.2). Doğalgaz kombine çevrim güç santralinde kazan, türbin, jeneratör ve tüm diğer yardımcı birimler bir ünite şeklinde düzenlenmekle beraber her bir birim diğerlerinden bağımsız olarak da işletilebilir. 300 MW üzeri geniş ünitelerde, bir ünite tek bir türbini besleyen iki kazandan oluşabilir. Bu "Harmanlama Ünite Düzenlemesi" veya "İkiz-Kazan Harmanlama Sistemi" olarak adlandırılır. (26)



Şekil 2.2. Standart kombine çevrim sistemi

Kimyasal fabrika ve rafineriler gibi birçok büyük ölçekli endüstriyel işletmelerde elektrik enerjisi yanında çoğunlukla kimyasal reaksiyonlar ve ısınma amaçları için sıcak su ve/veya buhara da ihtiyaç duyulur. Yani, termal enerjinin doğru buhar sıcaklığı ve/veya buhar basıncında üretilmesi gerekir. Bu yapıyı yerel, bir yerdeki kombine edilmiş ısı ve güç istasyonu karşılar. Kombine Güç Santralleri (CHP) olarak adlandırılan bu sistemler, tüm güç ve termal işlem taleplerinin istendiği yer olan ticari ve endüstriyel uygulamalarda verimli olarak kullanılabilir. Kojenerasyon diye de adlandırılan bu Kombine Isı ve Güç Santrali gerekli elektrik ve ısıyı üretir. (Şekil 2.3) (27)

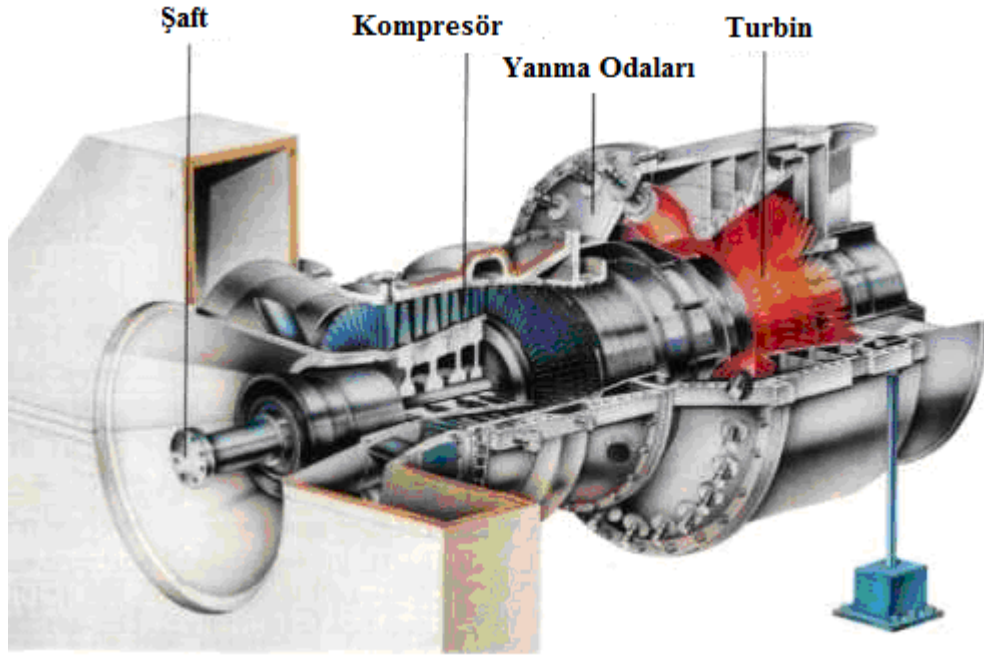


Şekil 2.3. Bir kojenerasyon (CHP) sistemi

2.1.3. Bir Doğalgaz Kombine Çevrim Santrali'nin Temel Elemanları

Gaz Türbini

Gaz türbini, yanan gazın enerjisini şaftın dönme enerjisine çeviren bir makinedir. Yanma odasında yanan gaz, türbin bıçakları üzerinde yayılarak uyguladığı basınçla şaftın dönmesine neden olur. Yanma için gerekli havayı sağlayan kompresörün bıçakları normalde türbin bıçakları ile aynı şaftta olur.



Şekil 2.4. Gaz türbini

Şekil 2.4'de (28) bir gaz türbinin başlıca parçaları görülmektedir. Bunlar; bir hava girişli kompresör, yakıt (gaz) girişli bir yanma hücresi sistemi, türbin, egzoz gazı kanalı ve bir soğutma sistemidir. Modern gaz türbinleri, 300 MW'a kadar elektriksel güç üretir ve yanma gaz sıcaklığı 1200 °C'yi aşarken çıkış gaz sıcaklığı 550 °C civarında olur. Günümüzde 600 civarında çeşitli gaz türbini modeli imal eden, 100 kadar firma vardır. Güç çıkış aralıkları 2-3 kW'lık modellerden 300 MW'lık kompleks elektrik santral sistemlerine varıncaya kadar üretilen bu türbinlerin her bir kW'da yakıt tüketme aralığı 0.220 kg/kWh-0.880 kg/kWh, verimliliği ise %25-%40 aralığında değişir. (29)

Kazan (Boiler)

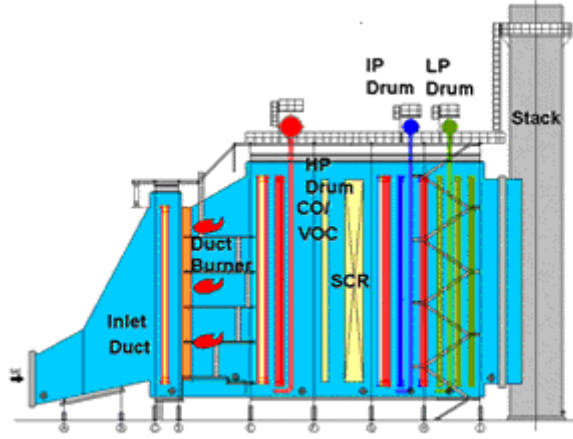
Kazan, bir güç santralinin buhar üreten parçasıdır. Buhar kazanı tanım olarak; istenilen basınç, sıcaklık ve miktarda buhar üreten bir cihazdır. Buhar üretmek için, herhangi bir yolla elde edilen ısı enerjisi kapalı bir kap içerisindeki sıvıya verilerek

bu sıvının buharlaştırılması sağlanır. Buhar kazanlarında buhara verilen ısı enerjisi çeşitli yakıtların yakılmasından, elektrik enerjisinden, nükleer enerjiden veya eldeki artık bir ısının uygun şekilde değerlendirilmesinden elde edilebilse de, günümüzde bu ısı enerjisi çoğunlukla fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. (30)

Yakıtın kimyasal enerjisinin, kazanda meydana gelen yanma sonucu ısı enerjisine dönüştüğünü biliyoruz. Yanma sonucu meydana gelen gazlar (baca gazları), ısılarını konveksiyon ve radyasyon (ışınma) yolu ile kazan borularına vererek boruların içerisinden geçmekte olan suyun sıcaklığının yükselmesini sağlar. Su sıcaklığı, kazan basıncının karşılığı olan kaynama sıcaklığına eriştiğinde kaynama başlar. Bu şekilde meydana gelen su-buhar karışımı genellikle "dom" denilen bir haznede doymuş buhar ve su olmak üzere ikiye ayrılır. Doymuş buhar daha sonra yine baca gazları ile kızdırıcı tarafından kızdırılır. Su ise besleme suyu pompası yardımıyla tekrar çevrimin başlangıç noktasına gönderilerek yeniden ısıtılır. Kızdırıcılarda mümkün olduğu kadar yüksek sıcaklıklara erişmek, santral işletmeciliği yönünden arzu edilen bir durumdur. Yani, kızdırıcılardan geçen baca gazının sıcaklığı genellikle oldukça yüksektir. Bu nedenle baca gazları dışarı atılmadan önce besleme suyunun ve yanma havasının ön ısıtılmasında da kullanılabilir. Bu ön ısıtmayı yapan kısma ekonomizer adı verilir. Ayrıca kazan; yakıcılar, fanlar, emisyon kontrol ekipmanları ve baca gibi çeşitli yardımcı elemanlara sahip olabilir.

Buhar kazanlarında buhar üretilebilmesi için, yeterli sıcaklık seviyesinde bir ısı kaynağına ihtiyaç vardır. Bu amaçla genellikle buhar kazanlarının ocaklarında fosil yakıtların yakılmasıyla ısı enerjisi temin edilir. İşte yakıt enerjisindeki yanabilir elemanların havanın oksijeni ile çok hızlı bir kimyasal reaksiyona girerek çevreye ısı ve ışık, yayması "yanma" olarak tanımlanır. Yanma elemanları yakıt ve havadaki oksijendir. Yanma ürünleri ise tam yanma için genellikle karbondioksit, su buharı ve ısı enerjisidir. (30)

Yakıtlar yakıldıkları zaman ortama kullanılabilir miktarda ısı veren maddelerdir. Fiziksel durumlarına göre katı yakıtlar (kömür vb.), sıvı yakıtlar (benzin, gazyağı, motorin, vb.) ve gaz yakıtlar (LPG-Sıvılaştırılmış Petrol Gazı, havagazı, doğalgaz, vb.) olarak sınıflandırılır. (31)



Şekil 2.5. Bir kazanın şematik diyagramı

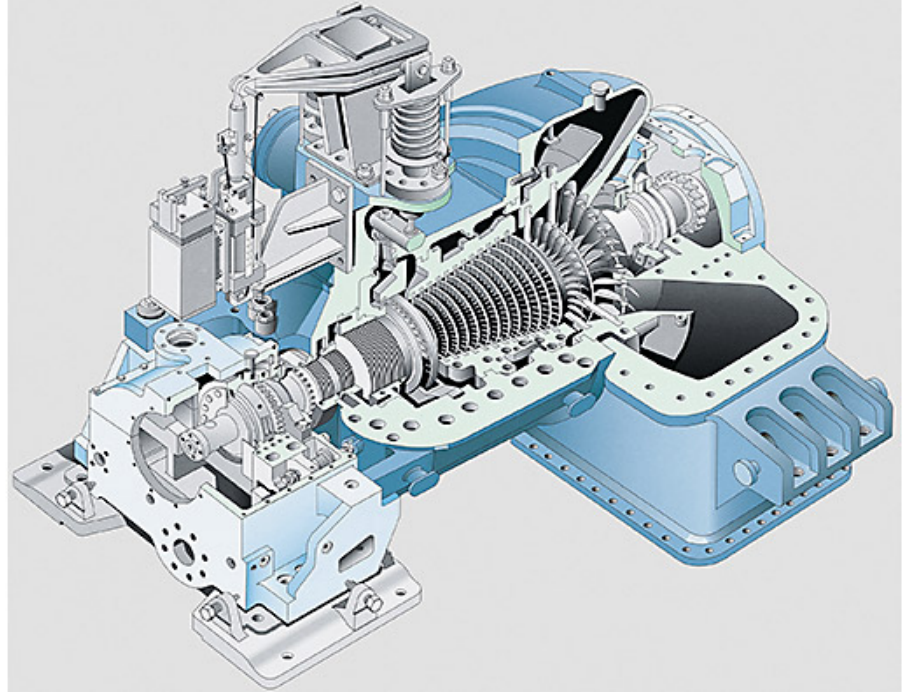
Şekil 2.5'te bir kazanın şeması görülmektedir. (32) Kazanlar, nükleer ve fosil yakıtlı her iki güç santrallerinde de kullanılırlar. Modern kazanlar, düşük (70 bar) basınçlı doymuş buhar üreten basınçlı-su reaktörlü (PWR) buhar jeneratörleri hariç, yüksek basınçlı (65'den 240 bar'a) süper ısıtılmış buhar üretir. (29)

Buhar Türbini

Buhar türbini (Şekil 2.6) içerisine çok yüksek bir basınçla püskürtülen buhar, türbinin ana sürücü şaftı boyunca monte edilen türbin bıçaklarını çevirir. Bu şaft, turbo-jeneratör sonundaki jeneratör içerisine kadar devam eder. Maksimum verimlilik için, türbinin ilk aşamasını (çap olarak en küçük bıçakların olduğu *yüksek basınçlı silindir*) sürerken kısmen kaybolan buhar enerjisini kazanmak üzere, buhar sonradan kazanda tekrar ısıtılır. Buhar, daha sonra türbinin ikinci aşamasını (büyük bıçaklara sahip *orta basınçlı silindir*) da geçerek üçüncü aşamada (en büyük bıçakların olduğu silindirler) çevrimini tamamlar.

Daha sonra, kullanılan buhar tekrar kullanılmak üzere, soğutma su sisteminden sirkülasyon yapan soğuk su içerisinde bulunan bir dizi yoğunlaştırıcı tüp boyunca soğutulmuş su haline getirilir. Buharı yoğunlaştırmak için ana neden, geri basınç

büyükliğini azaltarak türbin verimini artırmaktır. (29)



Şekil 2.6. Bir buhar türbini

Yoğunlaştırıcı (Condenser)

Yoğunlaştırıcı, buhar türbinlerinin buhar çıkış noktasında bulunmaktadır. Yoğunlaştırıcı, buharın soğutma boruları üzerinden geçmesine izin vererek yoğunlaşmasını sağlar. Bir dış kaynaktan gelen soğuk su, boruların içerisinden akarak ortamdaki ısıyı emer ve dış kaynağa ısıyı taşır. Yoğunlaştırma pompası; yoğunlaştırılan suyu ayırır, havalandırma cihazına ve ardından kazan besleme suyu pompasına sürer.

Yoğunlaştırıcının ana amacı, türbinden gelen artık buharı yoğunlaştırmak ve böylelikle çevrimde tekrar kullanım için yüksek kaliteli besleme suyunu yeniden elde etmektir. (29)

Ayrıştırıcı ve Besleme Suyu Sistemi

Besleme suyu sistemi, kazana su sağlar. Bu amaç doğrultusunda su, yoğunlaştırıcının içerisinden geçen buhar türbini çıkışından tekrar elde edilir. Sistem içerisinde sirkülasyon yapan su miktarındaki herhangi bir eksiklik takviye (make-up) adı verilen ek bir kaynak tarafından karşılanır. Ayrıştırıcı, amacı yoğunlaştırıcıdan havayı ayırmak olan bir kanaldır. Ana besleme suyu pompası ise buhar jeneratörüne (kazan) suyu pompalar. Yoğunlaştırıcı hava geçirmez olmalıdır. Daha sonra; yoğunlaştırma pompası, suyu yoğunlaştırıcıdan ayrıştırıcıya düşük sıcaklıktaki buhar ısıtıcıları içerisinden pompalar. (29)

2.1.4. KÇDG/CHP Santrallerinde Otomatik Kontrol

KÇDG/CHP santrallerinin kontrol sistemi şu şartları sağlamalıdır:

- Kontrol sistemi, basit ve dayanıklı (robust) olmalı ve gereksiz çevrimlerden oluşmamalı.
- Kontrol sistemi; santrali, manuel girişler olmadan işletebilmelidir. Bundan dolayı, kontrol sistemi tasarımında manuel kontrole izin verilmemelidir. Bununla birlikte; operatör, manuel kontrol açısından optimal olmayan herhangi bir hatada, anında müdahale etmek üzere hazır bulunmalıdır.
- Kontrol sistemi, santral performansını yükseltmeli ve santral ömrü boyunca birim enerji maliyetini düşürmelidir. Kontrol işletimi sırasında oluşabilecek problemlere karşı esnek çözümler getirebilmeli ve santral işletimini adım adım net bir şekilde göz önünde canlandırabilmelidir.
- Kontrol sistemi, güç şebekeli santral entegrasyonunu hesaba katmalı ve dağıtım merkezinden gelen girişlere izin vermelidir. Aynı zamanda

CHP santrallerinde, talepleri yerine getirmek için güç ve su üretimi birlikte kontrol edilmelidir. (29)

2.2. KONTROL YÖNTEMLERİ

Kontrol sistemleri çeşitlilik göstermekle birlikte, kontrol edilecek ünitenin zamana bağlı olarak istenilen değerlere en iyi adapte olduğu kontrol sistemi tercih edilir. Kontrol edilecek ünite genellikle birden çok sistemden oluşur ve karmaşık yapılara sahiptir. Bu yapı dışında sisteme dışarıdan etki edecek bozucu etkiler de pratikte mümkündür. Kontrol sisteminde girişler ve çıkışlar bulunur. Girişler kontrolörde işlenerek kontrol edilen sisteme gerekli çıkış sağlanır.

Bu kısımda, PID kontrol yöntemi, ardından ise Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) kontrol yöntemi, özetle açıklanacaktır.

2.2.1. PID Kontrol Yöntemi

Üç temel kontrol etkisini birleştiren bir kontroldür. P, diğer adıyla oransal band parametresi denetim sinyalinin hata miktarı ile doğru orantısı olan değerdir. İntegral (I) etki, sistemde ortaya çıkabilecek kalıcı durum hatasını sıfırlarlarken, türev (D) ise sistemin kararlılığı için cevap hızını artırır. (31-33)

$$m(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int e(t)dt + T_D \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.1)$$

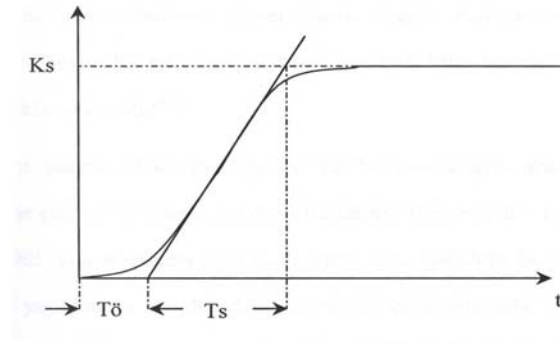
$K_p = K_i.T_i$ ve $K_p.T_D = K_D$ alınırsa ifade şu şekli alır;

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t)dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.2)$$

Uygulamada kullanılan kontrol parametrelerinin en iyi sonuç verecek şekilde

(optimum) ayarlanması önemli bir kontrol problemidir. Kontrol organının tipine bağlı olarak, oransal kazancı K_P 'nin ve integral kazancı K_I 'nin optimum ayarı için deneysel ve hesaba dayanan metotlar geliştirilmiştir. Bu parametrelerin nihai değerlerinin ayarı sistemin kalıcı durum ve dinamik davranışı arasında bir uyum sağlanacak şekilde saptanır. Kontrol parametrelerinin ayarında, genellikle pratik, ve analitik yöntem kullanılır. Bu çalışmada, analitik yöntem yani “Sistemin Cevap Eğrisi Yöntemi” referans alınmıştır (Şekil 2.7).

Bir sistemde kullanılacak kontrolör ve denetim ayarlarının seçimine etki eden dört önemli parametre vardır. Bunlar; sistemin bir basamak giriş karşısında gösterdiği cevap eğrisinden ortaya çıkan zaman gecikmesi veya tüm sistemin zaman sabiti T_S , ölü zaman gecikmesi $T_Ö$, sistem kazancı K_S ve örnekleme zamanı T 'dir.



Şekil 2.7. Sistemin birim basamak cevap eğrisi

Analitik yöntemle göre PI kontrolör parametreleri, sistemin cevap eğrisi yardımıyla şu şekilde atanır (33, 34):

$$K_P = \frac{1,2T_S}{K_S T_Ö + T}, \quad K_I = \frac{2(T_Ö + T/2)^2}{T_Ö + T}, \quad K_D = \frac{T_Ö + T}{2} \quad (2.3)$$

Türev elemanı kullanılmazsa ölçüm gürültülerine daha dayanıklı olan PI kontrolör elde edilir. Bu tezde yapılan çalışmalarda PI kontrolör kullanılmış, PI kontrolör için “Sistemin Basamak Cevap Eğrisi Yöntemi” kullanılarak ilk kazanç değerleri elde

edilmiş ve küçük çalışmalarla ve ayarlamalarla optimum değerler bulunmuştur.

2.2.2. Bulanık Mantık (Fuzzy Logic) Kontrol Yöntemi

2.2.2.1. Genel

Gerçek dünya karmaşıktır. Bu karmaşıklık genel olarak belirsizlik, kesin düşünceden yoksunluk ve karar veremeyişten kaynaklanır. Bir çok sosyal, iktisadi ve teknik konularda insan düşüncesinin tam anlamı ile olgunlaşmamış oluşundan dolayı belirsizlikler her zaman bulunur. Genel olarak, değişik biçimlerde ortaya çıkan karmaşıklık ve belirsizlik gibi tam ve kesin olmayan bilgi kaynaklarına **bulanık (fuzzy)** kaynaklar adı verilir. (9)

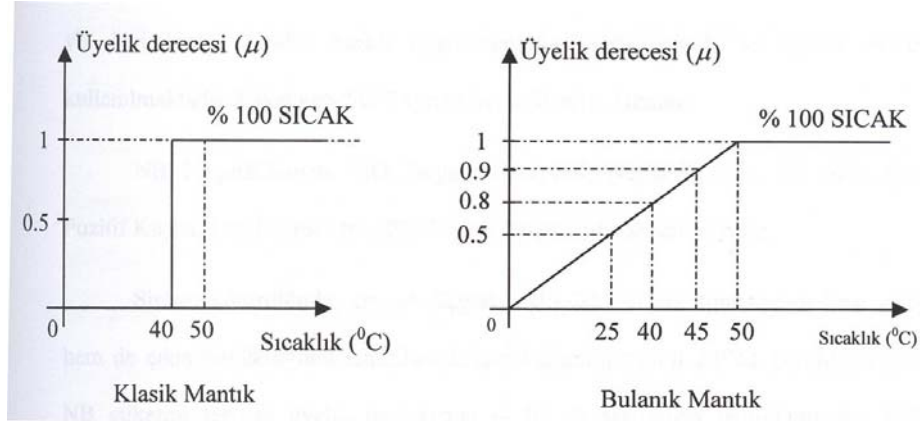
Bulanık mantık teorisini ilk defa 1974 yılında İngiltere'de Ebrahim Mamdani, bir buhar makinesi için kontrolör tasarlayarak kullandı. (7) Bundan sonra Danimarka'da çimento sanayisindeki bir uygulama bu yöntemin avantajlarını gösterdi. Bundan sonra bulanık mantığın en çok uygulandığı ülke Japonya oldu. Japon bilim adamları ve mühendisleri bulanık mantığı metroda, otomatik tren kontrolü, hisse senedi portföyü, asansör vs. bir çok alanda kullanmışlar ve bundan büyük ekonomik kazançlar elde etmişlerdir. (35)

2.2.2.2. Bulanık Mantık Küme Teorisi ve Üyelik Derecesi

Bulanık mantık, bulanık küme teorisine dayanır. Bu teori aslında daha genel bir matematiksel küme yaklaşımıdır. Bu yaklaşımla çözülmesi çok güç olan problemler genel bir yapıya kavuşturularak daha kolay bir sonuca gidilir. (36)

Klasik mantıkta bir eleman bir kümeye aitse 1, ait değilse 0 ile gösterilir. İşte bu 1 veya 0'a üyelik ağırlığı denir. Bulanık mantıkta üyelik ağırlığının alabileceği en büyük değer 1, en küçük değer 0'dır ve bu iki değer arasında çeşitli değerler de alabilir.

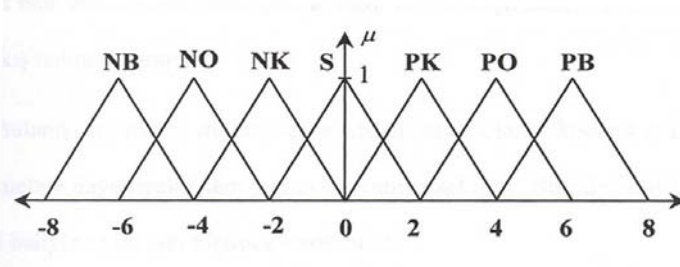
Şekil 2.8'de gösterildiği gibi 40 °C'den yüksek sıcaklıkların tartışıldığı kabul edilsin. Klasik küme mantığına göre 30 °C sıcaklık, SICAK kümesi içinde değildir, hatta 39 °C sıcaklık bile SICAK kümesi içinde bulunmamaktadır. Bulanık mantığa göre 39 °C sıcaklığa soğuktur denilemez; çünkü kısmen de olsa SICAK kümesi içindedir. Hatta bulanık kümesi olan SICAK kümesi, tam üyelikten hiç üye olmamaya kadar uzanan bölgede kısmi üyeliğe izin verdiği için 25 °C sıcaklık kümesi üyelik derecesi 0.5'dir, yani 25°C tam sıcak değil ama soğuk da değil. 45 °C sıcaklığın klasik kümede üyelik derecesi sorulacak olursa, grafikten alınacak cevap, "% 100 sıcak kümesindedir" olmasına rağmen, bulanık kümesinin cevabı, "% 90 sıcak kümesindedir" olacaktır. (35, 36)



Şekil 2.8. Klasik mantık ile bulanık mantığın karşılaştırılması

2.2.2.3. Üyelik Fonksiyonu

Üyelik ağırlığı belirli bir değer, bir bulanık küme içerisinde yer almasının güvenilirliğinin veya eminliğinin bir işaretidir. Üyelik işlevi biçimsel olarak, denetlenen sürecin özelliklerine göre değişik şekillerde olabilir. Üçgen, yamuk, çan vb. biçimlerde olabilir. Farklı uygulamalarda çeşitli sayıda ve isimde etiket kullanılmaktadır. Fakat genelde 7 ayrı etiket kullanılır. Bunlar; NB: Negatif Büyük, NO: Negatif Orta, NK: Negatif Küçük, SF: Sıfır, PK: Pozitif Küçük, PO: Pozitif Orta, PB: Pozitif Büyük, olarak adlandırılır.



