

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BULANIK MANTIK TEKNİKLERİ İLE
NÖTRALİZASYON PROSESİNDE ON-LINE
pH KONTROLÜ

Ömür ARAS
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

GEBZE

2010

T.C.
GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BULANIK MANTIK TEKNİKLERİ İLE
NÖTRALİZASYON PROSESİNDE ON-LINE
pH KONTROLÜ

Ömür ARAS
YÜKSEK LİSANS TEZİ
KİMYA MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU

GEBZE

2010



YÜKSEK LİSANS TEZİ JÜRİ ONAY SAYFASI

G.Y.T.E. Sosyal Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 15.01.2010 tarih ve 2010/03 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından 29.01.2010 tarihinde tez savunma sınavı yapılan Ömür ARAS'ın tez çalışması Kimya Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Prof. Dr. Mahmut R. BAYRAMOĞLU

ÜYE

: Prof. Dr. Vasfi ELDEM

ÜYE

: Doc. Dr. Hasan SADIKOĞLU

ONAY

G.Y.T.E. Sosyal Bilimler Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
...../...../20... tarih ve/..... sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

TEZ BAŞLIĞI: BULANIK MANTIK TEKNİKLERİ İLE NOTRALİZASYON PROSESİNDE ON-LINE pH KONTROLÜ

YAZAR ADI: ÖMÜR ARAS

Bu tezde, nötralizasyon prosesinde etkin ve başarılı bir pH kontrolü gerçekleştirmek amacıyla teorik ve deneysel çalışmalar yapıldı. Çalışmanın hazırlık kısmında nötralizasyon işleminde kullanılan deney düzeneği kuruldu, on-line veri toplama ve kontrol çalışmalarında kullanmak için programlar yazıldı. Deney düzeneğindeki çeşitli ekipmanların dinamik modelleri geliştirildi, model parametreleri ve sistemde meydana gelen zamana gecikmesi deneysel verilerle tespit edildi. Ayrıca, deney ve simülasyon sonuçları karşılaştırılarak sistem dinamik modelinin uyumluluğu incelendi.

Çalışmanın 1. kısmında PID kontrol tekniğinin pH kontrolünde uygulanabilirliği araştırıldı. Sistemin dinamik modeli kullanılarak değişik global optimizasyon algoritmaları ile PID katsayılarının ince ayarları yapıldı. pH elektrot dinamiğinin, pompa dinamiğinin ve sistem hatlarındaki gecikmenin PID kontrol performansı üzerindeki etkileri gözlemlendi.

Çalışmanın ikinci kısmında, 3 girişli bir bulanık denetleyici tasarlandı, bu denetleyicinin skala katsayıları aynı optimizasyon metotları ile farklı kriterler kullanılarak hesaplandı. Ayrıca, 2 girişli başka bir bulanık denetleyici optimize edildikten sonra 3 girişli bulanık denetleyici ile karşılaştırılması yapıldı. Son olarak, iki değişik metot yardımı ile bulanık denetleyicinin kural tabanındaki kural sayısı denetleyicinin performans ve etkinliği yükseltmek amacıyla minimize edildi.

SUMMARY

TITLE OF THESIS: ON-LINE pH CONTROL WITH FUZZY LOGIC TECHNIQUES IN THE NEUTRALIZATION PROCESS

AUTHOR: ÖMÜR ARAS

In this thesis, theoretical and experimental studies were done for the purpose of performing effective and successful pH control in neutralization processes. At the preparatory part of the study experimental setup of the neutralization process was built. Programmes were written for using data acquisition and control studies. Dynamic models of the various equipments on the experimental setup were developed. Model parameters and time delay occurring in the system were determined by experimental data. Moreover, the compatibility of system's dynamic model was investigated by comparing experiment and simulation results.

At the first part of the study, the feasibility of PID control technique on the pH control was investigated. PID coefficients were tuned using various global optimization algorithms by means of the system's dynamic model. The effects of the pH electrode's dynamic, pump's dynamic and time delay occurring in the system lines were observed on the PID control performance.

At the second part of the study, a fuzzy controller with three inputs was designed; this controller's scale coefficients were calculated with the same optimization algorithms by using different criteria. Besides, another fuzzy controller with 2 inputs was optimized then compared to the fuzzy controller with three inputs. Lastly, with the help of two different methods the rule number in the rule base of the fuzzy controller was minimized to increase the performance and effectiveness of the controller.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım sırasında maddi ve manevi yardımlarını esirgemeyen danışman hocam Prof. Dr. Mahmut BAYRAMOĞLU'na ve ikinci danışmanım Atatürk Üniversitesi Öğretim Üyesi Yrd. Doc. Dr. Samet HAŞILOĞLU'na, ilgi ve desteği ile yardımlarını esirgemeyen İTÜ öğretim üyesi Prof. Dr. Zekai ŞEN hocam'a ve destekleriyle her zaman yanımda olan aileme sonsuz teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xiii
TABLolar DİZİNİ	xv
1. GİRİŞ	1
2. KURAMSAL TEMELLER	2
2.1. Otomatik Kontrol Kavramı	2
2.2. Kontrol Sistemleri	3
2.2.1. Kimyasal Proses Kontrolü	5
2.3. Proses Kontrol Teknikleri	6
2.3.1. PID Kontrol	6
2.3.1.1. PID Katsayıların Ayarlanması	8
2.3.2. Bulanık Mantık Kontrol	12
2.3.2.1. Bulanık Küme Teorisi	13
2.3.2.2. Üyelik Derecesi ve Üyelik Fonksiyonu	14
2.3.2.3. Bulanık Kümelerde İşlemler	16
2.3.2.4. Bulanık Mantık Denetleyici	19
2.4. pH Kontrolü	25

2.4.1. pH Elektrodu	26
2.4.2. Nötralleştirme Reaktörü	29
2.4.3. Veri Toplama İşlemi	31
2.4.4. Kaynak Taraması	32
3. MATEMATİKSEL MODELLEME.	34
3.1.Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktör Dinamik Modeli	34
3.2. Reaksiyonlu SKTR Modeli	35
3.2.1. Kuvvetli Asit-Kuvvetli Baz Modeli	35
3.2.2. Zayıf Asit-Kuvvetli Baz Modeli	38
4. DENEY SİSTEMİ	40
4.1. Reaktör ve Karıştırıcı	41
4.2. Data Toplama Kartı	42
4.3. pH probu ve Transmitter	43
4.4. Peristaltik Pompa	43
5. BULGULAR VE TARTIŞMA	44
5.1. pH metre Kalibrasyonu	44
5.2. pH Sensor Dinamiği Deneyleri	45
5.3. Pompa Kalibrasyon Deneyleri	49
5.4. Pompa Dinamiği Deneyleri	50
5.5. Asit-Baz Çözeltilerinin Konsantrasyon Tayini	52
5.5.1. NaOH Çözeltisinin Konsantrasyon Tayini	52
5.5.2. Asetik Asidin Konsantrasyon tayini	54
5.6. Zaman Gecikmesi Deneyleri	54

5.7. Optimum PID Kontrol Katsayılarının Bulunması	56
5.8. PID Kontrol Deneyleri	65
5.9. Bulanık Mantık Kontrol Çalışmaları	69
5.9.1. Bulanık Mantık Kontrol tasarımı	69
5.9.2. Kural Tabanı İndirgeme Çalışmaları	81
5.9.2.1. Bulanık Küme Eşleştirme Yaklaşımı	81
5.9.2.2. Kişisel İndirgeme Yöntemi	92
SONUÇ	95
KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ	101
EKLER	103

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
AV	Bulanık mantık denetleyici için yardımcı giriş değişkeni
C	Konsantrasyon(mol/L)
C_1	Bileşen giriş konsantrasyonu(mol/L)
C_2	Bileşen çıkış konsantrasyonu(mol/L)
C_{20}	Bileşenin reaktör içerisindeki başlangıç konsantrasyonu(mol/L)
C_A	Asit konsantrasyonu(mol/L)
C_B	Baz konsantrasyonu(mol/L)
C_{A0}	Reaktör içerisinde başlangıçtaki astat iyon konsantrasyonu(mol/L)
C_{B0}	Reaktör içerisinde başlangıçtaki sodyum konsantrasyonu(mol/L)
Cl_0^-	Reaktör içerisinde başlangıçtaki klor konsantrasyonu(mol/L)
Na_0^+	Reaktör içerisinde başlangıçtaki sodyum konsantrasyonu(mol/L)
Cik	i.kuralın k. kuralla olan tutarsızlık seviyesi
Cti	i. Kuralın tutarsızlık seviyesi toplamı
D_A	Karıştırıcı çapı(mm)
D_T	Reaktör çapı (mm)
de	Skalalandırılmış hata değişim değeri
de^*	Skalalandırılmamış hata değişim değeri
e	Skalalandırılmış hata değeri
e^*	Skalalandırılmamış hata değeri
E	Potansiyel fark(V)
E_0	Sabit sıcaklıktaki standart potansiyel fakrk (V)
E_1	İç elektrot ile elektrolit arasındaki sabit potansiyel fark(V)
E_2	Cam elektrodun iç yüzeyi ile elektrolit arasında oluşan potansiyel fark(V)
E_3	Cam elektrodun dış yüzeyi ile çözelti arasındaki potansiyel fark(V)
Es	Toplam pil potansiyeli(V)
Et	Karıştırıcının tank tabanından olan yüksekliği(mm)

G_p	Proses kazancı
H	Sıvı yüksekliği(mm)
ISE	Hata karelerinin integrali
$ITSE$	Hata karelerinin zaman çarpımlı integrali
$ITEA$	Zaman çarpımlı mutlak hataların integrali
J	Dalgakıran (Baffle) Kalınlığı(mm)
K, T, α	Ziegler-Nichols açık çevrim PID katsayıları ayar parametreleri
K_a	Asit iyonlaşma sabiti
K_D	Türev kazancı
K_I	İntegral kazancı
K_o	Ziegler-Nichols kapalı çevrim osilasyon kazancı
K_p	Oransal kazanç
K_{su}	Suyun iyonlaşma sabiti
L	Karıştırıcı kanat uzunluğu(mm)
M	Molarite(mol/L)
$M_f i$	i.üyelik fonksiyonu
pH_{ind}	Göstergedeki anlık pH bilgisi
P_o	Ziegler-Nichols için osilasyon periyodu
P_v	Proses değeri
q	Toplam çıkış debisi(cc/dak)
q_a	Asit debisi(cc/dak)
q_b	Baz debisi(cc/dak)
$q_{b_{ind}}$	Göstergedeki anlık debi bilgisi(cc/dak)
R	pH sensorun nihai değere ulaşma oranı
R^2	Regresyon belirlilik katsayısı
rik	i.kuralın k. Kuralla olan fazlalık seviyesi
rti	i. Kuralın fazlalık seviyesi toplamı
Set	Ayar noktası
S_e	Hata için skala katsayısı
S_{de}	Hata değişimi için skala katsayısı
$S_{\Delta u}$	Kontrol sinyali değişimi(Δu) için skala katsayısı
u	Denetleyici çıkış sinyali
W	Karıştırıcı kanat genişliği

ν	Hacim(L)
τ	Hidrolik kalma zamanı(s)
τ_I	İntegral zamanı
τ_D	Türev zamanı
τ_S	Sensor zaman sabiti
$\tau_{S_{ort}}$	Deneysel olarak bulunan ortalama sensor zaman sabiti
τ_P	Deneysel olarak bulunan ortalama pompa zaman sabiti
Δu^*	Skalalandırılmamış kontrol sinyali değişim değeri
ΔpH	Farklı iki çözelti pH'ları arasındaki fark
Δq	Farklı iki çözelti debi arasındaki fark (cc/dak)
Δu	Skalalandırılmış kontrol sinyalindeki değişim değeri
$\mu(x)$	Bulanık kümede tanımlı x. varlığın üyelik değeri

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Açık çevrim kontrol sistemi	3
2.2. Geri besleme kapalı çevrim kontrol sistemi	4
2.3. İleri besleme kapalı çevrim kontrol sistemi	5
2.4. Ziegler-Nichols kapalı çevrim sistem cevabı	8
2.5. Açık çevrim birim basamak sistem cevabı	9
2.6. Kontrol sistemi performans kriterleri	10
2.7. a) Bulanık küme gösterimi b) Klasik mantık küme gösterimi	14
2.8. Örnek üyelik fonksiyonları	15
2.9. Bulanık kümelerde birleşim ve kesişim işlemi	17
2.10. Bulanık kümelerde sup, core ve α -cut	19
2.11. Basit bir Bulanık Mantık Denetleyici	21
2.12. Genel haliyle Bulanık Mantık Denetleyici	21
2.13. Örnek için hata ve hatanın değişimini gösteren üyelik fonksiyonları	23
2.14. Çıkış sinyali(u) için üyelik fonksiyonu	24
2.15. Ölçüm elektrodu	27
2.16. Ag-AgCl Referans elektrot	28
2.17. Kombine elektrot	29
2.18. İdeal Reaktör Boyutlandırılması	30
3.1. Sürekli Karıştırılmalı Tank Reaktör	35
3.2. Reaksiyonlu SKTR sistemi	36
4.1. Deney sistemi	40
4.2. Düz Kanatlı Türbin Karıştırıcı	41
5.1. Volt-pH Eğrisi	45
5.2. a) pH 3.2 den 9.26 'a geçerken sensor cevabı b) t-R grafiği	47
5.3. a) pH 2.7 den 6.6'ya geçerken sensor cevabı b) t-R grafiği	48
5.4. Volt-Debi eğrisi	49
5.5. NaOH etki değeri için Hacim-pH eğrisi	53
5.6. NaOH etki değeri için Hacim-eğim grafiği	53

5.7. Zaman gecikmesinin belirlenmesi	55
5.8. Zaman gecikmesinin belirlenmesi(Derişik baz kullanımı)	56
5.9. Simulink blok diyagramı	59
5.10. pH 5-6 aralığı için optimum katsayıların uygulanması	60
5.11. pH 6-7 aralığı için optimum katsayıların uygulanması	61
5.12. pH 7-8 aralığı için optimum katsayıların uygulanması	63
5.13. a) Zaman gecikmeli sistemde deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması b) zaman gecikmesiz simülasyon sonucu	66
5.14. Zaman gecikmeli sistemde deney ve simülasyon sonuçları	67
5.15. Zaman gecikmeli sistemde deney ve simülasyon sonuçları	68
5.16. Proses kazancının bölgelere göre değişimi	70
5.17. Yardımcı değişken (ayar noktası) için üyelik fonksiyonları	71
5.18. Hata (e), Hatanın değişimi (de) ve Çıkış değişkeni (Δu) için üyelik fonksiyonları	72
5.19. Bulanık mantık kontrol simulink blok diyagramı	75
5.20. ITSE kriteri optimize edilen 3 giriş değişkenli denetleyici performansı a) ceza puansız b) ceza puanlı	77
5.21. ISE kriteri optimize edilen 3 giriş değişkenli ceza puansız denetleyici performansı	78
5.22. ITSE kriteri optimize edilen iki giriş değişkenli denetleyici performansı a) ceza puansız b) ceza puanlı	80
5.23. ISE kriteri optimize edilen 2 giriş değişkenli ceza puansız denetleyicinin performansı	81
5.24. Kuralların tutarsızlık seviyeleri toplamaları	84
5.25. Kuralların fazlalık seviyeleri toplamaları	85
5.26. 43 kurallı denetleyici performansı	89
5.27. 43 kurallı denetleyicinin gürültü varlığındaki performansı	89
5.28. Yeni elde edilen 43 kuralın gürültü varlığındaki performansı	90
5.29. Farklı kural tabanları ile elde edilen kontrol performansları	91
5.30. Saçılım diyagramları	93
5.31. 33 kuraldan oluşan kontrolün performansı	94

TABLOLAR DİZİNİ

<u>Tablo</u>	<u>Sayfa</u>
2.1. Ziegler-Nichols kapalı çevrim PID katsayıları ayar değerleri	9
2. 2. Zeigler-Nichols açık çevrim birim basamak cevabı için ayar değerleri	10
2.3. Üyelik fonksiyon ifadeleri	15
2.4. Örnek için kural tablosu	23
2.5. Örnek için çıkış değişkeni kesinlik değerleri	24
5.1. R- τ_{ort} değerleri	48
5.2. Pompanın durgun halden harekete geçme süreleri	50
5.3. Pompanın kararlı halden, yeni kararlı hale geçme süreleri	51
5.4. pH 5-6 aralığı için optimum sonuç tablosu	58
5.5. pH 6-7 aralığı için optimum sonuç tablosu	61
5.6. pH 7-8 aralığı için optimum sonuç tablosu	62
5.7. Çok bölgeli Bulanık Kontrol için kural tabanı	74
5.8. Üç giriş değişkenli denetleyici için optimizasyon sonuçları	76
5.9. İki giriş değişkenli denetleyici için optimizasyon sonuçları	79
5.10. Kuralların tutarsızlık seviyeleri toplamalarının sınıflandırılması	85
5.11. Kuralların fazlalık seviyeleri toplamalarının sınıflandırılması	86
5.12. Birinci seviyedeki tutarsız kuralların çıkarılması	87
5.13. İkinci seviyedeki tutarsız kuralların çıkarılması	87
5.14. Üçüncü seviyedeki tutarsız kuralların çıkarılması	88
5.15. Kural sayısı-Amaç fonksiyon tablosu	91

1.GİRİŞ

Geçen 60 yıl boyunca, lineer kontrol teknikleri kimyasal proses kontrolünde yaygın bir şekilde kullanılmıştır. Fakat çoğu kimyasal prosesin tabiatında anlamlı bir payı olan nonlineerlik nedeniyle bazı durumlarda kontrol performansları sınırlı kalmıştır. Kuvvetli ekzotermik reaksiyonların vuku bulduğu proseslerde sıcaklık kontrolü, reaksiyon sırasında H^+ iyonlarının reaktan olduğu veya ürün olarak ortaya çıktığı proseslerde pH kontrolü bu duruma örnek olarak verilebilir. 80’li yıllardan itibaren bilgisayar teknolojilerinde kapasite ve işlemci hızındaki hızlı artışlar, özellikle yüksek derecede nonlineer olan sistemlerde yüksek performans sağlamak üzere proses modelini kullanan değişik kontrol tekniklerinin hızlı bir şekilde gelişmesini sağlamıştır.

Günümüzde, pH kontrolünün endüstrideki uygulama alanlarının genişlemesi ile birlikte önemi de artmıştır. Bu sanayilere örnek olarak; atık su arıtımı, flotasyon (yüzdürme), içki, hamur ve kâğıt, temizlik ürünleri, gıda ve ilaç sanayileri sayılabilir. Bu duruma paralel olarak pH kontrolü halen önemli bir “kontrol problemi” olmaya devam etmektedir. Geleneksel PID kontrol ve daha ileri lineer kontrol tekniklerinin dahi bu konuda yetersiz kaldığı görüldüğünden çalışmalar nonlineer teknikler üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Diğer yandan, günümüzde yapay zekâ ürünü olan kontrol sistemlerinden, bulanık mantık kontrol ve türevleri ile geliştirilen kontrol yapıları ön plana çıkmaktadır. Endüstriyel bir sürecin denetimine ihtiyaç duyulduğunda öncelikle o sistemin dinamik modeline başvurulur. Ancak bazı durumlarda, proseste cereyan eden olaylar bir model ile tam ifade edilemeyebilir veya değişken proses parametreleri sebebiyle denetleyici iyi bir performans sergileyemeyebilir ve ilgili prosesi çok iyi bilen bir uzman kişinin desteğine ihtiyaç duyulur. Bulanık mantık kontrol, bir uzmanın prosesi kontrol etme tecrübe ve bilgisini simüle etmeyi hedefleyen bir mantıksal yapı üzerine kurulmuştur.

Bu tezde, tipik bir nötralizasyon prosesine örnek teşkil olmak üzere, zayıf asit (asetik asit) - kuvvetli baz (sodyum hidroksit) sisteminde pH'ın kontrol altına alınması için gerekli olan denetleyicinin geliştirilmesine çalışılmıştır. Tezde yürütülen çalışmanın ana amacı; nötralizasyon prosesinde etkin ve başarılı bir pH kontrolü sağlamak üzere bulanık mantık tekniklerinin uygulanabilme şartlarının araştırılmasıdır. Bu çerçevede, tezin ikinci bölümünde bu konudaki kuramsal temeller kısaca verilmiş, üçüncü kısımda sistemin matematik modeli kurulmuş, dördüncü kısımda deney sistemi tanıtılmış, beşinci ve son kısımda ise değişik kontrol teknikleri ile elde edilen sonuçlar sunulularak tartışılmıştır.

2. KURAMSAL TEMELLER

2.1. Otomatik Kontrol Kavramı

İnsanların bizzat kontrolü üslendiği sistemlere genellikle manuel(elle) kontrol sistemleri adı verilir. Bu tip sistemlere örnek olarak bisiklet kullanan bir adam örnek gösterilebilir. Şayet burada bisiklet kullanan kişi bir makine olsaydı bu sistem bir otomatik kontrol sistemi olarak adlandırılırdı. O halde, bir sistemin otomatik kontrol sistemi olabilmesi için tam olarak makine kontrollü bir sistem olması gerekmektedir.

Otomatik kontrol kavramının kendini bilim dünyasında göstermesi 1900'lü yıllara tekabül etmektedir. 20. yüzyılın ortalarına kadar bu alanda yapılan çalışmalar daha çok deneme-yanılma ve sezgiye dayalı olmuş, teorik çalışmalar daha kısıtlı kalmıştır. 1950 den sonra transistor'un bulunması ve bilgisayarların ortaya çıkması ile birlikte zaman içinde “ dijital kontrol”, “bilgisayar destekli kontrol” ,“ileri kontrol teknikleri” ve daha güncel olarak “yapay zekâ kontrol teknikleri” gibi kavramlar ortaya çıkmıştır. Günümüzde ise hemen her yerde otomatik kontrolün uygulamalarını görmek mümkündür. Ev ve iş yerlerimizdeki aydınlatma, ısıtma, havalandırma işlemleri, asansör, otomatik kapı, uçak, gemi kontrolü, trafik kontrolü, üretim proseslerinde ürün, hammadde ve yarı mamulün özelliklerinin veya bir prosesin performansının kontrolü ilk bakışta göze çarpan uygulamalardır.

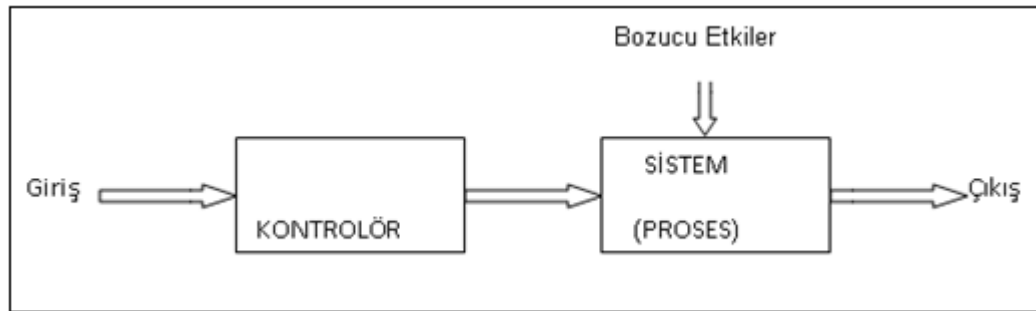
Çevremize şöyle bir göz attığımızda aslında otomatik kontrole fazla yabancı olmadığımızı görmekteyiz. Bizim yapmaya çalıştığımız aslında dünyamızdaki

olayların bir nevi taklidi veya analojisidir. Zira bu olayların çoğunda üstün bir mühendislik mevcuttur. Ve bunlar insan müdahalesi olmadan gerçekleşen doğal kontrol mekanizmalarıdır. Örneğin göze gelen ışığın şiddetine göre göz bebeğinin küçülüp büyümesi, acı veya ağrı durumunda vücut reflekslerinin harekete geçmesi, kan şekerinin yükselmesi durumunda insülin salgısının artırılması, kan şekerinin düşmesi durumunda glukagon' un kullanılması ile şeker düzeyinin istenilen düzeyde tutulması, yine içinde bulunulan ortam şartları nasıl olursa olsun vücut sıcaklığının 36.5-37.5 °C arasında tutulması, göze bir şey kaçtığında veya göz tahriş olduğunda gözün sulanması ve göz kapağının sürekli açılıp kapanarak gözyaşı keseciğini büyültüp emme miktarını artırması ile gözün temizlenip atığın burna gönderilmesi, vücudumuzda meydana gelen doğal otomatik kontrol mekanizmalarından sadece bir kaçıdır.

2.2. Kontrol Sistemleri

Kontrol sistemleri, kontrol edilmek istenilen değişkenin ölçülmesi, yönetilmesi, bakımından “açık çevrim” ve “kapalı çevrim” kontrol sistemi olarak ikiye ayrılır.

a) Açık Çevrim Kontrol Sistemi



Şekil 2.1. Açık çevrim kontrol sistemi

Açık çevrim kontrol sisteminde çıkış değerinin veya girdi değişkenlerinin kontrol işlevinde hiçbir etkisi yoktur sistemde herhangi bir ölçüm yapılmaz dolayısıyla **son denetim elemanına** gelen sinyal bağımsızdır, bu sistemlerde sonradan oluşabilecek herhangi bir arıza veya parametre değişimi kontrol sisteminin başarısızlığına yol açacaktır. Bu nedenle bu sistemler belirli zaman aralıklarıyla kalibre edilirler veya

bozucu etkilerin olmadığı yerlerde kullanılırlar böylece iyi bir performans sergileyebilirler.

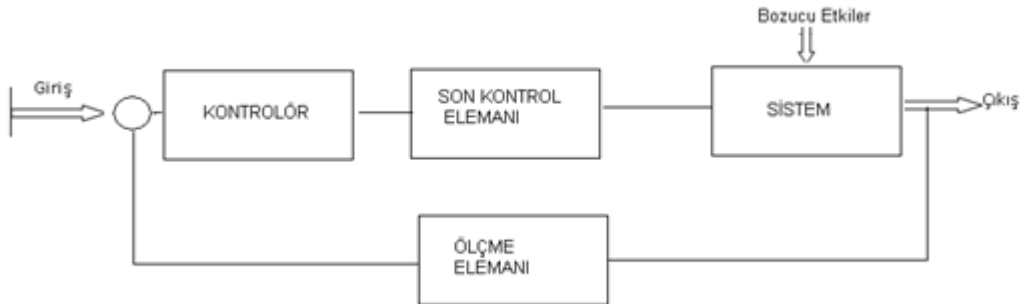
Çamaşır makinesi, fırın, trafik sinyalizasyonu, v.s açık çevrim kontrole örnek gösterilebilir.

b) Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi

Bu kontrol mekanizmasında, ya kontrol edilecek çıkış değişkeni ölçülür ya da çıkış değişkenine etki edecek giriş değişkenleri ölçülerek istenilen değerleri karşılaştırılır böylece hata varsa, hatayı azaltacak yönde çıkış sinyali üretilir.

Yukarıdaki açıklama doğrultusunda iki çeşit kapalı çevrim kontrol mekanizmasından söz edilebilir.

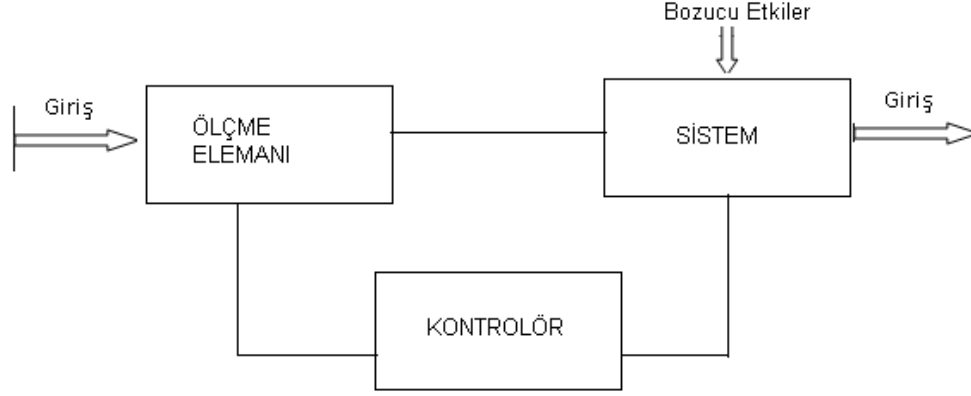
1) Geri Besleme Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi



Şekil 2.2. Geri besleme kapalı çevrim kontrol sistemi

Geri besleme kontrol mekanizmasında çıkış değeri ölçülüp referans değeri ile karşılaştırılır, arada fark varsa hatayı azaltacak yönde harekete geçilir.

2) İleri Besleme Kapalı Çevrim Kontrol Sistemi



Şekil 2.3. İleri besleme kapalı çevrim kontrol sistemi

İleri besleme kontrol sistemi daha çok sistemdeki bozucu etkilerin kaynağının bilindiği durumlarda kullanılır ve sistemde en ufak bir değişikliğin tolere edilemeyeceği durumlarda tercih edilirler. Oysa geri besleme kontrol sisteminde çıkış değişkeni, bozucu etkinin kaynağı bilinsin bilinmesin, değiştiği zaman kontrol işlemine başlar.

2.2.1. Kimyasal Proses Kontrolü

1930'lara kadar proses kontrol konusunda ancak birkaç teorik yayın mevcut iken son 30 yılda bu alanda yazılan kitap, yayımlanan bilimsel makale sayısı kimya mühendisliğinin termodinamik, ısı transferi, kütle transferi, reaksiyon kinetiği gibi temel alanlarındaki sayılara ulaşmış ve bu alanların çekirdek çalışma konusu haline gelmiştir.

