T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERS BULANIK KONTROL YÖNTEMLERİNİN BAŞARIM KARŞILAŞTIRMASI

Talha Burak AKCA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Danışman

Doç. Dr. Cenk ULU

Eş Danışman

Dr. Salih OBUT

Ocak, 2023

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERS BULANIK KONTROL YÖNTEMLERİNİN BAŞARIM KARŞILAŞTIRILMASI

Talha Burak AKCA tarafından hazırlanan tez çalışması 30.01.2023 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Mekatronik Mühendisliği Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Cenk ULU Yıldız Teknik Üniversitesi Danışman	Dr. Salih OBUT Yıldız Teknik Üniversitesi Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Cenk ULU, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Doç. Dr. Mehmet Selçuk ARSLAN, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA, Üye
İstanbul Teknik Üniversitesi _____

Danışmanlarım Doç. Dr. Cenk ULU ve Dr. Salih OBUT sorumluluğunda tarafımca hazırlanan Ters Bulanık Kontrol Yöntemlerinin Başarım Karşılaştırılması adlı tez çalışmasında veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Talha Burak AKCA

İmza

Aileme

ve

O'na

TEŞEKKÜR

Tez çalışmam boyunca her daim değerli bilgi ve tecrübeleri ile bana yol gösterici ve destek olan kıymetli danışmanım sayın Doç. Dr. Cenk ULU' ya, eş danışmanım sayın Dr. Salih OBUT' a, ilgisini ve yardımlarını esirgemeyen Prof. Dr. Haydar LİVATYALI' ya ve araştırma görevlileri meslektaşlarıma teşekkür eder ve saygılarımı sunarım.

Her zaman yanımda olan tüm yakın arkadaşlarıma ve benden desteklerini hiç esirgemeyen aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Talha Burak AKCA

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ vii
KISALTMA LİSTESİ ix
ŞEKİL LİSTESİ x
TABLO LİSTESİ xiii
ÖZET xiv
ABSTRACT xvi
1 GİRİŞ 1
1.1 Literatür Özeti 2
1.2 Tezin Amacı 5
1.3 Hipotez 5
2 BULANIK SİSTEMLER 6
2.1 Bulanık Mantık 6
2.2 Bulanık Sistemler 8
2.2.1 Takagi-Sugeno Tipi Bulanık Sistem 9
2.2.2 Ayrıştırılabilir Bulanık Sistemler 10
2.2.3 USBÇS Mimarisi 11
2.3 Büyük Patlama Büyük Çöküş En İyileme Yöntemi 14
3 BULANIK MODEL TERS ALMA YÖNTEMLERİ 16
3.1 USBÇS Tabanlı Ters Alma Yöntemi 16
3.2 Analitik Tabanlı Ters Alma Yöntemi 17
3.2.1 Ayrıştırılabilir TS Bulanık Model Ters Alma İşlemi 17
3.3 BP-BÇ En İyileme Algoritması Tabanlı Ters Alma Yöntemi 20
4 TERS BULANIK KONTROL YÖNTEMLERİNİN BAŞARIM KARŞILAŞTIRMASI 21
4.1 Küresel Tank Sıvı Seviye Sistemi Üzerinde Gerçekleştirilen Başarım Karşılaştırması 21
4.1.1 Küresel Tank Sistemi 21
4.1.2 Küresel Tank Sıvı Seviye Sisteminin Bulanık Modellenmesi 21
4.1.3 Sistem Bulanık Modeline Dayalı Ters Kontrolör Tasarımı 21
4.1.4 Benzetim Sonuçları 31
4.2 pH Nötralizasyon Prosesi Üzerinde Gerçekleştirilen Başarım Karşılaştırması 43
4.2.1 pH Nötralizasyon Prosesinin Bulanık Modellenmesi 43

4.2.2 Sistem Bulanık Modeline Dayalı Ters Kontrolör Tasarımı 43
4.2.3 Benzetim Sonuçları..... 55
4.3 Karşılaştırma ve Değerlendirme 65
5 SONUÇ VE ÖNERİLER **68**
KAYNAKÇA **70**
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR **74**

SİMGE LİSTESİ

J_c	Amaç fonksiyonu
P	Aday çözümler matrisi
Fit	Amaç fonksiyonu vektörü
CM	Ağırlık merkezi
aL	Alt limit
α	Arama uzayını daraltma operatörü
μ	Bulanık kümenin aitlik derecesi
E_p	Bulanık kümenin tanım uzayı
y_m	Bulanık model çıkışı
c^i	Bulanık sistemin tekil çıkışı
R^i	Bulanık kural
M	Bulanık kural sayısı
Q_0	Çıkış hacimsel debisi
y_0	Çıkış vanasının yerden yüksekliği
$d_y(k)$	Çıkış bozucusu
enP	En iyi aday çözümü parçacığı
d	Gecikme zamanı
Q_i	Giriş hacimsel debisi
$d_u(k)$	Giriş bozucusu
V	Hacim
U_{max}	Kontrol işaretinin üst sınırı
U_{min}	Kontrol işaretinin alt sınırı
β_i	Kural ateşleme derecesi
R	Küresel tank yarıçapı
y^i	i. kuralın sonuç fonksiyonu
ITs	İterasyon sayısı
Ts	Örnekleme zamanı
nP	Parçacık sayısı
c_i	Süreç akışının total iyon konsantrasyon vektörü
F	Süreç akış oranı
u	Titrasyon akış oranı
b_i	Titrasyon akışının total iyon konsantrasyon vektörü

uL	Üst limit
β	Yakınsama operatörü
yeniP	Yeni aday çözüm kümesi
g	Yer çekimi

KISALTMA LİSTESİ

BP-BÇ	Büyük Patlama – Büyük Çöküş
ÇGTÇ	Çok Girişli Tek Çıkışlı
İKH	İntegral Karesel Hata
İMK	İç Model Kontrol
PID	Oransal İntegral Türevsel
pH	Hidrojen Potansiyeli
TGTÇ	Tek Giriş Tek Çıkış
TS	Takagi-Sugeno
USBÇS	Uyarlanabilir Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi
KHOKK	Karesel Hataların Ortalamasının Kare Kökü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1 Sıcaklık değerine ilişkin klasik mantık ile oluşturulmuş kümeler 7
Şekil 2. 2 Sıcaklık değerine ilişkin bulanık mantık ile oluşturulmuş kümeler 7
Şekil 2. 3 Bulanık sistem yapısı 8
Şekil 2. 4 Dilsel terimlerin bulanık gösterimi 10
Şekil 2. 5 Temel USBÇS mimarisi [35] 12
Şekil 3. 1 Bulanık modelin giriş-çıkış konfigürasyonu 16
Şekil 3. 2 USBÇS tabanlı ters modelin giriş-çıkış konfigürasyonu 17
Şekil 3. 3 BP-BÇ tabanlı ters bulanık kontrolör tasarımı [31] 20
Şekil 4. 1 Küresel tank sistemi 22
Şekil 4. 2 (a) Uyarma işareti (b) karşılık gelen sistem çıkış işareti 23
Şekil 4. 3 Eğitilmiş bulanık modelin giriş üyelik fonksiyonları 24
Şekil 4. 4 Sistem çıkışı ve bulanık model çıkışı karşılaştırması 25
Şekil 4. 5 İç model kontrol yapısı 26
Şekil 4. 6 Eğitilmiş ters kontrolörün giriş üyelik fonksiyonları 27
Şekil 4. 7 Sisteme uygulanan giriş işareti ve USBÇS ters kontrolörün çıkış işareti karşılaştırması 28
Şekil 4. 8 Sisteme uygulanan giriş işareti ve analitik ters kontrolör çıkış işareti karşılaştırması 29
Şekil 4. 9 Sisteme uygulanan giriş işareti ve BP-BÇ tabanlı ters kontrolör çıkış işaretinin karşılaştırması 30
Şekil 4. 10 a) Referans değişimleri koşulu altında sistem cevaplarının karşılaştırılması b) kontrol işaretleri 31
Şekil 4. 11 Referans değeri 0 m'dan 1 m'ye değişirken Şekil 4.10'da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 32
Şekil 4. 12 Referans değeri 1 m'den 0.5 m'ye değişirken Şekil 4.10'da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 33
Şekil 4. 13 Referans değeri 0.5 m'den 1.5 m'ye değişirken Şekil 4.10'da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 34
Şekil 4. 14 a) Çıkış bozucusu koşulu altında sistem cevapları karşılaştırması b) kontrol işaretleri 35
Şekil 4. 15 Referans değeri 1 m iken çıkış bozucusu altında Şekil 4.14'te gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 36
Şekil 4. 16 Referans değeri 0.5 m iken çıkış bozucusu altında Şekil 4.14'te gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 37

Şekil 4. 17 Referans değeri 1.5 m iken çıkış bozucusu altında Şekil 4.14' te gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 38

Şekil 4. 18 a) Giriş bozucusu koşulu altında sistem cevapları karşılaştırması b) kontrol işaretleri 39

Şekil 4. 19 Referans değeri 1 m iken giriş bozucusu altında Şekil 4.18' de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 40

Şekil 4. 20 Referans değeri 0.5 m iken giriş bozucusu altında Şekil 4.18' de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 41

Şekil 4. 21 Referans değeri 1.5 m iken giriş bozucusu altında Şekil 4.18' de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 42

Şekil 4. 22 pH nötralizasyon prosesi 43

Şekil 4. 23 pH titrasyon eğrisi 44

Şekil 4. 24 (a) Uyarma işareti (b) sistem çıkış işareti 45

Şekil 4. 25 Eğitilmiş bulanık modelin giriş üyelik fonksiyonları 47

Şekil 4. 26 (a) Sistem çıkışı ve bulanık model çıkışı karşılaştırması (b) modelleme hatası 48

Şekil 4. 27 Eğitilmiş ters kontrolörün giriş üyelik fonksiyonları 49

Şekil 4. 28 Sisteme uygulanan giriş işareti ve USBÇS ters kontrolörün çıkış işareti karşılaştırması 51

Şekil 4. 29 Sisteme uygulanan giriş işareti ve analitik ters kontrolör çıkış işareti karşılaştırması 54

Şekil 4. 30 Sisteme uygulanan giriş işareti ve BP-BÇ tabanlı ters kontrolör çıkış işaretinin karşılaştırması 55

Şekil 4. 31 a) Referans değişimleri koşulu altında sistem cevaplarının karşılaştırılması b) kontrol işaretleri 56

Şekil 4. 32 Referans pH değeri 4'ten 5'e değişirken Şekil 4.31'de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 57

Şekil 4. 33 Referans pH değeri 5'ten 7'ye değişirken Şekil 4.31'de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 58

Şekil 4. 34 Referans pH değeri 7'den 10'a değişirken Şekil 4.31'de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 59

Şekil 4. 35 Referans pH değeri 10'dan 8'e değişirken Şekil 4.31'de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 60

Şekil 4. 36 a) Giriş bozucu koşulu altında sistem cevapları karşılaştırması b) kontrol işaretleri 62

Şekil 4. 37 Referans pH değeri 5 iken giriş bozucusu altında Şekil 4.36' da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 63

Şekil 4. 38 Referans pH değeri 7 iken giriş bozucusu altında Şekil 4.36' da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali 63

Şekil 4. 39 Referans pH değeri 10 iken giriş bozucusu altında Şekil 4.36' da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali..... 64

Şekil 4. 40 Referans pH değeri 8 iken giriş bozucusu altında Şekil 4.36' da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali..... 64

TABLO LİSTESİ

Tablo 4. 1 Küresel Tank Sisteminin Parametreleri 22
Tablo 4. 2 Bulanık Model Kural Tablosu 24
Tablo 4. 3 USBÇS tabanlı ters kontrolörün kural tablosu 27
Tablo 4. 4 Referans değişimleri koşulu altında başarım karşılaştırması 34
Tablo 4. 5 Çıkış bozucusu koşulu altında başarım karşılaştırması 38
Tablo 4. 6 Giriş bozucusu koşulu altında başarım karşılaştırması 42
Tablo 4. 7 pH nötralizasyon prosesinin parametreleri 44
Tablo 4. 8 Bulanık Model Kural Tablosu 46
Tablo 4. 9 USBÇS tabanlı ters kontrolörün kural tablosu 50
Tablo 4. 10 Referans değişimleri koşulu altında başarım karşılaştırması 60
Tablo 4. 11 Giriş bozucu koşulu altında başarım karşılaştırması 65

ÖZET

Ters Bulanık Kontrol Yöntemlerinin Başarım Karşılaştırması

Talha Burak AKCA

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Doç. Dr. Cenk ULU

Eş-Danışman: Dr. Salih OBUT

Doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi ve kontrolü, literatürdeki zor mühendislik problemlerinden biridir. Bulanık modelleme bu tür sistemler için sıklıkla kullanılan bir yöntemdir. Bir sistemin bulanık modelinin tersi alınabiliyorsa, bu ters model doğrudan kontrolcü olarak kullanılabilmektedir. Literatürde bulanık modeller için çeşitli ters alma yöntemleri önerilmiş ve bu yöntemlerle elde edilmiş ters modeller doğrusal olmayan sistemler için kontrolör tasarımında başarıyla kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında, literatürde yaygın olarak kullanılan ters alma yöntemlerinden Uyarlamalı Sinirsel-Bulanık Çıkarım Sistemi (USBÇS) ile Ters Alma Yöntemi, Analitik Ters Alma Yöntemi ve Büyük Patlama Büyük Çöküş (BP-BÇ) En İyileme Tabanlı Ters Alma Yöntemi kullanılarak tasarlanmış ters kontrolörlerin küresel tank sıvı seviye sistemi ve pH nötralizasyon prosesi kontrol uygulamalarında başarım karşılaştırması yapılmıştır. Bozucu etkilere ve model uyumsuzluklarına karşı gürbüz bir kontrol başarımı elde etmek için belirtilen ters alma yöntemleri ile elde edilen ters modeller iç model kontrol yapısında doğrudan ana kontrolcü olarak kullanılmışlardır. Tasarlanan kontrolörlerin başarımları bozucu etken ve referans işareti değişimleri için

benzetim ortamında test edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre analitik tabanlı ters kontrolörün diğer iki ters kontrolörden daha üstün kontrol ve gürbüzlük başarımı sergilediği görülmüştür. USBÇS tabanlı ters kontrolör analitik tabanlı ters kontrolöre göre daha düşük bir başarım sergilemiştir. BP-BÇ en iyileme tabanlı ters kontrolör ise en düşük kontrol ve gürbüzlük başarımına sahiptir.

Anahtar Kelimeler: Ters bulanık kontrol, uyarlanabilir sinirsel-bulanık çıkarım sistemi, analitik ters alma, büyük patlama büyük çöküş en iyileme yöntemi, iç model kontrol

ABSTRACT

Performance Comparison of Inverse Fuzzy Control Methods

Talha Burak AKCA

Department of Mechatronics Engineering

Master Thesis

Supervisor: Assoc. Prof. Cenk ULU

Co-supervisor: Asst. Prof. Salih OBUT

Modeling and control of nonlinear systems is one of the difficult engineering problems in the literature. Fuzzy modeling is a method that is frequently used method for such systems. If a system fuzzy model can be invertible, this inverse model can directly be used as a controller. Various inversion methods have been proposed for fuzzy models in the literature, and inverse models obtained by these methods have been successfully used in controller design for nonlinear systems. In this thesis, a performance comparison of inverse controllers designed using an inversion method using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), Analytical Inversion Method, and Big Bang-Big Crunch (BB-BC) Optimization Based Inversion Method, which are widely used in the literature, is performed in control applications of a spherical tank liquid level system and a pH neutralization process. In order to obtain a robust control performance against disturbances and model mismatches, the inverse models obtained with these inversion methods are used directly as the main controller in an internal model control structure. The performances of the designed controllers are tested through simulations for

disturbances and setpoint changes. It is revealed that the analytical based inverse controller exhibits superior control and robustness performance than the other two inverse controllers. The ANFIS based inverse controller shows lower performance than the analytical based inverse controller. The BB-BC optimization based inverse controller has the lowest control and robustness performance.

Keywords: Inverse fuzzy control, adaptive neuro-fuzzy inference system, analytical inversion, big bang big crunch optimization method, internal model control

1
GİRİŞ

Genel olarak, doğrusal olmayan sistemlerin matematiksel modellenmesi zordur. Doğrusal olmayan sistemlerin matematiksel modeli elde edilse bile yapısı kontrolör tasarımında kullanılması için çok karmaşık olabilmektedir [1], [2]. Bulanık mantık, doğrusal olmayan sistemleri modellemek için oldukça başarılı ve etkili bir yöntemdir. Bir sistem modelinin tersi alınabiliyorsa elde edilen bu ters model doğrudan ana kontrolcü olarak kullanılabilmekte ve böylece basit fakat etkin bir kontrol tasarımı gerçekleştirilebilmektedir. Bu nedenle doğrusal olmayan sistemlerin bulanık modellerinin tersinin alınabilmesi bu sistemlerin kontrolü açısından önemli bir konudur.

Literatürde birçok ters alma yöntemi önerilmiştir. Bu ters alma yöntemleri genel olarak tersi alınabilirlik koşulları gerektiren ve herhangi bir koşul gerektirmeyen yöntemler olarak ikiye ayrılabilir. Herhangi bir tersi alınabilirlik koşulu gerektirmeyen yöntemlere bakıldığında bunlardan ilki uyarlanabilir sinirsel-bulanık çıkarım sistemi (USBÇS) tabanlı ters alma yöntemidir. Bu ters alma yönteminde, USBÇS yapısındaki ters bulanık model sistemin giriş-çıkış verileri kullanılarak gerçekleştirilen eğitim ile elde edilir. Herhangi bir doğrusal olmayan sistemi USBÇS ile modellerken giriş ve çıkış verisinden yararlanılır. USBÇS tabanlı ters alma yönteminde ise mevcut veri setinin sadece giriş-çıkış verilerinin yerleri değiştirilir ve bu yeni veri seti ile eğitilerek ters bulanık model elde edilir. Böylece ek bir veri toplama işlemine gerek kalmadan sistemden toplanan tek veri seti ile sistemin hem ileri yol hem de ters bulanık modeli oluşturulabilmektedir. Herhangi bir tersi alınabilirlik koşulu gerektirmeyen diğer bir yöntem ise sistem bulanık modelinin tersinin genetik algoritma gibi stokastik en iyileme algoritmalarının kullanılarak alındığı yöntemdir. Bu çalışmada Büyük Patlama ve Büyük Çöküş (BP-BÇ) en iyileme algoritmasına dayalı ters alma yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde BP-BÇ algoritması sistemin bulanık modelini kullanarak, her örnekleme adımında bir başarı ölçütü çerçevesinde referans değer ile bulanık model yanıtı arasındaki hata değerini en küçük yapacak kontrol işareti değerini belirlemektedir. Bu şekilde

BP-BÇ algoritması ile bulanık modelin ters ifadesi o anki referans ve sistem yanıtı değerlerine göre her adımda yeniden belirlenmiş olmaktadır. Bu ters alma yöntemi global bir en iyileme algoritmasına dayalı olduğundan kullanılacak bulanık model yapısında herhangi bir özel koşul gerektirmemektedir. Bu koşul gerektirmeyen yöntemlerin yanında belli ters alınabilirlik koşulları gerektiren analitik ters almaya dayalı yöntemler de mevcuttur. Bu tez çalışmasında ayrıştırılabilir bulanık modeller için önerilmiş analitik ters alma yöntemi kullanılmıştır. Ayrıştırılabilir bir bulanık model basit yapıdaki bulanık alt modellere ayrıştırılabildiğinden analitik ifadelerinin elde edilmesi kolaylaşır. Böylece her bir bulanık alt modelin analitik tersi alınıp bir araya getirilerek ters model ifadesi elde edilebilmektedir. Bu yöntemde gerçekleştirilen analitik çözümlerde birden fazla çözüm elde edilebilmektedir. Bu nedenle, bu yöntemde uygun çözümün belirlenmesi için bir seçim ölçütü kullanılması ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca bu yöntemde sistemin bulanık modelinin özel ayrıştırılabilir olma koşullarını sağlaması gerekmektedir.

Tez çalışması kapsamında, bu üç ters alma yöntemi kullanılarak tasarlanan kontrolörlerin doğrusal olmayan sistemler üzerinde gösterdikleri kontrol başarımları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Çalışmalar benzetim ortamında gerçekleştirilmiştir. Doğrusal olmayan sistemler olarak küresel tank sıvı seviye sistemi ve pH nötralizasyon prosesi seçilmiştir. İlk olarak, kullanılan ters alma yöntemlerinin gerektirdiği model yapısı koşulları dikkate alınarak doğrusal olmayan sistemlerin USBÇS yapısında bulanık modelleri elde edilmiştir. Elde edilen bu bulanık modeller üzerinde, ilgili ters alma yöntemleri uygulanarak ters modeller elde edilmiştir. Genel kontrol sistem yapısı olarak İç Model Kontrol (İMK) yapısı kullanılmış ve elde edilen bu ters modeller bu yapıda ana kontrolcü olarak kullanılmıştır. Son olarak, referans değer değişimi ve bozucu etkisi altında farklı ters alma yöntemleri ile tasarlanan kontrolörlerin başarımları incelenmiştir.

1.1 Literatür Özeti

Bulanık mantık tabanlı sistemler yüksek yakınsama özellikleri sayesinde doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi için kolay ve etkili bir alternatif oluşturmaktadır [3]–[8]. Benzer şekilde bulanık kontrolörler sağladığı yüksek

kontrol başarımı ve tasarım esnekliği nedeniyle doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Örneğin, bulanık PID kontrolörler, doğrusal olmayan özellikleri sayesinde geleneksel PID kontrolörlere göre doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde daha iyi başarım sergilemektedirler [9]. Birçok uygulamada, bulanık kontrolörlerin ayar parametreleri, istenen kontrol performansını elde etmek için genellikle deneme yanılma yöntemiyle ayarlanmaktadır. Karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerde, bu deneme yanılma yaklaşımı zahmetli ve zaman alıcı olabilmektedir. Ayrıca, endüstride deneme yanılma yöntemiyle kontrolör ayarı yapmak, güvenlik, çevre ve ekonomik koşullar dikkate alındığında genellikle tercih edilmemektedir. Bu gibi durumlarda deneme yanılma yöntemleri yerine model tabanlı kontrol yaklaşımlarının kullanılması gerekmektedir [10]. Herhangi bir doğrusal olmayan sistem, giriş-çıkış verileri kullanılarak bulanık bir sistem olarak modellenebildiğinden, bulanık modeller model tabanlı kontrolör tasarımında etkin bir şekilde kullanılabilmektedir [11].

Doğrusal olmayan bir kontrolör tasarlamanın en etkili yollarından biri, elde edilebiliyorsa sistem modelinin tersini doğrudan kontrolör olarak kullanmaktır. Bununla birlikte, doğrusal olmayan bir analitik modelin ters ifadesini elde etmek genelde zahmetli bir iştir. Bulanık modelleme yaklaşımı, doğrusal olmayan bir sistemin modelini elde etmenin kolay bir yolunu sağladığından, literatürde bulanık modeller için birçok ters alma yöntemi önerilmiştir. Bu ters alma yöntemleri genel olarak dört gruba ayrılabilir; i) monoton bulanık modellerin tersini alma [12], ii) ayrıştırılabilir bulanık modellerin tersini alma [13]–[16], iii) daha serbest yapıda tasarlanmış bulanık modellerin tersini alma [17], [18] ve iv) genel bulanık model sınıfının yinelemeli tersini alma [19], [20]. Burada iv. gruba giren yöntemler stokastik arama algoritmalarına dayalı ters alma işlemi gerçekleştirdiklerinden, tersi alınacak modelin sağlaması gereken herhangi bir özel koşul gerektirmemektedirler. Diğer belirtilen yöntemlerin uygulanabilmesi için ise tersi alınacak bulanık modelin özel koşulları sağlaması gerekmektedir. Ters bulanık kontrolör doğrudan sistem modelinin tersini ifade ettiğinden, modelleme yaklaşıklığına bağlı olarak nominal koşullarda neredeyse sıfır hata ile sistemin istenen referans işareti takip etmesini sağlayabilmektedir. Fakat bu ters kontrolör tek başına kullanıldığında sistemin parametrelerinin değişmesi veya sistemin dış bozuculara maruz kalması gibi nominal koşullardan uzaklaşıldığı durumlarda

kontrol başarımı ciddi şekilde düşmektedir. Bu gibi durumlarda dayanıklı bir kontrol sağlayabilmek adına, bu ters kontrolörler model öngörülü kontrol yapısı [10], iç model kontrol yapısı [13], ve bazı çevrimiçi uyarlama yapıları [20], gibi farklı kontrol yapıları içinde kullanılmaktadır.

Jang tarafından önerilen USBÇS yaklaşımı [21] çeşitli modelleme ve kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. USBÇS, minimum girdi ve çıktı eğitim verisi gerektirdiğinden ve aynı zamanda hızlı ve doğru bir şekilde öğrendiğinden, özellikle doğrusal olmayan ve karmaşık yapıdaki sistemleri modellemek için etkili bir yöntemdir [11]. Sahip olduğu bu modelleme yeteneği sayesinde USBÇS yaklaşımı sistemin ters bulanık modelinin elde edilmesi için de çeşitli çalışmalarda kullanılmıştır. USBÇS tabanlı tasarlanmış ters kontrolörler bir araç süspansiyon sistemi [22], çift tank sistemi [23], karıştırıcı tank reaktörü [24], elektro-hidrolik eyleyici sistemi [25] ve dc motor [26] gibi farklı doğrusal olmayan sistemler üzerinde test edilmiş ve etkinliği gösterilmiştir.

Tek-giriş-tek-çıkış (TGTÇ) ve tekil sonuçlara sahip bulanık modeller için [12]' de analitik olarak tam tersine çevirme yöntemi önerilmiştir. Bu yönteme göre bulanık model monotonluk özelliği gibi bazı ters alınabilirlik koşullarını sağlamak zorundadır. [27]'de, ekstrapolasyon yöntemini kullanarak ileri yol bir bulanık modelden eksik kuralları tahmin etme yöntemi ile iki girdili tek çıktılı bulanık sistemler için analitik tam ters çevirme yöntemi önerilmiştir. [28]'de, bu yaklaşım çok-giriş-tek-çıkış bulanık sistemler için genişletilmiştir. Boukezzoula [29] tarafından önerilen analitik tam ters alma yönteminde, bulanık model çoklu doğrusal alt sistemlere ayrıştırılır ve bunların her biri üzerinde ayrı ayrı ters alma işlemi gerçekleştirilir. Bu alt sistemlerin ters ifadeleri bir araya getirilerek bulanık modelin tersi elde edilir. Bu yöntemin uygulanabilmesi için bulanık model Takagi-Sugeno (TS) bulanık model yapısında olmalı, giriş değişkenleri tam üçgen bölümleme kullanılarak ifade edilmiş olmalı ve kural sonuç önermeleri tekil tipte tanımlanmalıdır. Bu ters alma yaklaşımın ayrıştırılabilir aralık tip-2 TS bulanık sistemler için genişletilmiş hali [14]'te önerilmiştir. [30], daha esnek olarak tasarlanabilen tekil veya doğrusal kural sonuç yapısına sahip TS bulanık sistemlerinin ters alma işlemi için yeni bir yöntem önerilmiştir. Bu yöntemin aralık tip-2 TS bulanık sistemlerin tersinin alınabilmesi için genişletilmiş hali [17]'de

önerilmiştir. Bu ters alma yöntemi ile gerçekleştirilen kontrolörler İMK yapısı içinde ana kontrolcü olarak kimyasal prosesler, enerji sistemleri ve ısıl prosesler gibi çeşitli doğrusal olmayan sistemler üzerinde başarıyla uygulanmıştır [13], [31].

Büyük-Patlama-Büyük-Çöküş (BP-BÇ) en iyileme algoritmasına dayalı ters alma yöntemi Kumbasar tarafından önerilmiştir [32]. Ters alma yönteminde BP-BÇ en iyileme algoritmasının seçilmesinin en önemli sebepleri; yaygın olarak kullanılan genetik algoritmalara göre düşük hesaplama zamanına ve yüksek yakınsama hızına sahip olmasıdır [31]. Bu yöntemde referans değer ve sistem çıkış değeri arasındaki hatayı en küçük yapacak kontrol işareti sistem bulanık modelinden yararlanarak stokastik arama yoluyla her örnekleme adımında belirlenmektedir [20], [33]. BP-BÇ en iyileme algoritmasına dayalı ters alma yöntemi ile tasarlanan kontrolörler ısıl prosesler [31], pH nötralizasyon prosesi [34] ve sıvı seviye kontrol sistemi [35] gibi çeşitli doğrusal olmayan sistemlerin kontrol uygulamalarında etkin olarak kullanılmıştır.

1.2 Tezin Amacı

Bu tezin amacı doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bulanık modele dayalı üç ters kontrolör tasarım yönteminin sistematik olarak karşılaştırılması ve kontrol başarımlarının değerlendirilmesidir. Bu yolla, yöntemlerin tercihinde yol gösterici olacak yöntemler arası avantaj ve dezavantajların ortaya konulması amaçlanmaktadır. Bu ters kontrolör tasarım yöntemleri küresel tank sıvı seviye sistemi ve pH nötralizasyon prosesi olmak üzere iki farklı doğrusal olmayan sistemde uygulanmış ve tasarım kolaylıkları, kontrol başarımları gibi kriterler açısından değerlendirilmiştir.

