

EGE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

(YÜKSEK LİSANS TEZİ)

**ADAPTİF BULANIK DENETLEYİCİ İLE DOĞRUSAL
OLMAYAN SİSTEM KONTROLÜ**

Yusuf Gürkan ÖMÜR

Tez Danışmanı: Yard. Doç. Dr. Musa ALCI

Elektrik Elektronik Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Bilim Dalı Kodu: 609.01.00

Sunuş Tarihi: 1 Eylül 2009

Bornova-İZMİR

2009

Yusuf Gürkan ÖMÜR tarafından yüksek lisans tezi olarak sunulan “ Adaptif Bulanık Denetleyici ile Doğrusal Olmayan Sistem Kontrolü” başlıklı bu çalışma E.Ü. Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliği ile E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Eğitim ve Öğretim Yönergesi'nin ilgili hükümleri uyarınca tarafımızdan değerlendirilerek savunmaya değer bulunmuş ve 2009 tarihinde yapılan tez savunma sınavında aday oybirliği/oyçokluğu ile başarılı bulunmuştur.

-
Jüri Üyeleri:

İmza

Jüri Başkanı :

Raportör Üye :

Üye :

ÖZET
ADAPTİF BULANIK DENETLEYİCİ İLE DOĞRUSAL
OLMAYAN SİSTEM KONTROLÜ

ÖMÜR, Yusuf Gürkan

Yüksek Lisans Tezi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü

Tez Yöneticisi: Doç.Dr.Musa ALCI

1 Eylül 2009,

Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü, doğrusal sistemlere göre zordur. Bu kontrolü gerçekleştirebilmek için birçok farklı yöntem geliştirilmiştir. Bulanık mantık denetleyici kullanmak da bu yöntemlerden biridir. Çalışmamızda İki Seviyeli Su Tankının doğrusal olmayan kontrolü PID ile, Durum Geri Besleme yöntemi ile, Bulanık ve Öz-Adaptif Bulanık Mantık (Fuzzy Logic, Self-Organizing Adaptive Fuzzy Logic) denetleyici ile ve Ortogonal polinomlu YSA (Yapay Sinir Ağı) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bulanık mantık kullanılarak gerçekleştirilen kontrolün sistemlerinin diğer kontrol yöntemlerine göre daha iyi sonuç verdiği deneysel sonuçlar ile ortaya koyulmuştur.

Anahtar kelimeler : İki Seviyeli Su Tankı, Doğrusal Olmayan Sistem Kontrolü, PID Kontrolcü, Kararlılık, Ziegler-Nichols yöntemi, Durum Geri Besleme, Kendinden Organize Bulanık Denetleyici, Ortogonal Polinomlu YSA,

ABSTRACT**ADAPTIVE FUZZY CONTROL OF NONLINEAR SYSTEMS**

ÖMÜR, Yusuf Gürkan

Master Thesis, Electric Electronics Engineering Department

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Musa ALCI

1 Eylül 2009,

Nonlinear system control is more difficult than linear system control. Various control methods have been proposed to deal with nonlinear systems. Adaptive fuzzy control scheme is one of these methods. In this work, control of the nonlinear coupled tank system has been made by PID, State Feedback, Fuzzy, Self-Organizing Adaptive Fuzzy controllers and with using Orthogonal ARX network. And, we proved that fuzzy controllers have been successfully applied in many cases to which conventional control algorithms are difficult to applied and the stability of the adaptive fuzzy controller are better than the conventional control algorithms with the experimental results.

Keywords : Coupled-Tank, Nonlinear Systems, PID Controller, Stability, Ziegler-Nichols method, State Feedback, Self-Organizing Adaptive Fuzzy Control, Orthogonal ARX networks

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince değerli görüşlerini ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım sayın Doç. Dr. Musa ALCI'ya teşekkürü bir borç bilirim.

Yine çalışmam sürece desteklerini esirgemeyen bölümümüz aistanlarından Selami BEYHAN'a teşekkür ederim.

Çalışmalarında beni destekleyen işyerim Kentkart Ege Elektronik Firmasına ve özellikle Gökhan SORUCU'ya; İki-Seviyeli Su Tankının yapımında çalıştığım Öncel SARIKAYA'ya teşekkür ederim.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve her zaman yanımda olan eşime teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

ÖZET	IV
ABSTRACT	V
TEŞEKKÜR	VI
ŞEKİLLER DİZİNİ	XI
ÇİZELGELER DİZİNİ	XIV
1. GİRİŞ	1
1.1 Deneysel Yöntem.....	1
1.2 Matematiksel Modelleme.....	1
1.3 Bulanık Mantık	2
1.4 Bulanık Mantık Kümeleri	3
2. BULANIK KONTROL SİSTEMLERİNİN TEMEL YAPISI.....	9
2.1 Bulanık Kontrol Sistemleri	9
2.1.1 Bulanıklaştırma	10
2.1.2 Bilgi tabanı.....	12
2.1.2.1 Veri Tabanı	13
2.1.2.2 Kural Tabanı	13
2.1.3 Karar Mekanizması	14
2.1.4 Durulaştırma.....	15
2.1.4.1 Alanların Merkezi (Center-of-Area) Yöntemi:	15
2.1.4.2 Maksimumun Merkezi (Center-of-Maximum) Yöntemi:	16
2.1.4.3 Maksimumun Ortalaması (Mean-of-Maximum) Yöntemi:	16
2.2 Adaptif bulanık mantık denetleyici.....	16

3.	İKİLİ SIVI TANKI.....	19
3.1	Tanımlama	19
3.2	Matematiksel Modelleme	22
3.2.1	Düzenek #1	22
3.2.2	Düzenek #2	24
3.2.3	Düzenek #3	26
4.	YÖNTEM	29
4.1	Ziegler-Nichols Yöntemine göre PID Kontrol Tasarımı	29
4.1.1	Düzenek #2 PID Kontrol Tasarımı	31
4.1.2	Düzenek#3 PID Kontrol Tasarımı	37
4.2	Durum Geri Beslemeli Kontrol Tasarımı	38
4.2.1	Düzenek#3 Durum Geri Beslemeli Kontrol Tasarımı	41
4.3	Kendinden Organize Bulanık Mantık Kontrolü	45
4.3.1	Düzenek#3 Kendinden Organize Adaptif Bulanık Kontrol Tasarımı	47
4.3.2	Doğrusal olmayan sistemlerin tanımlanmasının ve kontrolünün Ortogonal polinomlu YSA (Yapay sinir Ağı) kullanılarak gerçekleştirilmesi	51
4.3.2.1	Ortogonal Polinomlu YSA	52
4.3.2.2	Öğrenme Algoritması	53
4.3.2.3	Tanımlama ve Kontrol	54
4.3.3	Düzenek#3 için Ortogonal Polinomlu YSA Kullanılarak Bulanık Kontrol Tasarımı Gerçekleştirilmesi.....	56
5.	SONUÇ.....	62
6.	TARTIŞMALAR.....	63
	KAYNAKLAR	64

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1: Yaşlılar kümesinin kesin ve bulanık kümelerle gösterimi.	4
Şekil 1.2: Yaş genel uzayında tanımlı yaşlı kesin kümesi.....	5
Şekil 1.3: Yaş uzayında tanımlı yaşlı bulanık kümesi.....	6
Şekil 1.4: Ayrık zamanlı bulanık küme üyelik fonksiyonunun çizimi	7
Şekil 1.5 Sürekli zamanlı bulanık küme üyelik fonksiyonu	8
Şekil 2.1: Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) temel yapısı	10
Şekil 2.2: Sıcaklığı gösteren bulanık küme (M.G.Simoes)	11
Şekil 2.3: Adaptif Bulanık Mantık Denetleyici temel düzeneği.....	17
Şekil 3.1: İkili sıvı tankının üç farklı düzenek şekli	20
Şekil 3.2: Uygulama laboratuvarı sistem şeması	20
Şekil 3.3: Laboratuvar deney ortamı	21
Şekil 4.1: Kritik kazancın bulunması için kurulan P-Kontrolcü.....	29
Şekil 4.2: Kritik kazanç değerindeki kritik periyodun gösterimi	30
Şekil 4.3: PID-Kontrolcü blok şeması	31
Şekil 4.4: Düzenek#2 iyileştirilmiş PID kontrol şeması.....	31
Şekil 4.5: Düzenek#2 İyileştirilmiş PID kontrol simülasyon çıkışı	34
Şekil 4.6: Düzenek#2 deneysel sonuçlar için simulink programı.....	35
Şekil 4.7: Düzenek#2 P-Kontrol deney çıkışı	35
Şekil 4.8: Düzenek#2 PI-Kontrol deney çıkışı	36
Şekil 4.9: Düzenek#2 PID-Kontrol deney çıkışı	36
Şekil 4.10: Düzenek#3 P-Kontrol deney çıkışı.....	37
Şekil 4.11: Düzenek#3 PI-Kontrol deney çıkışı	37
Şekil 4.12: Düzenek#3 PID-Kontrol deney çıkışı	38

Şekil 4.13: Açık devre sistem	39
Şekil 4.14: Kapalı devre sistem.....	39
Şekil 4.15: Düzenek#3 Durum Geri Besleme simulink programı	43
Şekil 4.16: Düzenek#3 Durum Geri Besleme simulasyon çıkışı	43
Şekil 4.17: Düzenek#3 Durum Geri Besleme deneysel sonuçlar için simulink programı	44
Şekil 4.18: Düzenek#3 Durum Geri Besleme kontrolü deney çıkışı	44
Şekil 4.19: Düzenek#3 Kendinden Organize Bulanık Kontrol deneysel sonuçlar için simulink programı	47
Şekil 4.20: Düzenek#3 Kendinden Organize Bulanık kontrolü deney çıkışı	48
Şekil 4.21: Düzenek#3 Kendinden Organize Bulanık kontrolü deney çıkışı–Sinyal İzleme.....	49
Şekil 4.22: Düzenek#3 Kendinden Organize Bulanık kontrolü- y1 çıkış üyelik merkezleri değişimi.....	49
Şekil 4.23: Düzenek#3 Kendinden Organize Bulanık kontrolü- y2 çıkış üyelik merkezleri değişimi.....	50
Şekil 4.24: Düzenek#3 Kendinden Organize Bulanık kontrolü- y3 çıkış üyelik merkezleri değişimi.....	50
Şekil 4.25: Düzenek#3 Kendinden Organize Bulanık kontrolü- y4 çıkış üyelik merkezleri değişimi.....	51
Şekil 4.26: Ortogonal ARX Ağı.....	52
Şekil 4.27: Düzenek#3 Ortogonal polinomlu YSA kullanılarak bulanık kontrol tasarımı deneysel sonuçlar için simulink programı.....	56
Şekil 4.28: Düzenek#3 ONN (Orthononal Neoural Network) sinyal takibi deney çıkışı.....	58
Şekil 4.29: Düzenek#3 ONN sinyal takibi deney çıkışı - sistem tanımlama	58
Şekil 4.30: Düzenek#3 ONN sinyal takibi deney çıkışı - tanımlama hatası	59
Şekil 4.31: Düzenek#3 ONN sinyal takibi deney çıkışı - takip hatası.....	59

Şekil 4.32: Düzenek#3 ONN sinyal takibi deney çıkışı – parameter norm değişimi
.....60

ÇİZELGELER DİZİNİ

Tablo 4.1: Ziegler-Nichols kuralına göre PID parametreler tablosu	30
-------------------------------------------------------------------------	----

1. GİRİŞ

Geleneksel kontrol yaklaşımı fiziksel sistemi modelleme temeline dayanır. Sistemi tanımlamak için üç yöntem kullanılabilir (Ian S. Shaw, 1998):

1.1 Deneysel Yöntem

Sistemin farklı girişlere nasıl tepki gösterdiği deneysel olarak gözlenir ve bu karakteristik bir giriş-çıkış tablosuna yazılır. Ayrık sistem girişlerine göre sistem çıkışları grafik olarak çizilerek de sistem tanımlaması yapılabilir. Bu giriş-çıkış tablosuna göre kontrolcü dizayn edilir.

Bu yöntemin dezavantajları çok fazladır: Sistemin çıkışlarını gözlemleyebilmek için yeterli ekipmana sahip olunmayabilir; deney prosedürü pahalı olabilir; çok fazla giriş değerine göre çıkış ölçümü almak gerekebilir ve bu hiç pratik değildir; ayrıca iyi bir kontrolcü dizaynı için çıkış değerlerinin ara değerleri için değer hesaplamaları yapmak ve bu değerler için beklenen değerler hesaplanıp deneysel olarak da gözlemlenebilirliğine bakmak gerekir.

1.2 Matematiksel Modelleme

Kontrol mühendisliği diferansiyel ya da farksal formda oluşturulan idealleştirilmiş sistemin matematiksel modeline ihtiyaç duyar. Çoğu zaman Laplace transformasyonu ya da z-transformasyonu bu modellemede kullanılır. Matematiksel modelin yeteri kadar basit olabilmesi için bazı yaklaşımlar yapılır. Bunlardan en önemlisi modeli lineerleştirmektir. Lineerleştirme tekniği çok faydalıdır çünkü sistemi iyi kavramaya yardımcı olur.

Başka bir yaklaşım da, sistem parçalarının ve çevrenin değişmesi durumunda bile, zamanla sistem parametrelerinin değişmemesidir (time-

invariant). Endüstriyel bir sistemi matematiksel olarak mantıklı bir şekilde modellemeye çalışıldığında şu tür sonuçlar ortaya çıkar:

1. Sistemin yeteri kadar iyi modellenememesi ve sistemin anlaşılır olmayışı
2. Matematiksel modelin karmaşıklığı

1.3 Bulanık Mantık

Bulanık mantık yöntemi, daha önceki deneyimlere, pratik kurallara ve sık kullanılan stratejilere dayanarak sistemi anlamaya ve modellemeye dayanır. Bulanık mantık yöntemi şu kural tabanını içerir: **Eğer** <Durum> **İse** <Sonuç>. Kurallar sonuçla "durum" ile ilişkilendirilir. Bunun için bulanık mantık yöntemi deneysel yöteme benzetilebilir çünkü burada da girişin durumuna göre bir giriş-çıkış tablosu oluşturulur fakat deneysel yöntemde tabloda çok kesin sayılar varken bulanık mantık yönteminde bulanık (fuzzy) değerler bulunur. Örneğin **Eğer** giriş_akımı=*düşük* **İse** çıkış_gerilimi=*orta*. Kuralında tabloda "*düşük, orta, yüksek*" gibi değerler bulunur.

Bulanık kontrol yönteminin avantajları :

1. Sistemi kontrol etmek için lineerleştirmeye gerek yoktur.
2. Deneyimli operatörler tarafından oluşturulan kurallar sisteme entegre edilebilir.
3. Kontrol kuralları ve kodu daha anlaşılırdır.

Bulanık kontrol stratejisi deneylerden ve deneyimlerden gelir; matematiksel modellerden gelmez. Bu yüzden de uygulaması çok daha hızlı olur. Bazı özel durumlar için çıkıştaki sapmaları en aza indirmek için kontrol sistemine birkaç kural daha eklemek gerekebilir. Bunun sonucunda kural tabanı anlaşılabilirliğini korur ve verimli kodlama ve sistem dokümantasyonu yapılmasını sağlar

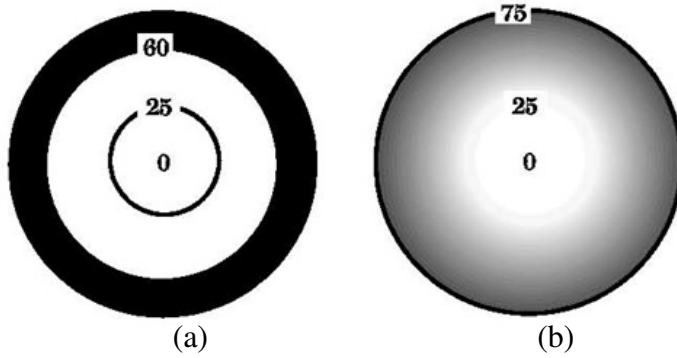
Sebe-sonuç yada durum-sonuç bağlantısı muhakeme ile yapılır. Muhakeme, mantıksal çıkarımla veya sonuca varabilmek için girişleri

değerlendirme ile ifade edilebilir. Biz çoğunlukla çıkarımı şu formdaki kurallarla yaparız: **Eğer** neden1=A ve neden2=B **İse** sonuç=C. Buradaki A, B ve C sözel değişkenlerdir. Örneğin "oda sıcaklığı" *Orta* İse "klima fan hızı" *Hızlı* olsun. *Orta* oda sıcaklığını ifade eden fonksiyonun derecesini, *Hızlı* ise klima fan hızını ifade eden fonksiyonun derecesidir. Muhakeme burada bu iki terimi mantıksal çıkarımda **Eğer...İse** formunda ilişkilendirmede gerekir. Sözel terimleri hesaplanabilir sisteme çevirmek için temel bulanık küme teorisine ihtiyaç duyulur. "oda sıcaklığı" *Orta* durumunu belirlemek için şu sorunun sorulması gerekmektedir: "oda sıcaklığı orta mı?" Geleneksel mantıkta bu sorunun cevabı EVET ya da HAYIR'dır. Bunun yanında bulanık mantık yaklaşımında bunun cevabı %20 ortadır veya %80 ortadır gibi verilebilir. Bu da kümenin üyelik fonksiyonlarının tanımlanmasıyla yapılabilir. A bulanık kümesinin x elemanının üyelik fonksiyonu $\mu_A(x)$, A kümesine ait olan elemanların değerlerini ifade eder. Geleneksel mantıkta örneğin $\mu_A(x) = 1$ elemanların A kümesine ait olduğunu veya $\mu_A(x) = 0$ elemanların A kümesine ait olmadığını gösterir.

1.4 Bulanık Mantık Kümeleri

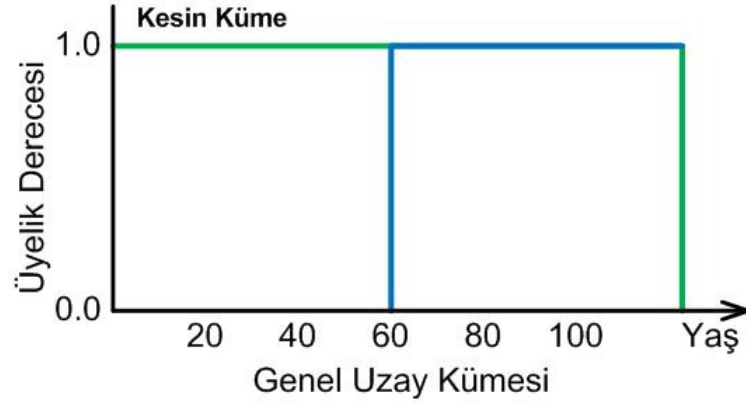
Bulanık mantık kümesi bir objeler sınıfıdır ve üyelik fonksiyonları ile gösterilir (L. A. Zadeh, 1965). Üyelik fonksiyonu bulanık küme içerisindeki üyelerin derecesini verir ve uzay-zamandaki elemanları [0 1] aralığındaki numerik değerlere eşleştirir. Sıfır (0) değerindeki üyelik fonksiyonu, ait olduğu elemanın kesinlikle o bulanık kümenin elemanı olmadığını gösterir. Bir (1) değerindeki üyelik fonksiyonu ise tamamen o bulanık kümesine ait olduğunu gösterir. Üyeliğin derecesi, elemanın o kümeye ait olma derecesini gösterir. Geleneksel yöntemde eğer birinin kilosu 80kg'ın üzerindeyse bu kişi "şişman insanlar bulanık küme"sine aittir. Fakat 80kg sınırındaki keskin geçiş yanlış sonuçlara varılmasına sebep olur. 79,99kg olan kişinin "zayıf insan", 80,01kg olan birinin de "şişman insan" kümesinde olmasını gerektirir ki bu da çok doğru değildir. Bu yüzden, pratik durumlarda insan doğal olarak kullanılır ve bir üyelik eğrisi çoğu zaman bulanık kümeye ait olan elemanların oranlarını en iyi şekilde açıklar.