Kimyasal Proses kontrol uygulamalarını diğer kontrol uygulamalarından ayıran bazı farklar vardır; kimyasal tesisler genellikle sabit bir operasyon noktasında işletilirler ve büyük kapasitedeki proses elemanları bozucu etkileri minimize etmede yardımcı olurlar. Proses kontrolünde zaman gecikmesi ve transport-lag, kontrolü etkileyen

önemli faktörler arasında yer alır. Proses kontroldeki 1.dereceden sistemler elektronik, mekanik ve elektro-mekanik sistemlerde sıklıkla rastlanan 2.dereceden sistemlere nazaran daha yaygındır.

2.3. Proses Kontrol Teknikleri

Günümüzde klasik kontrol teknikleri endüstride halen yaygın olarak kullanılmaktadır. Örnek olarak en basit kontrol tekniği olan aç-kapa (on-off) ve daha gelişmiş olan “PID kontrol” teknikleri sayılabilir.

2.3.1. PID Kontrol

PID(proportional, integral, derivative) kontrolün ana çalışma prensibi şöyledir. Şekil 2.2 den görüleceği üzere çıkış değeri bir ölçüm elemanı ile ölçüldükten sonra karşılaştırma elamanında istenilen değerde olup olmadığına bakılır, aradaki fark alınarak bir hata (e) değeri elde edilir. Kontrolör bu hatayı küçültecek yönde giriş değişkenine bir sinyal(u) gönderir. İşte kontrolörün gönderdiği bu sinyal hatanın fonksiyonudur. PID kontrol yapıları incelenirse;

1) P(oransal) Etki:

Oransal kontrol edici, çıkış sinyalini transmitterden aldığı hata sinyaliyle doğru orantılı olarak değiştirir.

$$u=K_p(\text{Set}-P_v) \quad (2.1)$$

K_p burada oransal kazançtır.

Sistem giriş değişkeninin bağlı olduğu son kontrol elemanına denklem 2.1 den de görüleceği üzere hata ile orantılı bir sinyal gönderilir. Bunu bir örnek üzerinde açıklayalım. Bir beher alalım ve içini pH'ı 2 olan bir çözelti ile dolduralım sonra bu çözeltinin pH'ını 5 ye getirmek isteyelim bunun için çözeltiye, hatayla orantılı sinyal gönderebileceğimiz bir pompa(son kontrol elemanı) vasıtasıyla baz ekleyelim, sonuçta uygun K_p değerinde hata sifıra gidince çıkış sinyali de sifıra gidecektir

(Eklenen baz miktarı da sıfıra gidecektir). Fakat pratikte debiyi ve pH sensorunu etkileyen bozucu etkilerle bu o kadar kolay olmayacaktır en küçük bir değişimde bile pompa tekrar baz ekleyecek buda istenilen değerden sapmaya neden olacaktır. Bunun için pratikte genellikle bir bant genişliği seçilir ve kontrolün bu bant'ın dışında çalışması sağlanır. Bu durum sistemde “kararlı hal hatası” na yol açar.

2) I(integral) Etki:

Oransal etkinin kararlı hal hatasını yok etmek amacı ile kontrole integral etki ilave edilir. Böylece kontrol çıkışı hatanın o andaki değerine bağlı kalmayıp aynı zamanda hatanın geçmişteki değerlerine de bağlı olacaktır.

$$u(t) = K_I \int_0^t e(t) dt \quad (2.2)$$

3) D(türevsel) Etki:

Kontrol edilen değişkenin istenilen değerden uzaklaşmasını önlemek amacı ile kontrole türevsel etki ilave edilir. Kontrol üzerine etkisi ani ve fark edici olabilir dolayısıyla buda sisteme yansır, sinyallerde gürültü varlığında kullanılması pek tercih edilmez.

$$u(t) = K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.3)$$

Bu üç etkinin beraber kullanılması ile PID kontrol elde edilir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt} \quad (2.4)$$

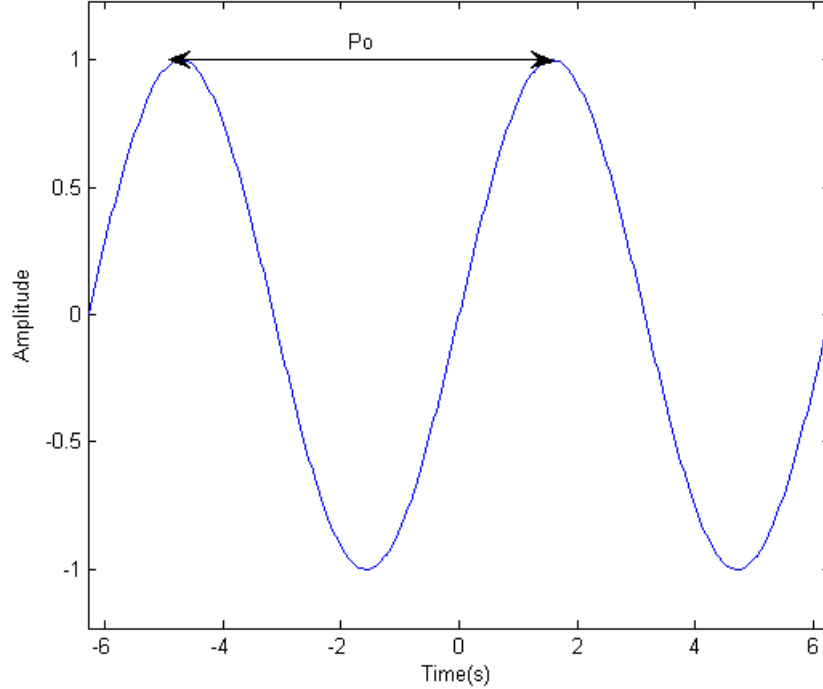
$$u(t) = K_p [e(t) + 1/\tau_I \int_0^t e(t) dt + \tau_D \frac{de(t)}{dt}] \quad (2.5)$$

Burada $\tau_I = K_p / K_I$ $\tau_D = K_D / K_p$

2.3.1.1. PID Katsayıların Ayarlanması

Literatürde PID katsayıların ayarlanmasında kullanılan birçok yöntem vardır. Bu yöntemlerden deneysel olan ve en çok kullanılan iki tanesine burada yer verilecektir.

Deneysel yöntemler içinde açık çevrim ve kapalı çevrim yöntemler mevcuttur. Kapalı çevrim yönteminde denetleyici(controller) devrededir ve integral ve türevsel sabitleri sıfırlanıp oransal sabite çok küçük değerden başlanarak git gide artan değerler verilir ve sistem salınımına (osilasyon) gidene kadar devam edilir. Sonuçta sistemi salınımına götüren oransal sabit (K_o) değeri ve salınım periyodu (P_o) kaydedilir ve PID katsayıları tablo 2.1 yardımı ile hesaplanır.



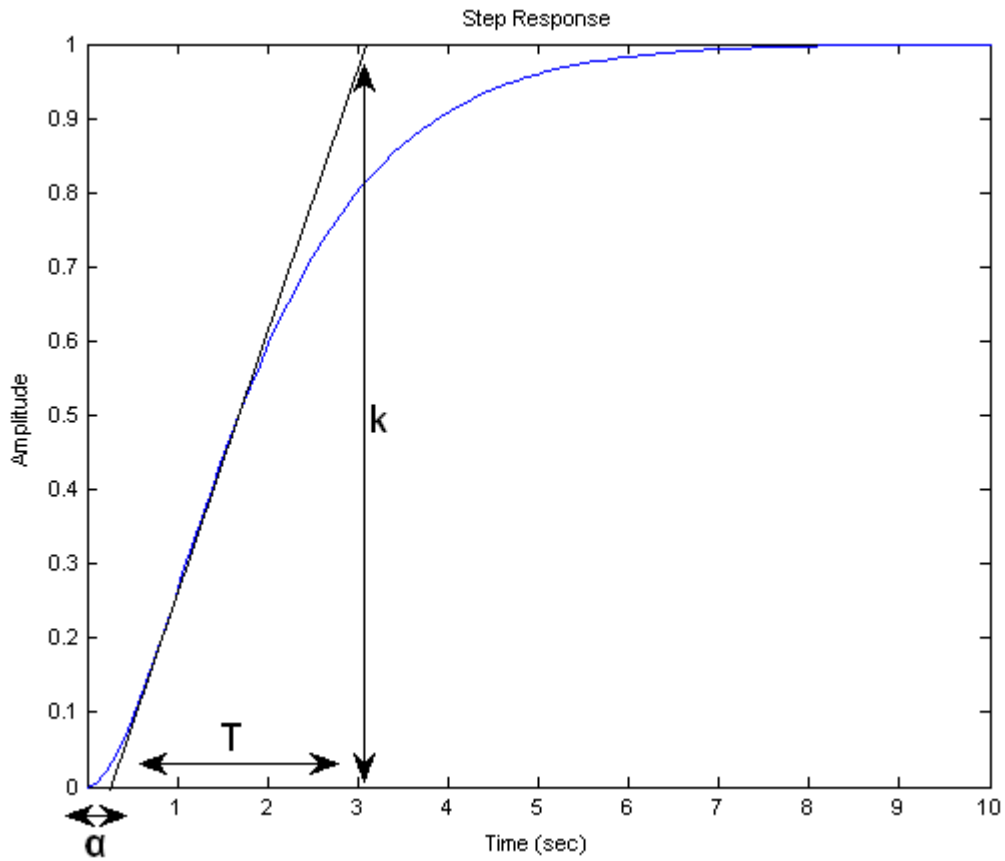
Şekil 2.4. Ziegler-Nichols kapalı çevrim sistem cevabı

Tablo 2.1. Ziegler-Nichols kapalı çevrim PID katsayıları ayar değerleri

Kontrol tipi	K_p	τ_I	τ_D
P	$0.5 K_O$	-	-
PI	$0.45K_O$	$P_O/1.2$	-
PID	$0.6 K_O$	$P_O/2$	$P_O/8$

Açık çevrim ayar yönteminde ise denetleyici devreden çıkarılır ve sistem çıkışında hissedilebilecek bir etki oluşturmak için giriş değişkenine etki verilir.

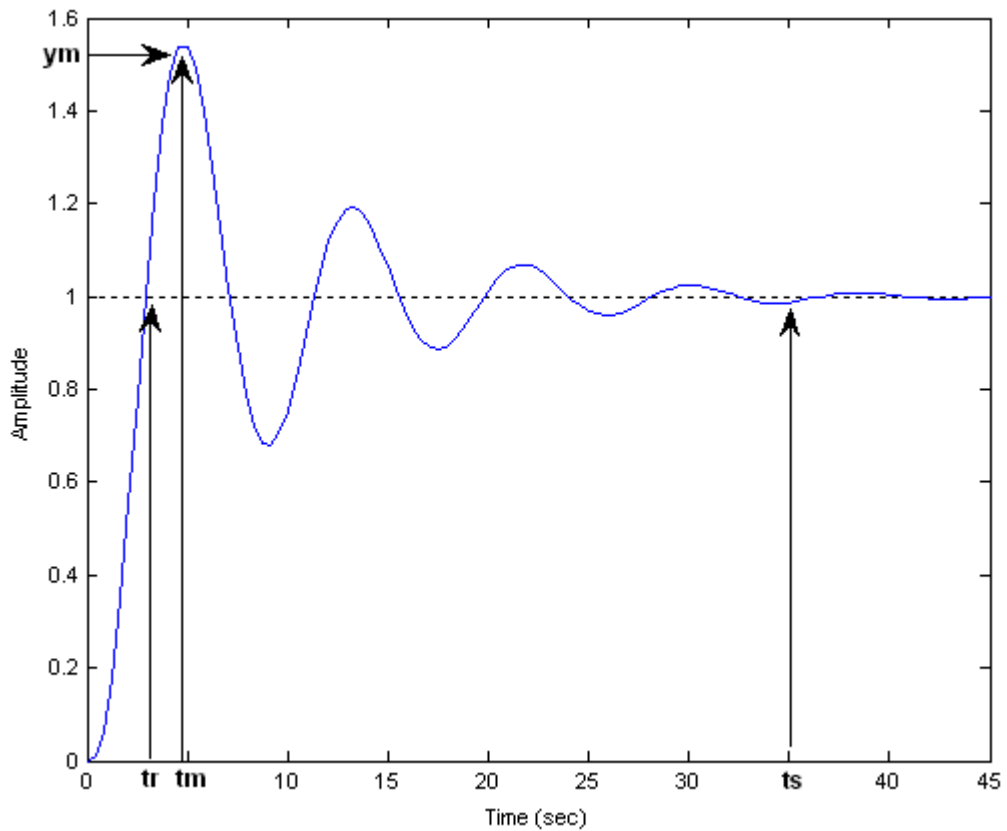
Sistemin birim basamak cevabı analiz edilerek PID katsayıları elde edilir.

**Şekil 2.5.** Açık çevrim birim basamak sistem cevabı

Tablo 2.2. Zeigler-Nichols açık çevrim birim basamak cevabı için ayar değerleri

Kontrolör	K_p	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K} \frac{T}{\alpha}$	-	-
PI	$\frac{0.9}{K} \frac{T}{\alpha}$	3.33α	-
PID	$\frac{1.2}{K} \frac{T}{\alpha}$	2α	0.5α

Sistem denetleyici yardımı ile bir kararlı halden başka bir kararlı hale geçtiğinde oluşan eğrinin analizi yapılır ve bu eğrinin belli kriterleri sağlaması istenir, bu kriterlerin optimizasyonu ile de PID katsayıların ayarlanması yapılabilir.

**Şekil 2.6.** Kontrol sistemi performans kriterleri

Kararlı halde yürüyen bir sistem yeni bir kararlı hale getirilmek istendiğinde veya bozucu (distürbans) etkisi ile kararlı halden sapıp tekrar eski haline döndürüldüğünde Şekil 2.6'ya benzer bir eğri elde edilir. Bu eğri incelendiğinde;

ym: proses çıktısının ulaştığı maksimum değerdir genellikle bu değer kararlı hal değerinden fazla olması istenmez (örneğin: mikrobiyal reaktörlerde pH ve sıcaklık değerindeki artış ve azalışlar ciddi sorunlara neden olabilir).

tr: kararlı hal değerine yükselme zamanıdır.

ts: kararlı hal değerinin belli bir yüzdesine ulaşma zamanıdır, bu değer genellikle kısa olması istenir. Farklı PID katsayıları ile çalışıldığında sonuçta aşımı farklı, yerleşme zamanı farklı, salınımı farklı sistemler elde edilecektir, bunlar içinden en idealinin bulunması istenir.

Bu parametrelerin haricinde, denetleyicinin performansının değerlendirilmesi amacıyla kullanılan bazı kriterler şunlardır:

a) ISE kriteri:

Bu yöntemde kontrol olayının başından sonuna kadar oluşan hataların kareleri toplanır böylece en küçük ISE değerini veren katsayılar PID de kullanılır. Zamanın etkisi bu kriterde dikkate alınmadığından ve başlangıçtaki hatada büyük olduğundan sistem bu hatayı giderecek büyük oransal sabit değerleri deneyecek sonuçta aşımı düşük fakat salınımlı bir cevapla karşılaşılabilir.

$$J = \int_0^t (e(t))^2 dt \quad (2.6)$$

b) ITEA kriteri:

Bu yöntemde ise hatanın mutlak değeri ile zamanın çarpımının integrali alınır. Bu kriterin kullanılması ile başlangıçta aşımı fazla ama kararlı hal hatası ve yerleşme zamanı düşük bir sistem elde edilebilir.

$$J = \int_0^t t|e(t)|dt \quad (2.7)$$

c) ITSE kriteri:

Burada da hata karelerinin zaman çarpımlı integrali minimize edilmeye çalışılır. ITSE kriterinin minimizasyonu sağlandığı takdirde zamandan dolayı hem yerleşme zamanı iyileşecek, hem de aşırı sönümlenme engellenmiş olacaktır.

$$J = \int_0^t t(e)^2 dt \quad (2.8)$$

Genel olarak ISE kriterinin kontrol sırasında ilk pik oluşumunu azaltmada daha etkili olduğu söylenebilirken, genel performansa bakıldığında ITSE'nin daha etkili olduğunu söylenebilir. Bu iki performans ölçütü ayrı ayrı kullanılabilirken ikisinin beraber kullanımı da yaygındır.

2.3.2. Bulanık Mantık Kontrol

Bulanık mantık(Fuzzy Logic), bulanık küme teorisi çerçevesinde 1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından ortaya konmuştur. Zadeh şu gerçeğe vurgu yapmaktadır; insanların bazı sistemleri, makinelerden daha iyi kontrol edebilmelerinin bir sebebi, insanların kesinlik ifade etmeyen bir takım bilgileri kullanarak karar verebilme özelliğine sahip olmalarındandır.

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

İnsan beyni sayısal bir işlemi birkaç dakikada yapabilmesine karşın, idrak etmeye yönelik olayları çok kısa bir sürede yapar. Örneğin yolda giden bir şoför, yolun kayganlık derecesini, önündeki tehlikeden ne kadar uzak olduğunu, sayısal olarak değerlendiremezse dahi geçmişte kazanmış olduğu tecrübeler sayesinde aracın hızını azaltır. Çünkü o saniyelerle ölçülebilecek kadar kısa bir sürede tehlikeyi idrak etmiş ve ona karşı koyma gibi bir tepki vermiştir. Bu noktada akla gelen ilk soru şu olmaktadır; acaba bir bilgisayar yardımı ile böyle bir zekâ üretmek mümkün olabilir

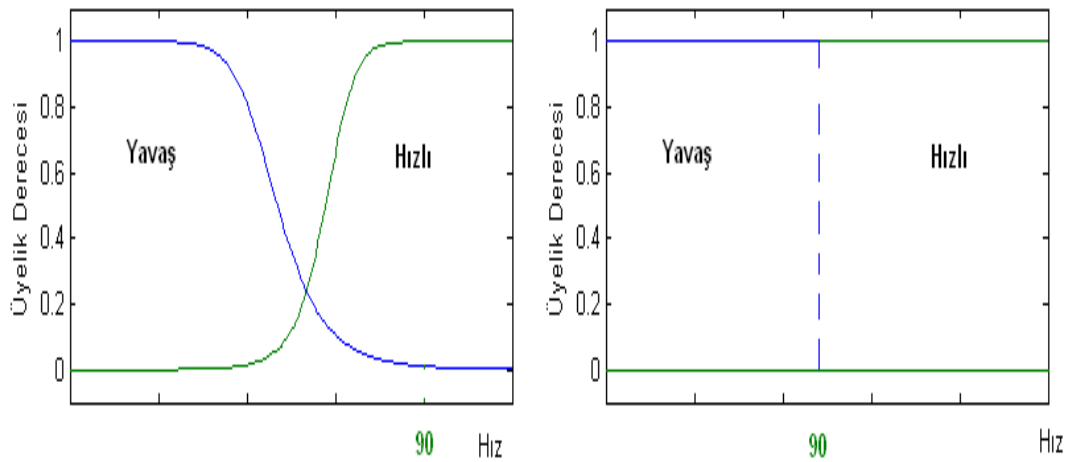
mi? Bilgisayarlar çok karmaşık sayısal işlemleri anında çözümleyebilmelerine karşın, idrak etme ve deneyimlerle kazanılmış bilgileri kullanabilme noktasında çok yetersizdirler. Bu çerçevede değişik yapay zekâ teknikleri geliştirilmiştir.

2.3.2.1. Bulanık Küme Teorisi

Klasik mantıkta, bir varlık (eleman) kümeye aittir ya da değildir. Matematiksel olarak ifade edildiğinde küme ile olan üyelik ilişkisi bakımından kümenin elemanı olduğunda ‘1’ , kümenin elemanı olmadığı zaman ‘0’ değerini alır. Bulanık mantık klasik küme gösteriminin genişletilmesidir. Bulanık varlık kümesinde her bir varlığın üyelik derecesi vardır. Varlıkların üyelik derecesi, $[0,1]$ aralığında herhangi bir değer olabilir ve üyelik fonksiyonu $\mu(x)$ ile gösterilir.

Konuyu biraz daha açarsak; Klasik mantıkta her şey ‘ikili’ kodlar üzerine kurulmuştur. Oysa dünyamızda pek çok şey ikili değildir. Yani insanları ‘iyi’ ve ‘kötü’ diye iki gruba kesin sınırlarla ayıramayız. İyilik ve kötülük kutuplarının arasında pek çok derece mevcuttur. Yani hayat sadece ‘siyah-beyaz’ üzerine kurulmamıştır. Doğada gri renkler de vardır ve bulanık mantık doğadaki gri tonların bilim ve endüstride kullanılmasıdır.

Örneğin: 90 Km/saat, Hızlı araçlar için hız sınırı olsun. Şimdi 89 km/saat hızla giden bir aracı ele alalım. Klasik mantıkta bu araç hızlıdır sorusuna yanıt bu alt değere bakarak cevaplanmaktadır.(cevap: hayır, yavaştır). Bu mantığın hiçbir esnekliği yoktur. Klasik mantıkta sınırların böyle keskin olması kontrolde denetim çıktısında ani çıkışların meydana gelmesini kaçınılmaz kılar. Bulanık mantığa göre ise yavaş olanın da bir hız derecesi vardır. (örneğin; 89km/saat lik araç 0.9’lik üyelik derecesi ile hızlı, 0.02’lik üyelik derecesi ile yavaştır denir).

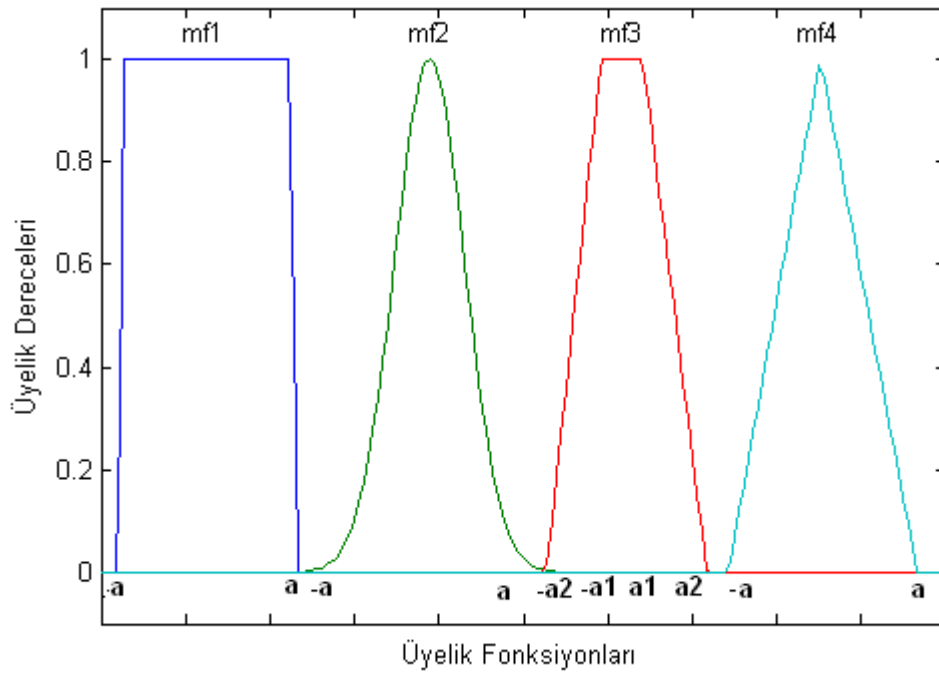


Şekil 2.7. a) Bulanık küme gösterimi b) Klasik mantık küme gösterimi

2.3.2.2. Üyelik Derecesi ve Üyelik Fonksiyonu

Üyelik derecesi belirli bir değerin bir bulanık küme içerisinde yer almasının düzeyidir: Üyelik derecesi, $[0,1]$ aralığında herhangi bir değer olabilir ve üyelik dereceleri üyelik fonksiyonuyla elde edilirler. Üyelik fonksiyonları; Üçgen, yamuk, çan v.b. gibi değişik biçimlerde olabilir. Bu fonksiyonların kullanılma sebepleri kolay normalizasyonları ve değişimlere uygulanabilirlikleridir. Ayrıca bulanık kümeleri ifade eden sayısız üyelik fonksiyonu bulunabilir, bu özellikleri sayesinde değişik durumlara kolayca uyum sağlayabilirler.

Üyelik fonksiyonlarını belirlenmesinde başlıca üç yöntem vardır; uzman bilgisi (1980 yılı sonlarına dek), veri setleri ve performanstır.



Şekil 2.8. Örnek üyelik fonksiyonları

Şekil 2.8 de gösterilen üyelik fonksiyonlarının matematiksel olarak gösterimi aşağıdadır.

Tablo 2.3. Üyelik fonksiyon ifadeleri

mf1	mf2	mf3	mf4
$\mu(x)=0 \quad -\infty < x < -a$	$\mu(x)=e^{-kx}$	$\mu(x)=0 \quad -\infty < x < -a2$	$\mu(x)=0 \quad -\infty < x < -a$
$\mu(x)=1 \quad -a < x < a$		$\mu(x)=\frac{a2-x}{a2-a1} \quad -a2 < x < -a1$	$\mu(x)=\frac{a-x}{a} \quad -a < x < a$
$\mu(x)=0 \quad a < x < \infty$		$\mu(x)=1 \quad -a2 < x < a1$	$\mu(x)=0 \quad a < x < \infty$
		$\mu(x)=\frac{a2-x}{a2-a1} \quad a1 < x < a2$	

2.3.2.3. Bulanık Kümelerde İşlemler

Klasik kümelerdeki birçok işleme bulanık kümelerde de rastlamak mümkündür.

Bu bölümde yaygın olarak kullanılan bulanık küme işlemleri ele alınacaktır. ‘U’ evrensel küme olsun ve A, B bu evrensel küme içerisinde iki alt küme olsun.

$$A(x) : U \rightarrow [0,1] \quad \forall x \in A \subset U$$

A’nın ayırık evrende gösterimi aşağıdaki şekildedir.

$$A = \mu_1/x_1 + \mu_2/x_2 + \mu_3/x_3 + \dots + \mu_n/x_n \quad (2.9)$$

Burada μ_i terimi x_i inci terimin üyelik derecesini ‘+’ birleşim işlemini göstermektedir. Birleşim işlemi yerine(+) toplam sembolü kullanılırsa.

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_i}{x_i} \quad (2.10)$$

Sürekli evrende A kümesi, integral sembolü kullanılarak gösterilir:

$$A = \int_i^n \mu/x \, dx \quad (2.11)$$

Boş Bulanık Küme:

A’nın tüm değerlerinin üyelik dereceleri sıfıra eşit ise A’ya boş bulanık küme denir.

$$\forall x \in U, \mu_A(x)=0 \text{ ise } A = \emptyset \quad (2.12)$$

Birleşim($A \cup B$):

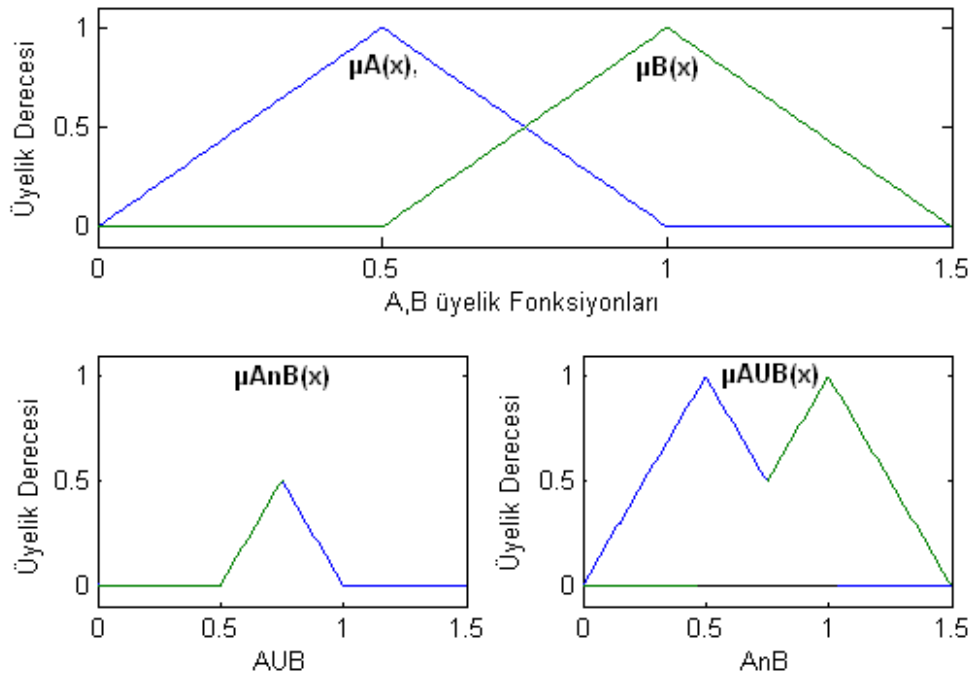
$$\forall x \in U \text{ için, } \mu_{A \cup B}(x) = \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (2.13)$$

Olarak yazılabilir.