1.3 Hipotez

Bu tez çalışmasıyla literatürdeki çeşitli ters alma yöntemleri ile tasarlanan kontrolörlerin başarım karşılaştırması doğrusal olmayan sistemler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu sayede ilgili ters alma yöntemlerinin avantaj ve dezavantajları ortaya konulmuştur. Elde edilen sonuçlar ters bulanık kontrolör tasarımında uygun ters alma yöntemi seçimi için yol gösterici olacaktır.

2
BULANIK SİSTEMLER

2.1 Bulanık Mantık

Bulanık mantık kavramı ilk olarak 1965 yılında Prof. Lotfi A. Zadeh tarafından ortaya atılmıştır [36]. Klasik mantıkta bir x elemanının bir A kümesi ile ilişki bir karakteristik fonksiyon üzerinden aşağıdaki gibi değerlendirilir.

$$\mathcal{X}_A(x) = \begin{cases} 1 & x \in A\ ise \\ 0 & x \notin A\ ise \end{cases} \tag{2.1}$$

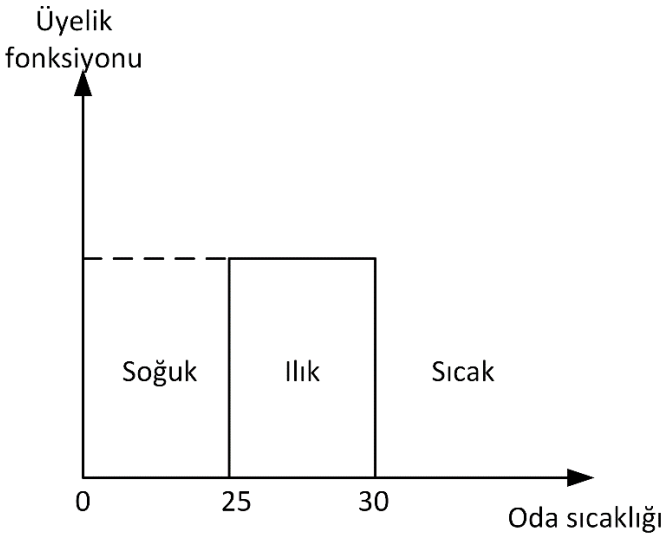
Burada $\mathcal{X}_A(x) = 1$ ise x A kümesinin elemanıdır ve $\mathcal{X}_A(x) = 0$ ise x A kümesinin elemanı değildir şeklinde iki değerli bir yaklaşım söz konusudur. Gerçek dünyada nesneleri veya olayları yalnızca 0 veya 1 aitlik değeriyle tanımlamak yeterli doğruluğu sağlamayabilmektedir. Bu nedenle klasik mantık yaklaşımı ile sistemlerin modellenmesi ve kontrolü yeterli başarımı sağlamayabilmektedir. Bulanık mantıkta ise bir x elemanının bir A kümesine olan aitliği aşağıdaki gibi bir üyelik fonksiyonu ile 0 ve 1 arasında tanımlanabilmektedir [37].

$$\mu A(x): X \rightarrow [0,1] \tag{2.2}$$

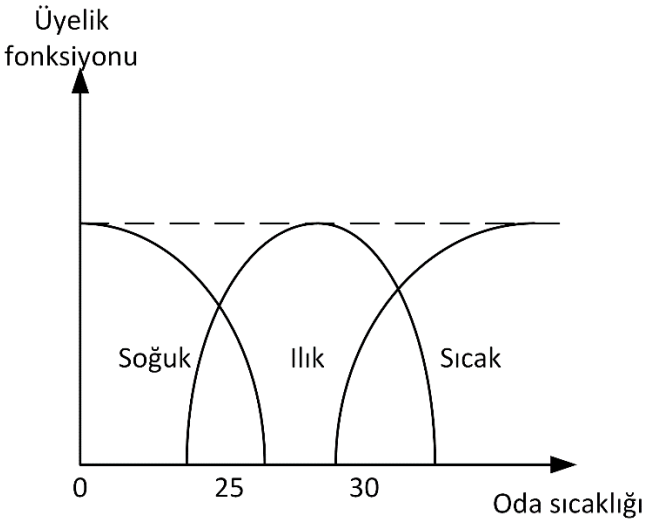
Görüldüğü gibi bulanık mantıkta iki değerli bir yaklaşım yerine çok değerli bir yaklaşım söz konusudur. Bulanık mantığın genel olarak özellikleri şunlardır [36];

- Bulanık mantıkta bir elemanın bir kümeye aitliği [0,1] aralığında bir değer ile ifade edilir.
- Bulanık mantıkta az, orta, çok gibi dilsel ifadeler kullanılır.
- Bulanık mantık matematiksel olarak modellenmesi ve kontrolü zor olan sistemler için oldukça uygundur.
- Bulanık çıkarım işlemi dilsel ifadelerle oluşturulan kurallar değerlendirilerek gerçekleştirilir.
- Bulanık mantık kesin sonuçlara dayalı karar verme yerine yaklaşık akıl yürütme yaklaşımına dayanmaktadır.

Örneğin, bir oda sıcaklığı tanımlama problemini ele aldığımızda, klasik mantık ile yaklaşıldığında oda sıcaklığı klasik kümelerle Şekil 2.1'deki gibi tanımlanırken, bulanık mantık ile yaklaşıldığında oda sıcaklığı Şekil 2.2'deki gibi bulanık kümelerle tanımlanabilmektedir.



Şekil 2. 1 Oda sıcaklığının klasik kümeler ile tanımlanması

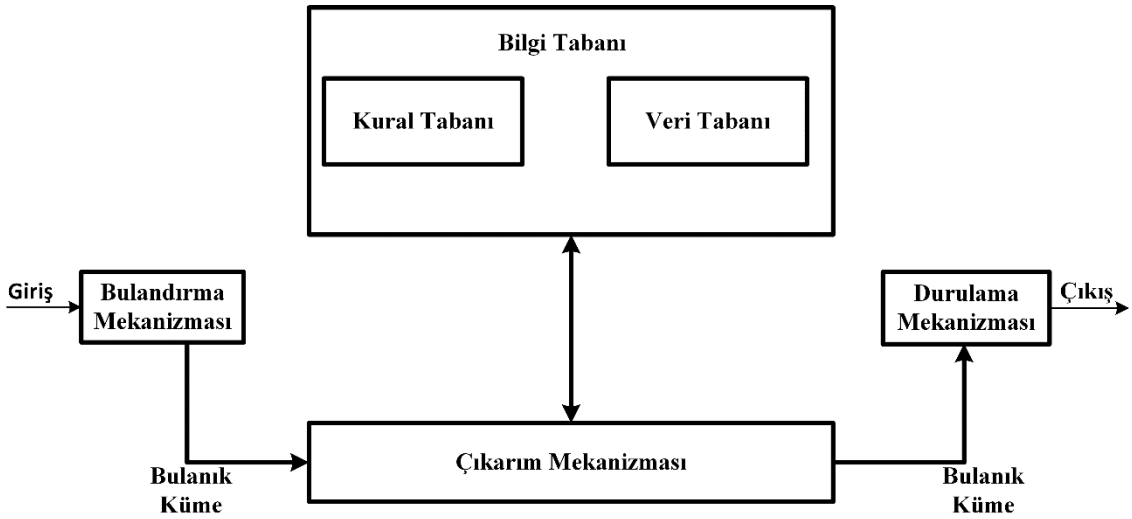


Şekil 2. 2 Oda sıcaklığının bulanık kümeler ile tanımlanması

Şekil 2.1'de görüldüğü gibi 0-25°C arası soğuk, 25-30°C arası ılık, 30°C üstü sıcak sınıfına girmektedir. Bu kurallara göre 24°C soğuk iken 26°C ılık sayılmaktadır. Oda sıcaklığı bulanık kümelerle tanımlandığında ise Şekil 2.2'de görüldüğü gibi 25°C oda sıcaklığı farklı aitlik değerleri ile hem soğuk hem de ılık kümesine dahil olmakta ve bu durum gerçeği daha iyi ifade edebilmektedir.

2.2 Bulanık Sistemler

Bir bulanık sistem Şekil 2.3'te gösterildiği gibi bulandırma mekanizması, bilgi tabanı, çıkarım mekanizması ve durulama mekanizması olmak üzere 4 ana kısımdan oluşmaktadır.



Şekil 2. 3 Bulanık sistem yapısı

Bulandırma mekanizması bulanıklaştırma işlemi yaparak giriş bilgilerinin dilsel ifadelere dönüştürülmesini sağlar. Bilgi tabanı, kuralların olduğu kural tabanı ve üyelik fonksiyonlarının tanımlandığı veri tabanı olmak üzere iki ana kısımdan oluşur. Kural tabanı kısmı giriş ve çıkış değişkenleri arasında ilişki kuran EĞER-O HALDE şeklinde oluşturulmuş kuralları içerir. Veri tabanı kısmı ise giriş ve çıkış üyelik fonksiyonu parametre değerlerini içerir. Çıkarım mekanizması kural tabanındaki kuralları ve gelen giriş bulanık değerlerini kullanarak bulanık bir çıkış üretir. Sistemin girişleri *x* ve *y*, çıkışı ise z olarak düşünülürse;

Kural: ***EĞER*** *x A* ise ve *y B* ise ***O HALDE*** *z C*'dir

şeklinde tanımlanmış kurallar değerlendirilerek bulanık sistemin çıkış değeri belirlenir. Burada *A*, *B* ve *C* sırasıyla *x*, *y* ve *z* değişkenleri için tanımlanmış bulanık kümeleri ifade etmektedir.

Durulama mekanizması üretilen bu bulanık çıkışın fiziksel dünyada anlamlı hale getirilmesi işlemini gerçekleştirmektedir. Bu sayede bulanık çıkış keskin sayılara dönüştürülmüş olur.

Bulanık sistemler, kullandıkları bulanık kuralların sonuç önermesine göre üç ana türe ayrılabilir ve kural yapıları aşağıdaki gibidir;

i. Mamdani tipi bulanık sistem

EĞER *x*, *A* ise ***O HALDE*** *y*, *B*' dir

ii. Bulanık bağıntısal sistem

EĞER *x*, *A* ise ***O HALDE*** $y=B_1(0.2), B_2(0.9)$

iii. Takagi–Sugeno tipi bulanık sistem

EĞER *x*, *A* ise ***O HALDE*** $y=f(x)$

Mamdani tipi bulanık sistem kural sonuç önermesinde bulanık kümeler kullanılır. Bulanık bağıntısal sistem kural sonuç önermesinde sonuç dilsel ifadelerinin ağırlıklandırılmış kombinasyonları kullanılır. TS tipi bulanık sistem kural sonuç önermesinde bulanık küme yerine doğrudan bir keskin fonksiyon, *f(x)*, kullanılır. Literatürde önerilen ters alma yöntemlerinin neredeyse tamamı Takagi-Sugeno tipi bulanık model yapısı için önerildiğinden, bu çalışma kapsamında bu bulanık model yapısı kullanılmıştır.

2.2.1 Takagi-Sugeno Tipi Bulanık Sistem

Takagi-Sugeno tipi bulanık sistemde kural sonuç önermesi tekil veya doğrusal fonksiyon şeklinde aşağıda gösterildiği gibi tanımlanabilmektedir.

R_i: ***EĞER*** x A_i ***O HALDE*** $y_i = f_i(x) = \boldsymbol{a_i^T x} + b_i$, $\quad i = 1, 2, \dots\dots\dots, n$

Burada $\boldsymbol{a_i}$ parametresi vektör ve b_i ise bir skaler değerdir. n ise kural sayısını göstermektedir. TS tipi bulanık modelin çıkışı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{K} \beta_i y_i}{\sum_{i=1}^{K} \beta_i} = \frac{\sum_{i=1}^{K} \beta_i (a_i^T x + y_i)}{\sum_{i=1}^{K} \beta_i} \qquad (2.3)$$

Burada β_i kural ateşleme derecesi, y_i, *i.* kuralın sonuç fonksiyonudur. TS tipi bulanık sistem sahip olduğu bu kural sonuç yapısı sayesinde en iyileme

algoritmalarını kolaylıkla uygulanabilir kıldığından sistem giriş-çıkış verisine dayalı bulanık model ve bulanık kontrolör tasarımında kolaylık sağlamaktadır.

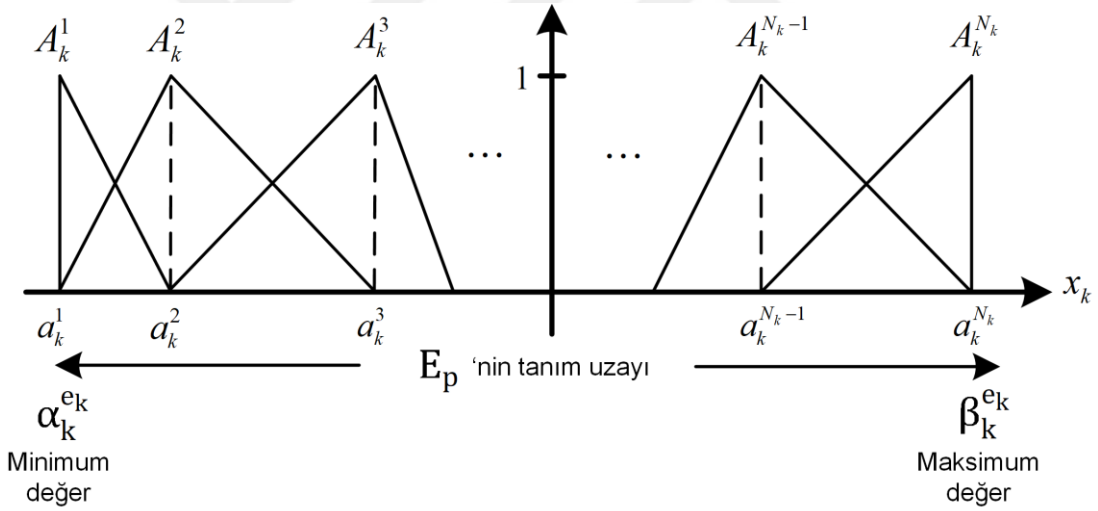
2.2.2 Ayrıştırılabilir Bulanık Sistemler

Çok girişli tek çıkışlı (ÇGTÇ) bir TS bulanık sistemi ele alalım. Bu bulanık sistemin n girişi $e_1, \dots\ e_n$ ve bir çıkışı s olsun ve bu bulanık sistem aşağıdaki gibi kurallar ile temsil edilsin;

$$R^{(i_1,\dots,i_n)}:$$

$$\textbf{\textit{EĞER}}\ e_1\ A_1^{i_1}\ \textbf{ve}\ \dots\ \textbf{ve}\ e_n\ A_n^{i_n}\ \textbf{\textit{O HALDE}}\ s = \emptyset(i_1, \dots, i_n) \tag{2.4}$$

Burada $A_k^{i_k},\ k = 1, \dots, n$ değişkeni e_k ile ilgili dilsel terimi ifade eder ve $\emptyset(i_1, \dots, i_n)$ sabit sayıdır. Giriş değişkenleri Şekil 2.4'te gösterildiği gibi tam üçgen bölümleme ile ifade edilmiştir.



Şekil 2. 4 Değişkenin tam üçgen bölümleme ile ifade edilmesi

E^n, Denklem (2.4)'te tanımlanan TS bulanık sistemin tanım uzayındadır. E^n aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$E^n = E_1 \dots x\ E_n = \left[\alpha_1^{e_1}\beta_1^{e_1}\right] x \dots x \left[\alpha_n^{e_n}\beta_n^{e_n}\right] \tag{2.5}$$

$\alpha_p^{e_p}\beta_p^{e_p}\ : p = 1, \dots, n$; E_p uzayını tanımlayan maksimum ve minimum noktalardır. Her E_p aşağıdaki gibi ayrıştırılabilir:

$$E_p = \left[\alpha_p^{e_p}\beta_p^{e_p}\right] = \cup_{i_p=1}^{N_p-1}\left[\alpha_p^{i_p}\alpha_p^{i_{p+1}}\right]:\ p = 1, \dots, n \tag{2.6}$$

$\alpha_p^{i_p}$, $A_p^{i_p}$' nin çekirdeği olmak üzere

$$\mu_{A_p^{i_p}}(\alpha_p^{i_p}) = 1 \tag{2.7}$$

Bu uzayda, temel bir bulanık ağ bir hiper küp üzerinde tanımlanabilir.

$$E_n(i_1, \dots i_n) = \left[\alpha_1^{i_1}\alpha_p^{i_1+1}\right] x \dots x \left[\alpha_n^{i_n}\alpha_n^{i_n+1}\right]$$

$$(i_1, \dots i_n) \in I_*^n$$

ve

$$I_*^n = \left\{(i_1, \dots i_n) \middle| i_p = 1, \dots, N_p - 1 : p = 1, \dots, n\right\} \tag{2.8}$$

olmak üzere tanım uzayı E_p gibi tanımlanabilir.

$$E^n = \bigcup_{(i_1,\dots i_n) \in I_*^n} E^n{}_{(i_1,\dots i_n) \in I_*^n} \tag{2.9}$$

Bu şekilde bulanık sistem (2.4), $\prod_{p=1}^{n} N_p - 1$ tane bulanık alt sistemden oluşmaktadır. Her biri 2^n tane kural ile tanımlanmıştır.

$$R_{(i_1,\dots i_n)}^{(v_1,\dots v_n)}$$

EĞER e_1 $A_1^{v_1+i_1}$ ve … ve e_n $A_n^{v_n+i_n}$ ise,

O HALDE $s(i_1, \dots i_n) = \emptyset(v_1 + i_1, \dots, v_n + i_n)$'dır. (2.10)

$$v_p = 0{,}1 : p = 1, \dots, n$$

Denklem (2.10)'daki $(i_1, \dots i_n)$ indeksi bulanık alt sistemi belirtirken $(v_1, \dots v_n)$ indeksleri belirli kuralları belirtmektedir. Her bir giriş $e \in E_{(i_1,\dots i_n)}^n$ için ayrıştırılabilir bulanık sistemin çıkışı her zaman 2^n kuraldan oluşmakta olan sadece bir bulanık alt sisteminin çıkışı tarafından belirlenir.

2.2.3 USBÇS Mimarisi

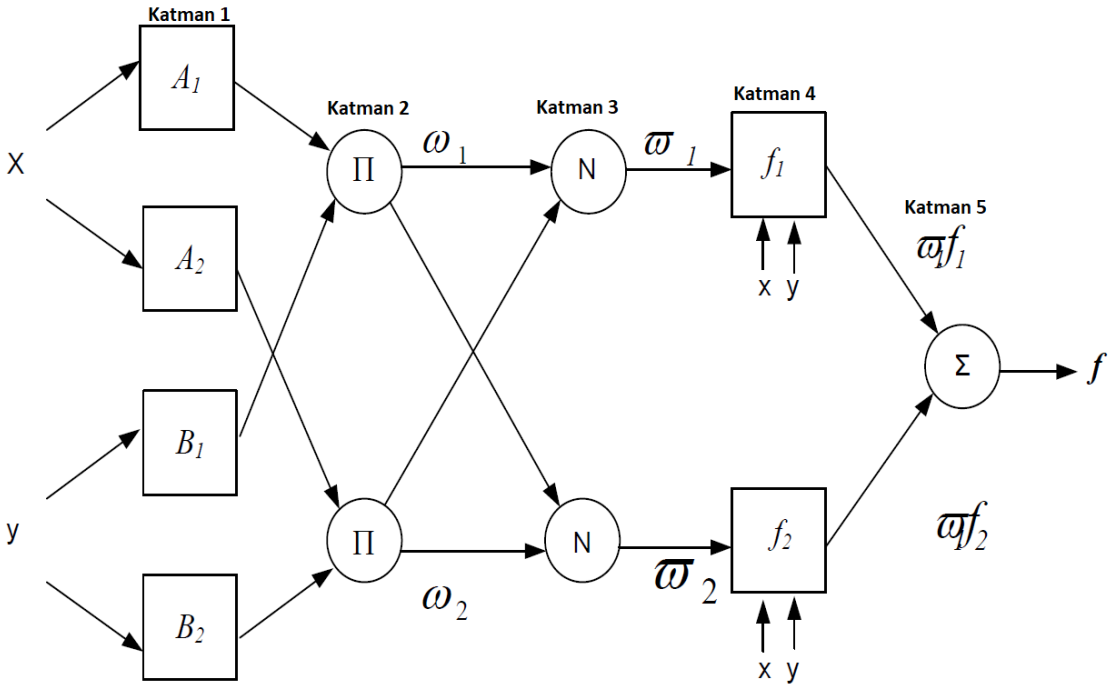
USBÇS mimarisi [21] TS bulanık sistemin öğrenme ve adaptasyon sürecini kolaylaştırmak için oluşturulmuş bir yapıdır. Bu yapı, bir bulanık sistemi uzman bilgisi gerekmeden daha sistematik bir şekilde veriye dayalı olarak tasarlama imkanı sunmaktadır. USBÇS'nin amacı giriş-çıkış verisinden yararlanarak bir

öğrenme prosedürü ile bulanık sistemin parametrelerini en iyi şekilde ayarlamaktır. USBÇS'nin eğitimi için ise en küçük kareler ve geri yayılımlı öğrenme algoritmalarının kombinasyonunu kullanır.

İki giriş ve tek çıkışa sahip örnek bir USBÇS mimarisi Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Bu sistemin kural tabanının aşağıdaki gibi iki kuraldan oluştuğunu varsayalım;

Kural 1: ***EĞER*** $x,\ A_1$ *ve* $y,\ B_1$ ***O HALDE*** $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Kural 2: ***EĞER*** $x,\ A_2$ *ve* $y,\ B_2$ ***O HALDE*** $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$



Şekil 2. 5 Temel USBÇS mimarisi [38]

USBÇS mimarisi 5 katmana sahiptir. Kare ile gösterilen düğümler uyarlanabilir parametrelerin olduğu, daire ile gösterilen düğümler ise sabit parametrelerin olduğu düğümleri göstermektedir. Her katmandaki düğüm işlevleri aşağıda açıklanmıştır.

Katman 1

Bu katmandaki her *i* düğümü uyarlanabilir bir fonksiyon düğümüdür. Düğüm işlevi aşağıdaki gibidir:

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(x) \tag{2.11}$$

burada x, i düğümünün girişidir ve A_i dilsel değişkendir (az, çok, vb.). O_i^1, A_i'nin üyelik fonksiyonudur ve A_i'ye karşılık gelen x'in derecesini belirtir. Genellikle $\mu_{A_i}(x)$ 'ye karşılık gelen üyelik fonksiyonu çan şeklinde maksimum değeri 1, minimum değeri 0 seçilir:

$$\mu_{A_i}(x) = \frac{1}{1+\left[\left(\frac{x-c_i}{a_i}\right)^2\right]b_i} \tag{2.12}$$

ya da

$$\mu_{A_i}(x) = exp\left\{-\left(\frac{x-c_i}{a_i}\right)^2\right\} \tag{2.13}$$

burada a_i, b_i, c_i parametre kümesidir ve bu parametrelerin değeri değiştikçe çan şeklindeki üyelik fonksiyonunun şekli de buna göre değişir. Yamuk veya üçgen şekilli üyelik fonksiyonları gibi sürekli ve parçalı türevi alınabilir fonksiyonlar da bu düğümde kullanılabilen fonksiyonlardır.

Katman 2

Bu katmandaki her *i* düğümü sabit bir düğümdür ve düğüme gelen her giriş işaretinin çarpımını çıkış olarak verir:

$$O_i^2 = \omega_i = \mu_{A_i}(x) \times \mu_{B_i}(y) \quad i = 1, 2 \tag{2.14}$$

Her düğüm çıktısı bir bulanık kuralın ateşleme derecesini temsil eder.

Katman 3

Bu katmandaki her *i* düğümü *N* ile adlandırılmış sabit bir düğümdür ve *i.* düğüm, *i.* kuralın ateşleme derecesinin tüm kuralların ateşleme derecesine oranını hesaplar:

$$O_i^3 = \overline{\omega_i} = \frac{\omega_i}{\omega_1+\omega_2}, \qquad i = 1, 2 \tag{2.15}$$

Bu katmanın çıkışı normalleştirilmiş kural ateşleme derecesini ifade eder.

Katman 4

Bu katmandaki her *i* düğümü uyarlanabilir bir fonksiyon düğümüdür:

$$O_i^4 = \overline{\omega_i} f_i = \overline{\omega_i}(p_i x + q_i y + r_i) \tag{2.16}$$

Burada $\overline{\omega_i}$, 3. katmanın çıkışıdır ve $p_i,\ q_i, r_i$ uyarlanabilir parametre kümesidir. Bu katmandaki parametreler kural sonuç parametrelerini ifade eder.

Katman 5

Bu katmandaki tek düğüm $\sum$ ile gösterilen sabit bir düğümdür ve gelen işaretlerin toplamını hesaplar.

$$O_i^5 = \sum \overline{\omega_i} f_i = \frac{\sum_i \omega_i f_i}{\sum_i \omega_i} \tag{2.17}$$

Böylelikle fonksiyonel olarak TS bulanık sisteme eşdeğer olan uyarlanabilir bir ağ yapısı oluşturulmuştur.

2.3 Büyük Patlama Büyük Çöküş En İyileme Yöntemi

Büyük patlama büyük çöküş (BP-BÇ) en iyileme yöntemi Erol ve Eksin tarafından önerilmiştir [39]. Bu en iyileme yöntemi düzensiz veya kaotik bir duruma dönüşüm gerçekleşirken oluşan enerji dağılımını temel alarak, yeni ve basit doğa tabanlı bir meta sezgisel yaklaşım ortaya koymaktadır. BP-BÇ en iyileme algoritmasında evrenin oluşumu ile ilgili olan Büyük Patlama teorisinden esinlenilmiştir. Evrenin oluşumu için ortaya konan bu teoride Büyük Patlama evresinde parçacıklar enerji kaybederek düzensizliğe doğru dağılırken, Büyük Çökme evresinde belirli bir noktaya doğru birleşirler. BP-BÇ en iyileme yönteminde Büyük Patlama ilk olarak rastgele başlangıç aday popülasyonu ile başlar. Bu ilk rastgele başlangıç aday popülasyonu dışında her Büyük Patlama aşamasından önce Büyük Çöküş aşaması meydana gelir. Büyük Çöküş aşamasında parçacıkların düzenli bir şekilde yakınsama operatörü belirlenir. Yakınsama operatörü aday çözümlerin konumlarının ağırlıklı ortalaması veya en iyi aday çözümün konumu olabilir. Bir durdurma kriteri gerçekleşene kadar parçacıkları global en iyiye doğru yönlendiren Büyük Patlama ve Büyük Çöküş aşamaları tekrar eder.

İlk aşamada belirli sayıda parçacığı (*nP*), değişken sayısı (*nv*), aday çözümler matrisi (*P*), buna karşılık gelen amaç fonksiyonu (*Fit*) vektörü ve her yinelemede en iyi gözlemlenen parçacığı (*enP*) tanımlanır. Büyük Çöküş aşamasına dayalı yakınsama operatörü, ağırlık merkezi (CM) veya en iyi aday çözümünün konumu

(enP) olarak tanımlanabilir. Minimizasyon problemleri için CM şu şekilde tanımlanabilir:

$$CM(i) = \sum_{j=1}^{nP}(\frac{P(j,i)}{Fit(j)}) / \sum_{j=1}^{nP}(1/Fit(j)), \quad i = 1, \dots nv \tag{2.18}$$

Büyük Patlama aşaması artık meydana gelebilir, parçacıklar ağırlık merkezine veya en iyi parçacığın konumuna (enP) göre izin verilen adım boyutu ile güncellenir. En iyileme işlemi gerçekleştirilen değişkenin alt limiti (aL) ve üst limiti (uL) tanımlanırsa yeni aday çözüm matrisi aşağıdaki gibi oluşturulur.

$$yeniP = (CM\ or\ enP) + \frac{rand \times (aL - uL)}{ITs} \tag{2.19}$$

burada *rand* 0-1 arasında rastgele bir değer olan değişkendir. Algoritmanın iterasyon sayısı (ITs) global en iyi hakkında etkili arama aralığı oluşturulmasını sağlar. Camp [40] Büyük Patlama formülasyonunu ek iki parametreyle yeniden sunmuştur. Arama uzayını daraltma (α) ve yakınsama operatörü (β) sunulmuştur. Önerilen yeni formül şu şekildedir:

$$yeniP = (\beta \times CM + (1 - \beta) \times\ enP) + \frac{rand \times \alpha \times (aL - uL)}{ITs},\ i = 1, \dots, nP \tag{2.20}$$

BP-BÇ algoritması aşağıdaki gibi özetlenebilir:

1.adım (Büyük Patlama)

nP tane kadar parçacığı arama uzayı içerisinde rastgele oluştur.

2.adım

Her bir parçacığın amaç fonksiyonu değerlerini hesapla.

3.adım (Büyük Çöküş)

Elde edilen değerlerin ağırlık merkezini hesapla (ya da en iyi bireyi kullan).

4.adım

Yeni popülasyonu ağırlık merkezi etrafında oluştur.

5. adım

Algoritmayı durdurma ölçütü gerçekleşmediyse 2. adıma git

6. adım

Algoritmayı durdurma ölçütü gerçekleştiyse algoritmayı durdur.