Bulanık sistemlerin en temel elemanı bulanık kümedir. Bulanık bir küme, değişik **üyelik** yani **ait olma** derecelerine sahip elemanları olan bir küme türüdür. Böyle bir küme, elemanlarının her birine 0 ile 1 arasında üyelik değeri atayabilen bir üyelik fonksiyonu ile karakterize edilebilir. Kümeye **dahil olmayan** elemanların üyelik değerleri **0**, kümeye **tam dahil** olanların üyelik değerleri de **1** olarak atanmaktadır. Kümeye dahil olup olmadıkları belirsiz olan elemanlara ise belirsizlik durumuna göre 0 ile 1 arasında değerler atanır. Oysa kesin küme teorisinde belirsiz eleman diye bir şey söz konusu değildir. Bir eleman ya kümeye dahildir ya da tamamı ile kümenin dışındadır. Dolayısıyla kesin kümelerde bir elemanın alabileceği üyelik değeri ya 0 ya da 1 dir. Şekil 1.1 de yaşlı insanlar için **kesin** ve bulanık kümeler gösterilmiştir. Bu şekillerde siyah rengin tonu yaşlılık düzeyini belirtmektedir. Şekil 1.1.a daki kesin kümeye göre yaşı 60 ve üzerinde olanlar yaşlı, 60 dan küçük olanlar yaşlı değildir. Oysa Şekil 2.b de sadece yaşı 75 in üzerinde olanlar değil, yaşı 25 ile 75 arasında olanlar da yaşlılar kümesine dahildir.



Şekil 1.1: Yaşlılar kümesinin kesin ve bulanık kümelerle gösterimi.

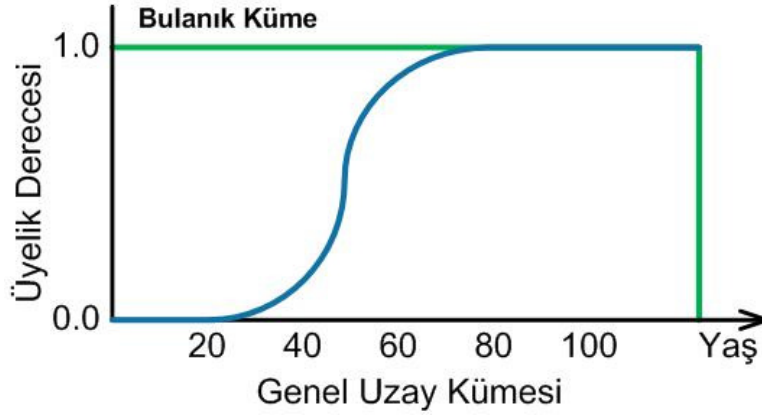
Şekil 1.1.a ve b de verilen kesin ve bulanık kümeler sırasıyla Şekil 1.2 ve Şekil 1.3 de gösterildiği gibi üyelik fonksiyonları (karakteristik fonksiyonlar) ile temsil edilebilir.



Şekil 1.2: Yaş genel uzayında tanımlı yaşlı kesin kümesi

Şekil 1.1 deki kümeler yerine üyelik fonksiyonlarını kullanmak daha yararlı ve anlaşılır olacaktır. Görüleceği gibi, üyelik fonksiyonlarının kullanılması, elemanların kümelere ait olma derecelerini 0 ile 1 arasında değişen sayılara atama olanağı verir. Üyelik fonksiyonları kullanıldığında da, yaşlı kesin kümesine göre, yaşı 60 ve daha büyük olanlar yaşlı, yaşı 60 dan daha küçük olanlar ise yaşlı değildirler. Yani 59 yaşındaki biri yaşlı sayılmazken 60 yaşındaki biri yaşlı sayılmaktadır. Bu da şu anlama gelmektedir. Yaşlı kesin kümesine göre 59 yaşındaki bir insan kesinlikle yaşlı değilken 60 yaşındaki bir insan kesinlikle yaşlıdır.

Yaşlı insanlar bulanık bir küme ile temsil edilirse bu yeni küme Şekil 1.3 de verildiği gibi 20 ile 75 yaşları arasındakileri de kapsar. Ancak bu kapsama klasik kümede olduğu gibi tam bir kapsama değildir. Yani yaşı 20 ile 75 arasında olanlar belirli derecelerle bu kümenin elemanlarıdır. Örneğin yaşı 20'nin altında olanların yaşlı **bulanık** kümesindeki üyelik dereceleri sıfır iken, yaşı 20'nin hemen üzerinde olanların üyelik derecesi sıfırın biraz üzerinde, yaşı 75'e gelmek üzere olanların üyelik derecesi de 1'e yakındır. Örneğin, 25 yaşındaki birisinin YAŞLI kümesindeki üyelik derecesi oldukça az iken, 65 yaşındaki birinin üyelik derecesi oldukça fazladır.



Şekil 1.3: Yaş uzayında tanımlı yaşlı bulanık kümesi

Şekil 1.2 ve Şekil 1.3'te verilen kümeler aslında yaş genel uzayında tanımlı olan ve yaşlı kümesini sırasıyla kesin ve bulanık biçimlerde tanımlayan birer üyelik fonksiyonudur. **Herhangi bir bulanık küme, elemanlarının ait olma derecelerini gösteren bir karakteristik veya üyelik fonksiyon ile temsil edilebilir.** Örneğin bir A bulanık kümesi genel anlamda aşağıdaki gibi gösterilebilir.

$$A = \{(x, \mu_A(x)), \quad \text{öyleki } x \in X\} \quad (1.1)$$

$$A = \sum_{x_i \in X} \frac{\mu_A(x_i)}{x_i} \quad (\text{ayrık biçim}) \quad (1.2)$$

$$A = \int_x \frac{\mu_A(x)}{x_i} \quad (\text{sürekli biçim}) \quad (1.3)$$

Bu denklemlerde;

X : uzay kümesi (kesin küme)

x : uzay kümesinin kesin küme elemanları

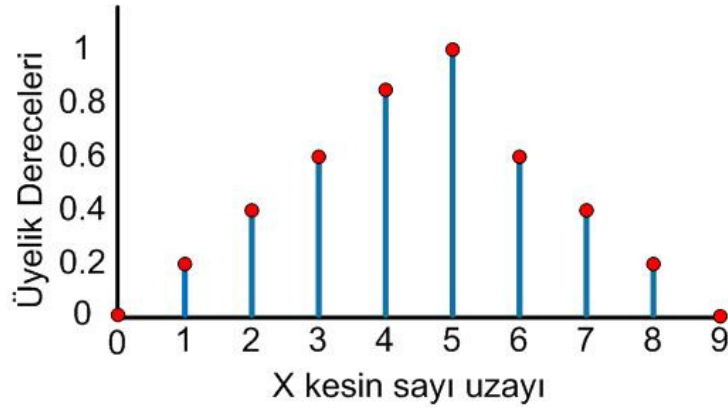
A : bulanık küme

$\mu_A(x)$: x kesin sayılarının A bulanık kümesindeki üyelik dereceleridir.

Denklemler (1.3) ile verilen ifadeler, bir bulanık kümenin üyelik fonksiyonları ile karakterize edilmesini göstermektedir. Bu denklemlerde kullanılan $\sum(\cdot)$ ve $\int(\cdot)$ işaretleri toplama ya da integral alma anlamında değil, üyelik fonksiyonlarının birleşimini temsil etmektedirler. Ayrıca bölme çizgisi de bölme yapmak amacıyla değil, sadece bir işaret olarak kullanılmaktadır.

Örnek olarak aşağıdaki gibi ayrık biçimde verilen A bulanık kümesini $X = \{0,1,2,3,4,5,6,7,8,9\}$ kesin sayı uzay kümesinde grafikte gösterelim.

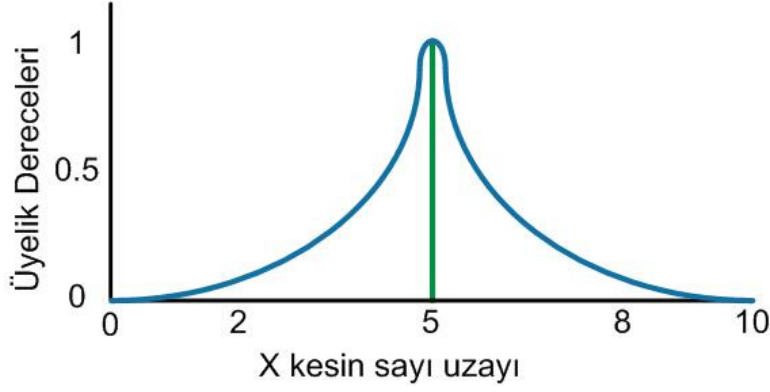
$$A = \frac{0}{0} + \frac{0.2}{1} + \frac{0.4}{2} + \frac{0.6}{3} + \frac{0.8}{4} + \frac{1}{5} + \frac{0.6}{6} + \frac{0.4}{7} + \frac{0.1}{8} + \frac{0}{9} \quad (1.4)$$



Şekil 1.4: Ayrık zamanlı bulanık küme üyelik fonksiyonunun çizimi

Bir başka örnek olarak da aşağıdaki gibi sürekli biçimde tanımlanan 5'e yakın sayılar kümesini grafikte gösterelim.

$$\mu_A(x) = \frac{1}{1 + 10(x - 5)^2} \quad (1.5)$$



Şekil 1.5 Sürekli zamanlı bulanık küme üyelik fonksiyonu

Bulanık kümeleri karakterize eden üyelik fonksiyonlar değişik biçimlere sahiptirler. Üyelik fonksiyonu olarak en çok kullanılan bulanık küme fonksiyonları, üçgen, yamuk, gaussian ve çan, fonksiyonu biçiminde olanlardır. Bu üyelik fonksiyonu türlerinin yanısıra sigmoid, sinüsoid ve Cauchy türü fonksiyonlar da yeri geldikçe kullanılır. Biraz önce kullanılan yaşlı bulanık kümesi de bir çeşit sigmoid fonksiyon olabilir. Sigmoid fonksiyonlar ya sağa ya da sola bakarlar ve genellikle kesin genel kümesinin alt ve üst sınırlarında yer alırlar.

Kullanımlarını kolaylaştırmak amacıyla bulanık kümeleri temsil eden üyelik fonksiyonları (karakteristik fonksiyonlar) parametrelerine bağlı olarak formüle edilirlen (L.A.Zadeh, 1973). Parametrelerin ayarlanabilme kolaylığı, üyelik fonksiyonlarının da ayarlanabilmesini kolaylaştırır.

2. BULANIK KONTROL SİSTEMLERİNİN TEMEL YAPISI

2.1 Bulanık Kontrol Sistemleri

Klasik kontrol sistem tasarımıındaki ilk adım kontrol edilecek düzeneğin transfer fonksiyonunun tam olarak elde edilmesidir. Başka bir deyişle matematiksel modelinin oluşturulmasıdır. Ayrıca uygun ve etkin bir kontrol sağlamak için sistem parametrelerinin zamanla değişmemesi istenir. Fakat uygulamadaki sistemlerin pek çoğu bilinmeyen parametrelere veya kompleks ve doğrusal olmayan karakteristiklere sahiptirler. Bu gibi sistem parametrelerinin değiştiği veya sistemde doğrusallıktan sapma olduğu durumlar için adaptif kontrol yöntemleri gerçekleştirilmiştir. Böyle uygulamalarda, uygulama alanındaki uzman kişilerin bilgisi klasik kontrol sistemlerinden daha faydalı ve etkili olabilmektedir. Bu yüzden insan düşünme yeteneğini ve bilgisini kontrol sisteminin içine sokabilecek bir kontrol yöntemi olan Bulanık Mantık Denetleyicisi (Fuzzy Logic Controller, BMD) iyi bir çözüm olabilmektedir. Bulanık mantığa dayanan BMD sistemleri geleneksel ve matematiksel sistemlerin aksine insan düşüncesinin ruhuna, ifade etme şekline yani diline daha yakındır. Bu sayede BMD sistemleri bir uzmanın kişisel ve mantıksal bilgi ve becerilerini numerik hesaplamalar kullanarak otomatik bir kontrol stratejisine çevirebilir. Temel olarak BMD sistemleri şekil 2.1'de de görüldüğü gibi dört temel arabirimden oluşur:

1. Bulanıklaştırma
2. Bilgi Tabanı
3. Karar Mekanizması
4. Durulaştırma



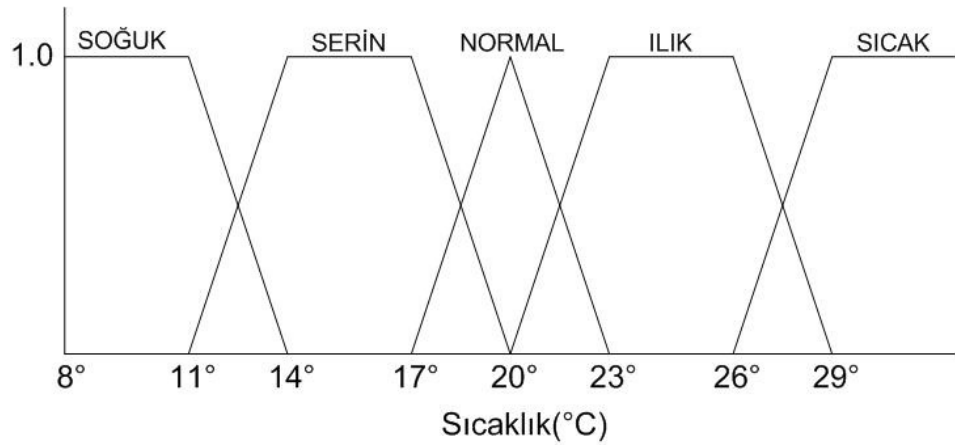
Şekil 2.1: Bulanık Mantık Denetleyici (BMD) temel yapısı

2.1.1 Bulanıklaştırma

BMD sistemleri kesin olmayan dilsel ifadelerle gösterilen uygulama alanına ait bilgileri kullanmaktadır. Başka bir açıdan BMD'nin dayandığı bulanık küme teorisinde işlemler bulanık değerler üzerinde yapılmaktadır. Bu sebeple dış ortamdan ölçülen reel giriş değişkenlerini bulanık değişkenlere çeviren bulanıklaştırma BMD'de önemli bir rol oynar ve ilk adımı oluşturur. Bu arabirimde gerçekleştirilen temel işlemler şunlardır: Kontrolü yapılan sistemden giriş değişkenlerinin gerçek zamanda ölçümlerinin alınması, eğer gerekliyse giriş değişkenlerini sabit bir sayıyla çarpmak ya da bölmek gibi işlemlerle ölçeklendirme yapılması (scaling), yine gerekliyse ve isteğe bağlı olarak seçilen dilsel uzayın kesikli hale dönüştürülmesi, ölçümü yapılan reel giriş değişkenlerinin her birisini o değişkene ait söylem uzayına göre dilsel değişkenlere dönüştürmek ve bunlara ait üyelik değerlerini bulmak sayılabilir.

Sonuç olarak dilsel niteleyicisi ve üyelik değeri elde edilen her bir reel giriş değişkeni bulanık değişkenlere veya başka bir deyişle bulanık sayılara dönüştürülür. Her bir değişken için söylem uzayı değişkenin alabileceği maksimum ve minimum değerler arasını kapsar. Sonlu sınırlara sahip bu söylem uzayları sonlu sayıda dilsel değişkenlere ayrılır. Bu bölme işleminde kullanılan fonksiyonlara ise dilsel değişkenler kümesinin üyelik fonksiyonu denir. Bulanıklaştırma arabirimini oluşturmada üyelik fonksiyonunu belirlemek ve söylem uzayını bölgelere ayırmak için matematiksel bir metot yoktur ve sayısız şekillerde gerçekleştirilebilir. Bu ise kontrol sistemine esneklik vermesiyle

beraber tasarım işlemlerini biraz daha zorlaştırmaktadır. Ve bu arabirim, kontrol sistemini büyük ölçüde etkilediği için dikkatli bir şekilde hazırlanması gerekir. Üyelik fonksiyonları için birçok eğri tipi kullanılabilir fakat en çok kullanılanlar üçgen ve yamuk üyelik fonksiyonlarıdır çünkü bunların gömülü sistemleri tarif etmesi daha kolaydır. Şekil 2.2, bir sistemin girişi için oluşturulan, yamuk ve üçgen üyelik fonksiyonlarından oluşan bulanık kümeyi göstermektedir. Her bir bulanık küme, bir giriş değer bölgesini kapsayacak şekilde grafiklendirilmiştir. Her bir giriş değeri, bu bulanık kümeye göre değerlendirilir ve üyeliğin derecesi belirlenir. Üyelik fonksiyonları sistemi düzgün bir şekilde eşleştirmeye izin verecek şekilde kapsamlı olmalıdır. Bulanıklaştırma işlemi, sistemin giriş ve çıkışlarını sözsel olarak ifade etmeye izin verir ve bu da kompleks sistemlerin basit bir şekilde tanımlanabilmesini sağlar.



Şekil 2.2: Sıcaklığı gösteren bulanık küme (M.G.Simoës)

Basit bir klima uygulamasını ele alalım. Odanın ısısını "normal ısı"da tutmak için sıcaklık, bulanık algoritmaları işleyen bir işlemciye gönderilmesi sayesinde çıkış motor hızını hızlandırıp yavaşlatacaktır. Şekil 2.2'de sıcaklık için oluşturulan bulanık küme gösterilmektedir: SOĞUK, SERİN, NORMAL, ILIK VE SICAK.