Kesişim($A \cap B$):

$$\forall x \in U \text{ için, } \mu_{A \cap B}(x) = \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\} \quad (2.14)$$

Şekil 2.9. da bir örnek üzerinde kesişim ve birleşim işlemlerinin gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.9. Bulanık kümelerde birleşim ve kesişim işlemi

Tümlleme:

$$\forall x \in U \text{ için, } \mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (2.15)$$

Alt Küme:

$$\forall x \in U \text{ için, } B \subset A \Leftrightarrow \mu_B(x) \leq \mu_A(x) \quad (2.16)$$

Eşit Bulanık Kümeler:

Bir bulanık küme α -cut sayesinde karakterize edilebilir.

$$\text{Kuvvetli } \alpha\text{-cut } A_\alpha = \{x \mid \mu_A(x) > \alpha\}; \alpha \in [0,1] \quad (2.17)$$

$$\text{Zayıf } \alpha\text{-cut } A_\alpha = \{x \mid \mu_A(x) \geq \alpha\}; \alpha \in [0,1] \quad (2.18)$$

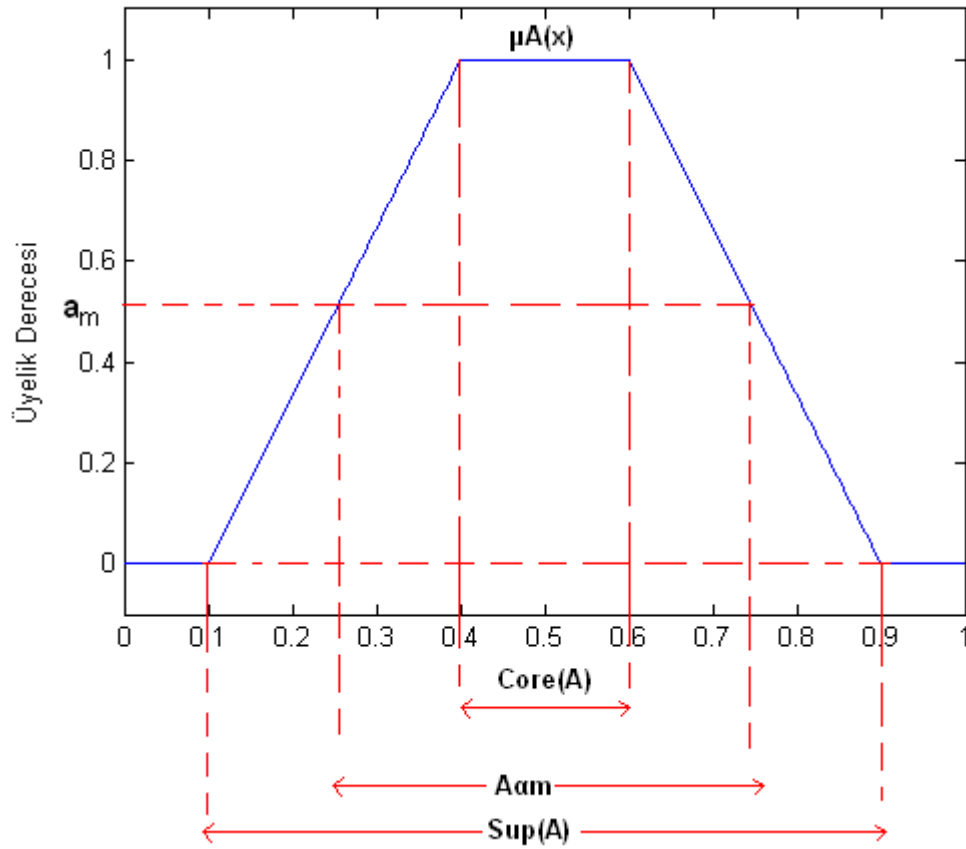
α -cut belirlenen α değerinden büyük yada büyük eşit değere sahip üyelik fonksiyonlu bulanık kümelerin tüm elemanlarını içeren keskin bir kümedir.

Support(A):

$$\text{Sup}(A), \mu_A(x) \geq 0 \text{ şartını sağlayan tüm keskin değerlerdir.} \quad (2.19)$$

Core(A):

$$\mu_A(x)=1 \text{ Şartını sağlayan tüm değerler } A \text{'nın çekirdeğini oluşturur.} \quad (2.20)$$



Şekil 2.10. Fuzzy kümelerde sup, core ve α -cut

2.3.2.4. Bulanık Mantık Denetleyici

Bulanık mantık ve bulanık küme kavramları ortaya atıldıktan sonra bulanık mantıkta iki temel model denetleyici olarak önerilmiştir. Bunların ilki Mamdani modeli, ikincisi ise Sugeno modelidir.

Mamdani bulanık denetleyici operatörlerden elde edilen deneyimler üzerine kurulmuştur. İlk defa buhar motoru ve kazan uygulamalarının kontrolünde sözel kurallarla denenmiştir. İnsan deneyimi mantıksal kurallar dizisine dönüştürülür. Uygun bulanıklaştırma ve durulaştırma ile birlikte bulanık mantık kurallarından gerçek kontrol değerlerini üretmek üzere kullanılır.

Genel gösterimi;

Eğer $x=A$ ve $y=B$ ise o halde z olmalıdır, şeklindedir.

Diğer model, Takagi, Sugeno ve Kang tarafından önerilmiştir. TSK modeli olarak da bilinip verilen giriş ve çıkışlardan bulanık kuralların geliştirilmesine yardım eder.

Genel gösterimi aşağıdadır.

Eğer $x=A$ ve $y=B$ ise o halde $z=f(x,y)$ olmalıdır.

Burada A ve B bulanık kümeler olup z ise kesin değer fonksiyonudur. x ve y giriş değişkenleri için $f(x,y)$ polinom şeklini alır. $f(x,y)$ fonksiyonu kuralda belirtilen bulanık bölgelerle birlikte model çıkışını haritalayacak herhangi bir fonksiyon olabilir. Eğer $f(x,y)$ birinci dereceden polinom ise sonuçta oluşan bulanık çıkarım sistemi birinci derece Sugeno bulanık modeli olarak isimlendirilir. Eğer f sabit ise sıfırıncı derece Sugeno bulanık model olarak adlandırılır.

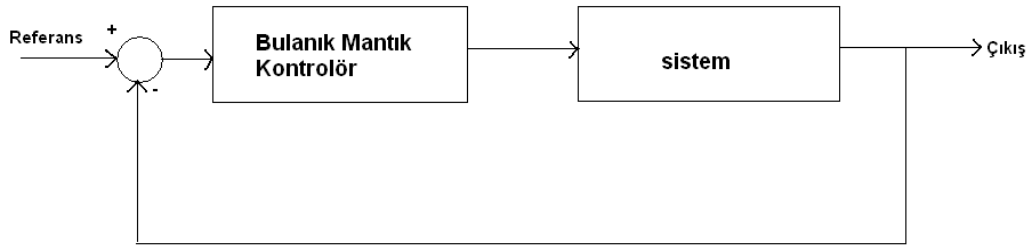
Buradaki çalışmalarda Mamdani tip bulanık denetleyici üzerinde durulacaktır. Bulanık mantık denetleyici, diğer denetleyicilerden farklı olarak, bir uzmanın önermelerle sistemi kontrol etmesine benzer. Burada belirtilen önermeler en genel haliyle;

Eğer(öncül) Öyleyse (artçıl)

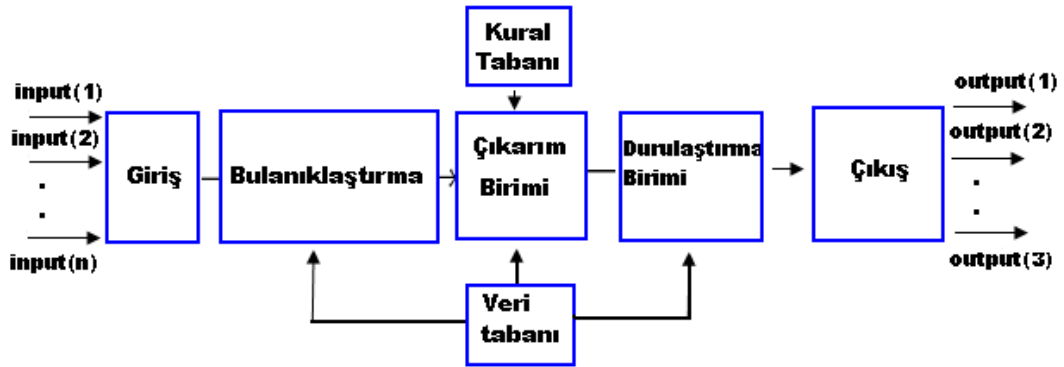
veya bilgisayar programlama dillerinde yaygın kullanımıyla

IF(antecedent) THEN (consequent)....

şeklindedir.



Şekil 2.11 Basit bir Bulanık Mantık Denetleyici



Şekil 2.12 Genel haliyle Bulanık Mantık Denetleyici

Genel haliyle Bulanık mantık denetleyicisi Şekil 2.11-12 de gösterilmiş olup, sistemi oluşturan birimler aşağıda ayrıntılı olarak incelenecektir.

Bulanıklaştırma birimi:

Bulanıklaştırma modülü girişteki kesin değerleri(hata ve hatanın değişimi gibi) sözel değişkenlere çevirir.

Bunu veri tabanındaki üyelik fonksiyonlarından faydalanarak yapar ve kesin değer in ait olduğu bulanık kümeleri ve bu kümelerdeki üyelik derecelerini belirler.

Bilgi Tabanı:

Bilgi tabanı iki kısımdan oluşur. Birincisi; bulanıklaştırma, karar verme ve durulaştırma birimlerine ait üyelik fonksiyonu için gerekli bilgileri sağlayan veri tabanı, ikincisi; çıkarım yapmak için gerekli önermeler topluluğunun bulunduğu kural tabanıdır (Bu kurallar aynı sistemden elde edilen deneyimler, yapay sinir ağları, genetik algoritmalar ve sezgi yoluyla elde edilebilir).

Durulayıcı birimi:

Çıkarım mekanizması sonucu elde edilen sonuç dilsel terimler içeren bulanık bir kümedir, bunun sistemin ihtiyaç duyduğu kesin değerlere dönüştürülmesi gereklidir. Bunun için birçok yöntem vardır fakat bunlardan en yaygın kullanılanı ağırlık merkezi metodudur.

$$Z = \frac{\sum_{n=1}^q w_n u_n}{\sum_{n=1}^q w_n} \quad (2.21)$$

$u_n = n$. İma edilen kümenin merkezi

w_n =Kümenin yüksekliği(n.çıkarımın kesinlik derecesi ile belirlenir)

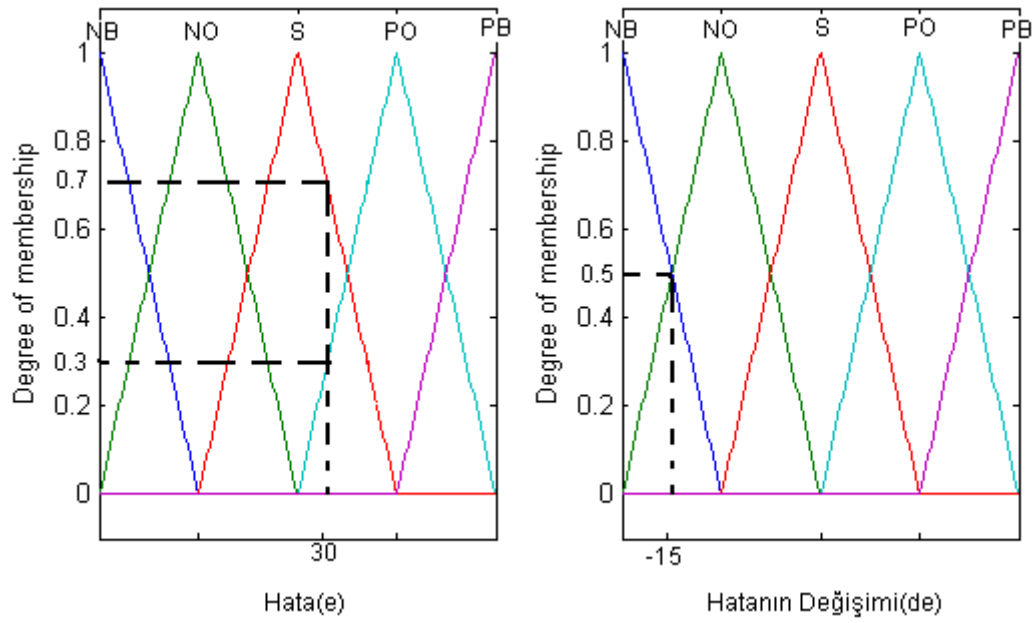
Çıkarım sonucu oluşan dilsel niceleyicinin kesinlik derecesi $\mu_{ij} = \mu_i * \mu_j$

Tüm bu yapılanlar bir örnek üzerinde kısaca açıklanmaya çalışılırsa.

Bulanık kontrole hata(e) ve hatanın değişimi(de) şeklinde iki kesin(crisp) değer gelsin. Bunlar ilk önce veri tabanı yardımı ile dilsel niceliklere çevrilir başka bir deyişle bulanıklaştırılır ve her birinin ait olduğu bulanık kümeler ve kümelerdeki üyelik dereceleri belirlenir.(denetleyiciye gelen hatanın 30, hatanın değişiminin -15 olduğu varsayılın).

N: Negatif P: Pozitif B: Büyük O: Orta S: Sıfır K: Küçük;

Kodlamaları gösterebiliriz ve NB, NO, NK S, PK, PO, PB ise üyelik fonksiyonlarının dilsel niceleyicileri olsun. Hata ve hatanın değişimi için üçgen üyelik fonksiyonları seçilsin.



Şekil 2.13. Örnek için hata ve hatanın değişimini gösteren üyelik fonksiyonları

$e=0.3$ üyelik derecesi ile pozitif orta ve 0.7 üyelik derecesi ile küçüktür(PO, S)

Yine; $de=0.5$ üyelik derecesi ile negatif büyük ve negatif ortadır.(NB, NO)

Hata ve hatanın değişimi iki ayrı bulanık kümede üyelik derecesine sahip, bu tek de olabilirirdi birden fazlada.

Kural tabanı yardımı ile bir çıkarım yapılmalıdır.

Kural tabanı da aşağıdaki gibi olsun.

Tablo 2.4. Örnek için kural tablosu

<i>e/de</i>	<i>NB</i>	<i>NO</i>	<i>S</i>	<i>PO</i>	<i>PB</i>
<i>NB</i>	NB	NB	NO	NK	S
<i>NO</i>	NB	NO	NK	S	PK
<i>S</i>	NO	NK	S	PK	PO
<i>PO</i>	NK	S	PK	PO	PB
<i>PB</i>	S	PK	PO	PB	PB

Tablo; “Eğer hata PO ve hatanın değişimi NB ise kontrol çıkışı NK dır” şeklinde okunur.

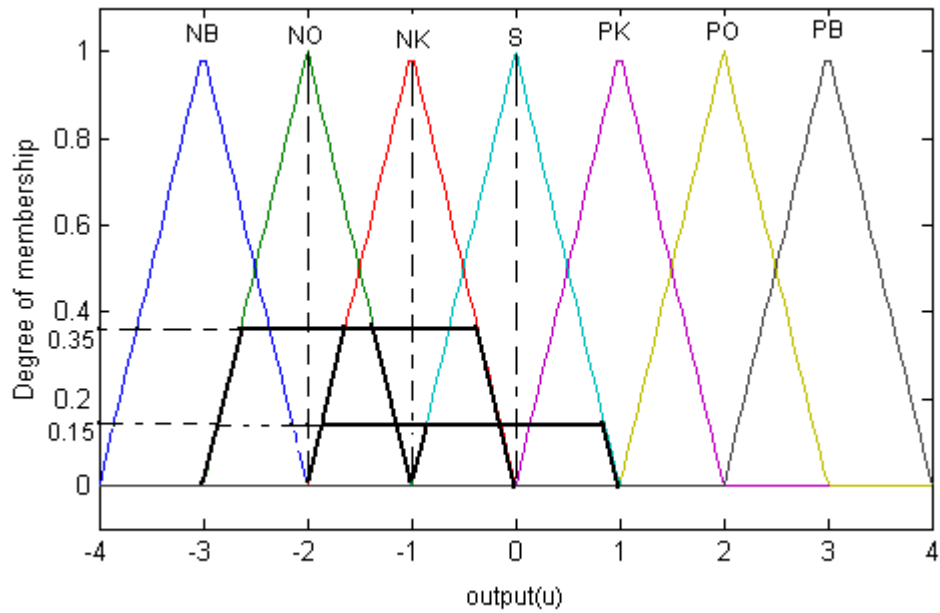
Kural Tablosuna bakıldığında çıkış(u) için 4 farklı etiketle karşılaşılacaktır (NO, NK, S,NK) şimdi çıkış değişeni hangisi olacak?

Bunun için önce her bir bulanık çıkış değeri için kesinlik değerleri hesaplanır.

Tablo 2.5. Örnek için çıkış değişkeni kesinlik değerleri

e/de	$NB(\mu = 0.5)$	$NO(\mu = 0.5)$
$S(\mu = 0.7)$	0.35(NO)	0.35(NK)
$PO(\mu = 0.3)$	0.15(NK)	0.15(S)

Artık sıra durulaştırma işleminde, merkezlerin ağırlıklı ortalaması metodu ile u sinyali için bir kesin değer bulunur.



Şekil 2.14. Çıkış sinyali(u) için üyelik fonksiyonu

Denklem 2.21 kullanılarak çıkış için keskin bir değer elde edilir.

$$u = \frac{\sum_{n=1}^q w_n u_n}{\sum_{n=1}^q w_n} \quad u = \frac{0.35*(-2)+0.35*(-1)+0.15*(-1)+0.15*0}{0.35+0.35+0.15+0.15} = -1.2$$

Geleneksel kontrol metodolojisinin uygulanmasında büyük güçlük çekilebilen durumlarda bulanık kontrol başarılı olabilmektedir. Örnek olarak; endüstriyel bir sistemin denetimi için bir modele ihtiyacımız olabilir fakat model çıkarmak mümkün olmayabilir veya elimizdeki model yeterli olmayabilir veya model parametreleri zamanla değişebilir (çalışılan konuya atfen, konsantrasyonlar, debiler, hacim, çalışma noktası v.s), veya da modelimiz yüksek derecede nonlinear olabilir, sinyallerde zayıflama gürültü bozulma olabilir.

Yukarda sayılan durumlar nazara alındığında bulanık mantık denetleyiciler sensor verilerinin zayıflamasına ve bozunumuna karşı daha kuvvetlidir ve sistem parametrelerinin değişmesine karşı tekrar dizayn etmeyi gerektirmezler, model değil uzman bilgisi kullanırlar, dolayısıyla modelden doğabilecek hataları elimine etmiş olurlar. Bulanık mantığın en iyi uygulama alanları doğrusal olmayan (non-linear) sistemlerdir, dolayısıyla belli başlı nokta civarlarında doğrusallaştırma yapılarak çalışılmayı gerektirmezler, yani sistemdeki nonlinearlik bir dezavantaj olmaktan çıkar.

Bulanık kontrolün zayıf yanları ise şu şekilde sıralanabilir:

- Bulanık kurallarının ve üyelik fonksiyonlarının belirlenmesi zaman alıcı ve zordur. Bunun için uzman kişilere ihtiyaç duyulabilir. Bu ihtiyacı kaldırmak amacıyla adaptif sistemler, algoritmalar geliştirilmektedir.
- Bulanık parametrelerinin belirlenmesinde halen tam oturmuş kesin kurallar yoktur. Bu amaçla değişik algoritmalar teklif edilmektedir.
- Yazılan kurallar ile sistemin bir kararlılık analizi yapılamaz. Sistemin nasıl cevap vereceği önceden kestirilemez.

2.4. pH Kontrolü

pH kontrolü; kimyasal, biyolojik, elektrokimyasal reaksiyonlar, koagülasyon, atık su arıtımı, çöktürme gibi işlemlerinin konu olduğu çeşitli tesislerin başarılı

olarak işletilmesinde önemli bir rol oynar. pH kontrolü; dönüm (ekivalent) noktası civarında çalışıldığı zaman nonlinearliğin yüksek olması, proseste zamanla değişen özelliklerin olması, küçük gürültülere karşı hassasiyetin yüksek olması gibi nedenlerle oldukça güç bir işlemdir. Bununda ötesinde, pH kontrolünün önemli olduğu işletmeler genellikle birden fazla ürünle çalışırlar, bu nedenle farklı pH aralıklarında çalışmak söz konusu olabilir. Kontrol sisteminin işletmeyi sadece bu değişik noktalarda düzenlemesi yetmez aynı zamanda ileri bir kontrol algoritmasının gerekli olduğu geçiş bölgelerinde de kontrol etmesi gereklidir.

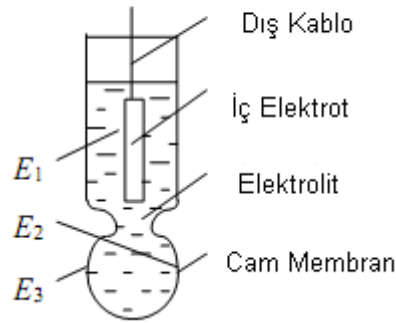
2.4.1. pH Elektrodu

1906 yılında Cremer bazı camların batırıldıkları sıvının asitliğine bağlı olarak bir elektriksel gerilim oluşturduklarını keşfetmiştir. pH ölçümü için geliştirilen ilk cam elektrot molce % 72.2 SiO₂, % 6.4 CaO, ve % 21.4 Na₂O içeren “corning” adlı camdan üretilmiş olup 0-9 aralığındaki pH ölçümleri için kullanılmıştır. Daha sonra, LiO₂, Cs₂O, BaO ve La₂O₃ gibi komponentlerin cam terkebine ilavesi ile daha bazik çözeltilerin de pH’ları ölçülmeye başlanmıştır. pH duyarlı cam membran kalınlığı genellikle 50-200 µm fakat agresif çözeltilerde kullanılacaksa kalınlığı 1mm olabilmektedir.

Bir cam elektrot düzensiz SiO₂ yapıları ve diğer materyalleri içeren aşırı soğutulmuş bir elektrolit olarak düşünülebilir. Cam elektrot çözeltiliye daldırıldığında çözeltideki H⁺ iyonları vasıtasıyla cam membran üzerinde “jel tabaka reaksiyonu” meydana gelmektedir. Bir iki gün beklenilmesi halinde (elektrot dengeye geldiğinde) jel tabakanın kalınlığı 10-100 nanometre arasında bir değere ulaşmaktadır. Bu değer camın kompozisyonu, daldırılan çözeltilinin sıcaklığı gibi birçok faktöre bağlıdır. Jel tabakanın oluşumu ile ilgili olarak literatürde çok sayıda teori geliştirilmiştir.

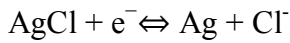
Pratikte pH ölçümü, cam elektrot ile bir referans elektrottan oluşan bir pilin emf (elektromotor kuvveti) değerinin ölçülmesine dayanır. Günümüzde bu iki elektrot tek bir birimde (kombine elektrot) birleştirilmiş halde kullanılabilir. Bakımının kolay olması, miktarı az olan çözeltilerin pH’ını ölçebilmesi bu elektrodun önemli bir avantajı olarak sayılabilir.

Ölçüm elektrodun iç yapısı:

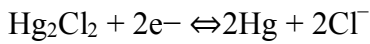


Şekil 2.15. Ölçüm elektrodu (measurement pH electrode) [Ylén,2001)].

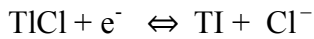
Elektrodun içi Cl^- içeren tampon(buffer) çözeltisi ile doludur ve genellikle pH'ı 7 dir. İç elektrot ise tuzun anyonunu içerir. Tipik bir iç elektrodu Ag-AgCl elektrodu olup elektrot reaksiyonu



şeklinde dir. Yaygın kullanılan bir başka iç elektrot ise kalomel elektrottur:



Ag-AgCl-elektrot 100°C sıcaklığa kadar kalomel elektrot 80°C sıcaklığa kadar kullanılabilir. Daha yüksek sıcaklıklar için Tl-TlCl-elektrodu kullanılır($135\text{-}150^\circ\text{C}$).



Şekil 2.15 de görüleceği üzere üç ayrı yerde potansiyel farkı oluşmaktadır:

E_1 ; iç elektrot ile elektrolit arasında sabit potansiyel fark

E_2 ; cam elektrodun iç yüzeyi ile elektrolit arasında.

$$E_2 = E_0 + (RT / F) \ln\{\text{H}_3\text{O}^+\}_{\text{iç}} \quad (2.22)$$

Elektrodun içerisindeki elektrolit, tampon çözelti olduğu için E_2 potansiyel farkı sabittir.

E_3 ; cam elektrodun dış yüzeyi ile daldırılan çözelti arasında, pH değerinin fonksiyonudur

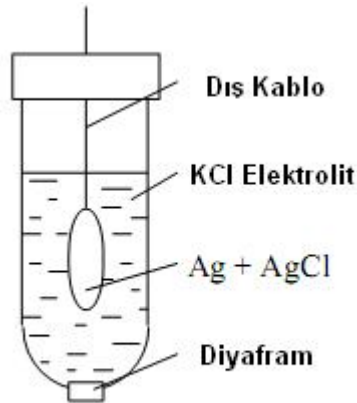
$$E_3 = E_0 + (RT / F) \ln\{\text{H}_3\text{O}^+\}_{\text{dış}} \quad (2.23)$$

E_0 sabit sıcaklıktaki standart potansiyel faktır.

pH değerin belirlenmesi için ölçülen değerin kıyaslandığı birde referans elektroda ihtiyaç vardır. Yaygın kullanılan bir referans elektrot Ag-AgCl elektrodudur.

Ag-AgCl Referans Elektrot:

Bu elektrot ismini iç elektrottan alır. Ölçme elektrodu ile aynı yapıdadır. KCl çözeltisine daldırılmış AgCl kaplı Ag den oluşur.



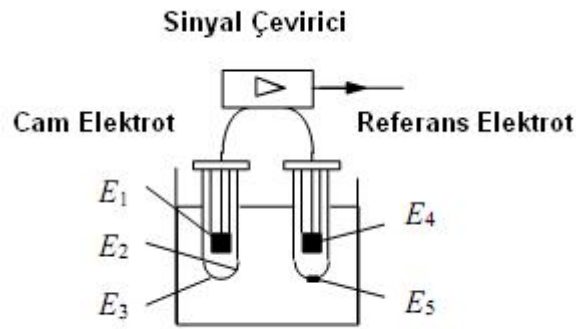
Şekil 2.16 Ag-AgCl Referans Elektrot[Ylén,2001)].

Referans elektrottaki diyafram vasıtası ile galvanik kontak sağlanır. Diyafram seramik, teflon veya farklı fiber çeşitlerinden üretilir. KCl çözeltisi bu diyaframdan tükenmeyecek tarzda yavaşça akar.

İç basıncın sürekli olarak proses sıvısının bulunduğu dış basınçtan fazla olması gerek aksi taktirde ters bir akış meydana gelip elektrot zehirlenmesi olabilir.

Kombine Elektrot:

İki ayrı elektrot yerine(ölçüm ve referans elektrot) tek bir birimden oluşan kombine elektrotlar sisteminde;



Şekil 2.17. Kombine Elektrot[Ylén,2001)].

$$E_S = E_1 - E_2 + E_3 - E_4 - E_5 \quad (2.24)$$

E_S burada toplam pil potansiyelidir, E_5 in çok küçük olmasından ve çoğu durumda $E_1 = E_4$ olmasından dolayı $E_S = E_3 - E_2$ olacaktır.

Asit ve Baz Hataları:

Kuvvetli bazik sıvılardaki pH hatası “bazik hata” veya “sodyum hatası” olarak anılır. Bazik çözeltilerde pH 9 un üzerinde Na^+ , Li^+ v.s gibi tek değerli katyonlar pH değerini düşürecek şekilde elektrot potansiyeline etkisi vardır, bu hata sıcaklığın etkisi ile daha da artar. Günümüzde, kuvvetli baz çözeltileri için daha uygun, küçük baz hatası veren özel elektrotlar geliştirilmiştir.

Kuvvetli asit çözeltilerinde çıkış voltajı tamamen Nerst kanununa uymaz. Deneysel testler, elektrot yüzeyindeki gel tabakasının asit moleküllerini absorpladığını ve sonuç olarak hidrojen iyon konsantrasyonunun arttığını göstermiştir. Bu hata çok düşük pH değerlerinde anlamlı olup baz hatasına nazaran küçüktür ve sıcaklığa da çok fazla bağlı değildir.

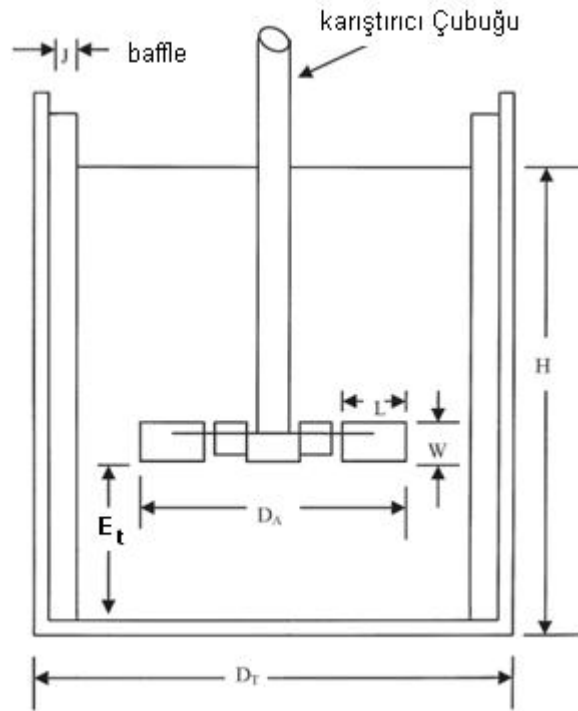
2.4.2. Nötralleştirme Reaktörü

Endüstride birçok alanda karıştırmalı tank reaktörler kullanılmaktadır. Özellikle şiddetli karıştırmanın gerekli olduğu sıvı reaksiyonlar için tercih sebebidir. Bu reaktörlerde, sıcaklık kontrolünün nispeten kolay oluşu “sıcak noktaların(hot

spot)) meydana gelmesine engel teşkil eder. Basit ve kullanışlı yapısının olması temizliğinin ve bakımının kolay olması gibi özellikler bu rektörlerin avantajları arasında sayılabilir.