3
BULANIK MODEL TERS ALMA YÖNTEMLERİ

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında ele alınan USBÇS tabanlı ters alma yöntemi, analitik tabanlı ters alma yöntemi ve Büyük Patlama Büyük Çöküş (BP-BÇ) en iyileme algoritması tabanlı ters alma yöntemi tanıtılmıştır.

3.1 USBÇS Tabanlı Ters Alma Yöntemi

USBÇS ile sistem giriş-çıkış veri setinden yararlanılarak TS bulanık model elde edilebilmektedir. USBÇS ile tasarlanmış ve Şekil 3.1' de belirtilen iki giriş ve tek çıkışa sahip bir TS bulanık modeli göz önüne alalım.



Şekil 3. 1 Bulanık modelin giriş-çıkış konfigürasyonu

Girişleri *y(k-1)* ve *u(k)*, çıkışı ise *y(k)* olan bu bulanık modelin USBÇS ile ters bulanık modelinin oluşturulması istendiğinde yapılması gereken sadece eğitim verisinde değişiklik yapılmasıdır. Bu durumda Şekil 3.1'deki gibi bir bulanık modelin USBÇS ile tersi alınmak istendiğinde artık eğitim veri setinde *y(k-1)* ve *y(k*) giriş *u(k)* ise çıkış olarak düzenlenmelidir. Bu durumda ters bulanık modelin giriş-çıkış konfigürasyonu Şekil 3.2'de gösterildiği gibi olmaktadır.



Şekil 3. 2 USBÇS tabanlı ters modelin giriş-çıkış konfigürasyonu

Eğitim veri setinde giriş ve çıkış ifadeleri yeniden düzenlenerek ve bu yeni veri seti eğitimde kullanılarak USBÇS tabanlı ters bulanık model oluşturma işlemi gerçekleştirilir. Burada önemli olan noktalardan biri bulanık modelin ters ifadesini yeterli doğrulukta elde edebilmek için bulanık modelin giriş sayısının ve bu giriş değişkenlerinin tanımlanması için kullanılacak üyelik fonksiyonu sayısının belirlenmesidir. Çünkü ters modelin giriş sayısının sistem ileri yol bulanık modelinin giriş sayısı ile aynı seçilmesi ve bu girişlerin aynı sayıdaki üyelik fonksiyonu ile ifade edilmesi yeterli doğrulukta bir ters model oluşturulmasına imkân vermeyebilmektedir.

3.2 Analitik Tabanlı Ters Alma Yöntemi

Bu ters alma yöntemi Boukezzoula tarafından önerilmiştir [41]. Bu yöntem ile giriş değişkenleri tam üçgen bölümleme ile ifade edilmiş ve kural sonuç önermeleri tekil yapıda tanımlanmış ayrıştırılabilir TS bulanık modellerin analitik olarak tersi alınabilmektedir. Bu yöntemde TS bulanık modeli basit yapıda olan bulanık alt sistemlere ayrılarak her bir bulanık alt sistemin analitik tersi alınır. Bu bulanık alt sistemlerin ters ifadeleri bir araya getirilerek bulanık modelin ters ifadesi elde edilir.

3.2.1 Ayrıştırılabilir TS Bulanık Model Ters Alma İşlemi

Genel olarak *n* girişe sahip bir TS bulanık modeli, giriş değişkenleri $x_k \in X_k$ ve bir çıkış değişkeni, $y \in Y$, olmak üzere aşağıdaki gibi tanımlanır [18].

$$R^i = \textbf{EĞER}\ x_1\ A_1^i\ ve\ x_2\ A_2^i\ ve\ \dots ve\ x_n\ A_n^i$$

$$\textbf{O HALDE}\ y^i(x) = f^i(x_1, \dots, x_n) \qquad i = 1, \dots, M. \tag{3.1}$$

burada M kural sayısını, $A_k^i\ (k = 1, \dots, n)$, x_k giriş değişkenlerinin bulanık kümelerini ve y^i, *i.* kuralın çıkış fonksiyonudur.

Eğer kural sonuçları tekil yapıda tanımlanırsa, $f^i(x_1, \dots, x_n) = c^i$, bulanık model aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$R^i = \textbf{EĞER}\ x_1\ A_1^i\ ve\ x_2\ A_2^i\ ve\ \dots ve\ x_n\ A_n^i$$

$$\textbf{O HALDE}\ y^i(x) = c^i \qquad i = 1, \dots, M. \tag{3.2}$$

TS bulanık modelin çıkışı ağırlıklı ortalama yöntemi ile tanımlanabilir.

$$Y_{TS}(x) = \frac{\sum_{i=1}^{M} \mu^i(x) y^i(x)}{\sum_{i=1}^{M} \mu^i(x)} \tag{3.3}$$

burada

$$\mu^i(x) = \mu_{A_1^i \times \dots \times A_n^i}(x_1, \dots, x_n) \tag{3.4}$$

şeklindedir ve t-norm çarpımı kullanılarak elde edilmiş kural ateşleme derecesini ifade etmektedir. Böylece tekil kural sonuç yapısına sahip bulanık modelin çıkışı aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$Y_{TS}(x) = \frac{\sum_{i=1}^{M} \mu^i(x) c^i}{\sum_{i=1}^{M} \mu^i(x)} \tag{3.5}$$

Eğer giriş değişkenlerinin tanımlanması için tam üçgen bölümleme kullanılırsa $\sum_{i=1}^{M} \mu^i(x) = 1$ şeklinde olduğundan, bulanık modelin çıkışı aşağıdaki gibi sadeleşmektedir.

$$Y_{TS}(x) = \sum_{i=1}^{M} \mu^i(x) c^i \tag{3.6}$$

Bulanık modeli analitik olarak ifade ettikten sonra ters alma işlemi yapılır. Tersi alınan değişkeni x_n olarak varsayalım. TS bulanık modeli tersi alınan değişkene göre alt bulanık sistemlere ayrıştırılır. Bu alt bulanık sistemlerin tersinin elde edilmesiyle tüm modelin tersi elde edilmiş olunur.

Üçgen bölümleme kullanıldığından, her kural için x_n'in üyelik fonksiyonunun derecesi doğrusal denklem şeklinde ifade edilebilir;

$$\mu_{A_n^i}(x_n) = \alpha_{A_{nj}^i} x_n + \beta_{A_n^i j}, i = 1, \dots, M, j = 1, \dots, p. \tag{3.7}$$

$\alpha_{A_n^i}$ ve $\beta_{A_n^i}$ katsayıları *i.* kural ve *j.* bölgedeki ateşlenen üçgen üyelik fonksiyonun doğrusal denklem katsayılarıdır. Tam üçgen bölümleme nedeniyle her bir x_n giriş değeri için iki kümenin olabildiği yalnızca bir bölge aktif olabilir. *i.* kuralın ateşleme derecesi aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\mu^i(x) = \mu_{X^i}(X)\left(\alpha_{A_n^i j^*} x_n + \beta_{A_n^i j^*}\right) \tag{3.8}$$

burada j^* ateşlenen bölgeyi, $\mu_{X^i}(X)$, x_n dışında diğer tüm giriş değişkenlerinin üyelik değerinin çarpımını ifade etmektedir.

$$\mu^i(x) = \mu_{X^i}(X)\left(\alpha_{A_n^i j^*} x_n + \beta_{A_n^i j^*}\right) \tag{3.9}$$

O halde TS bulanık modelinin tekil sonuç için çıkışı aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$Y_{TS}(x) = \sum_{i=1}^{M} \mu_{X^i}(X)\left(\alpha_{A_n^i j^*} x_n + \beta_{A_n^i j^*}\right) c^i \tag{3.10}$$

Denklem yeniden düzenlendiğinde,

$$Y_{TS}(x) = x_n \sum_{i=1}^{M} \alpha_{A_n^i j^*} \mu_{X^i}(X) c^i + \sum_{i=1}^{M} \beta_{A_n^i j^*} \mu_{X^i}(X) c^i \tag{3.11}$$

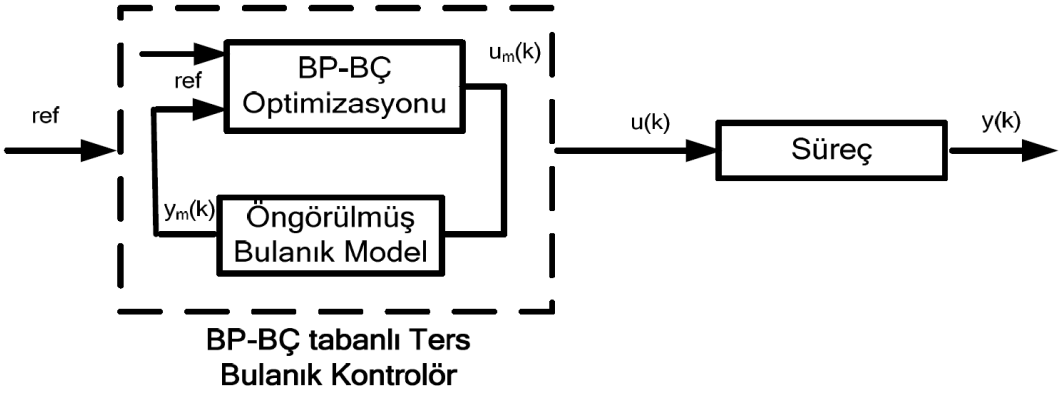
x_n'e göre ters çözüm aşağıdaki gibi elde edilir.

$$x_n = \frac{\left[Y_{TS}(x) - \sum_{i=1}^{M} \beta_{A_n^i j^*} \mu_{X^i}(X) c^i\right]}{\left[\sum_{i=1}^{M} \alpha_{A_n^i j^*} \mu_{X^i}(X) c^i\right]} \tag{3.12}$$

Benzer şekilde tüm bulanık alt sistemlerin ters ifadesi elde edilip bir araya getirilerek TS bulanık modelinin analitik ters ifadesi elde edilmiş olur. Ters alma sonucunda 3 farklı çözüm durumu ortaya çıkabilmektedir. Bunlardan ilki çözümün olmaması durumudur ki sistemin tersi alınabilir ise bu durumla karşılaşılması beklenilmez. Pratik uygulama açısından, o anki giriş değerlerine göre geçerli bir ters çözümün olmadığı durumlarda tanım uzayı sınır değerlerinden biri ya da bir önceki geçerli ters çözüm geçici ters çözüm olarak kullanılabilir. İkincisi tek çözümün olması durumudur. Bu durumda bu çözüm doğrudan bulanık modelin ters çözümü olarak kullanılır. Sonuncusu ise birden çok çözümün olması durumudur. Bu durumda minimum enerji ölçütü [13] gibi bir seçim ölçütü kullanılması gerekir ve bu ölçüte ilişkin en uygun çözüm bulanık modelin ters çözümü olarak kullanılır.

3.3 BP-BÇ En İyileme Algoritması Tabanlı Ters Alma Yöntemi

BP-BÇ en iyileme yöntemine dayalı ters alma yöntemi Kumbasar tarafından önerilmiştir [31]. BP-BÇ en iyileme yöntemi ile ters alma işlemi için öncelikle sistemin bulanık modeli elde edilmelidir. Ters alma işlemi, her örnekleme zamanında referans değer ile elde edilen bu bulanık modelin çıkışı arasındaki hata değerini en küçük yapacak kontrol işaretinin bu algoritma kullanılarak belirlenmesi ile gerçekleştirilir. BP-BÇ tabanlı ters bulanık kontrolörün yapısı Şekil 3.3' te gösterilmiştir.



Şekil 3. 3 BP-BÇ tabanlı ters bulanık kontrolör tasarımı [31]

BP-BÇ en iyileme algoritmasının bulanık modele dayalı amaç fonksiyonu J_c aşağıdaki gibi tanımlanmıştır:

$$J_c = |ref - y_m(k)| \tag{3.13}$$

Şekil 3.3'te öngörülmüş bulanık model kullanılmasının nedeni modeldeki ölü zaman etkisini ortadan kaldırmaktır. Eğer ölü zaman mevcutsa örneğin 2 örnekleme zamanı kadar bir ölü zaman varsa geri besleme bilgisi 2 adımlık bir öngörü mekanizmasında işlendikten sonra ters kontrolörler tarafından kullanılmaktadır. Modelde herhangi bir zaman gecikmesi yoksa bulanık model kullanılarak en iyileme yapılır. Bu çalışmada kullanılan modellerde herhangi bir ölü zaman olmadığı için bulanık model kullanılmıştır.

4
TERS BULANIK KONTROL YÖNTEMLERİNİN BAŞARIM KARŞILAŞTIRMASI

Bu bölümde, tez çalışması kapsamında ele alınan USBÇS tabanlı ters alma yöntemi, analitik tabanlı ters alma yöntemi ve Büyük Patlama Büyük Çöküş (BP-BÇ) en iyileme algoritması tabanlı ters alma yöntemi kullanılarak tasarlanmış sistemin bulanık modeline dayalı ters kontrolörlerin başarım karşılaştırması küresel tank sıvı seviye sistemi ve pH nötralizasyon prosesi olmak üzere iki doğrusal olmayan sistem üzerinde gerçekleştirilmiştir.

4.1 Küresel Tank Sıvı Seviye Sistemi Üzerinde Gerçekleştirilen Başarım Karşılaştırması

4.1.1 Küresel Tank Sistemi

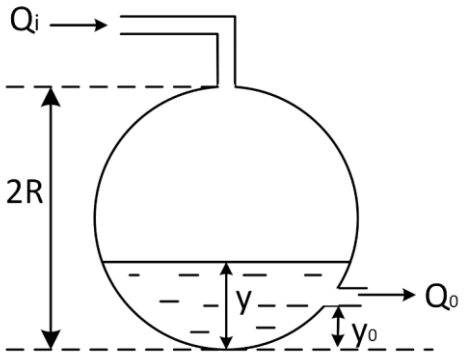
Küresel bir tank sisteminin genel yapısı Şekil 4.1' de gösterilmektedir. Küresel bir tank sistemindeki sıvı seviyesi doğrusal olmayan özellikler gösterir. Bu sistemdeki sıvı seviyesi için geçerli dinamik denklem şu şekilde verilebilir [42]:

$$Q_i\left(t-d\right)-Q_0=\left[\pi-\pi\left(R-y\right)^2\right]\frac{dy}{dt} \tag{4.1}$$

burada R, Q_i ve Q_o sırasıyla tank yarıçapını, giriş hacimsel debisini ve çıkış hacimsel debisini gösterir. Burada y, tanktaki sıvı seviyesi ve d, Q_i 'den y 'ye olan gecikmedir. Bernoulli denklemi göz önüne alındığında, çıkış hacimsel akış hızı şu şekilde tanımlanabilir:

$$Q_0=\sqrt{2g\left(y-y_0\right)} \tag{4.2}$$

burada y_o, küresel tankın tabanından çıkış borusuna olan yükseklik ve g yerçekimi sabitini gösterir.



Şekil 4. 1 Küresel tank sistemi

Bu çalışmada kullanılan tankın sistem parametreleri Tablo 4.1' de listelenmiştir. Sistemin giriş debisi 0,1 ile 6 m^3/s arasında değişmektedir.

Tablo 4. 1 Küresel Tank Sisteminin Parametreleri

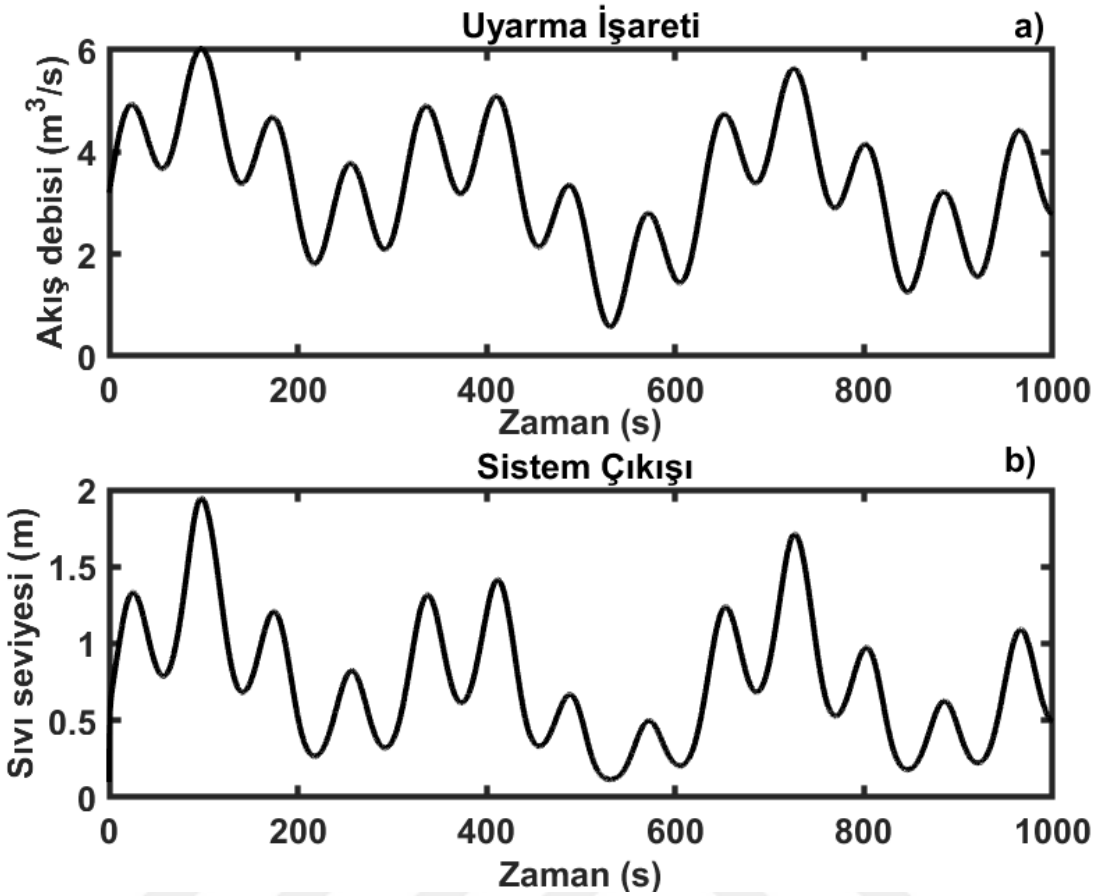
Parametreler	**Sembol**	**Değer**
Yarıçap	R	1 m
Gecikme zamanı	d	0
Yer çekimi	g	9.81 m/s^2
Çıkış vanasının yerden yüksekliği	y_0	0.1 m

4.1.2 Küresel Tank Sıvı Seviye Sisteminin Bulanık Modellenmesi

Küresel tank sıvı seviye sisteminin bulanık modellenmesi için Matlab/ANFIS paket programından yararlanılmıştır. Tank sisteminin bulanık modelini oluşturmak için Denklem (4.3)'te verilen uyarma işareti sistem girişine uygulanmıştır. Bu giriş işareti ve karşılık gelen sistem çıkış işareti kaydedilmiştir. Veriler 1000 s boyunca toplanmış ve örnekleme süresi 0,1 s olarak seçilmiştir.

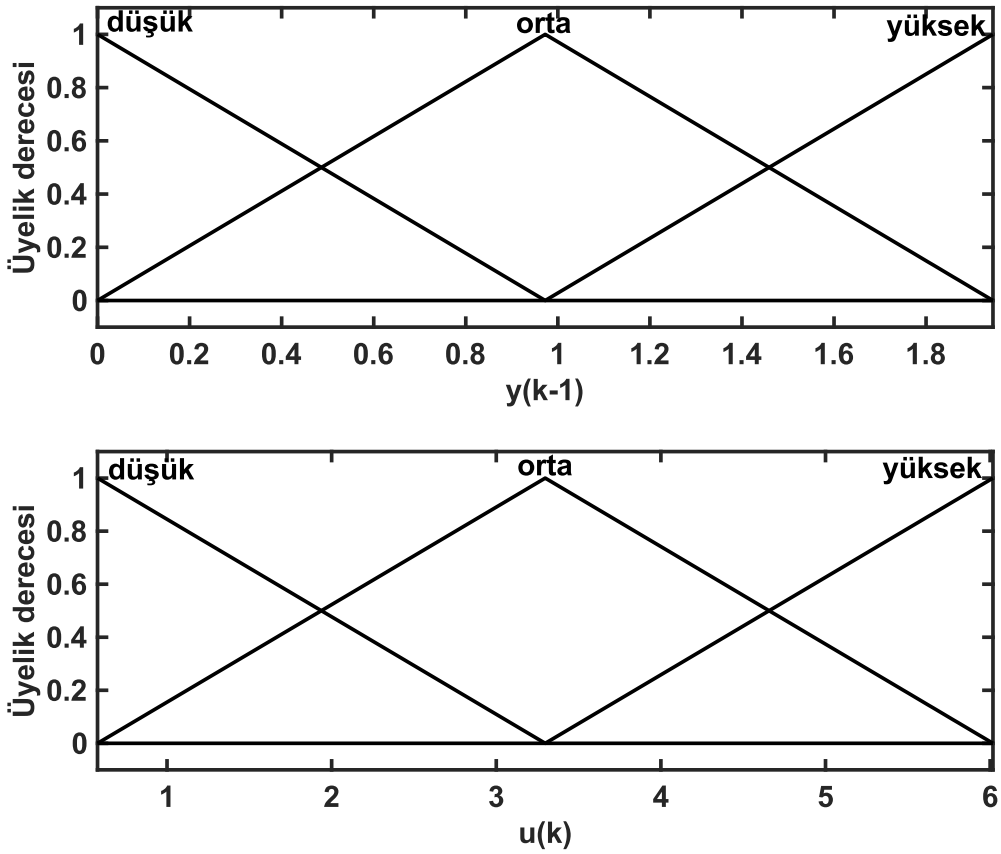
$$Q_i = 1.85\sin(0{,}02t) + 0.3\sin(0.05t) + 1.15\sin(0{,}08t) \qquad (4.3)$$

Uygulanan uyarma işareti ve karşılık gelen çıkış işareti sırasıyla Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b' de gösterilmektedir.



Şekil 4. 2 (a) Uyarma işareti (b) karşılık gelen sistem çıkış işareti

Daha sonra bu girdi-çıktı veri seti Matlab/ANFIS paket programında eğitilerek sistemin ileri yol bulanık model elde edilmiştir. Tasarım basitliği sağlamak ve hesaplama yükünü azaltmak için girişleri *y(k-1)* ve *u(k)* çıkışı ise *y(k)* olan iki-girişli-tek-çıkışlı bir Takagi-Sugeno bulanık model yapısı tercih edilmiştir. Giriş bulanık kümelerini tanımlamak için üç üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmış ve sonuç bulanık kümeleri için 9 tekil üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Verilerin ilk %75'lik kısmı eğitim süreci için, geri kalan veriler ise doğrulama süreci için kullanılmıştır. Eğitilmiş bulanık modelin üyelik fonksiyonları ve kural tablosu sırasıyla Şekil 4.3 ve Tablo 4.2'de gösterilmektedir.

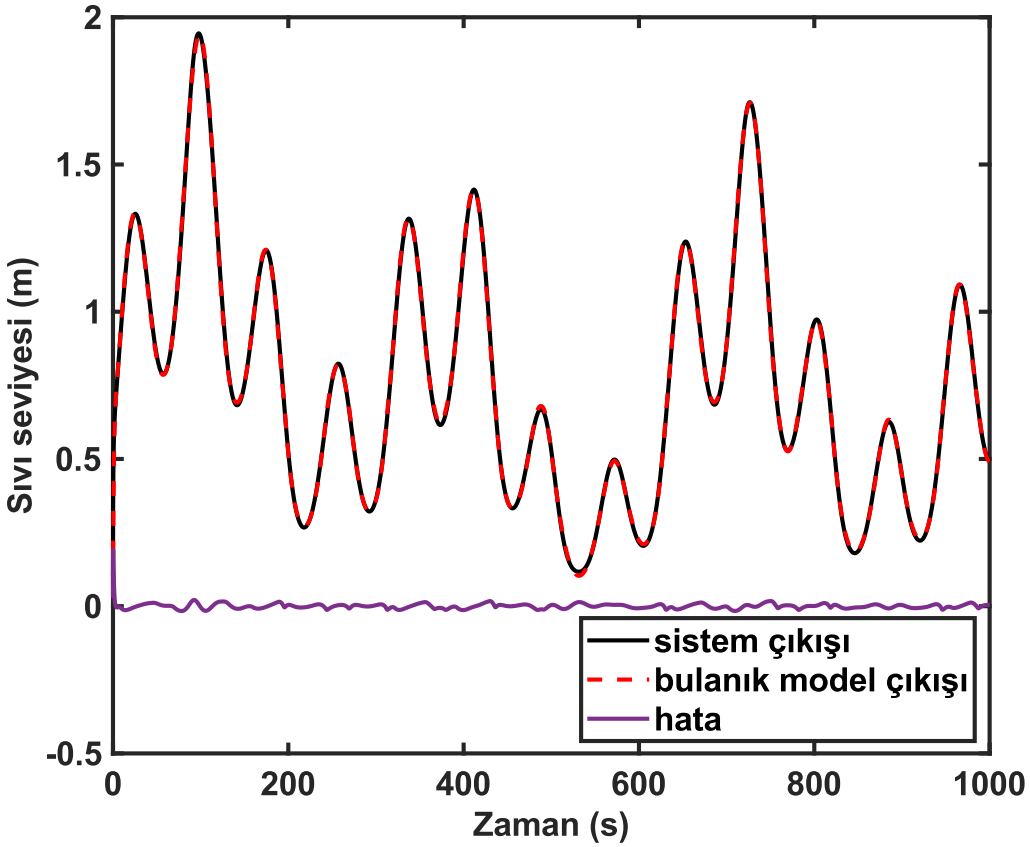


Şekil 4. 3 Eğitilmiş bulanık modelin giriş üyelik fonksiyonları

Tablo 4. 2 Bulanık Model Kural Tablosu

y(k-1) / u(k)	Düşük	Orta	Yüksek
Düşük	0.02191	0.07236	0.1106
Orta	0.7879	0.9395	1.046
Yüksek	0	1.818	1.945

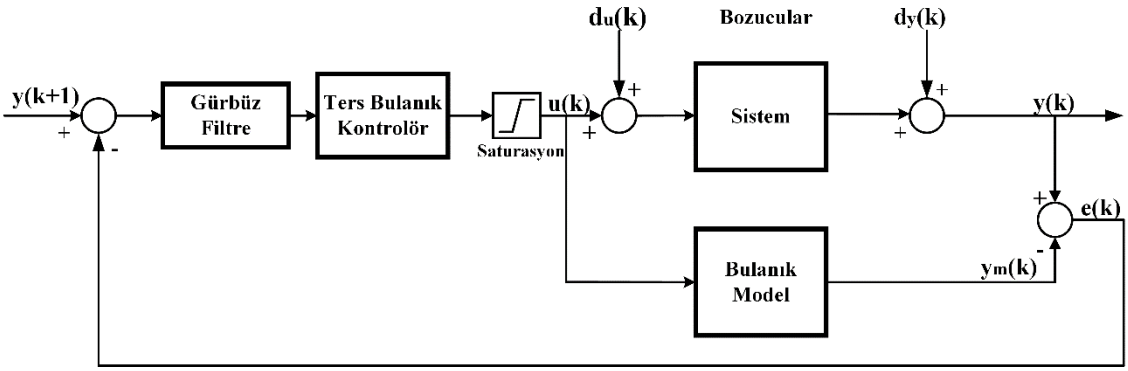
Tank sistemi çıkış işareti ile oluşturulan bulanık modelin çıkış işaretinin karşılaştırılması Şekil 4.4'te verilmiştir. Elde edilen bulanık model için karesel hataların ortalamasının kare kökü (KHOKK) değeri 1.8×10^{-3} şeklindedir. Bu değer kabul edilebilir bir modelleme doğruluğu elde edildiğini gösterir.



Şekil 4. 4 Sistem çıkışı ve bulanık model çıkışı karşılaştırması

4.1.3 Sistem Bulanık Modeline Dayalı Ters Kontrolör Tasarımı

Tüm ters alma yöntemleri ile elde edilen ters kontrolörler iç model kontrol (İMK) yapısı içinde ana kontrolcü olarak kullanılmıştır. Ters kontrolörler doğrudan sistem modelinin tersini ifade ettiğinden, modelleme yaklaşıklığına bağlı olarak nominal koşullarda neredeyse sıfır hata ile sistemin istenen referans işareti takip etmesini sağlayabilmektedir. Fakat bu ters kontrolörler tek başına kullanıldığında sistemin parametrelerinin değişmesi veya sistemin dış bozuculara maruz kalması gibi nominal koşullardan uzaklaşıldığı durumlarda kontrol başarımı ciddi şekilde düşmektedir. Bu nedenle İMK yapısı ile ters kontrolörlerin başarımı bozuculara ve sistem parametre değişimlerine karşı gürbüz hale getirilmiştir. İMK yapısı Şekil 4.5'te gösterilmiştir.