SERİN ve ILIK için olan üyelik fonksiyonları yamuk, NORMAL için olan üçgen, SOĞUK ve SICAK için olanlar ise sistemin limitlerinin sınırları belirlediği

yarım üçgenler olarak seçilmiştir (8°nin altı ve 32°nin üstü oda sıcaklığı için konforlu değildir ve bu ısılar limit olarak seçilmiştir). Bu tür bulanık bir sistem tasarlanarak derecelere ve biraz da dizayn edicinin deneyimine ve sezgisine bağlıdır. Bir eskimo ile ekvator da yaşayan bir kişi çok farklı dizaynlar ortaya çıkarabilirler. Şekil 2.2 gösteriyor ki sistem lineerdir. 18'lik bir giriş 0.75 derecede SERİN ve 0.25 derecede NORMAL olarak değerlendirilir. Klimanın motor hızını kontrol edecek kuralları oluşturmak için, insanların klimaların motor hızını nasıl ayarladıklarına uygulamalı olarak bakmak gerekmektedir. Eğer oda sıcaklığı normale motor hızını orta hızda bırak, eğer ılık ise hızı artırır ve eğer sıcak ise hızı şiddetli olarak artırır. Diğer taraftan, eğer odanın ısıyı serinse hızı yavaşlat ve eğer soğuksa motoru durdur. İşte bu bulanık mantığın güzelliğidir: genel deyişle, sözsözsel açıklamanın bilgisayar kontrollü sistemlere aktarılmasıdır. Bu nedenle kuralları oluşturabilmek için ikili bitsel (logic) işlemlerin nasıl kullanılacağına anlaşılması gerekmektedir.

İkili bitsel işlemlerin "tamamen doğru" ve "tamamen yanlış" arasındaki doğru-doğru eşleşme kavramlarını kontrol edebilmek için genişletilmesi gerekmektedir. Bulanık mantığında "X DÜŞÜK" ile "Y YÜKSEK" durumlarının birleştirilmesi halinde X DÜŞÜK ve Y YÜKSEK şeklinde olacaktır. Bu "ve" işleminin doğruluk değeri nedir? Bulanık kümesindeki ikili işlemler üyelik fonksiyonları ile uygulanır. Bulanık işlemler için birçok farklı yorumlar olmasına rağmen, gömülü sistem kontrol uygulamaları için şu tanımlamalar çok uygundur:

$$\text{Doğruluk}(X \text{ ve } Y) = \text{En küçük}(\text{Doğruluk}(X), \text{Doğruluk}(Y))$$

$$\text{Doğruluk}(X \text{ veya } Y) = \text{En büyük}(\text{Doğruluk}(X), \text{Doğruluk}(Y))$$

$$\text{Doğruluk}(X \text{ değil}) = 1.0 - \text{Doğruluk}(X)$$

2.1.2 Bilgi tabanı

Temel olarak uygulama sahasına ait uzman bilgisini ve kontrol hedeflerini içeren bilgi tabanı BMD'nin dilsel kavramları kullanabilmesini sağlayan arabirimdir. Bulanık kontrol sistem tasarımında klasik kontrol sistemlerinde

olduğu gibi analitik bir metot olmaması bu arabirimin oluşturulmasını güçleştirmektedir. Veri tabanı ve kural tabanı olmak üzere iki kısımdan oluşur:

2.1.2.1 Veri Tabanı

Kısaca dilsel kavramları (bulanık değişkenleri) BMD sisteminde kullanabilmek için gerekli tanımları içerir. Başlıca giriş, çıkış değişkenlerine ait dilsel uzayların tanımlarını, üyelik fonksiyonlarını, eğer sistemde değişkenler normalize edilmişse ve kesikli hale dnştrlmşse bu işlemlerle ilgili bilgileri ve BMD'de kullanılan bulanık işlemlerinin tanımlarını kapsar.

2.1.2.2 Kural Tabanı

Uygulama alanındaki uzman kişilerin kontrol hedeflerini ve kontrol sırasında takip ettikleri yöntemleri karakterize etmeyi sağlayan dilsel değişkenlerden oluşturulan kurallar kümesidir. Oluşturulan bu kurallara bulanık kurallar denir. Dilsel kural tabanı, sistemde dilsel-bulanık giriş değişkenlerine hangi dilsel-bulanık değişkenlerinin çıkışa verileceğinin ifade edildiği bölümdür. Genellikle kurallar şart cümlelerinden (**Eğer X=A İse Y=B**) oluşur. Kuralların sayısı ve doğruluğu sistemin performansını etkileyen en önemli faktörlerdir. Sistemin kural tabanını oluşturmak için yollar kullanılmıştır.

Bunlardan birisi, uygulanacak sistemi iyi tanıyan bir uzman bilgisi ile sistem giriş-çıkış değişkenleri ve kontrol kuralları belirlenir. Kurallar giriş-çıkış değişkenlerinin dilsel ifadelerinden oluştuğundan bu işlem uzmanın kendi kontrol stratejisinin kural tabanına aktarımının en kolay ve güvenli yolludur. Diğer bir yol ise, daha önceden operatörün kontrol yönteminin taklit edilmesidir. Bazı endüstriyel sistemlerde modellenemeyen ve ancak bir operatör yardımıyla kontrol edilebilen süreçlerin; operatörün izlenmesiyle, yaptığı işlemlerin şart cümlelerine (**Eğer ... İse**) dönüştürerek kural tabanının elde edilmesidir. Kural tabanıyla ilgili nc yol ise sistemin bulanık modellenmesidir. Burada bulanık durum

değişkenleri ve bulanık kestirim ile optimum bir bulanık denetleyici temel hedeftir. Sistemin giriş-çıkış fonksiyonu veya verileri belirli ise öğrenmeye dayalı bir sistem, kural tabanı oluşturmak için kullanılabilir. Öğrenme yöntemi, sistem kurulmadan önce uygulanarak sabit bir kural tabanı oluşturulur. Daha sonra sistem performansının ölçülmesiyle kurallarda değişiklik yapılabilir. Bu yöntemin en önemli ve gerekli kısmı sisteme ait istenen (optimum) kontrol sürecinin giriş-çıkış verilerinin elimizde bulunmasıdır. Kural tabanı oluşturulduktan sonra gerekiyorsa her kurala belirli bir ağırlık vermek veya gereksiz (kullanılmayan) kuralların eliminasyonu işlemleri hızlandırmak için gerekli olabilmektedir. Kontrol kurallarının oluşturulması, sistemin bulanık durumları, bulanık tanımlama gibi çok geniş alanları kapsayan ve belirli bir sistematik yaklaşımın bulunmadığı bulanık modelleme üzerinde çalışmalar devam etmektedir.

2.1.3 Karar Mekanizması

BMD'nin en önemli arabirimidir. Bilgi tabanında tanımlanan bulanık kavram ve kuralları kullanarak giriş değişkenlerinin durumuna göre uzman bir kişiden beklenen kontrol hareketlerini dilsel ifade olarak üretir. Çıkışta dilsel değişkeni ve üyelik fonksiyonu belli bulanık sayılar elde edilir. Çıkış değişkenlerine ait üyelik fonksiyonu bulunurken çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Literatürde en çok geçen yöntemler minimum korelasyonu ve çarpım korelasyonu olarak sayılabilir. Bu yöntemler kullanılırken ilk önce, dilsel çıkış değişkenlerinin üretilmesine sebep olan giriş değişkenlerine ait üyelik dereceleri isteğe bağlı olarak minimum (VE) veya maksimum (VEYA) işleme tabi tutulur ve çıkış üyelik fonksiyonlarının etkinlik derecesi diyebileceğimiz tek bir üyelik derecesi elde edilir. Genelde etkinlik derecesini elde etmede literatürde minimum işlemi kullanılmıştır. Bu işlem üretilen her bir çıkış için tekrarlanır ve elde edilen bu etkinlik dereceleri yukarıda geçen metotlardan birinde kullanılarak çıkış dilsel değişkenleri ve üyelik fonksiyonları oluşturulur. Bu işlemler sonucu tek bir bulanık sayının elde edilmesi gerekmez ve genelde de birden fazladır. Önceden de belirttiğimiz gibi bu BMD'nin en belirgin özelliğidir.

2.1.4 Durulaştırma

Durulaştırma arabirimi, sonuç çıkartım mekanizmasının ürettiği çıkış değişkenlerine ait bulanık sayılardan reel kontrol işaretlerinin elde edildiği bölümdür. Bulanık sayılardan reel çıkış değerleri maksimum merkezi, maksimumların ortalaması ve alanların ağırlık merkezi gibi üç farklı dönüşüm ile elde edilebilir. Maksimumların ortalaması yöntemi geçici durum için, alanların ağırlık merkezi yöntemi ise kalıcı durum için daha iyi sonuçlar vermektedir ve bu nedenle ağırlık merkezi durulaştırmada en çok kullanılan yöntemdir. Ayrıca çıkışa ait reel değerkenlerin sınırları, dilsel değerkenlerin söylem uzayından farklı ise bulanıklaştırmadaki gibi bir ölçeklendirme durulaştırmada da yapılabilir.

2.1.4.1 Alanların Merkezi (Center-of-Area) Yöntemi:

Alanın Merkezi yöntemi, Ağırlık Merkezi Yöntemi olarak da bilinir çünkü bu yöntemde çıkış bulanık terimini gösteren bileşik alanın kütle merkezi hesaplanır.

$$y_o = \frac{\int \mu(y)y}{\int \mu(y)} \quad (2.1)$$

Denklem (2.1)'deki y değerleri, bulanıklaştırmada oluşturulmuş fonksiyonun elemanları, $\mu(y)$ değerleri ise, bu elemanlara karşılık gelen üyelik derecelerini belirtir.

2.1.4.2 Maksimumun Merkezi (Center-of-Maximum) Yöntemi:

Bu yöntemde sadece üyelik fonksiyonunun tepe (peak) noktası kullanılır. Karar verilen durulaştırılmış değer, ağırlıkların dengeli olduğu bölgenin bulunmasıyla hesaplanır. Bu nedenle üyelik fonksiyonunun alanının rolü yoktur; sadece tepe noktası kullanılır (singleton membership). Sayısal çıkış, üyelik tepe noktalarının ağırlıklı ortalamasının hesaplanmasıyla elde edilir.

$$y_o = \frac{\sum_{i=1}^k \mu(y_i) y_i}{\sum_{i=1}^k y_i} \quad (2.2)$$

Denklem (2.2)'deki y_i değerleri, bulanıklaştırmada oluşturulmuş her bir fonksiyonun üyelik derecesi en büyük olan elemanlarıdır. $\mu(y_i)$ değerleri ise, bu elemanlara karşılık gelen üyelik derecelerini belirtir.

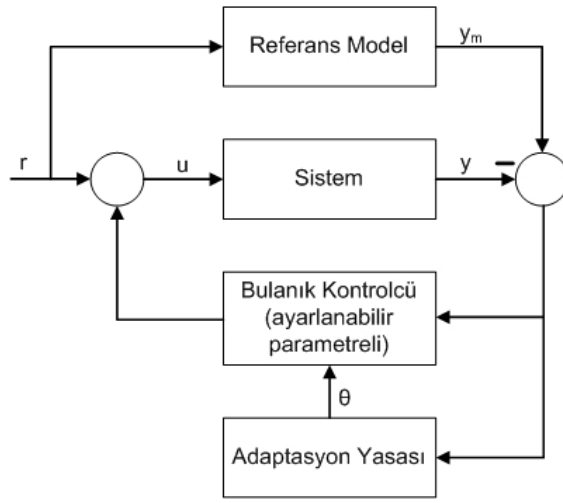
2.1.4.3 Maksimumun Ortalaması (Mean-of-Maximum) Yöntemi:

Bu yöntem sadece Maksimumun Merkezi yönteminin çalışmadığı durumlarda kullanılır. Bu durum tepe noktanın tek olmadığı üyelik fonksiyonlarında gerçekleşir ve soru şudur ki eşit seçimli bu noktalardan hangisi alınmalıdır?

2.2 Adaptif bulanık mantık denetleyici

BMD'lerin, parametreleri değişebilen sistemleri de kontrol edebilmesi beklenmektedir. Adaptif kontrolün temel amacı genel olarak, parametreleri sabit olmayan, zamanla değişen, sistemleri de kararlı bir şekilde kontrol edebilmektir. Bu nedenle modern bulanık mantık kontrolü adaptif olmak zorundadır (Li-Xin Wang, 1996)

Adaptif bulanık mantık denetleyici (ABMD)'nin temel düzeneği şekil 2.3'teki gibidir. Burada *referans model*, bulanık mantık kontrol sistemi (BMKS)'nin takip etmesi gereken ideal sistem cevabını belirtir. *Sistem*'in bilinmeyen komponentlere sahip olduğu varsayılır. *Bulanık kontrolcü*, θ parametreleri ayarlanabilen bulanık sistemden oluşturulur. *Adaptasyon yasası*, çevirimiçi olarak θ parametrelerini, sistem çıkışı $y(t)$ 'nin referans model çıkışı $y_m(t)$ 'yi takip edecek şekilde ayarlar.



Şekil 2.3: Adaptif Bulanık Mantık Denetleyici temel düzeneği

Şekil 2.3'ten adaptif BMK sistemleri ile adaptif olmayan BMK sistemleri arasındaki temel farklar şu şekilde görülebilir:

Adaptif BMK sistemindeki bulanık kontrolcü gerçek zamanlı işlemlerde değişim göstermektedir. Bunun yanında, adaptif olmayan BMK sistemlerindeki bulanık kontrolcüler zaman içerisinde değişmezler, sabittirler.

Adaptif bulanık mantık denetleyicilerin, adaptif olmayan bulanık mantık denetleyicilere göre en önemli avantajı çoğunlukla çok daha iyi performans sağlamalarıdır. Çünkü adaptif bulanık mantık kontrolcüler değişen çevre koşullarına göre kendilerini ayarlarlar.

Sistem hakkında çok daha az bilgiye ihtiyaç duyarlar çünkü “adaptasyon yasası” çevrimiçi işlemlerde sistem dinamiğinin öğrenilmesine yardımcı olur.

Adaptif bulanık mantık denetleyicilerin, adaptif olmayan bulanık mantık denetleyicilere göre en önemli dezavantajları ise; sonuçta oluşturulan kontrol sisteminin analiz edilmesi çok daha zordur çünkü doğrusal olmayışının yanısıra zamana da bağlıdır. Uygulaması daha pahalıdır.

3. İKİLİ SIVI TANKI

Çalışmamızda anlatılacak kontrol yöntemlerini deneysel olarak gösterebilmek için İkili Sıvı Tankı kullanılacaktır. Bu bölümde bu deney setinin tanımlaması ve farklı konfigürasyonları için matematiksel modellemeleri üzerinde durulacaktır.

3.1 Tanımlama

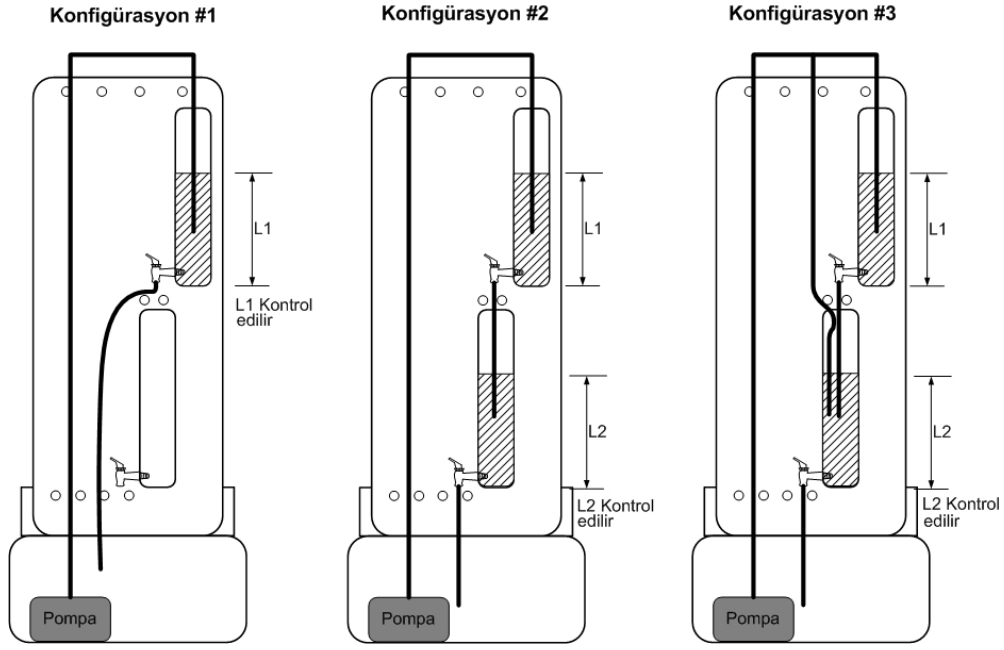
İkili sıvı tankı, iki adet su tankı, bir pompa ve bir su kabından oluşur. Pompa suyu dik olarak istenilen tanklara pompalar. Ön taraftaki tanklarda üstteki (birinci) tanktaki musluktan su alttaki (ikinci) kaba akar. İkinci kaptaki su da musluk ile alttaki su kabına akabilmektedir. Tanklara monte edilmiş olan muslukların açıklığı ayarlanabilmektedir.

Bu basit sistem üç farklı şekilde konfigüre edilebilir (Quanser Consulting, www.quanser.com; T.L.Seng, M.Khalid, R.Yusof, 1998; C.Gabriela, V.Matei, M.Camelia, I.Eugen, 2008):

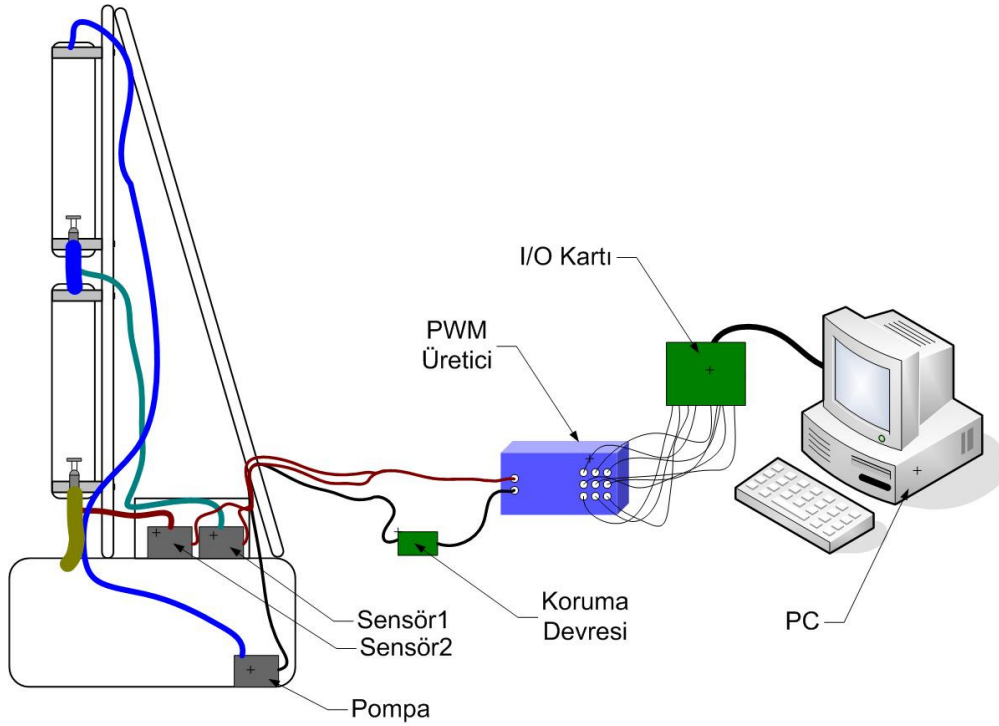
Düzenek #1: SISO (Single Input Single Output – Tek Giriş Tek Çıkış) sistem. Pompa Tank1'i besler. Tank1'in sıvı seviyesi kontrol edilir. Bu uygulamada Tank2 kullanılmaz.