Yine endüstride birçok operasyon etkili bir karıştırmaya bağlıdır yani birçok fiziksel ve kimyasal olayın temelinde karıştırma vardır. Kimyasal reaksiyonların gerçekleştiği “sürekli karıştırmalı tank rektör” tasarımı yapılırken başlangıçta iyi bir karışmanın olduğu varsayımı yapılır, yani çok iyi ve anlık bir karıştırma ile bütün moleküller birbirlerini etkilemeyecek şekilde serbestçe hareket edebildiği kabul edilir. Pratikte böyle bir karışmanın sağlanabilmesi için belli bir zamana ihtiyaç vardır; rektördeki ortalama hidrolik kalma zamanı (holding time) karışma zamanından (mixing time) büyük olması gerekir, aksi takdirde iyi bir karışım olmadan moleküller rektörü terk edecek ve rektör homojenliğini yitirecektir.

Rektör Boyutlandırma:



Şekil 2.18. İdeal Rektör Boyutlandırılması[Coker,2001].

D_A ; Karıştırıcı çapı

D_T ; Tank çapı

J ; Engel levhası (dalgakıran) (Baffle) kalınlığı

L ; Karıştırıcı kanat uzunluğu

H ; Sıvı yüksekliği

E ; karıştırıcının tank tabanından olan yüksekliği

W ; karıştırıcı kanat genişliği

Homojenliği sağlamak amacıyla iyi bir karıştırma için değişik tipte, farklı geometrik şekil ve boyutta karıştırıcılar mevcuttur. Karıştırıcıda 4 ila 16 arasında değişen kanat sayıları kullanılabilir. Standart tasarım için aşağıdaki oranlar tercih edilir:

$$\frac{D_A}{D_t} = \frac{1}{3} \quad \frac{H}{D_t} = 1 \quad \frac{J}{D_t} = \frac{1}{12} \quad \frac{E}{D_A} = 1 \quad \frac{W}{D_A} = \frac{1}{5} \quad \frac{L}{D_A} = \frac{1}{4} \quad (2.25)$$

2.4.3. Veri Toplama İşlemi

Veri toplama(Data acquisition) işlemi, test, ölçüm ve kontrolün ilk aşamasıdır. Sıcaklık, basınç, kuvvet, ivme, gerilme gibi gerçek hayattan fiziksel büyüklüklerin ölçülmesi ve incelenmesi için öncelikle bu analog işaretler sayısallaştırılmaktadır. (analog to digital conversion - ADC). Bu işlem günümüzde en kolay, etkin ve esnek şekilde bilgisayar ortamında yapılmaktadır.

Veri toplama işlemi basit olarak şu aşamalardan oluşur: Algılayıcılar ve dönüştürücüler fiziksel bir büyüklüğü elektrik sinyaline çevirir, bu elektrik sinyali ya doğrudan ya da çeşitli sinyal koşullama ünitelerinden geçtikten sonra veri toplama sistemine gelir (data acquisition board), analog sinyaller burada dinamik yapılarına uygun bir hızda (sampling rate) ve çözünürlükte (resolution bit rate) örneklendikten sonra bilgisayar ortamında gerçek zamanda işlenir ve saklanır. Veri toplama donanımları, birlikte çalıştıkları bilgisayarın işletim sistemine ve veri toplamanın yönetildiği uygulama yazılımına sürücü yazılımları ile tanıtılırlar. Test, ölçüm ve otomasyon uygulamaları birbirinde çok farklı yapılarda olabilir. Bazı uygulamalarda tüm sinyallerin aynı anda toplanması (eşzamanlı veri toplama)(Simultaneous Data Acquisition) gerekirken bazılarında sinyal kaynakları birbirinden çok farklı

noktalarda sahaya yayılmış olabilir (dağıtılmış veri toplama sistemleri). Çok işlevli kartların (Multifunction Data Acquisition) kullanılmasını gerektiren pek çok uygulamada ise farklı tipte analog ve dijital sinyaller toplanırken, kontrol amaçlı çıkış sinyallerinin üretilmesi gerekmektedir.

2.4.4. Kaynak Taraması

pH kontrolü üzerinde son yıllarda yapılan bazı önemli araştırmalar aşağıda özetlenmiştir:

Yeo ve Kwon(1999); pH nötralizasyon prosesini kontrol etmek için, olayın çekirdeğinde bulunan yapay sinir ağını set noktası, pid çıkış sinyali, prosten elde edilen pH değeri gibi girdi değişkenleri ile eğiten sonuç olarak pid katsayılarını çıkış olarak veren bir yapay sinir ağı geliştirdi. Sonuçta Sistemde kazanç sabitlerinin neural network tarafından sürekli güncellendiği PID kontrolör tasarlamış oldular. Yeo ve Kwon çalışmalarının başında sadece yapay sinir ağının kullanıldığı kontrolörlerden de bahsediyor fakat ağın yeteri kadar eğitilememesi durumunda bundan iyi bir performans alınamayacağı, böyle bir kontrolü giriş ve çıkış arasında birebir ilişkinin olduğu durumlarda kullanılmasının uygun olacağından bahsediyorlar.

Sonuç olarak kendi çalışmaları içinde bu durumun bir nebze söz konusu olduğundan aksine fazla öğrenme gerçekleştirildiğinde kazanç sabitlerinin kademeli olarak değiştiğinden bunun da performansa etki ettiğinden, optimum öğrenme periyodunun hala kendileri tarafından çalışıldığından bahsetmişlerdir.

Babuska ve ark.(2002); Çalışmalarında pH kontrolünü küçük çaplı bir laboratuvar fermentasyon prosesinde gerçekleştirdiler. Çalışmalarında geleneksel PI kontrolün böyle bir sistemi kontrol etmesinin güçlüğünden ve yetersizliğinden bahsetmişlerdir. Bunun nedenini ise asit ve baz ilavelerine pH yanıtının son derece nonlineer olmasını, zamanla değişen özelliklerin olmasını, çeşitli şartlarda çalışılmasını (değişen reaktör hacimleri v.s) örnek vererek belirtmişlerdir. Babuska ve ark. dolayısıyla Geleneksel PI kontrolör yerine PI katsayılarının bulanık çıkarım mekanizması ile sürekli güncellendiği yeni bir kontrolör tasarladılar.

Önerilen bu denetleyicide Öz Ayarlı Bulanık(Fuzzy self tuning) mekanizması iki modülden oluşmaktadır. Birinci modül bulanık çıkarım modülüdür ve bu modüle hata ve hatanın değişimi girmekte h parametresi çıkmaktadır. İkincisi güncelleme(update) modülü olmak üzere h parametresini kullanarak kazanç sabitlerinin güncellenmesi sağlanmaktadır. Sonuçta bu çalışmalarında istenen pH değerini iyi bir hassasiyetle elde etmeyi başarmışlardır.

Fuente ve ark.(2006); Çalışmalarında pH nötralizasyon prosesi için yeni bir bulanık denetleyici kullandılar. Kontrol edilecek değişkenin yüksek derece non-lineer olmasından dolayı bu proses için kullanılan PI tip Bulanık denetleyicinin sistemi yeteri derecede kontrol edemeyeceği ekivalent noktada salınımlara yol açacağını belirtmişlerdir. Bu sorunu gidermek için pH nötralizasyon prosesini birkaç bulanık bölgeye ayırmış ve çok bölgeli bulanık(multiregional Fuzzy) denetleyiciye hata ve hatanın değişimine ilaveten yardımcı değişken adı verdiği, prosesin hangi bölgede işlem gördüğü bilgisini veren bir değişkeni de sisteme girdi olarak verdiler. Bu sayede prosesin daha iyi bir performans sergilemesi sağladılar. Sonuç olarak Fuente ve ark. sistemin iyi bir performans sergilediğini simülasyonlar ve deneysel olarak gösterdiler. Bu yönteminde diğer bulanık denetleyicilerde olduğu gibi ayarlanacak parametrelerin sayısı ve belirlenmesi (üyelik fonk. ve fuzzy kurallar)ana zorluklarını oluşturmaktadır.

Fuente ve ark.(2005); Yine başka bir çalışmalarında PI tip bulanık denetleyicinin ve özellikle çok bölgeli bulanık denetleyicinin dezavantajlarından bahsetmekte iyi bir performans sağlamak için çok fazla kural ortaya çıktığını belirtmektedirler. Bu nedenle kontrol sağlamak için hem bulanık modülü hem de neural modülü paralel kullanılmışlardır.

Kontrol çıkışındaki değişim;

$\Delta U = \Delta U_f = (1 + ks)$ olacak şekilde bir bağıntı ile U çıkış sinyali elde edilmektedir.

ΔU_f bulanık modülü tarafından elde edilen kontrol çıkışındaki değişim olup, ks de yapay sinir hücresi tarafından hesaplanmaktadır.

Sonuçta gürültü ve bozuculara rağmen iyi bir kontrolör tasarlandığı deneysel olarak gösterilmiştir

Sperka ve ark.(2005); Makalelerinde yeni bir strateji uygulamış, buna da ters neurol işletme modeli adını vermişlerdir. Bulanık modülü ve neural modül burada da paralel yürütülmektedir. Bulanık modül tarafından ayarlanan integrasyon terimi neural kontrolörün performansını artırmak için birleştirilmiştir. Yine integrasyon terimini ayarlamak için 4 bulanık kural kullanılmıştır. Sonuç olarak geleneksel neural yaklaşımlarla kıyaslandığında iyi bir performans elde edildiği gösterilmiştir.

Peng ve Chen (1999); Çalışmalarında, dinamik sistemler, doğrusal olmayan sistemler ve kimyasal işlemlerin direk adaptif kontrolü için akıllı bir kontrol sistem geliştirdiler. Dört katmanlı eşdeğer bağlayıcı ağı ile bir sinirsel bulanık kontrolör oluşturdular.

Bu çalışmalara ek olarak ;

Golob ve Tovornik(2000), çalışmalarında PID kontrol temelli bulanık mantık kontrolör tasarladılar. PI, PD ve PID bulanık denetleyicileri birbirleri ile değişik alternatiflerle birleştirdiler.(örn:Fuzzy I + Fuzzy PD,Fuzzy PD+fuzzy PI).

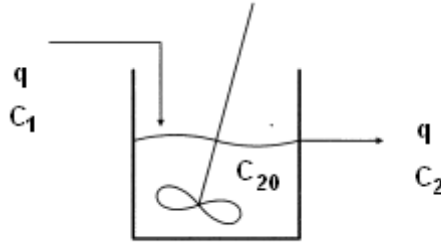
Bu şekilde az sayıdaki bulanık kurallarla daha iyi bir performans elde etmeye çalışmışlardır.

3. MATEMATİK MODELLEME

Kontrolü yapılacak sistemin modeli kurulmadan önce basit sistemlerin modeli kurulmuştur. Bunun için ilk önce reaksiyonun olmadığı sadece karışmanın olduğu sistem ele alındı.

3.1. Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktör Dinamik Modeli

Sürekli karıştırmalı Tank Reaktörde(SKTR) başlangıçta belli konsantrasyon da (C_{20}) çözelti varken belli (C_1) konsantrasyondaki başka bir çözelti sabit debide reaktöre beslenmeye başlanırsa reaktör çıkış akımı konsantrasyonunun zamana bağlı değişimi aşağıdaki bağıntılardan elde edilebilir.



Şekil 3.1. Sürekli Karıştırılmalı Tank Reaktör

$$v \frac{dc_2}{dt} = q * (C_1 - C_2) \quad (3.1)$$

Bu denklem integre edilir ve başlangıç koşulu olarak $C_2(0)=C_{20}$ yazılırsa aşağıdaki denklem elde edilir.

$$C_2 = C_1 - (C_1 - C_{20}) * e^{-t/\tau} \quad (3.2)$$

Burada $\tau = v/q$ τ burda hidrolik kalış süresi olmak üzere Denklem 3.2 her hangi bir 't' anındaki çıkış konsantrasyonunu verir.

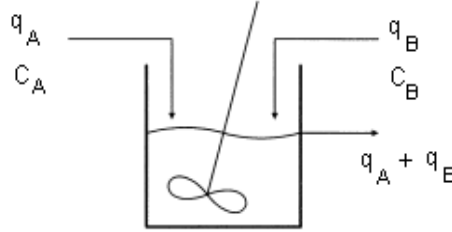
3.2. Reaksiyonlu SKTR Modeli:

3.2.1. Kuvvetli Asit -Kuvvetli Baz Modeli:

Burada, nötralizasyonun meydana geldiği reaksiyon sistemleri incelendi. İlk olarak kuvvetli bir asit ile kuvvetli bazın reaksiyon verdiği sistem ele alındı (baz olarak sodyum hidroksit, asit olarak da klor asidi seçilmiştir).

Aşağıdaki sistem incelensin; reaktör başlangıçta, pH'ı belli bir çözelti ile doludur ($[Na_0^+]$ ve $[Cl_0^-]$ bellidir). Tam bu noktadan itibaren konsantrasyonu C_a debisi q_a olan asit çözeltisi ile konsantrasyonu C_b , debisi q_b olan baz çözeltisi reaktöre beslenmeye başlanıyor, çıkış debisi girişteki toplam debiye eşit alınarak sabit bir hidrolik kalma süresi(τ) sağlanıyor. Sistem bir geçiş halinden sonra nihayetinde yeni bir denge haline ulaşacaktır.

Sistemin matematiksel modeli aşağıdaki gibi olacaktır.



Şekil 3.2. Reaksiyonlu SKTR sistemi

Nötralizasyon reaksiyonları çok hızlı reaksiyonlar olduğu için hız sabiti kullanmamak yerinde olacaktır. Bunun yerine reaksiyon ortamına iyon dengesi kurulabilir.

$$[Na^+] + [H^+] = [Cl^-] + [OH^-] \quad (3.3)$$

Reaktörde 3.3 koşulu sağlanmak zorundadır.

Na^+ ve Cl^- için iyon balansı kurulursa.

Kuvvetli asit ve baz kullanıldığından, baz beslemesindeki Na^+ konsantrasyonu baz konsantrasyonuna, asit beslemesindeki Cl^- konsantrasyonu ise asit konsantrasyonuna eşit olacaktır.

$$\frac{d[Na^+]}{dt} = qb * \frac{Cb}{v} - \frac{qa+qb}{v} * [Na^+] \quad (3.4)$$

$$\frac{d[Cl^-]}{dt} = qa * \frac{Ca}{v} - \frac{qa+qb}{v} * [Cl^-] \quad (3.5)$$

Bu iki diferansiyel denklem analitik olarak çözülebilir. Bunun için,

$b = qb * \frac{Cb}{v}$ ve $a = qa * \frac{Ca}{v}$ Olarak tanımlanır ve denklemler integre edilirse.

$$[Na^+] = b - \left(b - \frac{Na_0^+}{\tau}\right) * e^{-t/\tau} \quad (3.6)$$

$$[Cl^-] = a - \left(a - \frac{Cl_0^-}{\tau}\right) * e^{-t/\tau} \quad (3.7)$$

olacaktır.

Suyun iyonlaşma reaksiyonu için aşağıdaki bağıntıyı da yazılabilir.

$$[H^+] * [OH^-] = Ksu \quad (3.8)$$

Ve denklem 3.3, yani iyon balansı ifadesi de yazılırsa.

$$[Na^+] + [H^+] = [Cl^-] + [OH^-]$$

Bu son denklemden H^+ artık çekilebilir. 3.3 eşitliği ile 3.8 eşitliği birleştirilir ve yeniden düzenlenirse;

$$\begin{aligned} [H^+] - \frac{Ksu}{[H^+]} &= [Cl^-] - [Na^+] \\ ([H^+])^2 + [H^+]([Na^+] - [Cl^-]) - Ksu &= 0 \end{aligned}$$

$$pH = -\log \left(\sqrt{([Na^+] - [Cl^-])^2 / 4 + Ksu} - ([Na^+] - [Cl^-]) / 2 \right) \quad (3.9)$$

Denklem 3.6, 3.7 ve 3.9 eşitlikleri yardımı ile artık herhangi bir t anı için çıkış akımının pH'ı rahatlıkla hesaplanabilir.

İstenirse bu diferansiyel ve cebirsel denklem takımı simulink ile nümerik olarak da çözülebilir.

3.2.2. Zayıf Asit-Kuvvetli Baz Modeli:

Bu sisteme örnek olarak Sodyum hidroksit (NaOH)-Asetik asit (CH_3COOH) verilirse, denklemler aşağıdaki şekilde olacaktır.

İlk olarak elektronegatifliği sağlayacak olan, iyon dengesi için bir ifade yazılsın.

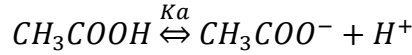
$$[\text{Na}^+] + [\text{H}^+] = [\text{CH}_3\text{COO}^-] + [\text{OH}^-] \quad (3.10)$$

Sırası ile $[\text{Na}^+]$ balansını, $[\text{CH}_3\text{COO}^-]$ balansını ve suyun iyonlaşma denkleminden $[\text{OH}^-]$ için bir ifade elde edilsin.

$$\frac{d[\text{Na}^+]}{dt} = qb * \frac{Cb}{v} - \frac{qa+qb}{v} * [\text{Na}^+] \quad (3.11)$$

$[\text{OH}^-] = K_{su}/[\text{H}^+]$ $K_{su} = 1 * 10^{-14}$ suyun iyonlaşma denkleminin 3.8 eşitliği ile aynı olacaktır.

Asetik asit zayıf bir asit olduğu için tam iyonlaşmayacaktır. Bu yüzden asetat iyonu ($[\text{CH}_3\text{COO}^-]$) konsantrasyonu denge reaksiyonuna bağlı olacaktır.



Asetat iyonu hem asetik asitte bağlı hem de serbest iyon halinde olacaktır.

Toplam asetat iyon konsantrasyonuna $[\text{Xa}]$ dersek.

$$[\text{Xa}] = [\text{CH}_3\text{COOH}] + [\text{CH}_3\text{COO}^-] \quad (3.12)$$

Giriş akımında asetat iyon konsantrasyonu asit konsantrasyonuna eşit olacaktır.

$$\frac{d[\text{Xa}]}{dt} = qa * \frac{Ca}{v} - \frac{qa+qb}{v} * [\text{Xa}] \quad (3.13)$$

Üstteki iki denklemden asetat iyon konsantrasyonunu elde edebilmek için asetik asit konsantrasyonuna da ihtiyaç duyulacaktır, bunun için bir bilgi daha gerekli.

$$Ka = \frac{([CH_3COO^-] * [H^+])}{[CH_3COOH]} \quad Ka = 1.987 * 10^{-5} \left(\frac{mol}{l} \right) \quad (3.14)$$

Denge reaksiyon ifadesinden asetik asit konsantrasyonu çekilebilir.

$$[CH_3COOH] = ([CH_3COO^-] * [H^+]) / Ka$$

Son olarak bu ifade denklem (3.12) de yerine konulup asetat iyon konsantrasyonu çekilirse.

$$[CH_3COO^-] = \frac{[Xa]}{\frac{[H^+]}{Ka} + 1} \quad (3.15)$$

Şimdi (3.10) da hepsi yerine koyulursa

$$[H^+] - \frac{Ka * [Xa]}{Ka + [H^+]} - \frac{Ksu}{[H^+]} + [Na^+] = 0$$

Biraz daha düzenlenirse, aşağıda yazılan denklem (3.16) elde edilir.

$$([H^+])^3 + (Ka + [Na^+])([H^+])^2 + ([Na^+]Ka - Ka * [Xa] - Ksu) * [H^+] - Ka * Ksu$$

Sonuçta 3.dereceden bir bilinmeyenli bir denklem elde edilir, bu denklemi çözüp H^+ elde ettikten sonra eksi logaritması alınarak pH'a çevrilebilir.

3.dereceden Denklem çözümü:

$$X^3 + BX^2 + CX - D$$

$$X = H^+, B = (Ka + [Na^+]), C = ([Na^+]Ka - Ka * [Xa] - Ksu) \quad D = Ka * Ksu$$

X yerine $Y - \frac{B}{3}$ yazarsak denklem $Y^3 + PY^2 + q$ şekline dönüşecektir

$$\text{Burada} \quad p = \frac{1}{3}(3C - B^2) \quad \text{ve} \quad q = \frac{1}{27}(27D - 9BC + 2B^3)$$

Katsayılar reel olduğu sürece en az bir tane reel kök olacaktır. Kökler aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$y1 = A + B \quad y2 = \frac{A + B}{-2} + \frac{(A - B).i\sqrt{3}}{2} \quad ve \quad y3 = \frac{A + B}{-2} - \frac{(A - B).i\sqrt{3}}{2}$$

$$A = \sqrt[3]{\frac{-q}{2} + \sqrt{R}} \quad B = \sqrt[3]{\frac{-q}{2} - \sqrt{R}} \quad R = \left(\frac{p}{3}\right)^3 + \left(\frac{q}{2}\right)^2$$

Asit ve baz debileri sabit olduğu için üstteki iki diferansiyel denklem analitik olarak çözülebilir (Kuvvetli Asit-Baz sistemindeki ile aynı), böylece her hangi bir t anında çıkış pH'ı bulunabilir.

4. DENEY SİSTEMİ



Şekil 4.1. Deney sistemi

Deney sistemi bir adet SKTR, 2 adet peristaltik pompa, 1 adet dijital karıştırıcı, pH elektrodu ve transmitteri ve data acquisition karttan oluşmaktadır.

Simülasyon ve on-line çalışmalar Matlab, Simulink ve Labview’de yazılan programlar yardımı ile gerçekleştirilmiştir. Aşağıda deney sisteminin parçalarını teker teker incelenecektir.

4.1. Reaktör ve Karıştırıcı

Çalışmada, $D_t=9.5$ cm çapında $H=20$ cm yüksekliğinde bir reaktör seçildi reaktör sıvı seviyesi $h=11$ cm olarak belirlendi, 1cm kalınlığında 4 dalga kıran(baffle) kullanıldı.

Yine karıştırıcı olarak türbin tipi 4 kanatlı bir karıştırıcı tasarlandı.

Karıştırıcı için ölçüler:

$D_a=3.2$ cm (Karıştırıcı çapı)

$L=0.8$ cm (Kanat uzunluğu),

$W=0.6$ cm (Kanat genişliği)

Karıştırıcının reaktör tabanından yüksekliği $E=3.2$ cm olarak ayarlandı.



Şekil 4.2. Düz Kanatlı Türbin Karıştırıcı

Reaktör, karıştırıcı ve dalgakıranın yapımında teflon kullanıldı. Teflonun önemli özellikleri; sanayi plastikleri içinde en geniş çalışma sıcaklığı (- 260 ile + 270) sahip oluşu, bütün kimyasal maddelere neme ve ortam şartlarına tam sorunsuz dayanımı, tüm katılar içinde en düşük statik ve dinamik sürtünme katsayısına sahip oluşu, üstün elektriksel izolasyon özelliği, yapışmazlık, yanmama ve bunun gibi özelliklerin yanı sıra mekanik özelliklerin yeterli oluşu ve tüm kimyasal maddelere karşı tam dayanımlı olması sayılabilir.

4.2. Data Toplama Kartı

Deney sisteminde kullanılan daq(data acquisition) kartının özellikleri aşağıdadır.

Analog girişler için:

- Ölçüm tipi: Voltaj
- Kanal Sayısı: 8 SE/4 DI,
- Örnekleme Hızı: 48 kS/s,
- Çözünürlük:14 bit
- Eş zamanlı Örnekleme: Yok,
- Maksimum Voltaj aralığı: -10..10
- Minimum Voltaj aralığı: -1..1 V

Analog Çıkışlar için:

- Kanal Sayısı:2,
- Güncelleme Hızı: 150 kS/s,
- Çözünürlük: 12bit ,
- Maksimum Voltaj aralığı: 0..5
- Minimum Voltaj aralığı: 0..5 V

Dijital I/O

- Kanal Sayısı: 12 DIO
- Maksimum giriş aralığı: 0..5 V
- Maksimum çıkış aralığı: 0..5 V
- Programlanabilir giriş filtresi: Yok

4.3. pH probu ve Transmitter

Sistemde kullanılan pH probunun ve ve transmitterin özellikleri aşağıdadır.

Elektrot özellikleri: (sentix mic 0-14 ,100 °C)

- 1-100 °C çalışma sıcaklığı
- 0-14 pH ölçme aralığı
- 3M KCl Elektrolit, seramik junction, 700(25 °C) mΩ membran direnci.

Transmitter'in teknik özellikleri : (Metler Toledo pH 2050e)

- 2 tane akım çıkışı 0/4...20 mA
- Röle çıkışı 4 adet
- pH-aralığı 0....14
- mV-aralığı -1000.....+1000
- hassasiyet ±0.01 pH
- Sensor girişleri pH veya mV
- Sıcaklık girişi Pt100/Pt1000 / -9.9...125 °C

4.4. Peristaltik Pompa

Pompa teknik özellikleri (heidolph pumpdrive 5201/6)

- Analog(0-10 Volt,0/4-20mA) ve digital RS 232C arayüz hız ayarı, setting, dönme yönü ve başlat durdur
- 4-digitlik elektronik gösterge
- Elektronik hız kontrolü ±0.5% hassasiyet
- Akış hacmi ve akış hızı kalibrasyonu
- Mikroişlemci kontrollü sürücü
- Farklı tüp çapları için kayıtlı akış hızları
- Max hız butonu ile hızlıca tüp doldurup boşaltma.
- Çift yönlü dönme

- Çift pompa kafası takılabilme

PD 5201

- Akış hızı 0.3 - 729 ml/dak
- Açısal hız 5 -120 rpm

PD 5206

- Akış hızı 1.6 - 3,644 ml/dak
- Açısal hız 24 - 600 rpm

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. pH Metre Kalibrasyonu

pH metre alışlagelmiş yöntemlerle, pH'ı 4,7 ve 10 olan standart tampon(baffer) çözeltileri vasıtasıyla kalibre edildi. Asıl kalibrasyon ise dinamik sistem üzerinde, pH bilgisini bilgisayar ortamına almak için yapıldı.

Transmitter pH probundan aldığı mV mertebesindeki sinyali ekranında pH değeri olarak gösterir, bu sinyalin data acquisition vasıtasıyla bilgisayar ortamına alınması gerekir. Transmitter analog çıkış olarak 4-20 mA desteklemektedir. Data acquisition cihazı ise analog input olarak sadece Volt desteklemektedir. Transmitterden alınan 4-20mA'lık (doğrusallaştırılmış) çıkışı 265 ohm'luk bir direnç üzerinden geçirerek 1.06-5.3 V arasında bir gerilim elde edildi. Bu sinyal data acquisition cihazına verildi.

Bilgisayara, okunan pH değerlerine karşın 1.06-5.3 lük Volt değerleri ulaştı. (Dirençteki hata payı, hatlardaki gürültüler ve akış dinamiğinin etkisi de içinde olacak şekilde).

Deneyin Yapılışı:

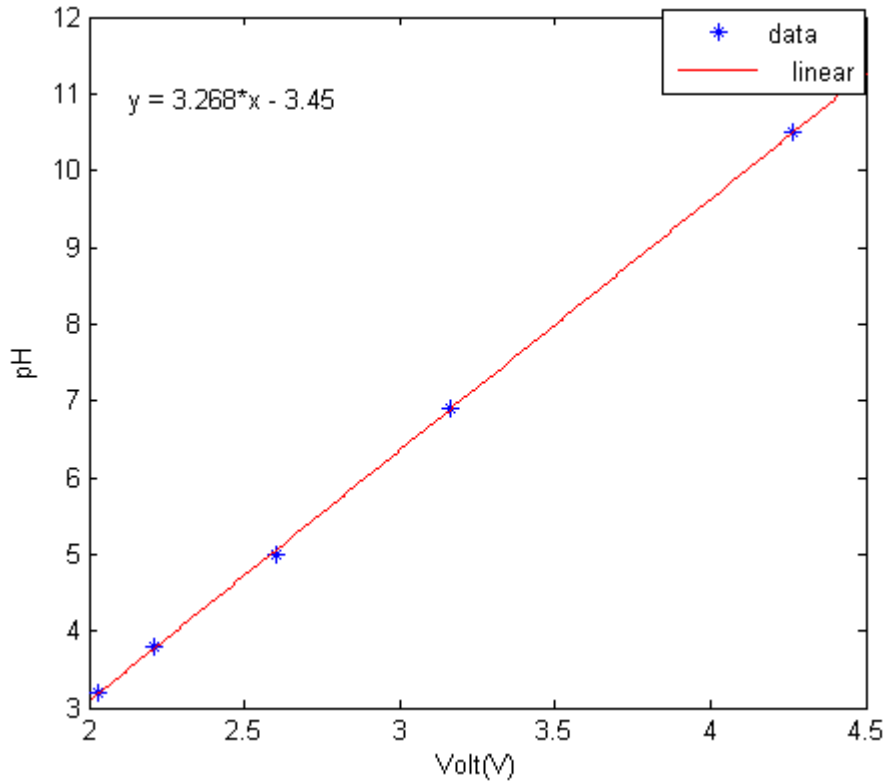
Bu Volt değerlerinin, bilgisayar ortamında pH değerlerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bunun için ilk olarak pH'ı bilindik tampon çözeltiler hazırlandı(3.2-

3.8 -5-6.9 -10.5) . Bu çözeltiler pH probunun daldırıldığı hücreden pompa vasıtası ile sırayla sirküle ettirildi ve pH değerlerine karşın Volt değerleri toplandı.

Ortalama volt değerlerine karşın pH verileri aşağıdaki şekildedir. Regresyon ile

$$\text{pH}=3.27\text{V}-3.45 \quad (R^2=0.999) \quad (5.1)$$

eşitliği elde edildi.