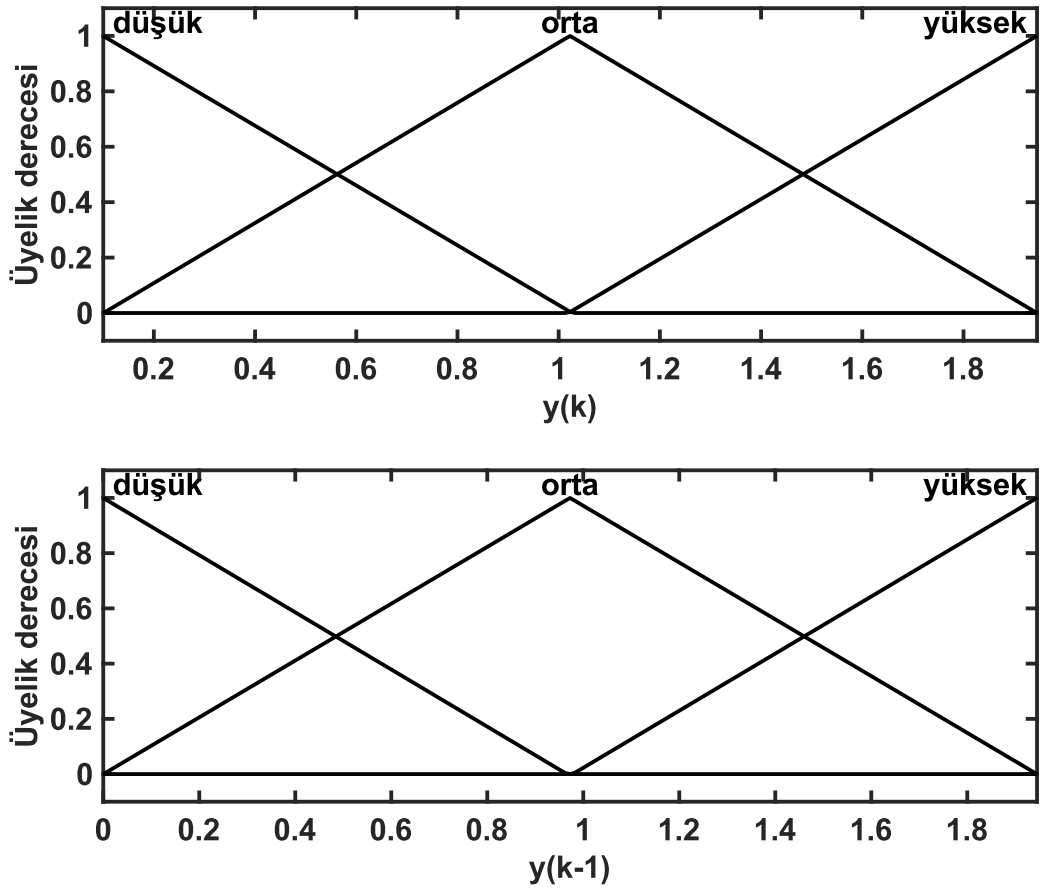


Şekil 4. 5 İç model kontrol yapısı

İMK yapısında sistemi temsil eden bulanık model ile sistem çıkışı arasındaki fark, hata olarak geri beslenir. Sisteme etki eden bozucu veya model parametre değişiminde sistem çıkışı ile bulanık model çıkışı arasında fark olacaktır. Kontrolörün gürbüzlüğünü arttırmak için hata, ters kontrolöre geri beslemeden önce gürbüz bir filtreden geçirilir.

4.1.3.1 USBÇS Tabanlı Ters Kontrolör Tasarımı

USBÇS tabanlı ters kontrolör tasarımında, sistemin ters modelini de temsil eden ters kontrolörü tasarlamak için giriş ve çıkış verileri yer değiştirilmiş ve yeni bir veri seti tanımlanmıştır. Bu veri setinde, *y(k)* ve *y(k-1)* girdi olarak ve *u(k)* çıktı olarak kullanılmıştır. Ters kontrolör, bu yeni veriye dayalı olarak Matlab/ANFIS paket programında eğitilip elde edilmiştir. Ters kontrolör, ileri yol bulanık model ile aynı yapıda olup girişler için 3 üçgen üyelik fonksiyonuna, çıkış için ise 9 tekil üyelik fonksiyonuna sahiptir. Modelleme sürecinde olduğu gibi, verilerin ilk %75'i eğitim ve geri kalan veriler doğrulama sürecinde kullanılır. Eğitilmiş ters kontrolörün üyelik fonksiyonları ve kural tablosu sırasıyla Şekil 4.6 ve Tablo 4.3'te gösterilmektedir.

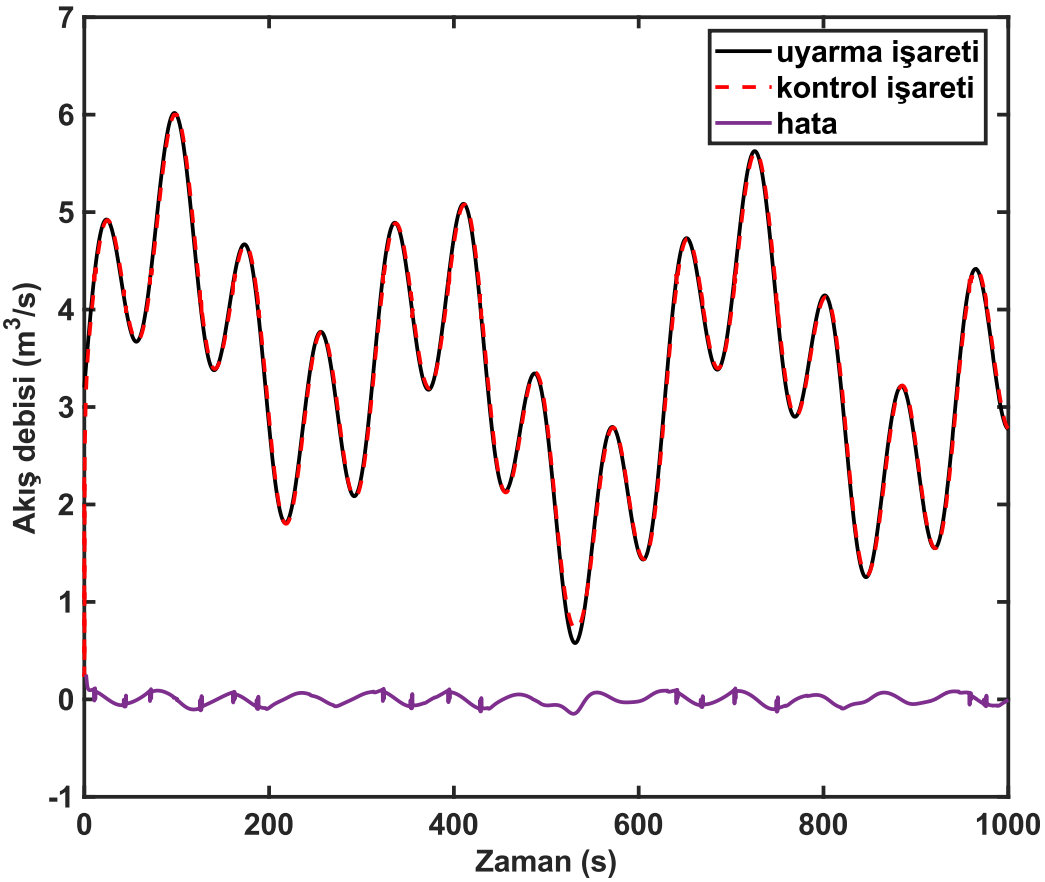


Şekil 4. 6 Eğitilmiş ters kontrolörün giriş üyelik fonksiyonları

Tablo 4. 3 USBÇS tabanlı ters kontrolörün kural tablosu

y(k)/ y(k-1)	Düşük	Orta	Yüksek
Düşük	2.28	-12.07	17.41
Orta	21.79	5.141	-15.5
Yüksek	0	27.16	6.014

Eğitilmiş ters kontrolörün doğrulaması için sisteme uygulanan giriş işaretine karşı elde edilen çıkış işareti kaydedilip ters kontrolöre referans giriş olarak verilmiştir. Sisteme uygulanan giriş işareti ve ters kontrolörün ürettiği kontrol işareti Şekil 4.7'de karşılaştırılmıştır. Tasarlanan ters kontrolör için KHOKK değeri 6.3×10^{-2} şeklindedir. Bu değer kabul edilebilir bir doğruluktadır.



Şekil 4. 7 Sisteme uygulanan giriş işareti ve USBÇS ters kontrolörün çıkış işareti karşılaştırması

İMK yapısında gösterilen gürbüz filtre olarak Denklem (4.4)'teki birinci dereceden filtre seçilmiştir.

$$G_f(z) = \frac{0.1813}{z-0.8187} \tag{4.4}$$

4.1.3.2 Analitik Tabanlı Ters Kontrolör Tasarımı

Bölüm 3.2.1'de anlatılan formülasyon ile sistemi temsil eden TS bulanık modelin analitik olarak tersi alınmıştır. Girişler sırasıyla *y(k-1)* ve *u(k)* olarak çıkış ise *y* şeklinde temsil edilmiştir. Ters alma işlemi *u(k)*'ya göre yapılmıştır. Her bulanık alt sistem için elde edilen denklemler aşağıdaki gibidir.

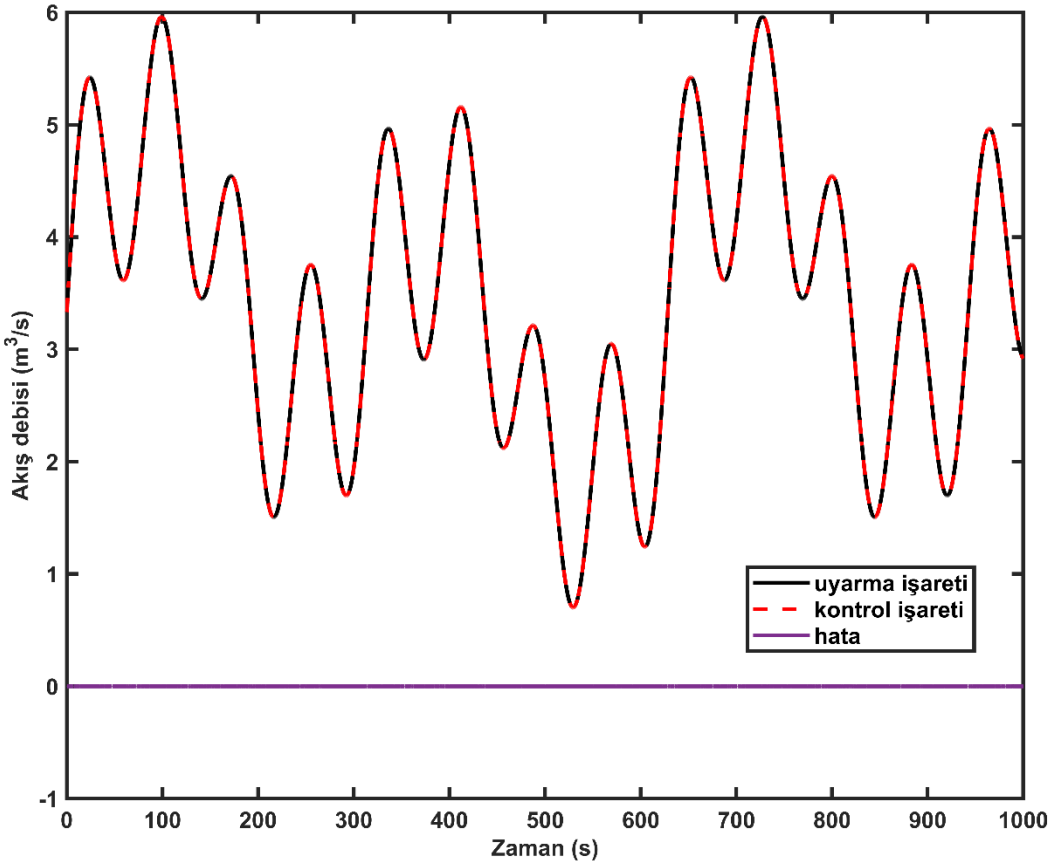
$TS^{1,1}$: $$u(k) = \frac{\mathrm{y(k)} - 0.7655y(k-1) - 0.01119}{0.03825y(k-1) + 0.01855} \tag{4.5}$$

$TS^{1,2}$: $$u(k) = \frac{y(k) - 0.02601 - 0.8065y(k-1)}{0.02581y(k-1) + 0.01406} \tag{4.6}$$

$TS^{2,1}$: $$u(k) = \frac{\mathrm{y(k)} - 1.898 + 1.174y(k-1)}{0.6302y(k-1) - 0.5572} \quad (4.7)$$

$TS^{2,2}$: $$u(k) = \frac{\mathrm{y(k)} + 0.04342 - 0.8779y(k-1)}{0.0078y(k-1) + 0.03162} \quad (4.8)$$

Bu denklemler sonucunda sistemi temsil eden TS bulanık modelin *u(k)*' ya göre tersi alınmıştır. Elde edilen denklemler ile analitik tabanlı ters kontrolör tasarlanmıştır. Denklemlerin çözümünde birden fazla çözüm ortaya çıkabildiğinden, bu tez çalışmasında seçim ölçütü olarak minimum enerji ölçütü kullanılmıştır. Analitik tabanlı ters kontrolörün doğrulaması Şekil 4.8'de gösterilmiştir.

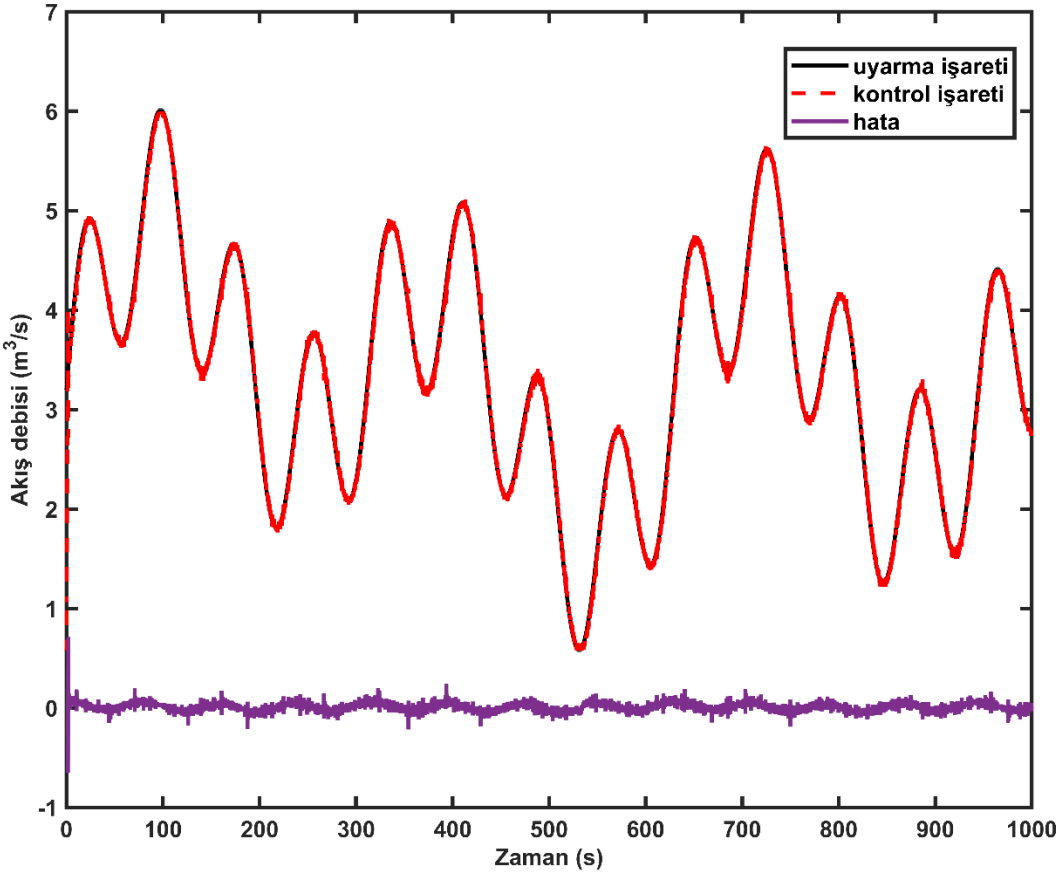


Şekil 4. 8 Sisteme uygulanan giriş işareti ve analitik ters kontrolör çıkış işareti karşılaştırması

Şekil 4.8'den görüldüğü gibi ters kontrolör doğrudan bulanık modelin analitik tersi alınarak tasarlandığından kontrolör hatası oluşmamaktadır. İMK yapısı ve filtre seçimi USBÇS tabanlı yapılan tasarımla aynıdır.

4.1.3.3 BP-BÇ En İyileme Tabanlı Ters Kontrolör Tasarımı

BP-BÇ en iyileme algoritması global en iyiyi aramaya yönelik bir algoritmadır. Bu algoritma ile ters alma işlemi referans ile bulanık modelin farkını en küçük yapacak kontrol işaretini elde etme ile yapılır. Bu çalışmada popülasyon sayısı 20 ve iterasyon sayısı 20 olarak seçilmiştir. En iyilemede kullanılan başarım ölçütü $J_c = |ref - y_m(k)|$ şeklindedir. Şekil 4.9'da BP-BÇ tabanlı ters kontrolörün doğrulama sonucu gösterilmektedir. Tasarlanan ters kontrolör için KHOKK değeri 7.2×10^{-2} şeklindedir.

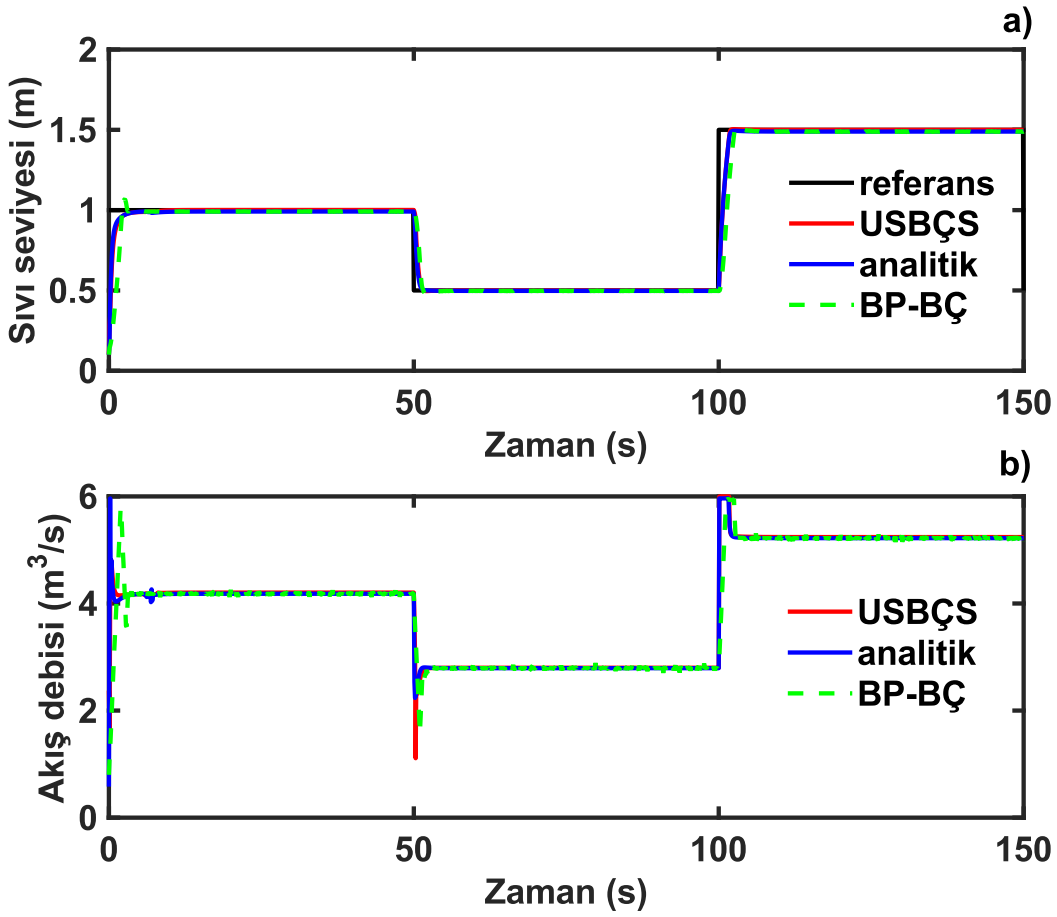


Şekil 4. 9 Sisteme uygulanan giriş işareti ve BP-BÇ tabanlı ters kontrolör çıkış işaretinin karşılaştırması

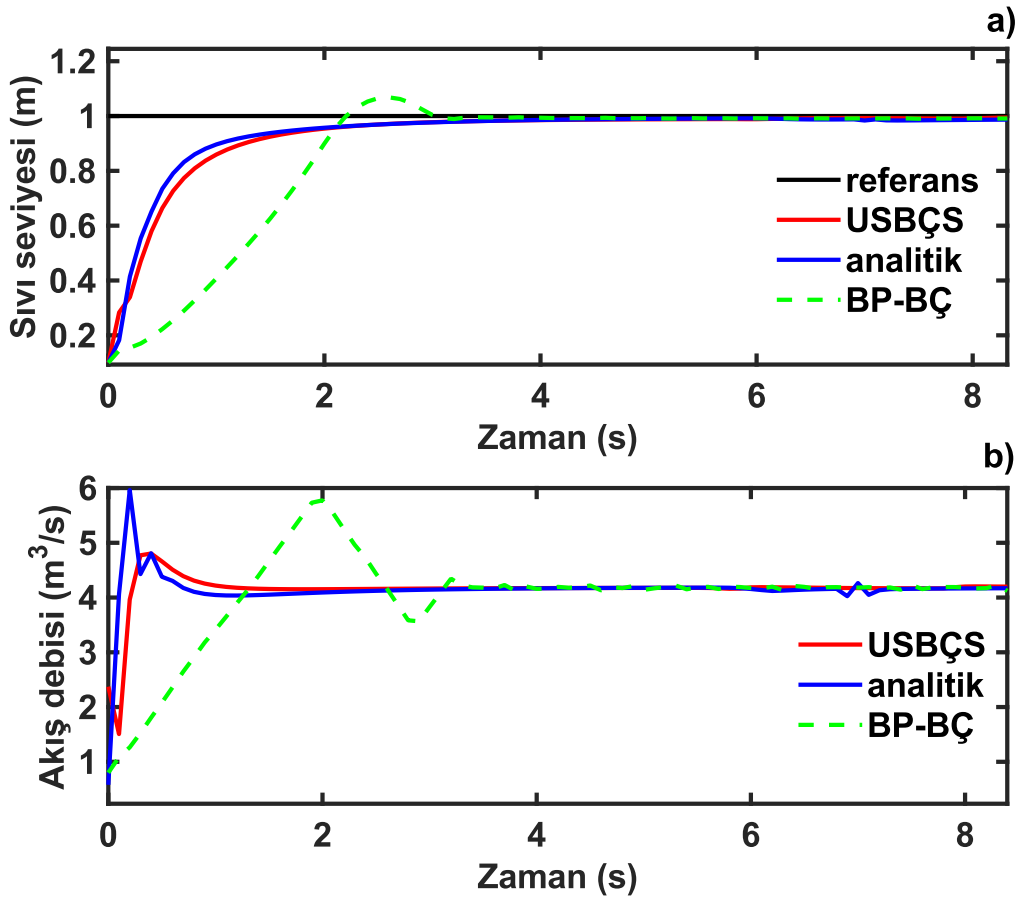
Şekil 4.9'dan görüldüğü gibi, diğer ters kontrolör doğrulama hatalarına benzer olarak BP-BÇ tabanlı ters kontrolörün doğrulama hatası da kabul edilebilir düzeydedir. İMK yapısı ve filtre seçimi adil bir karşılaştırma olması için diğer kontrolörlerle aynı seçilmiştir.

4.1.4 Benzetim Sonuçları

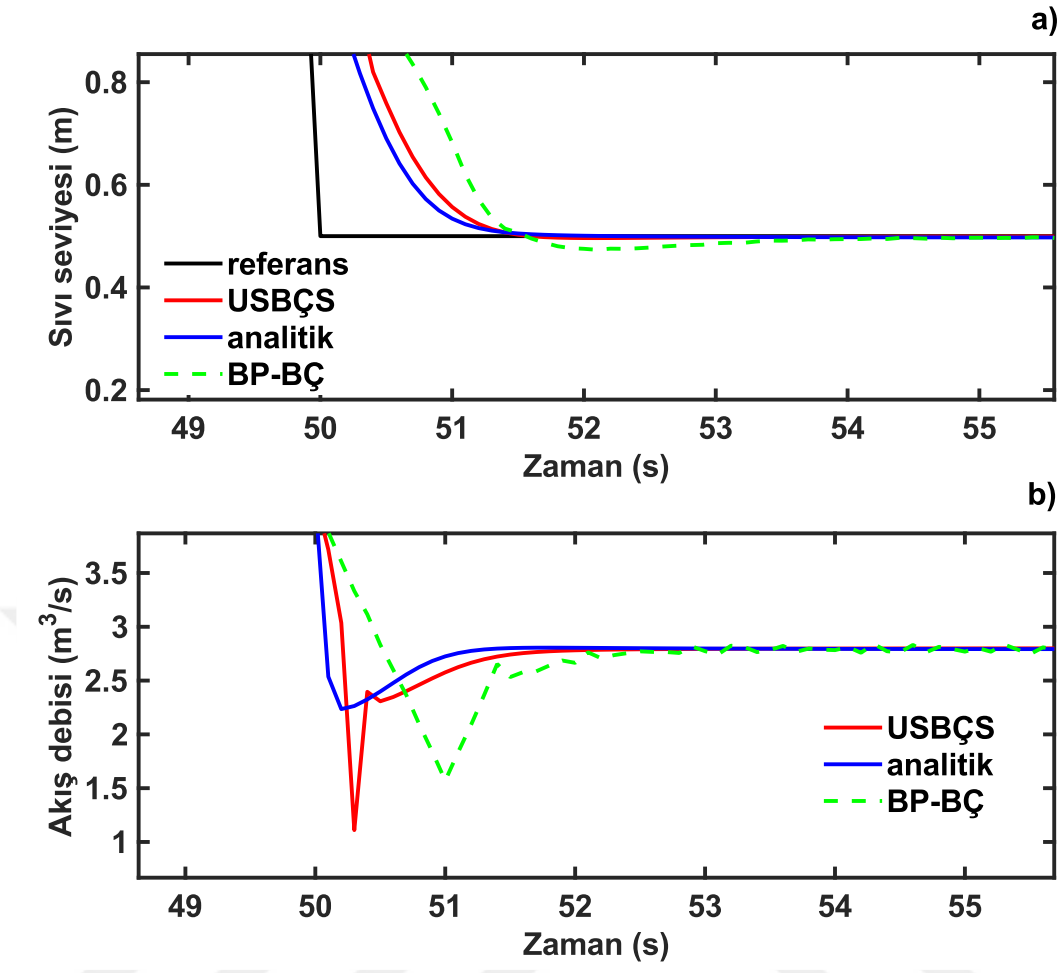
Ters kontrolörlerin başarımları ilk olarak referans değişimleri koşulu altında değerlendirilmiştir. Uygulanan referans işareti, karşılık gelen çıkış işaretleri ve kontrol işaretleri Şekil 4.10'da gösterilmektedir. İlgili referans değişimi bölgelerinin yakınlaştırılmış halleri sırasıyla Şekil 4.11, Sekil 4.12 ve Şekil 4.13'te gösterilmiştir. Başarım karşılaştırma tablosu ise integral karesel hata (İKH) başarım ölçütüne göre Tablo 4.4'te verilmiştir.