Şekil 2.9. Üçgen üyelik fonksiyonu

Sistem kontrolünde, en çok üçgen şeklindeki üyelik fonksiyonu hem giriş hem de çıkış büyüklüğünü tanımlamak için kullanılır. Şekil 2.9'da görüldüğü gibi NB etiketini taşıyan üyelik fonksiyonu -8 ile -4 aralığında tanımlanmıştır. NO etiketini taşıyan üyelik fonksiyonu -6 ile -2 aralığında tanımlanmıştır. Dolayısıyla üyelik fonksiyonu -5 değerini hem NB ve NO için hesaplanacak ve sıfırdan farklı bir değer olacaktır. (37)

2.2.2.4. Dilsel Değişkenler

Bulanık kümelerin yapay zeka alanında önemli uygulamalarından biri dilsel hesaplamalardır. Burada amaç, kesin rakamların yerine tabii dildeki ifadeleri kullanarak klasik mantıkta yapıldığı gibi hesaplamaların yapılabilmesidir. "Bu gün hava çok sıcaktır" cümlesinde "Bu günün hava sıcaklığı" bir değişken ve "çok" onun değeri olarak ele alınabilir. "Hava sıcaklığı" değişkeni rakam olarak 25 °C, 30 °C vs. değerler aldığı anda bu değişkeni matematiksel olarak işlemek için iyi yöntemler mevcuttur. Fakat değişkenin değerini rakam olarak değil de kelime ("çok" gibi) olarak ele aldığımızda bu değişkeni işlemek için klasik matematiksel bir teori mevcut değildir. Böyle bir yöntemi sağlamak için dilsel değişken kavramı kullanılır. Kabaca, eğer değişkenin değeri olarak tabii dilde kullanılan kelimeler ele alınırsa bu değişkene "dilsel değişken" denmektedir. (35)

2.2.2.5. Bulanık Kontrol Sistemleri

Bulanık mantık teorisi, insan düşüncesi ve doğal dile daha yakın bir mantık sistemidir. Bilinmeyen yapıdaki sistemleri, operatör deney ve tecrübelerinden hareketle elde edilmiş kurallara göre kontrol etmek düşüncesi, bulanık kontrolörlerin temel çıkış noktası olmuştur.

Bulanık kontrolör, diğer kontrollerden farklı olarak kontrol edilecek sisteme ait önermelere dayanarak işlem yapan bir yapıya sahiptir. Burada belirtilen önermeler en genel haliyle aşağıdaki biçimde verilebilir;

"Eğer (If).....Veya (Or) Eğer (If).....Öyleyse (Then)....."

"Eğer sıcaklık soğuk ve basınç düşük ise, o halde sıcak su sübabını orta pozitifte tut ve soğuk su sübabının durumunu değiştirme"

Burada soğuk, düşük, orta pozitif gibi dilsel değerler kullanılır ve bu dilsel değerlerin uygun üyelik dereceleri mevcuttur. Bu türden önermeler bulanık kontrolörün esasını teşkil etmektedir. Bu önermelerin kontrol edilecek sistemin operatöründen elde edilmesi, kontrolörün istenilen yapıda çalışma olanağını arttıracaktır. Bu kurallar, o sistemi daha önce kullanmış bir insanın deney ve tecrübelerine dayanmaktadır. Operatör tarafından verilen bu önermeler kontrol kurallarını oluşturmaktadır. Bulanık kontrolörler, bu özellikleriyle dilsel önermeleri işleyebilen bir yapıya ulaşmaktadır.

Bulanık kontrolörler, klasik kontrol yapılarına alternatif olarak geliştirilmiştir. Amaç matematiksel modeli tam olarak belirlenemeyen sistemleri kontrol etmek için yöntem geliştirmektir. Bunun için klasik kontrol teorisinin tersine sistemin modeliyle ilgilenilmeyen bir yol tutulmuştur. Buna göre sistemi kontrol etmekte olan bir operatörden yararlanılmış ve operatörün sistemi kontrol ederken uyguladığı kurallar bütünü bulanık kontrolörün temelini oluşturmuştur. Bu yüzden bulanık kontrol, geleneksel matematik kontrol ve insan karar yapısı arasındaki yakınlaşma için bir basamak olarak görülebilir. Bulanık kontrolörler giderek artan bir ilgiyle pek çok alanda kullanılmaktadır. (31)

2.3. SANTRAL MODELİ VE DENETLEYİCİ SİSTEMLER

2.3.1. Giriş

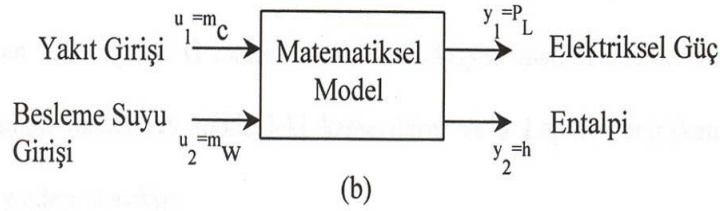
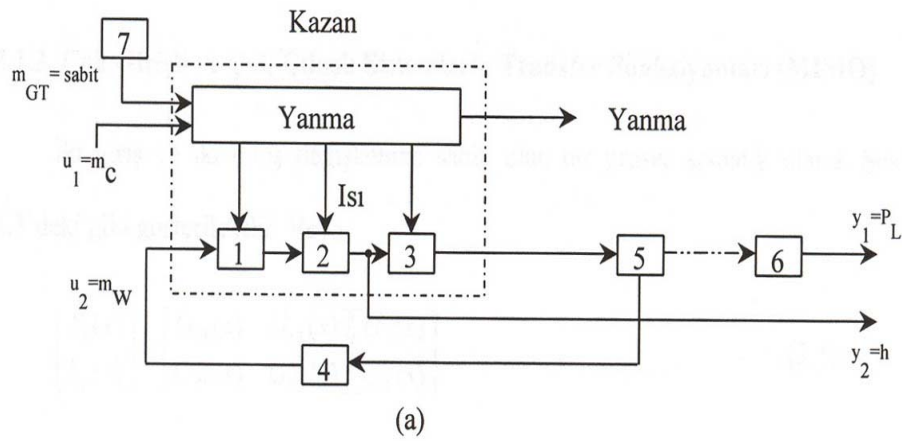
Bu çalışmada referans alınan elektriksel güç santrali, 195 bar ve 535 °C canlı buhara sahip bir kömür yakıtlı zorlamalı kazandan beslenen, 652.5 MW elektriksel güç sağlayan bir jeneratör/buhar türbin ünitesi ve diğer 112.5 MW elektriksel güç sağlayan jeneratör/gaz türbini ünitelerinden oluşan 765 MW'lık bir kombine bloktur. Kömür tozu 4 katta sıralanmış 32 brülör tarafından beslenmektedir. Yanma için gerekli hava vantilatörlerden sağlanmakta, türbin çıkışındaki gazlar buhar kazanının verimini artırmak için ısı ve oksijen taşıyıcı olarak kullanılmaktadır. (38)

Güç santrali; kazan, gaz türbini, buhar türbini ve jeneratörden oluşur. Kazan sıkı bir şekilde birbiriyle bağıntılı çok değişkenli bir sistemle modellenabilir. Bu, kazanı kontrol mühendisliği açısından oldukça ilginç kılar. Kazanda, kimyasal enerji termal enerjiye (buhar) dönüştürülür. Bir kazanın dinamik davranışı ağırlıklı olarak aşağıdaki gibi bir çok farklı işletme koşuluna bağlıdır;

- Yakıtın kalorifik değeri ve kalitesinin değişmesi, entalpinin ve canlı buhar basıncının değişmesine sebep olur, dolayısıyla jeneratördeki güç de değişir,
- Yakıt besleyicilerinin verimi zamanla azalır,
- Isıtma yüzeyleri, brülörler ve besleyicilerdeki kuruma, sistem dinamiğinde değişimlere neden olur,
- Set değerlerindeki ve yükteki değişimler, çalışma noktasında değişmelere neden olur,
- İklimsel değişikliklerden dolayı, kombine güç istasyon bloğunda yer alan gaz türbininin çıkış sıcaklığındaki değişimler kazan dinamiğini oldukça etkileyebilir.

Verimli bir kontrol tasarımı için, sistemin dinamik ve statik özellikleri çok iyi bilinmelidir. Diğer bir taraftan, bu şekilde çok giriş ve çok çıkışlı bir sistemi ele almak oldukça güç ve karmaşıktır. Bu yüzden, Şekil 2.10'da görüldüğü gibi model tasarımında en önemli giriş ve çıkış değişkenleri kullanılır. İstenen proses davranışını tanımlamak üzere incelenen güç santrali için iki girişli ve iki çıkışlı model genellikle yeterlidir.

Şekil 2.10'da görüldüğü gibi, yakıt beslemesi ve besleme suyu akışı, giriş değişkenleri olarak seçilmiştir. Çıkış değişkenleri ise elektriksel güç ve entalpidir.



1: Ön ısıtıcı, 2: Evaporatör, 3: Kızdırıcı, 4: Yoğunlaştırıcı, 5: Türbin,
6: Jeneratör, 7: Gaz türbini, m_C : Kömür Beslemesi,
 m_W : Besleme suyu akışı, m_{GT} : Gaz türbini'nden gelen egsoz gazı

Şekil 2.10. Şematik diyagram, Güç santrali ve Matematiksel modeli

Entalpi, sabit basınçta meydana gelen birçok işlemde hem enerjiyi hem de işlem esnasındaki maksimum işi göz önüne alan bir termodinamik fonksiyondur. Kimyasal reaksiyonların çoğu sabit basınçta yürür. Hacim değiştiğinde dış basınca karşı bir iş yapılmış olur. Böyle bir reaksiyonda iç enerji değişmesinde bu iş ile serbest hale geçen veya alınan enerji birbirinden ayrı göz önüne alınır. Bu sebeple sabit basınç altında yürüyen bir kimyasal reaksiyonda hal değişmelerini göstermek için bir hal fonksiyonu kullanılmıştır. Bu hal fonksiyonu da entalpidir.

Güçteki değişim, sadece buhar jeneratörüne bağlı olduğundan, buhar üretimi üretilen elektriksel gücü doğrudan etkiler. Isınmadaki sorunlara çok hızlı cevap verildiğinden ve püskürtme suyundan etkilenmediği için evaporatör çıkışındaki buharın entalpisi, buhar kalitesi için en iyi ölçüm yeri kabul edilir.

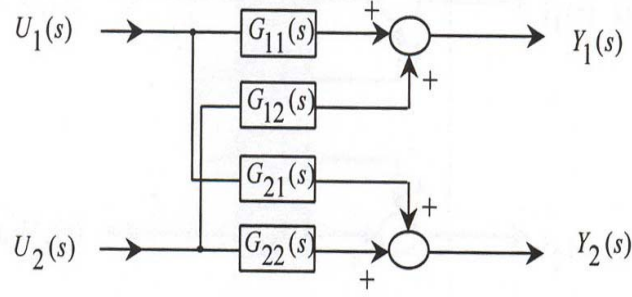
Model için gerekli ölçümler yapılırken, her bir girişin elektriksel güç ve entalpi üzerinde etkisinin belirlenmesi, yani bir girişe adım değişim uygulanırken diğer girişin sabit tutulduğu bilinmelidir. (13, 38-40)

2.3.2. Çok Girişli ve Çok Çıkışlı Sistemlerin Transfer Fonksiyonları (MIMO)

İki giriş ve iki çıkış değişkenine sahip olan bir proses şematik olarak Eşitlik (2.4)'deki gibi gösterilebilir. Veya,

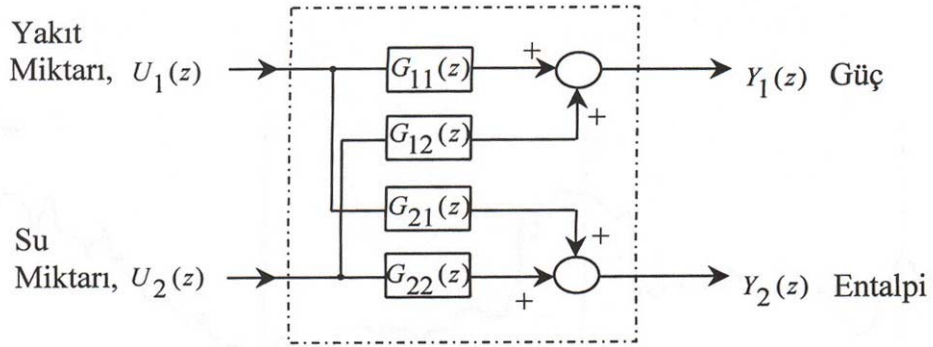
$$\begin{bmatrix} Y_1(s) \\ Y_2(s) \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix}}_{G(s)} \begin{bmatrix} U_1(s) \\ U_2(s) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

şeklinde matrisel olarak ifade edilebilir. Buradaki bağımsız transfer fonksiyonlarını toplayan 2x2 boyutlu G(s) matrisi, transfer fonksiyon matrisi olarak bilinir. Matrisin elemanları, matematik modeldeki katsayıların ve s Laplace değişkeninin cebirsel fonksiyonları olacaktır.



Şekil 2.11. İki giriş ve çıkış değişkenli prosesin blok diyagramı

Transfer fonksiyonları sadece s domeninde değil, kesikli zaman sinyalleri kullanıyorsa z domeninde de oluşturulabilir. Laplace dönüşümleri ile elde edilmiş olan transfer fonksiyonları sürekli zaman sistemlerinin, z domenindeki transfer fonksiyonları ise ayrık zamanlı sistemlerin transfer fonksiyonlarıdır. Bu çalışmada kullanılan santral modeli z domeninde incelenmiş olup gerekli blok diyagramı Şekil 2.12'de gösterilmiştir.



Şekil 2.12. Kullanılan santral modelinin blok diyagramı

Söz konusu santrale ait kazanın dinamik davranışının işletme şartları ile yakından ilgili olduğunu da göz önüne alarak, bütün ölçümler için değerlendirilen modele ait U_1 , U_2 girişleri ve Y_1 , Y_2 çıkışları Şekil 2.12'de gösterilmiştir. Bu sisteme ait birim

basamak fonksiyon cevapları için Kocaarslan'ın çalışmasında bulunan değerler alınmıştır. (38)

İki giriş ve iki çıkışa sahip söz konusu santral modeli, kazan ısıtıcı boru yüzeyleri temiz ve santral %95 kapasitede olduğu durum için incelenmiştir.

2.3.3. Kullanılan Modele Ait Transfer Fonksiyonları (31)

Bulanık Mantık Kontrolör İçin Model (Kazan Temiz, Santral Çalışma Kapasitesi % 95):

$G_{11}(z)$:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 0.09601 & c_1 &= -1.892 \\ b_{11} &= -0.09315 & c_0 &= 0.8936 \quad \text{olmak üzere;} \end{aligned}$$

$$G_{11}(z) = \frac{a_{11}.z + b_{11}}{z^2 + c_1.z + c_0} \quad (2.5)$$

$G_{12}(z)$:

$$\begin{aligned} a_{12} &= 0.01129 \\ b_{12} &= -0.01125 \quad \text{olmak üzere;} \end{aligned}$$

$$G_{12}(z) = \frac{a_{12}.z + b_{12}}{z^2 + c_1.z + c_0} \quad (2.6)$$

$G_{21}(z)$:

$$\begin{aligned} a_{21} &= 0.007947 \\ b_{21} &= 0.03004 \quad \text{olmak üzere;} \end{aligned}$$

$$G_{21}(z) = \frac{a_{21}.z + b_{21}}{z^2 + c_1.z + c_0} \quad (2.7)$$

G₂₂ (z):

$$a_{22} = -0.1145$$

b₂₂ = 0.11 olmak üzere;

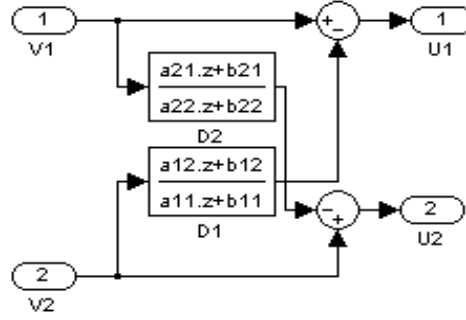
$$G_{22}(z) = \frac{a_{22}.z + b_{22}}{z^2 + c_1.z + c_0} \quad (2.8)$$

2.3.4. Ayırıcı (Decoupler) Sistemin Modellenmesi

Kullanılan santral modelinin matris biçimindeki ifadesi;

$$\begin{bmatrix} Y_1(z) \\ Y_2(z) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11}(z) & G_{12}(z) \\ G_{21}(z) & G_{22}(z) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1(z) \\ U_2(z) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Yukarıdaki kazan modelinin daha kolay kontrol edilebilmesi için, oluşturduğumuz modele ayırıcı sistem eklenmelidir. Yani, Y₁(z) çıkışı sadece bir girişten, Y₂(z) çıkışı ise sadece diğer girişten etkilenmelidir. Oysa yukarıdaki eşitlikten de anlaşıldığı gibi Y₁(z) ve Y₂(z) çıkışları hem U₁(z) hem de U₂(z) girişlerinden etkilenirler. Giriş ve çıkışlar arasında bir çıkış (Y₁(z)) ayırıcının bir girişinden (U₁(z)), diğer çıkış (Y₂(z)), ayırıcının diğer girişinden (U₂(z)) etkilenecek şekilde ayırıcı tasarlanır. Bu ayırma sisteminin, içinde bulunan birimler ile birlikte gösterimi ise Şekil 2.13'te sunulmuştur;



Şekil 2.13. Kullanılan ayırma sistemi

Yukarıda blok diyagram şeklinde gösterilen ayırma sisteminin vektör-matris şeklinde gösterimi de Eşitlik (2.10)'da sunulmuştur (38);

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -G_{21}/G_{11} \\ -G_{21}/G_{22} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Burada V_1 ve V_2 ayırıcının girişleri, U_1 ve U_2 ayırıcının çıkışları ve aynı zamanda boilerin girişleridir. $G_{12}(z)$, $G_{21}(z)$, $G_{11}(z)$, $G_{22}(z)$ fonksiyonları Eşitlik (2.9)'da kullanılan değerlerdir.

Eşitlik (2.10), Eşitlik (2.9)'da yerine konulduğunda Eşitlik (2.11) elde edilir;

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} - (G_{12}G_{21}/G_{22}) & 0 \\ 0 & G_{22} - (G_{12}G_{21}/G_{11}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

Giriş ve çıkış ilişkilerinin ayrıştığı, vektör-matris gösteriminden daha rahat bir şekilde algılanabilmektedir. Vektör-matris gösterimi açıldığında Y_1 çıkışının sadece V_1 girişine, Y_2 çıkışının da sadece V_2 girişine bağlı olduğu görülmektedir.

2.4. SANTRAL MODELİ İÇİN DENETLEYİCİLER

2.4.1. Giriş

Bu tez çalışmasında klasik PI kontrolör ile Bulanık PI kontrolörün limitli ve bozucu etkili karşılaştırmaları yanında her iki kontrol sistemiyle yapılmış adaptif model karşılaştırması yapılacaktır. Bunun için öncelikle klasik PI kontrolör ve Bulanık PI kontrolör tasarımları gösterilmiştir.

2.4.2. PI Kontrolör Parametrelerinin Belirlenmesi

Daha önceden belirtildiği gibi PI kontrol parametrelerinin belirlenmesinde çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu çalışmada "analitik yöntem (Sistemin Basamak Cevap Eğrisi Yöntemi)", kullanılmıştır. (41) Buna göre sistemin basamak giriş karşısında gösterdiği cevap eğrisinden ortaya çıkan zaman gecikmesi veya ölü zaman gecikmesi T_0 ve tüm sistemin zaman sabiti T_S belirlenmelidir. Her bir model için gerekli olan K_P ve K_I parametreleri; Eşitlik (2.3)'te gösterildiği gibi hesaplanmalıdır. Hesaplama yöntemiyle elde edilen değerler daha sonra deneme-yanılma çalışmalarıyla optimize edilmelidir.

K_P ve K_I parametreleri Kocaarslan çalışmasındaki eğrilerden ilk olarak hesaplama yöntemi ile bulunmuş, daha sonra girişlere limit etkisi sisteme dahil edildiği duruma göre tekrar deneme-yanılma yöntemleriyle optimum değerleri elde edilmiştir. (38) Oluşturulan değerler gürültülü sistemde de aynı şekilde elde edilmiştir.

Buna göre, her bir model için hesaplanan optimum parametreler aşağıda gösterilmiştir:

$$\text{Güç çıkışı} \quad K_P = 1.869 \quad K_I = 0.011 \quad (2.12)$$

$$\text{Entalpi çıkışı} \quad K_P = 1.823 \quad K_I = 0.011 \quad (2.13)$$

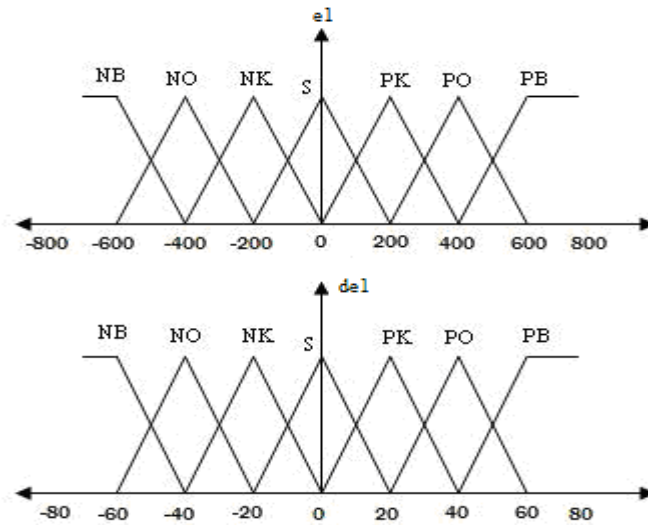
2.4.3 Bulanık Mantık Kontrolörün Tasarımı

Sistemin bulanık mantık kontrolünü sağlamak üzere her bir modelde güç ve entalpi çıkışları için iki ayrı kontrolör kullanılmıştır.

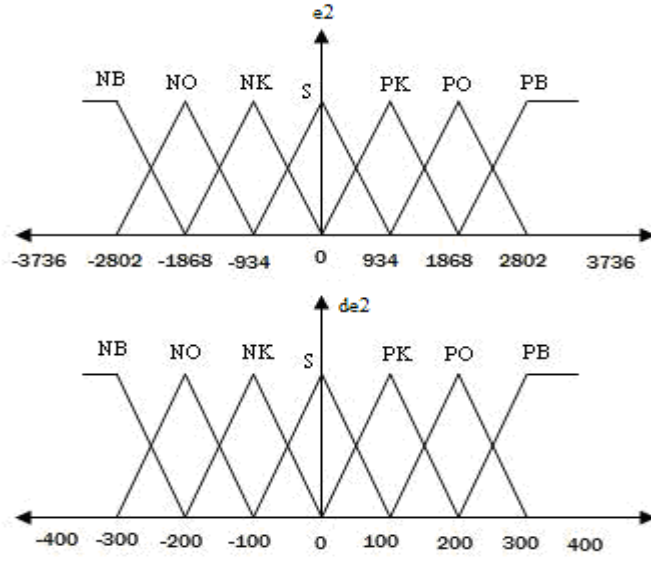
Kullanılan bulanık mantık kontrolörlerin her birinin giriş ve çıkış değişkenleri, 7 üyelik fonksiyonu kullanılarak oluşturulmuştur. Bu üyelik fonksiyonlarının isimleri sırasıyla; NB (Negatif Büyük), NO (Negatif Orta), NK (Negatif Küçük), S (Sıfır), PK (Pozitif Küçük), PO (Pozitif Orta), PB (Pozitif Büyük) şeklindedir. Bu üyelik fonksiyonlarından NB ve PB kontrol aralığının uç değerleri olduğundan yamuk üyelik fonksiyonu olarak, diğerleri ise kontrol aralığının daha hassas olması amacıyla üçgen üyelik fonksiyonu olarak seçilmiştir.