Düzenek #2: State coupled (Çift Durumlu) SISO sistem. Pompa Tank1'i besler. Tank1'deki su Tank2'ye akar. Tank2'nin sıvı seviyesi kontrol edilir. Tanklardaki musluk açıklıkları değiştirilebilir.

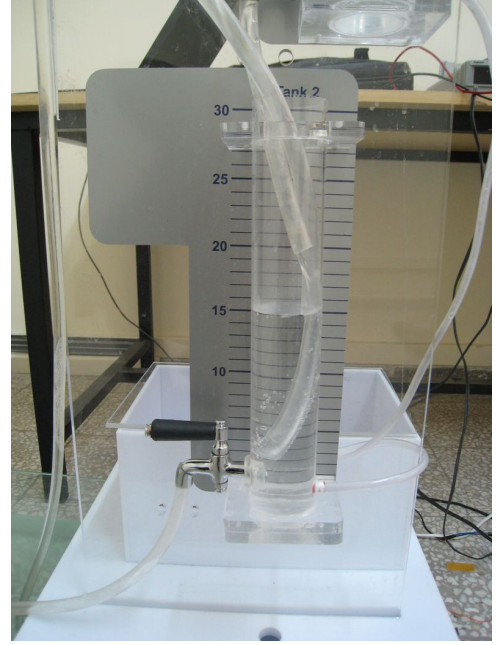
Düzenek #3: State coupled-input coupled (Çift Durumlu ve Çift Girişli) SISO Sistem. Pompa iki tankı birden besler. Tank1'deki su Tank2'ye akar. Tank2'nin sıvı seviyesi kontrol edilir. Tanklardaki musluk açıklıkları değiştirilebilir.



Şekil 3.1: İkili sıvı tankının üç farklı düzenek şekli



Şekil 3.2: Uygulama laboratuvarı sistem şeması



Şekil 3.3: Laboratuvar deney ortamı

3.2 Matematiksel Modelleme

3.2.1 Düzenek #1

Tek tanklı sistem için

Tanka giriş akışı:

$$F_{in} = K_m V_p \left(\frac{cm^3}{s} \right) \quad (3.1)$$

burada K_m pompa sabiti, V_p pompaya uygulanan voltajdır (s saniye birimidir). Tanktan çıkış akış hızını, küçük delikler için Bernoulli denkleminde yazılabilir:

$$V_o = \sqrt{2gL_1} \left(\frac{cm}{s} \right) \quad (3.2)$$

buradaki g , cm/s^2 cinsinden gravitasyonel hızlanma sabiti ve L_1 cm cinsinden Tank1'deki su seviyesidir. Buradan tanktan çıkış akışı:

$$F_{out} = a_1 \sqrt{2gL_1} \left(\frac{cm^3}{s} \right) \quad (3.3)$$

olarak yazılabilir. Buradaki a_1 , tanktan çıkış deliğinin kesit alanıdır.

Giriş ve çıkış akışları arasındaki fark:

$$F_{in} - F_{out} = K_m V_p - a_1 \sqrt{2gL_1} \left(\frac{cm^3}{s} \right) \quad (3.4)$$

buradan seviyedeki değişim şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{L}_1 = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gL_1} + \frac{K_m}{A_1} V_p \left(\frac{cm}{s} \right) \quad (3.5)$$

Bu eşitlikteki A_1 , Tank1'in kesit alanıdır. Bu denklemi L_0 denge noktası için doğrusallaştırırsak:

$$\dot{L}_1 = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_0}} L + \frac{K_m}{A_1} V_p \quad (3.6)$$

Verilen bir L_0 denge noktasında seviyeyi sabit tutabilmemiz için pompaya sabit bir voltaj uygulamamız gerekir. Çıkıştan sürekli bir su akışı olduğu için seviyedeki bozulmaları önlemek için kontrol döngüsüne bir integratörün eklenmesi gerekir. Tek tanklı sistemin durum uzayı modeli şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{\zeta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_0}} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L \\ \zeta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_m}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix} V_p \quad (3.7)$$

buradaki ζ , L_1 seviyesi için tanımladığımız integratördür.

L_0 seviyesinde sabit kalmak için gereken denge voltajı şu şekilde hesaplanabilir:

$$0 = K_m V_{p0} - a_1 \sqrt{2gL_0} \Rightarrow V_{p0} = a_1 \frac{\sqrt{2gL_0}}{K_m} \quad (3.8)$$

Doğrusallaştırılmış (3.6) denkleminin laplace transformu alınırsa:

$$sL_1(s) = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} L_1(s) + \frac{K_m}{A_1} V_p(s) \quad (3.9)$$

$$L_1(s) = \left(s + \frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} \right) = \frac{K_m}{A_1} V_p(s)$$

$$\frac{L_1(s)}{V_p(s)} = \frac{K_m}{A_1 s + a_1 \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}}}$$

$$\frac{L_1(s)}{V_p(s)} = \frac{\frac{K_m}{a_1 \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}}}}{\frac{A_1}{a_1 \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}}} s + 1} = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (3.10)$$

Tank1'in sıvı seviyesinin pompanın voltajına göre transfer fonksiyonu (3.10)'daki gibi yazılabilir. Buradaki zaman sabiti τ ,

$$\tau = \frac{A_1}{a_1} \sqrt{\frac{2L_{10}}{g}} \quad (3.11)$$

Sürekli hal kazancı K ,

$$K = \frac{K_m}{a_1} \sqrt{\frac{2L_{10}}{g}} \quad (3.12)$$

Ve sistem parametreleri,

$$A_1 = \pi r^2 = \pi 4.5^2 \text{ (cm}^2\text{)},$$

$$a_1 = \pi r^2 = \pi 0.25^2 \text{ (cm}^2\text{)},$$

$$K_m = 5 \text{ (cm}^3\text{/V} \cdot \text{s)},$$

$$g = 980 \text{ (cm/s}^2\text{)}$$

Şeklindedir Seviye $L_{10} = 15 \text{ cm}$ 'de sabit tutulmak istenirse:

$$K = 4.4554$$

$$\tau = 14.172$$

$$\Rightarrow \frac{L_1(s)}{V_p(s)} = \frac{4.4554}{14.172s + 1} \quad (3.13)$$

olarak yazılabilir.

3.2.2 Düzenek #2

İki tank sistem, durum çiftlemeli.

Tank1 için, birinci düzenekteki denklemler geçerlidir. Tank2'nin giriş akışı, Tank1'in çıkış akışına eşittir. Tank2 giriş akışı:

$$F_{2in} = a_1 \sqrt{2gL_1} \left(\frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \right) \quad (3.14)$$

Çıkış akışı:

$$F2_{out} = a_2 \sqrt{2gL_2} \left(\frac{cm^3}{s} \right) \quad (3.15)$$

olarak yazılabilir. Buradan Tank2'nin seviyesindeki değişim şu şekilde yazılabilir:

$$\dot{L}_2 = \frac{a_1}{A_2} \sqrt{2gL_1} - \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gL_2} \quad (3.16)$$

Bu eşitlikteki A_2 , tank2'nin kesit alanıdır. Bu denklemi L_{10} ve L_{20} denge noktaları için lineerleştirirsek:

$$\dot{L}_2 = -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} L_2 + \frac{a_1}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} L_1 \left(\frac{cm}{s} \right) \quad (3.17)$$

Tüm sistem 2 ikinci derece sistemle gösterilebilir.

Tank1 giriş olarak pompa voltajını kullanır:

$$\begin{bmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{\zeta}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ \zeta_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{K_m}{A_1} \\ 0 \end{bmatrix} V_p \quad (3.18)$$

Tank2 giriş olarak L_1 sıvı seviyesini kullanır:

$$\begin{bmatrix} \dot{L}_2 \\ \dot{\zeta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_2 \\ \zeta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{a_1}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} \\ 0 \end{bmatrix} L_1 \quad (3.19)$$

buradaki $\dot{\zeta}_2$, L_2 seviyesi için tanımladığımız integratördür.

Bu şekilde L_2 seviyesini kontrol etmek için iki döngülü bir sistem dizayn edilebilir. Denge durumunda seviyeler sabittir:

$$\frac{a_1}{A_2} \sqrt{2gL_1} = \frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gL_2} \Rightarrow L_{10} = \frac{a_2^2}{a_1^2} L_{20} \quad (3.20)$$

Bu, teknik olarak L_1 kullanılarak L_2 'nin kontrol edilebileceğini gösterir fakat eğer oran kesin olarak bilinmiyorsa geri beslemeli kapalı döngü performansı artırır. Seviyeyi sabit tutmak için gerekli olan pompa voltajı şu şekilde yazılabilir:

$$K_m V_p = a_1 \sqrt{2gL_{10}} \Rightarrow V_p = a_1 \frac{\sqrt{2gL_{10}}}{K_m} \quad (3.21)$$

L_1 ve L_2 seviyelerindeki değişimin doğrusallaştırılmış şekillerini (3.6) ve (3.17)'den yazıp Laplace dönüşümü yaparsak:

$$sL_2(s) = L_1(s) \left[-\frac{a_2}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} + \frac{a_1}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} \right] \quad (3.22)$$

$$L_1(s) = V_p(s) \frac{K_m}{A_1 s + a_1 \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}}} \quad (3.23)$$

(3.23) eşitliğini (3.22)'de yerine yazarsak Tank2'nin sıvı seviyesinin pompanın voltajına göre transfer fonksiyonu şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{L_2(s)}{V_p(s)} = \frac{K_m \frac{a_1}{A_1 A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}}}{s^2 + s \left(\frac{a_2}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} + \frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} \right) + \left(\frac{a_1 a_2 g}{2A_1^2 \sqrt{L_{10} L_{20}}} \right)} \quad (3.24)$$

Sistem parametreleri,

$$A_1 = A_2 = \pi r^2 = \pi 4.5^2 (cm^2),$$

$$a_1 = a_2 = \pi r^2 = \pi 0.18^2 (cm^2),$$

$$K_m = 5 (cm^3 / V \cdot s),$$

$$g = 980 (cm/s^2)$$

Şeklinde. Seviye $L_{10} = 15 cm$ ve $L_{20} = 15 cm'$ de sabit tutlmak istenirse:

$$\frac{L_2(s)}{V_p(s)} = \frac{0.0115}{s^2 + 0.0732s + 0.0013} \quad (3.25)$$

olarak yazılabilir.

3.2.3 Düzenek #3

İki tank sistem, durum ve giriş çiftlemeli.

b_1 Tank1'in giriş akış kesit alanı ve b_2 Tank2'nin giriş akış kesit alanı ise her iki tank için giriş akışlarını şu şekilde yazabiliriz:

$$F_{p1} = \frac{b_1}{b_1 + b_2} K_m V_p = \rho K_m V_p \left(\frac{cm^3}{s} \right) \quad (3.26)$$

$$F_{p2} = \frac{b_2}{b_1 + b_2} K_m V_p = (1 - \rho) K_m V_p \left(\frac{cm^3}{s} \right) \quad (3.27)$$

(3.26) ve (3.27) eşitliklerinden ve bir önceki bölümde çıkarılan durum-uzay modellerden yararlanarak düzenek#3 için durum-uzay eşitliği şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} \dot{L}_1 \\ \dot{L}_2 \\ \dot{\zeta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} & 0 & 0 \\ \frac{a_1}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} & -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \zeta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (1 - \rho) \frac{K_m}{A_1} \\ \rho \frac{K_m}{A_2} \\ 0 \end{bmatrix} V_p \quad (3.28)$$

Denge durumunda:

$$a_1 \sqrt{2gL_{10}} = (1 - \rho) K_m V_p$$

$$0 = a_1 \sqrt{2gL_{10}} - a_2 \sqrt{2gL_{20}} + \rho K_m V_p$$

Buradan;

$$L_{10} = \frac{a_2^2}{a_1^2} (\rho - 1)^2 L_{20} \quad (3.29)$$

$$V_{p0} = \frac{a_2}{K_m} \sqrt{2gL_{20}} \quad (3.30)$$

L_1 ve L_2 seviyelerindeki değişim:

$$\dot{L}_2 = \frac{a_1}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} L_1 - \frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} L_2 + \rho \frac{K_m}{A_2} V_p \quad (3.31)$$

$$\dot{L}_1 = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} L_1 + (1 - \rho) \frac{K_m}{A_1} V_p \quad (3.32)$$

(3.31) ve (3.32)'in Laplace dönüşümleri yapılırsa:

$$sL_1(s) = -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} L_1 + (1 - \rho) \frac{K_m}{A_1} V_p(s) \quad (3.33)$$

$$sL_2(s) = \frac{a_1}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} L_1(s) - \frac{a_2}{A_2} \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} L_2(s) + \rho \frac{K_m}{A_2} V_p(s) \quad (3.34)$$

(3.33), (3.34)'te yerine yazılıp gerekli düzenlemeler yapılırsa:

$$\frac{L_2(s)}{V_p(s)} = \frac{(1 - \rho) \frac{a_1}{A_1} K_m \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} + \rho K_m s + \rho K_m \frac{a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}}}{A_2 s^2 + s \left(a_2 \sqrt{\frac{g}{2L_{20}}} + \frac{A_2 a_1}{A_1} \sqrt{\frac{g}{2L_{10}}} \right) + \frac{a_1 a_2 g}{2A_1 \sqrt{L_{10} L_{20}}}} \quad (3.35)$$

Tank2'nin sıvı seviyesinin pompanın voltajına göre transfer fonksiyonu (3.35)'teki gibi ifade edilebilir.

Sistem parametreleri,

$$A_1 = A_2 = \pi r^2 = \pi 4.5^2 (cm^2),$$

$$a_1 = a_2 = \pi r^2 = \pi 0.18^2 (cm^2),$$

$$b_1 = \pi r^2 = \pi 0.25^2 (cm^2),$$

$$b_2 = \pi r^2 = \pi 0.35^2 (cm^2),$$

$$K_m = 5 (cm^3 / V \cdot s),$$

$$g = 980 (cm/s^2)$$

Şeklindedir. Seviye $L_{10} = 10 \text{ cm}$ ve $L_{20} = 15 \text{ cm}$ 'de sabit tutulmak istenirse:

$$\frac{L_2(s)}{V_p(s)} = \frac{1.69s + 0.224}{15.9s^2 + 1.29s + 0.0261} \quad (3.36)$$

olarak yazılabilir.

4. YÖNTEM

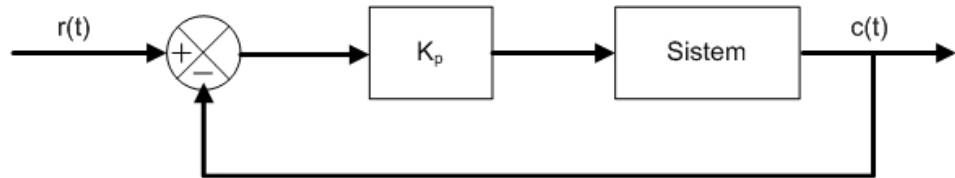
Bu bölümde kullanılan kontrol sistem yöntemleri açıklanmış ve deneysel sonuçlar gösterilmiştir.

4.1 Ziegler-Nichols Yöntemine göre PID Kontrol Tasarımı

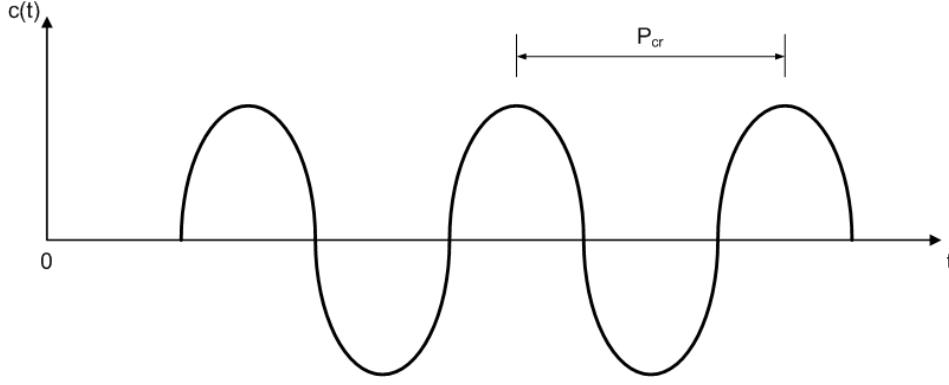
Ziegler ve Nichols verilen bir sistemin geçici cevap karakteristiğine göre orantısal kazanç K_p , integral zamanı T_i ve türevsel zamanı T_d 'yi hesaplayan bir yöntem geliştirmişlerdir.

Ziegler ve Nichols tarafından iki tane PID parametreleri ayarlama yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin ikisinde de sistemin adım cevabının maksimum %25 taşım (overshoot) olduğu varsayılır. PID kontrol tasarımında bu yöntemler kullanılacaktır (K. Ogata, 1997).

İlk önce $T_i = \infty$ ve $T_d = 0$ alınır. Şekil 4.1'deki gibi sadece K_p kazancı kullanılan P-Kontrolcü tasarımında adım cevabının Şekil 4.2'teki gibi osilasyon olacağı ilk kritik değer K_{kr} bulunur. (Eğer osilasyon gözlenecek bir K_{kr} değeri bulunamıyorsa, bu metot uygulanamaz demektir). Kritik kazanç K_{kr} ve bu değerdeki P_{kr} periyodu deneysel olarak bulunduktan sonra K_p , T_i ve T_d değerleri Tablo 4.1'e göre hesaplanabilir (K. Ogata, 1997).



Şekil 4.1: Kritik kazancın bulunması için kurulan P-Kontrolcü



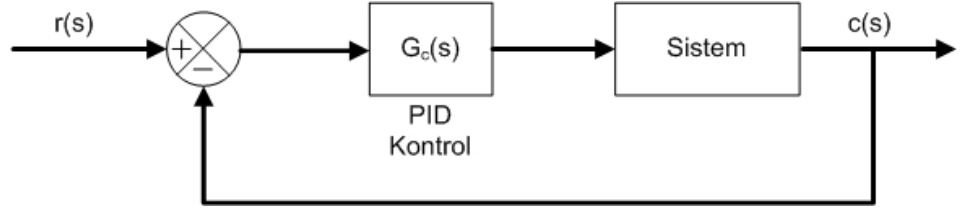
Şekil 4.2: Kritik kazanç değerindeki kritik periyodun gösterimi

Kontrolcü Tipi	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{kr}$	∞	0
PI	$0.45K_{kr}$	$\frac{1}{1.2}P_{kr}$	0
PID	$0.6K_{kr}$	$0.5P_{kr}$	$0.125P_{kr}$

Tablo 4.1: Ziegler-Nichols kuralına göre PID parametreler tablosu

Ziegler-Nichols kuralının bu yöntemine göre PID parametreleri ayarlanınca $G_c(s)$ şu şekilde yazılabilir:

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 0.6K_{kr} \left(1 + \frac{1}{0.5P_{kr}s} + 0.125P_{kr}s \right) \\
 &= 0.075K_{kr}P_{kr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{kr}} \right)^2}{s}
 \end{aligned}$$

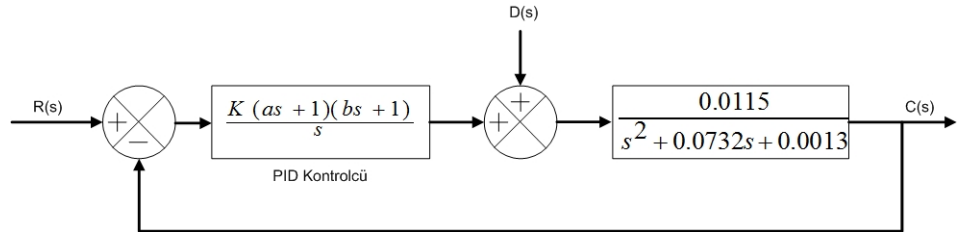


Şekil 4.3: PID-Kontrolcü blok şeması

Bu durumda PID kontrol sisteminin merkezde bir pole'u, iki tane zero (sıfırı) da $s = -4/P_{kr}$ 'de bulunur.