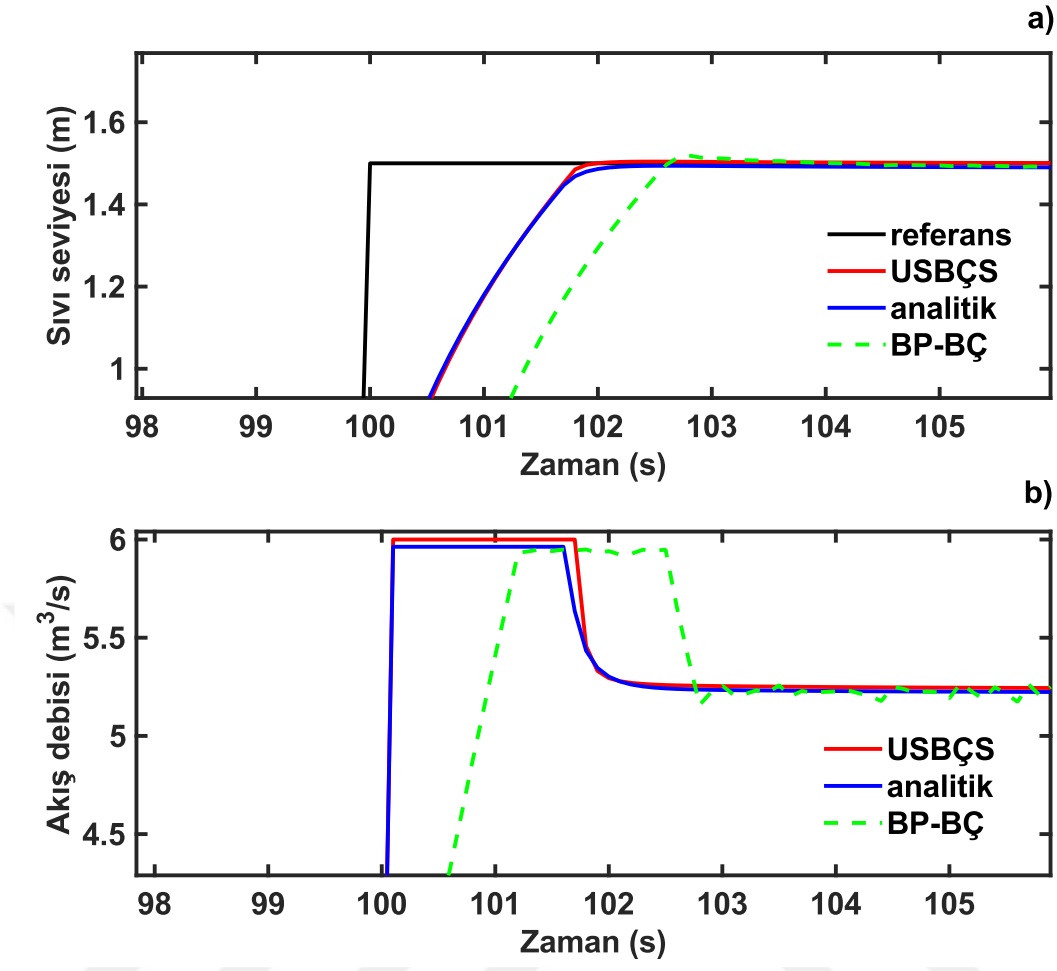
Şekil 4. 10 a) Referans değişimleri koşulu altında sistem cevaplarının karşılaştırılması b) kontrol işaretleri



Şekil 4. 11 Referans değeri 0 m'dan 1 m'ye değişirken Şekil 4.10'da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 12 Referans değeri 1 m'den 0.5 m'ye değişirken Şekil 4.10'da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 13 Referans değeri 0.5 m'den 1.5 m'ye değişirken Şekil 4.10'da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali

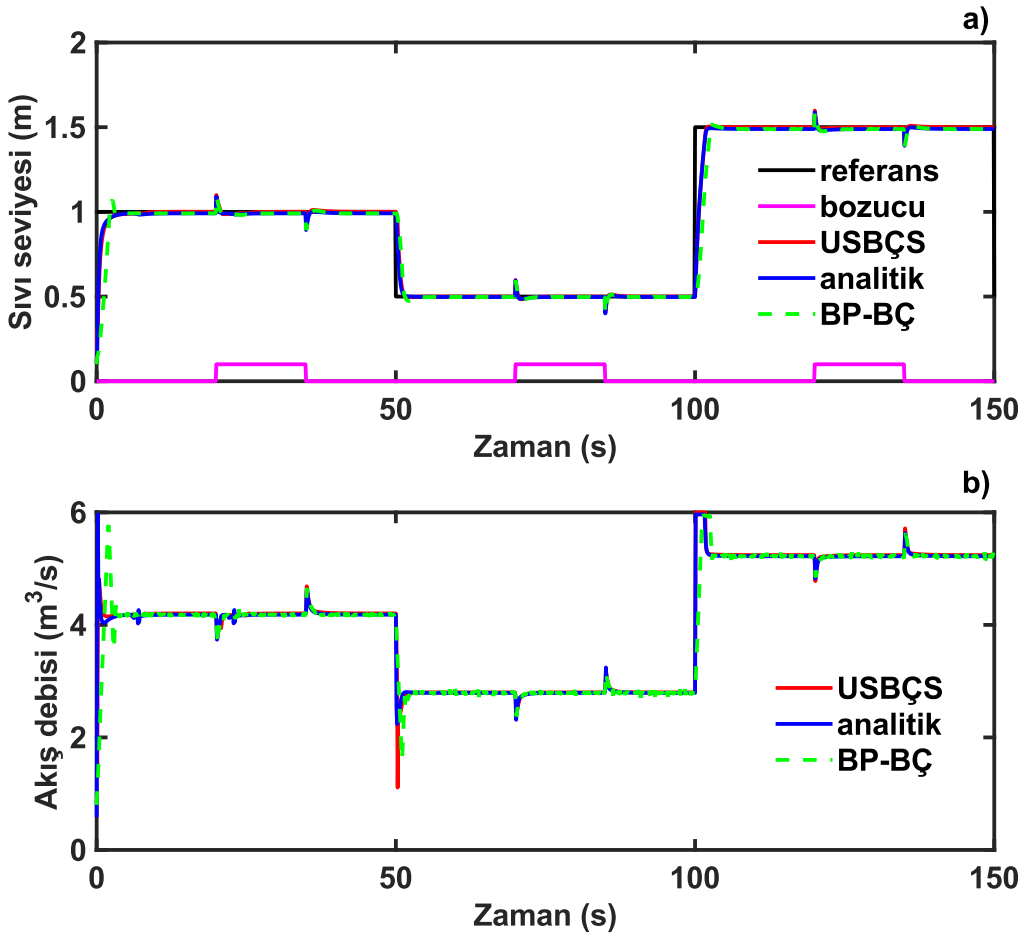
Tablo 4. 4 Referans değişimleri koşulu altında başarım karşılaştırması

	İKH
USBÇS Ters Kontrolör	0.7476
Analitik Ters Kontrolör	0.6972
BP-BÇ Ters Kontrolör	1.995

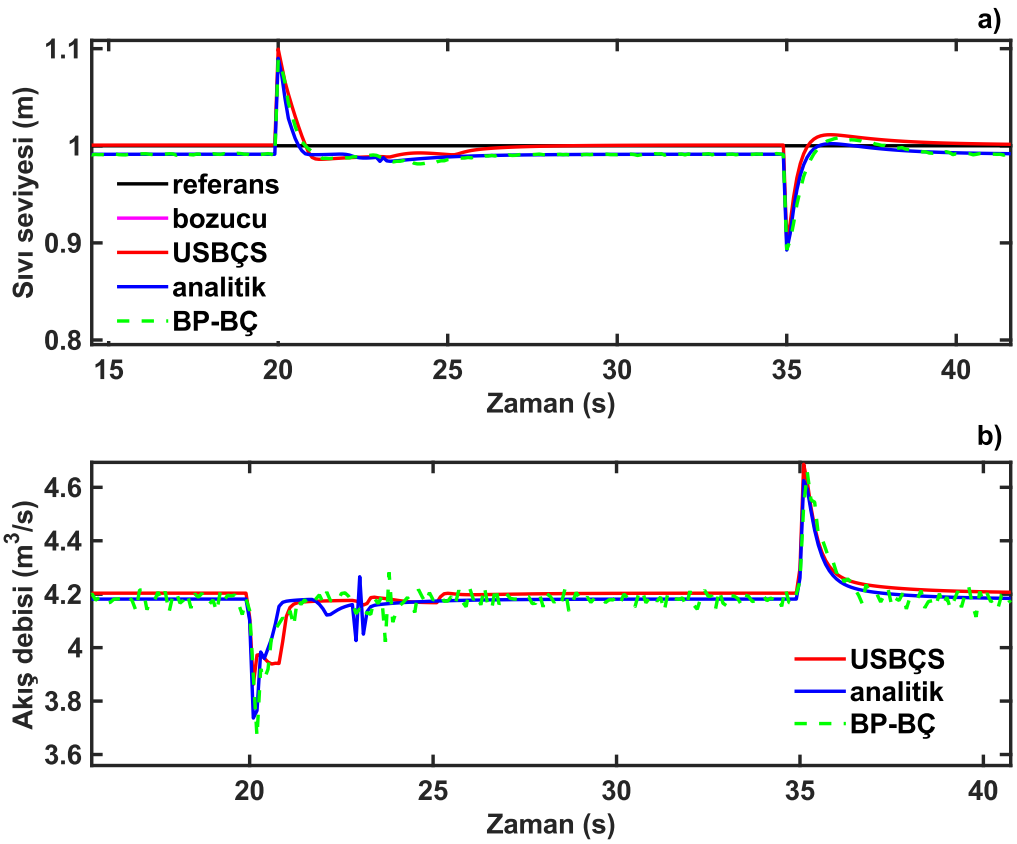
Şekil 4.10 ve Tablo 4.4'te görüldüğü gibi tüm ters kontrolörler doğrusal olmayan bu sistemin kontrolünde iyi derecede başarım sergilemektedirler. Başarım

sonuçlarına göre en üstün başarımı analitik tabanlı ters kontrolör göstermektedir. USBÇS tabanlı ters kontrolörün sağladığı başarım BP-BÇ tabanlı ters kontrolörün sahip olduğu başarımdan daha iyidir.

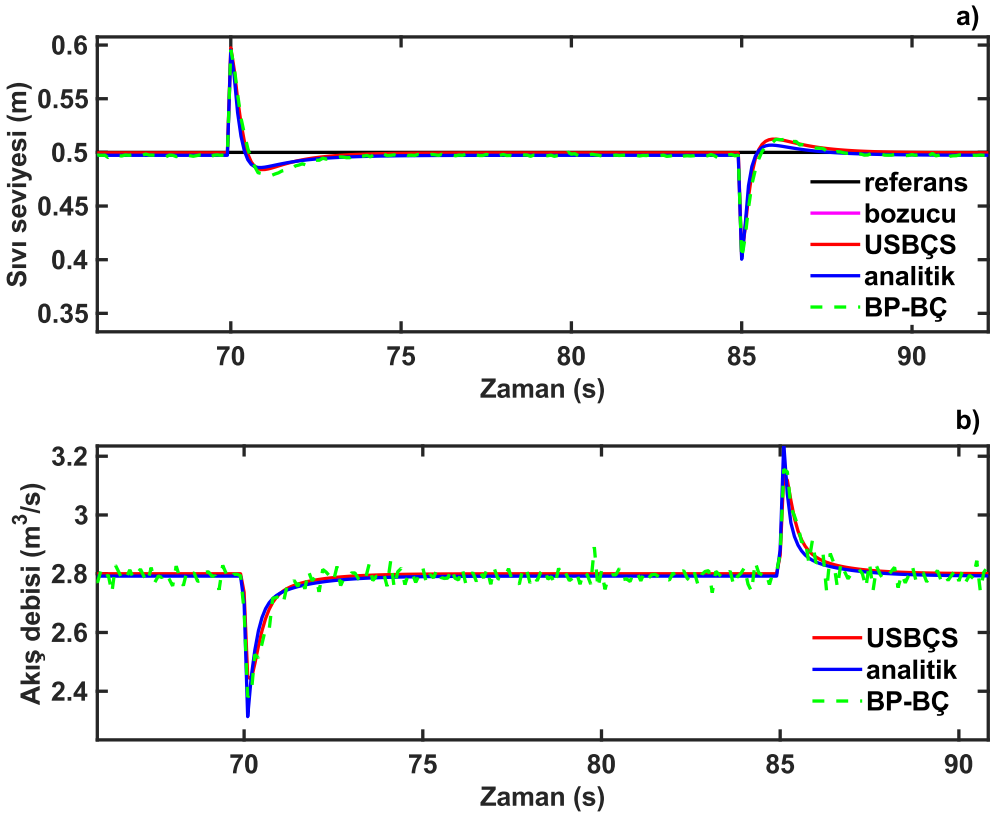
Ters kontrolörlerin bozuculara karşı gürbüzlük başarımını değerlendirmek için sisteme giriş ve çıkış bozucularının etki etmesi durumları göz önüne alınmıştır. Farklı referans değerlerinde sisteme 0.1 m değerinde çıkış bozucusu uygulanmış ve kontrolörlerin gösterdiği gürbüzlük başarımları Şekil 4.14 ve Tablo 4.5'te sunulmuştur. Uygulanan referans işareti, karşılık gelen sistem cevabı ve sisteme uygulanan çıkış bozucu işareti Şekil 4.14a'da gösterilmiştir. Elde edilen kontrol işaretleri Şekil 4.14b'de sunulmuştur. İlgili referans değişimi bölgelerinin yakınlaştırılmış halleri sırasıyla Şekil 4.15, Sekil 4.16 ve Şekil 4.17'de gösterilmiştir.



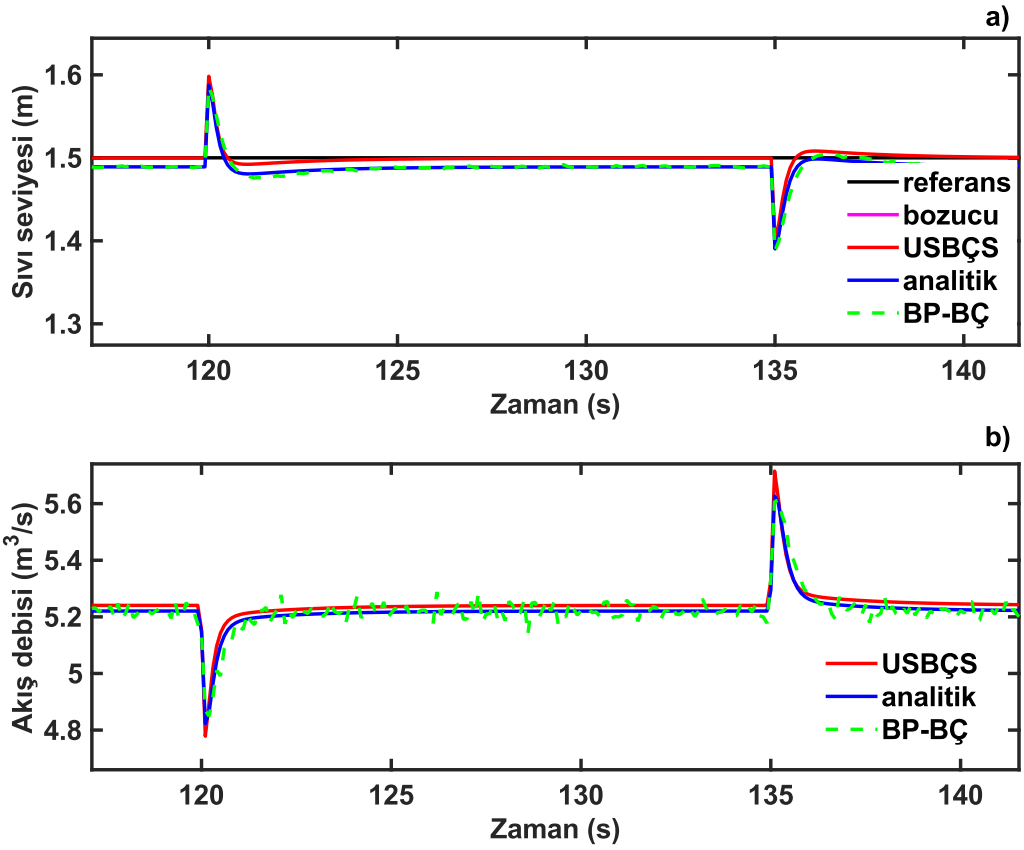
Şekil 4. 14 a) Çıkış bozucusu koşulu altında sistem cevapları karşılaştırması b) kontrol işaretleri



Şekil 4. 15 Referans değeri 1 m iken çıkış bozucusu altında Şekil 4.14'te gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 16 Referans değeri 0.5 m iken çıkış bozucusu altında Şekil 4.14'te gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 17 Referans değeri 1.5 m iken çıkış bozucusu altında Şekil 4.14' te gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali

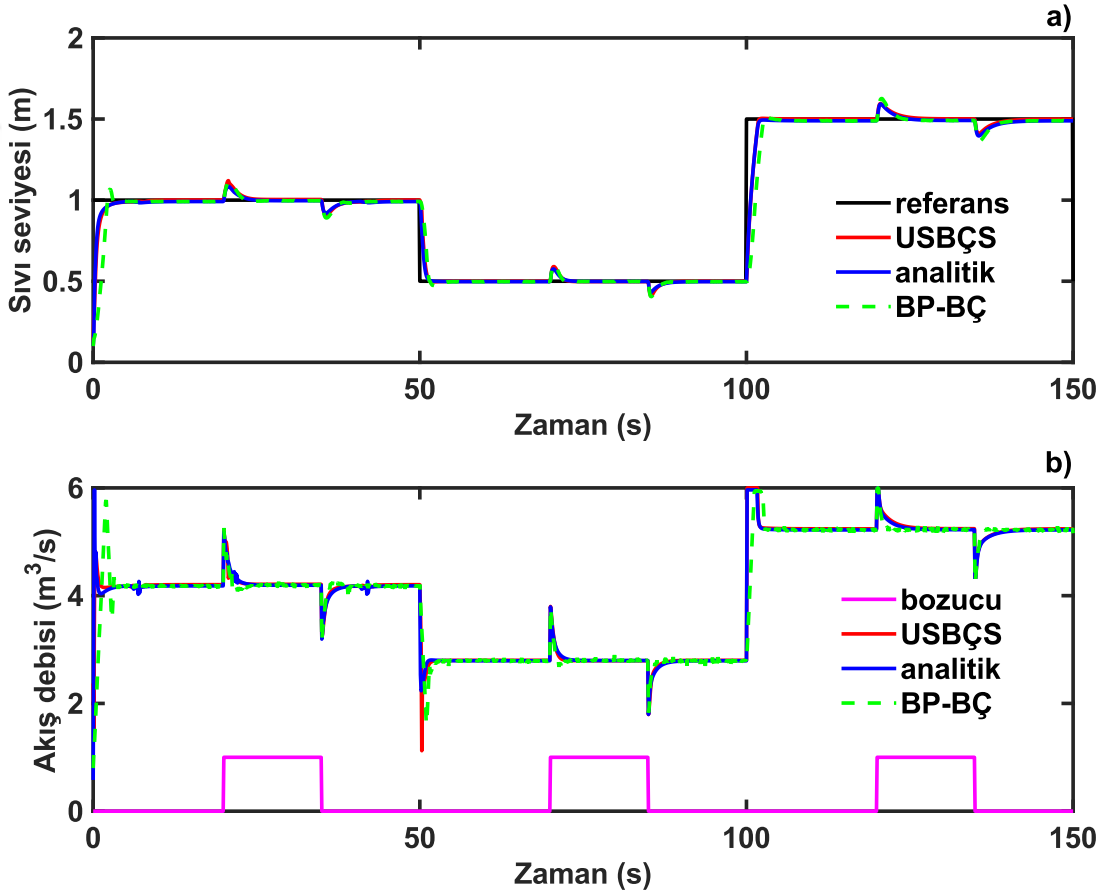
Tablo 4. 5 Çıkış bozucusu koşulu altında başarım karşılaştırması

	İKH
USBÇS Ters Kontrolör	0.759
Analitik Ters Kontrolör	0.7073
BP-BÇ Ters Kontrolör	2.027

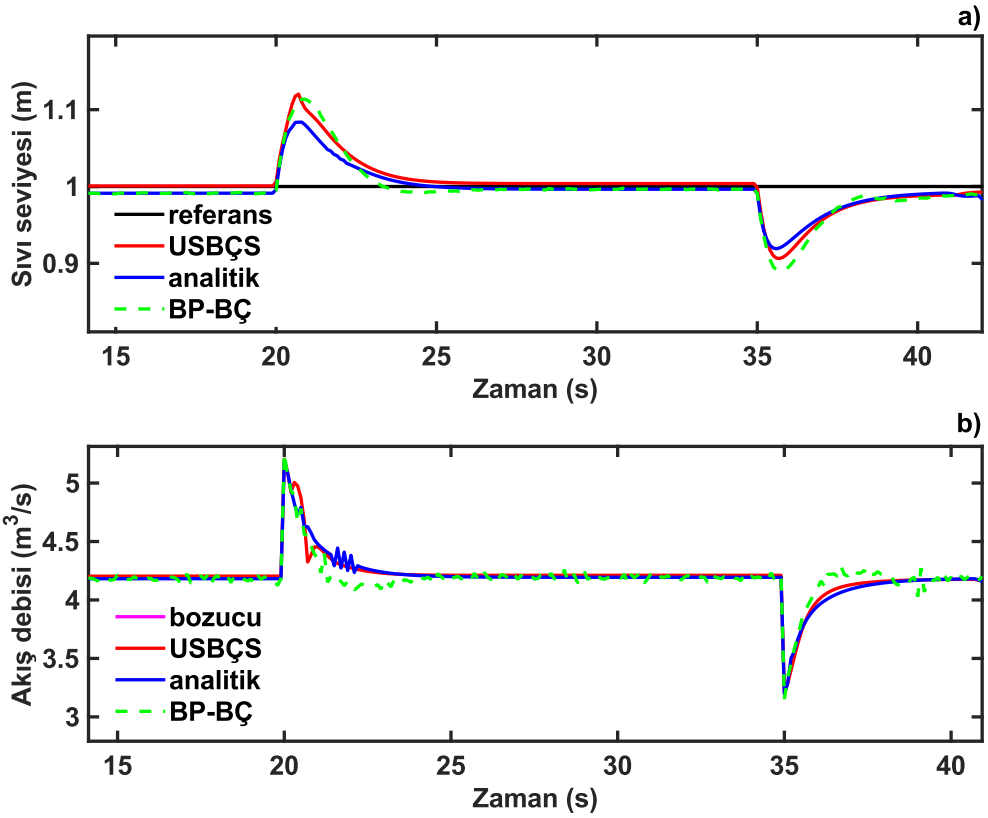
Sisteme çıkış bozucuları etkimesi durumunda ters kontrolörlerin sağladığı gürbüzlük başarımı incelendiğinde, Şekil 4.14 ve Tablo 4.5' ten görüldüğü gibi, en üstün gürbüzlük başarımını analitik tabanlı ters kontrolörün sergilediği görülmektedir. En düşük gürbüzlük başarımını BP-BÇ tabanlı ters kontrolör

sergilerken USÇBS tabanlı ters kontrolör analitik tabanlı ters kontrolörünkine benzer bir gürbüzlük başarımı göstermiştir.

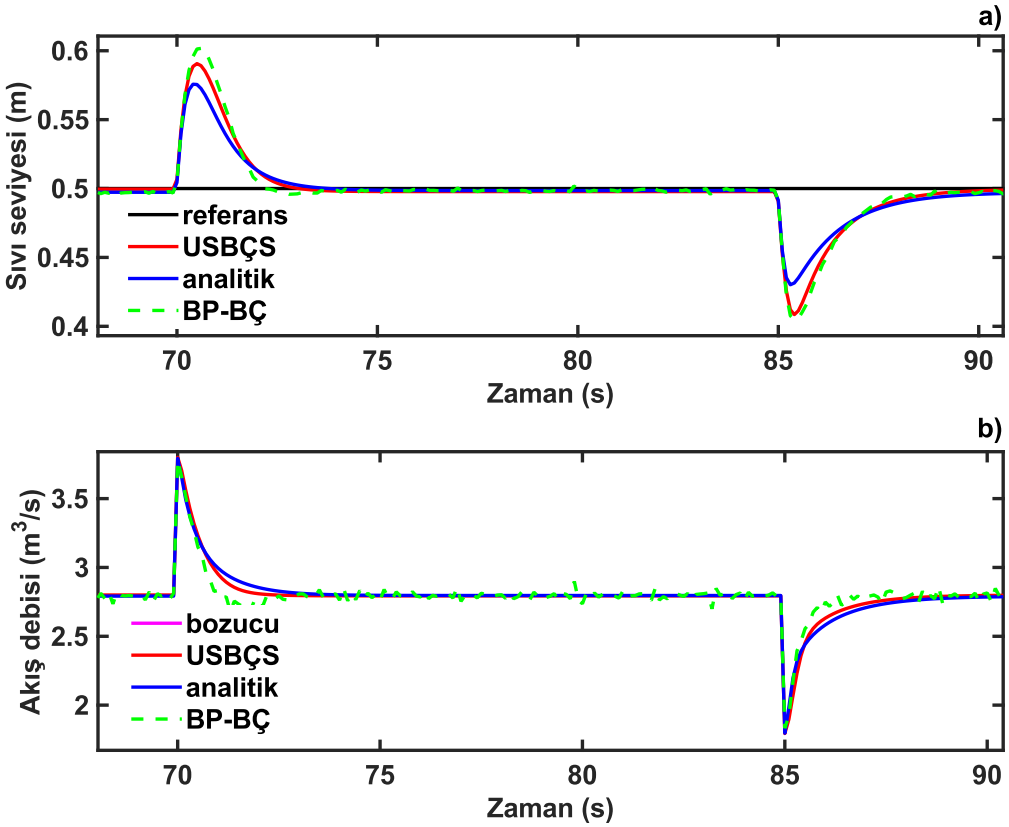
Sisteme 1 m^3/s değerinde giriş bozucuları etki etmesi durumunda kontrolörlerin gürbüzlük başarımları Şekil 4.18 ve Tablo 4.6'da sunulmuştur. Uygulanan referans işareti ve karşılık gelen sistem cevabı Şekil 4.18a'da gösterilmiştir. Kontrol işareti ve sisteme etkiyen giriş bozucusu Şekil 4.18b'de verilmiştir. Ayrıca ilgili referans değişimi bölgelerinin yakınlaştırılmış halleri sırasıyla Şekil 4.19, Sekil 4.20 ve Şekil 4.21'de gösterilmiştir.



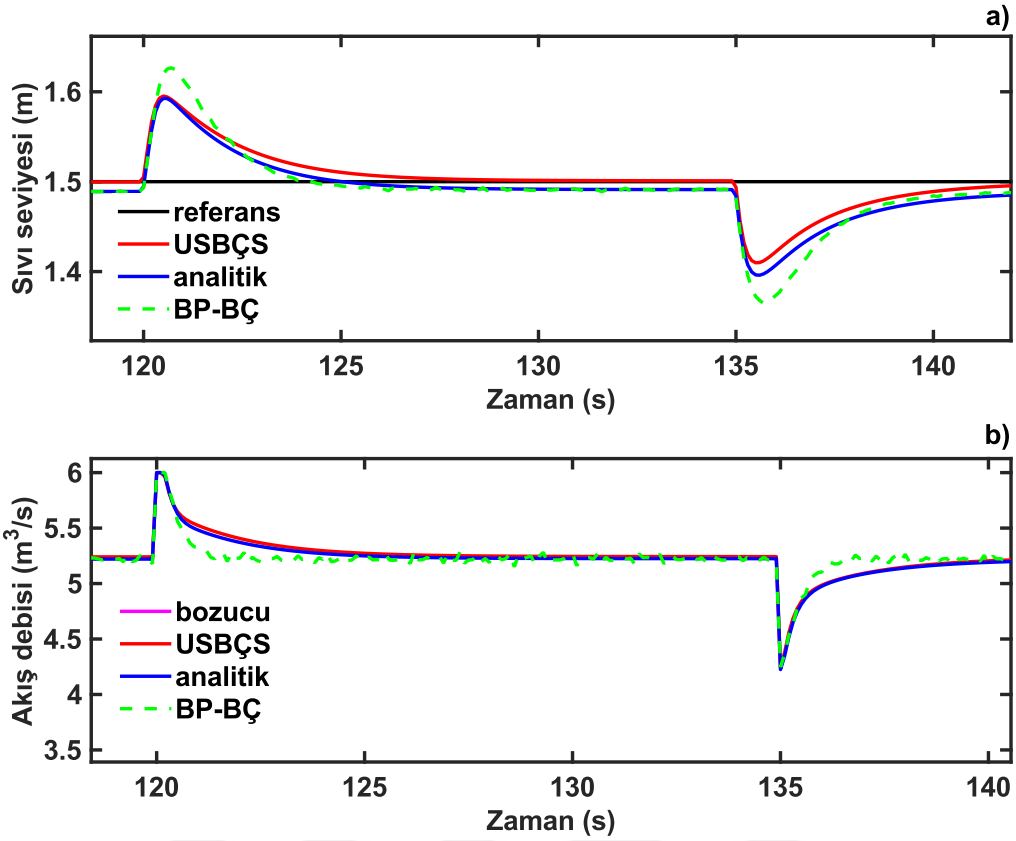
Şekil 4. 18 a) Giriş bozucusu koşulu altında sistem cevapları karşılaştırması b) kontrol işaretleri



Şekil 4. 19 Referans değeri 1 m iken giriş bozucusu altında Şekil 4.18' de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 20 Referans değeri 0.5 m iken giriş bozucusu altında Şekil 4.18' de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 21 Referans değeri 1.5 m iken giriş bozucusu altında Şekil 4.18' de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali

Tablo 4. 6 Giriş bozucusu koşulu altında başarım karşılaştırması

	İKH
USBÇS Ters Kontrolör	0.8172
Analitik Ters Kontrolör	0.7552
BP-BÇ Ters Kontrolör	2.087

Şekil 4.18 ve Tablo 4.6' dan görüldüğü gibi sisteme giriş bozucularının etkimesi durumunda da en üstün gürbüzlük başarımını analitik tabanlı ters kontrolör göstermektedir. USBÇS tabanlı ters kontrolör analitik tabanlı ters kontrolöre göre

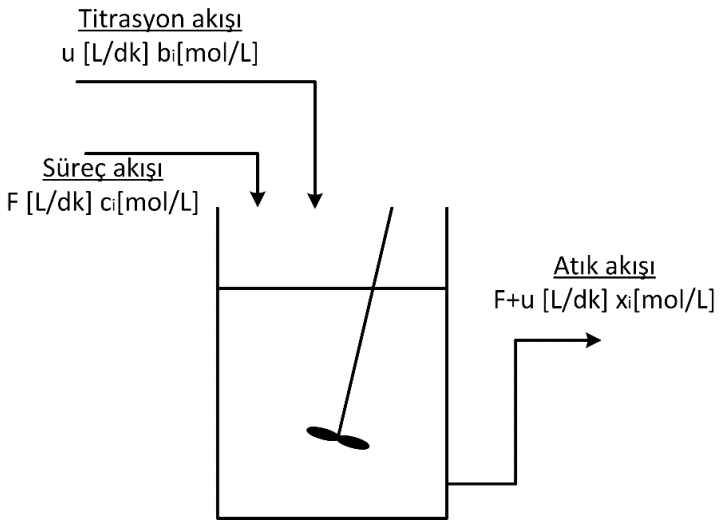
görece daha düşük bir gürbüzlük performansı gösterirken BP-BÇ tabanlı ters kontrolör en düşük gürbüzlük başarımını sergilemektedir.