Şekil 5.1. Volt-pH eğrisi

5.2. Sensor Dinamiği Deneyleri

Şayet pH probu bir çözeltiliye daldırıp kararlı hale gelmesi beklendikten sonra aniden pH'ı belli başka bir çözeltiliye daldırılırsa nihai pH'a ulaşması zaman alacaktır, göstergedeki değer zamana bağlı bir değişim sergileyecektir. Buna elektrodun "cevap süresi" adı verilir ve nihai değer % 98 ine ulaşması için geçen süre olarak

adlandırılır. Pratikte, zaman sabitini, cevap süresinin yerine kullanmak daha verimli olmaktadır. Çünkü çoğu endüstriyel proseslerde gürültülerden dolayı nihai değerin % 98 ini belirlemek zor olmaktadır.

Sensor dinamiği birinci dereceden bir sistemin dinamiği ile aynı özellikler sergiler. Sensor dinamiği için aşağıdaki yaygın eşitlik yazılır:

$$pH_{ind}=pH_1+\Delta pH(1-e^{(-t/\tau_s)}) \quad (5.2)$$

Burada pH_{ind} göstergedeki anlık pH değerini, pH_1 başlangıçtaki çözeltinin pH'ını, ΔpH ilk ve son çözelti arasındaki pH farkını, τ_s ise sensor zaman sabitini göstermektedir.

Üstteki eşitlik yeniden düzenlenirse;

$$R=(pH_{ind}-pH_1)/\Delta pH \quad \text{ve} \quad R=(1-e^{(-t/\tau_s)}) \quad \text{şeklinde yazılır.} \quad (5.3)$$

Bu eşitlikten çeşitli R değerlerine tekabül eden τ_s değerleri aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$R=0.63 \text{ için} \quad t=\tau_s$$

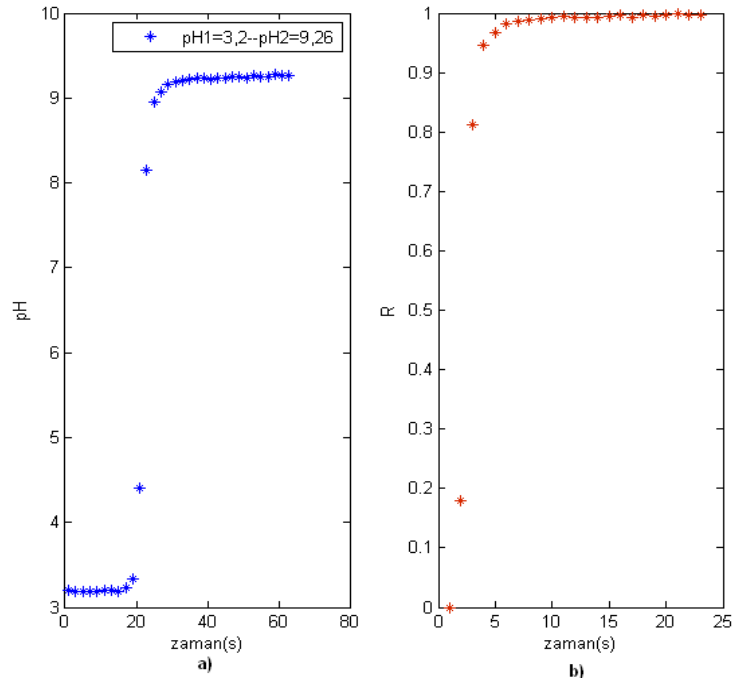
$$R=0.5 \text{ için} \quad t=0.693\tau_s$$

$$R=0.9 \text{ için} \quad t=2.303 \tau_s$$

$$R=0.98 \text{ için} \quad t=3.91 \tau_s$$

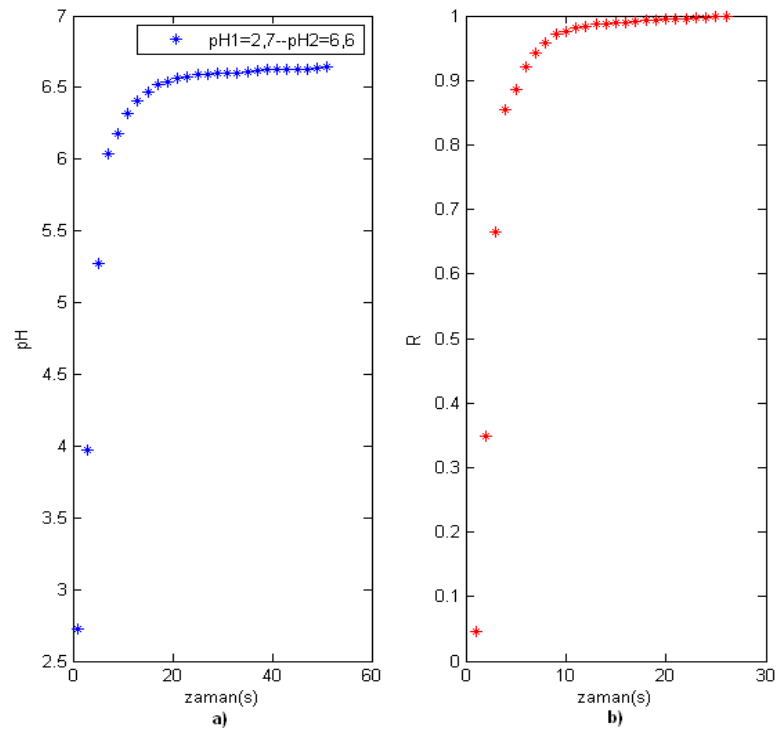
Deneyin Yapılışı:

İlk önce farklı konsantrasyonlarda(pH) çözeltiler hazırlandı, bunlar tanklara yerleştirildi, bunlardan pH çiftleri oluşturuldu(pH_1 ve pH_2). Peristaltik pompa ile pH probunun bağlı olduğu hücreden pH_1 çözeltisi sirküle ettirilip kararlı hale geldikten sonra emme borusu aniden pH_2 çözeltisinin olduğu diğer bir tanka daldırıldı. Bu arada veri toplama kartı ile zaman ve pH dataları toplanarak kaydedildi.



Şekil 5.2. a) pH 3.2 den 9.26 'a geçerken sensor cevabı b) t-R grafiği

t-R grafiği elde edilirken pH'ın değişmeye başladığı nokta ilk nokta olarak alındı. Yine t-R grafiğinden R'nin 0.5-0.67-0.9-0.95 olduğu t(zaman) değerleri elde edildi, bu 't' değerleri yardımı ile denklem 5.3. kullanılarak τ_s değerlerine ulaşıldı ve ortalama bir τ_s değeri hesaplandı.



Şekil 5.3. a) pH 2.7 den 6.6'ya geçerken sensor cevabı b) t-R grafiği

Bu şekilde, pH eğrisinin farklı bölgelerini içerecek şekilde yapılan deneylerle aşağıdaki tablodaki τ_s değerleri elde edildi.

Tablo 5.1. R- $\tau_{s_{ort}}$ değerleri

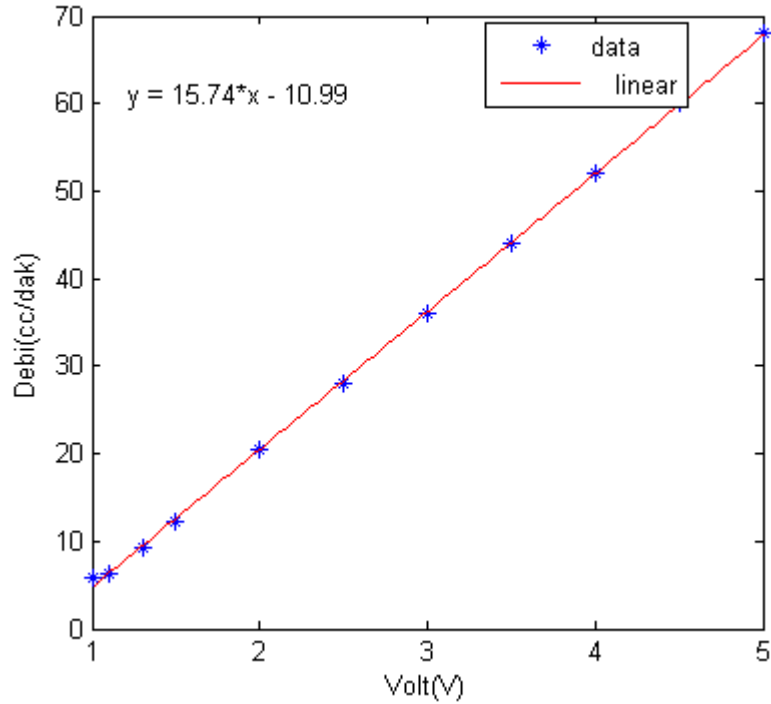
$pH1$	$pH2$	$R(0.5)$	$R(0.67)$	$R(0.9)$	$R(0.95)$	$\tau_{s_{ort}}$
6.3	2.8	3.67	3.47	2.62	2.67	2.67
2.7	6.6	5.1	5.19	4.29	4.28	4.715
9.25	4.3	2.79	2.52	1.8	1.85	2.24
6.23	10.2	3	2.7	2.16	2.17	2.51
6.5	10.2	3.17	2.54	1.96	2.07	2.43
9.26	3.2	2.8	2.41	1.76	1.706	2.17
3.2	9.26	4.99	4.73	3.63	3.48	4.2

Buradan ortalama bir τ_{ort} değeri hesaplanarak ($\tau_{\text{ort}}=3\text{s}$) sensor modelinde yerine konuldu.

5.3. Pompa kalibrasyon Deneyleri

Deneyin Yapılışı:

Pompaya uygulanan Volt değerine karşı gelen debi değerini bulmak için, belirli volt değerleri pompaya uygulandı ve sıvı debileri deneysel olarak bulunup kaydedildi. Daq cihazı analog çıkış olarak 0-5 volt desteklediğinden pompanın analog çıkışları değerlendirildi. Pompaya uygulanan minimum gerilim 1 voltur (0-0.99 Volt aralığı için dönüş hızı 0 rpm dir ve 1 voltun üstünde pompa hız kazanacaktır) .



Şekil 5.4. Volt-Debi eğrisi

Şekil 5.4, pompanın sadece başlangıçta küçük bir sapma gösterdiğini ve Volt-Debi eğrisinin lineer olduğunu göstermektedir. Regresyon ile

$$q=15.74V-10.99 \quad (5.4)$$

elde edildi.

5.4. Pompa Dinamiği Deneyleri

Pompa dinamiğinin belirlenmesindeki asıl amaç bilgisayardan gönderilen sinyale karşı pompanın cevap süresinin belirlenmesidir. Bu olay kontrol açısından önemlidir. Pompanın cevap süresini belirlemek için Lutron DT-2268 Dual digital takometre kullanıldı.

Deneyin Yapılışı:

Bilindiği üzere peristaltik pompa analog girişleri sayesinde gönderilen sinyale göre debisini ayarlamaktadır. İlk deneyde, durgun haldeki pompaya sinyal gönderilip kararlı hale gelmesi için geçen süreler bakıldı. Deneyin ikinci aşamasında ise kararlı halde çalışan pompaya farklı sinyal gönderilerek yeniden kararlı hale geçme süreleri incelendi. (tablodaki değerler kararlı haldeki değerlerin $\pm 10\%$ una ulaşma zamanlarıdır).

Tablo 5.2. Pompanın durgun halden harekete geçme süreleri

<i>Volt(ilk-son)</i>	<i>dönme hızı(rpm)</i>	<i>zaman(s)</i>
0-1.25	7.3	6.06
0-2	17.1	6.01
0-3	30	5.97
0-4	43	6.22
0-5	56.1	6.19

Tablo 5.3 deki veriler ise, kararlı halde çalışan pompaya farklı sinyaller gönderilerek yeniden kararlı hale geçme süreleri incelenerek elde edildi. Sinyal değişimi hem

pozitif yönde hem de negatif yönde gerçekleştirildi. Deneyler iki üç kere yapılarak ortalamaları alındı.

Tablo 5.3. Pompanın kararlı halden, yeni kararlı hale geçme süreleri

<i>Volt</i>	<i>rpm</i>	<i>Debi cc/dak</i>	<i>Hızlanma zamanı (s)</i>	<i>Yavaşlama zamanı (s)</i>
1.5	10	12		
2	17.1	20.8	$(8.78+9.34+9.2)/3=9.10$	$(9.53+8.90)/2=9.215$
1.5	10	12		
3	30	36.7	$(3.5+4.19+4.34+4.41)/4= 4.11$	$(6.25+4.56+5.09+5.8)/4= 5.42$
1.5	10	12		
4	43	51.6	$(3.03+4.02+3.4)/3=3.48$	$(5.16+4.84+4.63)/3=4.8$
1.5	10	12		
5	56	68.5	$(3.78+3.82+3.78)/3=3.79$	$(5.63+4.15+5.47)/3=5.08$
2	17.1	20.8		
3	30	36.7	$(3.32+3.60+4.20+3.12)/4= 3.56$	$(3.15+4.20+3.46+3.38)/4=3.54$
2	17.1	20.8		
4	43	51.6	$(3.5+3.01+3.54)/3=3.35$	$(3.06+3.59+4.5)/3=3.71$
2	17.1	20.8		
5	56	68.5	$(3.53+3.90+3.60)/3=3.67$	$(3.02+4.20+3.25)/3=3.49$
3	30	36.7		
4	43	51.6	$(3.31+4.65+3.63)/3=3.86$	$(4.06+4.41+4.43)/3=4.3$
3	30	36.7		
5	56	68.5	$(3.5+3.22+3.63+3.12)/4=3.36$	$(2.94+2.82+4.12+2.91)/4=3.2$
4	43	51.6		
5	56	68.5	$(3.72+3.5+3.25)/3=3.5$	$(4.25+3.44+4.20)/3=3.9$

Tablodaki verilerden, 1-2 volt arasında gerek pozitif gerekse negatif yönde farklılığın olduğu diğer bölgelerde sonuçların yakın olduğu görülmektedir (zaten kalibrasyonda da bu aralıkta sapma olduğu görülmüştü). Buradan anlaşılmaktadır ki, pompaya sinyal geldikten ortalama $(3.63+3.16)/2=3.9$ s sonra pompa nihai değerin $\pm 10\%$ una

ulaşıyor. Pompanın da tıpkı pH sensörü gibi birinci dereceden bir sistem gibi modellenebileceğini varsayarsak aşağıdaki bağıntı yazılabilir.

$$q_{b_{ind}} = q_{b_0} + \Delta q * (1 - \exp^{(-t/\tau_p)}) \quad (5.5)$$

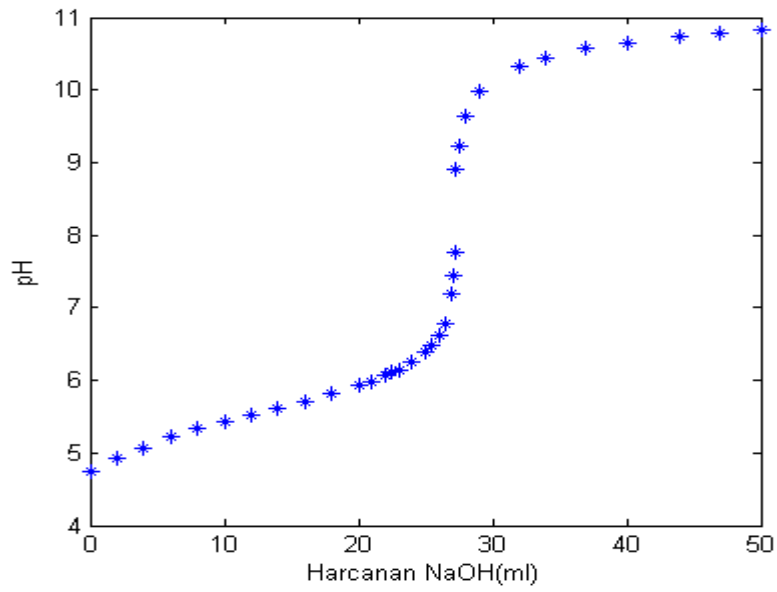
Burada $\Delta q = q_b - q_0$, ayrıca pompanın zaman sabiti yukarıdaki bilgilerden bulunabilir. Burada 3.9 s nihai değerin %90'ına (ortalama) ulaşmak için geçen süredir.

5.5. Asit-Baz Çözeltilerinin konsantrasyon Tayini

Deneylerde kullanılan asit ve bazın konsantrasyonlarının hassas bir şekilde belirlenmesi için potansiyometrik titrasyon yöntemi kullanıldı.

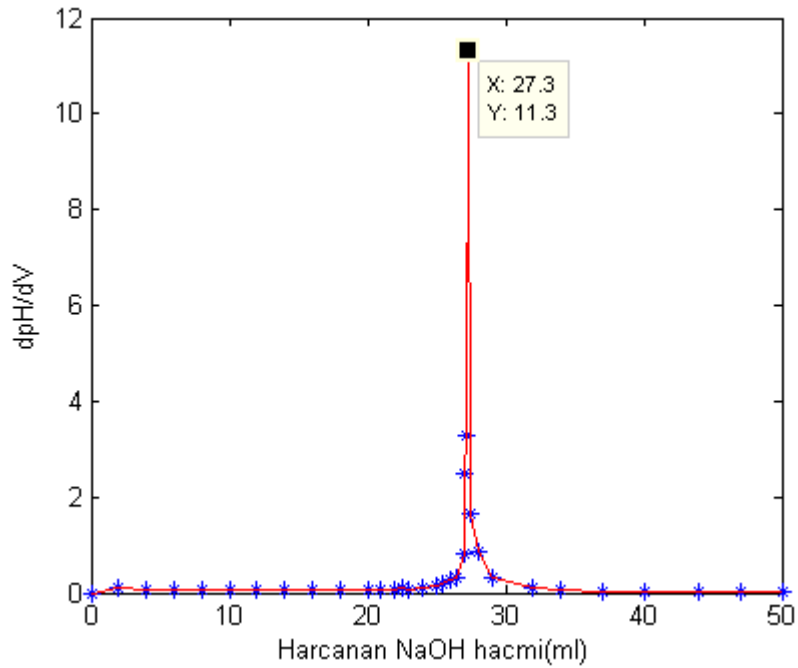
5.5.1. NaOH çözeltisinin konsantrasyon tayini

Bir miktar Potasyum hidrojen fitalat (KHP) alınıp 120 °C'deki etüvde 2-2:30 saat bekletildi. Ardından 0.5 gram civarında hassas bir şekilde tartılarak desikatöre konuldu ve soğuması beklenildi, kaynatılmış ve soğutulmuş 100 cc suda çözüldü ve içine pH elektrodu yerleştirildi. Diğer yandan titrasyon büreti hazırlanan NaOH çözeltisi ile dolduruldu. Titrasyon yapılırken pH-hacim verisi toplanıp bir grafiğe geçildi.



Şekil 5.5. NaOH etki değeri için Hacim-pH eğrisi

Grafikten dönüm noktasını kestirmek zor olacağından Hacim-pH eğrisini oluşturan noktaların eğimine (pH'ın hacme göre değişimine veya türevine) bakarak ekivalent nokta daha hassas şekilde hesaplandı.



Şekil 5.6. NaOH etki değeri için Hacim –Eğim grafiği

5.5.2. Asetik Asidin konsantrasyon tayini

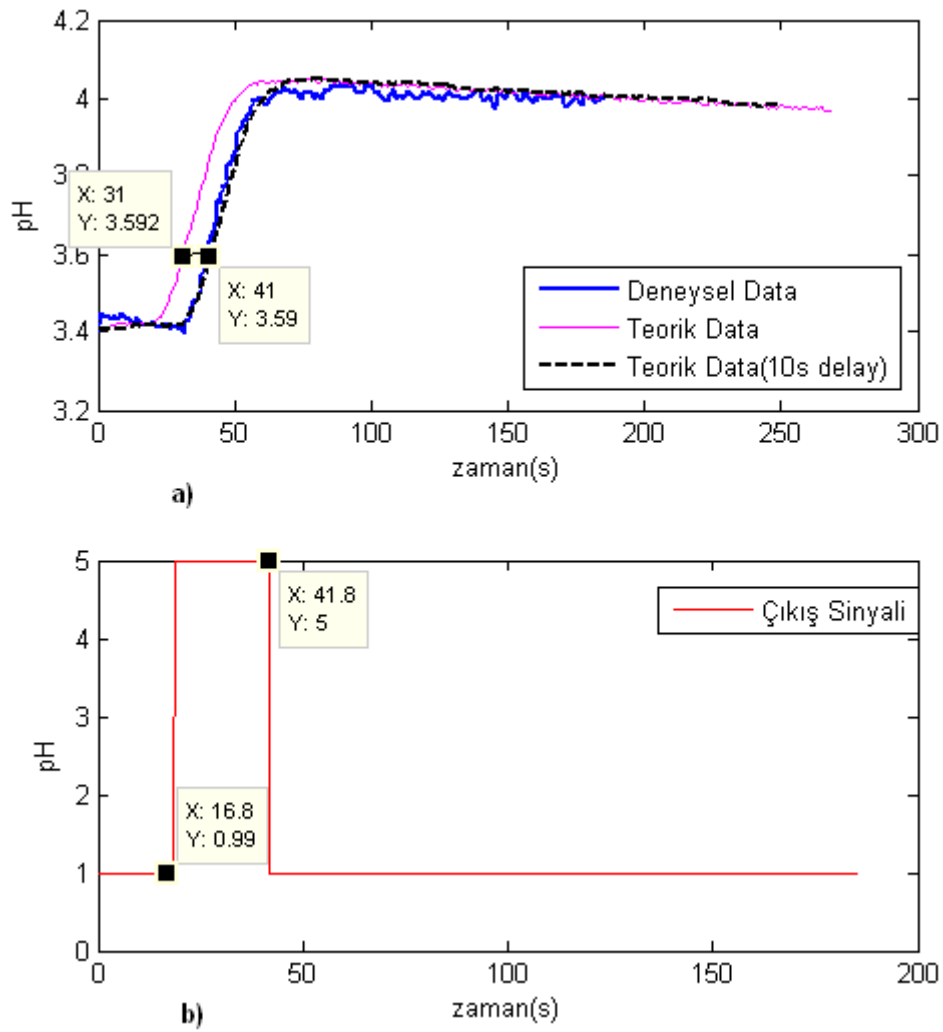
Elde konsantrasyonu bilinen NaOH çözeltisi olduğundan bunu kullanarak asit çözeltilerinin etki değeri tayin edildi. Bunun için hacmi belli olan asit çözeltisinden alınıp potansiyometrik olarak NaOH ile titre edildi.

5.6. Zaman Gecikmesi Deneyleri

Nötralizasyon sırasında, reaktördeki pH değişimi ile elektrodun bu değişimi algılaması arasında geçen “gecikme süresi (Time delay)’ nin tespiti proses kontrolü açısından önemlidir. Gecikmenin minimum olması için elektrodun reaktör içinde veya çıkış hattı üzerinde en uygun yerde konumlandırılması gerekmektedir. Elektrodun reaktör içinde çıkışa yakın bir yere yerleştirilmesi en doğru karar olarak görülmektedir. Bununla birlikte, asid-baz çözeltilerinin karışma süresinin sonlu küçük (sıfır değil) olması, elektrot çıkış sinyalinde titreşimlerin oluşması, elektrodun bakımı gibi bazı nedenlerle bundan vazgeçilmiş, elektrot reaktör çıkış hattı üzerinde uygun bir yerde bir elektrot yuvası içine yerleştirilmiştir. Bu durumda gecikme süresinin tespiti için kararlı halde yürüyen sisteme kısa zaman aralığında puls etki verilmiş ve sistemin verdiği cevap ve teorik sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Deneyin yapılışı:

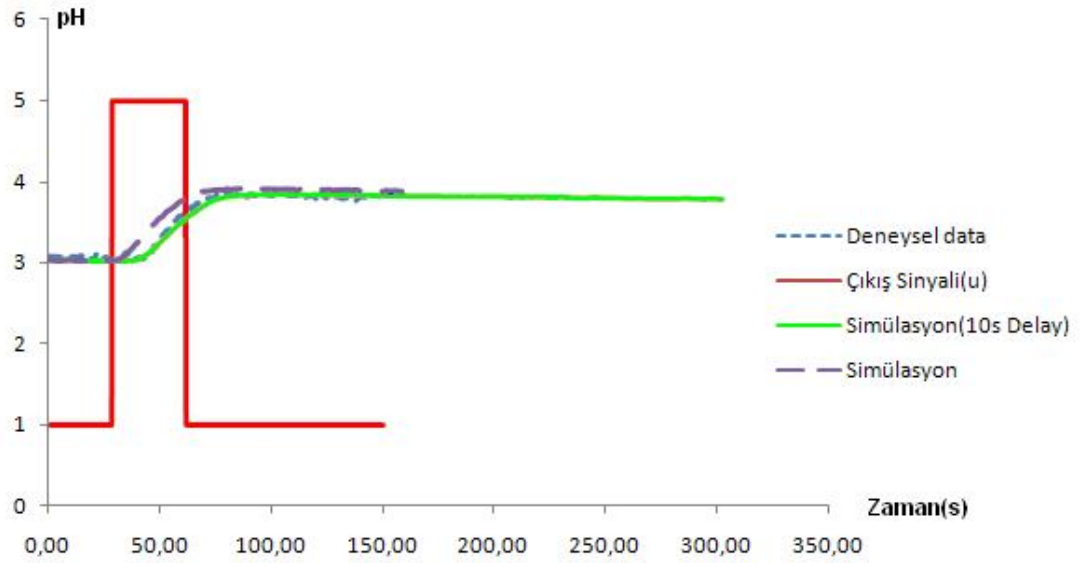
Reaktöre başlangıçta 0.008M’lık asetik asit çözeltisi konulup 30cc/dak debi ile 0.01M asetik asit reaktöre beslenilmeye başlandı, bu arada 0.037M NaOH çözeltisinin bulunduğu tanka bağlı olan baz pompasına belirli bir zaman aralığında, sistemde gözlenebilecek bir etki oluşturmak için puls verildi, zaman, pH ve pompa çıkış sinyali kaydedildi (On-Line ölçüm ve simülasyon için yazılan Labview programına sırasıyla Ek-1-a,b ve Ek-2 den ulaşılabilir), bu arada reaktör hacmi 708 cc de sabit kalacak şekilde çıkış akımı ayarlandı.



Şekil 5.7. Zaman gecikmesinin belirlenmesi

Şekil 5.7. de görüleceği gibi, sisteme $t = 16.8$ saniye olduğunda, baz pompasına puls etki verilmiş bu etki 25 saniye sürmüştür. Deneysel data ile simülasyon sonucu arasında zaman kayması olduğu görülmektedir. Model ile deneysel sonuç arasındaki farkı gidermek üzere modele 10 saniyelik bir gecikme süresi ilave edildiğinde simülasyon sonucu ile deneysel verinin örtüştüğü görüldü.

Başka bir denemede ise bazın konsantrasyonu artırılarak yapıldı; Başlangıçta içerisinde 0.05M asetik asit bulunan 778 cc reaktöre 30 cc/dak'lık 0.05M asit çözeltisi beslenmeye başlandı, 28.8-61.2 saniyeleri arasında 0.12M baz çözeltisi pompasına puls etki verildi, zaman, pH ve çıkış sinyalleri kaydedildi.



Şekil 5.8. Zaman gecikmesinin belirlenmesi (Derişik baz kullanımı)

Şekil 5.8 den yine zaman gecikmesinin etkisi bariz bir şekilde görülmektedir.

Çıkış akış hızına bağlı olarak bu zaman gecikmesi farklı değerler alacaktır. Çıkış akış hızı sabit olduğu sürece zaman gecikmesi sabit kalacaktır. Sistemin bu gecikme varlığında yeterli bir performans ile kontrol edilebilmesi kabul edilebilir bir durumdur. Kontrol performansının düşük olması halinde ise zaman gecikmesini giderecek adımların atılması gerekir. Bu konu ileride kapsamlı bir şekilde irdelendi.

5.7. Optimum PID Kontrol Katsayılarının Bulunması

Buradaki çalışmalarda kararlı halde çalışan farklı sistemlere adım (step) etki verilerek sistemin en kısa zamanda, aşımı, salınımı, kararlı hal hatası minimum olacak şekilde istenilen değere getirilmesi amaçlandı. Çalışma noktası olarak özellikle dönüm noktası civarındaki pH değerleri (5-6-7-8) seçildi. Sistemde zaman gecikmesinin olmadığı varsayılarak model kuruldu. “Genetik algoritma”, “particle swarm”, “simulated annealing”(Bu algoritmalar hakkında temel bilgilere ek-4’ten ulaşılabilir) gibi çeşitli global optimizasyon metotları ayrı ayrı kullanılarak PID

katsayılarının, minimum ITSE verecek şekilde optimizasyonu sağlandı, ayrıca ikincil amaç olarak ISE değeri de takip edildi. Gerçek zamanlı çalışıldığında sistemde gürültülerin olması hasebiyle kontrolörde diferansiyel etki kullanılmadı, dolayısıyla PI kontrol seçildi.