2.4.3.1 Giriş ve Çıkış Değişkenlerinin Aralıklarının Belirlenmesi

Bilindiği gibi bulanık mantık kontrol algoritmasında hata ve hatanın değişimi kontrolün sağlanmasında belirleyici iki faktördür. Bunun yanında kontrolör çıkışının aralıkları da hassas olarak belirlenmeli ve üyelik fonksiyonları ile derecelendirilmelidir. Buna göre model için kullanılan giriş değişkenlerinin aralıkları Şekil 2.14 ve 2.15'te gösterilmiştir (20);



Şekil 2.14. Model için kullanılan güç hatası ve değişimi



Şekil 2.15. Model için kullanılan entalpi hatası ve değişimi

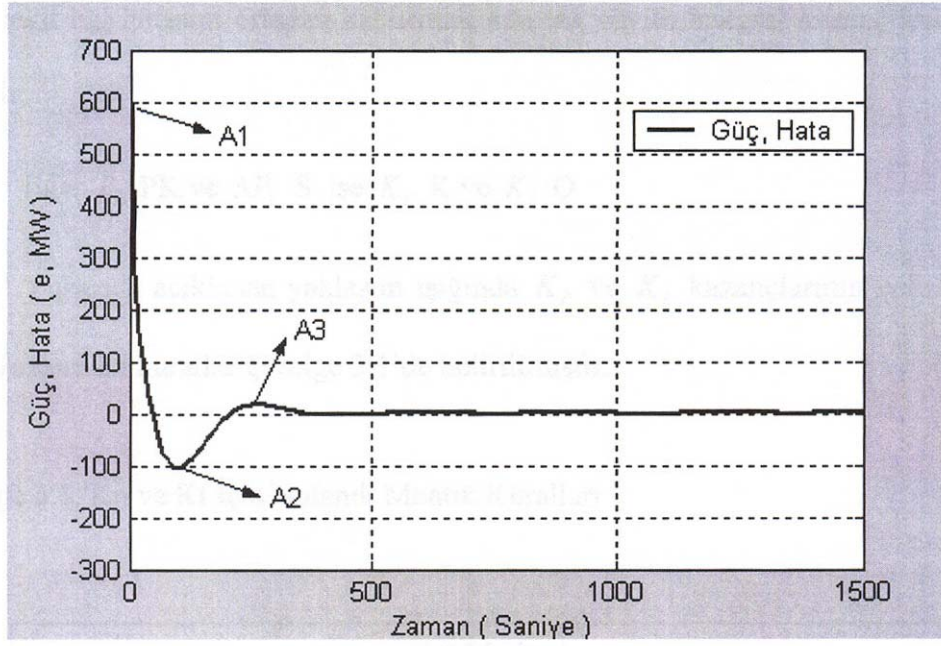
Burada e_1 , sistemin güç kısmına ilişkin hata değerini temsil etmektedir. de_1 , bu hatanın değişimidir. Benzer şekilde e_2 , sistemin entalpi kısmına ilişkin hata değerini temsil etmektedir. de_2 , bu hatanın değişimidir.

2.4.3.2 Bulanık Kuralların Çıkarımı

Bu çalışmada, bulanık mantık matris tablosu oluştururken yararlanılan yaklaşım, Şekil 2.16'da gösterilen güç girişinin, 600 MW'lık bir giriş sinyal değişimi karşısında güç hata sinyalinin verdiği cevap üzerinde açıklanabilir.

Başlangıçta (A1 civarında), hata büyük olduğu için PI kontrolörün oransal kazancı oldukça büyük olmalı fakat aşırı yükselmeleri önlemek için integral kazancı oldukça küçük olmalıdır. Buna göre kural olarak;

Eğer e PB ve de PB ise K_P PB ve K_I NB



Şekil 2.16. Güç hata sinyalinin girişe verdiği cevap

A2 noktası civarında ise hata biraz daha azalmıştır. Buna göre oransal kazanç biraz küçülmeli, integral kazanç ise biraz artmalıdır,

Eğer e NO ve de S ise K_P NO ve K_I PO

şeklinde kural yazılır.

A3 noktasında ise, sistem osilasyonunu azaltmak için küçük oransal kazanç ve sürekli hal hatasını ortadan kaldırmak için ise büyük integral kazanç kullanmak gerekir,

Eğer e PK ve de S ise K_P PK ve K_I NK

Yukarıda açıklanan yaklaşım ışığında K_P ve K_I kazançlarının belirlenmesi için oluşturulan kurallar, Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de belirtilmiştir;

Çizelge 2.1 Güç ve Entalpi çıkışları için K_P parametrelerinin kuralları (20)

de E	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

Çizelge 2.2 Güç ve Entalpi çıkışları için K_I parametrelerinin kuralları (20)

de E	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

2.4.3.3 Bulanık Çıkış Değerlerinin Durulaştırılması

Amaçlanan programlamada, PI kontrolör parametreleri K_P ve K_I , e ve onun ilk türevi de 'ye göre tanımlanır. K_P ve K_I , tecrübeler ışığında $[K_{P,min}, K_{P,max}]$ ve $[K_{I,min}, K_{I,max}]$ değerleri arasında değişmektedir. Kullanımda K_P ve K_I değerleri aşağıdaki eşitlik yardımı ile normalize edilir;

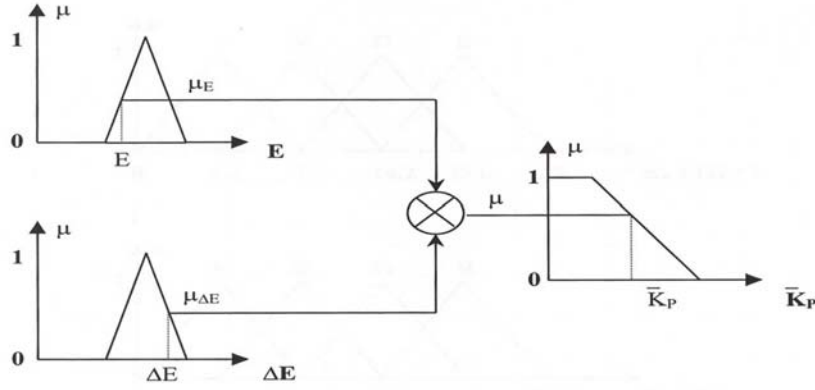
$$\bar{K}_P = (K_P - K_{P, \min}) / (K_{P, \max} - K_{P, \min}) \quad (2.14)$$

$$\bar{K}_I = (K_I - K_{I, \min}) / (K_{I, \max} - K_{I, \min}) \quad (2.15)$$

Böylece kazanç değerleri [0, 1] aralığına normalize edilmiş olur.

Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de sunulan kurallar seti \bar{K}_P ve \bar{K}_I değerlerini belirlemek üzere kullanılır. Örneğin;

Eğer e PB ve de PB ise K_P PB ve K_I NB



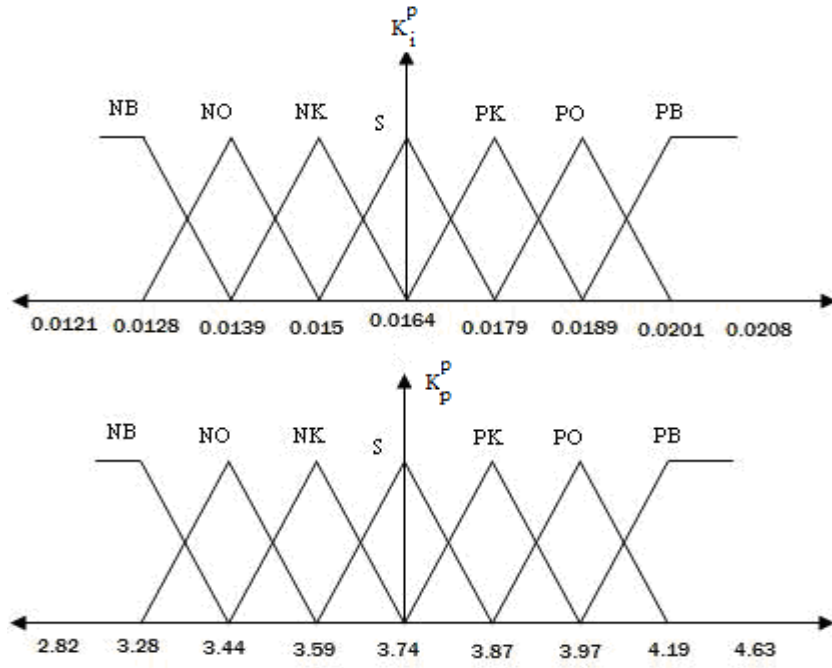
Şekil 2.17. Bulanık mantık kuralının uygulanması

\bar{K}_P ve \bar{K}_I değerleri bulunduktan sonra, PI kontrolörün parametreleri aşağıdaki eşitlik yardımı ile hesaplanır⁽⁴⁷⁾;

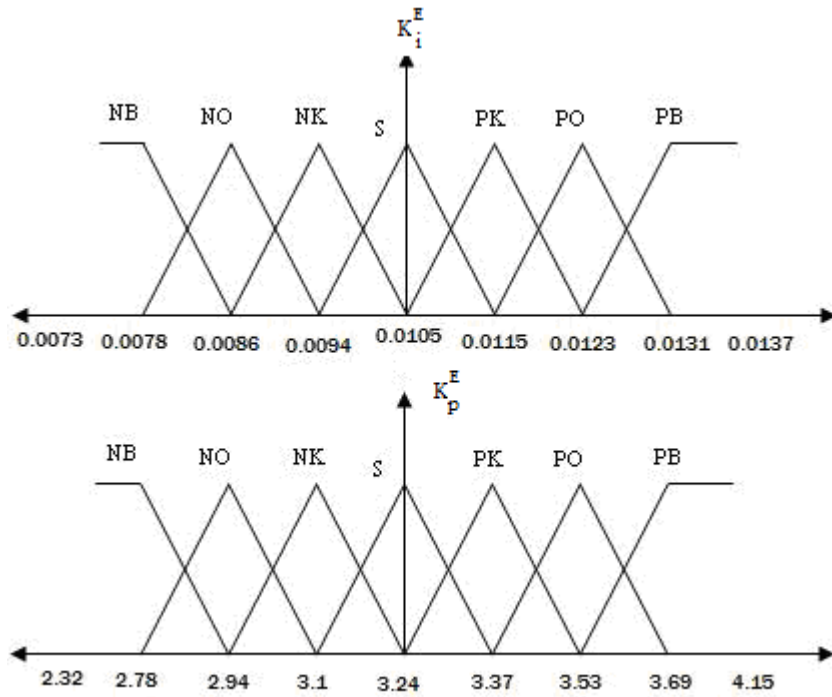
$$K_P = (K_{P, \max} - K_{P, \min}) \bar{K}_P + K_{P, \min} \quad (2.16)$$

$$K_I = (K_{I, \max} - K_{I, \min}) \bar{K}_I + K_{I, \min} \quad (2.17)$$

Bulanık PI kontrolördeki bu aralık değerleri sistemden sisteme değişiklik göstermekle beraber tecrübe ve deneme yanılma yöntemleri ile belirlenmiştir. Bu da bulanık mantığın felsefesinden ileri gelir.



Şekil 2.18.a. Model için kullanılan kazanç değişkenlerinin aralıkları,
Güç kazanç değerleri



Şekil 2.18.b. Model için kullanılan kazanç değişkenlerinin aralıkları,
Entalpi kazanç değerleri

2.5. PARAMETRE TAHMİNİ

2.5.1. Giriş

Parametre tahmini sisteminde “Projeksiyon algoritması” yöntemi kullanılmıştır. Santralin kazan modeli için fark denklemleri oluşturulmuş ve aşağıda gösterilen projeksiyon algoritmasına göre model oluşturulmuştur. (42)

$$y(k) = \phi(k-1)^T \theta_0 \quad (2.18)$$

$y(k)$: Skaler sistem çıkışı

$\phi(k-1)$: Bilinen sinyal vektörü, k-1 ve daha önceki anlarda mevcut bilgilerden oluşur.

θ_0 : Parametre (bilinmeyen)

Örnek olarak;

$$y(k) = -a_1 y(k-1) + b_1 u(k-1) \quad (2.19)$$

$$\phi(k-1)^T = [-y(k-1) \quad u(k-1)] \quad (2.20)$$

$$\theta_0^T = [a_1 \quad b_1] \quad (2.21)$$

$$y(k) = \phi(k-1)^T \theta_0 \quad (2.22)$$

2.5.2. Projeksiyon Algoritması

Kullanılan projeksiyon algoritması aşağıda verilmiştir;

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{a\phi(k-1)}{c + \phi(k-1)^T \phi(k-1)} (y(k) - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1)) \quad (2.23)$$

Algoritmadaki a ve c değerleri, oluşturulan sistemde yakınsama değerlerini daha iyi sonuçlandırmak için kullanılmıştır. $0 < a < 2$ ve $c > 0$ için $\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\theta}(k) = \theta_0$ olacağı aşağıdaki gibi ispatlanır. (42)

$\tilde{\theta}(k) = \hat{\theta}(k) - \theta_0$ olsun. Eşitlik (2.23)'te kullanılırsa:

$$\tilde{\theta}(k) = \tilde{\theta}(k-1) + \frac{a\phi(k-1)}{c + \phi(k-1)^T \phi(k-1)} \left(\phi(k-1)^T \theta_0 - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1) \right)$$

$e(k) = \phi(k-1)^T * \tilde{\theta}(k-1) \rightarrow$ tanımıyla

$$\tilde{\theta}(k) = \left(\tilde{\theta}(k-1) - \frac{a\phi(k-1)}{c + \phi(k-1)^T \phi(k-1)} e(k) \right)$$

$$\|\tilde{\theta}(k)\|^2 = \tilde{\theta}(k)^T \tilde{\theta}(k) = \tilde{\theta}(k-1)^T \tilde{\theta}(k-1) - \frac{2\tilde{\theta}(k-1)^T \phi(k-1)a}{c + \phi(k-1)^T \phi(k-1)} e(k) + \frac{a^2 \tilde{\theta}(k-1)^T \phi(k-1)}{[c + \phi(k-1)^T \phi(k-1)]^2} e(k)^2$$

$$\|\tilde{\theta}(k)\|^2 - \|\tilde{\theta}(k-1)\|^2 = a \left(-2 + \frac{a\phi(k-1)^T \phi(k-1)}{c + \phi(k-1)^T \phi(k-1)} \right) \frac{e(k)^2}{c + \phi(k-1)^T \phi(k-1)} \quad (2.24)$$

Burada, $0 < a < 2$ ve $c > 0$ için

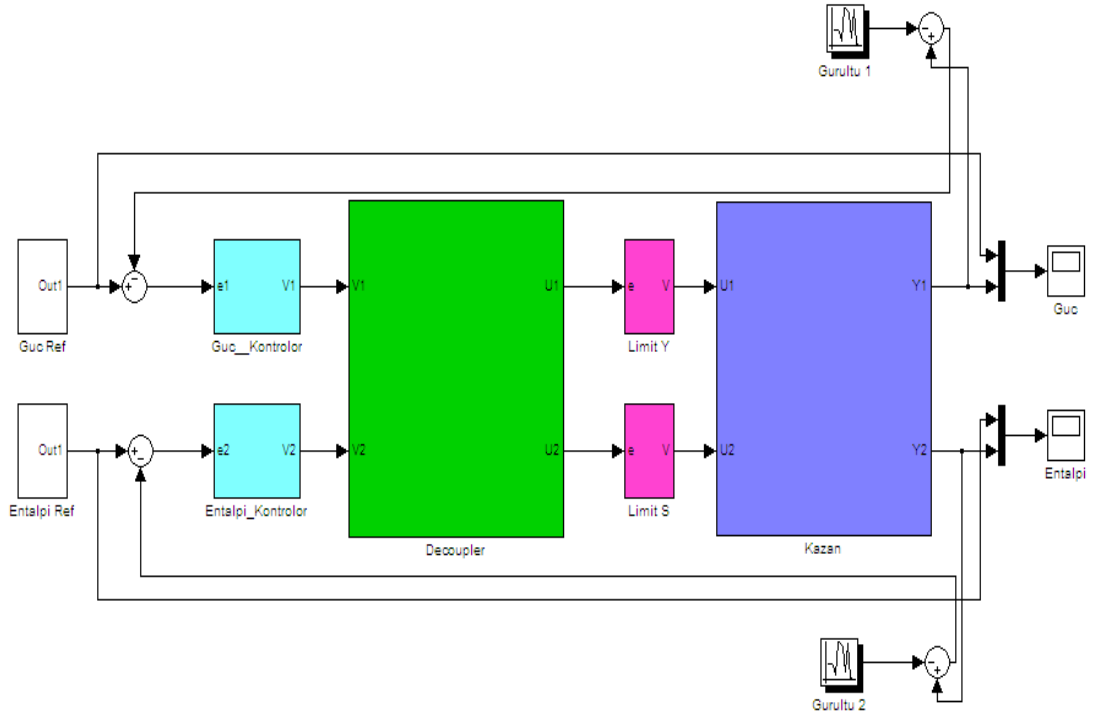
$$a \left(-2 + \frac{a\phi(k-1)^T \phi(k-1)}{c + \phi(k-1)^T \phi(k-1)} \right) < 0 \quad (2.25)$$

olur. Yani parametre tahmin hatası norm karesi gittikçe azalır. Pozitif olan bir değer sürekli azalıyorsa sıfırın altına inemeyeceği için sonlu bir sabite yakınsar. Mutlak hata sabitleşiyorsa $e(k)$ sıfıra gitmelidir. Giriş(ler) frekansça yeterince zenginse hataların sıfır olması ancak parametre tahminlerinin doğru değerlere yakınsamasıyla mümkün olur. (43) Frekans bileşen sayısı, θ_0 'ın boyutunun, yani tahmin edilen parametre sayısının yarısından fazlaysa her t için $e(k)$ 'nin sıfır olması ancak tahminlerin gerçek değerlerde olmasıyla mümkün olur. Aksi halde her frekans bileşeni için 2 parametre tahmininin (biri sin diğeri cos fonksiyon katsayısı olarak düşünülebilir) yanlış bazı değerler almasıyla da $e(k)$ sıfır olabilir. Bu yüzden sistemde, dolayısıyla girişlerde θ_0 boyutunun yarısından fazla sayıda frekans bileşeni varsa Eşitlik (2.23) ile verilen projeksiyon algoritması gerçek değerlere yakınsayan parametre tahminleri verir.

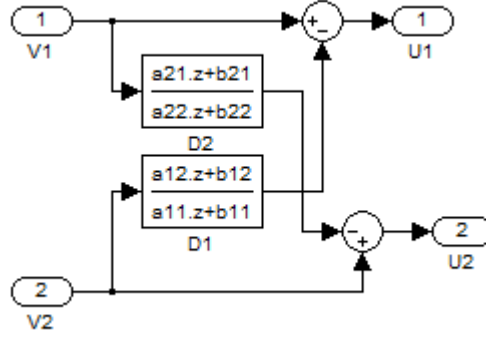
3. TERMİK SANTRALLERDE ADAPTİF DENETİM

3.1. Giriş

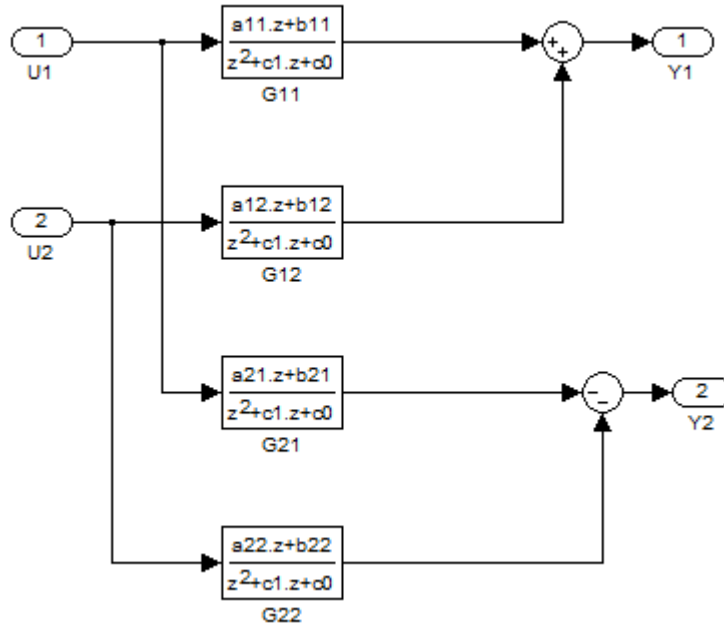
Daha önce yapılan ve bu tezde geliştirilmesi hedeflenen çalışmalarda (20, 21) sistemler ideal (girişleri limitsiz ve ölçümleri gürültüsüz) olarak incelenmişti. İşletme anında sistemin ideal olması beklenemez; dışarıdan bozucu etkilere maruz kalır. Girişler de sınırsız uygulanamaz. Bu konular dikkate alınarak limit ve gürültü etkisi sisteme dahil edilmiş adaptif denetimli sistem ileriki bölümlerde incelenecektir. Ancak önce, daha önceki çalışmalardaki denetimlerin limit ve gürültü etkileriyle nasıl olacağı incelenecektir. Tasarımı yapılan kontrolörlerin sisteme uygulanabilmesi için Şekil 3.1’de görülen blok diyagram kullanılmıştır. Uygulanan kontrolörlerle ilgili blok diyagramlar aşağıda verilmiştir.



Şekil 3.1. Modeli alınan sistemin kontrol blok diyagramı



Şekil 3.2. Ayırıcı (Decoupler) sisteminin blok diyagramı



Şekil 3.3. Kazan sisteminin blok diyagramı

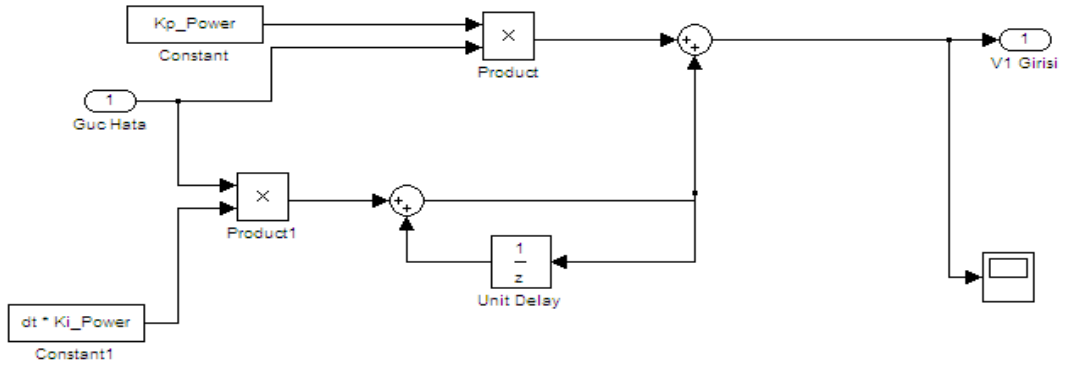
Simülasyon aşamasında buradaki güç ve kontrolörlerinin yerine sırasıyla bulanık mantık PI kontrolör ve klasik PI kontrolör kullanılmıştır. İlk aşamada her iki kontrol sistemi de gürültüsüz ve girişleri limitli olarak incelenecektir. Daha sonra ölçümlere gürültü dahil edilerek her iki kontrol sistemi karşılaştırılacaktır.

Bir sonraki kısımda parametre tahmini çalışmaları incelenecektir. Parametre tahmini çalışmalarından sonra adaptif denetim, limitli ve gürültülü olarak her iki kontrol sisteminde uygulanacak ve sonuçları karşılaştırılacaktır.

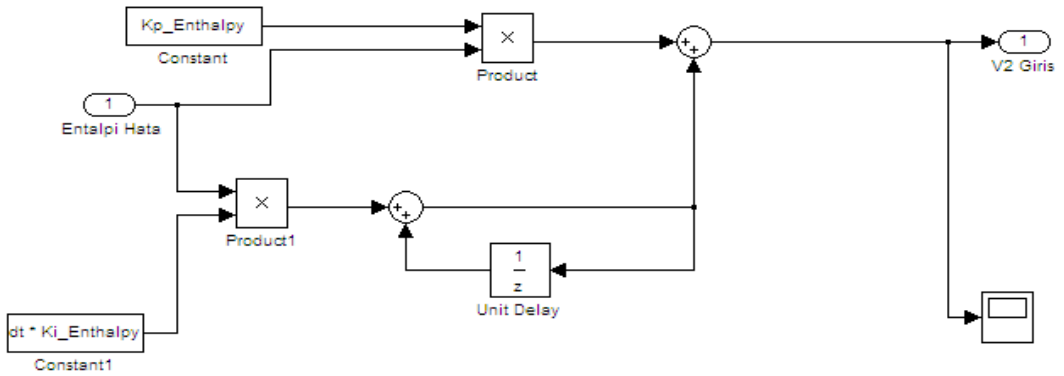
Tüm simülasyonlar, MATLAB 7.0-Simulink yazılımı ile yapılmıştır.

3.2. Kontrolörlerin Güç Santrali Modeline Uygulanması

Şekil 3.1'de görülen kontrolörlerin yerine kullanılan PI kontrolörlerin blok diyagramları Şekil 3.4'de görülmektedir.