4.2 pH Nötralizasyon Prosesi Üzerinde Gerçekleştirilen Başarım Karşılaştırması

Doğrusal olmayan pH nötralizasyon prosesi asitler ve bazlar arasındaki reaksiyonları içeren bir sistemdir. Bu çalışmada, kuvvetli asit ve zayıf asit karışımı ile kuvvetli baz arasındaki nötrleşme reaksiyonu, doğrusal olmama özelliğinden dolayı bir sistem modeli olarak ele alınmıştır. Şekil 4.22'de sürekli karıştırılan tank reaktöründeki nötralizasyon süreci gösterilmektedir. Tank reaktörü içinde ideal karışımın olduğu varsayılır. Baz konsantrasyonu asit konsantrasyonlarına göre nispeten yüksek olduğundan, tankta sabit bir sıvı seviyesi olduğu varsayılır. Buna göre model şu şekilde yazılabilir:

$$V\frac{dx_i}{dt} = F(c_i - x_i) + u(b_i - x_i) \qquad i = 1,\ldots n \tag{4.9}$$

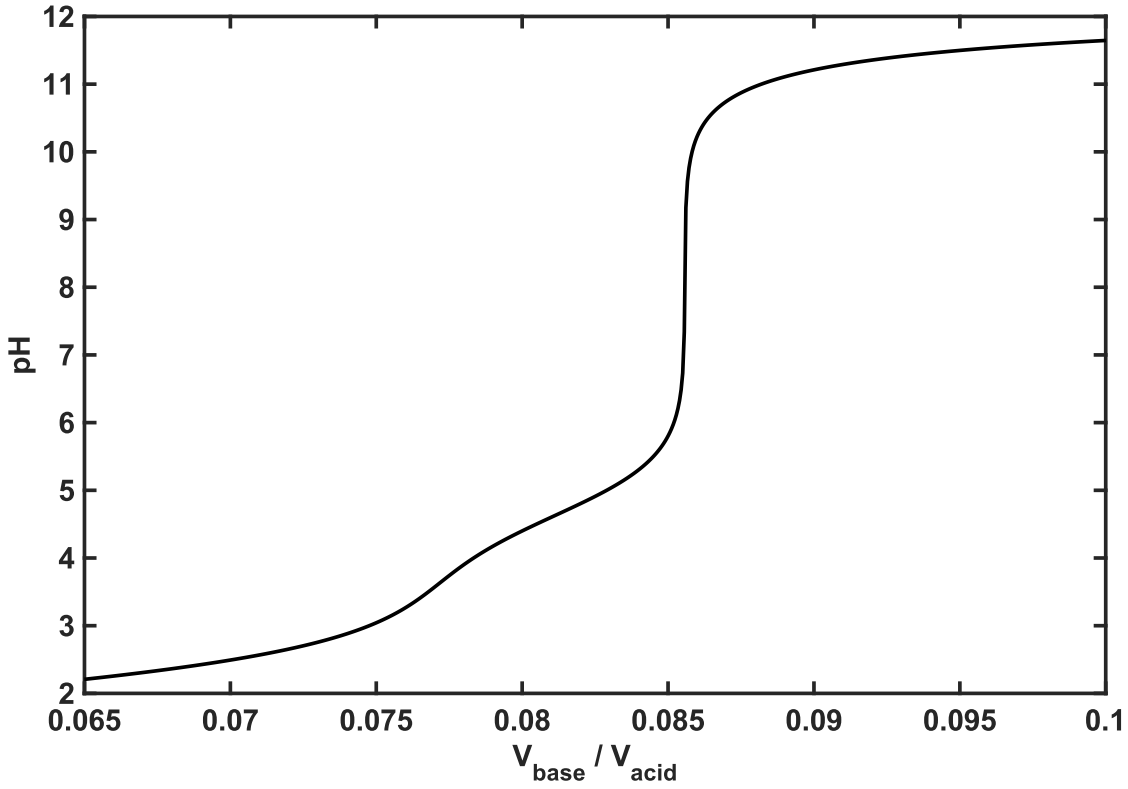
burada c_i, b_i, ve x_i Şekil 4.22'de gösterilen akışlardaki toplam iyon konsantrasyonunu temsil etmektedir. Sabit bir sıvı seviyesi varsayımı nedeniyle, burada tank içindeki sıvı hacmi sabiti V ile sembolize edilir. Benzetimde kullanılan model parametreleri Tablo 4.7'de verilmiştir. Titrasyon eğrisi Şekil 4.23'te gösterildiği gibidir.



Şekil 4. 22 pH nötralizasyon prosesi

Tablo 4. 7 pH nötralizasyon prosesinin parametreleri

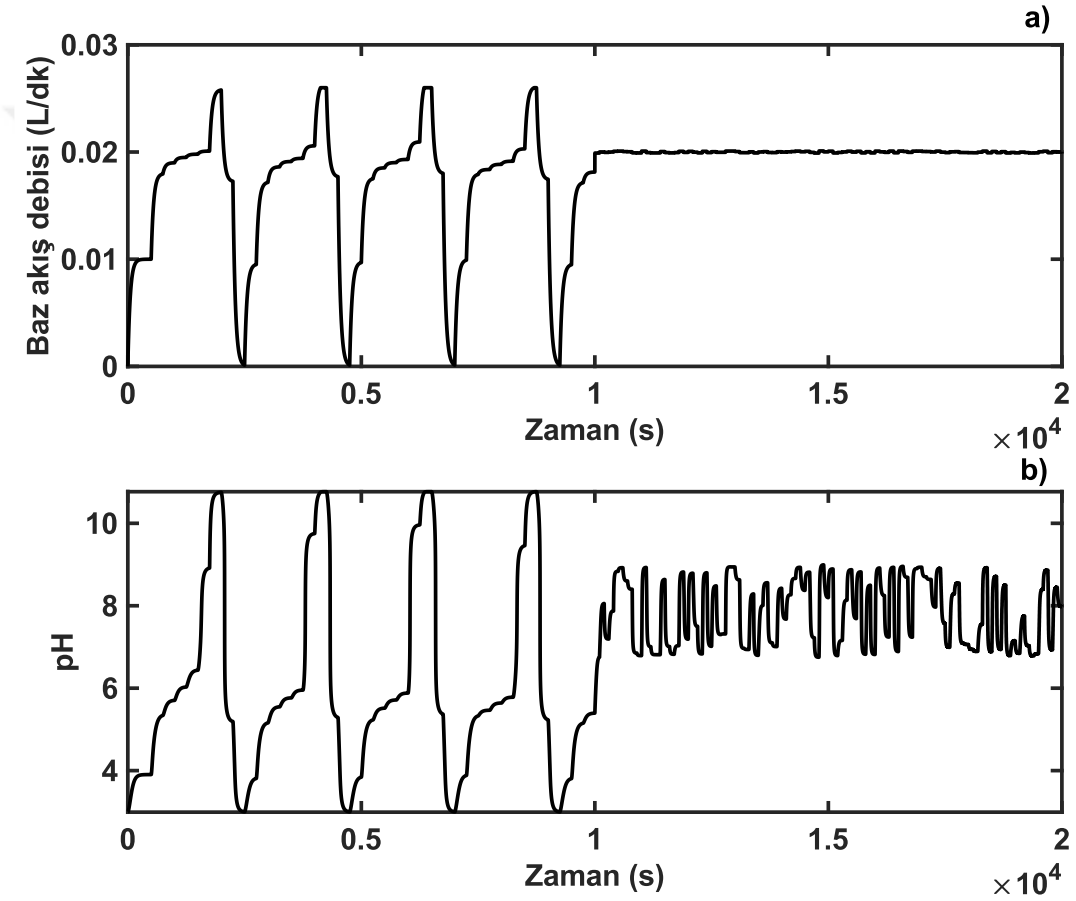
Sembol	Parametreler	Değer
V	Hacim [L]	1
F	Süreç akışı oranı [L/dk]	1
u	Titrasyon akışı oranı [L/dk]	0-0.27
c_i	Süreç akışının total iyon konsantrasyon vektörü [C_{a1} C_{a2} C_b] [mol/L]	[0.001 0.001 0]
b_i	Titrasyon akışının total iyon konsantrasyon vektörü [C_{a1} C_{a2} C_b] [mol/L]	[0 0 0.1]



Şekil 4. 23 pH titrasyon eğrisi

4.2.1 pH Nötralizasyon Prosesinin Bulanık Modellenmesi

pH nötralizasyon prosesinin bulanık modellenmesi için ANFIS/Matlab paket programından yararlanılmıştır. Tank sisteminin bulanık modelini oluşturmak için Şekil 4.24a'da verilen uyarma işareti sistem girişine uygulanmıştır. Bu giriş işareti ve karşılık gelen sistem çıkış işareti kaydedilmiştir. Veriler 20000 s boyunca toplanmış ve örnekleme süresi 1 s olarak seçilmiştir. Uygulanan uyarma işaretine karşılık gelen sistem çıkış işareti Şekil 4.24b' de gösterilmektedir.



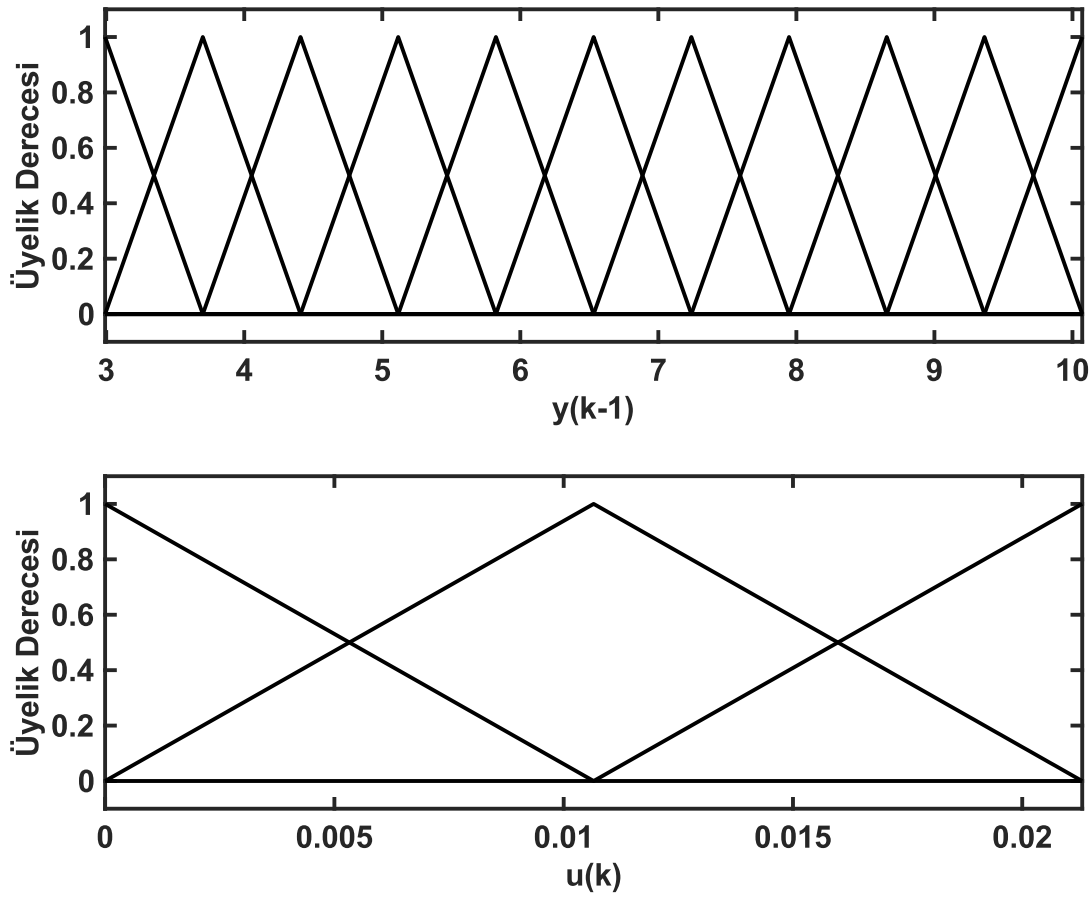
Şekil 4. 24 (a) Uyarma işareti (b) sistem çıkış işareti

Daha sonra bu giriş-çıkış veri seti Matlab/ANFIS paket programında eğitilerek prosesin ileri yol bulanık modeli elde edilmiştir. Tasarım basitliği sağlamak ve hesaplama yükünü azaltmak için girişleri *y(k-1)* ve *u(k)* çıkışı ise *y(k)* olan iki-girişli-tek-çıkışlı bir Takagi-Sugeno bulanık model yapısı tercih edilmiştir. Bulanık modelin *y(k-1)* girişi için 11 üçgen üyelik fonksiyonu, *u(k)* girişi için 3 üçgen üyelik fonksiyonu ve *y(k)* çıkışı için 11x3=33 tekil üyelik fonksiyonu kullanılmıştır.

Verilerin ilk %75'lik kısmı eğitim süreci için, geri kalan veriler ise doğrulama süreci için kullanılmıştır. Eğitilmiş bulanık modelin üyelik fonksiyonları ve kural tablosu sırasıyla Tablo 4.8 ve Şekil 4.25'te sunulmuştur.

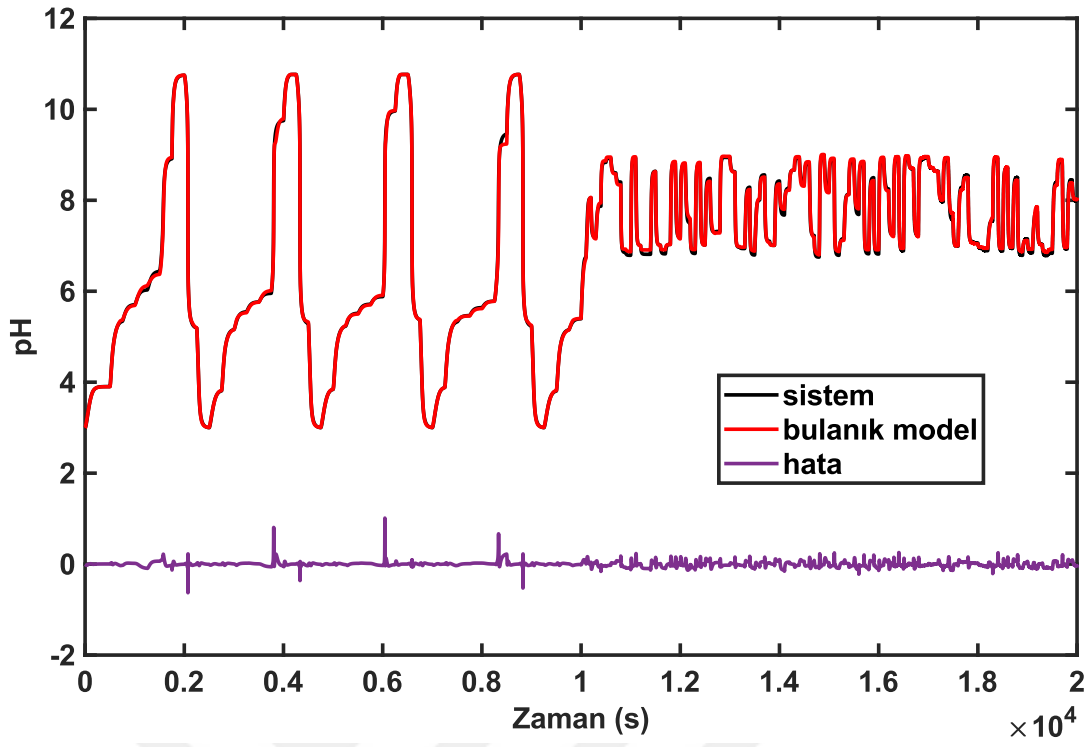
Tablo 4. 8 Bulanık Model Kural Tablosu

		u(k)		
		A1	A2	A3
y(k-1)	A1	2.993	3.046	0
	A2	3.69	3.815	3.52
	A3	4.386	4.565	4.665
	A4	5.241	5.272	5.49
	A5	0	5.83	6.486
	A6	0	5.14	8.818
	A7	0	-1.4	17.29
	A8	0	1.523	15.72
	A9	0	8.368	10.1
	A10	0	9.916	10.13
	A11	0	10.76	10.82



Şekil 4. 25 Eğitilmiş bulanık modelin giriş üyelik fonksiyonları

pH nötralizasyon prosesi çıkış işareti ile oluşturulan bulanık modelin çıkış işaretinin karşılaştırılması ve elde edilen modelleme hatası sırasıyla Şekil 4.26a ve 4.26b'de gösterilmiştir. Elde edilen bulanık model için karesel hataların ortalamasının kare kökü (KHOKK) değeri $9.2\ x\ 10^{-3}$ şeklindedir. Bu değer kabul edilebilir bir modelleme doğruluğu elde edildiğini göstermektedir.



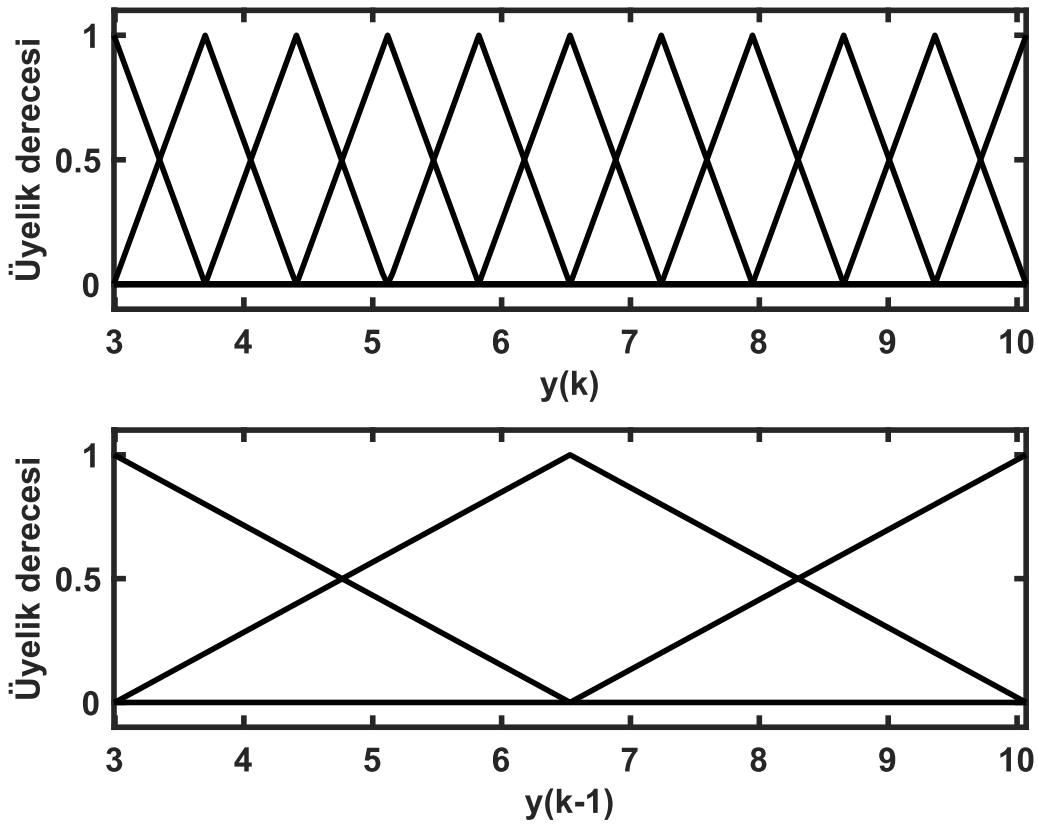
Şekil 4. 26 (a) Sistem çıkışı ve bulanık model çıkışı karşılaştırması (b) modelleme hatası

4.2.2 Sistem Bulanık Modeline Dayalı Ters Kontrolör Tasarımı

Ters alma yöntemleri ile tasarlanmış ters kontrolörler küresel tank sıvı seviye sistemi kontrolü örneğinde olduğu gibi pH nötralizasyon prosesi kontrolü örneğinde de İMK yapısı içinde ana kontrolcü olarak kullanılmıştır.

4.2.2.1 USBÇS Tabanlı Ters Kontrolör Tasarımı

USBÇS tabanlı ters kontrolör tasarımında sistemin bulanık modellenmesi için toplanılan veri setinde *y(k)* ve *y(k-1)* girdi olarak ve *u(k)* çıktı olarak düzenlenerek yeni bir veri seti elde edilmiştir. Ters kontrolör bu yeni veri setine dayalı olarak Matlab/ANFIS paket programında eğitilmiştir. Ters kontrolör, *y(k)* girişi için 11 üçgen üyelik fonksiyonuna, *y(k-1)* girişi için 3 üçgen üyelik fonksiyonuna ve çıkış için 33 doğrusal üyelik fonksiyonuna sahiptir. Modelleme sürecinde olduğu gibi, verilerin ilk %75'i eğitim ve geri kalan veriler doğrulama sürecinde kullanılmıştır. Eğitilmiş ters kontrolörün üyelik fonksiyonları ve kural tablosu sırasıyla Şekil 4.27 ve Tablo 4.9'da gösterilmektedir. Tablo 4.9' da [a b c] şeklinde belirtilen değerler $u(k) = ay(k) + by(k-1) + c$ şeklindeki çıkış doğrusal üyelik fonksiyonlarının parametrelerini ifade etmektedir.

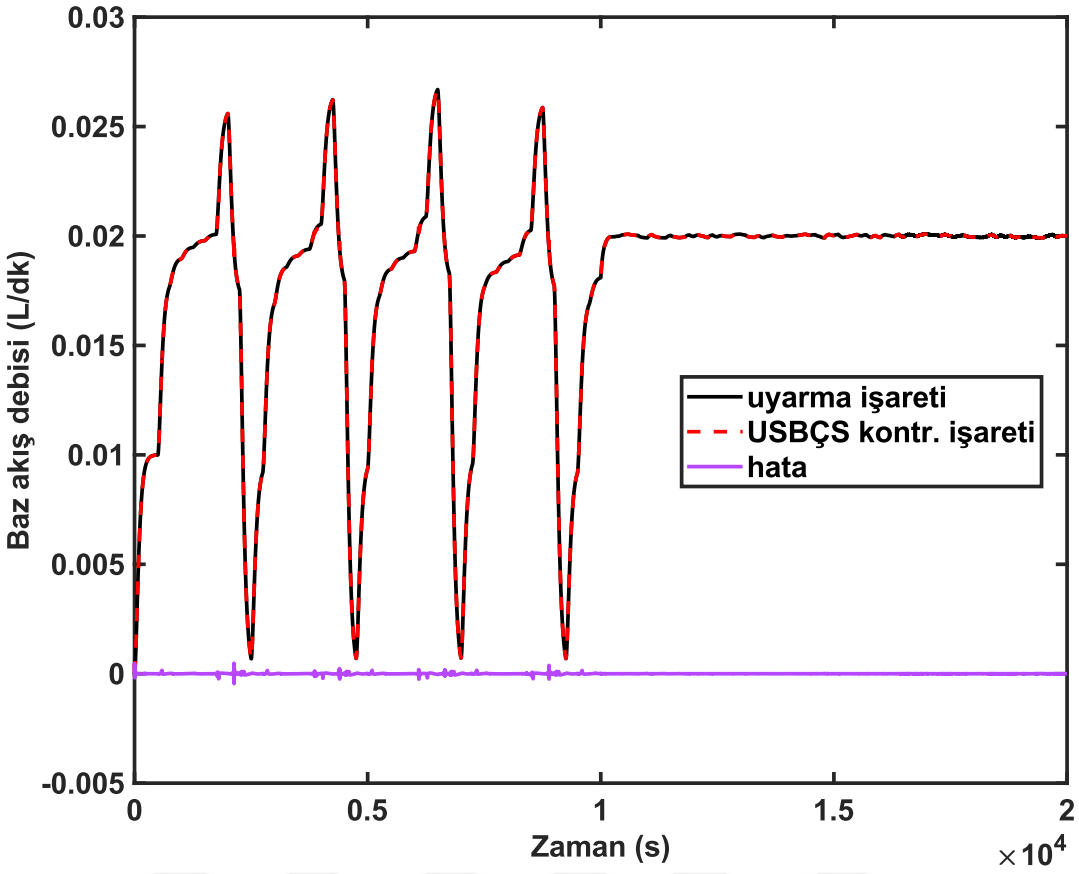


Şekil 4. 27 Eğitilmiş ters kontrolörün giriş üyelik fonksiyonları

Tablo 4. 9 USBÇS tabanlı ters kontrolörün kural tablosu

		y(k-1)		
		A1	A2	A3
y(k)	A1	[0.34 -0.31 -0.11]	[-0.006 0.026 -0.17]	[0 0 0]
	A2	[0.11 -0.1 0.004]	[0.03 -0.02 -0.02]	[0 0 0]
	A3	[0.05 -0.04 0.004]	[0.14 -0.14 -0.03]	[0 0 0]
	A4	[0.14 -0.14 0.006	[0.03 -0.03 -0.03]	[0 0 0]
	A5	[0.07 -0.07 0.02]	[0.02 -0.01 -0.02]	[-0.008 -0.009 -0.001]
	A6	[-0.001 0.002 0.03]	[0.009 -0.002 -0.02]	[-0.01 0.02 -0.02]
	A7	[0.02 0.01 0.002]	[0.005 -0.001 -0.009]	[-0.002 0.003 0.007]
	A8	[0 0 0]	[0.004 -0.0002 -0.01]	[0.0004 0.001 0.006]
	A9	[0 0 0]	[0.003 0.0008 -0.01]	[0.004 -0.002 0.006]
	A10	[0 0 0]	[-0.009 0.01 -0.009]	[0.01 -0.01 0.006]
	A11	[0 0 0]	[-0.08 0.08 0.004]	[0.04 -0.04 0.002]

Eğitilmiş ters kontrolörün doğrulaması için sisteme uygulanan giriş işaretine karşı elde edilen çıkış işareti kaydedilip ters kontrolöre referans giriş olarak verilmiştir. Sisteme uygulanan giriş işareti ile ters kontrolörün ürettiği kontrol işareti karşılaştırması ve ters kontrolörün ürettiği kontrol işareti ile uygulanan giriş işareti arasındaki hata Şekil 4.28'de verilmiştir. Tasarlanan ters kontrolör için KHOKK değeri $7.11\ x\ 10^{-5}$ şeklindedir. Bu değer kabul edilebilir bir doğruluktadır.



Şekil 4. 28 Sisteme uygulanan giriş işareti ve USBÇS ters kontrolörün çıkış işareti karşılaştırması

İMK yapısında gösterilen gürbüz filtre olarak aşağıda gösterilen birinci dereceden filtre seçilmiştir.

$$G_f(z) = \frac{0.02817}{z-0.9718} \tag{4.10}$$

4.2.3.2 Analitik Tabanlı Ters Kontrolör Tasarımı

Analitik tabanlı ters kontrolör tasarımı için sistem bulanık modelinin öncelikle her bir alt sistemi için analitik ifadesi elde edilmiştir. Bu analitik ifadeler kullanılarak kontrol işareti *u(k)*'ya göre her bir bulanık alt sistemin analitik ters alma işlemi gerçekleştirilmiştir. İlgili bulanık alt sistemler için elde edilen analitik ters ifadeleri aşağıdaki gibidir.