Simulinkte K_p , K_I ve K_D katsayıları, 2.4. eşitliğindeki hali ile direkt çarpan olarak kullanılmakta.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^{\infty} e(t) dt + K_D \frac{de(t)}{dt}$$

Bu katsayıların birimleri saniye cinsindendir. Labview de ise 2.5 eşitliği kullanılıyor ve τ_I ve τ_D 'nin birimi dakika cinsindendir. Burada ise, optimizasyon yapılırken 2.5 eşitliği tercih edildi, fakat τ_I ve τ_D nin birimleri saniye olarak alındı.

$$u(t) = K_p [e(t) + 1/\tau_I \int_0^{\infty} e(t) dt]$$

Kullanılan global optimizasyon metotları başlangıç tahmin noktası istemektedir. Burada optimizasyon işlemleri farklı üç başlangıç noktası için gerçekleştirildi, sonuca nedenli etki ettiklerine de bakıldı. Ayrıca optimizasyon metotlarının performansına bakılırken optimizasyon işlemi süreleri de (CPU time) göz önünde bulunduruldu.

Bu ve bundan sonraki simülasyon ve deneysel çalışmalarda, zayıf asit-kuvvetli baz sistemi ele alındı, asit olarak asetik asit, baz olarak sodyum hidroksit kullanıldı, ayrıca asit pompası sabit debide çalıştırıldı, son kontrol elemanı olarak baz pompası kullanıldı, reaktör hacmi 0.778L ayarlandı.

İlk olarak pH 5'te kararlı halde çalışan bir sistem ele alındı. Kararlı halde asit debisi $q_a=60\text{cc/dak}$, baz debisi $q_b=39.73\text{cc/dak}$ dır , ayrıca 0.778L'lik reaktör içerisindeki konsantrasyonlar $C_{b0}=0.0199\text{M}$, $C_{a0}=0.0301\text{M}$ dır. Bu sisteme $t=0$ anında birim basamak etki verildi ve pH'ın 6'ya gelmesi için de 1000 saniye (simülasyon zamanı) süre verildi. Optimizasyon sonuçları tablo 5.4 görülmektedir.

Tablo 5.4. pH 5-6 aralığı için optimum sonuç tablosu

<i>Optimizasyon Programı</i>	<i>Başlangıç Kp-τ_I</i>	<i>Optimum Kp-τ_I</i>	<i>Amaç ITSE*104--ISE</i>	<i>CPU TIME(s)</i>
<i>Particle Swarm</i>	10-100	9.03-500	2.0051-170.17	93
<i>Particle Swarm</i>	0.1-10	8.88-492.37	2.0052-170.18	91.78
<i>Particle Swarm</i>	35-3	9.02- 500	2.0051-170.18	96
<i>Genetik Algoritma</i>	1.5-100	8.65 -478.95	2.0052-170.18	60.55
<i>Genetik Algoritma</i>	0.1-10	8.15 -451.83	2.0053-170.18	59.61
<i>Genetik Algoritma</i>	35-3	8.50 -472.07	2.0052-170.18	69.8
<i>Simulated Annealing</i>	1.5-100	4.91 -269.36	2.0085-170.25	151
<i>Simulated Annealing</i>	0.1-10	5.57 -307.61	2.0068-170.21	203.59
<i>Simulated Annealing</i>	35-3	5.50 -304.02	2.0069 - 170.22	448.5

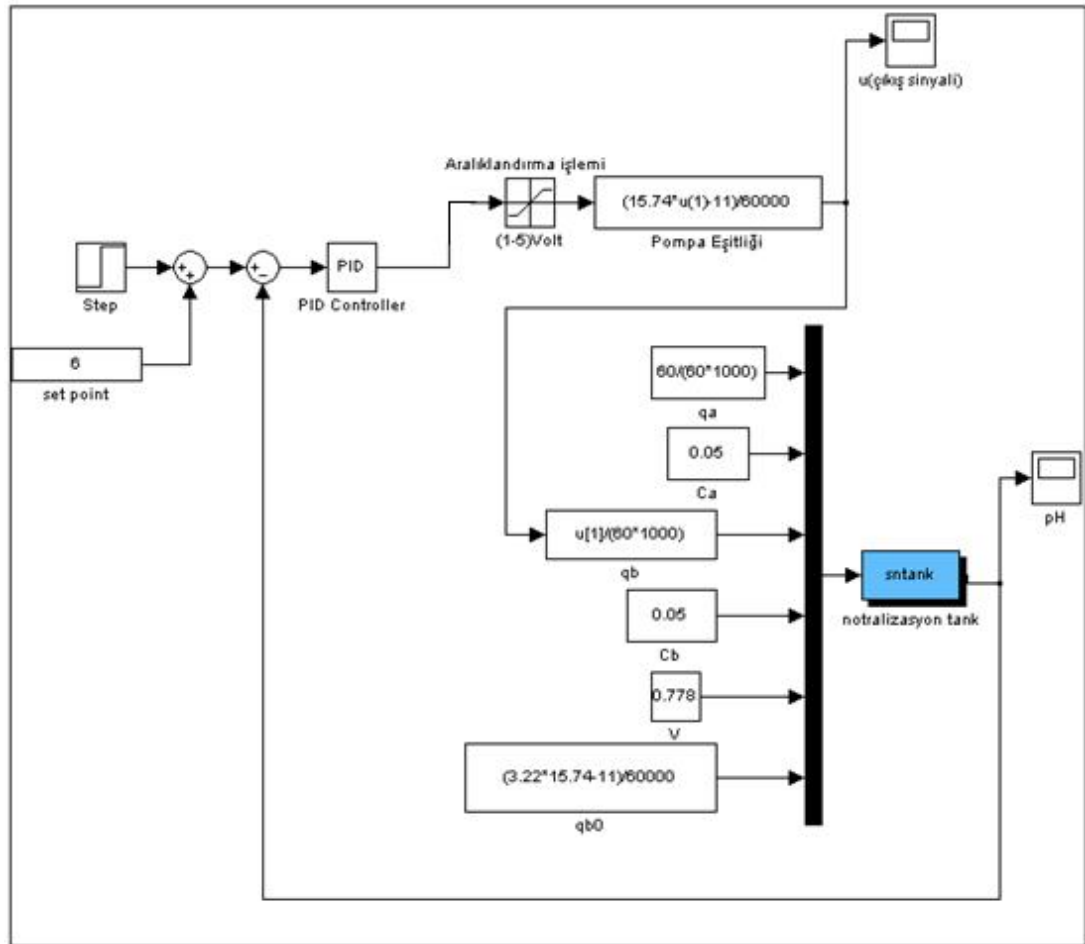
Tablo 5.4 deki hesaplamalardan gerek ISE, gerekse ITSE değerlerinin birbirine yakın çıktığı fakat bulunan PID değerlerinde farklılıkların olduğu görülmektedir. Biraz daha dikkatli bakıldığında aslında katsayılar arasında da benzerliklerin bulunduğu görülecektir. Zira ilk durumda K_p değeri 9.03 τ_I değeri 500 iken en son hesaplamada K_p değeri 5.5 τ_I değeri 304.2 dir.

$$\frac{\tau_I(2)}{\tau_I(1)} = \frac{Kp(2)}{Kp(1)} = \frac{5.5}{9.03} \sim = \frac{304.2}{500}$$

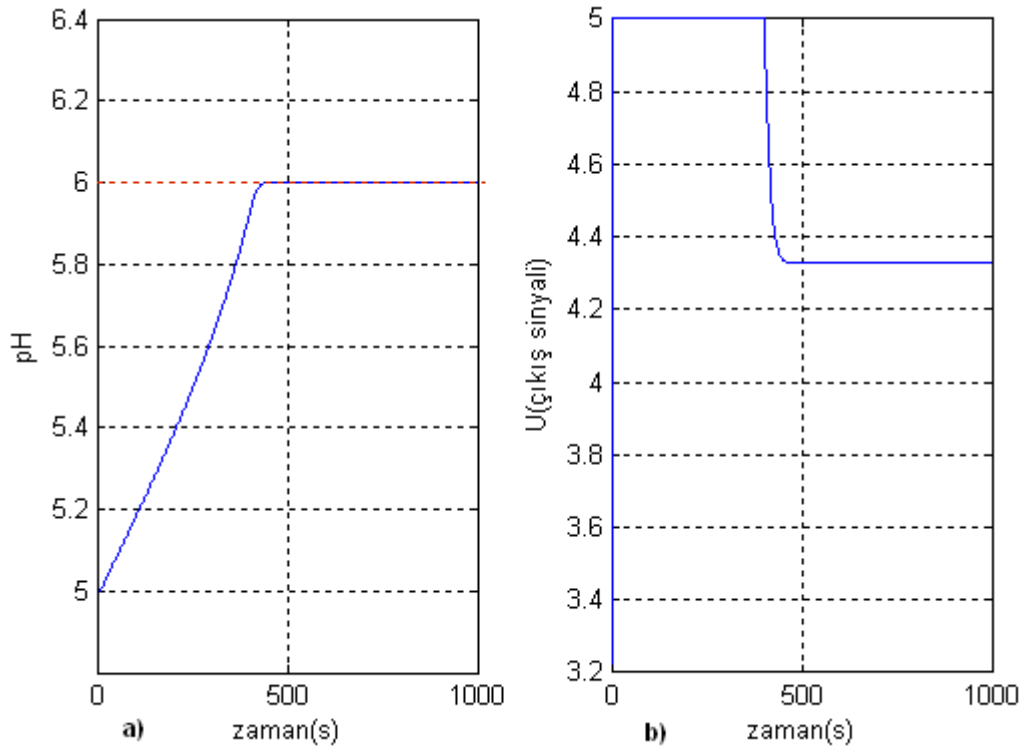
Yukarıdaki oranın diğerleri içinde geçerli olduğu görülmektedir. Yani hem K_p hem de τ_I aynı oranda azaltılıyor. Aslında τ_I paydada olduğu için oransal çarpanın etkisi artırılırken integral çarpanının etkisi de aynı oranda artırıldığından integral çarpanı etkilenmemiş oluyor. Oransal etki başlangıçta çok büyük olduğundan pompaya

gönderilmesi için bir aralıklandırma işleminden geçiriliyor, dolayısıyla bir çarpanla azaltılıp artırılması sonucu değiştirmiyor (burada bu örneğe has bir durum ortaya çıkmıştır), sonralarda ise hata sıfıra yaklaştığında etkisi az olacağından sonlarda sadece integral etki önemli rol oynayacaktır denilebilir.

Simülasyon ve optimizasyon çalışmaları matlabda m.file ortamında yapıldı, fakat görselliği açısından m.file yerine simülink deki eşdeğeri Şekil 5.9 da gösterilmektedir. Şekil 5.9 daki simülink blog diyagramındaki Nötralizasyon tank bloğu için gerekli s-fonksiyonuna ise ek-3 ten ulaşılabilir. Şekil 5.10, tablodan elde edilen optimum katsayılar yardımı ile çizildi.



Şekil 5.9. Simulink blok diyagramı



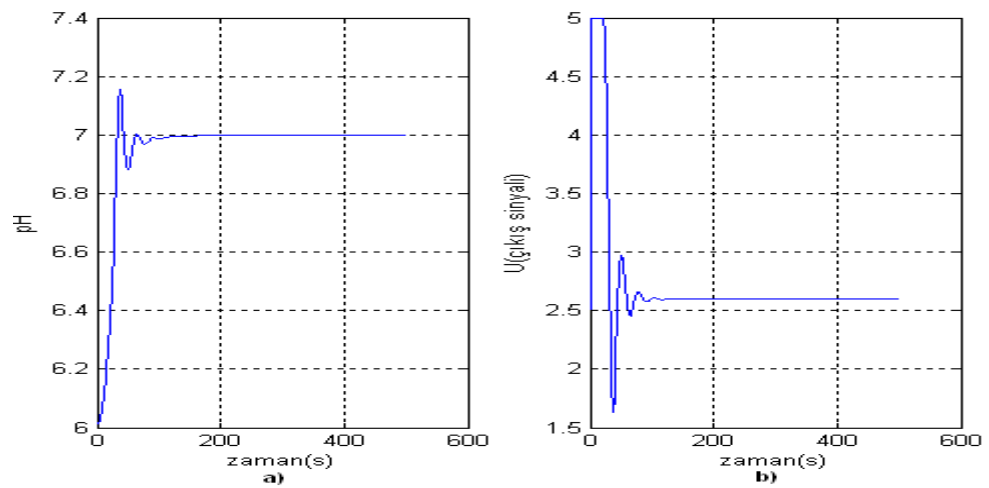
Şekil 5.10. pH 5-6 aralığı için optimum katsayıların uygulanması

İkinci çalışmada ise kararlı halde olan sistemde $q_a=30\text{cc/dak}$, $q_b=28.5\text{cc/dak}$ ve reaktör içerisinde $Ca_0=0.0256\text{ M}$, $Cb_0=0.0244\text{M}$ dır.

Bu şartlarda pH 6'da yürüyen sisteme birim basamak etki verilip ITSE değeri 1000 saniyelik süre zarfında optimize edildi. Sonuçlar tablo 5.5 dedir.

Tablo 5.5. pH 6-7 aralığı için optimum sonuç tablosu

<i>Optimizasyon Programı</i>	<i>Başlangıç Kp-τI</i>	<i>Optimum Kp-τI</i>	<i>Amaç ITSE*104---ISE</i>	<i>CPU TIME(s)</i>
<i>Particle Swarm</i>	10-100	4.84- 45.37	203.84-18.67	81.09
<i>Particle Swarm</i>	0.1-10	4.84-45.42	203.84-18.67	82.5
<i>Particle Swarm</i>	35-3	4.84- 45.42	203.84-18.67	81.1
<i>Genetik Algoritma</i>	10-100	5.39 -52.10	206.46-18.7	125.0
<i>Genetik Algoritma</i>	0.1-10	7.28-71.92	215.67-18.89	106.9
<i>Genetik Algoritma</i>	35-3	5.31 -48.00	206.88-18.75	132.5
<i>Simulated Annealing</i>	10-100	4.84 -45.51	203.85-18.67	109.4
<i>Simulated Annealing</i>	0.1-10	4.84 -45.40	203.84-18.67	344.2
<i>Simulated Annealing</i>	35-3	4.84 -45.43	203.84-18.67	237.7

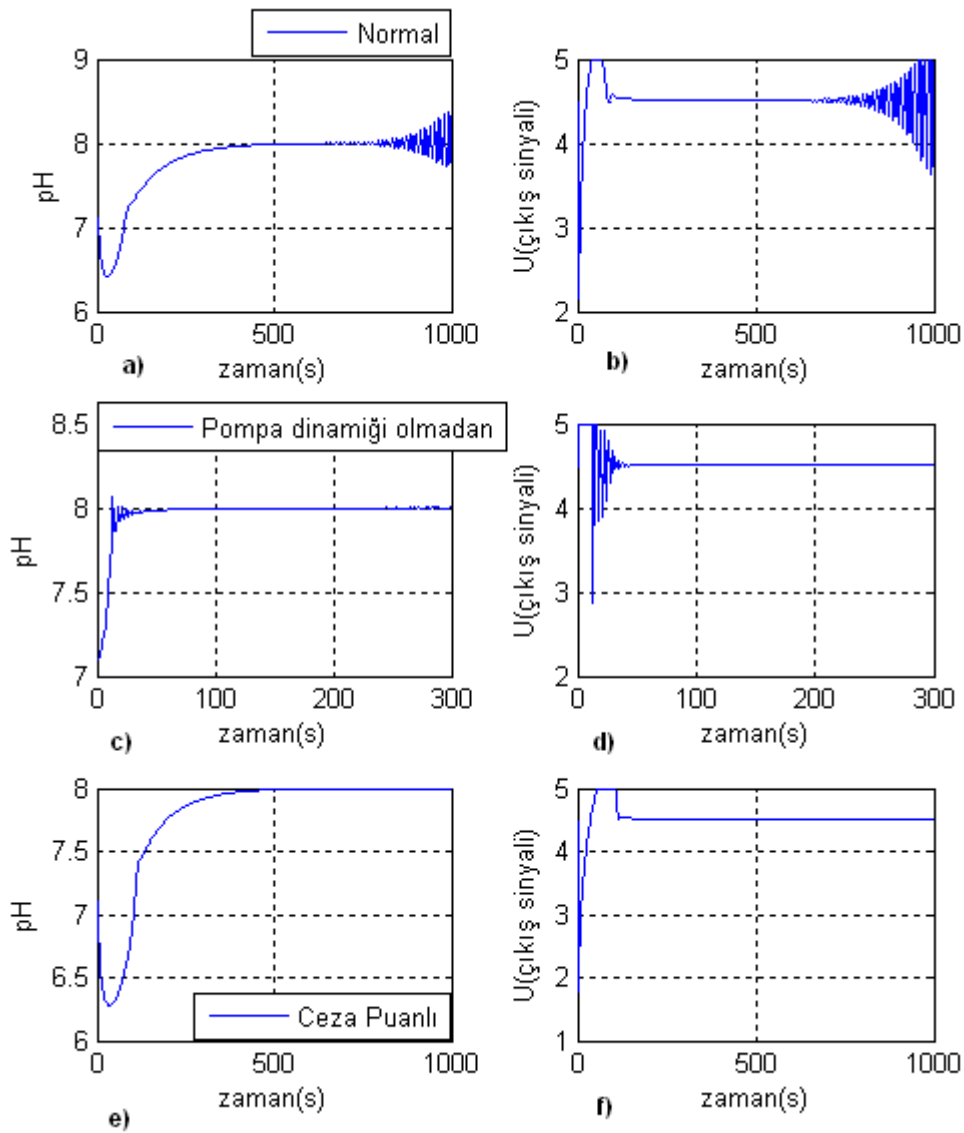
**Şekil 5.11.** pH 6-7 aralığı için optimum katsayıların uygulanması

Son çalışmada ise kararlı halde asit debisi $q_a=60\text{cc/dak}$, baz debisi $q_b=59.69\text{cc/dak}$ ve reaktör içerisinde konsantrasyonları $Ca_0=0.025\text{M}$, $Cb_0=0.0249\text{M}$ olan, pH 7 civarında seyreden sisteme birim basamak etki verildi ve yine 1000 saniyelik süre zarfındaki ITSE değeri optimize edildi.

Tablo 5.6. pH 7-8 aralığı için optimum sonuç tablosu

<i>Optimizasyon Programı</i>	<i>Başlangıç $K_p-\tau I$</i>	<i>Optimum $K_p-\tau I$</i>	<i>optimum ITSE*104</i>	<i>CPU TIME(s)</i>
<i>Particle Swarm</i>	10-100	2.274- 98.0996	1.054	82.9
<i>Particle Swarm</i>	0.1-10	2.3633- 103.0543	1.043	75.5
<i>Particle Swarm</i>	35-3	2.3579-101.2211	1.030	74.4
<i>Genetik Algoritma</i>	10-100	31.6424 -401.0539	7.22	72.4
<i>Genetik Algoritma</i>	0.1-10	33.3825 -316.9760	6.97	48.1
<i>Genetik Algoritma</i>	35-3	42.4567 -389.6494	7.15	68.1
<i>Simulated Annealing</i>	10-100	2.5134 -126.5609	1.3450	133.8
<i>Simulated Annealing</i>	0.1-10	1.6046 -36.6609	1 .939	417.2
<i>Simulated Annealing</i>	35-3	1.7160 -55.0077	1.8602	138

Sonuçların iyi olmadığı tablodan görülmektedir, bu şartlar altında sistemi kontrol edebilecek optimum katsayılar bulunamadı. Sisteme 1000 saniyelik kontrol süresi verildi fakat bulunan optimum katsayılar sistemi kontrol edemedi, sistem kontrolden çıkma eğilimi sergiledi.



Şekil 5.12. pH 7-8 aralığı için optimum katsayıların uygulanması

Şekil 5.12-a da ITSE değerini en düşük ($1.03 \cdot 10^4$) veren PI katsayılar ile oluşturulan simülasyon sonucu görülmektedir. Sistem 700. Saniyeden sonra kontrolden çıkma eğilimi göstermesine rağmen program bu kontrolü optimum diye sunmuştur. Bunun sebebi simülasyonun 1000 sn sürmesi ve bu 1000 saniyelik süredeki ITSE'nin gerçekten küçük olmasıdır. Şayet simülasyon çok daha uzun tutulursa program en iyi sonucu gerçekte bulabilecektir. Program süresini uzatmak gerçekte iyi bir fikir değildir. 500 sn de oturacak bir sistem için 2000 sn simülasyon yapmak ileriki konularda da görüleceği üzere optimizasyon sürelerini günlere uzatabilir.

Bunun yerine ikinci bir alternatif simülasyon süresinin son saniyelerine doğru oluşan hatalara yüksek ceza puanı verip, bu puanı amaç fonksiyonu(ITSE) ile toplamaktır.

Şekil 5.12-e de ceza puanı uygulanan optimizasyon sonucu görülmektedir, burada katsayılar K_p ; 1.94, τ_i ; 95.4, bulunmuş buna mukabil amaç fonksiyonu $1.6 \cdot 10^4$ olarak hesaplanmıştır. Bu değer hakikaten de ceza puansız hesaplanan optimum değerden büyüktür fakat 1000 saniyelik süre zarfında. Daha öncede denildiği gibi süre uzatılırsa program yeni bulunan optimum değere yakın değerler bulacaktır.

Burada farklı bir noktaya daha değinmekte fayda var, o da pompanın dinamiğinin kontrol üzerindeki etkisidir. Bu son nokta seçildi çünkü pH 8 civarı, pH değişiminin en kritik olduğu noktaların olduğu bölgedir. Diğer bölgelere nazaran pompa dinamiğinin bariz görülebileceği bir noktadır.

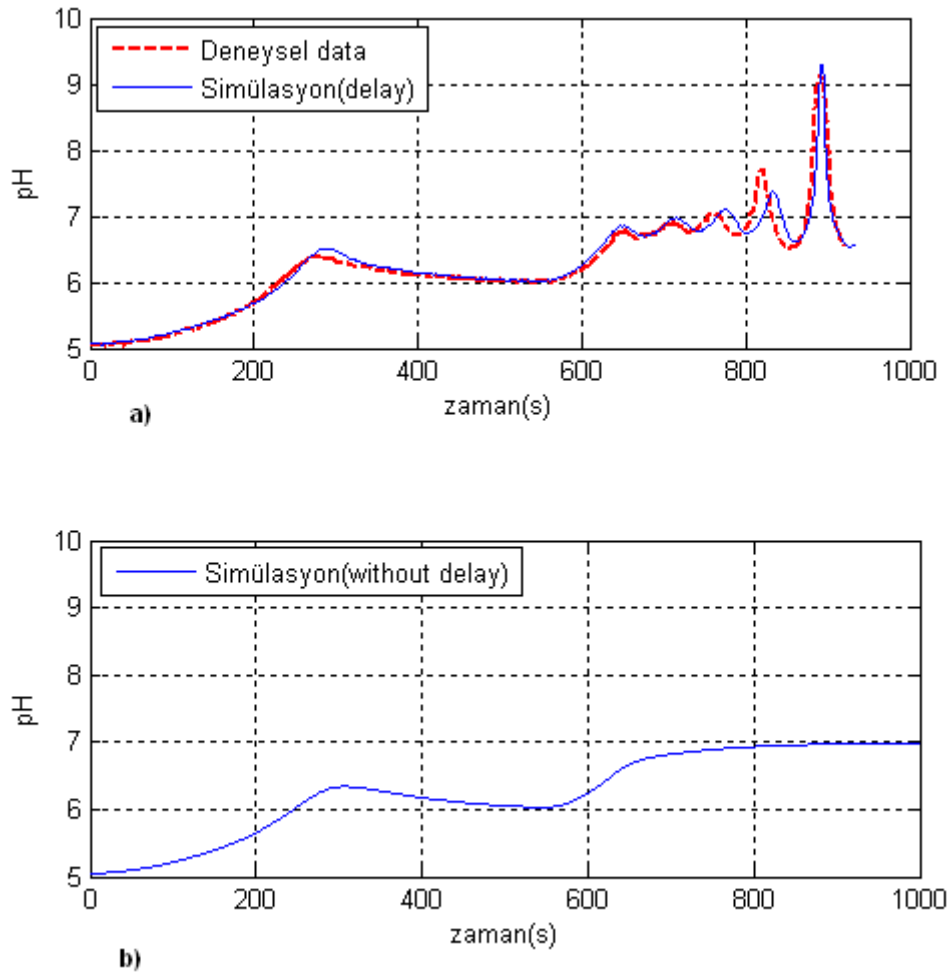
Şekil 5.12-b pompa dinamiği modelde olmadan optimizasyon yapılarak elde edilen sonucu göstermektedir, sonuç hiçte şaşırtıcı değil sistem çok kısa sürede istenilen değere ulaşmakta, kararlılığını korumaktadır. Burada dikkat çeken nokta 5.12-d ve 5.12-f figürleridir. Figür 5.12-d ye bakıldığında çıkış sinyali çok agresif bir hareket sergilemekte, pompanın dinamiği modelde olmadığı için, pompanın da bu çıkış sinyaline hemen yanıt verdiği varsayılmaktadır. Ama gerçekte tabii ki de bu o kadar kolay olmayacaktır. Pompanın kararlı hale gelmesi, önceki bölümlerde bahsedildiği gibi zaman alacaktır. Dolayısıyla Şekil 5.12-f ten de açıkça görüleceği gibi pompa dinamiği işin içine girdiğinde pompaya çok daha yumuşak geçişlerle sinyal gönderilmektedir.

5.8. PID Kontrol Deneyleri

Bölüm 5.6 da bahsedildiği üzere sistemde zaman gecikmesi mevcut, bu zaman gecikmesinin kontrol üzerindeki etkisine bakmak için deneysel sistemde deneyime bağlı PID katsayılar kullanılarak sistem kontrol edilmeye çalışıldı, hem zaman gecikmesinin etkisi gösterildi hem de deneysel sistem ile teorik model test edildi.

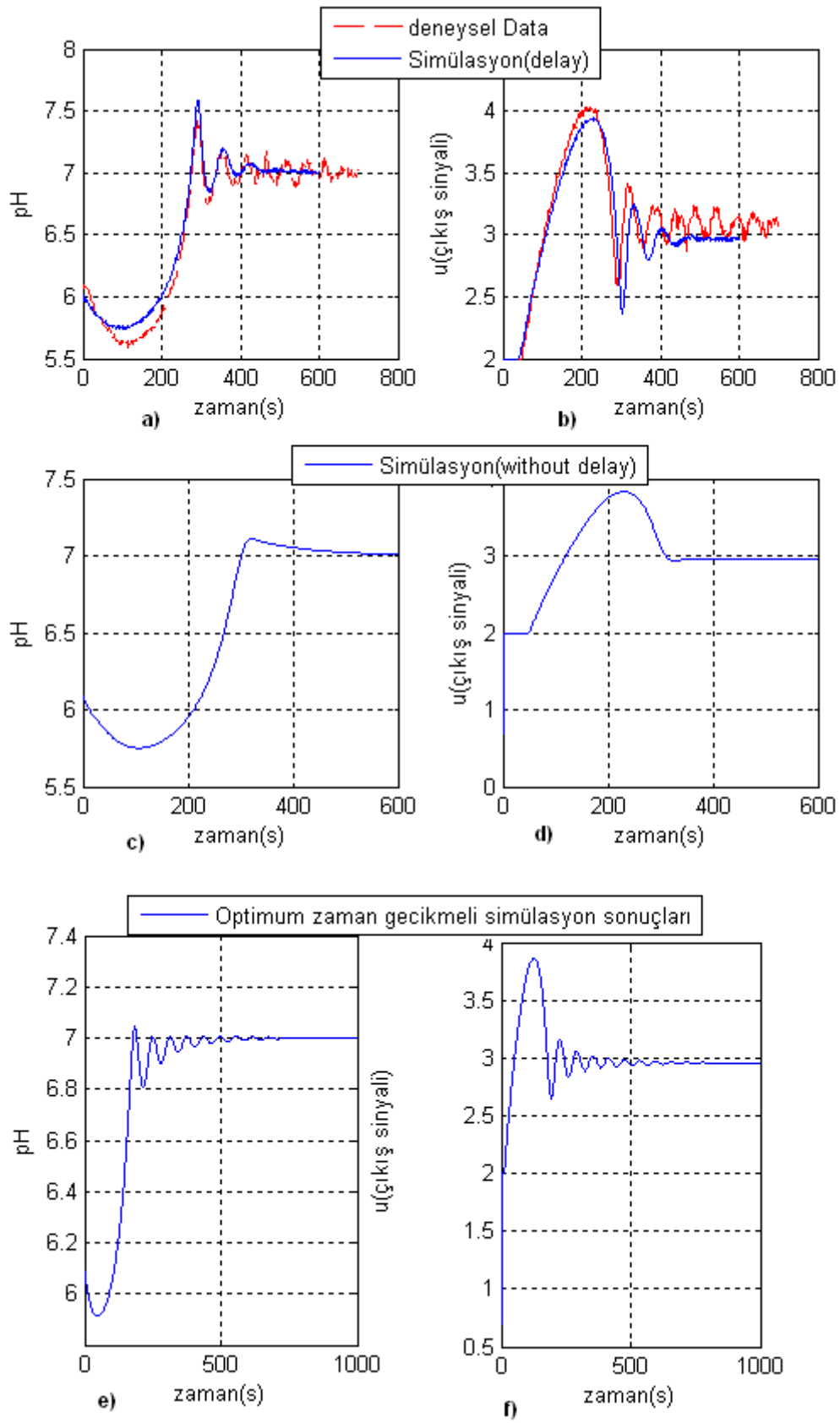
İlk deneyde 0.778L'lik reaktöre başlangıçta pH'ı 5.05 olan($Ca_0=0.02775M$, $CB_0=0.01915M$) olan çözelti konuldu, ardından 0.05M'lık asetik asit çözeltisi 30cc/dak'lık debi ile beslenmeye başlandı, tam bu sırada kontrolör devreye sokularak 0.042M'lık NaOH ile pH 6'ye getirilmeye çalışıldı, çıkış debisi ayarlanarak reaktör hacminin sabit kalması sağlandı. PI katsayıları sırasıyla 3 ve 110.4 alındı. Tam 545. Saniye de pH 6 da ki sisteme tekrar step etki verilerek bu sefer de pH 7'e ayarlandı(Kontrolör resetlendi). İlk önce sistem ile model arasındaki uyuma bakıldı. Şekil 5.13-a ya bakıldığında modelin gayet iyi bir şekilde deneysel sonuçlarla örtüştüğü görülebilmektedir.