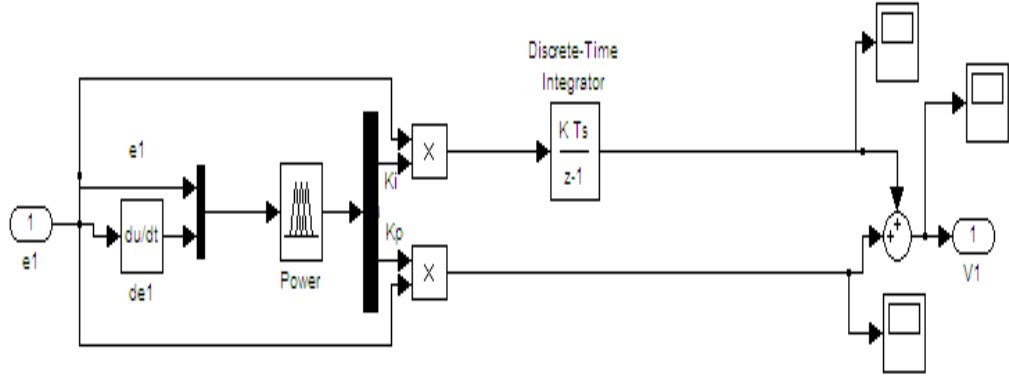


Şekil 3.4.a. Sisteme uygulanan PI kontrolörler, güç kontrolörü

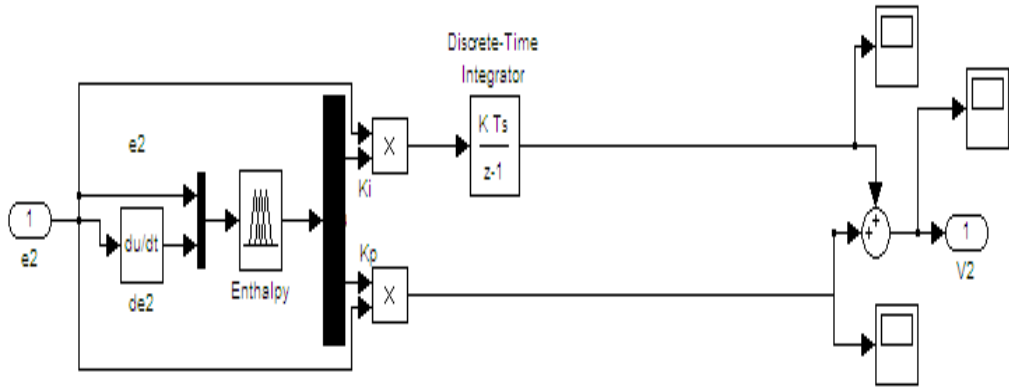


Şekil 3.4.b. Sisteme uygulanan PI kontrolörler, entalpi kontrolörü

Şekil 3.1'de görülen kontrolörlerin yerine kullanılan bulanık mantık PI kontrolörlerin blok diyagramları Şekil 3.5'de görülmektedir;



Şekil 3.5.a. Sisteme uygulanan bulanık mantık PI kontrolörler, güç kontrolörü

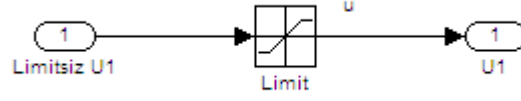


Şekil 3.5.b. Sisteme uygulanan bulanık mantık PI kontrolörler, entalpi kontrolörü

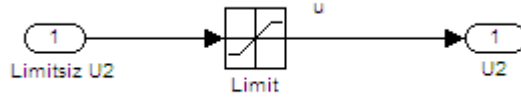
3.2.1 PI ve Bulanık Mantık PI Kontrolörlerinde Limit Etkisi

Her iki kontrol sistemi için de daha önce yapılan çalışmalarda (20, 21) ideal sistemler düşünülmüştü. Limit, sistemde doğrusal olarak düşünülen yapıda su ve yakıt girişinin negatif olmaması ve mümkün olmayacak kadar yüksek değer almaması için kullanılmaktadır. Simülasyonların limitli ve gürültülü yapılması daha gerçekçi bir yaklaşım olacaktır. Şekil 3.6'da modelde kullanılan limit blok

diyagramları görülmektedir.



Şekil 3.6.a. Sisteme uygulanan limit blok diyagramları, yakıt limit



Şekil 3.6.b. Sisteme uygulanan limit blok diyagramları, su limit

Her iki kontrol sistemi için de yapılan çalışmalarda;

İstenen (Referans) değerler :

Güç için ; 10. saniyede 0 MW'tan 400MW'a çıkmış, 1000. saniyede 400MW'tan 600 MW'a çıkmış, 5000. saniyede de 600 MW'tan 500 MW'a inmiştir.

Entalpi için ; 10. saniyede 0 kJ/kg'dan 2000 kJ/kg'a çıkmış, 1000. saniyede 2000 kJ/kg'den 2500 kJ/kg'a çıkmış, 3000. saniyede de 2500 kJ/kg'den 3000 kJ/kg'a çıkmıştır.

Limit Değerleri:

Yakıt tam yükte giriş değeri 600 MW olduğu için üst limit değeri 690 MW,
Su tam yükte giriş değeri 3000 kJ/kg olduğu için üst limit değeri 3450 kJ/kg.
Alt limit değerleri ise hem yakıt hem su için sıfır alınmıştır.

Klasik PI kontrolör için kazançlar:

$$\text{Güç} \quad K_p = 1.869 \quad K_I = 0.011$$

$$\text{Entalpi} \quad K_p = 1.823 \quad K_I = 0.011$$

Bulanık PI kontrolör için kazanç sınırları:

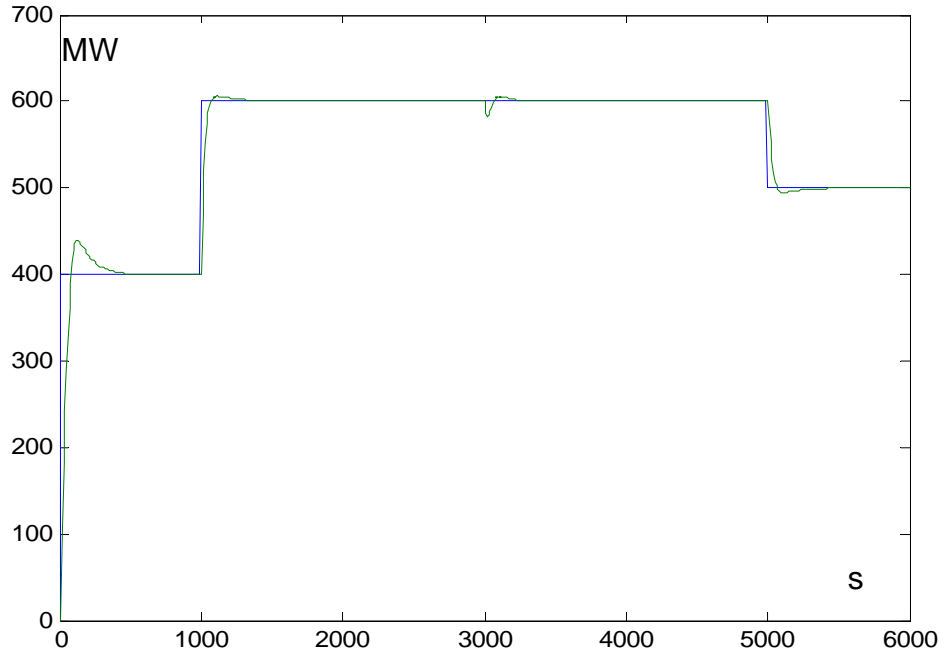
$$\text{Güç} \quad K_{Imin} = 0.0128 \quad K_{Imax} = 0.0201$$

$$K_{Pmin} = 3.28 \quad K_{Pmax} = 4.19$$

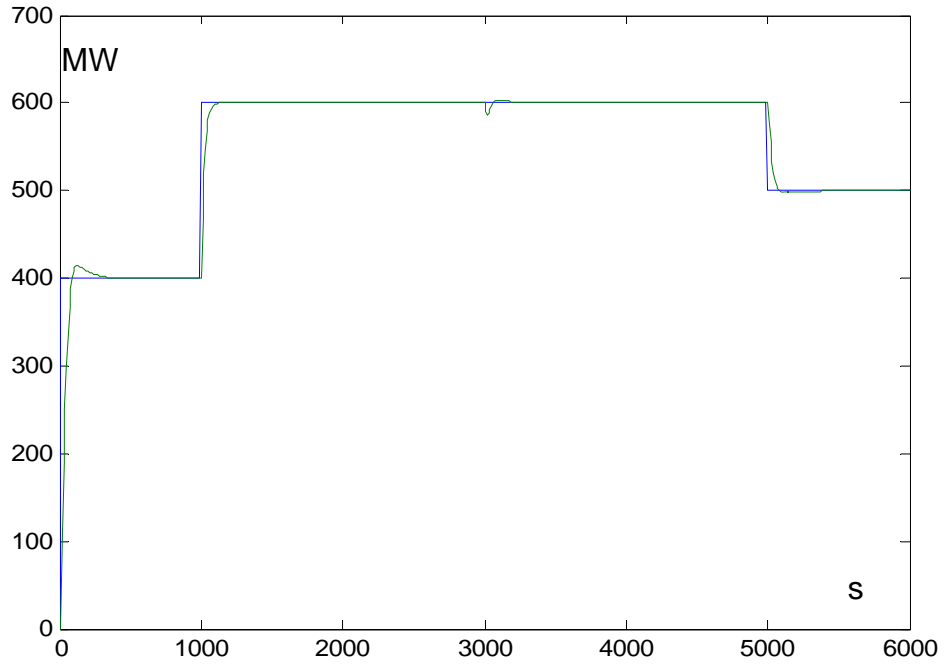
$$\text{Entalpi} \quad K_{Imin} = 0.0078 \quad K_{Imax} = 0.0131$$

$$K_{Pmin} = 2.78 \quad K_{Pmax} = 3.69$$

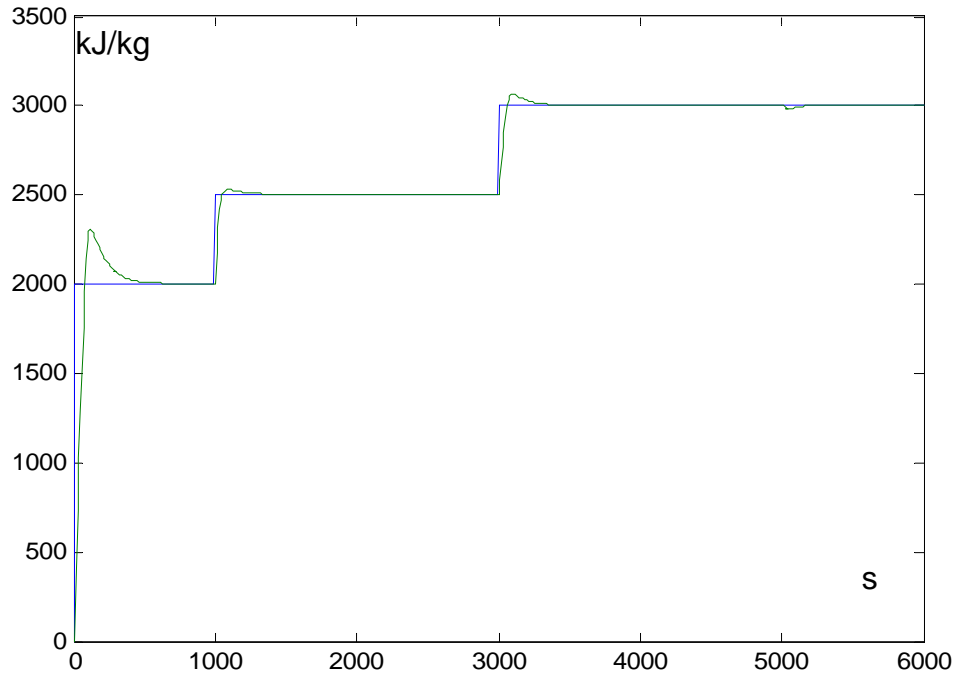
Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de her iki kontrol sistemi için yakıt ve su girişine karşılık, güç ve entalpi çıkışlarının simülasyon sonuçları bulunmaktadır.



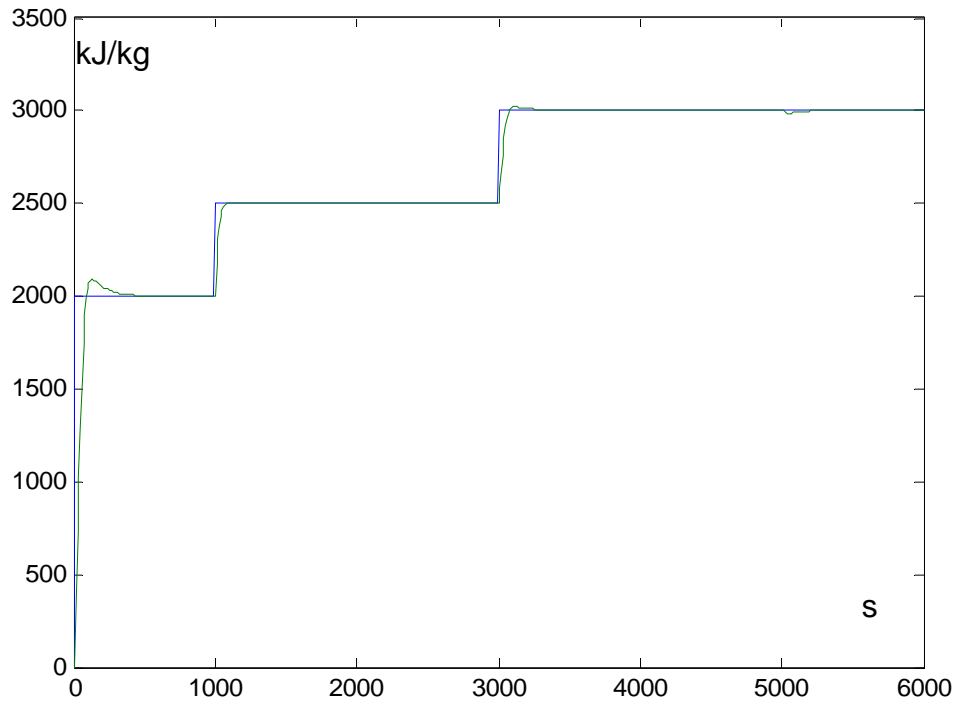
Şekil 3.7.a. Limitli model için güç çıkışı, PI kontrolör



Şekil 3.7.b. Limitli model için güç çıkışı, bulanık mantık PI kontrolör



Şekil 3.8.a. Limitli model için entalpi çıkışları, PI kontrolör



Şekil 3.8.b. Limitli model için entalpi çıkışları, bulanık mantık PI kontrolör

Çizelge 3.1. Limitli model için güç ve entalpi sonuçları

GÜÇ		
0-400 MW	Limitli FPI	Limitli PI
Oturma Zamanı (s)	260	370
Max. Aşma (%)	3,5	9,97
400-600 MW		
Oturma Zamanı (s)	120	140
Max. Aşma (%)	0,1	1
600-500 MW		
Oturma Zamanı (s)	80	140
Max. Aşma (%)	0,52	1,1
ENTALPİ		
0-2000 kJ/kg	Limitli FPI	Limitli PI
Oturma Zamanı (s)	300	440
Max. Aşma (%)	4,4	15,35
2000-2500 kJ/kg		
Oturma Zamanı (s)	90	140
Max. Aşma (%)	0,2	1,28
2500-3000 kJ/kg		
Oturma Zamanı (s)	80	210
Max. Aşma (%)	0,7	2,23
Not: Oturma zamanı %1 hata payı alınarak ölçülmüştür.		

Her iki kontrol sistemi için de limitli modellerin güç ve entalpi sonuçları Çizelge 3.1’de görülmektedir. Limitli bulanık mantık sisteminin, limitli PI sisteme göre oturma zamanları daha kısa ve maksimum aşma miktarları daha küçüktür. Sistemde limit etkisinden sonra normal işletme anında oluşabilecek gürültü etkisi de aşağıdaki bölümde incelenecektir.

3.2.2. PI ve Bulanık Mantık PI Kontrolörlerinde Gürültü Etkisi

Yukarıda da belirtildiği gibi işletme anında dışarıdan gürültü etkisi sistemlere bozucu olarak etki edebilmektedir. Her iki kontrol sistemi için de yukarıda kullandığımız giriş limitleri ile beraber ölçümlere gürültü eklenerek model düzenlenmiştir. Gürültü dağılımı Gaussian seçilmiştir. Aşağıda Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da her iki kontrol sistemi için yakıt ve su girişine karşılık, güç ve entalpi çıkışlarının simülasyon sonuçları bulunmaktadır. Her iki kontrol sistemi için de yapılan çalışmalarda;

İstenen (Referans) değerler, kazanç değerleri ve limit değerleri bir önceki çalışmayla aynı alınmıştır.

Limit Değerleri:

Yakıt tam yükte giriş değeri 600 MW olduğu için üst limit değeri 690 MW,

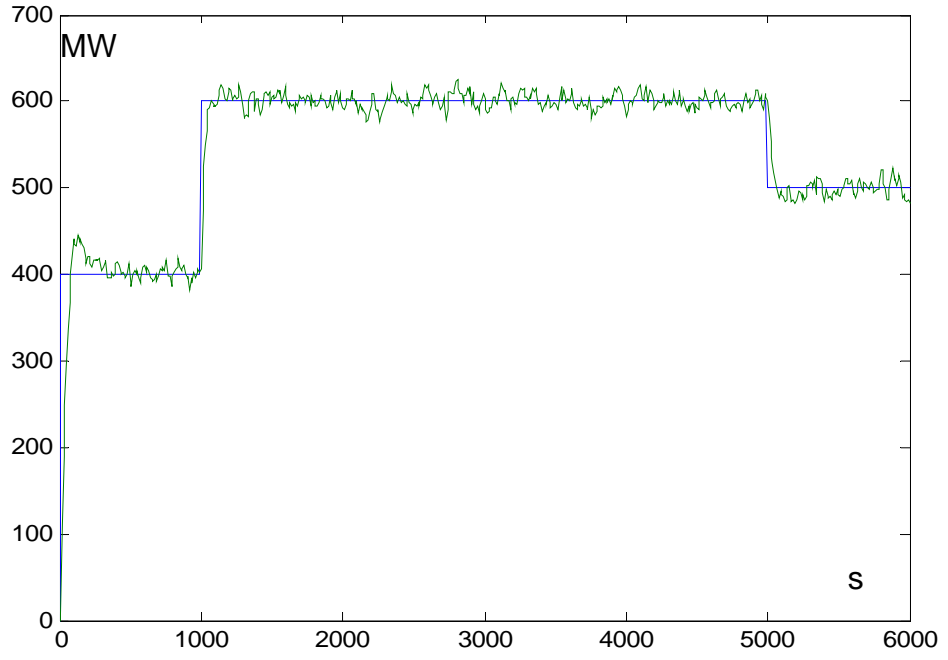
Su tam yükte giriş değeri 3000 kJ/kg olduğu için üst limit değeri 3450 kJ/kg.

Alt limit değerleri ise hem yakıt hem su için sıfır alınmıştır.

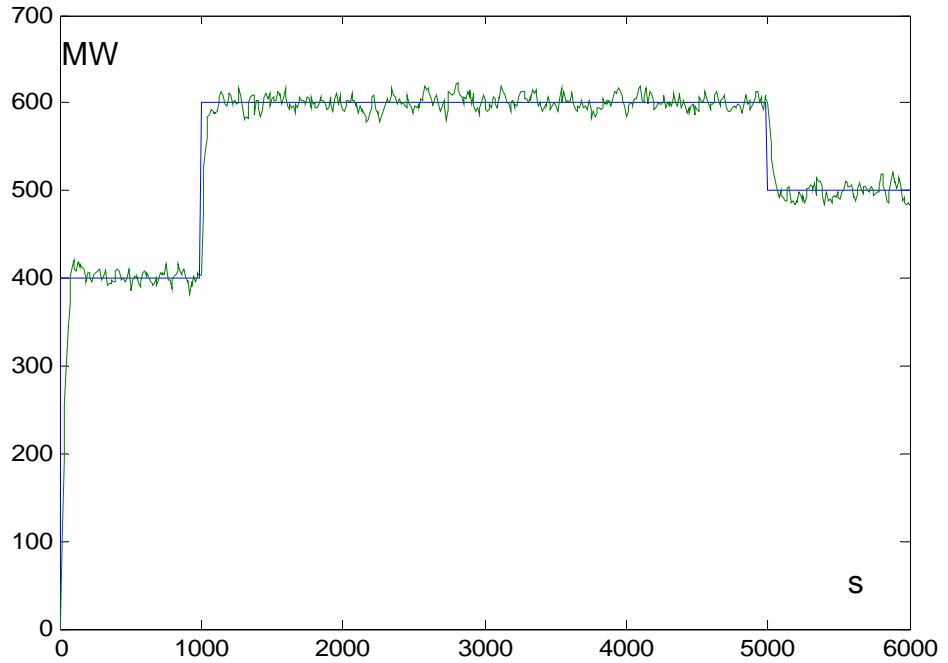
Bozucu etkili sistemlerde bozucu etki varyansı olarak maksimum değerlerin %3'ü alınmış ve testler bu şekilde yapılmıştır.

Güç için $600 \cdot 3 / 100 = 18$ MW varyans olduğundan random fonksiyonun katsayısı bunun karesi 324 (MW)^2 ,

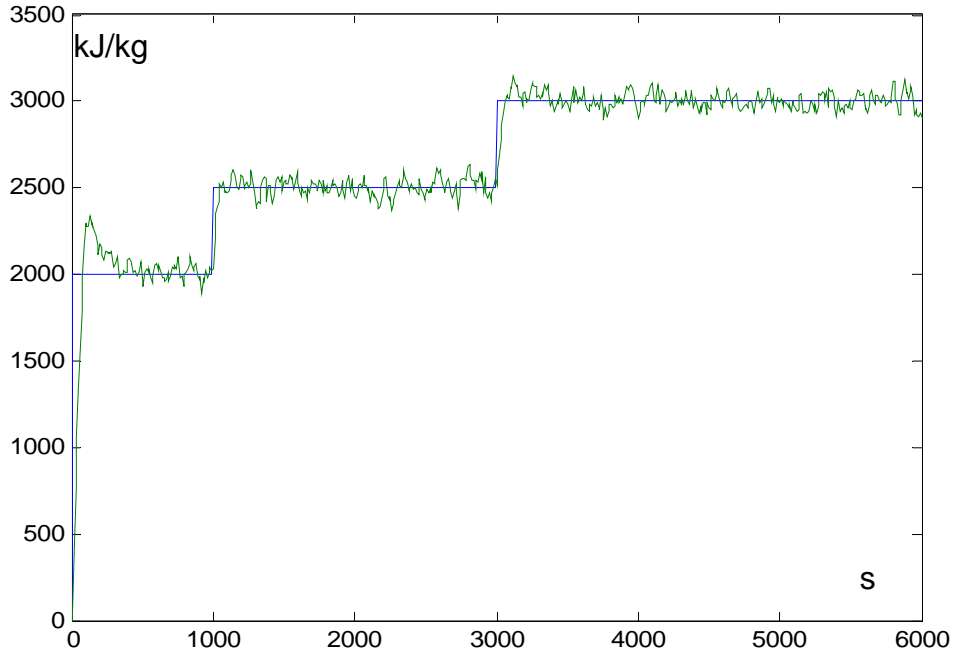
Entalpi için $3000 \cdot 3 / 100 = 90$ kJ/kg varyans olduğundan random fonksiyonun katsayısı bunun karesi 8100 (kJ/kg)^2 alınmıştır.



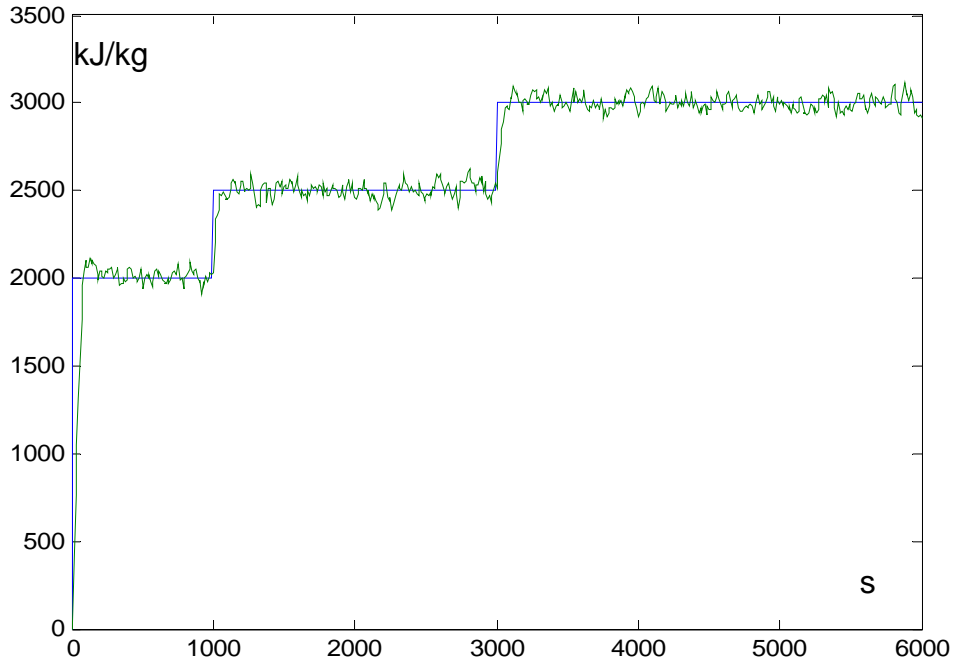
Şekil 3.9.a. Limitli ve gürültülü model için güç çıkışları, PI kontrolör



Şekil 3.9.b. Limitli ve gürültülü model için güç çıkışları, bulanık mantık PI kontrolör



Şekil 3.10.a. Limitli ve gürültülü model için entalpi çıkışları, PI kontrolör



Şekil 3.10.b. Limitli ve gürültülü model için entalpi çıkışları, bulanık mantık PI kontrolör

Çıkışlardaki bozulmalar ortalama mutlak hata olarak aşağıdaki gibi olmuştur:

Limitli ve gürültülü FPI için:

Güç ortalama: %2

Entalpi ortalama:%2.4

Limitli ve gürültülü PI için:

Güç ortalama: %2.5

Entalpi ortalama:%2.8

Limitli ve bozucu etkili sistemde de bulanık mantık PI kontrolör, PI kontrolöre göre daha iyi sonuç vermiştir. %3'lük bozucu etkiye karşılık yukarıdaki oranlarda ortalama bozulmalar oluşmuştur.