$TS^{1,1}$: $$u(k) = \frac{y\,(k)-0.890139y(k-1)-0.329624}{6.8365y(k-1)-16.515} \tag{4.11}$$

$TS^{1,2}$: $$u(k) = \frac{y(k)+2.534y(k-1)-13.676}{261.4061y(k-1)-1008.789} \tag{4.12}$$

$TS^{2,1}$: $$u(k) = \frac{y(k) - 0.887748y(k-1) - 0.33869}{5.12097y(k-1) - 10.0383} \quad (4.13)$$

$TS^{2,2}$: $$u(k) = \frac{y(k) - 0.452428y(k-1) - 2.40227}{37.4868y(k-1) - 163.465} \quad (4.14)$$

$TS^{3,1}$: $$u(k) = \frac{y(k) - 1.09192y(k-1) + 0.592238}{-14.0528y(k-1) + 77.377} \quad (4.15)$$

$TS^{3,2}$: $$u(k) = \frac{y(k) - 0.7521y(k-1) - 1.03598}{11.2126y(k-1) - 43.6797} \quad (4.16)$$

$TS^{4,1}$: $$u(k) = \frac{y(k) + 6.685y(k-1) - 40.95}{549.935y(k-1) - 2935.482} \quad (4.17)$$

$TS^{4,2}$: $$u(k) = \frac{y(k) - 4.2384y(k-1) - 0.152644}{41.5676y(k-1) - 205.837} \quad (4.18)$$

$TS^{5,1}$: $$u(k) = \frac{y(k)}{-65.5167y(k-1) - 834.827} \quad (4.19)$$

$TS^{5,2}$: $$u(k) = \frac{y(k) - 4.74347y(k-1) - 34.233}{287.157y(k-1) - 1710.38} \quad (4.20)$$

$TS^{6,1}$: $$u(k) = \frac{y(k)}{-620.984y(k-1) + 4672.69} \quad (4.21)$$

$TS^{6,2}$: $$u(k) = \frac{y(k) + 27.5383y(k-1) - 191.728}{1426.48y(k-1) - 9582.21} \quad (4.22)$$

$TS^{7,1}$: $$u(k) = \frac{y(k)}{277.196y(k-1) - 2236.2719} \quad (4.23)$$

$TS^{7,2}$: $$u(k) = \frac{y(k) - 9.46337y(k-1) + 92.8925}{-426.4y(k-1) + 4670.24} \quad (4.24)$$

$TS^{8,1}$: $$u(k) = \frac{y(k)}{649.944y(k-1) - 5395.8457} \quad (4.25)$$

$TS^{8,2}$: $$u(k) = \frac{-y(k) + 24.673y(k-1) - 221.816}{1184.45y(k-1) - 11096.03} \quad (4.26)$$

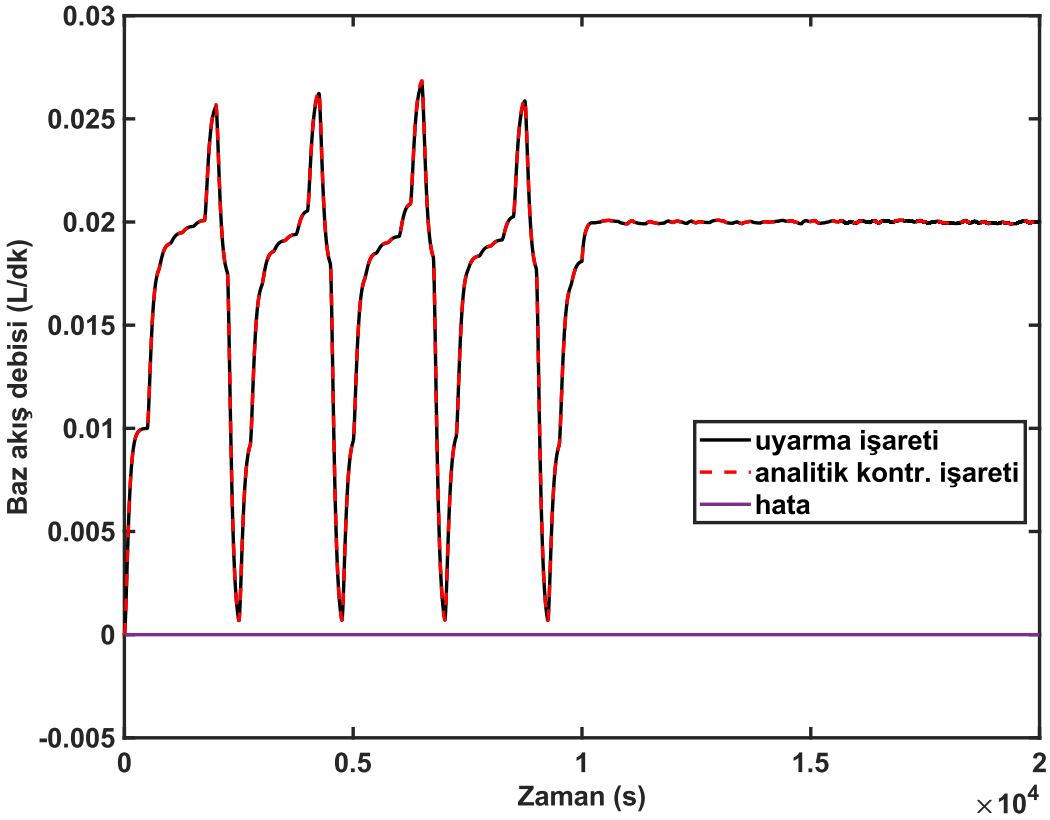
$TS^{9,1}$: $$u(k) = \frac{y(k)}{147.365y(k-1) - 742.27063} \quad (4.27)$$

$TS^{9,2}$: $$u(k) = \frac{-y(k) + 3.9271y(k-1) - 29.726108}{144.6166y(k-1) - 1467.849} \quad (4.28)$$

$TS^{10,1}$: $$u(k) = \frac{y(k)}{79.4301y(k-1) - 60.252491} \quad (4.29)$$

TS^{10,2}: $$u(k) = \frac{-y(k)+1.2634y(k-1)-2.9832}{14.504y(k-1)-161.547} \quad (4.30)$$

Bu alt sistem ters ifadeleri bir araya getirilerek analitik tabanlı ters kontrolör tasarlanmıştır. Aynı çözümü sağlayan birden fazla alt sistem olabildiğinden, bu tez çalışmasında seçim ölçütü olarak minimum enerji ölçütü kullanılmıştır. Analitik tabanlı ters kontrolörün doğrulaması Şekil 4.29'da gösterilmiştir.

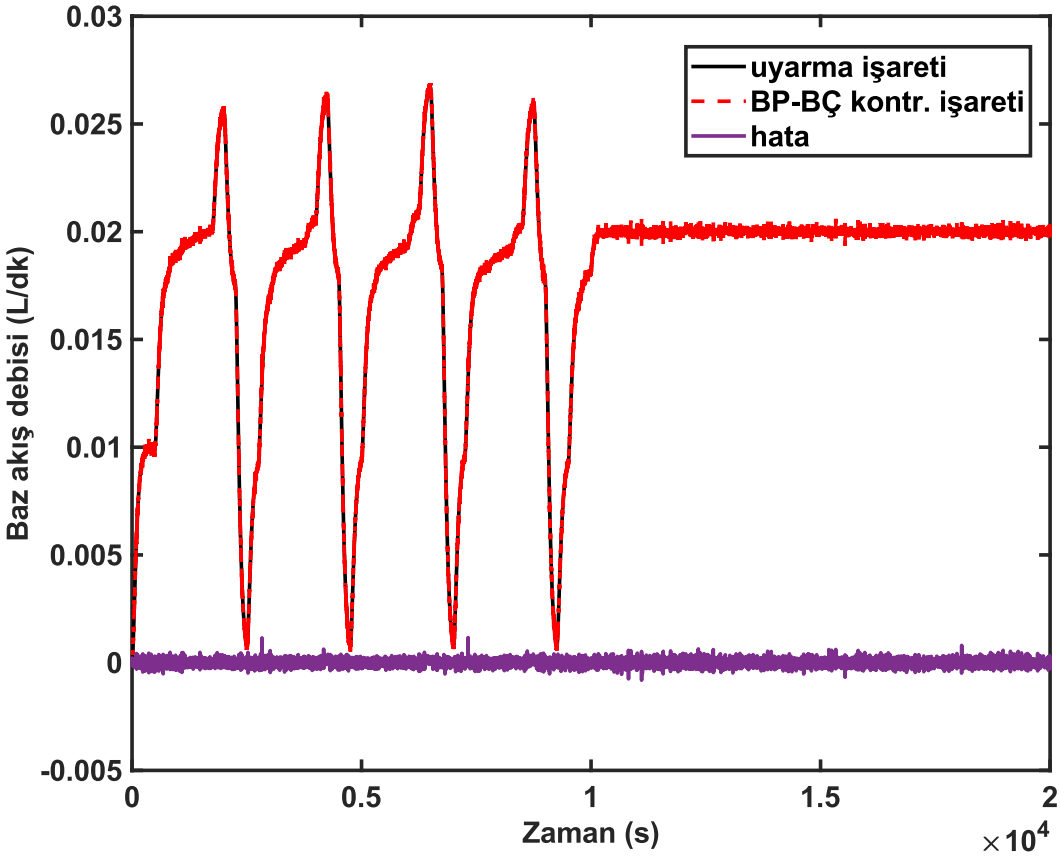


Şekil 4. 29 Sisteme uygulanan giriş işareti ve analitik ters kontrolör çıkış işareti karşılaştırması

Şekil 4.29'dan görüldüğü gibi ters kontrolör doğrudan bulanık modelin analitik tersi alınarak tasarlandığından kontrolör hatası oluşmamaktadır. İMK yapısı ve filtre seçimi USBÇS tabanlı ters kontrolör tasarımındakiyle aynıdır.

4.2.3.3 BP-BÇ En İyileme Algoritması Tabanlı Ters Kontrolör Tasarımı

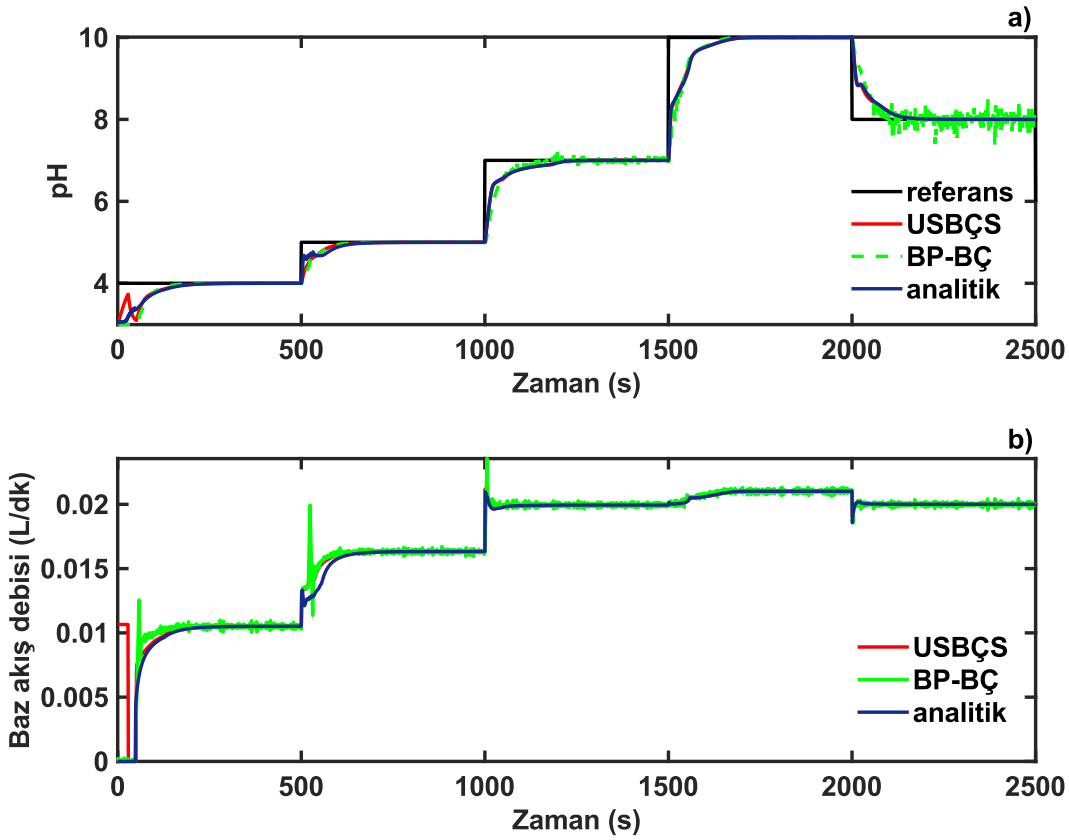
BP-BÇ en iyileme algoritması tabanlı ters kontrolör tasarımında popülasyon sayısı 20 ve iterasyon sayısı 100 olarak seçilmiştir. En iyilemede kullanılan başarım ölçütü $J_c = |ref - y_m(k)|$ şeklindedir. Şekil 4.30'da BP-BÇ tabanlı ters kontrolörün doğrulama sonucu gösterilmektedir. Tasarlanan ters kontrolör için KHOKK değeri 1.77×10^{-4} şeklindedir.



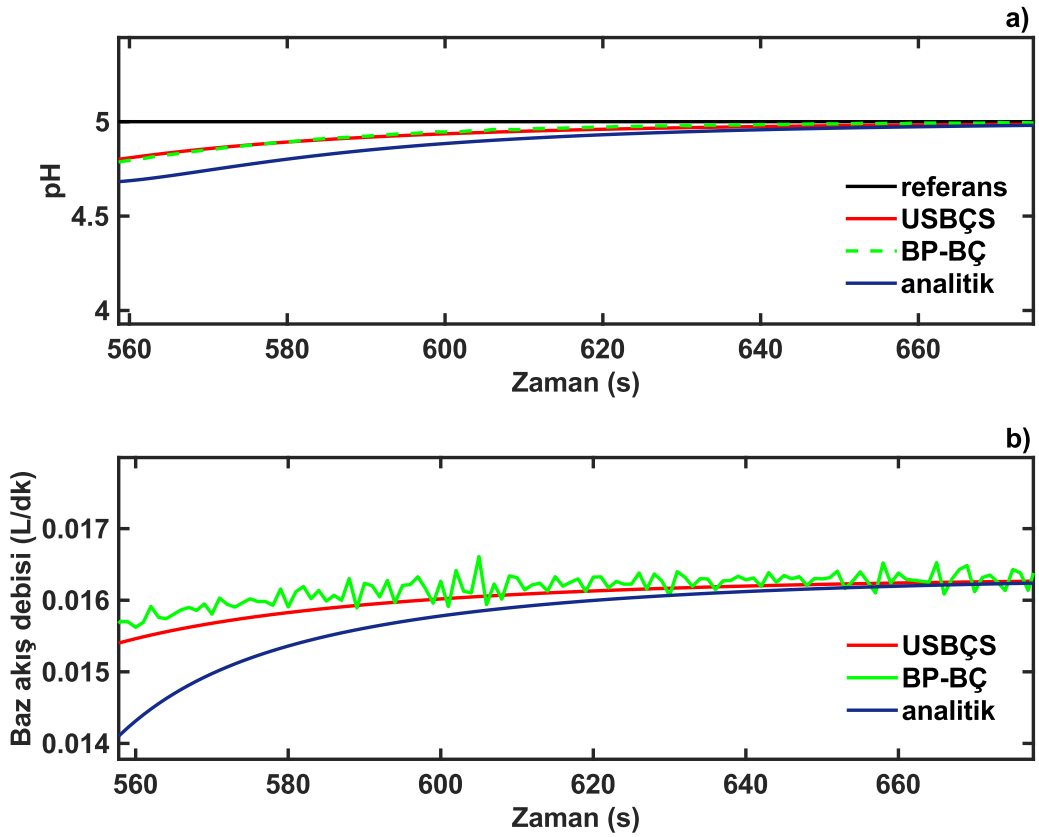
Şekil 4. 30 Sisteme uygulanan giriş işareti ve BP-BÇ tabanlı ters kontrolör çıkış işaretinin karşılaştırması

4.2.4 Benzetim Sonuçları

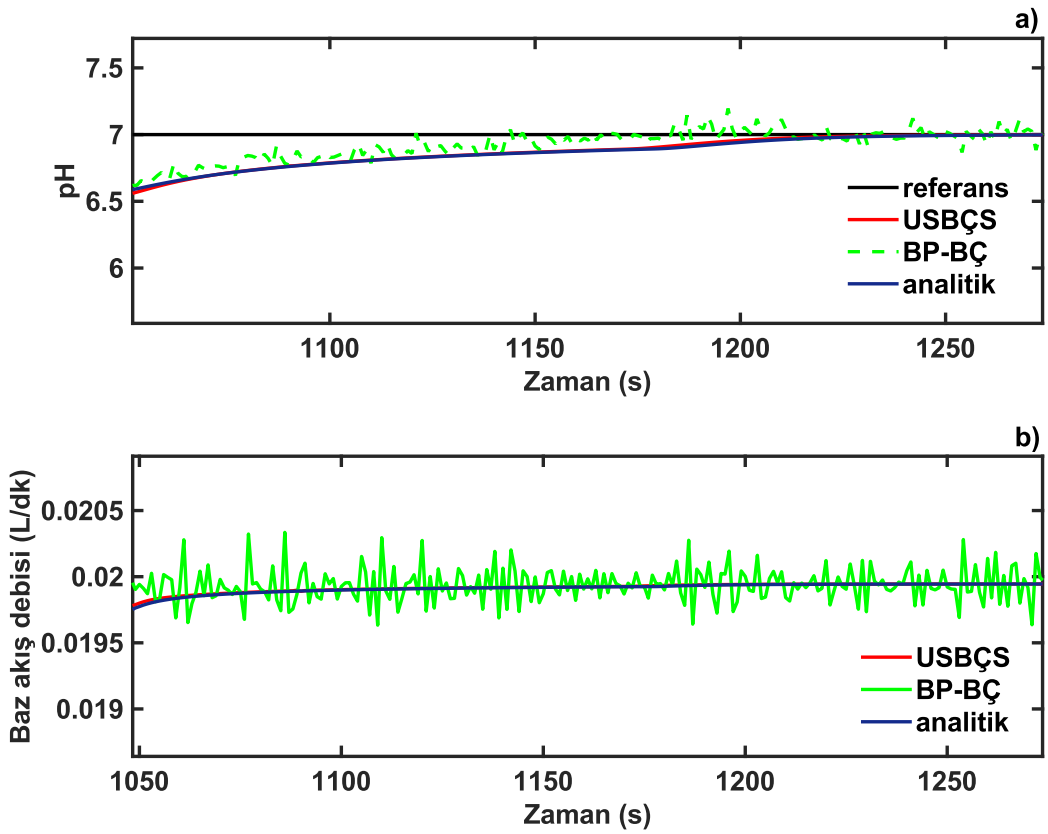
Ters kontrolörlerin başarımları referans değişimleri koşulu altında değerlendirilmiştir. Uygulanan referans işareti, karşılık gelen çıkış işaretleri ve kontrol işaretleri Şekil 4.31'de gösterilmektedir. Başarım karşılaştırma tablosu ise İKH başarım ölçütüne göre Tablo 4.10'da verilmiştir. Ayrıca ilgili referans değişimi bölgelerinin yakınlaştırılmış halleri sırasıyla Şekil 4.32, Sekil 4.33, Şekil 4.34 ve Şekil 4.35'te gösterilmiştir.



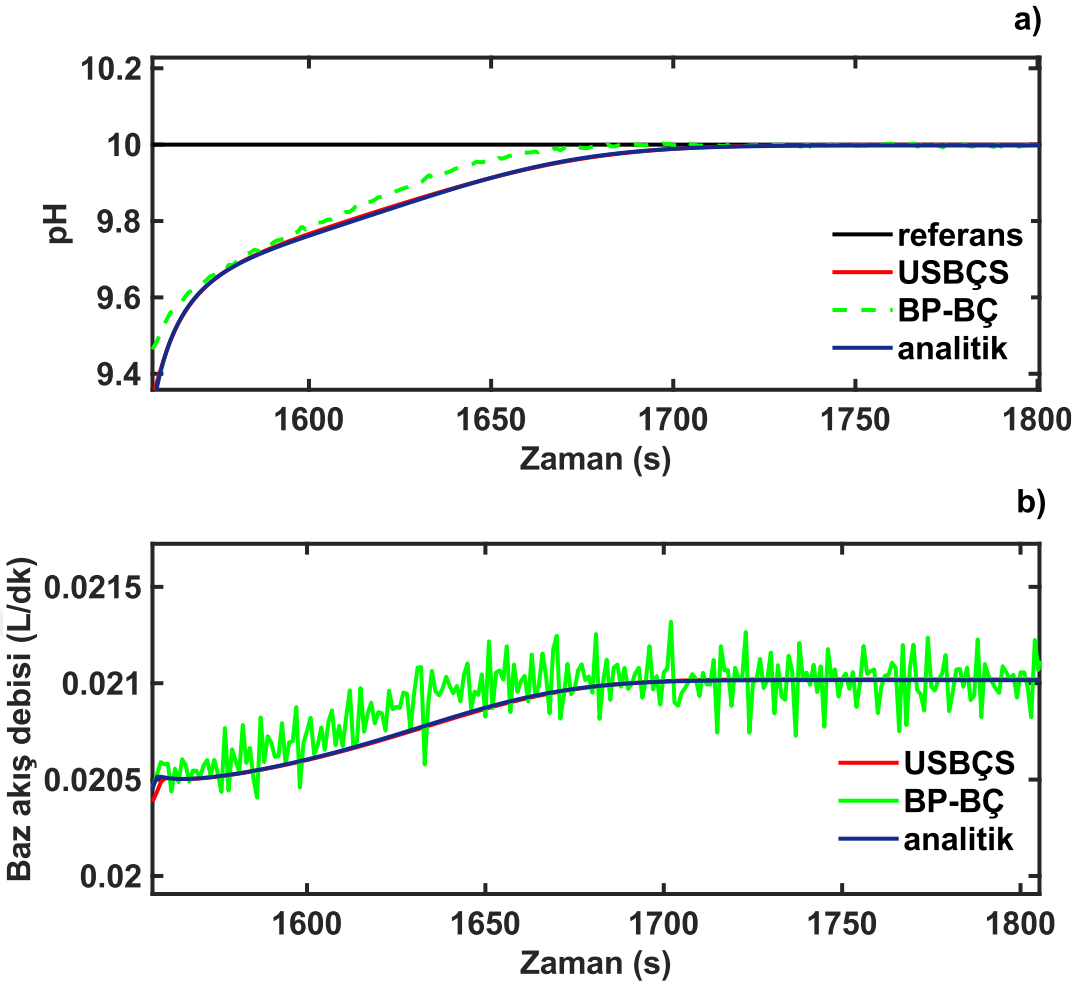
Şekil 4. 31 a) Referans değişimleri koşulu altında sistem cevaplarının karşılaştırılması b) kontrol işaretleri



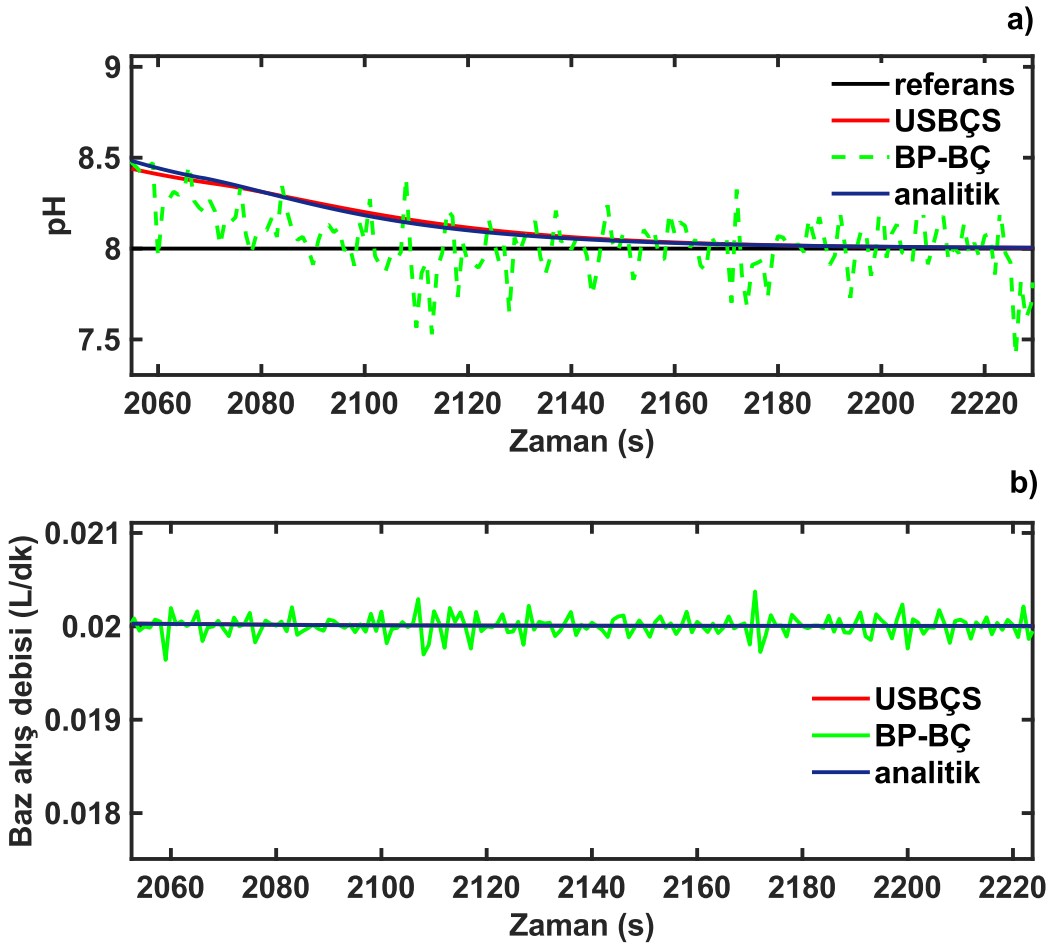
Şekil 4. 32 Referans pH değeri 4'ten 5'e değişirken Şekil 4.31'de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 33 Referans pH değeri 5'ten 7'ye değişirken Şekil 4.31'de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 34 Referans pH değeri 7'den 10'a değişirken Şekil 4.31'de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 35 Referans pH değeri 10'dan 8'e değişirken Şekil 4.31'de gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali

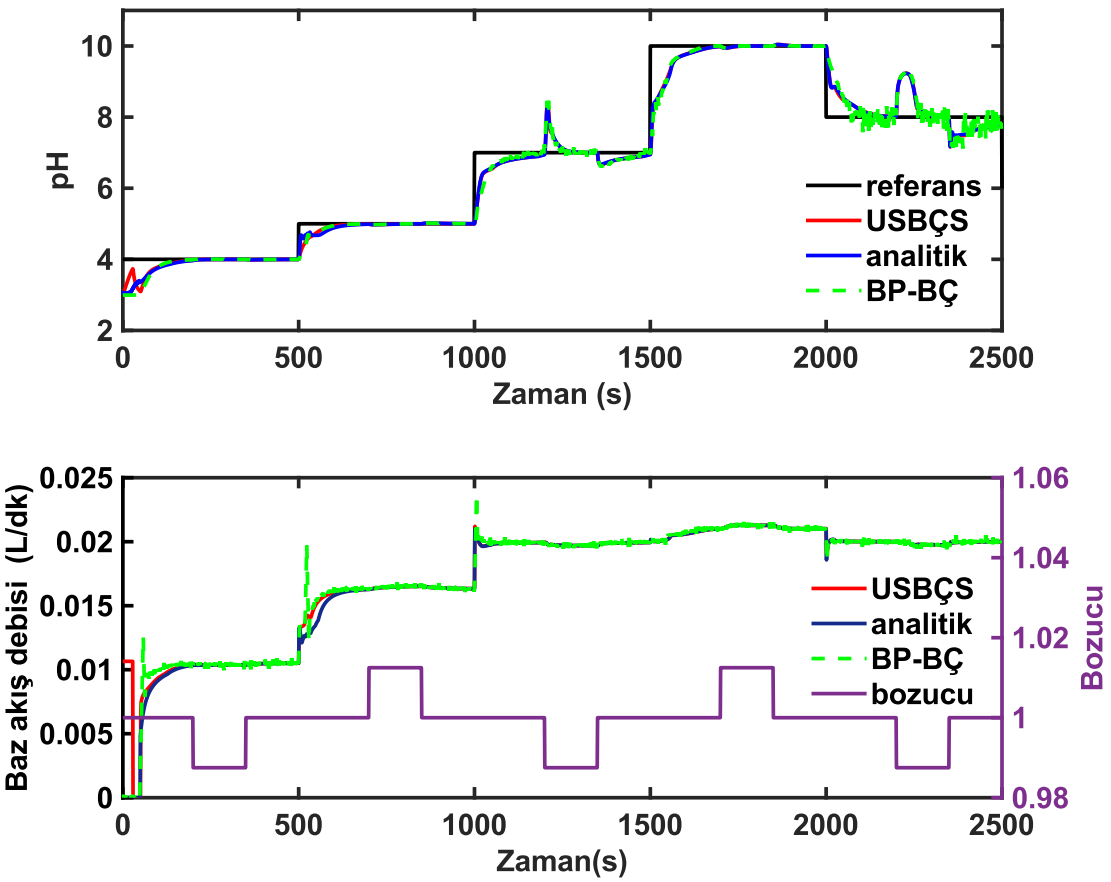
Tablo 4. 10 Referans değişimleri koşulu altında başarım karşılaştırması

	İKH
USBÇS Ters Kontrolör	301.5
Analitik Ters Kontrolör	298.8
BP-BÇ Ters Kontrolör	413.6

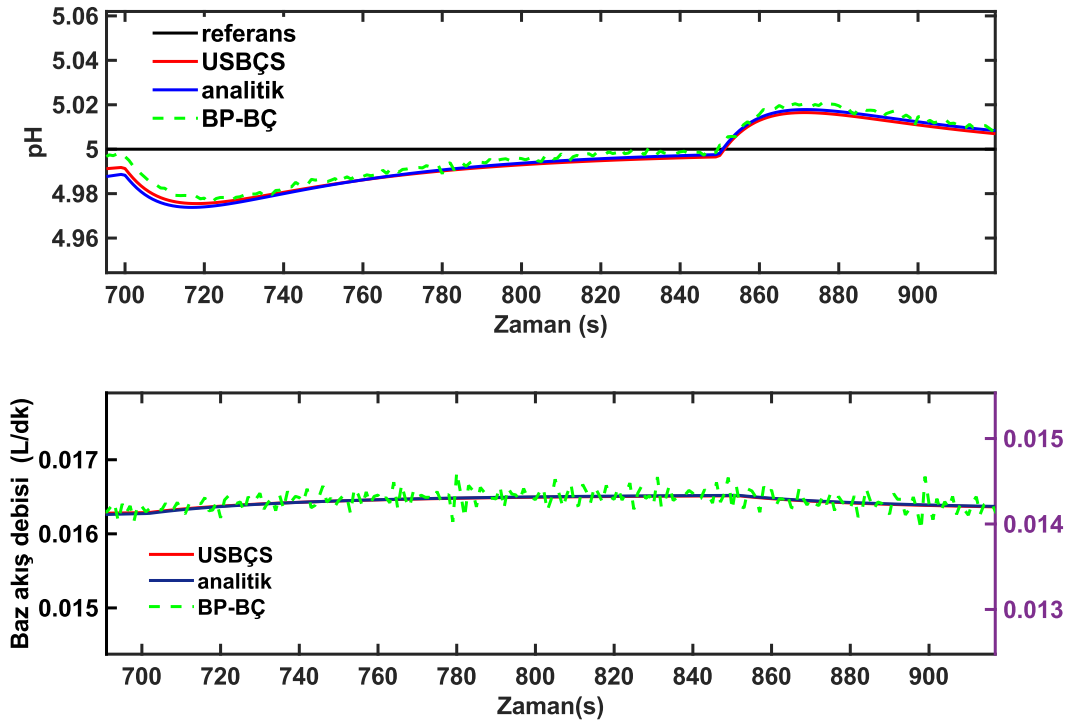
Şekil 4.31 ve Tablo 4.10'dan görüldüğü gibi en üstün başarımı analitik tabanlı ters kontrolör sergilemektedir. USBÇS tabanlı ters kontrolör analitik tabanlı ters

kontrolöre oldukça yakın bir başarım göstermektedir. BP-BÇ tabanlı ters kontrolörün başarımı ise diğer iki kontrolöre göre oldukça düşüktür. Özellikle Şekil 4.35 incelendiğinde, BP-BÇ tabanlı ters kontrolörün prosesi 8 pH referans değerinde sabit tutamadığı ve proses yanıtının salınım yapmasına neden olduğu görülmektedir. Bu bölgede kontrol işaretindeki çok küçük değişimler sistem yanıtında büyük değişimlere neden olduğundan buradaki kontrol başarımını iyileştirmek için BP-BÇ en iyileme algoritmasında bu bölgeye özel farklı kısıtlar kullanılması gerekmektedir.