4.1.1 Düzenek #2 PID Kontrol Tasarımı

Daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen PID parametreleri ile istenilen sonuçlar elde edilememiştir. Bu yüzden kontrol parametrelerinde iyileştirme yapmak gerekmektedir.



Şekil 4.4: Düzenek#2 iyileştirilmiş PID kontrol şeması

Şekil 4.4'deki gibi ayrıca bozucu girişin de olduğu sistem gözönünde bulundurularak ve kontrol sistemimizde maksimum taşımın $M_p = \%10$ ve oturma zamanının $t_s = 12(sn)$, yükselme zamanının $t_p = 7(sn)$ olması istenirse ve $\%5$ kritisizm kabul ederek, kontrol sistemimizi tasarlayalım:

$$\xi = \frac{\left| \ln \left(\frac{1}{100} Mp \right) \right|}{\sqrt{\left(\ln \frac{1}{100} Mp \right)^2 + \pi^2}} \quad (4.1)$$

eşitliğinden $\xi = 0.5912$ olarak bulunur. Sistemin doğal frekansı ω_n ,

$$\omega_n = \frac{4}{\xi t_s} \quad (4.2)$$

eşitliğinden $\omega_n = 0.56$ olarak bulunur. Bir kökün de $s = 10$ 'da olacak şekilde tasarıma başlayalım. PID kontrolcü transfer fonksiyonu:

$$G_c(s) = \frac{K(as + 1)(bs + 1)}{s}$$

Referans girişi olmadığında bozucu giriş için kapalı devre transfer fonksiyonu:

$$\frac{C_d(s)}{U_d(s)} = \frac{s}{s^3 + (0.0732 + Kab)s^2 + (0.0013 + Ka + Kb)s + K}$$

İstenilen karakteristik denklem:

$$(s + 10)(s^2 + 2 \times 0.5912 \times 0.56^2) = s^3 + 10.6621s^2 + 6.935s + 3.136$$

buradan:

$$0.0732 + Kab = 10.6621$$

$$0.0013 + Ka + Kb = 6.935$$

$$K = 3.13$$

$$\Rightarrow a \cdot b = 3.3766$$

$$a + b = 2.211$$

buluruz. Şimdi PID kontrolcü şu hale gelir:

$$G_c(s) = \frac{K[abs^2 + (a + b)s + 1]}{s} = \frac{10.589[s^2 + 0.6548 + 0.2962]}{s}$$

Giriş referans $r(t)$ için kapalı devre transfer fonksiyonu:

$$\frac{C_r(s)}{R(s)} = \frac{10.589[s^2 + 0.6548 + 0.2962]}{s^3 + 10.6621s^2 + 6.935s + 3.136}$$

Bu yeni tasarladığımız PID kontrol sisteminin MATLAB programında yapılan simülasyon (Uğur Arifoğlu, 2001; S.N.Sivanandam, S.Sumathi, S.N.Deepa, 2007; H.N.Koivo, 2006) sonucu ve program aşağıdaki gibidir:

```
% Düzenek#2 için iyileştirilmiş PID kontrol tasarımı
close all;
clear all;
Mp=10/100;
a=abs(log(Mp));
b=sqrt((log(Mp)^2+pi^2));
ksi=a/b;
ts=12;%oturma zamani 12 secildi
wn=4/(ksi*ts);

%sistem parametreleri girilir:
r1=0.18;r2=0.18; d1=2.25; d2=2.25; g=980; Km=5; L10=15;L20=15;
a1=pi*r1^2;a2=pi*r2^2;
A1=pi*d1^2;A2=pi*d2^2;

num=[0 0 (Km*a1/A1/A2)*sqrt(g/(2*L10))];
den=[1 ((a2/A1)*sqrt(g/(2*L20)))+(a1/A1)*sqrt(g/(2*L10))
(a1*a2/A1^2)*(g/2/sqrt(L10*L20))];

[A,B,C,D]=tf2ss(num,den);

konfig2=tf(num,den)

numd=[wn];
den1=[1 2*ksi*wn wn^2];
den2=[1 10];
```

```

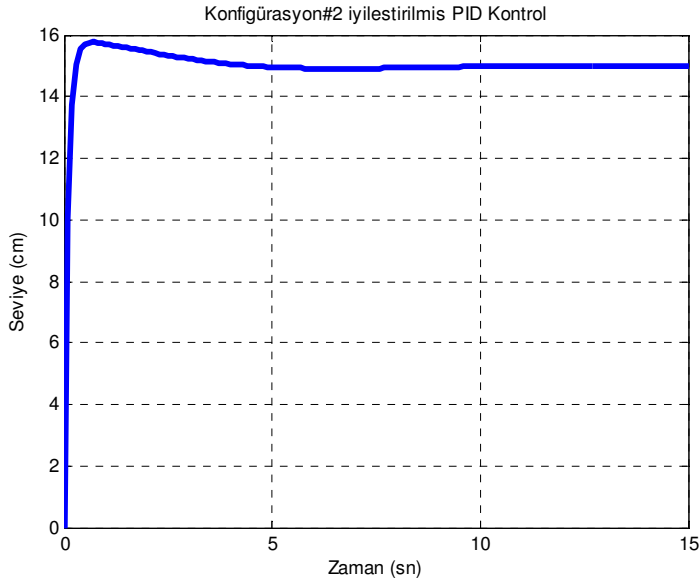
dend=[conv(den1,den2)];
sysd=tf(numd,dend)

t=0:.1:15;

numr=[0 10.589 10.589*0.6548 10.589*0.2962];
denr=[1 10.6621 6.9350 3.136];
sysGc=tf(numr,denr)

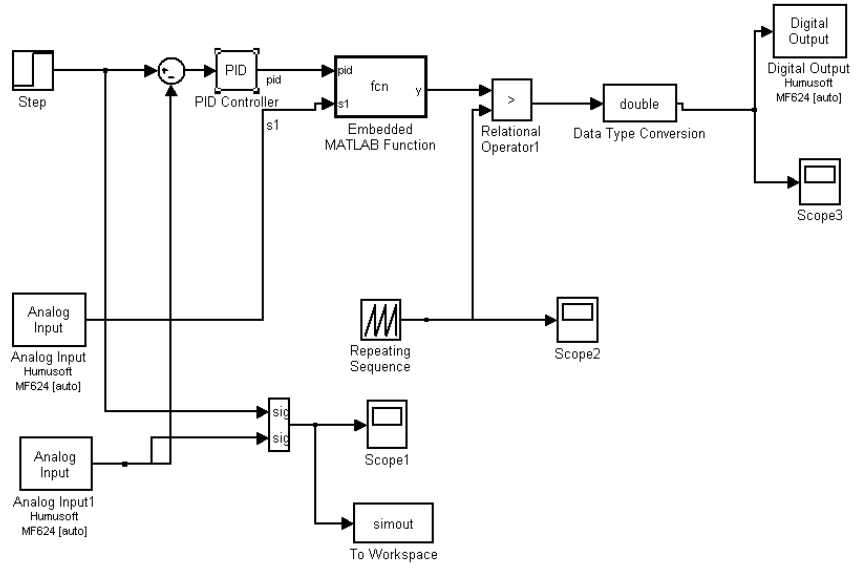
[c,x,t]=step(numr,denr,t);
c=15*c;
plot(t,c,'LineWidth',3)
title('Konfigürasyon#2 iyileştirilmiş PID Kontrol')
xlabel('Zaman (sn)')
ylabel('Seviye (cm)')
grid

```

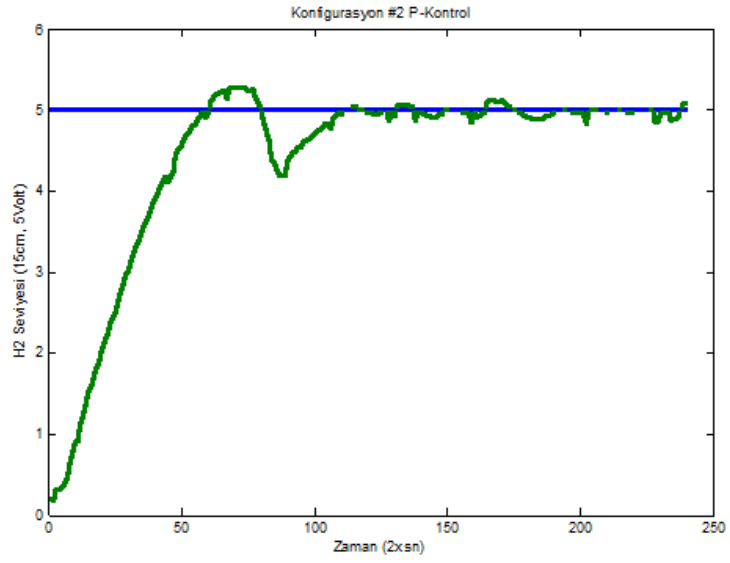


Şekil 4.5: Düzenek#2 İyileştirilmiş PID kontrol simülasyon çıkışı

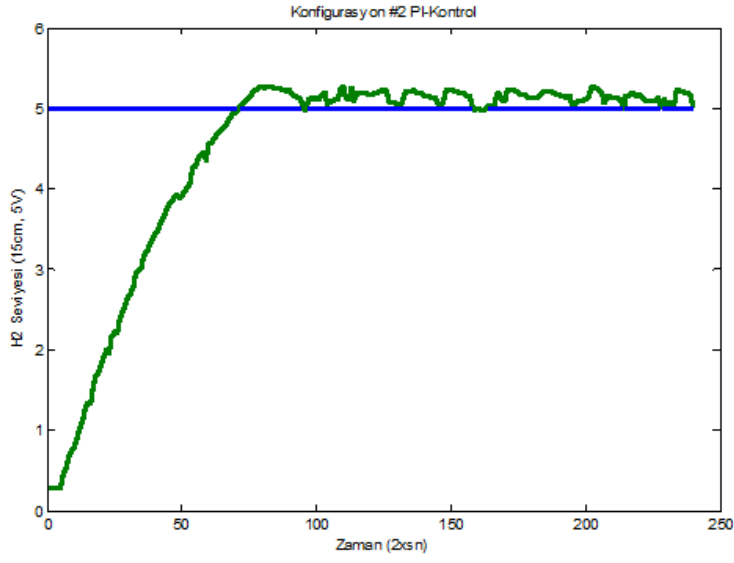
İki seviyeli su kabında gerçek ortamda bulunan PID parametreleriyle gözlemlenen sonuçlar ise:



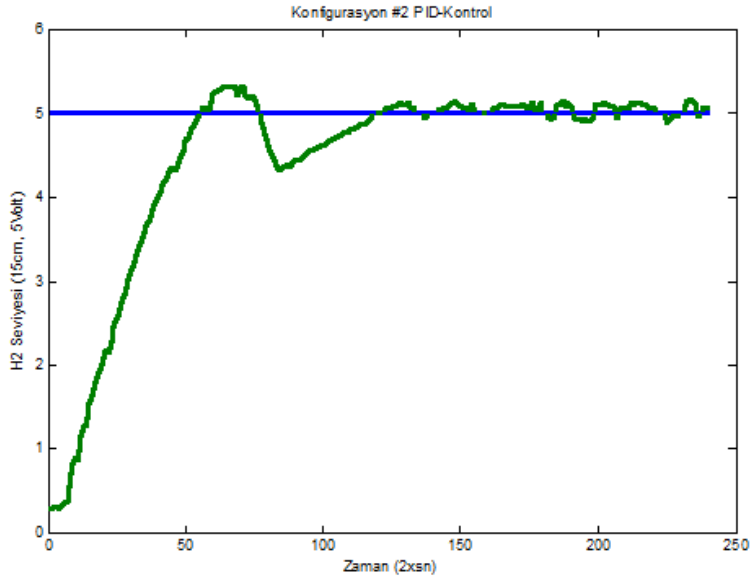
Şekil 4.6: Düzenek#2 deneysel sonuçlar için simulink programı



Şekil 4.7: Düzenek#2 P-Kontrol deney çıkışı



Şekil 4.8: Düzenek#2 PI-Kontrol deney çıkışı

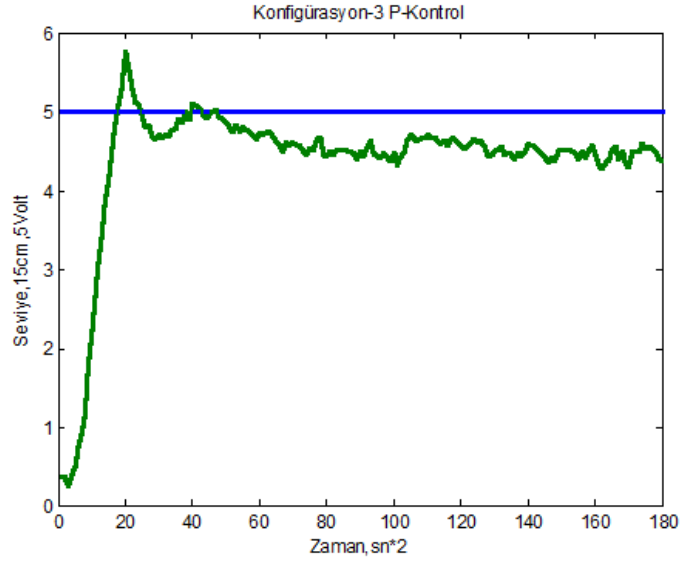


Şekil 4.9: Düzenek#2 PID-Kontrol deney çıkışı

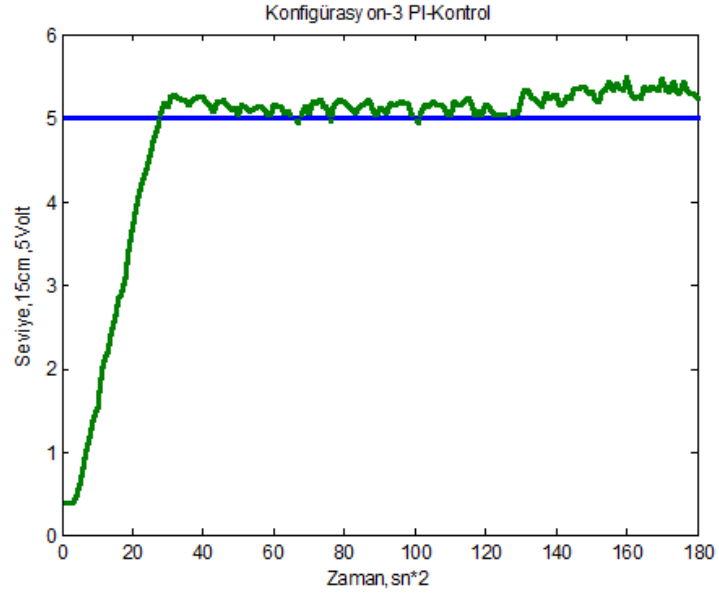
PID-Kontrolde taşım %100'e yakın ve t_s 'nin de çok uzun olduğu görüldü. Bunun iyileştirilmesi için ince ayar yapılarak PID parametreleri tekrar hesaplanmalıdır.

4.1.2 Düzenek#3 PID Kontrol Tasarımı

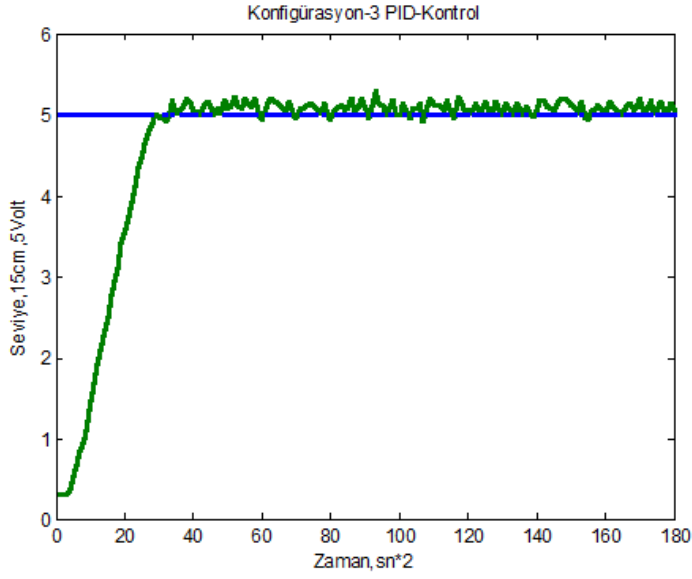
İki seviyeli su kabında gerçek ortamda bulunan PID parametreleriyle gözlemlenen sonuçlar:



Şekil 4.10: Düzenek#3 P-Kontrol deney çıkışı



Şekil 4.11: Düzenek#3 PI-Kontrol deney çıkışı



Şekil 4.12: Düzenek#3 PID-Kontrol deney çıkışı

4.2 Durum Geri Beslemeli Kontrol Tasarımı

Tek giriş-çıkışlı kontrol sistem dizaynındaki bu geleneksel yaklaşımda, istenilen sönümlenme oranı (damping ratio) ξ ve sönümlenmemiş doğal frekans (undamped natural frequency) ω_n 'e göre kontrolcü dizayn edilecektir.