3.3. Sistem Parametrelerinin Tahmin Edilmesi

Parametre tahmini konusu Bölüm 2'de incelenmişti. Parametre tahmininde kazan ve ayırıcı sistemin matematiksel modelinden elde edilen fark denklemi yardımıyla tahmin edilmesi istenen parametreler için projeksiyon algoritması uygulanmıştır. Aşağıda Eşitlik (3.1) ve Eşitlik (3.2)'de fark denklemleri bulunmaktadır.

Model oluşturulurken yukarıda da belirtildiği gibi santral modeli için fark denklemi oluşturulup, z domeninden k domenine geçiş yapılarak aşağıdaki denklemler elde edilmiştir :

$$\underbrace{y_2[k] + c_o y_2[k-2]}_{y[k] \text{ yerine}} = -c_1 y_2[k-1] - a_{21} u_1[k-1] - a_{22} u_2[k-1] - b_{21} u_1[k-2] - b_{22} u_2[k-2]$$

(3.1)

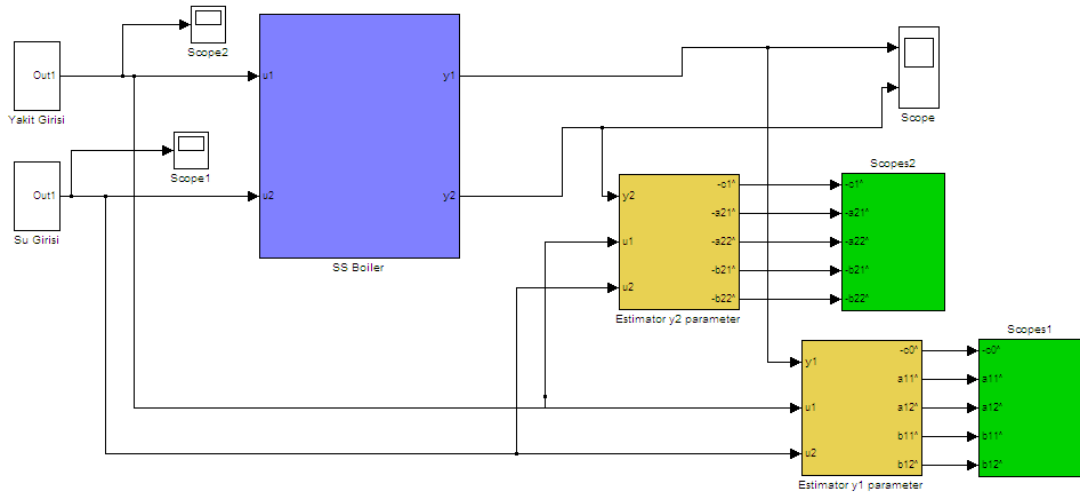
$$\phi[k-1] = \begin{bmatrix} y_2[k-1] \\ u_1[k-1] \\ u_2[k-1] \\ u_1[k-2] \\ u_2[k-2] \end{bmatrix} \quad \theta = \begin{bmatrix} -c_1 \\ -a_{21} \\ -a_{22} \\ -b_{21} \\ -b_{22} \end{bmatrix}$$

$$\underbrace{y_1[k] + c_1 y_1[k-1]}_{y[k] \text{ yerine}} = -c_0 y_1[k-2] + a_{11} u_1[k-1] + a_{12} u_2[k-1] + b_{11} u_1[k-2] + b_{12} u_2[k-2] \quad (3.2)$$

$$\phi[k-1] = \begin{bmatrix} y_1[k-2] \\ u_1[k-1] \\ u_2[k-1] \\ u_1[k-2] \\ u_2[k-2] \end{bmatrix} \quad \theta = \begin{bmatrix} -c_0 \\ a_{11} \\ a_{12} \\ b_{11} \\ b_{12} \end{bmatrix}$$

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{a\phi(k-1)}{c + \phi(k-1)^T \phi(k-1)} (y(k) - \phi(k-1)^T \hat{\theta}(k-1)) \quad (3.3)$$

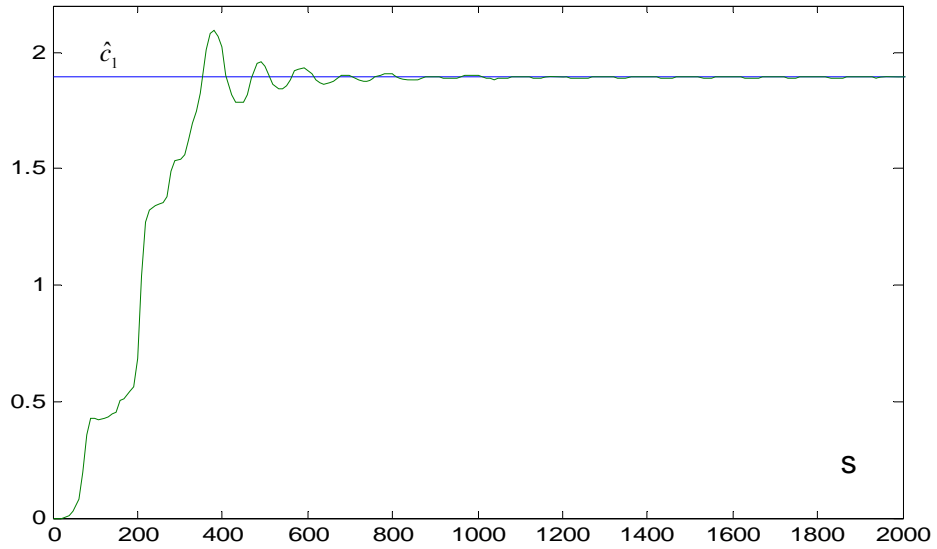
Aşağıda Şekil 3.11’de parametre tahmini için oluşturulmuş model bulunmaktadır.



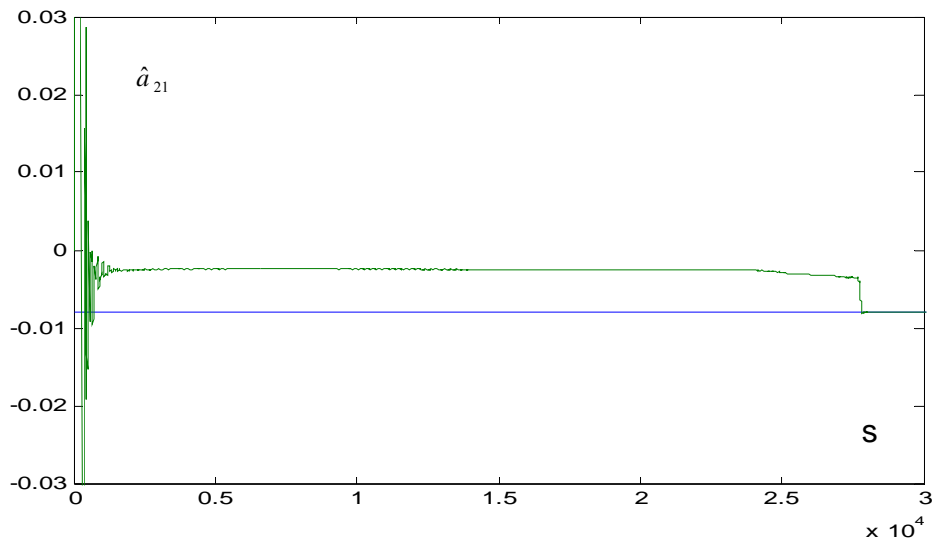
Şekil 3.11. Parametre tahmini modeli blok diyagramı

Yukarıda da bahsedildiği gibi model oluşturulduktan sonra her iki tahmin edicinin a_{y1} , a_{y2} , c_{y1} ve c_{y2} katsayıları denemeler yapılarak $a_{y1}=0.72$, $a_{y2}=0.725$, $c_{y1}=0.15$, $c_{y2}=0.15$ olarak seçilmiş ve yakınsamalar elde edilmiştir.

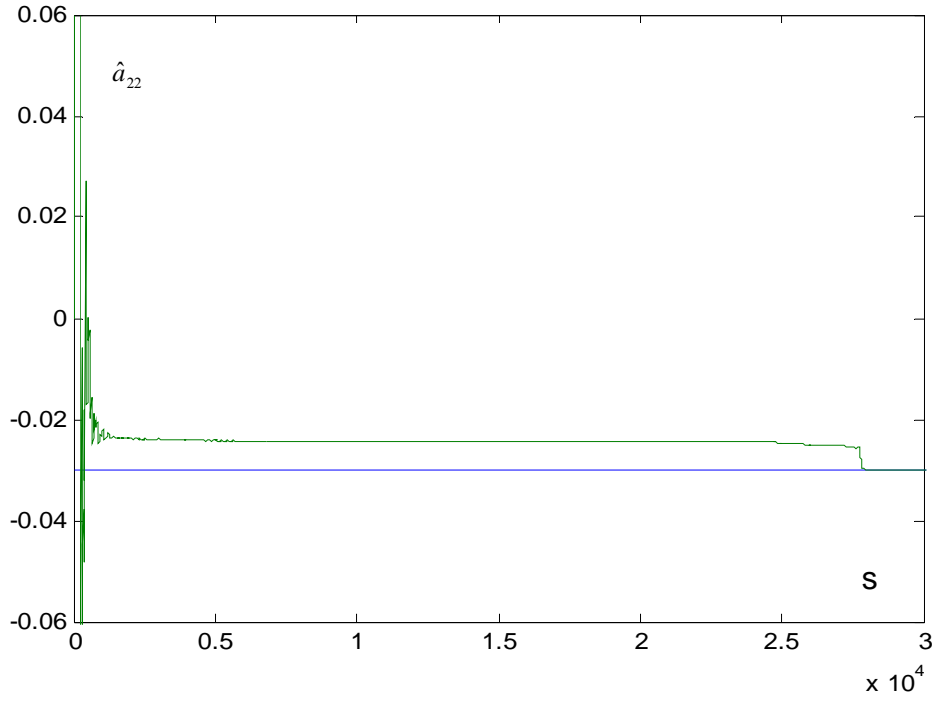
Aşağıdaki simülasyon sonuçları bulunmaktadır. Tahminler gerçek değerlerle karşılaştırmalı olarak verilmiştir.



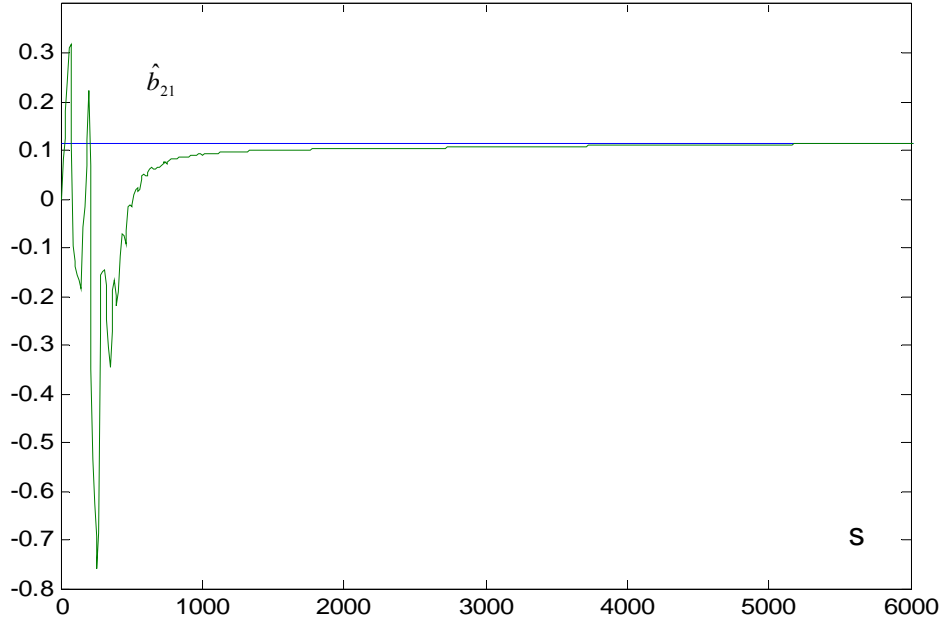
Şekil 3.13.a. y_2 'den tahmin edici sonuçları, \hat{c}_1



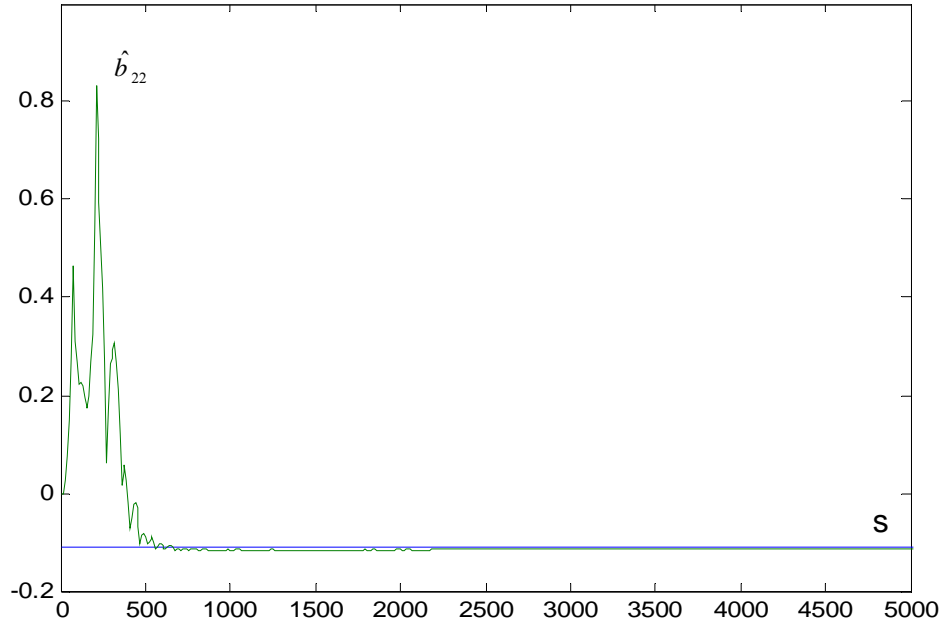
Şekil 3.13.b. y_2 'den tahmin edici sonuçları, \hat{a}_{21}



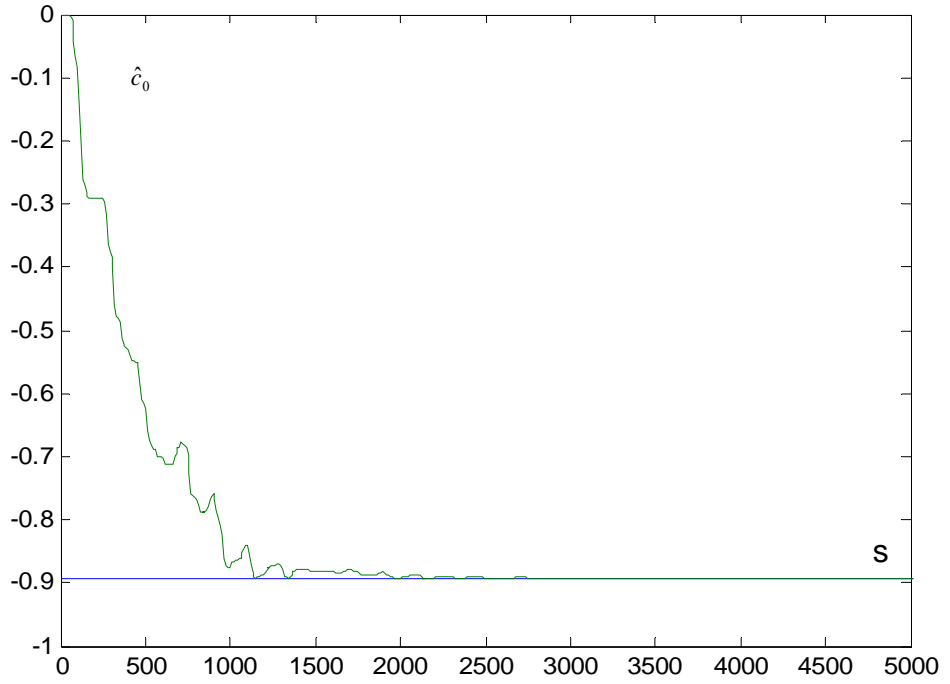
Şekil 3.14.a. y_2 'den tahmin edici sonuçları, \hat{a}_{22}



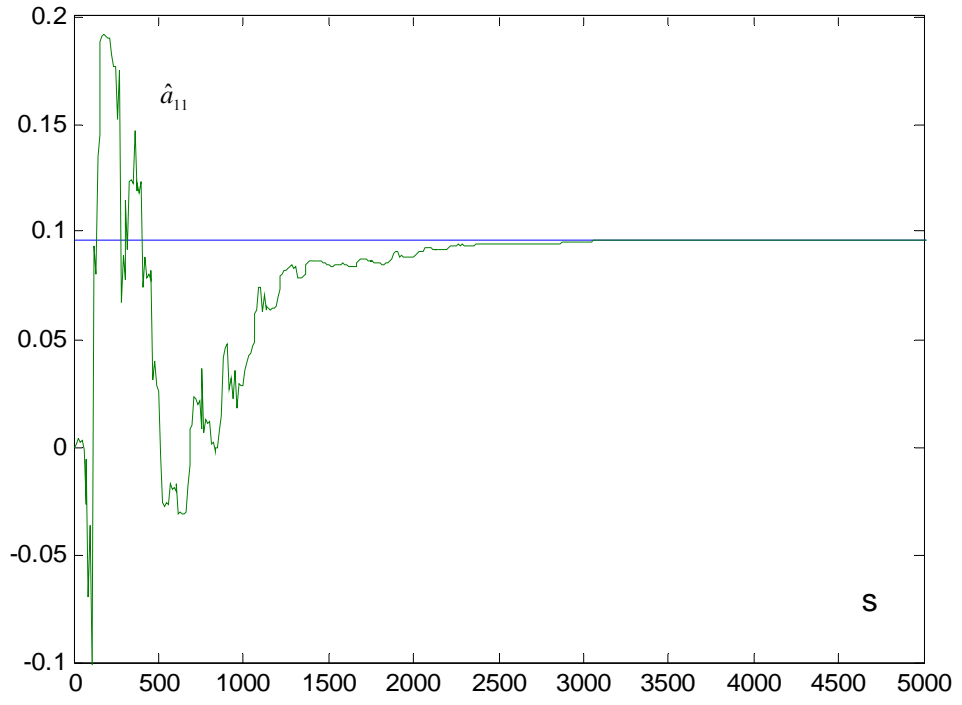
Şekil 3.14.b. y_2 'den tahmin edici sonuçları, \hat{b}_{21}



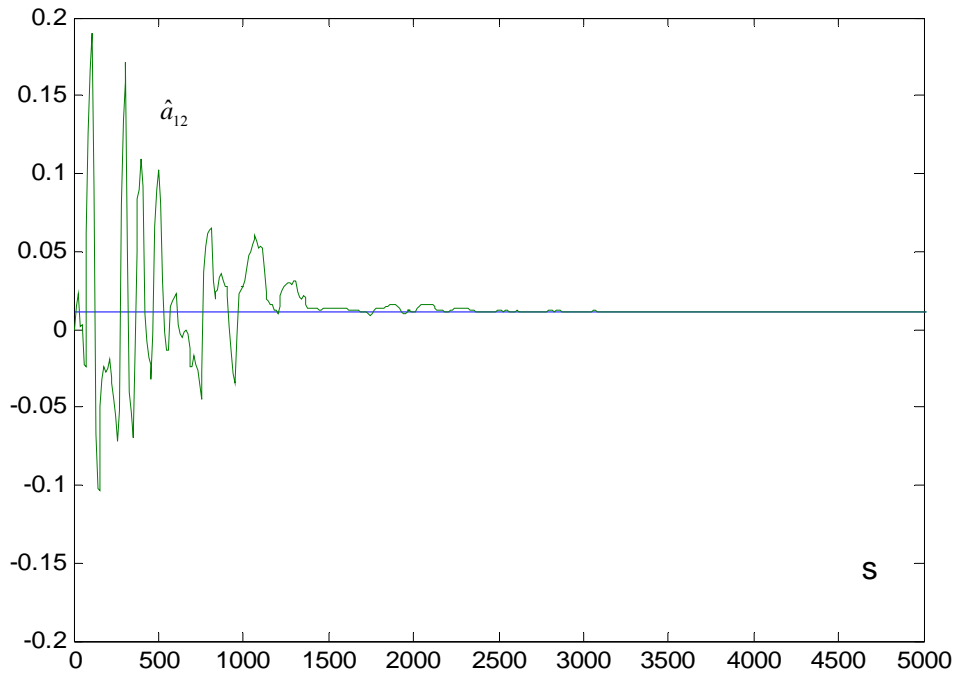
Şekil 3.15. y_2 'den tahmin edici sonuçları, \hat{b}_{22}



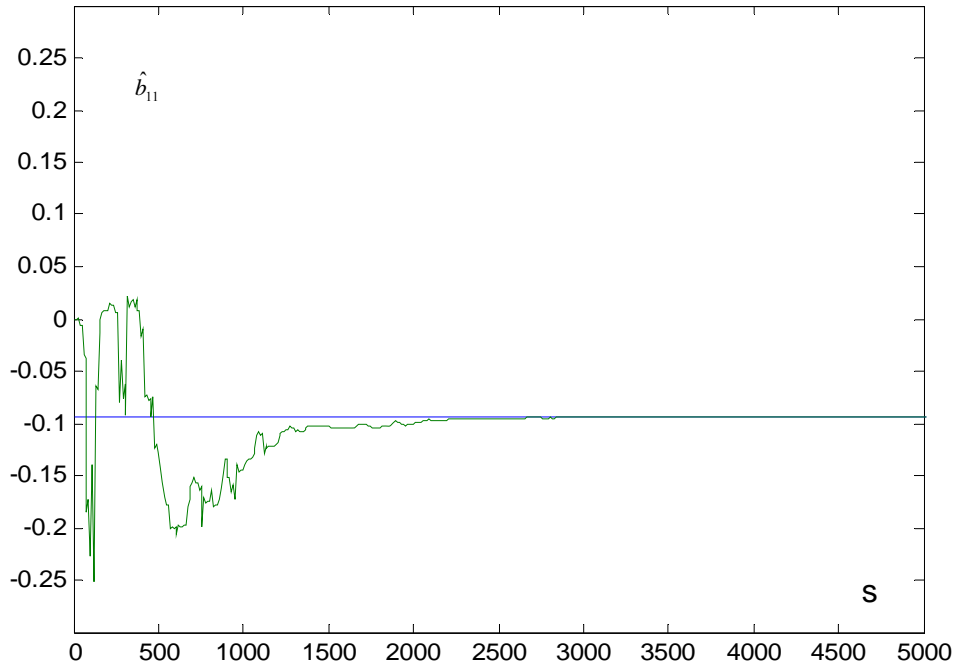
Şekil 3.16. y_1 'den tahmin edici sonuçları, \hat{c}_0



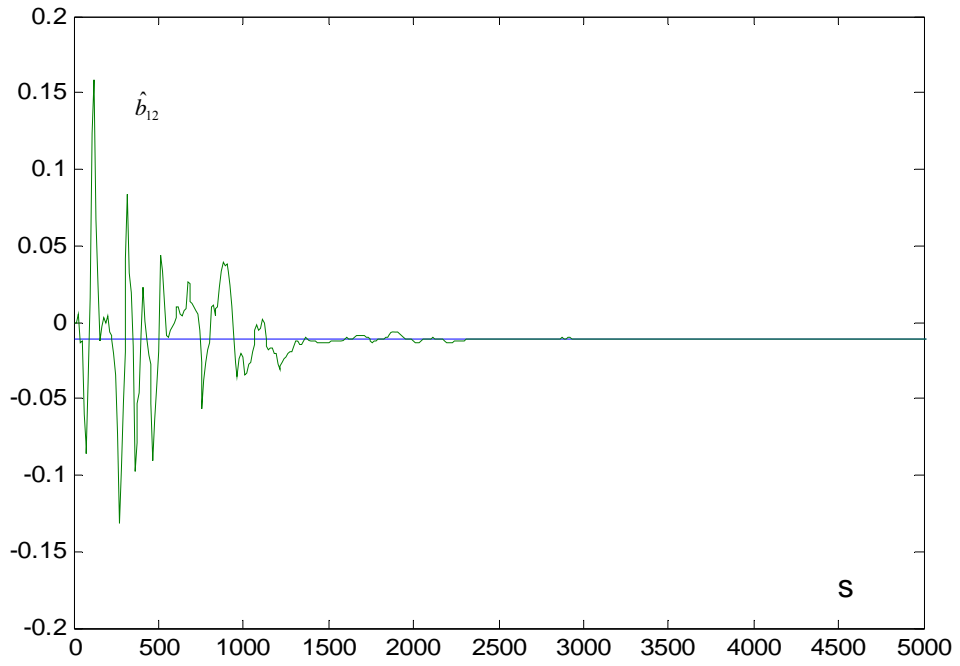
Şekil 3.17.a. y1'den tahmin edici sonuçları, \hat{a}_{11}



Şekil 3.17.b. y1'den tahmin edici sonuçları, \hat{a}_{12}



Şekil 3.18.a. y_1 'den tahmin edici sonuçları, \hat{b}_{11}



Şekil 3.18.b. y_1 'den tahmin edici sonuçları, \hat{b}_{12}

Grafiklerden de görüldüğü gibi kısa süreli geçiş zamanından sonra istenilen yakınsamalar elde edilmiştir.