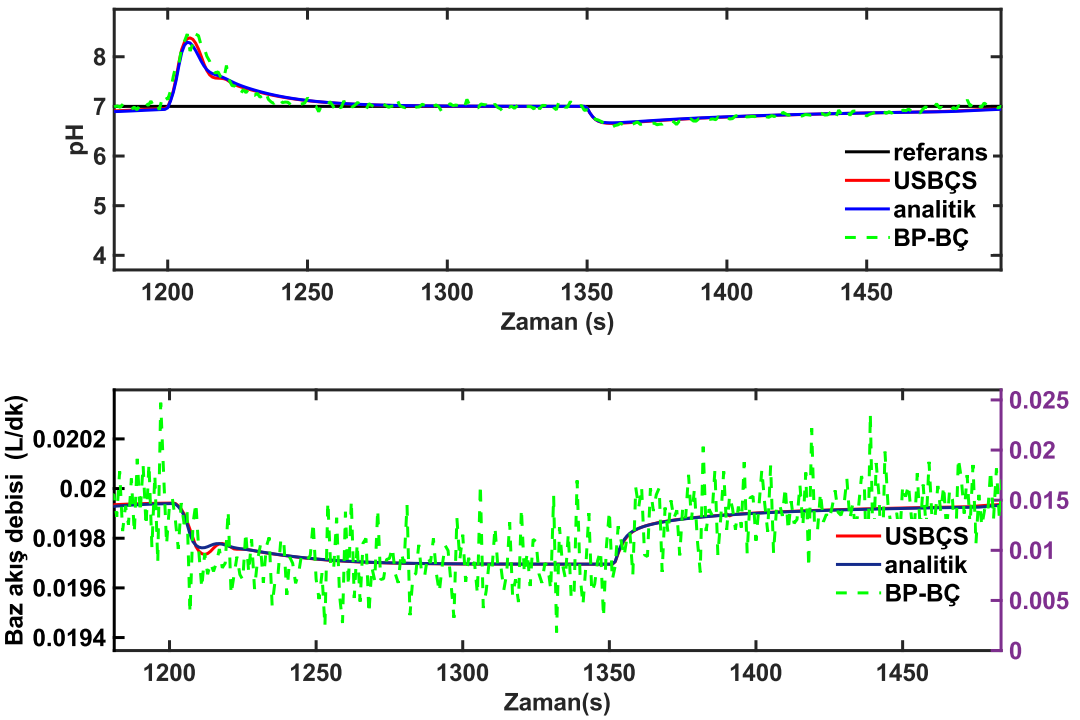
pH nötralizasyon prosesi için ters kontrolörlerin bozuculara karşı gürbüzlük başarımlarının değerlendirmesinde giriş bozucusu durumu incelenmiştir. Reaktöre sürekli bir asit akışı olduğu için asit akışında meydana gelen bir değişim sisteme giriş bozucusu olarak etki edebilmektedir. Bozucu işareti genliği 0.0125 L/dk olarak seçilmiştir. Kontrolörlerin giriş bozucularına karşı gürbüzlük başarımları Şekil 4.36 ve Tablo 4.11'de sunulmuştur. Uygulanan referans işareti, karşılık gelen sistem cevabı ve bozucu Şekil 4.36a'da gösterilmiştir. Kontrol işareti ve kontrol performansları Şekil 4.36b'de sunulmuştur. Ayrıca ilgili referans değişimi bölgelerinin yakınlaştırılmış halleri sırasıyla Şekil 4.37, Sekil 4.38, Şekil 4.39 ve Şekil 4.40'da gösterilmiştir.



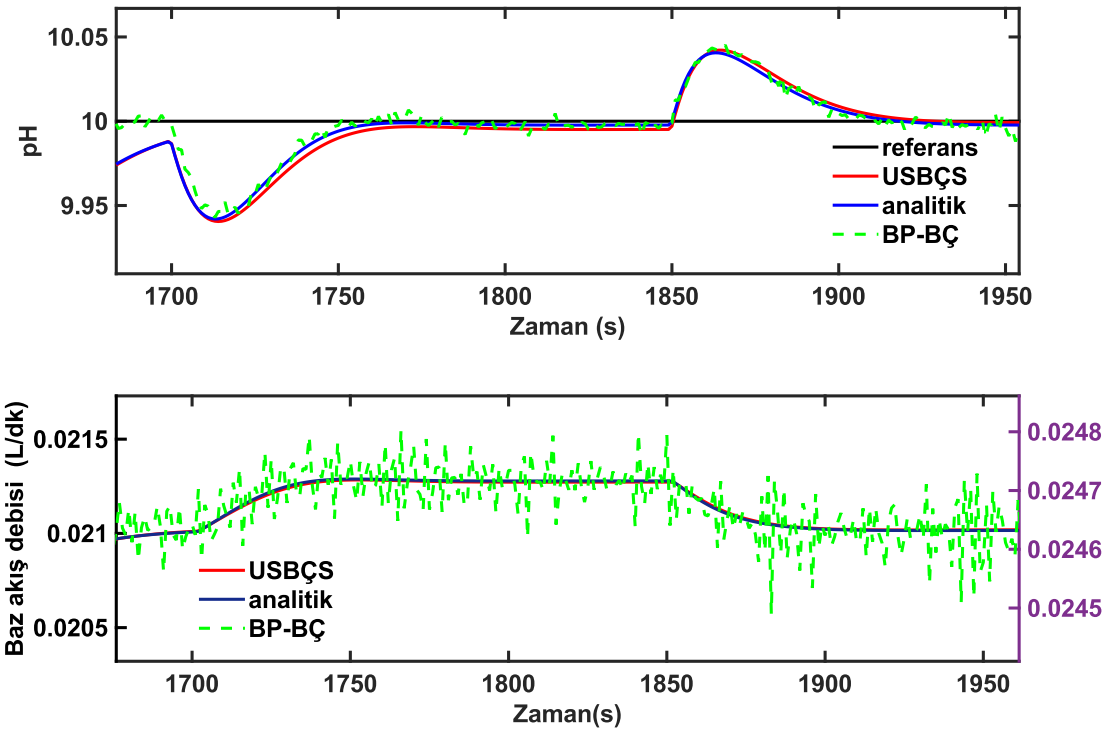
Şekil 4. 36 a) Giriş bozucu koşulu altında sistem cevapları karşılaştırması b) kontrol işaretleri



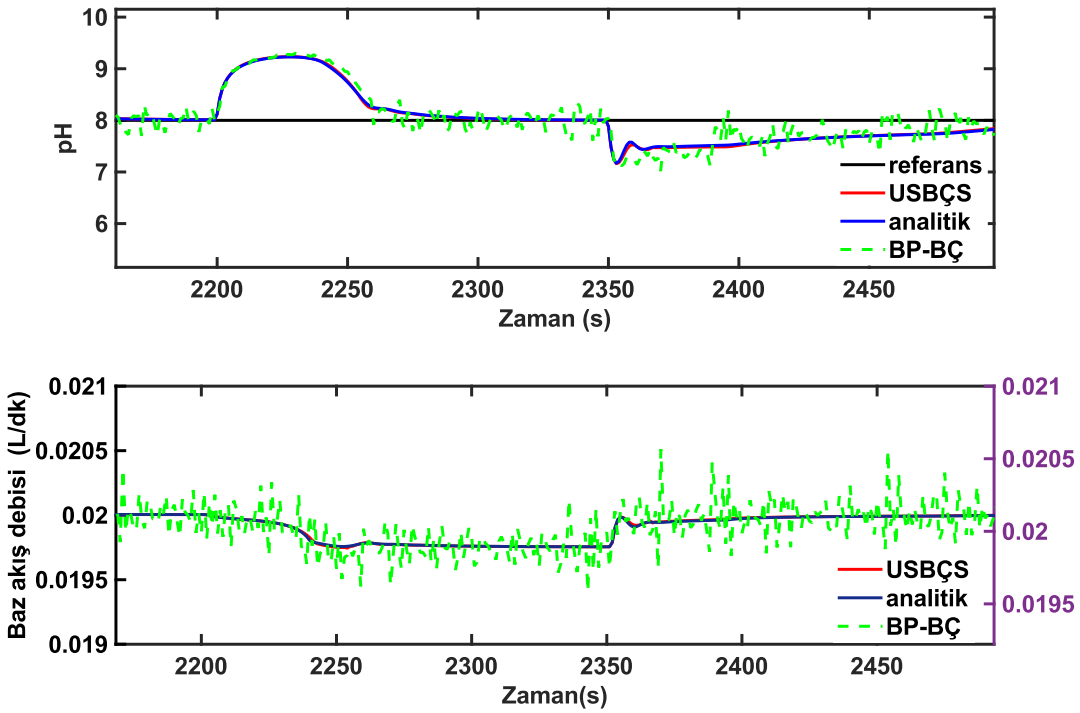
Şekil 4. 37 Referans pH değeri 5 iken giriş bozucusu altında Şekil 4.36' da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 38 Referans pH değeri 7 iken giriş bozucusu altında Şekil 4.36' da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 39 Referans pH değeri 10 iken giriş bozucusu altında Şekil 4.36' da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali



Şekil 4. 40 Referans pH değeri 8 iken giriş bozucusu altında Şekil 4.36' da gösterilen a) sistem cevaplarının b) kontrol işaretlerinin yakınlaştırılmış hali

Tablo 4. 11 Giriş bozucu koşulu altında başarım karşılaştırması

	İKH
USBÇS Ters Kontrolör	416.3
Analitik Ters Kontrolör	401.8
BP-BÇ Ters Kontrolör	529.7

Şekil 4.36 ve Tablo 4.11' den görüldüğü gibi giriş bozucularına karşı en gürbüz başarımı analitik tabanlı ters kontrolör sergilemiştir. İkinci sırada analitik tabanlı ters kontrolöre yakın bir başarım gösteren USBÇS tabanlı ters kontrolörün başarımı gelmektedir. En düşük başarımı ise diğer örneklerde olduğu gibi BP-BÇ tabanlı ters kontrolör sergilemektedir.

4.3 Karşılaştırma ve Değerlendirme

Tasarım süreçleri ve benzetim sonuçları dikkate alınarak ters kontrolörler tasarım kolaylığı, ters alma doğruluğu, kontrol başarımı ve gürbüzlük açısından karşılaştırılmıştır.

Tasarım kolaylığı: Doğrudan bir en iyileme algoritması temelli çalıştığından ve özel ön analizler gerektirmediği için BP-BÇ tabanlı ters kontrolör tasarımı diğer iki ters kontrolör tasarımına kıyasla daha kolaydır. Burada uygun popülasyon ve iterasyon sayısının belirlenmesi önem arz etmektedir. USBÇS tabanlı ters kontrolör doğrudan giriş çıkış verisine dayalı şekilde otomatik olarak tasarlandığından nispeten tasarımı kolaydır. Fakat bu yöntemde giriş konfigürasyonunun ve her bir giriş için tanımlanacak bulanık küme sayısının belirlenmesi tasarım zorluğu olarak değerlendirilebilir. Analitik tabanlı ters kontrolör tasarımında ise sistem bulanık modelinin alt sistemlerinin analitik ifadelerinin çıkarılması ve bu ifadeler üzerinden analitik ters alınması gerekmektedir. Bu nedenle diğer iki kontrolörün tasarımı analitik tabanlı ters kontrolörün tasarımına kıyasla daha kolaydır.

Ters alma doğruluğu: Analitik tabanlı ters alma yöntemi doğrudan bulanık modelin tam analitik ters modelini ifade ettiğinden bu yöntemle elde edilen ters

kontrolörün ters alma hatası sıfırdır. Buna karşın USBÇS ve BP-BÇ tabanlı ters alma yöntemleri sadece yaklaşık bir ters model ortaya koymaktadır. USBÇS tabanlı ters alma yönteminde giriş-çıkış verilerine göre sistemin tersini en düşük hata ile ifade eden bir model elde edilir. Bu ters modelin doğruluğu seçilen USBÇS model yapısına bağlıdır. Uygun model yapısı deneme yanılma yöntemi ile belirlenmektedir. BP-BÇ tabanlı ters alma yönteminde ters alma doğruluğu belirlenen popülasyon sayısına ve örnekleme zamanı içinde gerçekleştirilebilen iterasyon sayısına bağlıdır. Benzetim sonuçlarından da görüldüğü gibi bu yöntemde her örnekleme adımında çoğunlukla en iyi çözüme ulaşılmaz ve bu nedenle bu yöntem diğer iki yöntemle karşılaştırıldığında daha düşük bir ters alma doğruluğuna sahiptir.

Kontrol başarımı: Benzetim sonuçlarından görüldüğü gibi sisteme bozucu etki etmediği durumlarda sağladığı ters alma doğruluğuna bağlı olarak en üstün kontrol başarımını analitik tabanlı ters kontrolör sergilemektedir. USBÇS tabanlı ters kontrolör sahip olduğu daha düşük ters alma doğruluğuna bağlı olarak analitik tabanlı ters kontrolörden daha düşük bir kontrol başarımı göstermektedir. BP-BÇ tabanlı ters kontrolör ise her adımda en iyi ters çözümü garanti edemediğinden diğer iki ters kontrolöre göre düşük bir kontrol başarımına sahiptir. Ayrıca kontrol sinyalleri açısından değerlendirildiğinde, diğer iki ters kontrolör yumuşak geçişli bir kontrol işareti sağlarken BP-BÇ tabanlı ters kontrolör arama tabanlı yapısı gereği oldukça sert değişen bir kontrol işareti üretmektedir. Bu durum pratik uygulamalarda genellikle istenmeyen bir durumdur. Ayrıca, pH nötralizasyon prosesi için gerçekleştirilen benzetimlerde BP-BÇ tabanlı ters kontrolörün prosesi 8 pH referans değerinde sabit tutamadığı ve proses yanıtının salınım yapmasına neden olduğu görülmektedir. Bu bölgede kontrol işaretindeki çok küçük değişimler sistem yanıtında büyük değişimlere neden olduğundan buradaki kontrol başarımını iyileştirmek için BP-BÇ en iyileme algoritmasında bu bölgeye özel farklı kısıtlar kullanılması gerekmektedir.

Gürbüzlük: Sisteme giriş ve çıkış bozucularının etkidiği koşullarda yine analitik tabanlı ters kontrolör diğer iki ters kontrolörden daha üstün bir gürbüzlük başarımı sergilemektedir. USBÇS tabanlı ters kontrolör analitik tabanlı ters kontrolörünkine yakın bir gürbüzlük başarımı gösterirken en düşük gürbüzlük

başarımını sahip olduğu en düşük ters alma doğruluğuna bağlı olarak BP-BÇ algoritması sergilemektedir.

5
SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, literatürde bulanık modeller için yaygın olarak kullanılan ters alma yöntemlerinden USBÇS ile ters alma yöntemi, analitik ters alma yöntemi ve stokastik en iyileme tabanlı ters alma yöntemi ele alınmış ve bu yöntemler kullanılarak tasarlanmış ters kontrolörlerin başarım karşılaştırması yapılmıştır. Ters kontrolörler küresel tank sıvı seviye sistemi ve pH nötralizasyon prosesi olmak üzere iki adet doğrusal olmayan sisteme benzetim ortamında uygulanmış ve başarım sonuçları sunulmuştur. Ters kontrolörler tasarım kolaylığı, ters alma doğruluğu, kontrol başarımı ve gürbüzlük açısından değerlendirilmiştir.

Değerlendirmeler sonucunda analitik tabanlı ters kontrolörün diğer iki ters kontrolörden daha üstün kontrol ve gürbüzlük başarımı sergilediği görülmektedir. Bunun nedeni bu kontrolörün sahip olduğu ters alma hatasının sıfır olmasıdır. Bu kontrolör bulanık modelin doğrudan analitik tersinin alınması ile tasarlandığından ters alma hatası mevcut olmamaktadır. Tasarım kolaylığı açısından değerlendirildiğinde ise sistem bulanık modelinin alt sistemlerinin analitik ifadelerinin çıkarılması ve bu ifadeler üzerinden analitik ters alınması gerektiğinden diğer iki kontrolöre kıyasla daha zor bir tasarım sürecine sahiptir. USBÇS tabanlı ters kontrolör analitik tabanlı ters kontrolöre göre daha düşük kontrol ve gürbüzlük başarımı sergilemektedir. Bunun nedeni USBÇS tabanlı ters alma yönteminin sadece yaklaşık bir ters model ortaya koymasıdır. Bu nedenle bu kontrolör ters alma hatasına sahiptir. USBÇS tabanlı ters kontrolör doğrudan giriş çıkış verisine dayalı şekilde otomatik olarak tasarlandığından nispeten tasarımı kolaydır. Fakat bu yöntemde giriş konfigürasyonunun ve her bir giriş için tanımlanacak bulanık küme sayısının belirlenmesi tasarım zorluğu olarak değerlendirilebilir. BP-BÇ tabanlı ters kontrolör en düşük kontrol ve gürbüzlük başarımına sahiptir. Bunun nedeni bu ters kontrolörün de USBÇS tabanlı ters kontrolörde olduğu gibi sadece yaklaşık bir ters çözüm ortaya koyması ve ters alma hatasının USBÇS tabanlı ters kontrolörünkinden daha yüksek olmasıdır.

Tasarım kolaylığı açısından incelendiğinde ise doğrudan bir en iyileme algoritması temelli çalıştığından ve özel ön analizler gerektirmediğinden BP-BÇ tabanlı ters kontrolör tasarımının diğer iki ters kontrolör tasarımına kıyasla daha kolay olduğu değerlendirilebilir.

Gelecek çalışmalarda benzetim ortamında yapılan bu başarım karşılaştırmalarının gerçek sistemler üzerinde yapılması planlanmaktadır.

KAYNAKÇA

[1] C. G. Economou, M. Morari, and B. O. Palsson, "Internal model control: Extension to nonlinear system," Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development, vol. 25, no. 2, pp. 403–411, 1986.

[2] E. P. Nahas, M. A. Henson, and D. E. Seborg, "Nonlinear internal model control strategy for neural network models," Computers & Chemical Engineering, vol. 16, no. 12, pp. 1039–1057, 1992.

[3] J. L. Castro, "Fuzzy logic controllers are universal approximators," IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, vol. 25, no. 4, pp. 629–635, 1995.

[4] D. Tikk, P. Baranyi, and R. J. Patton, "Approximation properties of TP model forms and its consequences to TPDC design framework," Asian Journal of Control, vol. 9, no. 3, pp. 221–231, 2007.

[5] D. Tikk, L. T. Kóczy, and T. D. Gedeon, "A survey on universal approximation and its limits in soft computing techniques," International Journal of Approximate Reasoning, vol. 33, no. 2, pp. 185–202, 2003.

[6] L.-X. Wang and J. M. Mendel, "Fuzzy basis functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning," IEEE transactions on Neural Networks, vol. 3, no. 5, pp. 807–814, 1992.

[7] H. Ying, "Sufficient conditions on uniform approximation of multivariate functions by general Takagi-Sugeno fuzzy systems with linear rule consequent," IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, vol. 28, no. 4, pp. 515–520, 1998.

[8] H. Ying, "Interval type-2 Takagi-Sugeno fuzzy systems with linear rule consequent are universal approximators," in NAFIPS 2009-2009 Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, 2009, pp. 1–5.

[9] O. P. Verma, G. Manik, and V. K. Jain, "Simulation and control of a complex nonlinear dynamic behavior of multi-stage evaporator using PID and Fuzzy-PID controllers," Journal of Computational Science, vol. 25, pp. 238–251, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.jocs.2017.04.001.

[10] R. Babuška, J. M. Sousa, and H. B. Verbruggen, "Inverse fuzzy model based predictive control," in Advances in fuzzy control, Springer, 1998, pp. 129–154.

[11] R. Babuška and H. Verbruggen, "Neuro-fuzzy methods for nonlinear system identification," Annual Reviews in Control, vol. 27, no. 1, pp. 73–85, Jan. 2003, doi: 10.1016/S1367-5788(03)00009-9.

[12] R. Babuška, Fuzzy modeling for control, vol. 12. Springer Science & Business Media, 2012.

[13] R. Boukezzoula, S. Galichet, and L. Foulloy, “Nonlinear internal model control: Application of inverse model based fuzzy control,” IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 11, no. 6, pp. 814–829, 2003.

[14] T. Kumbasar, I. Eksin, M. Guzelkaya, and E. Yesil, “Exact inversion of decomposable interval type-2 fuzzy logic systems,” International journal of approximate reasoning, vol. 54, no. 2, pp. 253–272, 2013.

[15] C. Ulu, “Exact analytical inverse mapping of decomposable TS fuzzy systems with singleton and linear consequents,” Applied Soft Computing, vol. 23, pp. 202–214, 2014.

[16] C. Ulu, “An exact inversion method for multi-input-single-output decomposable TS fuzzy systems,” Journal of Intelligent & Fuzzy Systems, pp. 6343 – 6356, 2022.

[17] C. Ulu, “Exact analytical inversion of interval type-2 TSK fuzzy logic systems with closed form inference methods,” Applied Soft Computing, vol. 37, pp. 60–70, 2015.

[18] C. Ulu, M. Güzelkaya, and I. Eksin, “Exact analytical inversion of TSK fuzzy systems with singleton and linear consequents,” International journal of approximate reasoning, vol. 55, no. 6, pp. 1357–1368, 2014.

[19] A. R. Várkonyi-Kóczy, G. Péceli, T. P. Dobrowiecki, and T. Kovácsházy, “Iterative fuzzy model inversion,” in 1998 IEEE International Conference on Fuzzy Systems Proceedings. IEEE World Congress on Computational Intelligence (Cat. No. 98CH36228), 1998, vol. 1, pp. 561–566.

[20] T. Kumbasar, I. Eksin, M. Guzelkaya, and E. Yesil, “Adaptive fuzzy model based inverse controller design using BB-BC optimization algorithm,” Expert Systems with Applications, vol. 38, no. 10, pp. 12356–12364, 2011.

[21] J.-S. Jang, “ANFIS: adaptive-network-based fuzzy inference system,” IEEE transactions on systems, man, and cybernetics, vol. 23, no. 3, pp. 665–685, 1993.

[22] L.-H. Zong, X.-L. Gong, C.-Y. Guo, and S.-H. Xuan, “Inverse neuro-fuzzy MR damper model and its application in vibration control of vehicle suspension system,” Vehicle system dynamics, vol. 50, no. 7, pp. 1025–1041, 2012.

[23] H. Alshareefi, C. Lupu, S. Olteanu, and L. Ismail, “Design and Simulation of Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System Inverse Controller for a Coupled Tank System,” in 2021 10th International Conference On ENERGY And ENVIRONMENT (CIEM), 2021, pp. 1–5.

[24] P. Jagtap, P. Raut, G. N. Pillai, F. Kazi, and N. M. Singh, “Extreme-ANFIS: A novel learning approach for inverse model control of Nonlinear Dynamical Systems,” in 2015 International Conference on Industrial Instrumentation and Control (ICIC), 2015, pp. 718–723.

[25] T. G. Ling, M. F. Rahmat, and A. R. Husain, “ANFIS modeling and Direct ANFIS Inverse control of an Electro-Hydraulic Actuator system,” in 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013, pp. 370–375.

[26] J. C. Gonzalez-Gomez, J. A. Ruz-Hernandez, R. Garcia-Hernandez, and E. N. Sanchez, “Real-time neuro-fuzzy inverse control applied to a DC motor,” in 2011 8th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control, 2011, pp. 1–5.

[27] P. Baranyi, I. Bavelaar, L. T. Koczy, and A. Titli, “Inverse rule base of various fuzzy interpolation techniques,” in Proc. of the 7th IFSA World Congress, Prague, Tchéquie, 1997, pp. 121–126.

[28] P. Baranyi, I. M. Bavelaar, R. Bubuška, L. T. Kóczy, A. Titli, and H. B. Verbruggen, “A method to invert a linguistic fuzzy model,” International journal of systems science, vol. 29, no. 7, pp. 711–721, 1998.

[29] S. Galichet, R. Boukezzoula, and L. Foulloy, “Explicit analytical formulation and exact inversion of decomposable fuzzy systems with singleton consequents,” Fuzzy Sets and Systems, vol. 146, no. 3, pp. 421–436, Sep. 2004, doi: 10.1016/j.fss.2003.09.002.

[30] C. Ulu, M. Güzelkaya, and I. Eksin, “A new approach to an exact inversion of TSK fuzzy systems,” in 2013 The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAEECE), 2013, pp. 262–265.

[31] T. Kumbasar, “Ters Bulanık Model Alma Yöntemleri,” PhD Thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2008.

[32] KUMBASAR T. GÜZELKAYA M., “Big Bang Big Crunch Optimization Method Based Fuzzy Model Inversion,” Lecture Notes in Computer Science, p. pp.732-740, 2008, doi: 10.1007/978-3-540-88636-5_69.

[33] T. Kumbasar, I. Eksin, M. Guzelkaya, and E. Yesil, “Type-2 fuzzy model inverse controller design based on BB-BC optimization method,” IFAC Proceedings Volumes, vol. 44, no. 1, pp. 5308–5313, 2011.

[34] T. Kumbasar, I. Eksin, M. Guzelkaya, and E. Yesil, "Control of a pH neutraliztion process via the Big Bang Big Crunch optimization," 8th International Workshop on Modeling and Applied Simulation, MAS 2009, Held at the International Mediterranean and Latin American Modeling Multiconference, I3M 2009 , Puerto de la Cruz, Spain, pp.38-43, 2009 .

[35] T. Kumbasar, İ. Eksin, M. Güzelkaya, and E. Yeşil, “Big bang big crunch optimization method based fuzzy model inversion,” in Mexican International Conference on Artificial Intelligence, 2008, pp. 732–740.

[36] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets,” Information and control, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, 1965.

[37] N. K. Kasabov, Foundations of neural networks, fuzzy systems, and knowledge engineering. Marcel Alencar, 1996.

[38] K. H. Hassan, “Self learning of ANFIS inverse control using iterative learning technique,” International Journal of Computer Applications, vol. 21, no. 8, pp. 24–29, 2011.

[39] O. K. Erol and I. Eksin, “A new optimization method: big bang–big crunch,” Advances in Engineering Software, vol. 37, no. 2, pp. 106–111, 2006.

[40] C. V. Camp, “Design of space trusses using Big Bang–Big Crunch optimization,” Journal of Structural Engineering, vol. 133, no. 7, pp. 999–1008, 2007.

[41] R. Boukezzoula, S. Galichet, and L. Foulloy, “Exact inversion of Takagi-Sugeno fuzzy models,” in Proceedings Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS International Conference (Cat. No. 01TH8569), Vancouver, BC, Canada, 2001, vol. 4, pp. 2108–2113. doi: 10.1109/NAFIPS.2001.944395.

[42] P. Agrawal and S. Lakshminarayanan, “Tuning proportional- integral-derivative controllers using achievable performance indices,” Industrial & engineering chemistry research, vol. 42, no. 22, pp. 5576–5582, 2003.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. T. B. AKCA, C. ULU, S. OBUT, "Inverse Neuro-Fuzzy Model Based Controller Design for a pH Neutralization Process," International Conference on Applied Engineering and Natural Sciences , Konya, Turkey, pp.90, 2022

Makaleler

1. T. B. Akca, C. ULU, S. OBUT, "ANFIS Based Inverse Controller Design for Liquid Level Control of a Spherical Tank," PRZEGLAD ELEKTROTECHNICZNY , no.2, pp.32-36, 2023

2. T. B. Akca, C. ULU, S. OBUT, " Inverse Neuro-Fuzzy Model Based Controller Design for a pH Neutralization Process," Journal of Scientific Reports-A (Kabul edildi.), 2023