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \quad (4.3)$$

burada,

\mathbf{x} = durum vektörü (n – vektörel)

u = kontrol sinyali (sayısal)

\mathbf{A} = $n \times n$ sabit matris

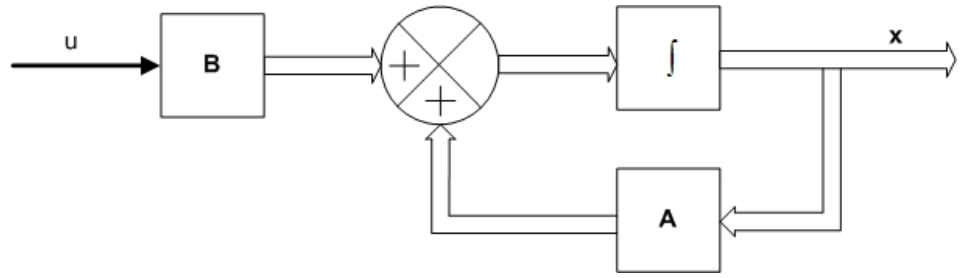
\mathbf{B} = $n \times 1$ sabit matris

Kontrol sinyalini şu şekilde seçilebilir:

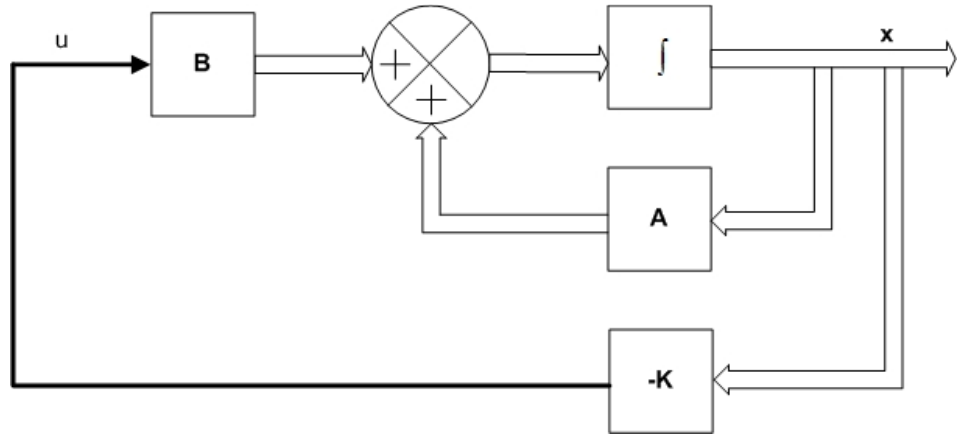
$$u = -\mathbf{K}\mathbf{x} \quad (4.4)$$

Bu, kontrol sinyalinin anlık duruma göre hesaplandığı anlamına gelir. Bu tasarıma *durum geri besleme (state feedback)* adı verilir. $n \times 1$ K matrisine de *durum geri besleme kazanç matrisi* denir (K. Ogata, 1997).

Şekil 4.13, denklem (4.37) ile tanımlanan sistemi gösterir. Bu açık devre bir kontrol sistemidir çünkü durum x , kontrol sinyali u 'ya geri beslenmez. Şekil 4.14 durum geri beslemeli sistemi gösterir. Bu bir kapalı devre kontrol sistemidir çünkü durum x , kontrol sinyali u 'ya geri beslenir.



Şekil 4.13: Açık devre sistem



Şekil 4.14: Kapalı devre sistem

Kontrolcü tasarımındaki takip edilmesi gereken adımları şu şekilde sıralayabiliriz:

Adım 1: Sistemin kontrol edilebilirliği kontrol edilir. Eğer sistem tamamen kontrol edilebilir ise diğer adımlar takip edilir.

Adım 2: \mathbf{A} matrisinin karakteristik polinomlarından

$$|s\mathbf{I} - \mathbf{A}| = s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n$$

a_1, a_2, \dots, a_n hesaplanır.

Adım 3: Sistemin durum denklemini kontrol edilebilir kanonik forma çeviren transformasyon matrisi \mathbf{T} hesaplanır. (Eğer sistem denklemi zaten kontrol edilebilir kanonik formdaysa $\mathbf{T} = \mathbf{I}$ alınır. Transformasyon matrisi:

$$\mathbf{T} = \mathbf{M}\mathbf{W} \quad (4.5)$$

burada,

$$\mathbf{M} = [\mathbf{B} : \mathbf{A}\mathbf{B} : \dots : \mathbf{B}^{n-1}\mathbf{A}] \quad (4.6)$$

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} a_{n-1} & a_{n-2} & \dots & a_1 & 1 \\ a_{n-2} & a_{n-3} & \dots & 1 & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ a_1 & 1 & \dots & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \dots & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Adım 4: İstenilen özdeğerler (eigenvalue) kullanılarak karakteristik polinom yazılır:

$$(s - \mu_1)(s - \mu_2) \dots (s - \mu_n) = s^n + \alpha_1s^{n-1} + \dots + \alpha_{n-1}s + \alpha_n$$

ve buradan $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n$ değerleri hesaplanır.

Adım 5: Gereken durum geri besleme kazanç matrisi \mathbf{K} şu denklemden hesaplanır:

$$\mathbf{K} = [\alpha_n - a_n : \alpha_{n-1} - a_{n-1} : \dots : \alpha_2 - a_2 : \alpha_1 - a_1] \quad (4.8)$$

4.2.1 Düzenek#3 Durum Geri Beslemeli Kontrol Tasarımı

Kontrol sistemimizde maksimum taşımın $M_p = \%10$ ve oturma zamanının $t_s = 12(sn)$, yükselme zamanının $t_p = 7(sn)$ olması istenirse ve $\%5$ kritisizm kabul edilerek, kontrol sistemi dizayn edilmeye başlanırsa:

$$\xi = \frac{\left| \ln \left(\frac{1}{100} M_p \right) \right|}{\sqrt{\left(\ln \frac{1}{100} M_p \right)^2 + \pi^2}} \quad (4.9)$$

eşitliğinden $\xi = 0.5912$ olarak bulunur. Sistemin doğal frekansı ω_n ,

$$\omega_n = \frac{4}{\xi t_s} \quad (4.10)$$

eşitliğinden $\omega_n = 0.56$ olarak bulunur. Bu değerlere göre kontrol tasarımındaki adımlar izlenerek durum geri besleme kazanç matrisi Matlab yardımıyla şu şekilde hesaplatılmıştır:

$$K = [0.5812 \quad 0.3125] \quad (4.11)$$

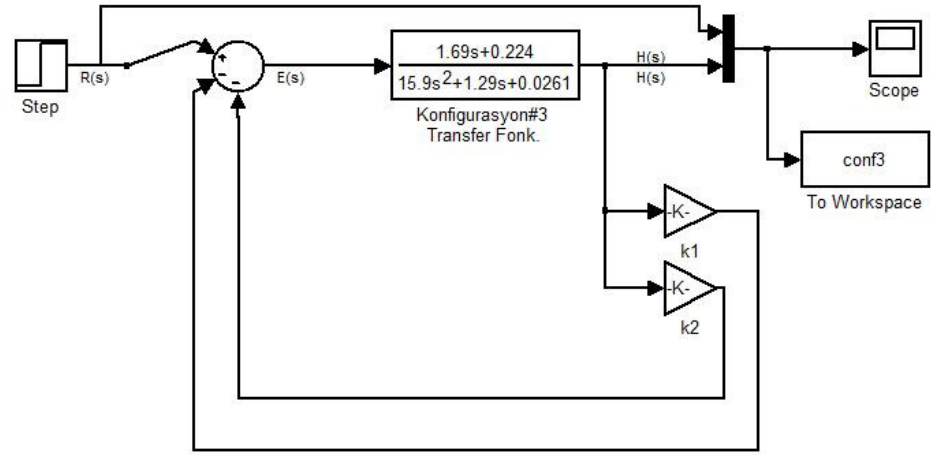
Bu hesaplamayı yapan Matlab kodu:

```
% Konfigurasyon#3 için T transformation matris kullanılarak state
feedback kazanç matrisi K'nın
% hesaplanması
```

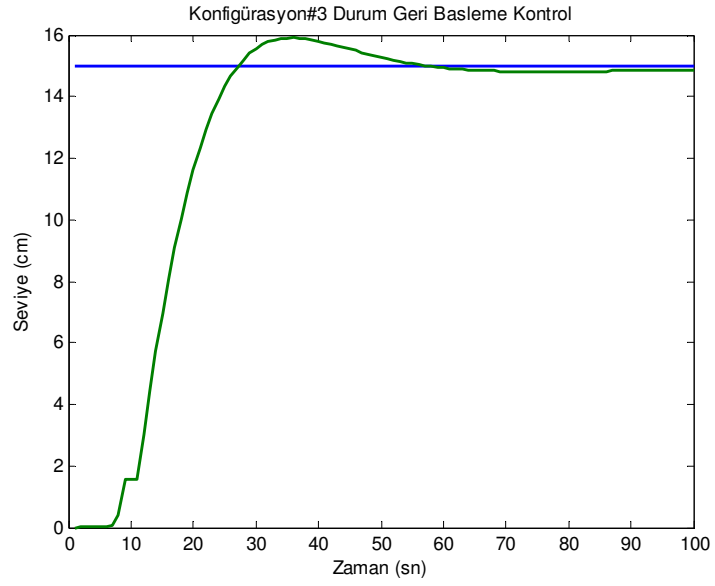
```
clear all;close all;
% Konfigurasyon#3 parametreleri
r1=0.18;r2=0.18; d1=2.25; d2=2.25; g=980; Km=5; L10=10;L20=15;
br1=0.25;br2=0.35;
a1=pi*r1^2;a2=pi*r2^2;
A1=pi*d1^2;A2=pi*d2^2;
b1=pi*br1^2;b2=pi*br2^2;
```

```
ro=b1/(b1+b2);
```

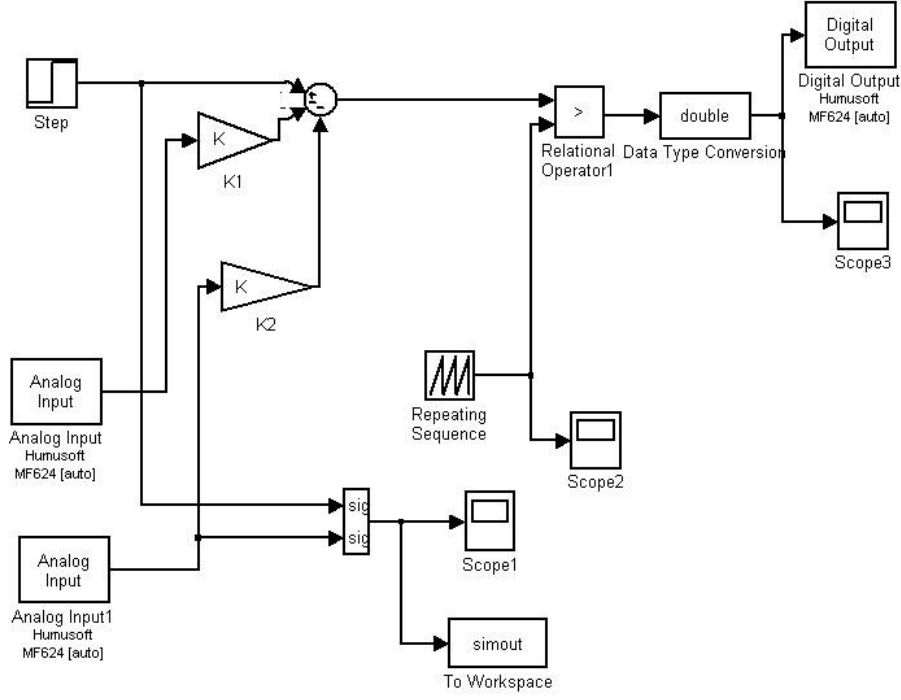
```
num=[0 ro*Km (ro*Km*a1/A1*sqrt(g/(2*L10)))+(1-ro)*a1*Km/A1*sqrt(g/(2*L10))]
```

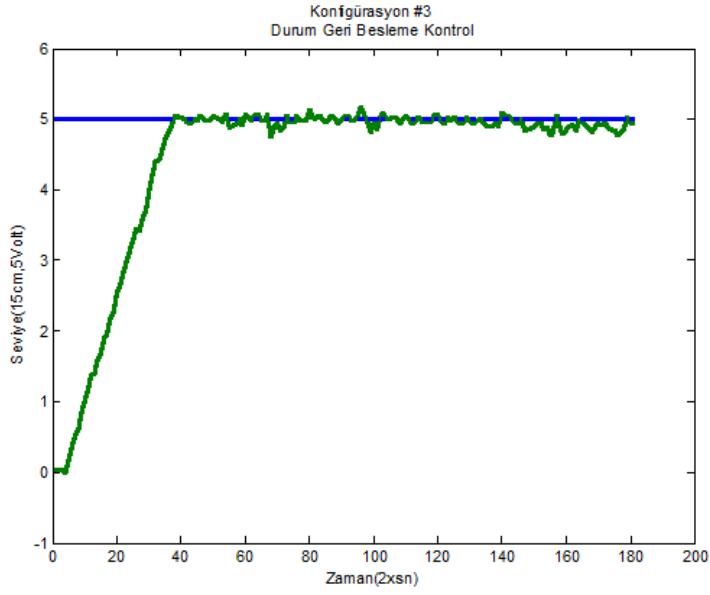
Şekil 4.15: Düzenek#3 Durum Geri Besleme simulink programı



Şekil 4.16: Düzenek#3 Durum Geri Besleme simulasyon çıkışı



Şekil 4.17: Düzenek#3 Durum Geri Besleme deneysel sonuçlar için simulink programı



Şekil 4.18: Düzenek#3 Durum Geri Besleme kontrolü deney çıkışı

4.3 Kendinden Organize Bulanık Mantık Kontrolü

Kontrolün amacı sistemi herhangi bir ilk durumdan istenen duruma getirmek ve sistemin dinamik davranışının sistem parametrelerindeki değişimden ve dış bozulmalardan etkilenmemesini sağlamaktır. Bu amaca ulaşmak için tekrarlayan bir öğrenme algoritması, kontrol eforu $\rho_i, (i = 1, 2, \dots, n)$ 'yi ayarlamak için sisteme adapte edilmelidir. ρ_i 'lerin ilk değeri sıfırdır ve *bulanık kural modifiyeci* ile öğrenmeleri sağlanır. Kendinden Organize Bulanık Mantık Kontrol (Self-Organizing Fuzzy Logic Control – SOFLC) sisteminin merkez parçası tekrarlı öğrenme algoritmasının performans indeksi I 'nin negatif gradyanının yönüne doğru kontrol eforunun değiştirilmesidir. I, e ve \dot{e} fonksiyonları cinsinden şu şekilde ifade edilir (Chin-Min Lin, Chun-Fei Hsu, Yi-Jen Mon, 2003).

$$I = \sum_{k=1}^g \sqrt{e^2(k) + h[\dot{e}(k)]^2} \quad (4.12)$$

Burada e izleme hatasını, \dot{e} izleme hatasının türevini, k k 'nıncı zaman aralığını, g toplam zaman aralığı sayısını ve $h > 0$ ağırlık faktörünü gösterir. I 'nin e ve \dot{e} 'ye göre kısmi türevi şu şekilde yazılabilir:

$$\frac{\partial I}{\partial e(k)} = \frac{e(k)}{\sqrt{e^2(k) + h[\dot{e}(k)]^2}} \quad (4.13)$$

$$\frac{\partial I}{\partial \dot{e}(k)} = \frac{h\dot{e}(k)}{\sqrt{e^2(k) + h[\dot{e}(k)]^2}} \quad (4.14)$$

En iyi performans için negatif gradyan şu şekilde yazılabilir:

$$-|\nabla I| = - \left\{ \left| \frac{e(k)}{\sqrt{e^2(k) + h[\dot{e}(k)]^2}} \right|, h \left| \frac{\dot{e}(k)}{\sqrt{e^2(k) + h[\dot{e}(k)]^2}} \right| \right\} \quad (4.15)$$

En iyi kontrol temeline göre, ayarlanacak kontrol sinyali ∂u şu şekilde seçilir:

$$\partial u(k) = \eta(-|\nabla I|) \begin{bmatrix} e(k) \\ \dot{e}(k) \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

buradaki η , pozitif bir sabit olan öğrenme oranıdır.

Her bir kontrol kuralı için uyarlama algoritması şu şekilde önerilir:

$$\Delta \rho_i(k) = \partial u(k) \frac{w_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (4.17)$$

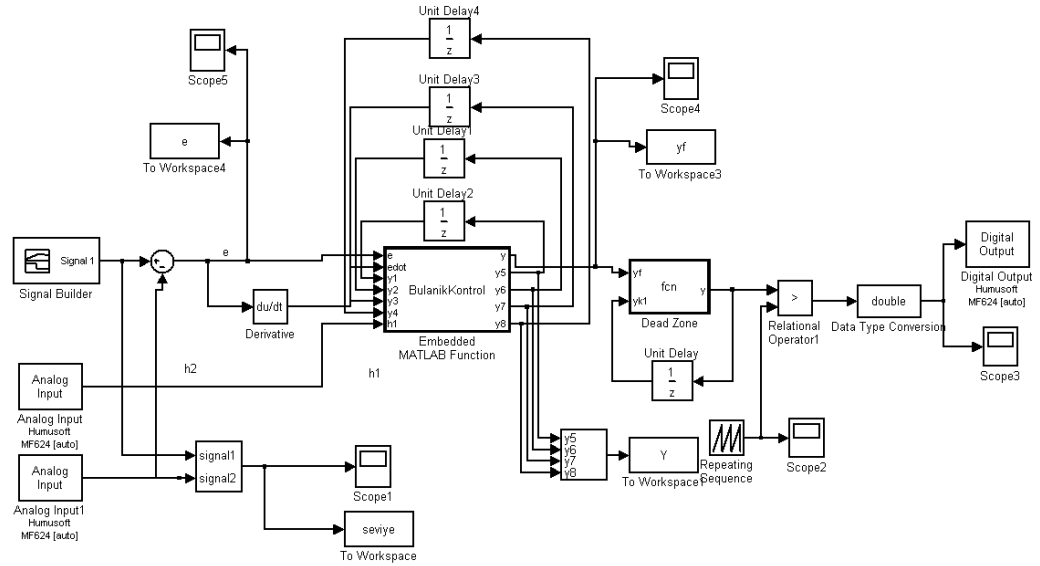
buradaki $\Delta \rho_i$, i 'ninci kontrol kuralına eklenecek olan uyarlama değeridir:

$$\text{Kural } i : \text{ Eğer } e \text{ } F_e^i \text{ ve } \dot{e} \text{ } F_{\dot{e}}^i \text{ ise } u \text{ } \rho_i \text{ 'dir} \quad (4.18)$$

$$\rho_i(k+1) = \rho_i(k) + \Delta \rho_i(k) \quad (4.19)$$

burada F_e^i ve $F_{\dot{e}}^i$ bulanık mantık kümelerini ifade etmektedir. Denklem (4.19) her bir kontrol kuralı için uyarlama değerinin bulanık sonuç çıkarımının ağırlığı ile orantılı olduğunu gösterir.