Bu bölümde kazanda kullanılan tüm parametreler özel test şartlarında tahmin edilmiştir. Gürültülü ölçümler kullanıldığında ise bu kadar sayıda parametre tahmin etmek pek mümkün olamamaktadır. Her bir gürültülü ölçümden ancak birer parametre tahmin edilebilmiştir. Bir sonraki konuda, bu şekilde tahmin edilen birer parametrenin ayırıcı sistem içinde gerçek değerlerin yerine kullanılmasıyla elde edilen adaptif denetim incelenecektir. 2 parametrenin tahmin edildiği adaptif denetimli sistem, hem klasik PI, hem de bulanık PI yöntemleriyle gerçekleştirilerek simülasyon sonuçları karşılaştırılacaktır.

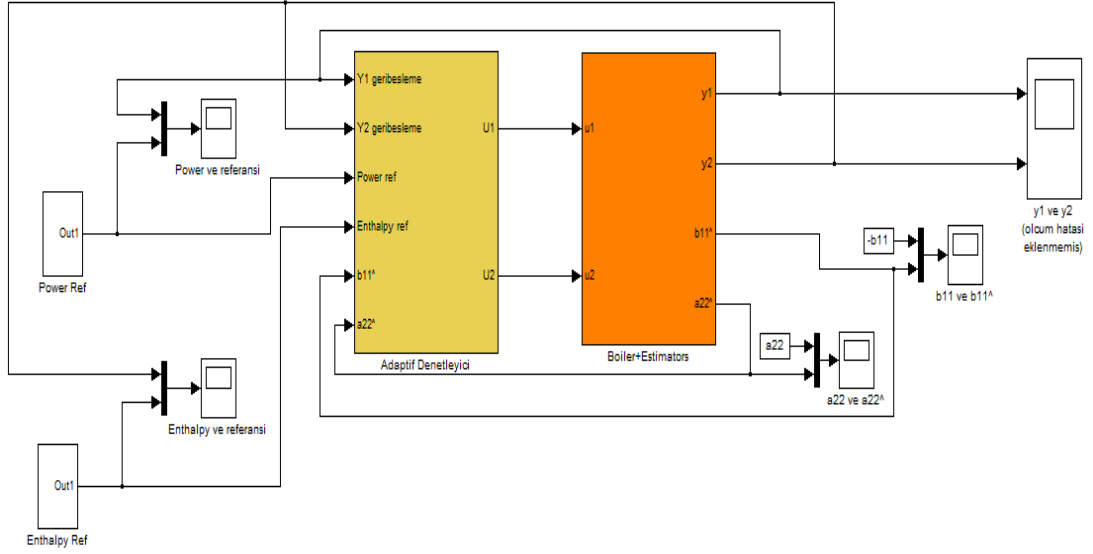
3.4. Adaptif Denetim

3.4.1 Gürültüsüz Şartlarda Adaptif Denetim

Kazanın bütün parametrelerinin tahmin sistemini önceki kısımda incelemiştik. Adaptif denetimde tahmin edilecek parametre sayısı ise gürültüden dolayı 2 olarak kalmıştır. Kazan zaman içerisinde kirlenir ve parametreler aynı kalmaz. Bu çalışmada bu konuyu dikkate alarak koşulların değişmesinden dolayı adaptif denetim sistemi gerçekleştirilmiştir. Burada tahmin edilen değerler denetleyici ve ayırıcıda kullanılmaktadır. Kısım 3.3'te bu yöntem kullanılmamıştı. Uygulamada adaptif denetim sistemi limitli PI ve limitli Bulanık mantık PI kontrolörler için oluşturulacak ve her iki kontrolör için simülasyon sonuçları karşılaştırılacaktır.

Adaptasyon sisteminde her iki kontrolör için kullanılacak olan kazançlar K_i ve K_p değerleri yeniden belirlenmiştir.

Şekil 3.19'da adaptif sistem için oluşturulmuş olan modelin blok diyagramı bulunmaktadır. Görüldüğü gibi parametrelerden a_{22} ve b_{11} değerleri tahmin edilmiş ve denetleyicide kullanılmıştır.



Şekil 3.19. Adaptif sistem modeli blok diyagramı

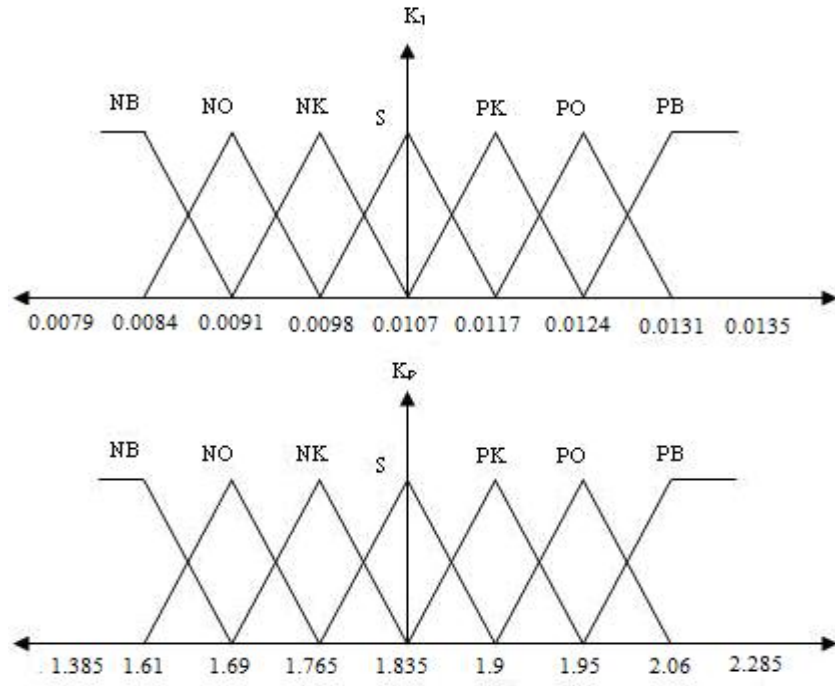
Adaptif sistem için limitli klasik PI’da kullanılan kazanç değerleri her bir model için bulunan optimum parametreler aşağıda gösterilmiştir;

$$\text{Güç kontrolörü} \quad K_P^P = 1.123 \quad K_I^P = 0.0099 \quad (3.4)$$

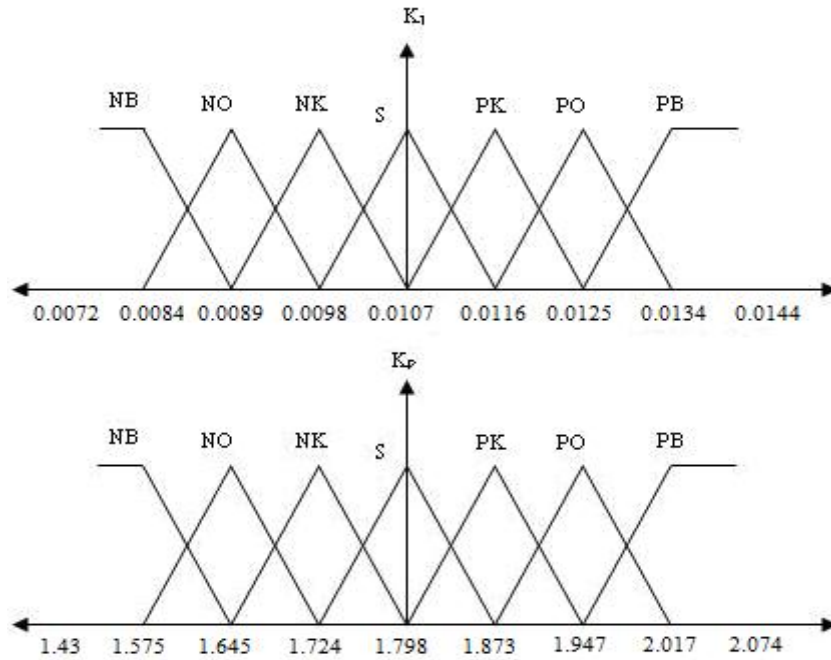
$$\text{Entalpi kontrolörü} \quad K_P^E = 0.65 \quad K_I^E = 0.008 \quad (3.5)$$

Adaptif sistem için limitli bulanık PI’da da kazanç değerleri yeniden oluşturulmuştur. Sistemde gürültü ve limit etkisiyle birlikte parametre tahmini de yapıldığı için optimum kazanç değerlerinin yeniden bulunması gerekmiştir.

Adaptif sistem için bulanık mantık PI’da kullanılan üyelik kümeleri sınırları, her bir kontrolör ve her bir kazanç için Şekil 3.20’de gösterilmiştir;

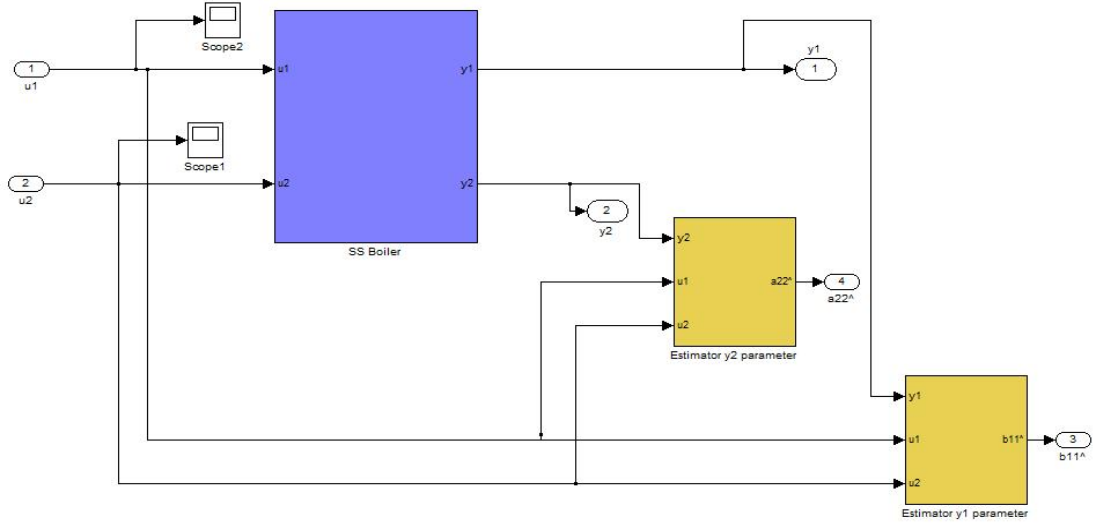


Şekil 3.20.a. Kazanç değişkenlerinin aralıkları, Güç kazançları üyelik kümeleri



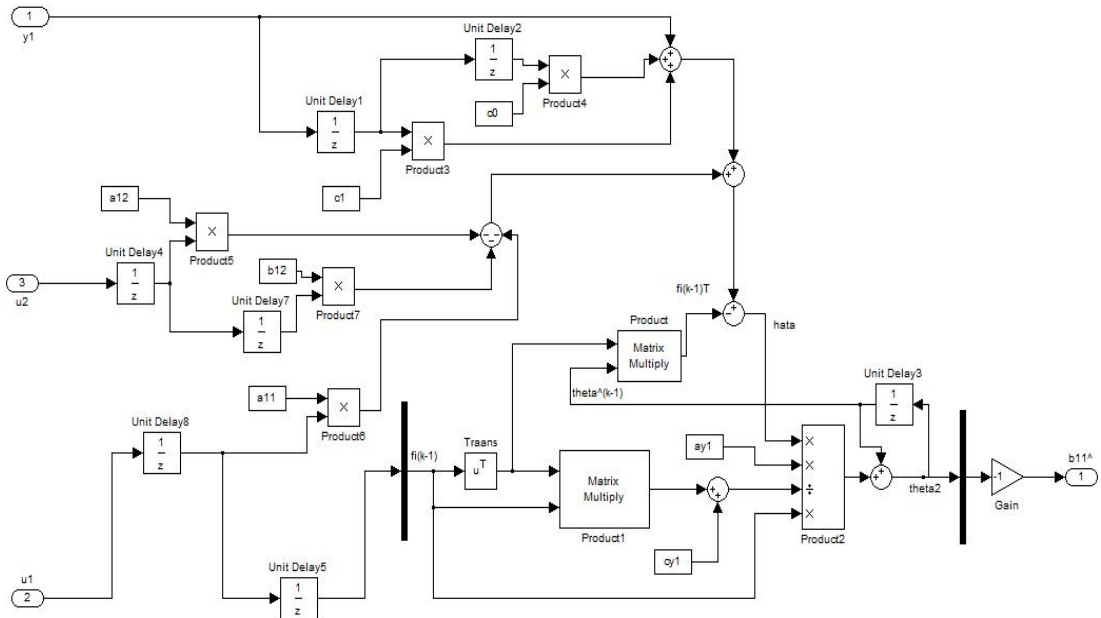
Şekil 3.20.b. Kazanç değişkenlerinin aralıkları, Entalpi kazançları üyelik kümeleri

Adaptif denetimde kullanılacak 2 parametre tahmini için Şekil 3.21’de bulunan blok diyagramlar kullanılmıştır.

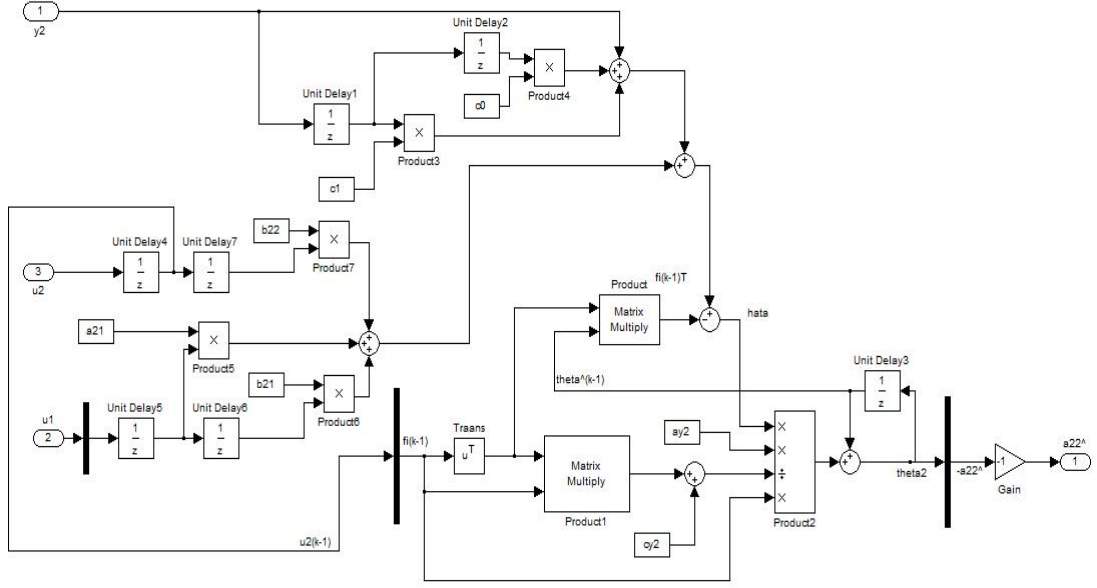


Şekil 3.21. Adaptif denetleyici içi blok diyagramı

Model içerisinde kullanılan tahmin edici sistemlerinin blok diyagramları da Şekil 3.22 ve Şekil 3.23’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22. Tahmin edicilerin blok iç diyagramları, estimator y_1 ’den tahmin edici



Şekil 3.23. Tahmin edicilerin blok iç diyagramları, estimator y_2 'den tahmin edici

Eşitlik (3.6) ve Eşitlik (3.7)'de tahmin edici sistemde kullanılan algoritma görülmektedir.

$$\underbrace{y_2[k] + c_1 y_2[k-1] + c_0 y_2[k-2] + a_{21} u_1[k-1] + b_{21} u_1[k-2] + b_{22} u_2[k-2]}_{y[k] \text{ yerine}} = -a_{22} u_2[k-1] \quad (3.6)$$

$$\phi[k-1] = u_2[k-1] \quad \theta = -a_{22}$$

$$\underbrace{y_1[k] + c_1 y_1[k-1] - c_0 y_1[k-2] - a_{11} u_1[k-1] - a_{12} u_2[k-1] - b_{12} u_2[k-2]}_{y[k] \text{ yerine}} = b_{11} u_1[k-2] \quad (3.7)$$

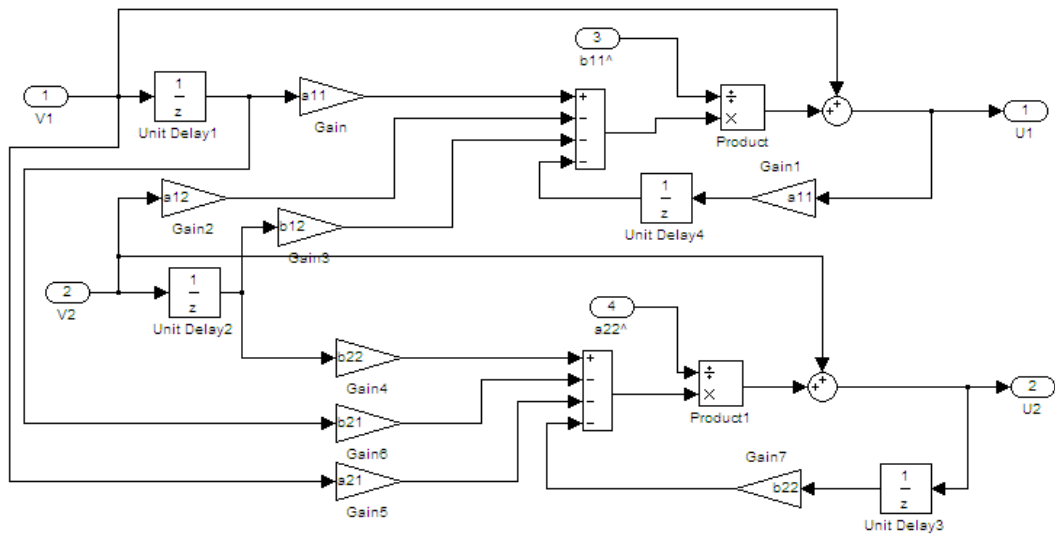
$$\phi[k-1] = u_1[k-2] \quad \theta = b_{11}$$

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + \frac{a\phi(t-1)}{c + \phi(t-1)^T \phi(t-1)} (y(t) - \phi(t-1)^T \hat{\theta}(t-1)) \quad (3.8)$$

Modelde kullanılan a_{y1} , a_{y2} , c_{y1} ve c_{y2} parametreleri ile istenilen parametre yakınsamaları elde edilmiştir. Tahmin edilen parametre değerlerini kullanan ayırıcı ile simülasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.24’da oluşturulan ayırıcı için blok diyagram gösterilmektedir. Adaptif sistemde ayırıcı için aşağıdaki fark denklemleri kullanılmıştır.

$$u_1[k] = v_1[k] + (a_{11} * v_1[k-1] - a_{12} * v_2[k] - b_{12} * v_2[k-1] - a_{11} * u_1[k-1]) / \hat{b}_{11} \quad (3.9)$$

$$u_2[k] = v_2[k] + (b_{22} * v_2[k-1] - a_{21} * v_1[k] - b_{21} * v_1[k-1] - b_{22} * u_2[k-1]) / \hat{a}_{22} \quad (3.10)$$



Şekil 3.24. Adaptif sistem için ayırıcı

Her iki kontrol sistemi için de yapılan çalışmalarda;

Referans sinyalleri :

Güç için ; 10. s’de 0 MW’tan 400 MW’a çıkmış, 1000. s’de 400 MW’tan 600 MW’a çıkmış, 5000. s’de 600 MW’tan 500 MW’a inmiş, 15000. s’de 500MW’tan 400 MW’a inmiş ve 30000. s’de 400 MW’tan 600 MW’a çıkmıştır.

Entalpi için ; 10. s’de 0 kJ/kg’dan 2000 kJ/kg’a çıkmış, 1000. s’de 2000 kJ/kg’dan

2500 kJ/kg'a çıkmış, 3000. s'de 2500 kJ/kg'dan 3000 kJ/kg'a çıkmış, 15000. s'de 3000 kJ/kg'dan 2500 kJ/kg'a inmiş ve 30000. s'de 2500 kJ/kg'dan 3000 kJ/kg'a çıkmıştır.

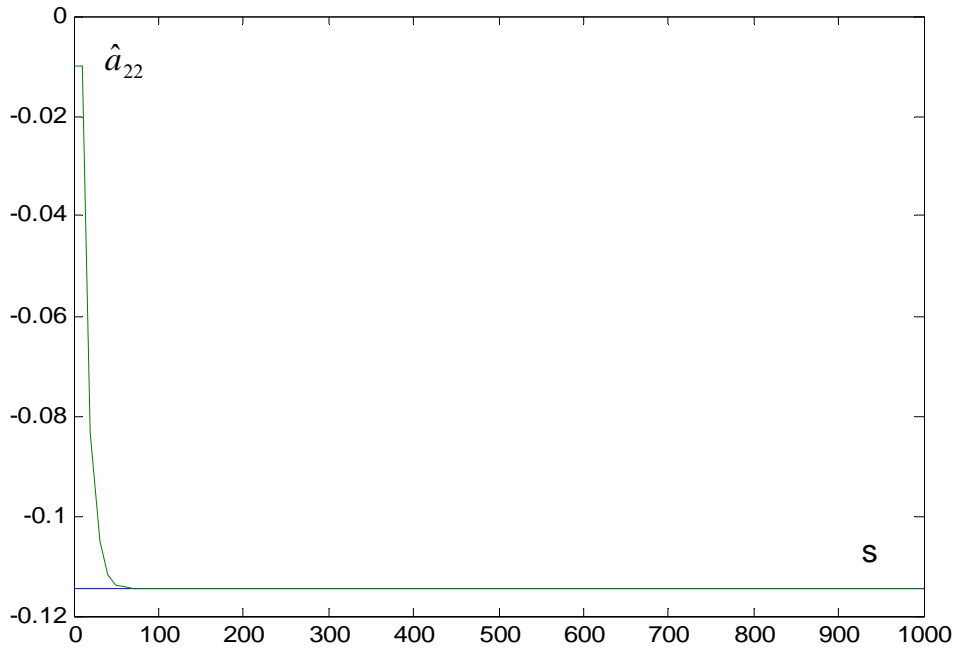
Limit Değerleri:

Yakıt tam yükte giriş değeri 600 MW olduğu için üst limit değeri 690 MW,

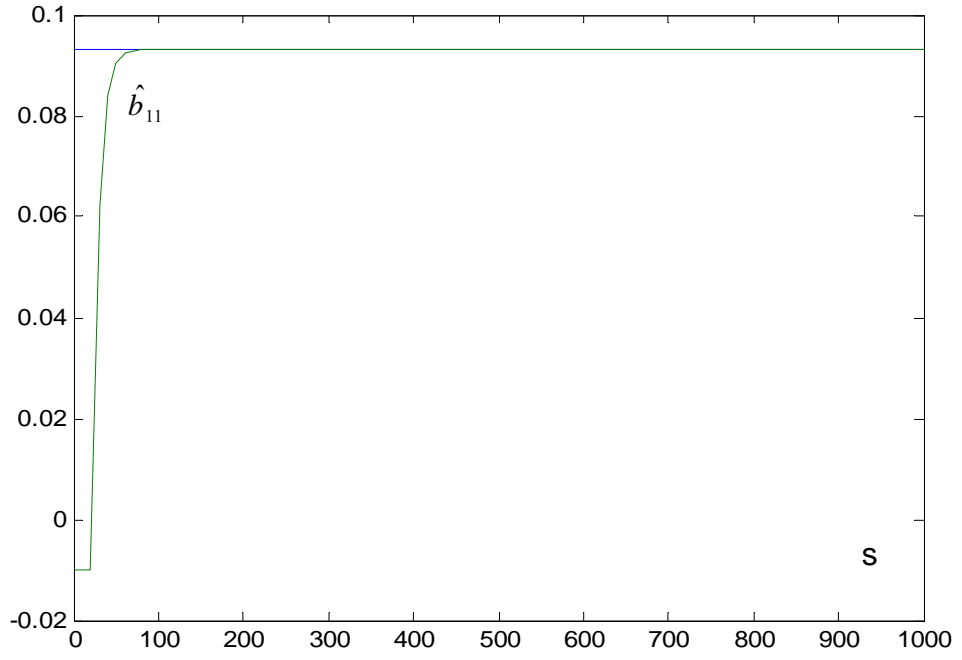
Su tam yükte giriş değeri 3000 kJ/kg olduğu için üst limit değeri 3450 kJ/kg.