Burada şuna dikkat çekmek gerekirse; Zaman gecikmenin olduğu sistem optimize edilip, optimize edilen katsayılarla deneysel sonuçlar elde edilip model ile karşılaştırılabilir(zira ikinci deneyde optimum sonuçlara yakın değerlerle çalışılmıştır). Fakat ileride de görüleceği üzere zaman gecikmesinin çok fazla olduğu sistemlerde çalışmak gerçekten zordur. Şekil 5.13-b' ye bakıldığında sistem, zaman gecikmesinin olmadığı durumda(aynı PI katsayılarla) çok daha iyi performans gösterip, daha iyi bir kontrol sağlayabilmektedir. Önceki bölümlerde pompa dinamiğinin olumsuz etkisi üzerinde de durulmuştu, pompa dinamiğinin aksine sistemdeki zaman gecikmesi bertaraf edilebilir. Dikkat çekilmek istenen bir diğer nokta ise rastgele PI katsayılarla kontrol edilmek istenen sistemde yine farklı sistem cevapları oluşacak, buda modelin farklı yönleriyle sınanmasına yarayacaktır.



Şekil 5.13. a) Zaman gecikmeli sistemde deney ve model sonuçlarının karşılaştırılması b) zaman gecikmesiz simülasyon sonucu

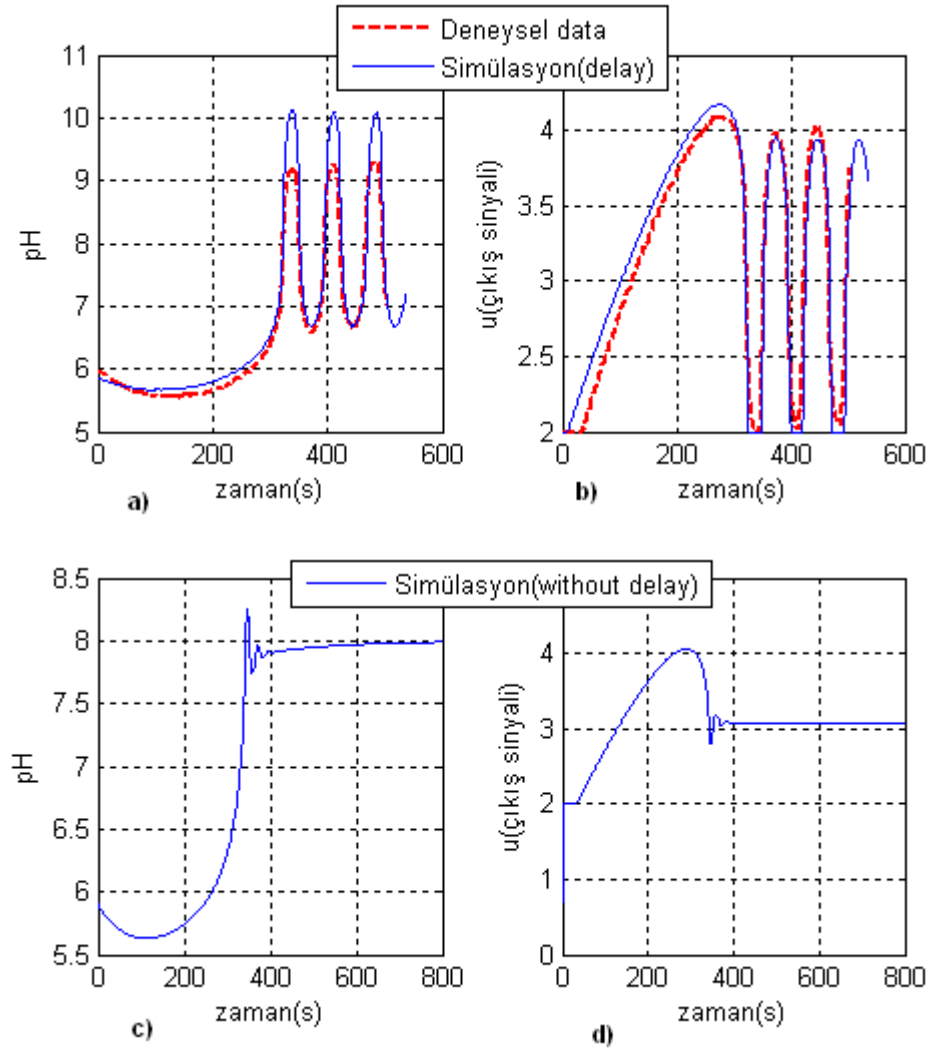
İkinci deneyde yine 0.778L hacmindeki reaktöre başlangıçta pH'ı 6.08 olan ($Ca_0=0.0227M$, $CB_0=0.0218M$) çözelti konuldu, 0.05M'lık asetik asit çözeltisi 30cc/dak'lık debi ile beslenmeye başlandığı anda kontrolör devreye sokularak 0.042M'lık NaOH ile pH 7'ye getirilmeye çalışıldı. PI katsayıları sırasıyla 1.25 ve 120 alındı. Deneyel ve teorik sonuçların uyumu Şekil 5.14-a,b de zaman gecikmesinin olmadığı durum ise 5.14-c,d de gösterilmektedir. Ayrıca Şekil 5.14-e de zaman gecikmeli sistem optimize edilmiş PI katsayıları olarak $K_p=1.97$ $\tau_I=110$ kullanılmıştır (optimum değerler, deneyde kullanılan değerlere yakındır).



Şekil 5.14 Zaman gecikmeli sistemde deney ve simülasyon sonuçları

Şekil 5.14-e bakıldığında, optimize edilen zaman gecikmeli sistemin set noktasına temkinli yaklaştığı ayrıca sistemde salınımların meydana geldiği görülmektedir. Bu sisteme dışarıdan bir bozucu etki verildiğinde sistem bunu geç fark edecek buda kararsızlığa neden olacaktır.

Bu alandaki son çalışmada ise; 0.778L hacmindeki reaktöre başlangıçta pH'ı yaklaşık 5.9 olan ($Ca_0=0.0201M$, $CB_0=0.0189M$) çözelti konuldu ardından 0.05M'lık asetik asit çözeltisi 30cc/dak'lık debi ile beslenmeye başlanıldığı anda kontrolör devreye sokularak 0.042M'lık NaOH ile pH 8'e getirilmeye çalışıldı. PI katsayıları sırasıyla 0.75 ve 180 alındı.



Şekil 5.15. Zaman gecikmeli sistemde deney ve simülasyon sonuçları

Şekil 5.15-a da deneysel data ve zaman gecikmesinin eklendiği simülasyon sonuçları üst üste çizildi, buradan modelin yine sistemi yeteri kadar temsil ettiği söylenebilir. Ayrıca 5.15-c de ise zaman gecikmesi olmadan aynı PI katsayılarla simülasyon yapıldı, buradan da pH'ın salınım yapmadan fazla bir aşım olmadan istenilen değere ulaştığı görülmektedir

Bundan sonraki çalışmalarda zaman gecikmesinin etkisi ortadan kaldırılarak bulanık mantık çalışmalarına devam edildi.

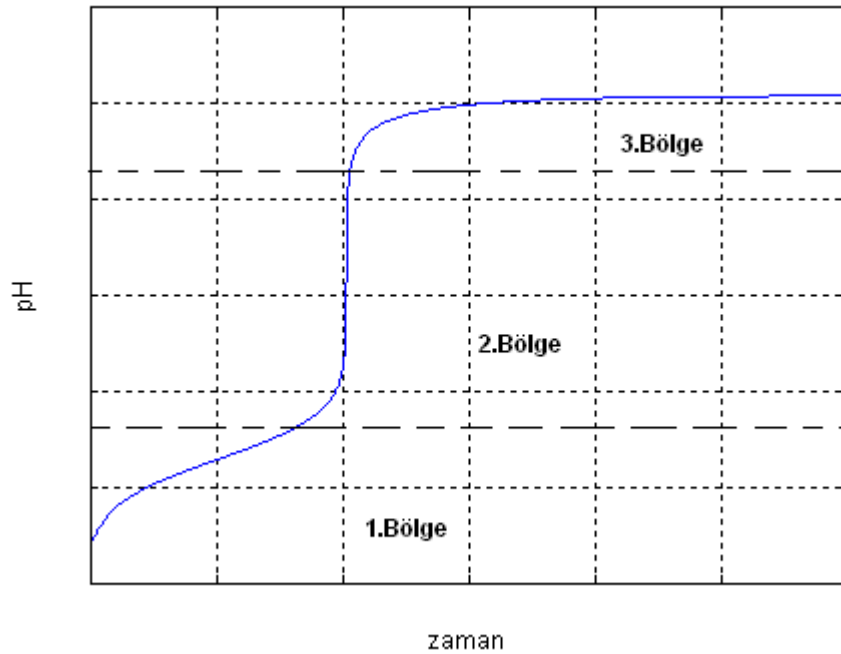
5.9. Bulanık Mantık Kontrol Çalışmaları

PID kontrol lineer kontrol teknikleri arasında yer alır. Oysa nötralizasyon nonlinear bir prosestir. Literatürde geleneksel PI kontrolün böyle bir sistemi kontrol etmesinin güçlüğünden ve yetersizliğinden bahseden birçok çalışma vardır. Bunun nedenini ise asit ve baz ilavelerine pH yanıtının son derece nonlinear olması, zamanla değişen özelliklerin olması, çeşitli şartlarda çalışılması (farklı pH değerlerinde çalışılması, değişen reaktör hacimleri v.s) örnek olarak verilebilir. Şayet işletme tek bir pH noktasında çalışıyor, reaktör hacmi, konsantrasyonlar, debiler zamanla değişmiyorsa, çalışılan nokta civarında bir lineerlik kabulü yapılabilir, bu durumda PID kontrol iyi bir performans sergiler (Daha önceki çalışmalarda bu görüldü). Ama dediğimiz gibi bu durum çok nadir görülür genellikle işletmelerde birden fazla ürün üretilir ve genellikle değişen koşullarda çalışılır. Kontrol sisteminin işletmeyi sadece bu değişik noktalarda düzenlemesi yetmez aynı zamanda ileri bir kontrol algoritmasının gerekli olduğu geçiş bölgelerinde de kontrol etmesi gereklidir. İşte burada Bulanık Mantık kontrol devreye giriyor.

5.9.1. Bulanık Mantık Kontrol Tasarımı

pH prosesi(ve bir çok endüstriyel proses) farklı çalışma noktaları nazara alındığında hatırı sayılır bir nonlinearlik sergiler. Proses karakterizasyonuna bağlı olarak (örneğin proses kazancı G_p) titrasyon eğrisindeki bu bölgeler Şekil 5.16 da gösterildiği gibi yüksek kazançlı ve düşük kazançlı bölgeler olarak kategorize edilebilir.

Şayet bu bölgeleri belirtmek adına yardımcı bir değişken (AV) kullanacak olursak aşağıdaki “bulanık ilişkiler” yazılabilir.



Şekil 5.16. Proses kazancının bölgelere göre değişimi

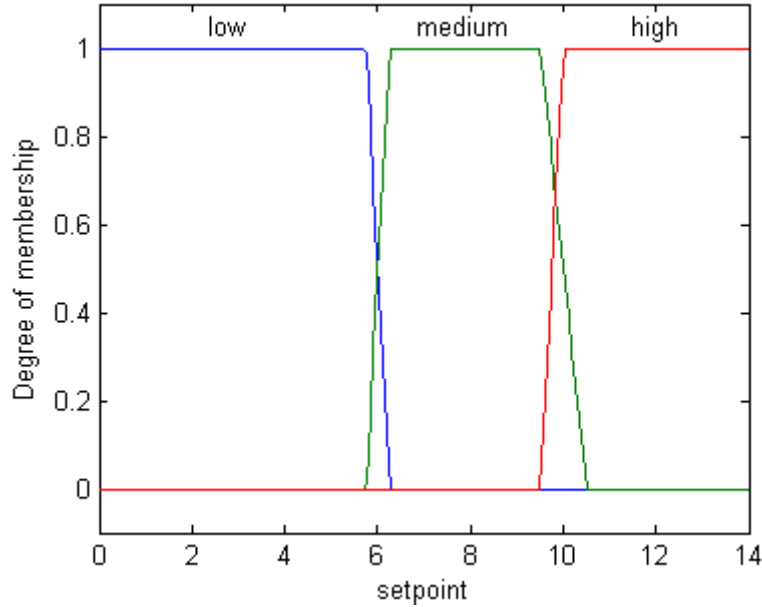
Şayet AV 1. Bölgede ise, O halde Gp düşüktür

Şayet AV 2. Bölgede ise, O halde Gp Yükseksektir

Şayet AV 3. Bölgede ise, O halde Gp düşüktür

Başlangıçta bu farklı bölgelerin hepsinde yeterli bir performans elde etmek üzere farklı bölgelerde farklı kontrol stratejine izin veren üç girişli bir bulanık denetleyici kullanıldı. Sadece hata(e) ve hatanın değişimi(de) yerine prosesin hangi bölgesinde çalışıldığı bilgisini veren üçüncü bir değişken(AV) kullanıldı. Böylece, bulanık kontrolün çıkışı bu üç girişin bir fonksiyonu haline geldi.

Sırayla kullanılacak olan bulanık mantık kontrolü tasarlanmaya çalışıldı. Denildi ki yeni bir giriş değişkeni tanımlandı, bu yardımcı değişken nötralizasyon eğrisini üç bölgeye ayırdı, bu üç bölgenin ikisinde proses kazancı düşük birinde ise yüksek. Kazancın düşük olduğu bölgelerde pH değerinde küçük bir değişiklik yapmak için baz akış hızında anlamlı bir değişiklik yapmak gerekecek, oysa proses kazancının yüksek olduğu bölgede baz debisindeki küçük bir değişiklik bile pH değerini 3,4 birim değiştirebilir. pH set değeri hangi bölgede çalışıldığı hakkında bilgi verir dolayısıyla pH set noktası yardımcı değişken olarak seçildi. Daha sonra önceki bilgi ve tecrübelerle nötralizasyon eğrisi, set noktası için üç üyelik fonksiyonu ile tanımlanmaya çalışıldı.



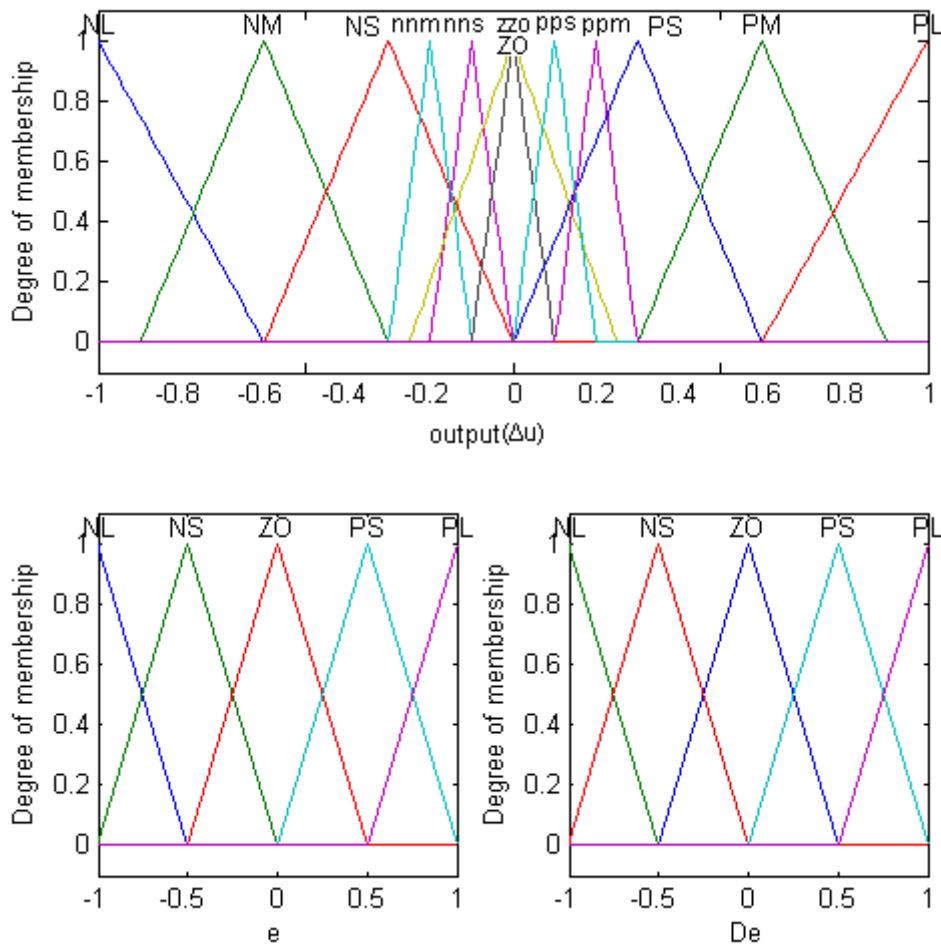
Şekil 5.17. Yardımcı değişken (ayar noktası) için üyelik fonksiyonları

Diğer iki giriş değişkeni(e, de) ve çıkış değişkeni(Δu) için üyelik fonksiyonları da belirlendi. Her bir değişken için gerekli üyelik fonksiyonu sayısı farklı farklı olabilir. Genellikle fazla üyelik fonksiyonu daha fazla fonksiyonel ilişki sağlar, kontrolördeki nonliner ilişkiyi artırır. Fakat bu seferde çalışılmayı zorlaştırır.

Burada şu noktaya dikkat çekmek lazım ki çıkış değişkeni(Δu) için gerekli üyelik fonksiyonu sayısı diğerlerine nazaran çok daha fazla olmalıdır. Çünkü kontrol

hareketi kimi yerlerde agresif kimi yerlerde yumuşak bir şekilde olacaktır[Fuente, 2006].

Buradaki çalışmalarda Fuente ve ark. (2001)'in seçmiş olduğu üyelik fonksiyonları kullanıldı. Hata ve hatanın değişimi için beşer çıkış değişkeni için on iki üyelik fonksiyonu seçildi.



Şekil 5.18. Hata (e), Hatanın değişimi (de) ve Çıkış değişkeni (Δu) için üyelik fonksiyonları.

Şekillerde üyelik fonksiyonlarının dilsel niteleyiciler olup;

N; Negatif, P; Pozitif, L; Large(Büyük), M; Medium (orta), S; Small(Küçük), ZO; Zero(Sıfır) dır.

Şekil 5.9.3' e bakıldığında değişkenlerin tanımlandıkları evrende [-1 1] aralığında oldukları görülüyor. Bunun nedeni hepsinin belli katsayılar ile skalalandırılmış olmalarıdır.

$$e = e^*/S_e \quad de = de^*/S_{de} \quad \Delta u = \Delta u^*/S_{\Delta u}$$

Burada e , de ve Δu skallandırılmış değişkenler olup e^* , de^* , Δu^* ise skalalandırılmamış giriş değişkenleridir.

S_e , S_{de} ve $S_{\Delta u}$ ise bulanık denetleyicinin ayar parametreleridir. Bu çalışmanın ana gövdesini bu parametrelerin ayarlanması ve optimum kural tabanının bulunması oluşturdu.

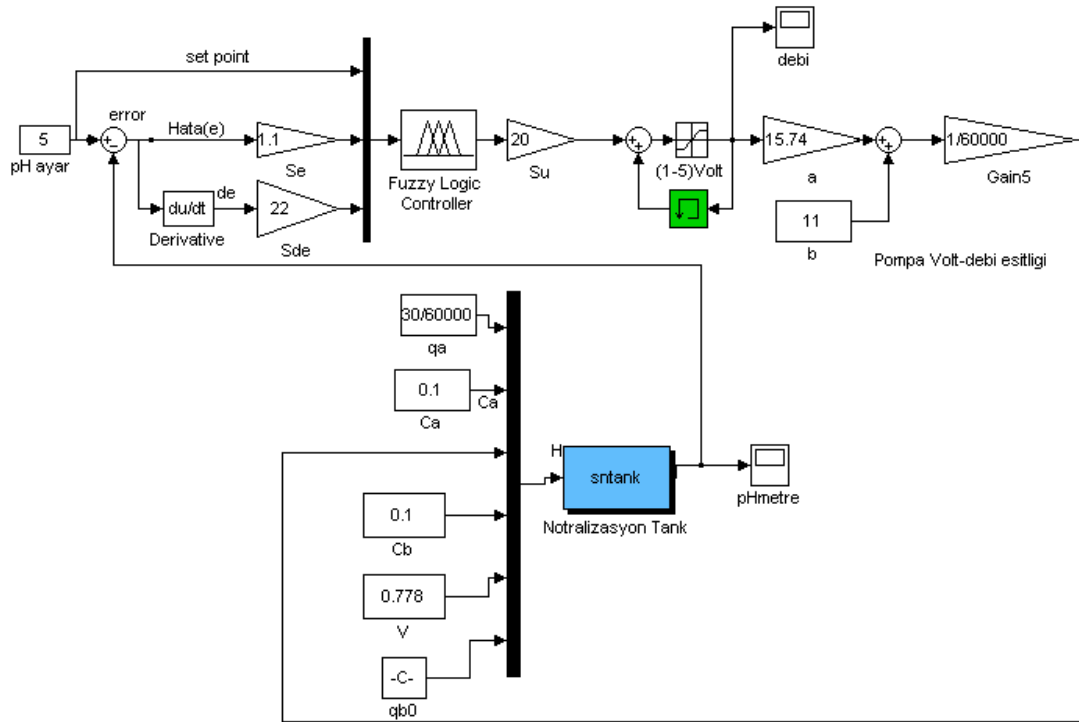
Hata, hatanın değişimi ve yardımcı değişken olmak üzere üç tane giriş değişkeni var bu üç giriş değişkeni sırasıyla beş, beş ve üç adet üyelik fonksiyonuna sahip, dolayısıyla ortaya $5*5*3=75$ olasılığın olduğu bir durum çıktı.

Yani, 75 mekanik kural oluştu. Burada 3 üyelik fonksiyonuna sahip yardımcı değişken, iki düşük kazançlı birde yüksek kazançlı bölgeyi temsil etmektedir, dolayısıyla kazancın aynı olduğu bölgeler için kuralın artçıları(consequent) eşittir. Tablo 5.7'e bakılsın[Fuente,2006].

Tablo 5.7. Çok bölgeli Bulanık Kontrol için kural tabanı

<i>e</i> <i>de</i>	<i>NL</i>	<i>NS</i>	<i>ZO</i>	<i>PS</i>	<i>PL</i>
AV(Yardımcı Değişken) Low					
<i>NL</i>	NL	NL	NM	NS	ZO
<i>NS</i>	NL	NL	NM	ZO	PS
<i>ZO</i>	NL	NM	ZO	PM	PM
<i>PS</i>	NM	ZO	PM	PL	PL
<i>PL</i>	ZO	PM	PL	PL	PL
AV(Yardımcı Değişken) Medium					
<i>NL</i>	NM	NS	nnm	nns	zzo
<i>NS</i>	nnm	nns	nns	zzo	pps
<i>ZO</i>	nns	nns	zzo	pps	pps
<i>PS</i>	nns	zzo	pps	pps	ppm
<i>PL</i>	zzo	pps	ppm	PS	PM
AV(Yardımcı Değişken) High					
<i>NL</i>	NL	NL	NM	NS	ZO
<i>NS</i>	NL	NL	NM	ZO	PS
<i>ZO</i>	NL	NM	ZO	PM	PM
<i>PS</i>	NM	ZO	PM	PL	PL
<i>PL</i>	ZO	PM	PL	PL	PL

Daha öncede belirtildiği gibi simülasyon ve optimizasyonlar matlab m.file ortamında yapıldı, fakat yine görsel olarak idrak edilmesi açısından burada muadili, simülink ortamında gösterildi, Şekil 5.19'a bakılsın(sntank adlı s-fonksiyon dosyası PID kontroldeki ile aynı m.file dır, gerekmesi durumunda ek-3 e başvurulabilir).



Şekil 5.19. Bulanık mantık kontrol simulink blok diyagramı

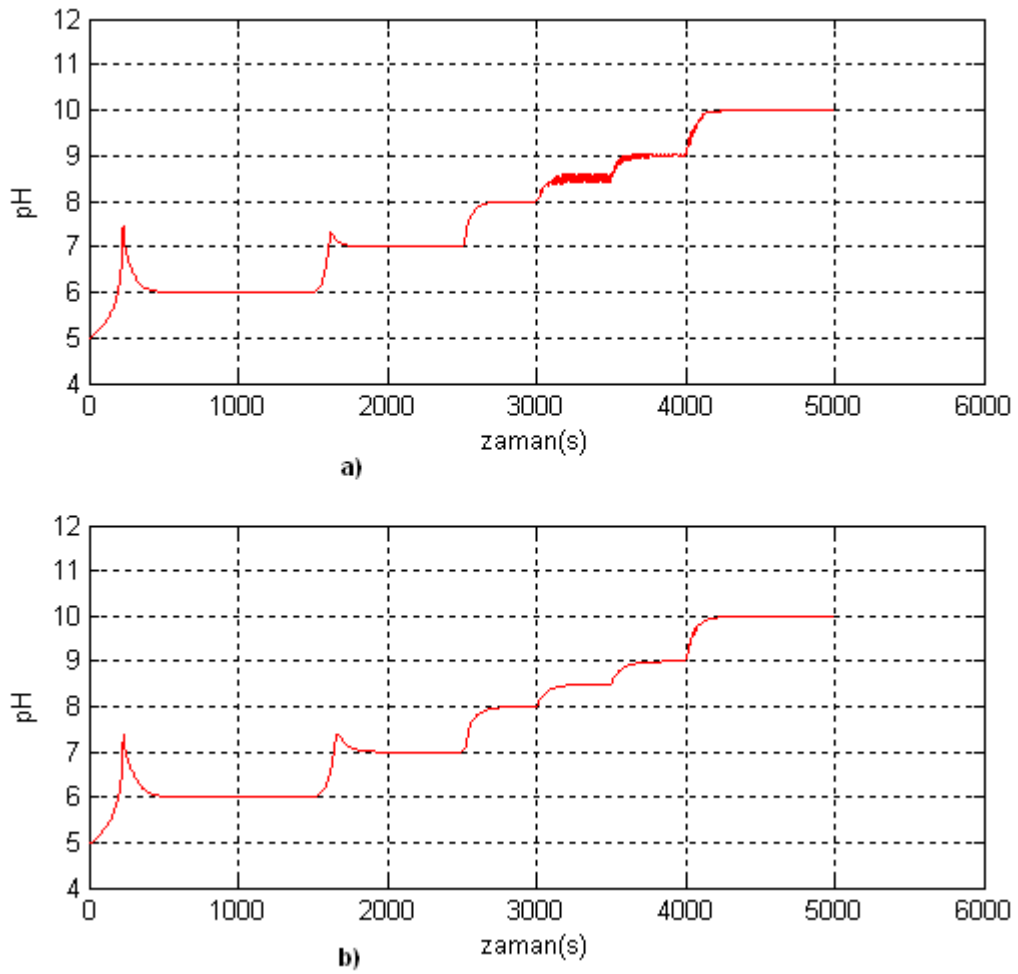
Skala katsayılarını ayarlamak için Particle Swarm optimizasyon metodu ITSE veya ISE kriterini minimize etmek için kullanıldı. Bunun için nötralizasyon eğrisinin tamamını temsil edecek şekilde pH değeri optimizasyon sırasında değiştirildi, bu sayede sadece tek bir aralıkta değil tüm eğriyi temsil edecek skala katsayıları arandı. Şöyle ki pH 5 ten başlatılarak set noktası sırasıyla 6,7,8,8.5,9 ve 10'a ayarlandı ve pH değerinin her bir set değerine ulaşip kararlı hale geçmesi için yeteri süre tanındı, bu süre zarfında istenilen değere ulaştıracak katsayılar arandı. pH 5-10 arası nötralizasyon eğrisini yeterince temsil etmektedir dolayısıyla bu sınırların altına inilmedi. Bu bölgelerde sergilenecek performans diğer noktalarda da sergilenecektir. Bunun nedeni pH 5-6 arasında proses düşük proses kazancına sahip dolayısıyla pH 5'in altında düşük kazançlı bölge, aynı zamanda pH 10'un üzerinde düşük kazançlı bölgedir.

Buradaki çalışmaların tümünde asit debisi 30cc/dak, konsantrasyonlar $Ca=0.05M$, $Cb=0.05M$, kararlı haldeki baz debisi 19.85 cc/dak, reaktör hacmi 0.778L alındı. Ayrıca başlangıçta reaktör içerisindeki konsantrasyonlar $Ca_0=0.0301M$,

$C_{b0}=0.0199M$, dolayısıyla $pH_0=5$ olarak alındı. Simülasyonlar 5000 s devam ettirildi.