4.3.1 Düzenek#3 Kendinden Organize Adaptif Bulanık Kontrol Tasarımı



Şekil 4.19: Düzenek#3 Kendinden Organize Bulanık Kontrol deneysel sonuçlar için simulink programı

```
function [y,y5,y6,y7,y8] = BulanikKontrol(e,edot,y1,y2,y3,y4,h1)
% 2-Kapli Sivi Seviye Bulanik Kontrolu
% Konfigurasyon #3
% 2-Giris 1-Cikis Bulanik Sistem
% Hata Uyelik Fonksiyonlari
if (edot==0) edot = 0.00001; end
if (e==0) e = 0.00001; end

if (e<0) mu11 = exp(-(e+0.5)^2);else mu11=0;end
if (e>0) mu12 = exp(-(e-2.5)^2);else mu12=0;end

% Hatanin Turevi Uyelik Fonksiyonlari
if (edot<0) mu21 = exp(-(edot+0.25)^2);else mu21=0; end
if (edot>0) mu22 = exp(-(edot-0.25)^2);else mu22=0; end

% Cikis Merkezleri
% y1 = 0.25; % Motoru Durdur
% y2 = 0.35; % Motoru Calistir

%Output of Product+COA+Singleton Fuzzy Inference
pay = mu11*mu21*y1+mu11*mu22*y2+mu12*mu21*y3+mu12*mu22*y4;
payda = mu11*mu21+mu11*mu22+mu12*mu21+mu12*mu22;
out = pay/payda;
```

```

%% Ters-Gradyan Yontemi ile Self Organize Bulanik Kontrol
h = 0.01; mu = 0.1;

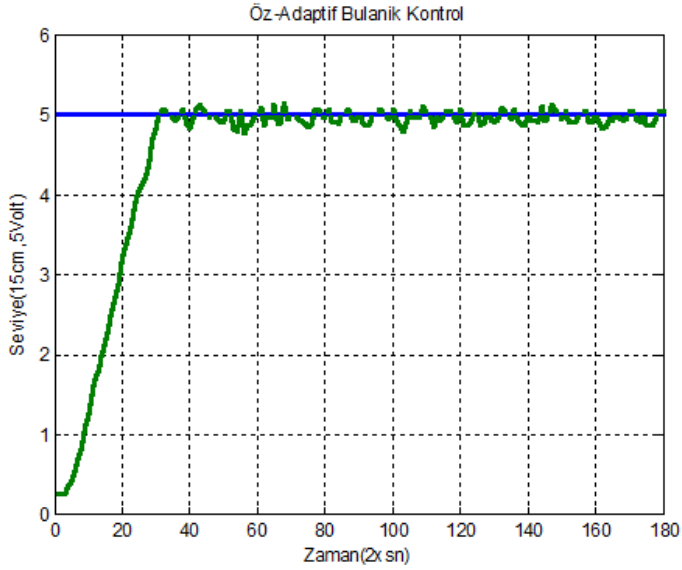
Ik = sqrt(e*e+h*edot*edot); % O anki index
Ie = e/Ik; % Turevler
Iedot = h*edot/Ik; % Turevler
delta = [abs(e/Ie), h*abs(edot/Iedot)];
gg = mu*delta*[e;edot];

if (Iedot==0) Iedot = 0.00001; end
if (Ie==0) Ie = 0.00001; end

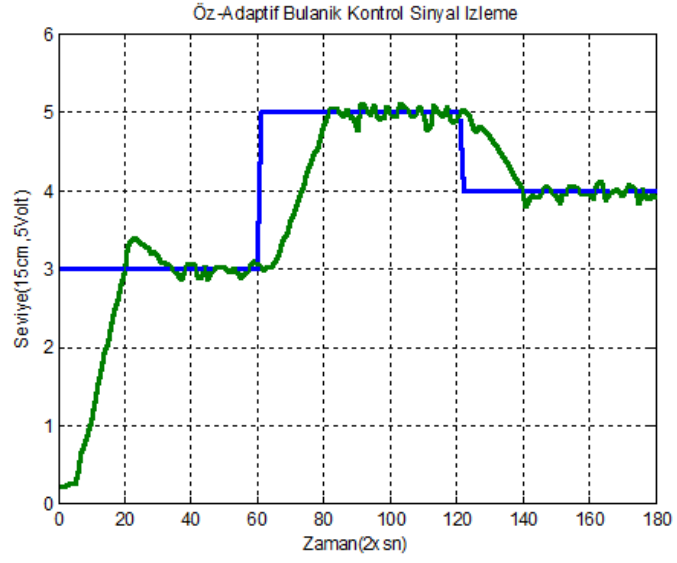
y5 = y1 +gg*(mu11*mu21)/payda;
y6= y2 +gg*(mu11*mu22)/payda;
y7 = y3 +gg*(mu12*mu21)/payda;
y8 = y4 +gg*(mu12*mu22)/payda;

% Tasim Engelleme
if(h1>9.9)
    y=0;
else
    y=out;
end

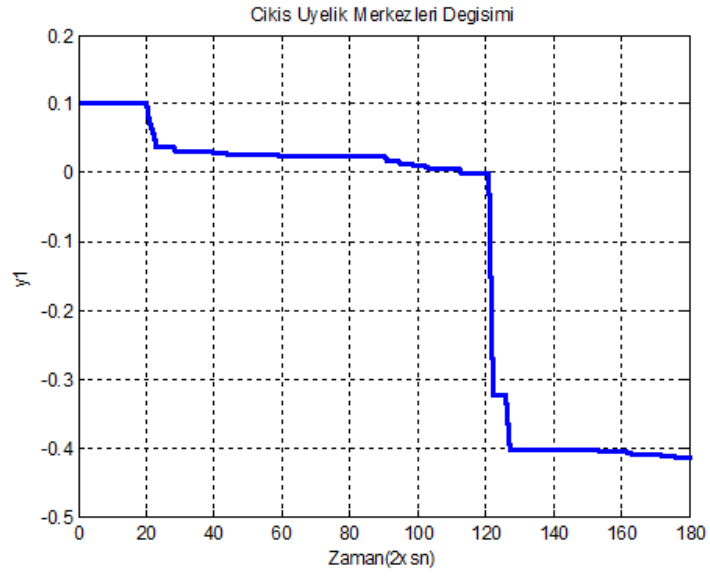
```



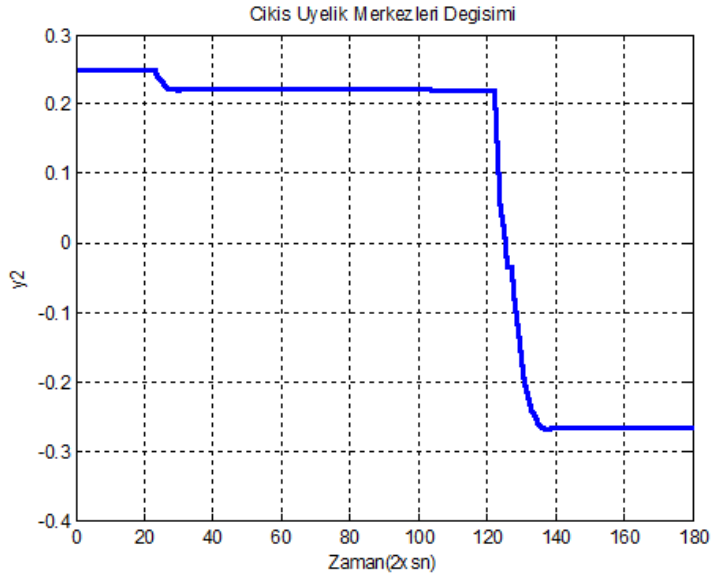
Şekil 4.20: Düzenek#3 Kendinden Orgaize Bulanik kontrolü deney çıkışı



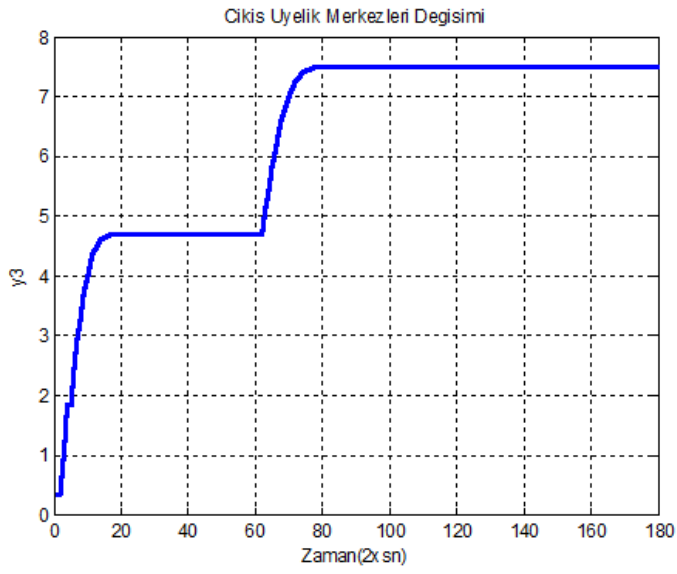
Şekil 4.21: Düzenek#3 Kendinden Orgaize Bulanık kontrolü deney çıkışı–Sinyal İzleme



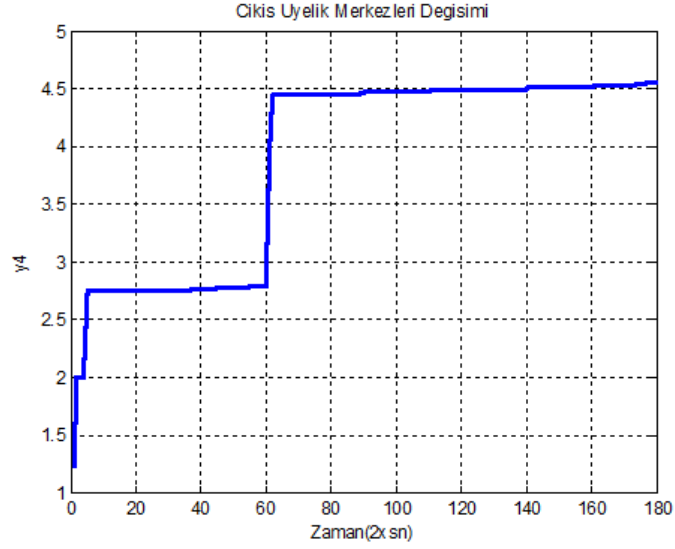
Şekil 4.22: Düzenek#3 Kendinden Orgaize Bulanık kontrolü- y1 çıkış üyelik merkezleri değişimi



Şekil 4.23: Düzenek#3 Kendinden Orgaize Bulanık kontrolü- y_2 çıkış üyelik merkezleri değişimi



Şekil 4.24: Düzenek#3 Kendinden Orgaize Bulanık kontrolü- y_3 çıkış üyelik merkezleri değişimi



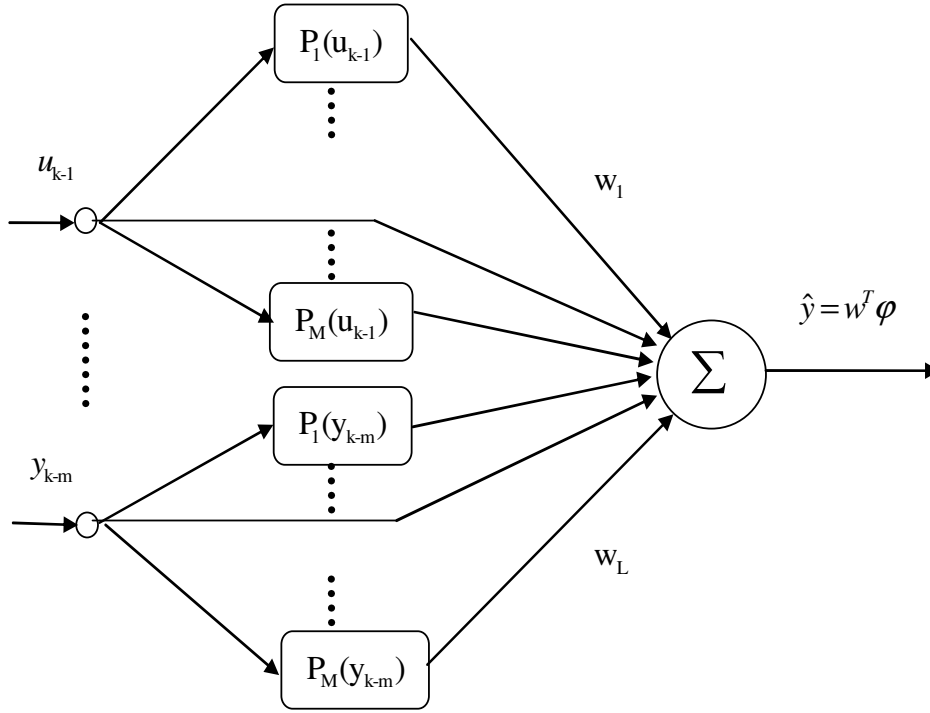
Şekil 4.25: Düzenek#3 Kendinden Orgaize Bulanık kontrolü- y4 çıkış üyelik merkezleri değişimi

4.3.2 Doğrusal olmayan sistemlerin tanımlanmasının ve kontrolünün Ortogonal polinomlu YSA (Yapay sinir Ağı) kullanılarak gerçekleştirilmesi

Doğrusal olmayan sistem ile ilgili eldeki bilgiler, sistemi tanımlama için iki şekilde kullanılabilir. İlk yol, çevirimiçi olmayan prosedür, ikinci yol ise çevirimiçi prosedürdür (A.Isidori, 1989). Çevirimiçi olmayan yöntemde sistem eğitilirken veriler toplanır ve bu eğitilmiş sistem bir sonraki sistem tepkisi için kullanılır. Tabii ki bu durum çevirimiçi sistem kontrolünde sözkonusu değildir. Çevirimiçi prosedürde veriler eş zamanlı olarak sistem çıkışından alınarak sistem model parametrelerini optimize etmekte kullanılır. Çevirimiçi yöntemler, kendilerine uygulama alanları bulması nedeniyle, çevirimiçi olmayan uygulamalara göre çok daha fazla tercih edilmekte ve bunun üzerine çok daha fazla çalışmalar yapılmaktadır. Aynı zamanda ortam koşullarındaki değişiklikler ve sistemi etkileyen gürültüler de gerçek zamanlı uygulamalarda göz önünde bulundurulması gereken etkenlerdir. Buradaki yöntemde tanımlama ve kontrol aynı zamanda gerçekleştirilecek ve bu sebeple kesin bir tanımlama fazı kısmına gereksinim duyulmayacaktır. Başka bir deyişle öğrenme ve daha sonra kontrol

yerine sistem çalışırken öğrenme şeklinde bir uygulama olacaktır (S.Beyan, M.Alcı, 2009).

4.3.2.1 Ortogonal Polinomlu YSA



Şekil 4.26: Ortogonal ARX Ağı

Ortogonal polinomların kapasitelerini ve uygulanmalarının kolaylığını anlamak için örnek ağımızın yapısal şekli Şekil 4.26'da gösterilmiştir. Ortogonal fonksiyonların, ortogonal yaklaşım özelliklerinden de bilindiği üzere, sistemdeki her bir fonksiyonun yaklaşımda bir payı vardır. Fakat tabii ki yüksek dereceli terimlerin katkısı, birinci dereceli fonksiyonlara göre daha azdır. Bu yüzden geniş ortogonal terimlerinden kaçınmak için ARX - auto regressive with exogenous terimleri kullanılacaktır. Böylece daha az sayıda parametre kullanmanın avantajı olacaktır. Ağın çıkışı şu şekilde hesaplanır:

$$\hat{y} = \widehat{W}^T \phi \quad (4.34)$$

buradaki \widehat{W} ağırlık vektörü, ϕ ise giriş vektörüdür. Önerilen modelin çıkışının genel ifadesinin şu şekilde verildiğini varsayalım:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k+1) = & \sum_{i=0}^{n-1} \alpha_i u(k-i) + \sum_{i=0}^{m-1} \beta_i y(k-i) + \sum_{j=3}^M \sum_{i=0}^{nd} \gamma_i P_{j,i}(u(k-i)) \\ & + \sum_{j=3}^N \sum_{i=0}^{np} \xi_i P_{j,i}(y(k-i)) \end{aligned} \quad (4.35)$$

burada nd ve np fonksiyondan geçen giriş ve çıkışlar için seçilen gecikmeler, $P(\cdot)$ orthogonal polinom setidir. α_i , β_i , γ_i ve ξ_i ise çevrimiçi olarak ayarlanacak olan sistem parametreleridir. Polinomun derecesi üç olarak ve giriş-çıkış arasındaki gecikme de iki olarak seçilirse giriş vektörü aşağıdaki gibi seçilebilir:

$$\varphi(k) = [u_{k-1}(k) \ u_{k-2}(k) \ y_{k-1}(k) \ y_{k-2}(k) \ P_3(u_{k-1}(k)) \ P_3(u_{k-2}(k)) \ P_3(y_{k-1}(k)) \ P_3(y_{k-2}(k))]^T \quad (4.36)$$

4.3.2.2 Öğrenme Algoritması

Sistem, bayır iniş (gradient descent) yöntemi kullanılarak sabit öğrenme oranıyla optimize edilebilir.

$$\widehat{W}(t+1) = \widehat{W}(t) - \eta_t \frac{\partial E(t)}{\partial w(t)} \quad (4.37)$$

burada $\widehat{W}(t)$ parametre vektörü, $E(t)$ ise ikinci dereceden masraf fonksiyonu (quadratic cost function) dur, Ör: $E(t) = 0.5e^2$. Buradaki öğrenme oranı η_t şu şekilde seçilebilir:

$$\eta_k = \frac{\mu}{(1 + \|J(x(k))\|^2)} \quad 0 < \mu \leq 1 \quad (4.38)$$

buradaki $J(.)$ girişlerin jacobian'ıdır. Öğrenme oranı kararlılığı Lyapunov kararlılık yaklaşımı kullanılarak geliştirilebilir (W.Yu, X.Li, 2004). Düşük parameter sayısı ve tek katman yapısı sayesinde optimizasyon az sayıda hesaplama ile gerçekleştirilebilir ve bu da çevrimiçi sistem tanımlamanın performansını artırır.

4.3.2.3 Tanımlama ve Kontrol

K.S.Narendra, K.Parthasarathy (1990) ve L-X.Wang (1997) çalışmalarında referans kontrol modelini oluşturmuşlardır. Bu model şu tür bir sistemi tanımlama ve kontrol etmek için uygulanabilir,

$$y_p(k+1) = f[y_p(k), \dots, y_p(k-np)] + \alpha^T[u(k), \dots, u(k-nd)] \quad (4.30)$$

buradaki np ve nd , girişlerin gecikmeleridir. Amaç, sistemi bir referans sinyal ile takip edebilmektir. Sistemin giriş-çıkış fonksiyonu basitçe şu şekilde ifade edilebilir,

$$y_p(k+1) = f[y_p(k), y_p(k-1)] + u(k) \quad (4.31)$$

buradaki $f(.)$ doğrusal olmayan (nonlinear) fonksiyondur ve bilinmediği kabul edilir. Ağ, sistemin bu doğrusal olmayan parçasını tanımlamada kullanılır. Referans model şu şekilde seçilmiştir,

$$y_m(k+1) = 0.2y_m(k) + 0.3y_m(k-1) + 0.6r(k) \quad (4.32)$$

Burada referans modelin kararlı bir sistem olduğuna dikkat edilmelidir. Bu çalışmada $r(k)$, bağlı referans giriş aşağıdaki şekilde alınmıştır,

$$\begin{aligned} r(k) &= 7 & \text{if } (0 < k \leq 50) \\ r(k) &= 2.2 & \text{if } (50 < k \leq 100) \\ r(k) &= 7 & \text{if } (100 < k \leq 150) \\ r(k) &= 2.2 & \text{if } (150 < k \leq 175) \\ r(k) &= \sin\left(\frac{2\pi k}{50}\right) + 6.2 & \text{if } (175 < k \leq 375) \end{aligned} \quad (4.33)$$

Temel amaç sistemin bu referans sinyali takip edecek kontrol girişini üretmektir.