Alt limit değerleri ise hem yakıt hem su için sıfır alınmıştır.

Her iki kontrol sistemi için yakıt ve su girişine karşılık, güç ve entalpi çıkışlarının simülasyon sonuçlarından önce, Şekil 3.25 ve Şekil 3.26'da \hat{a}_{22} ve \hat{b}_{11} parametrelerinin yakınsama grafikleri verilmiştir. Burada $a_{y1}=0.7$, $a_{y2}=0.7$, $c_{y1}=0.01$, $c_{y2}=0.01$ alınmıştır.

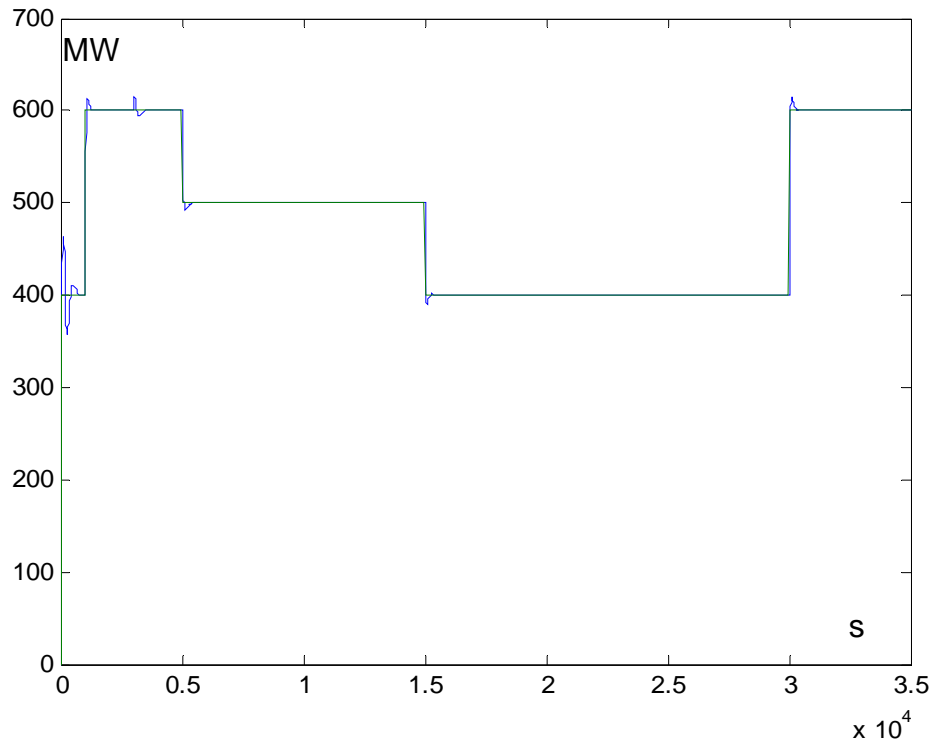


Şekil 3.25. Bulanık mantık PI modelleri için, \hat{a}_{22} parametre yakınsaması

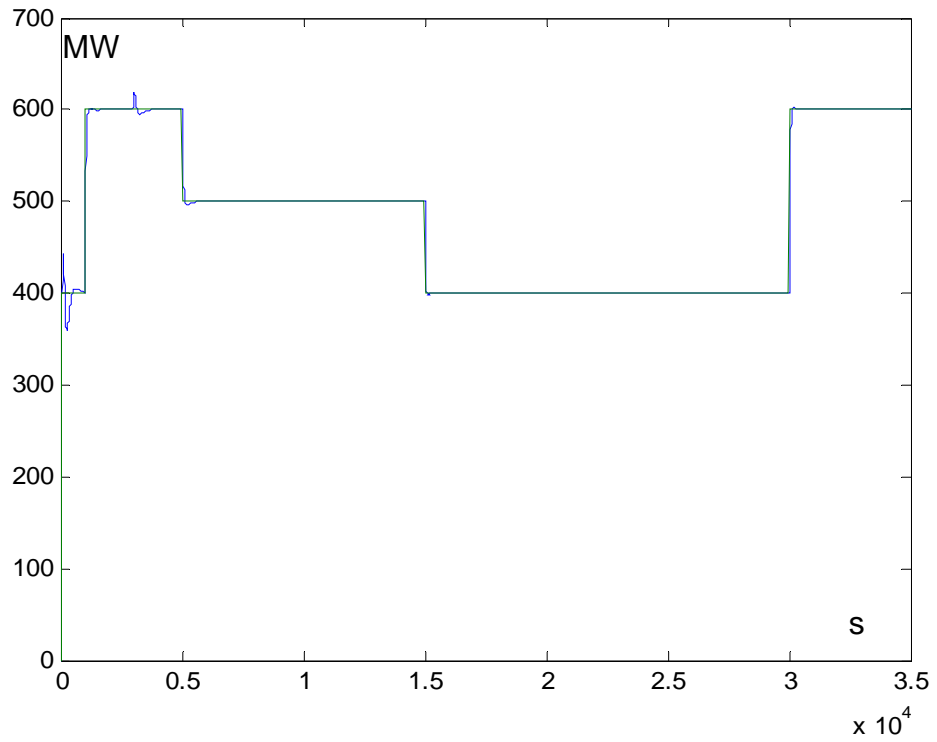


Şekil 3.26. Bulanık mantık PI modelleri için, \hat{b}_{11} parametre yakınsaması

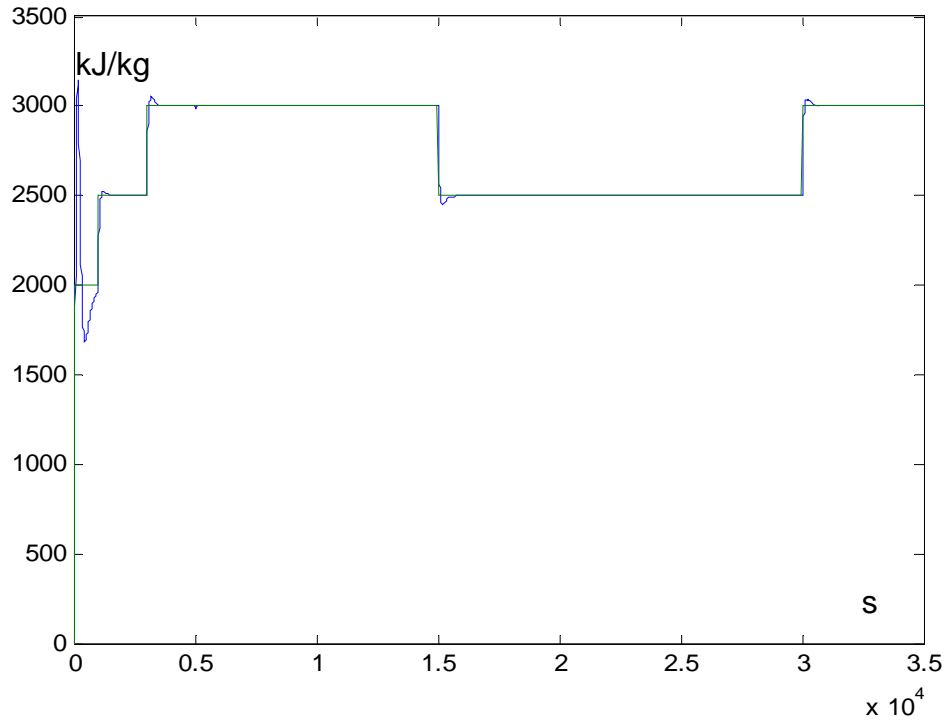
Adaptif denetimde %1'lik band için \hat{a}_{22} parametresi 110. s'de yakınsarken, \hat{b}_{11} parametresi 160. s'de yakınsamıştır. Parametre tahminleri, denetimin klasik PI ile yapıldığı durumda da hemen hemen aynı olduğu için ayrıca gösterilmemiştir. Şekil 3.27 ve Şekil 3.28'de ise her iki kontrol sistemi için güç ve entalpi çıkışları gösterilmiştir.



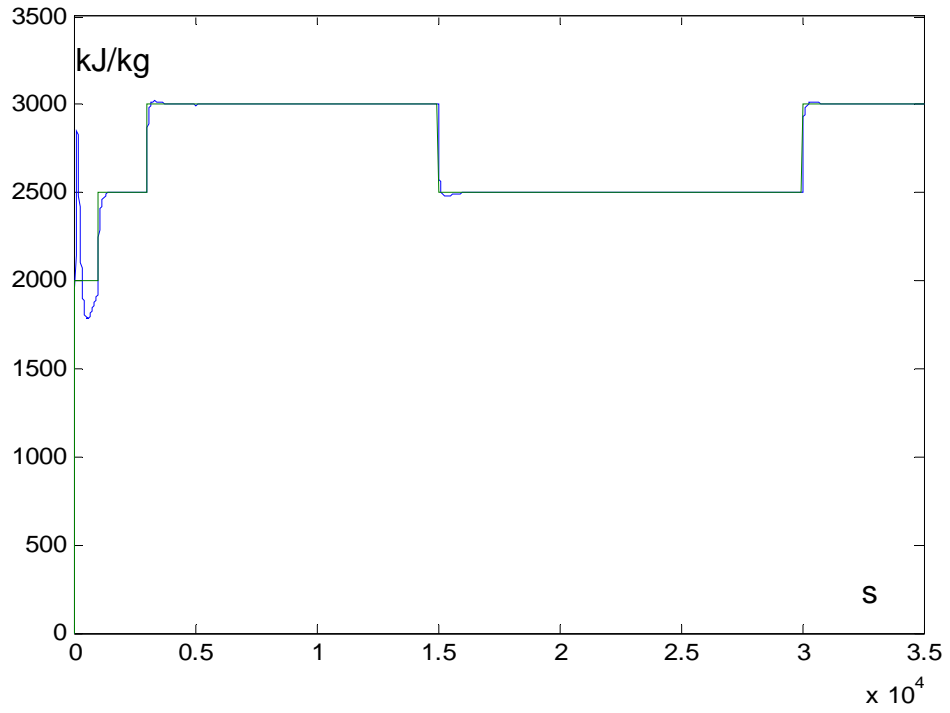
Şekil 3.27.a. Limitli adaptif sistem modeli için güç çıkışları, PI kontrolör



Şekil 3.27.b. Limitli adaptif sistem modeli için güç çıkışları, bulanık mantık PI kontrolör



Şekil 3.28.a. Limitli adaptif sistem modeli için entalpi çıkışları, PI kontrolör



Şekil 3.28.b. Limitli adaptif sistem modeli için entalpi çıkışları, bulanık mantık PI kontrolör

Çizelge 3.2. Limitli adaptif model için güç ve entalpi sonuçları

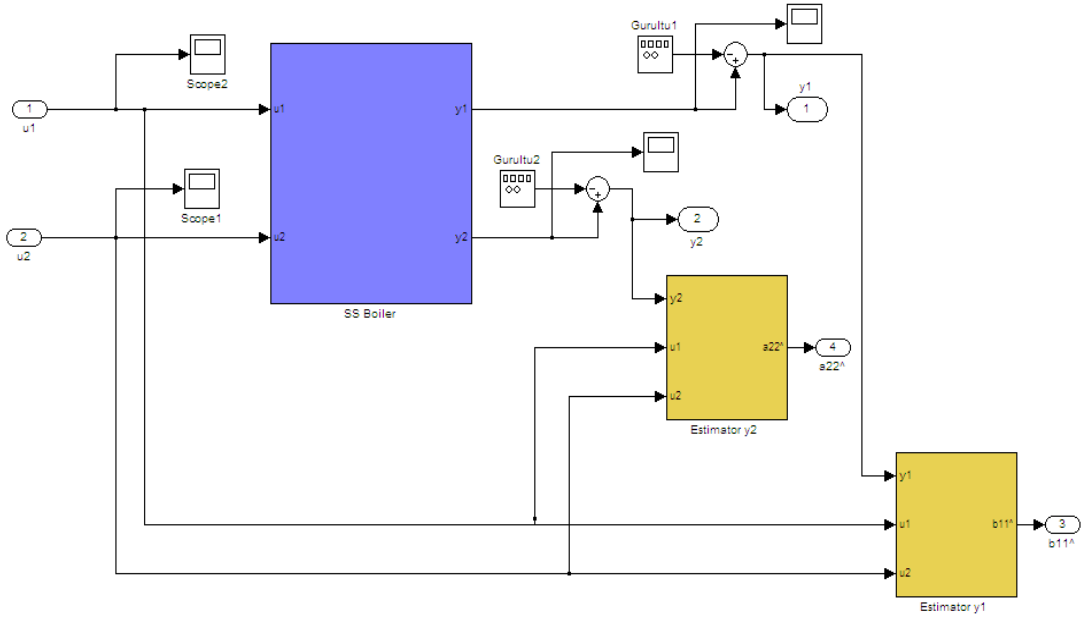
GÜÇ		
600-500 MW	Limitli FPI	Limitli PI
Oturma Zamanı (s)	150	250
Max. Aşma (%)	0,83	1,48
500-400 MW		
Oturma Zamanı (s)	100	170
Max. Aşma (%)	0,4	2,46
400-600 MW		
Oturma Zamanı (s)	160	220
Max. Aşma (%)	0,34	2,37
ENTALPİ		
2500-3000 kJ/kg	Limitli FPI	Limitli PI
Oturma Zamanı (s)	190	360
Max. Aşma (%)	0,64	1,7
2000-2500 kJ/kg		
Oturma Zamanı (s)	190	370
Max. Aşma (%)	0,75	1,84
2500-3000 kJ/kg		
Oturma Zamanı (s)	210	320
Max. Aşma (%)	0,52	1,34
Not: Oturma zamanı %1 hata payı alınarak ölçülmüştür.		

Her iki adaptif kontrolörle de istenilen sonuçlar elde edilmiştir. Çizelge 3.2’de karşılaştırma tabloları mevcuttur.

Limitli bulanık mantık PI kontrolörün, limitli PI kontrolöre göre oturma zamanları daha kısa ve maksimum aşma miktarlarının daha küçük olduğu görülmektedir.

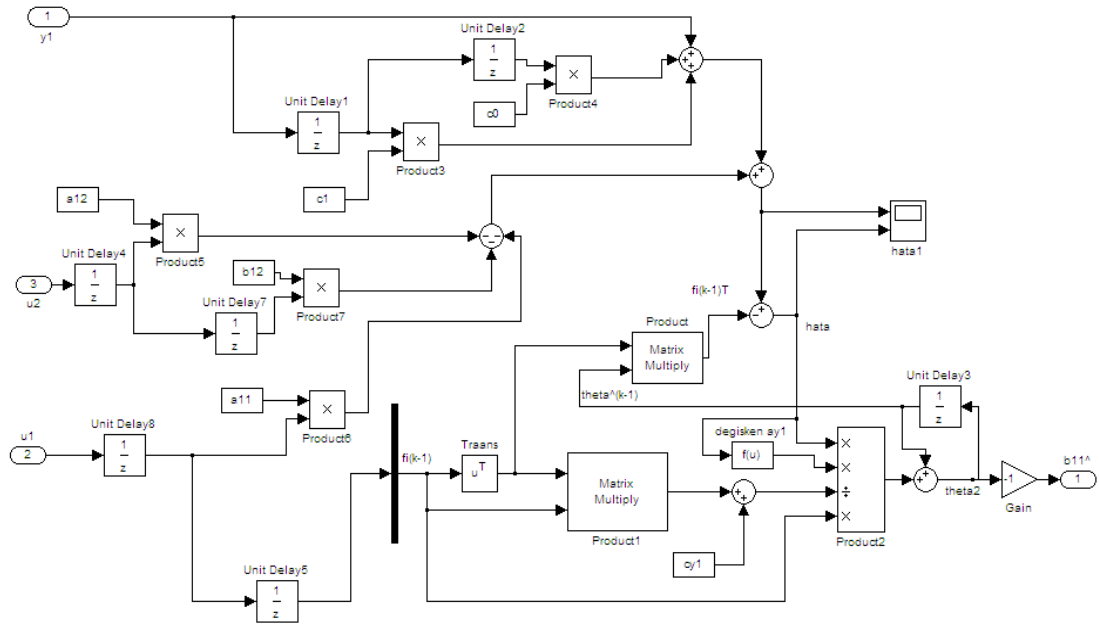
3.4.2 Gürültülü Şartlarda Adaptif Denetim

Bu bölümde normal işletme şartlarında ideal çalışma kolay olmayacağı için ve sistemin bozucu etki içermesi kaçınılmaz olduğundan, girişlerin limitlenmesinden başka, ölçüm gürültüsü katılarak adaptif denetim incelenecektir. Şekil 3.29'da adaptif denetim sistemi için bozucu etkili blok diyagram bulunmaktadır.

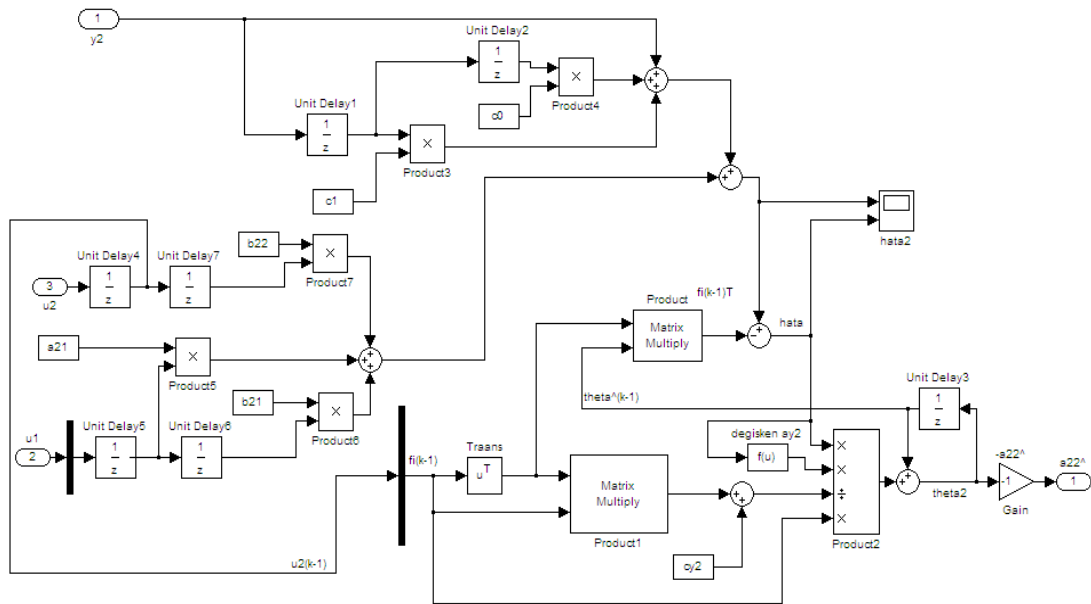


Şekil 3.29. Gürültülü adaptif sistem için parametre tahminli model
(Boiler+Estimator) için blok diyagramı

Her iki tahmin edici için açık blok diyagramları Şekil 3.30'da görülmektedir. Gürültüden en az etkilenecek en iyi yakınsamanın bulunabilmesi için a_{y1} , a_{y2} , c_{y1} ve c_{y2} değerleri deneme-yanılma yöntemiyle elde edilmiştir. Ayrıca hata büyüklüğüne göre tahmin edici sistemde kademeli a_{y1} ve a_{y2} değerleri uygulanmıştır ("f(u)" blokları içinde).



Şekil 3.30.a. Tahmin edicilerin iç blok diyagramları, y_1 'den tahmin edici



Şekil 3.30.b. Tahmin edicilerin iç blok diyagramları, y_2 'den tahmin edici

Referans sinyalleri :

Güç için ; 10. s'de 0 MW'tan 400 MW'a çıkmış, 1000. s'de 400 MW'tan 600 MW'a çıkmış, 5000. s'de 600MW'tan 500 MW'a inmiş, 15000. s'de 500 MW'tan 400 MW'a inmiş ve 30000. s'de 400MW'tan 600 MW'a çıkmıştır.

Entalpi için ; 10. s'de 0 kJ/kg'dan 2000 kJ/kg'a çıkmış, 1000. s'de 2000 kJ/kg'dan 2500 kJ/kg'a çıkmış, 3000. s'de 2500 kJ/kg'dan 3000 kJ/kg'a çıkmış, 15000. s'de 3000 kJ/kg'dan 2500 kJ/kg'a inmiş ve 30000. s'de 2500kJ/kg'dan 3000 kJ/kg'a çıkmıştır.

Limit Değerleri:

Yakıt tam yükte giriş değeri 600 MW olduğu için üst limit değeri 690 MW,

Su tam yükte giriş değeri 3000 kJ/kg olduğu için üst limit değeri 3450 kJ/kg.

Alt limit değerleri ise hem yakıt hem su için sıfır alınmıştır.

$a_{y1}^{\max}=0.7$, $a_{y2}^{\max}=0.7$, $c_{y1}=0.01$, $c_{y2}=0.01$ değerleri kullanılmıştır.

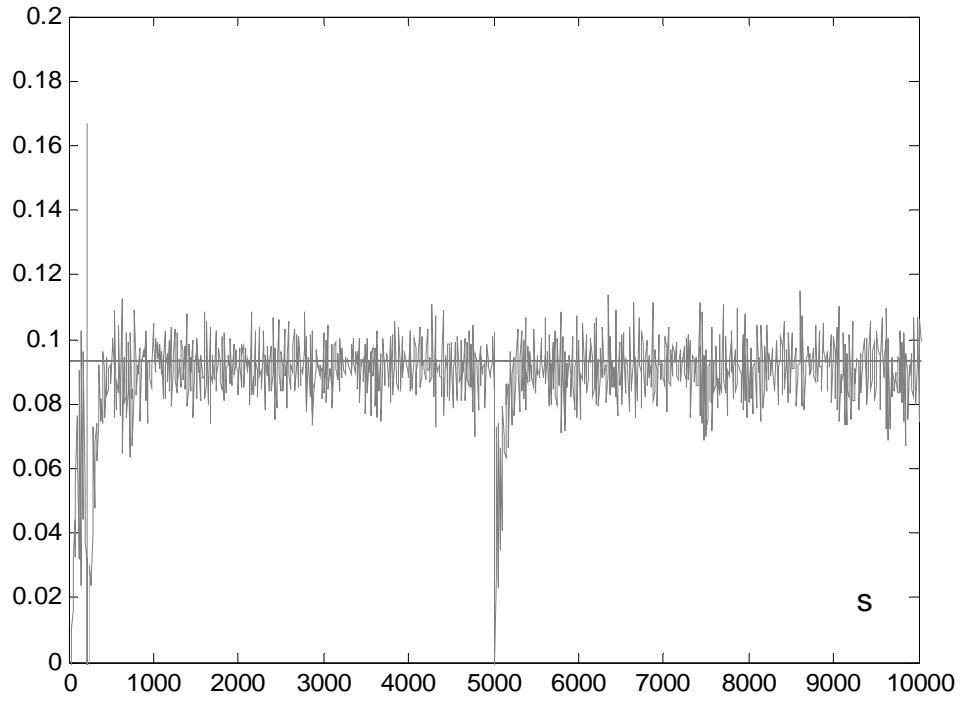
a_{y2} için kademeli değer şöyle uygulanmıştır:

$$a_{y2} = \begin{cases} 0.2a_{y2}^{\max} & |e_2| < 80 \text{ ise} \\ 0.4a_{y2}^{\max} & 80 \leq |e_2| < 100 \text{ ise} \\ 0.6a_{y2}^{\max} & 100 \leq |e_2| < 120 \text{ ise} \\ 0.8a_{y2}^{\max} & |e_2| \geq 120 \text{ ise} \end{cases}$$

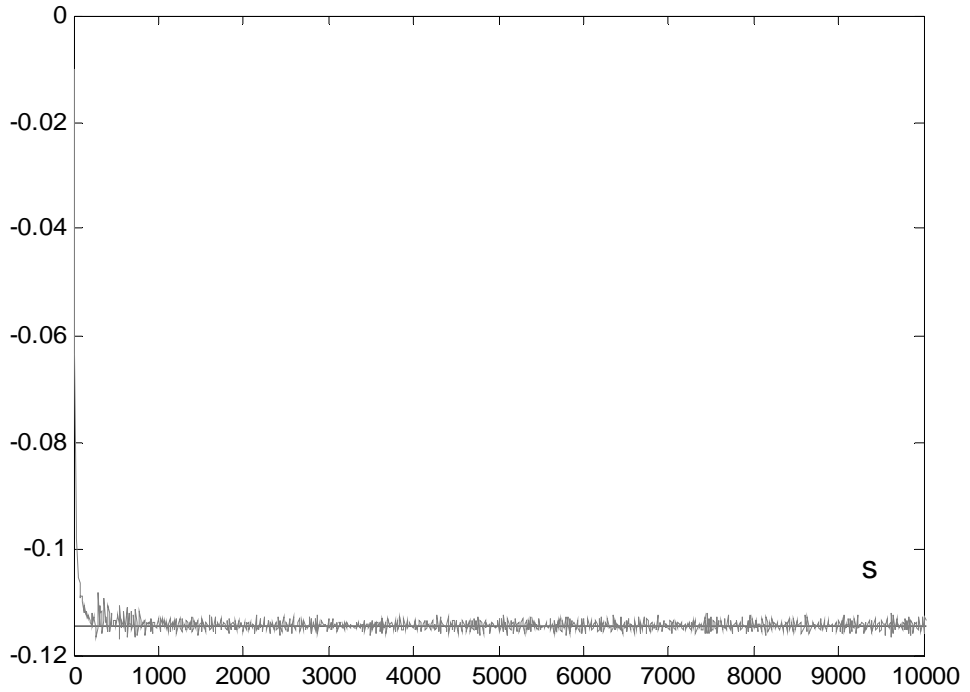
a_{y1} için kademeli değer şöyle uygulanmıştır:

$$a_{y2} = \begin{cases} 0.2a_{y1}^{\max} & |e_1| < 90 \text{ ise} \\ 0.4a_{y1}^{\max} & 90 \leq |e_1| < 100 \text{ ise} \\ 0.6a_{y1}^{\max} & 100 \leq |e_1| < 120 \text{ ise} \\ 0.8a_{y1}^{\max} & |e_1| \geq 120 \text{ ise} \end{cases}$$

Her iki parametre tahmin kazançları (a_{y1} , a_{y2}) için kullanılan değerler, küçük hatalarda, yani tahminlerin yakınsadığı sırada, gürültünün etkisini azaltmak için düşürülmüştür. Şekil 3.31'de \hat{b}_{11} ve \hat{a}_{22} tahminlerinin yakınsaması gösterilmiştir.



Şekil 3.31.a. Bulanık mantık PI modeli için, \hat{b}_{11} yakınsaması



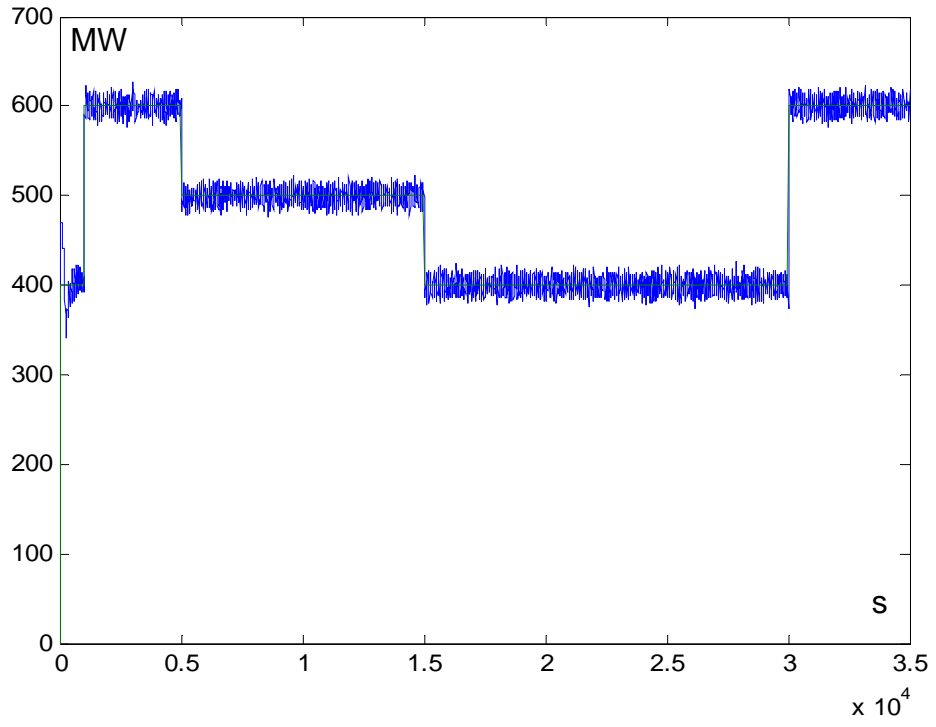
Şekil 3.31.b Bulanık mantık PI modeli için, \hat{a}_{22} yakınsaması

\hat{b}_{11} 'de ortalama mutlak hata 0,007 civarında olmuştur. Bu da %7.5'lik bir ortalama bozulmaya karşılık gelmektedir.

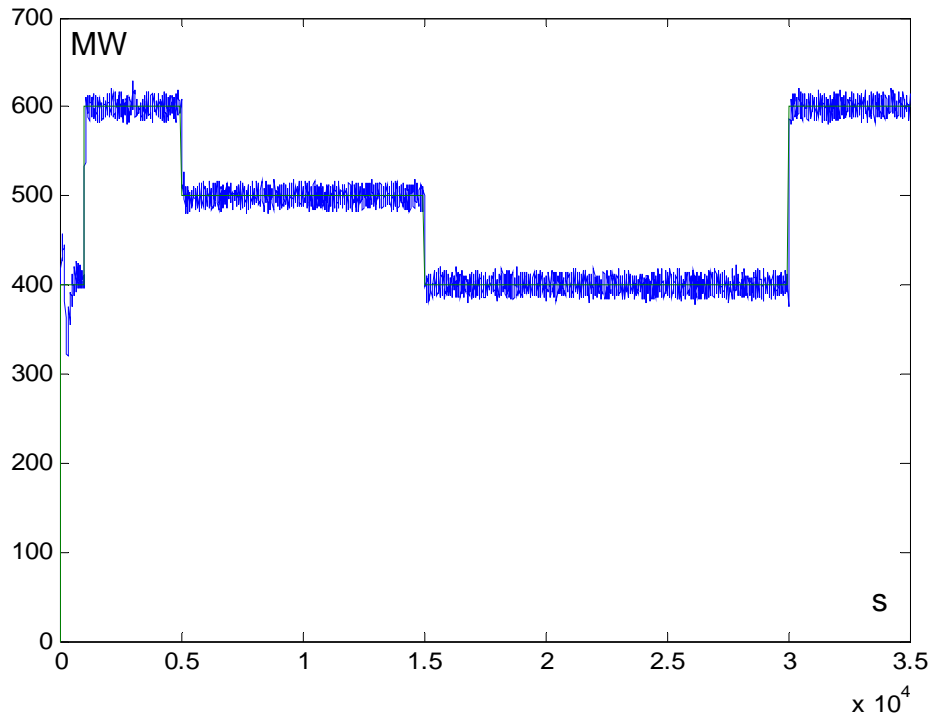
\hat{a}_{22} 'de ise ortalama mutlak hata 0,0016 civarında olmuştur. Bu da %1.4'lük bir ortalama bozulmaya karşılık gelmektedir.

Parametre tahminleri, denetimin klasik PI ile yapıldığı durumlarda da hemen hemen aynı olduğu için ayrıca gösterilmemiştir.

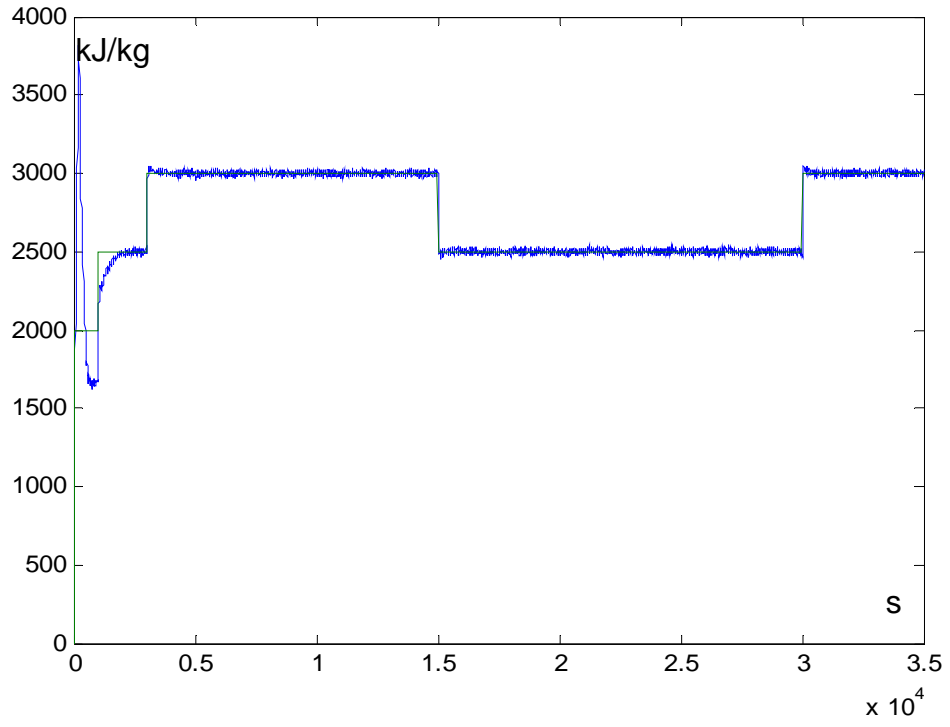
Şekil 3.32 ve Şekil 3.33'te gürültülü klasik PI ve bulanık mantık PI sistemi için karşılaştırmalı olarak güç ve entalpi çıkışları gösterilmiştir.



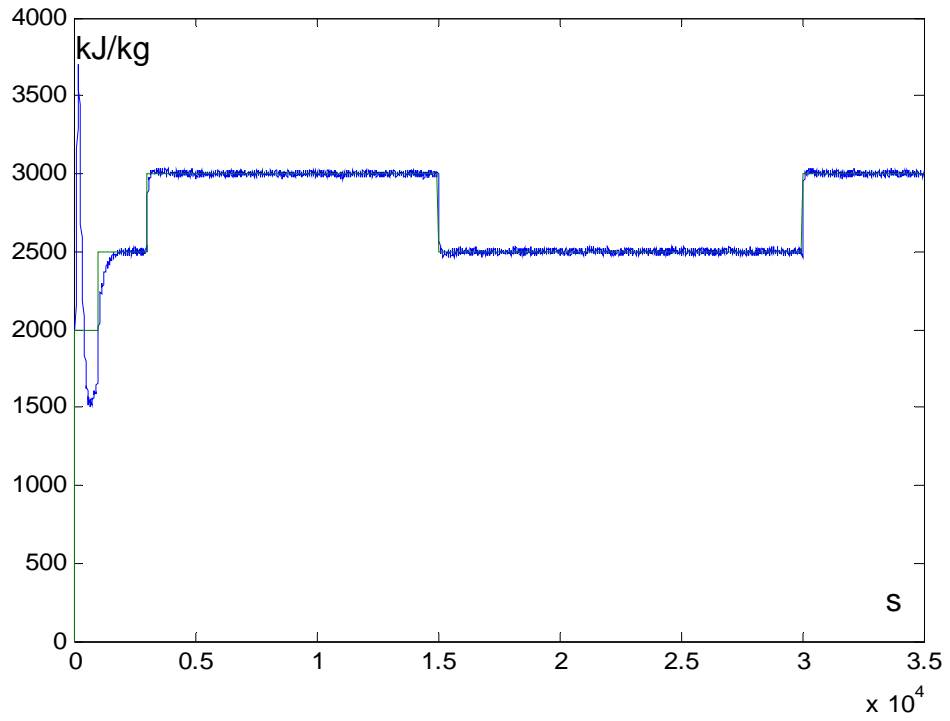
Şekil 3.32.a. Gürültülü ve limitli adaptif sistem modeli için güç çıkışları,
PI kontrolör



Şekil 3.32.b. Gürültülü ve limitli adaptif sistem modeli için güç çıkışları,
bulanık mantık PI kontrolör



Şekil 3.33.a. Gürültülü ve limitli adaptif sistem modeli için entalpi çıkışları, PI kontrolör



Şekil 3.33.b. Gürültülü ve limitli adaptif sistem modeli için entalpi çıkışları, bulanık mantık PI kontrolör

Çıkışlardaki bozulmalar ortalama mutlak hata olarak aşağıdaki gibi olmuştur:

Adaptif limitli ve gürültülü FPI için:

Güç ortalama: %1,25

Entalpi ortalama:%0.4

Adaptif limitli ve gürültülü PI için:

Güç ortalama: %2.5

Entalpi ortalama:%0.8

4. SONUÇ VE ÖNERİ

Günümüzde üretim ve tüketim dengesinin Avrupa Birliği kriterleriyle çok daha önemli olduğu, enerji kalitesinden söz edilen bir dönemdeyiz. Enerji üretim sistemlerinde kontrol sistemlerinin önemi hem daha kaliteli enerji hem de daha verimli santraller için kaçınılmazdır.

Bu tezde geliştirilmesi hedeflenen daha önce yapılmış olan çalışmalarda ki sistemler ideal olarak düşünülmüştü. (20, 21) Daha önce de bahsedildiği gibi sistemde her zaman bir bozucu mevcuttur. Sistemlerin ideal bir şekilde çalışması mümkün değildir. Kontrol sistemlerini karşılaştırırken girişlerin limitli, ölçümlerin gürültülü olduğu düşünülmelidir. Bu tezde klasik PI ve bulanık mantık PI kontrolörlerle oluşturulan modellere gürültü ve limit etkileri de dahil edilmiş ve her iki kontrol sistemi bu şekilde simüle edilerek karşılaştırılmıştır. Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki kontrol parametreleri bulanık mantık kuralları ile programlanan PI kontrolör Bölüm 3'teki çizelgelerde de anlaşılacağı gibi güç ve entalpi çıkış performansını iyileştirmiştir.

Tezin amacında belirtildiği gibi sistem parametrelerindeki değişimlere (kazan kirlenmesi gibi) uyum sağlayacak yapıda bir denetim sistemi bir ölçüde başarılmıştır. Kontrol sisteminin istenilen referans değerine, istenilen kriterlerde ulaşması hedefi gerçekleştirilmiştir. Yapılan çalışmalarda sistemin ideal durumdan, işletme şartlarına daha yakın bir konumda karşılaştırılması düşünülmüştür. Ancak bütün sistem parametrelerindeki değişikliklerin adaptasyonu, gürültülü ölçümler nedeniyle gerçekleştirilememiştir. Özel test şartlarında 2 ideal ölçümden 10 tane parametrenin tahmin edilebileceği gösterilmiş; ancak gürültülü durumda bu iki ölçümden adaptif şartlarda ancak 2 parametre tahmin edilebilmiştir. Bu sayının artırılarak sistem parametrelerindeki değişimlerin daha iyi adaptasyonunun sağlanması ise bir geliştirme konusu olarak gelecekteki araştırmacılara bırakılmıştır.

Bu çalışma dışında, ileriki zamanlarda sistem modeline daha farklı bozucu etki ve işletme şartlarında oluşacak etkenler ilave edilebilir. Adaptif denetimde bu tezde

kullanılan tahmin yöntemi dışında farklı yöntemler kullanılarak veya teknolojinin gelişmesiyle beraber daha fazla parametrenin tahmin edileceği sistemler gerçekleştirilebilir.

Sonuç olarak, günümüzde enerji santrallerinde kontrol sistemlerinin verimliliğe etkisi göz önünde bulundurulduğunda, modern kontrol yöntemleri kullanımı tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- (1) Nicholson, H., Dynamic Optimization of a Boiler. Proc. IEE, 11, 8, 1964.
- (2) Anderson, J.H., Dynamic Control of a Power Boiler. Proc. IEE, 116, 7, 1969.
- (3) Zadeh, L.A., Outline of a new Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., SMC-3, 28-44, 1973.
- (4) Kwan, H.W. and Anderson, H.J., A Mathematical Model of a 200 MW Boiler. International Journal of Control, 12, 977-978, 1970.
- (5) McDonald, P.J., Kwatny, H.G., Spare, J.H., A Nolineer Model for Reheat Boiler-Turbine Generation Systems. Proc. JACC, July 1971.
- (6) Laubli, F. and Fenton, F.H., The Flexibility of the Supercritical Boiler as a Partner in Power System Design and Operation. IEEE Winter Power Meeting, 1971.
- (7) Mamdani, E.H., Application of Fuzzy Algorithms for Control o Simple Dynamic Plant. Proc. Inst. Elect. Eng. Contr. Sci., 121, 1585-1588, 1974.
- (8) Mamdani, E.H. and Assilian, S., An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller. Int. J. Man-Mach. Stud., 7, 1-13, 1975.
- (9) Kickert, W.J.M. and Lemke, R.H., Application of a Fuzzy Controller in a Warm Water Plant. Automatica, 12, 301-308, 1976.

- (10) Bell, R.D., Rees, N.W., Done, T., Nonlinear and Linear Models of a 500 MW Boiler-Turbine System. 1st Australian Conf. on Control Engineering, Melbourne, June 1979.
- (11) Lausterer, G., Franke, J., Eitelberg, E., Modular Modelling Applied to a Benson-Boiler. 1st IFAC Workshop on Modelling and Control of Electric Power Plants, Como / Italy, 1983.
- (12) Li, Y.F. and Lau, C.C., Development of Fuzzy Algorithms for Servo Systems. IEEE Contr. Syst. Mag., 65-71, Aug. 1989.
- (13) Unbeauchen, H., Kocaarslan, I., Keuchel, U., Real-Time Adaptive Control of Electrical Power and Enthalpy for a 750 MW Once-Through Boiler. Edinburg Conference Centre, Edinburg, 25-28 March 1991
- (14) Ying, H., The Simplest Fuzzy Controllers Using Different Inference Methods are Different Nonlinear Proportional-Integral Controllers with Variable Gains. Automatica, 29, 1579-1589, 1993.
- (15) Ambuel, J., Steenhoek, L., Smith, R., Colvin, T., Control of Hydrostatic Transmission Output Speed: Development and Comparison of PI and Hybrid Fuzzy-PI Controllers. Amer. Soc. Agric. Eng., 36, 1057-1064, 1993.
- (16) Sugawara, S. and Suzuki, T., Application of Fuzzy Control to Air Conditioning Environment. J. Therm. Biol., 18, 465-472, 1993.
- (17) Armstrong, B., Fuzzy Logic Controller Design for Bounded Separable Functions with Linear Input-Output Relations as a Special Case. IEEE Trans. Fuzzy Syst., 4, 72-79, 1996.
- (18) Malki, H.A. and Chen, G., A Fuzzy Logic Controller For Boiler Systems in Power Plants. IEEE Trans. Fuzzy Syst., 653-656, 1996.

- (19) Chang, S.C. and Fu, W., Area Load Frequency Control Using Fuzzy Gain Scheduling of PI Controllers. Electric Power Systems Research, 42, 145-152, 1997.
- (20) S. Güngör, Bulanık Mantık Yaklaşımı ile Bir Termik Santralin Güç- Entalpi Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2004
- (21) H. Tiryaki, Bulanık Mantık Kontrolörler ile PID Kontrolörün Bir Elektriksel Termik Santralde Karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Kırıkkale Üniversitesi, Kırıkkale, 2005
- (22) Unbehauen, H. and Kocaarslan, I., .Experimental Modelling and Adaptive Power Control of 750 MW Once-Through Boiler. 11th World Congress, Tallinn, 13-17 Aug. 1991.
- (23) Heper, Y., Buhar Santralleri Teorisi ve Uygulaması. Ankara, 1979
- (24) Anonim, <http://www.eonturcasdenizlienerjisantrali.com/>,
(Erişim tarihi: 28.12.2009)
- (25) Anonim,
http://4.bp.blogspot.com/_M1REeID8OCw/SFkocHO4UNI/AAAAAAAAAZs/tF4orgeoqQw/s400/CombCycle1.gif, (Erişim tarihi: 28.12.2009)
- (26) Klefenz, G., Vladimir, F.T., Automatic Control of Steam Power Plants. Germany, 1986.
- (27) Anonim, http://www.epa.gov/chp/images/basic_schematic1_small.gif,
(Erişim tarihi: 28.12.2009)
- (28) Anonim, http://www.energytech.at/kwk/fotos/portrait_10_en.jpg,
(Erişim tarihi: 28.12.2009)

- (29) Ordys, A.W., Grimble, M.J., Kocaarslan, I., Combined Cycle and Combined Heat and Power Processes, In Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS). EOLSS Publishers, Oxford, UK, 2002.
- (30) Onat, K., Buhar Kazanlarının Isıl Hesapları. İTÜ, Makina Fakültesi, İstanbul, 1988.
- (31) E. Mustafa Yeğin, Bir Termik Santralin Modelinin Oluşturulması ve Bu Model Üzerinde Klasik PID ve Fuzzy Kontrol Yöntemlerinin Karşılaştırılması. Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, 1999.
- (32) Anonim, <http://www.mapnaboiler.com/en/webimages/hrsg.gif>,
(Erişim tarihi: 28.12.2009)
- (33) Yüksel, İbrahim, Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri. Bursa, 1997.
- (34) Unbeauhen, Heinz, Regelungstechnik 2. Germany, 1983.
- (35) Allahverdi, N., Bulanık Mantık ve Sistemler. Selçuk Üniversitesi, Konya, 2001.
- (36) Hıdır Peker, Fuzzy (Bulanık) Lojik Uygulamaları. Yüksek Lisans Tezi. Osmangazi Üniversitesi, Eskişehir, 1995.
- (37) Eyyüp Özbay, Bulanık Mantık ile Motor Kontrolünün İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul, 1995.
- (38) Kocaarslan, I., Modellbildung und Identifikation für einen 750 MW-Kombi-Block, Internal Report ESR-8904. Ruhr Universty, Bochum, 1989.

- (39) Unbeauchen, H. and Kocaarslan, I., Experimental Modelling and Simulation of a Power Plant, European Simulation Multiconference, Erlangen-Nuremberg / Germany, p. 474-478, June 1990.
- (40) İlhan Kocaarslan, Einsatz Adaptiver Regelkonzepte in Einem Dampfkraftwerk. Doktora Tezi. Bochum Universitesi, Almanya, 1991.
- (41) Zhou, T., A Parameterization of All the Unfalsified Plant Models for MIMO Systems. IEEE Trans. On Auto. Control, 43, No.1, 1998.
- (42) Goodwin, C.G. and Sin, S.K., “Adaptive Filtering, Prediction and Control”. Prentice-Hall, 50-54, 1984
- (43) Morgan, A.P. and Narendra, K.S., “On the stability of nonautonomous differential equations $\dot{x} = [A + B(t)]x$, with skew symmetric matrix $B(t)$ ”. SIAM J. Control and Optimization, 15, 163-176, 1977
- (44) Rees, N.W., Bell, R.D., Lee, K.B., Modelling and Control Studies on a 500 MW Coal-Fired Steam Generating Plant, School of E. E. Report, Univ. Of N. S. W., 1974.
- (45) Bell, R.D., Rees, N.W., Lee, K.B., Models of Large Boiler-Turbine Plant. IFAC Symp. Auto Cont. & Protection of Electrical Power Systems, Melbourne, 1977.
- (46) Rees, N.W., Bell, R.D., Lee, K.B., Statistical Models of Industrial Plant, 1st Australian Conf. on Control Engineering, Melbourne, June 1979.
- (47) Braae, M. and Rutherford, D.A., Selection of Parameters for a Fuzzy Logic Controller. Fuzzy Sets Syst., 2, 185-199, 1979.
- (48) Procyk, T.J. and Mamdani, E.H., A Linguistic Self-Organizing Process Controller. Automatica, 15, 15-30, 1979.

- (49) Maffezzoni, C.G., Magnani, G., Marcocci, L., Computer Aided Modelling of Large Power Plants. 1st IFAC Workshop on Modelling and Control of Electric Power Plants, Italy, 1983.
- (50) Takagi, T. and Sugeno, M., Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modelling and Control. IEEE Trans. Syst., Man, Cybern., SMC-15, 116-132, 1985.
- (51) Ying, H., Siler, W., Buckley, J.J., Fuzzy Control Theory: A Nonlinear Case. Automatica, 26, 513-520, 1990.
- (52) Matia, F., Jimenez, A., Galan, R., Sanz, R., Fuzzy Controllers: Lifting the Linear-Nonlinear Frontier. Fuzzy Sets Syst., 52, 113-128, 1992.
- (53) Qin, S.J. and Borders, G., A Multiregion Fuzzy Logic Controller for Nonlinear Process Control. IEEE Trans. Fuzzy Syst., 2, 74-81, 1994.
- (54) Sheoni, S., Ashenayi, K., Timmerman, M., Implementation of a Learning Controller. IEEE Contr. Syst. Mag., 73-80, June 1995.
- (55) Gül Akalın Kurt, Güç Sistemlerinde Yük-Frekans Kontrolü. Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Kocaeli, Şubat 2000.
- (56) Arifoğlu, Uğur, Matlab 7.04 Simulink ve Mühendislik Uygulamaları. Alfa Yayınları, İstanbul, 2005.