Kontrol girişi şu şekilde ifade edilebilir,

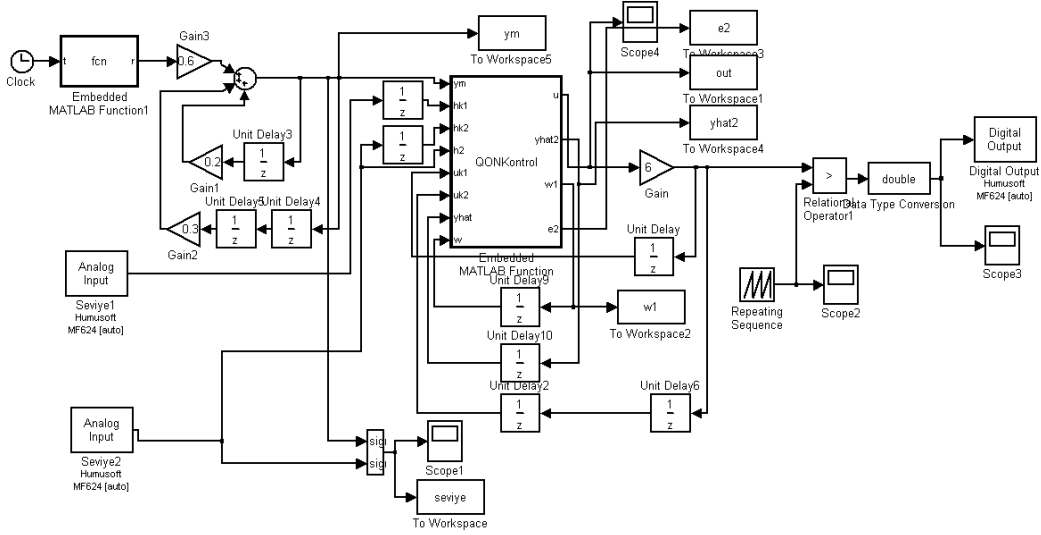
$$u(k) = -N[y_p(k), y_p(k-1)] + 0.2y_m(k) + 0.3y_m(k-1) + 0.6r(k) \quad (4.34)$$

buradaki $N(\cdot)$, önerilen ağ tanımlama modelidir. Eğer tanımlama işlemi başarılı olursa ve model kontrol sinyalinin içine konulursa son sistem çıkışı şu şekilde oluşturulur,

$$y_p(k+1) = f[y_p(k), y_p(k-1)] - N[y_p(k), y_p(k-1)] + 0.2y_m(k) + 0.3y_m(k-1) + 0.6r(k) \quad (4.35)$$

Burada tanımlama ve kontrol zaman aralıkları $T_i = 1$ ve $T_c = 1$ olarak alınmıştır. Bu, tanımlama ve kontrol işleminin asimptotik cevaplarının her k iterasyonunda oluşturulduğu manasına gelir. Tanımlama hatası $MSE = 5.5206e^{-5}$ ve izleme hatası $MSE = 0.8823$ olarak bulunmuştur. Şekil 4.47'de değişen bir sinyali izleme performansı, şekil 4.29'da sistemin doğrusal olmayan parçasının tanımlama performansı gösterilmiştir. Şekil 4.30 ve şekil 4.31'de sırasıyla tanımlama ve izleme hataları ve son olarak da şekil 4.32'de parametrelerin norm değişimi gösterilmiştir.

4.3.3 Düzenek#3 için Ortogonal Polinomlu YSA Kullanılarak Bulanık Kontrol Tasarımı Gerçekleştirilmesi



Şekil 4.27: Düzenek#3 Orogonal polinomlu YSA kullanılarak bulanık kontrol tasarımı deneysel sonuçlar için simulink programı

```
function r = fcn(t)

if (0<t)&&(t<=175)
    r = 3.8+2*sign(sin(2*pi*t/100));
else
    r = 3.8+2*sin(2*pi*t/100);
end

ym(t+1) = 0.2*ym(t)+*.3*ym(t-1)+0.6*r(t); %Reference Model

function [u,yhat2,w1,e2]=QONKontrol(ym,hk1,hk2,h2,uk1,uk2,yhat,w)
u = -yhat+ym;
uk = u; yk1 = hk1; yk2 = hk2;
Q = [uk uk1 uk2 yk1 yk2 4*uk1^3-3*uk1 4*yk1^3-3*yk1 4*yk2^3-3*yk2];
yhat1 = Q*w;
e1 = h2-yhat1;
mul = 1/(10+Q*Q');
w2 = w + mul*e1*Q';
yhat2 = Q*w2;
e2 = h2-yhat2;
w1 = w2 + mul*e2*Q';
u = -yhat2+ym;
```

Figürleri çizdirmek ve hatayı hesaplatmak için yazılan m.file:


```

clc,close all
figure(1)
plot([yhat2,ym])
grid
title('QON Sinyal Takibi')
xlabel('Zaman(2xsn)')
ylabel('Seviye H2')

figure(2)
plot([yhat2, seviye(:,2)])
grid
title('QON Sistem Tanilama')
xlabel('Zaman(2xsn)')
ylabel('Seviye H2')
legend('Referans Model','Sistem Modeli')

figure(3)
plot(e2)
grid
title('Tanilama Hatasi')
xlabel('Zaman(2xsn)')

figure(4)
plot(out)
grid
title('Takip Hatasi')
xlabel('Zaman(2xsn)')

for i=1:700
norm(i) = sqrt(w1(i,:)*w1(i,:));
end

figure(5)
plot(norm)
grid
title('Parametre Norm Degisimi')
xlabel('Zaman(2xsn)')

MSEtan = 0.5*e2'*e2/750
MSEiz = 0.5*out'*out/750

```

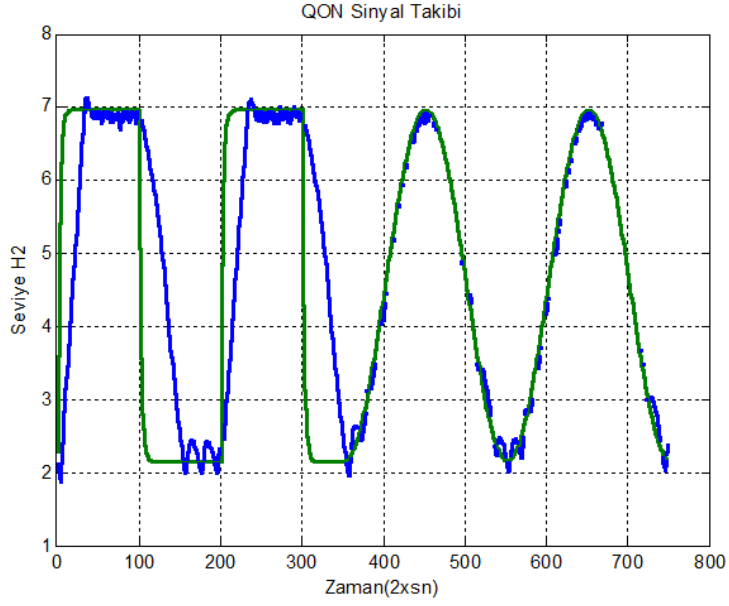
MATLAB'ta hesaplanan hata değerleri aşağıdaki gibi çıkmıştır:

MSEtan =
5.5206e-005

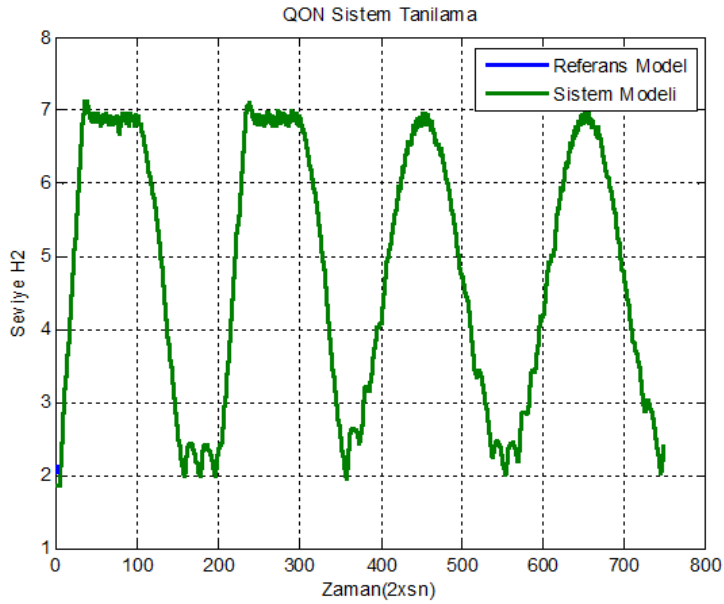
MSEiz =
0.8823

Buradan da görüleceği üzere tanımlama ve izleme hata oranı istenildiği gibi küçük çıkmıştır. İzlemedeki hatanın daha yüksek olmasının sebebi ikili tank

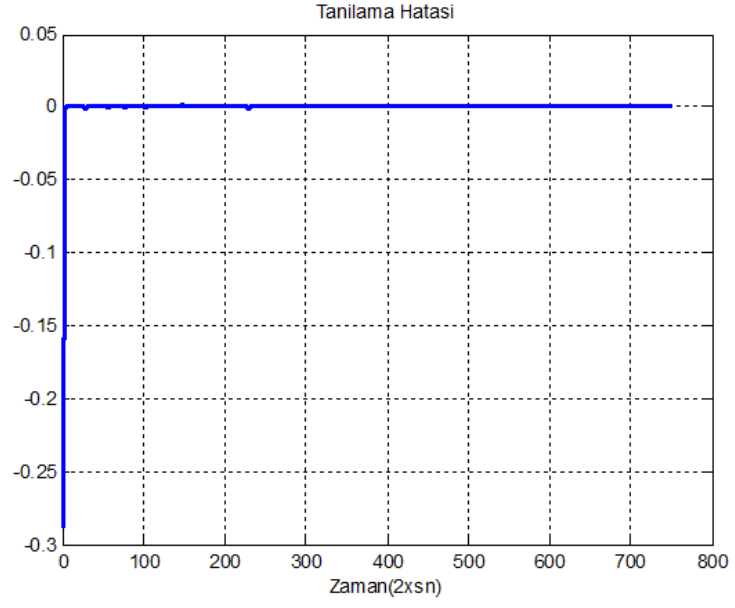
sisteminin tepkisinin çok hızlı olmaması ve gecikmelerin çok olmasıdır. Çizdirilen çıkışlar aşağıdaki gibi gözlenmiştir:



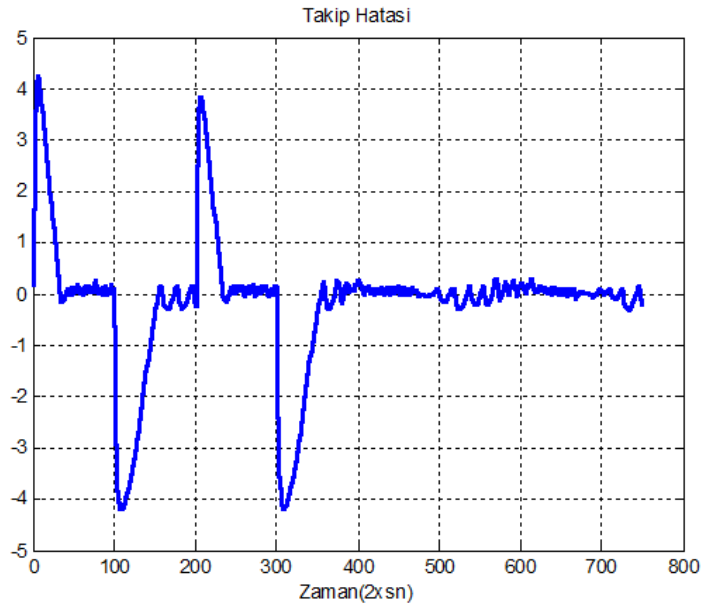
Şekil 4.28: Düzenek#3 ONN (Orthononal Neoural Network) sinyal takibi deney çıkışı



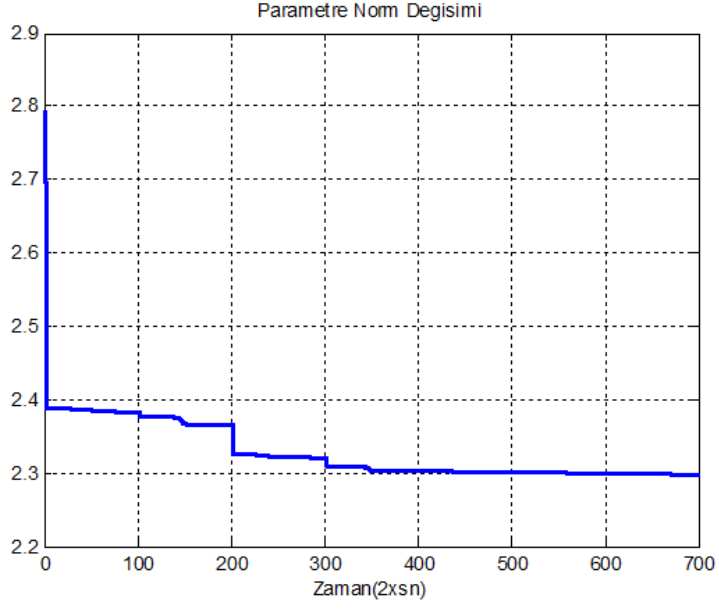
Şekil 4.29: Düzenek#3 ONN sinyal takibi deney çıkışı - sistem tanımlama



Şekil 4.30: Düzenek#3 ONN sinyal takibi deney çıkışı - tanımlama hatası



Şekil 4.31: Düzenek#3 ONN sinyal takibi deney çıkışı - takip hatası



Şekil 4.32: Düzenek#3 ONN sinyal takibi deney çıkışı – parameter norm değişimi

5. SONUÇ

Çalışmamızda çevirimiçi doğrusal olmayan sistemlerin kontrol yöntemleri üzerinde durduk. Çalışmalar iki seviyeli su tankı deney seti üzerinde gerçekleştirildi ve karşılaştırıldı. Denetlemede P, PI, PID, Durum geribesleme, adaptif bulanık mantık kontrol ve çevirimiçi tanımlama-kontrol yöntemleri kullanılmıştır. Bu yöntemlerden adaptif bulanık mantık kontrol yöntemlerinin, parametreleri bilinmeyen ve matematiksel modellemesi zor olan çevirimiçi sistemlerde en iyi sonuç verdiği gösterilmiştir. Öğrenme adımlarının çevirimiçi sistem içerisinde eğitilebilir olan yöntemlerin daha iyi sonuçlar verdiği gösterilmiştir.

Çevirimiçi çalışan doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünün günümüzde de uygulama alanlarının çok geniş olduğu düşünülürse, çalışmanın çok faydalı olduğunu ve ileride daha da geliştirilebileceği söylenebilir.

6. TARTIŞMALAR

Çalışmamızda farklı yöntemler ile doğrusal olmayan sistemlerin kontrolü gerçekleştirilmiş ve sonuçlar iki seviyeli su tankı deney setinde karşılaştırılmıştır. Bu yöntemlere daha farklı kontrol yöntemleri eklenebilir ve deney setinde gerçekleştirilerek bu çalışmadaki sonuçlar ile karşılaştırılabilir.

İki seviyeli su tankı deney setinde uygulamalar Düzenek#3 üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu uygulamalar farklı bir düzenek olan Düzenek#2'de de gerçekleştirilebilir.

Bir adet daha pompa ilave edilerek düzenekler oluşturulup MIMO-Multiple Input Multiple Output deneyleri yapılabilir.

Deney setindeki musluklar, çıkışı DC voltaj ile ayarlanabilen vanalar ile değiştirilir ve pompanın voltaşı sabit tutularak vanaların çıkışı ayarlanabilir. Bu şekilde farklı deney setleri oluşturulup değindiğimiz adaptif bulanık kontrol yöntemleri bu setlerde uygulanabilir.

KAYNAKLAR

Ian S. Shaw, 1998, Fuzzy Control of Industrial Systems: Theory and Applications, Kluwer Academic Publishers, ISBN:0792382498

L. A. Zadeh, 1965, Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes, IEEE Transactions on Systems, man, and Cybernetics, Vol. SMC-3, No.1

L. A. Zadeh, 1973, Fuzzy Sets, Information and Control Vol.8

Li-Xin Wang, 1996, A Course in Fuzzy Systems and Control, Prentice-Hall International, Inc.

Katsuhiko Ogata, 1997, Modern Control Engineering, Prentice-Hall International, Inc., ISBN:0-13-261389-1

Uğur Arifoğlu, 2001, MATLAB7.0 Simulink ve Mühendislik Uygulamaları,

S.N.Sivanandam, S.Sumathi, S.N.Deepa, 2007, Introduction to Fuzzy Logic Using MATLAB, Sprindeg Science + Business Media, LLC., ISBN:103-540-35780-7

Quanser Consulting - User Manuel, Coupled-Tank User Manuel, Document Number:557, Rev:03., <http://www.quanser.com>

Quanser Consulting, Coupled Water Tank Experiments, <http://www.quanser.com>

Quanser Consulting, Specialty Experiment: PI-Plus-Feedforward Water Level Control – Coupled Water Tanks, <http://www.quanser.com>

- T.L.Seng, M.Khalid, R.Yusof**, 1998, Tuning of Neuro-Fuzzy Controller By Genetic Algorithms With an Application to a Coupled-Tank Liquid-Level Control System, International Journal of Engineering Applications on Artificial Intelligence Vol.11, ISSN 517-529, Pergamon Press
- C.Gabriela, V.Matei, M.Camelia, I.Eugen**, 2008, Additive Faults Detection and Level Control in Coupled Tanks, Wseas Transactions on Systems and Control Issue 11 Vol.3, ISSN 1991-8763.
- H.N.Koivo**, 2006, Fuzzy Systems: Basics Using MATLAB Fuzzy Toolbox,
- A.Isidori**, 1989, Nonlinear Control Systems, Springer-Verlag
- W.Yu, X.Li**, 2004, Fuzzy Identification Using Fuzzy Neural Networks With Stable Learning Algorithms, IEEE Transactions On Fuzzy Systems, Vol.12, No.3, June 2004
- K.S.Narendra, K.Parthasarathy**, 1990, Identification and control of dynamical systems using neural networks, IEEE Transactions On Neural Networks, 1 (1) (1990) 4-27
- C.Lin, C.Hsu, Y.Mon**, 2003, Self-Organizing Fuzzy Learning CLOs Guidance Law Design, IEEE Transactions On Aerospace and Electronic Systems, Vol.39, No.4
- S.Beyhan, M.Alci**, 2009, An Orthogonal ARX Network for Identification and Control of Nonlinear Systems, Ege University, Electrical & Electronic Department
- L-X.Wang**, 1997, A course in fuzzy systems and control, USA, Prentice-Hall Inc., ISBN 0-13-593005-7