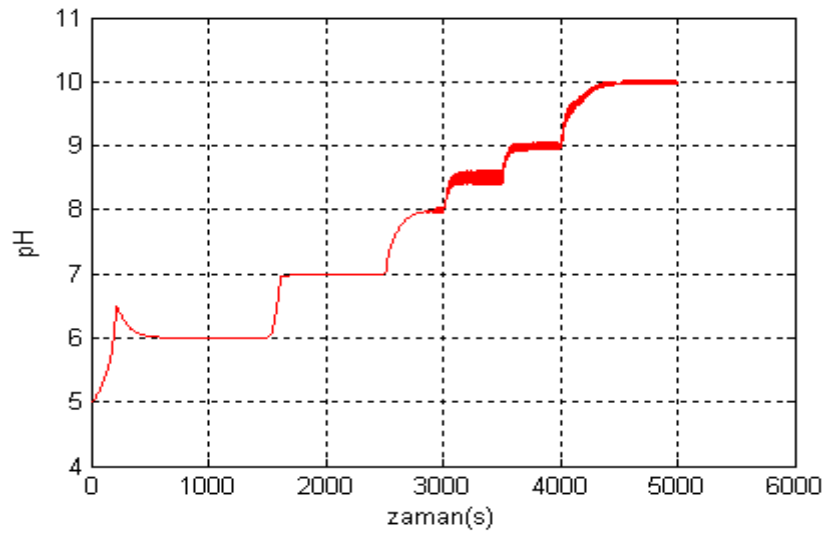
Tablo 5.8. Üç giriş değişkenli denetleyici için optimizasyon sonuçları

<i>Optimum Sonuçlar</i>	<i>ITSE*105 (Birincil amaç)</i>	<i>ISE</i>	<i>Ceza Puanı</i>	<i>CPU Time(s)</i>	<i>Şekil No</i>
Se=0.4563 Sde=27.155 SΔu=0.2775	3.84	316.5	Yok	12 saat 36 dak.	5.9.1.5a
Se=0.17.59 Sde=12.588 SΔu=0.3225	4.467	356.8	abs(hata)* 10^5	12 saat 21 dak.	5.9.1.5b
<i>Optimum Sonuçlar</i>	<i>ITSE*105</i>	<i>ISE (Birincil amaç)</i>	<i>Ceza Puanı</i>	<i>CPU Time(s)</i>	<i>Şekil No</i>
Se=0.5732 Sde=58.3 SΔu=0.2438	5.12	299.4	Yok	14 saat 25 dak	5.9.1.6
Se=2.068 Sde=48.6 SΔu=0.0764	36.7	7861	abs(hata)* 10^3	11 saat 38 dak.	Kontrol edemedi



Şekil 5.20. ITSE kriteri optimize edilen 3 giriş değişkenli denetleyicinin performansı a) ceza puansız b) ceza puanlı

Şekil 5.20-a optimizasyon programında titreşimlere herhangi bir ceza puanı verilmeden elde edilen katsayılar yardımı ile çizildi. Sonuç olarak dönüm noktası civarlarında kontrolör iyi bir performans sergileyemedi. Daha sonra her bir set noktası için ayrılan zaman dilimlerinin son anlarına doğru oluşan hatalara, büyük ceza puanları verip bu ceza puanlarının amaç fonksiyonuna ilave edilmesi ile yeni bir çalışma yapıldı. Buradan elde edilen katsayılar yardımı ile Şekil 5.20-b çizildi, sonuç olarak bütün bölgelerde iyi bir performans sergileyen bir kontrolör elde edildi. Amaç fonksiyonu ISE kriteri seçildiğinde ceza puansız en düşük ISE elde edildi fakat bu durumda da yine salınımlar oluştu (Şekil 5.21), bu salınımlar ceza puanı ile giderilmek istenildiğinde kontrolör beklenen performansı gösteremedi.



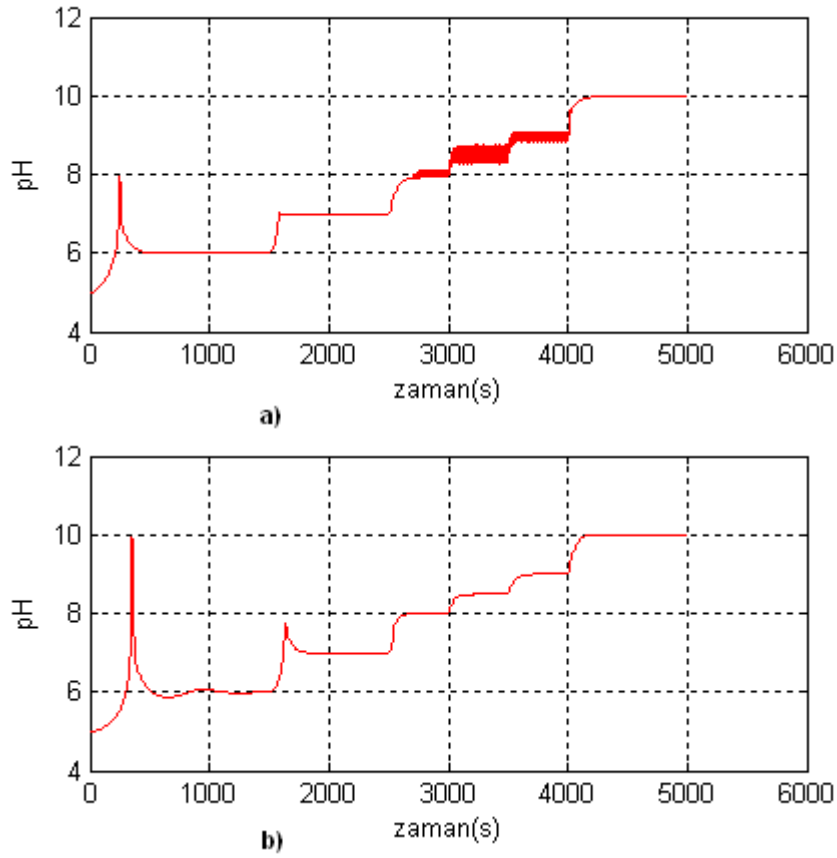
Şekil 5.21 ISE kriteri optimize edilen 3 giriş değişkenli ceza puansız denetleyici performansı

Bu noktadan sonra, 3 giriş değişkeni yerine 2 giriş değişkeni kullanarak sistemin ne kadar kontrol edilebileceğine bakıldı bir diğer ifade ile yardımcı değişkenin performansa ne kadar katkıda bulunduğu ortaya kondu. Şöyle ki yardımcı değişkeni (AV) devre dışı bırakıp 2 girişli($5 \times 5 = 25$ kurallı) sistem için skala katsayıları optimize edilmeye çalışıldı. Bunun için sistemi düşük proses kazançlı bir sistem gibi düşünüp, kural tabanı olarak 1. Bölgedeki(3.bölgedeki ile aynı) kural tabanı seçildi.

Kısacası kontrole sadece hata(e) ve hatanın değişimi(de) girdi, kontrolör kural tabanını kullanarak çıkış için değer üretti.

Tablo 5.9. İki giriş değişkenli denetleyici için optimizasyon sonuçları

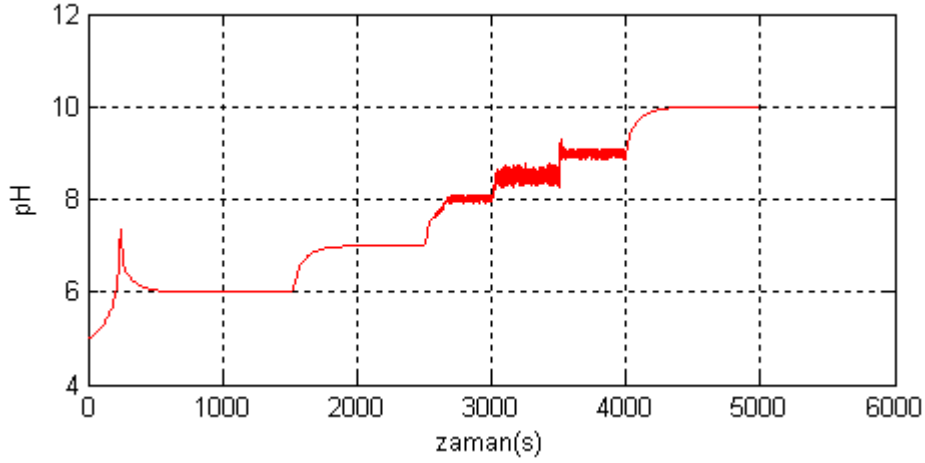
<i>Optimum Sonuçlar</i>	<i>ITSE*105 (Birincil amaç)</i>	<i>ISE</i>	<i>Ceza Puanı</i>	<i>İşlem (CPU) süresi</i>	<i>Şekil No</i>
Se=0.5747 Sde=42.395 SΔu=0.4328	3.299	310	Yok	12 saat 45 dak.	5.9.1.7-a
Se=0.283 Sde=13.956 SΔu=0.285	5.05	691	abs(hata)*10 ⁵	.8 saat 25 dak.	5.9.1.7-b
<i>Optimum Sonuçlar</i>	<i>ITSE*105</i>	<i>ISE (Birincil amaç)</i>	<i>Ceza Puanı</i>	<i>CPU Time(s)</i>	<i>Şekil No</i>
Se=0.98 Sde=100 SΔu=0.32	4.06	313	Yok	2 saat 48 dak	5.9.1.8
Se=0.2259 Sde=10.01 SΔu=0.389	-	10908	abs(hata)*1000	2 saat 46 dak	Kontrol edemedi



Şekil 5.22. ITSE kriteri optimize edilen iki giriş değişkenli denetleyici performansı
a) ceza puansız b) ceza puanlı

Şekil 5.22-a'nın performansı gerek 2 girişli gerekse 3 girişli kontrol içerisinde en düşük ITSE değerine sahip fakat titreşimin olması hasebiyle zaten iyi bir denetleyici olarak sayılmadı. Şekil 5.22b'de görüldüğü gibi denetleyici 25 kuralla gayet iyi bir performans sergilemektedir, fakat ITSE ve ISE kriterlerinin 3 girişli denetleyiciye göre çok yüksek olduğu ortadadır.

Şekil 5.23 ISE kriteri optimize edilerek elde edildi, buda 3 girişli denetleyiciye göre iyi bir değer fakat yine titreşimli ve titreşimi gidermek adına eklenen ceza puanlarının yardımı ile de sistem kontrol edilemedi.



Şekil 5.23. ISE kriteri optimize edilen 2 giriş değişkenli ceza puansız denetleyici performansı

Sonuç olarak; buraya kadar yapılan çalışmalar, ITSE kriteri kullanarak elde edilen sonuçların kontrol edilebilirlik açısından daha iyi bir performans sergilediğini gösterdi. Ayrıca yardımcı değişken sayesinde bulanık mantık kontrolün performansına önemli ölçüde katkı sağlandığı görüldü. Bu nedenle en iyi sonuç olarak, 3 giriş değişkeninin kullanıldığı, ITSE kriterinin ceza puanlı optimize edilmesi ile elde edilen skala katsayıları alındı. Fakat burada kural sayısının fazla olması, özellikle gerçek zamanlı çalışıldığında kontrolöre önemli ölçüde işletme zorluğu getireceğinden kural sayısını azaltmaya yönelik bazı çalışmalar yapıldı.

5.9.2. Kural Tabanı İndirgeme Çalışmaları

5.9.2.1. Bulanık Küme Eşleştirme Yaklaşımı

Bu bölümde ilk olarak kural tablosundaki uzman tabanlı kontrol kurallarının bulanık küme eşleştirme yaklaşımı(Fuzzy matching set approach) ile her birinin birbiriyle olan tutarsızlık ve fazlalık hesaplarının yapılması amaçlandı. Daha sonra maksimum fazlalığa ve tutarsızlığa sahip kuralların kural tabanından performansı etkilemeyecek veya iyileştirecek şekilde çıkarılması öngörüldü.

Genel olarak bulanık kurallar, Eğer X O halde Y şeklinde gösterilebilir, burada X kuralın öncülünü, Y ise artçılını göstermektedir, dolayısıyla bir veya birden fazla kuralın hemen hemen aynı öncül şartlar(X_i, X_k) altında sergiledikleri kontrol çıkışı(Y_i, Y_k) farklı oluyorsa bu denetleyicinin performansının düşmesine neden olacaktır. Yine İki kuralın öncül kısımları olan X_i ve X_k da küçük bir farklılık olduğunda bu kuralların artçıları olan Y_i ve Y_k da küçük farklılık oluşuyorsa bu iki kuralın birbiri ile uyumlu olduğu söylenebilir.

Literatürde tutarsızlık seviyesi ölçümü için C_{ik} indisi tanımlanır;

$$C_{ik} = |\Pi(X_i, X_k) - \Pi(Y_i, Y_k)| \quad (5.6)$$

$\Pi(X_i, X_k)$ ve $\Pi(Y_i, Y_k)$ sırasıyla (X_i, X_k) ve (Y_i, Y_k) gibi iki bulanık kümenin

olasılık ölçümleridir (Possibility measure) ve aşağıdaki bağıntıyla tanımlanırlar.

$$\Pi(X_i, X_k) = \sup [\min(X_i(x), X_k(x))] \quad (5.7)$$

Şayet iki bulanık küme eşit ise bunların olasılık ölçümü sonucu 1 olacaktır. Şayet eşit değillerse olasılık ölçümünün sonucu sıfıra eşit olacaktır. Dolayısıyla iki bulanık kuralın öncülleri ve artçıları eşit olduğunda tutarsızlık seviyesi sıfır olacaktır. Kuralların öncülleri eşit artçıları farklı, ya da tam tersi artçıları eşit öncülleri farklı olduğunda ise tamamen tutarsız kural çiftleri oluşacak dolayısıyla tutarsızlık seviyesi 1'e eşit olacaktır. Buradan olasılık ölçümünün iki bulanık küme arasındaki bir nevi eşitlik derecesi ölçümü olduğu anlaşılıyor. Olasılık ölçümü yerine literatürde daha kullanışlı olduğu belirtilen fuzeq(bulanık eşitlik) operatörü tanımlanmıştır[ciliz, 2005].

$$\{A = B\} \Leftrightarrow \{A \subset B\} \cap \{B \subset A\} \quad (5.8)$$

$$\text{Fuzeq}(A \mid B) = \{A(x) \emptyset B(x)\} \cap \{B(x) \emptyset A(x)\} \quad (5.9)$$

$\emptyset$ operatörü burada altküme ($\subset$) ye denk gelmektedir.

$$A(x) \tilde{\cap} B(x) = \sup (c \in [0,1] \mid A(x) \cap C \leq B(x)) \quad (5.10)$$

Burada her bir nokta için 5.10 koşulunu sağlayan maksimum C değerleri hesaplanır. C kümesi, B kümesinin A kümesini kapsama derecesini gösterir ve grade of inclusion olarak adlandırılır.

İki bulanık kümenin, 5.10 eşitliği yardımı ile 5.9 dan eşitlik derecesi bulunabilir ve bu da denklem 5.6 de yerine konularak tutarsızlık seviyesi hesaplanabilir. Örnek olarak B'nin A'yı kapsama derecesi 1 A'nında B'yi kapsama derecesi 1 çıktığında bu iki ayrı C kümesinin kesişimi de 1 olacak dolayısıyla $\text{fuzeq}(A|B)$ 1'e eşit çıkacaktır.

Tutarsızlık seviyesine ek olarak birde fazlalık seviyesi ölçümleri yapılır. Çünkü aşırı ve fazla kuralların araştırılıp çıkarılması anlamlı olacaktır. Fazla kuralların kontrolör performansına bir katkıları olmayacağı gibi çıkarılmaları kontrolörün işlem yükünü azaltacaktır. Fazlalık seviyesi ölçümü içinde aşağıdaki tanım yapılmıştır[ciliz, 2005].

$$r_{ik} = (\text{fuzeq}(X_i \mid X_k) + \text{fuzeq}(Y_i \mid Y_k))/2 \quad (5.11)$$

Şayet iki kuralın öncülü ve artçılı eşit ise bu maksimum fazlalık seviyesi verecektir (dolayısıyla her bir kuralın kendisi ile karşılaştırılmasında fazlalığı 1'e zaten eşit olacaktır). Kuralların hem öncülleri hem de artçıları farklı olduğunda bu değer sıfıra eşit olacaktır. Bu şekilde her bir kuralın birbirleriyle olan tutarsızlık ve fazlalık seviyeleri ölçülür (1. Kuralın 75 kuralla, 2. kuralın 75 kuralla, v.s) ve bu seviyeler toplanarak toplam fazlalık seviyesi ve toplam tutarsızlık seviyeleri belirlenir (denklem 5.12), daha sonra en yüksek değerlere sahip kurallar çıkarılarak kontrolün performansına bakılır).

$$Ct_i = \sum_{k=1}^N C_{ik} \quad rt_i = \sum_{k=1}^N r_{ik} \quad (5.12)$$

Buradaki çalışmada bir önceki bölümde 75 kural için elde edilen optimum skala katsayıları kullanıldı. Ayrıca yeni elde edilecek kural tabanını sınamak için

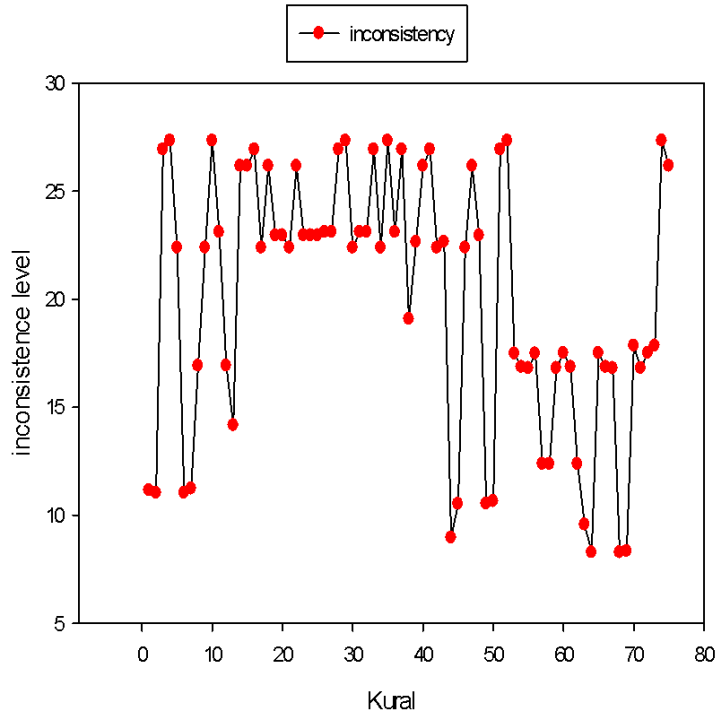
6500 saniyelik zaman diliminde pH değeri step etkilerle artırılıp(şekil 5.26 dan verilen step etkiler görülebilir) ITSE ve ISE kriterleri gözlemlendi.

İlk önce 75(ful) kural ile 6500 saniyelik süre zarfındaki amaç fonksiyonunun ve ikincil amacın değeri hesaplandı ve tutarsızlık-fazlalık seviye ölçümlerine geçildi.

ITSE= $5.02 \cdot 10^5$, ISE=356.8

Burada Kurallar daha öncede belirtildiği üzere Eğer X O halde Y (IF X Then Y) şeklinde yani kuralların öncülleri ve artcilleri karşılaştırılmaları için bir giriş bir çıkış olacak şekilde düzenlenmekte. Kullanılan denetleyicide ise 3 giriş(e,de,AV) 1 çıkış mevcut, yani bu 3 girişin tek girişli muadilinin bulunmalı. Kuralların öncülleri birbirine ve(and) bağlacı ile bağlı olduğundan bulanık kümelerdeki kesişim işlemi ile bu üç giriş tek girişe çevrildi.

Buradan sonra kural tabanındaki kural sayısını azaltmak amacı ile yazılan program çalıştırılarak sonuçlar analiz edildi.

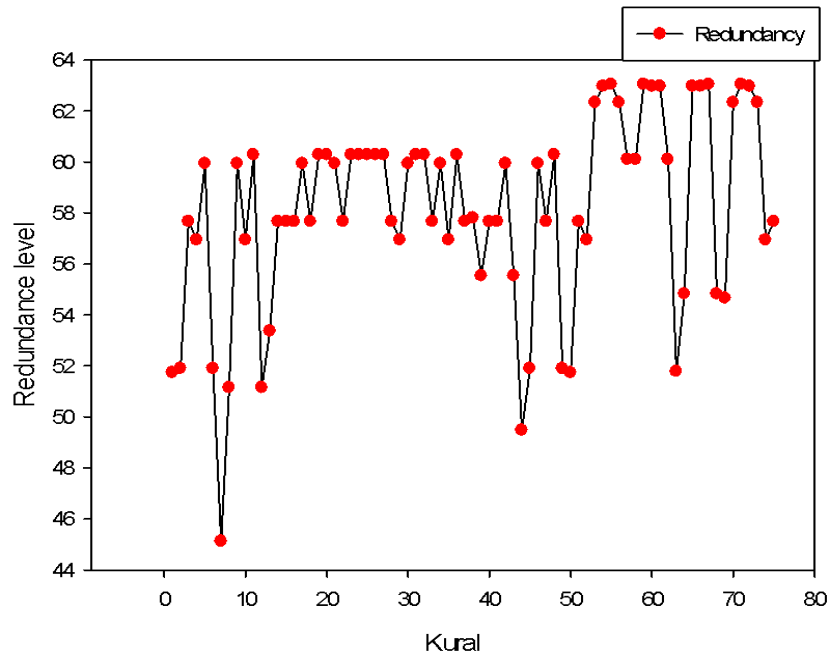


Şekil 5.24. Kuralların tutarsızlık seviyeleri toplamları

Şekil 5.24 kuralların uyumsuzluk seviyeleri toplamını gösteren grafikdir. Yüksek uyumsuzluğa(inconsistence) sahip kuralları sınıflandırılarak tablo 5.10 elde edildi. En yüksek uyumsuzluk seviyesinden başlayarak gruplandırma yapıldı (Ayrıca bütün kurallar tabloya geçirilmedi sadece standart sapmanın üstünde kalanlarla ilgilenildi).

Tablo 5.10. Kuralların tutarsızlık seviyeleri toplamalarının sınıflandırılması

<i>Tutarsızlık seviyeleri</i>			
<i>K</i>	27,33	26,92	26,17
<i>U</i>	4	3	14
<i>R</i>	10	16	15
<i>A</i>	29	28	18
<i>L</i>	35	33	22
<i>L</i>	52	37	40
<i>A</i>	74	41	47
<i>R</i>	-	51	75

**Şekil 5.25.** Kuralların fazlalık seviyeleri toplamaları

Aynı şekilde fazlalık seviyesi toplamı yüksek olandan düşük olana doğru kurallar sınıflara ayrılarak aşağıdaki tablo elde edildi.

Tablo 5.11. Kuralların fazlalık seviyeleri toplamalarının sınıflandırılması

	<i>Fazlalık seviyeleri</i>					
	63,05	62,97	62,33	60,28	60,1	59,94
<i>K U R A L L A R</i>	55	54	53	11	57	5
	59	60	56	19	58	9
	67	61	70	20	62	17
	71	65	73	23		21
		66		24		30
		72		25		34
				26		42
				27		46
				31		
				32		
				36		
				48		

İlk önce tablo 5.11 den fazlalık seviye toplamaları 63,05-62,97-62,33 olan kurallar kural tabanından çıkarılarak amaç fonksiyonu ve ikincil amaca bakıldı.

75-4-6-4=61 kural geriye kalan.

61 kural için;

$$ITSE=4,9959*10^5, ISE=347,585$$

Sonuç iyi, hem kural azaltıldı hem de amaç fonksiyonu iyileşti. Sonra çıkarılan kurallara ilaveten tablo 5.10 daki 27,33 seviyesindeki maksimum uyumsuz kurallarda teker teker çıkarılmaya başlandı aynı zamanda amaç fonksiyonları takip edildi.

Tablo 5.12. Birinci seviyedeki tutarsız kuralların çıkarılması

<i>Çıkarılan Kurallar</i>	<i>ITSE*10⁻⁵</i>	<i>ISE</i>
4	4,9959	347,585
10	4,995	347,55
29	4,995	347,508
35	4,995	347,551
52	4,995	347,551
74	4,995	347,551

Bu noktada hem kurallar azaltıldı hem de performans ilk duruma göre gayet iyi konuma getirildi. Uyumsuz kurallar bir alt seviyeden(26,92) silinmeye devam edildi.

Tablo 5.13. İkinci seviyedeki tutarsız kuralların çıkarılması

<i>Çıkarılan Kurallar</i>	<i>ITSE*10⁻⁵</i>	<i>ISE</i>
3	4,99	347,58
16	4,99	347,55
28	4,99	347,51
33	4,99	347,551
37	8,6	406
41 çıkarıldı 37 tekrar eklendi	4,99	347,551
51	4,99	347,551

37. kuralın çıkarılması ile sistem yeterince kontrol edilemedi bunun üzerine 37. Kural tekrar eklenerek diğer kurallar çıkarıldı.

Aynı şekilde uyumsuzluk seviyesi 26,17 olan kurallarda(14, 15,22, 40, 47, 75. kurallar) teker teker çıkarıldı amaç fonksiyonu gözlemlendi. Aynı sonuç 18. Kuralda da tekrerrür etti, 18. Kuralda tekrar geri eklendi.

Tablo 5.14. Üçüncü seviyedeki tutarsız kuralların çıkarılması

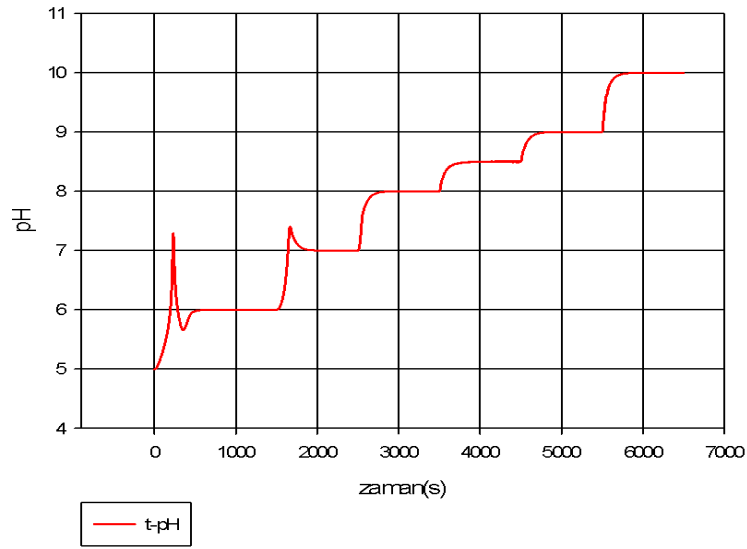
<i>Çıkarılan Kurallar</i>	<i>ITSE*10⁻⁵</i>	<i>ISE</i>
14	4,96	330,817
15	4,949	329,16
18	Kontrol edemedi	--
22 çıkarıldı 18. kural tekrar eklendi	4,949	329,163
40	4,949	329,163
47	4,949	329,163
75	4,949	329,163

Kural tabanında toplam 43 kural kaldı.

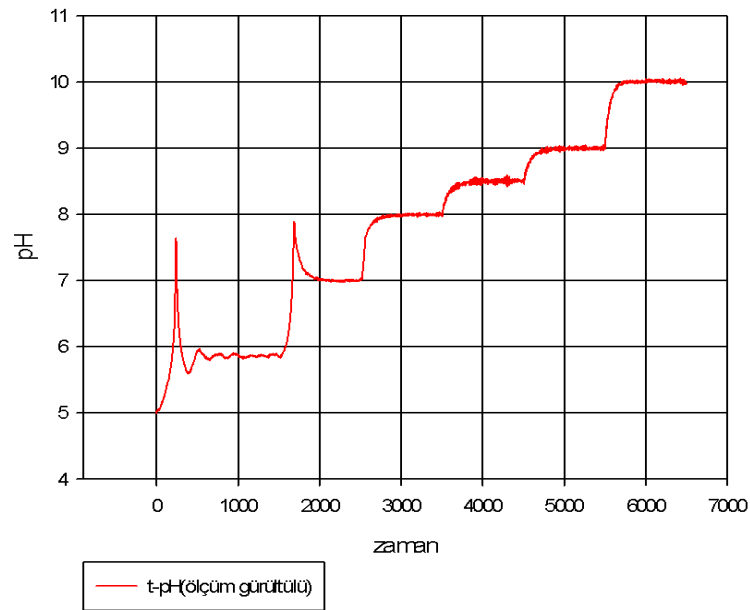
Sorun şu; acaba 18. ve 37. Kurallarda bilinmeyen özel bir şey mi vardı yoksa 26,92 ve 26,17 seviyelerindeki kurallara dokunulmaması mı lazımdı, sadece maksimum seviyedeki kurallar çıkarılmalı diğerleri kalmalı mıydı? Çünkü kurallar bazen aktif bazen ise pasif olabiliyor buda sonuca yansıyabiliyordu.

Sistemin çalışma şartları değiştirip diğer kurallarında farklı çalışma şartlarında ki davranışlarına bakıldı. Bunun için sistemdeki pH ölçümüne deneysel sistemin doğasında da var olan şiddeti biraz fazla gürültüler eklenip kural tabanının performansı izlendi.

pH değeri 5'ten 6'ya, 6 'dan 7'e, 7'den 8'e, 8'den 8,5'a 8,5'dan 9'a, 9'dan 10'a steplerle değiştirildi.



Şekil 5.26. 43 kurallı denetleyicinin performansı



Şekil 5.27. 43 kurallı denetleyicinin gürültü varlığındaki performansı

Şekil 5.26 ve 5.9. den görüleceği üzere 26,92 ve 26,17 seviyelerindeki kuralların çıkarılması(18 ve 37 kurallar hariç) başlangıçta iyi bir sonuç verdi fakat şartlar değişince sistemi yeterince kontrol edilemedi, pH 6 yakalanamadı.

Sonuç olarak uyumsuzluğu en yüksek seviyedeki kurallar atıldı, fakat bir alt seviyedeki kurallar atıldığında sistem kontrol edilemediğinden o kurallara dokunulmadı(yani uyumsuzluk seviyesi tablolarından kural çıkarılmadı).

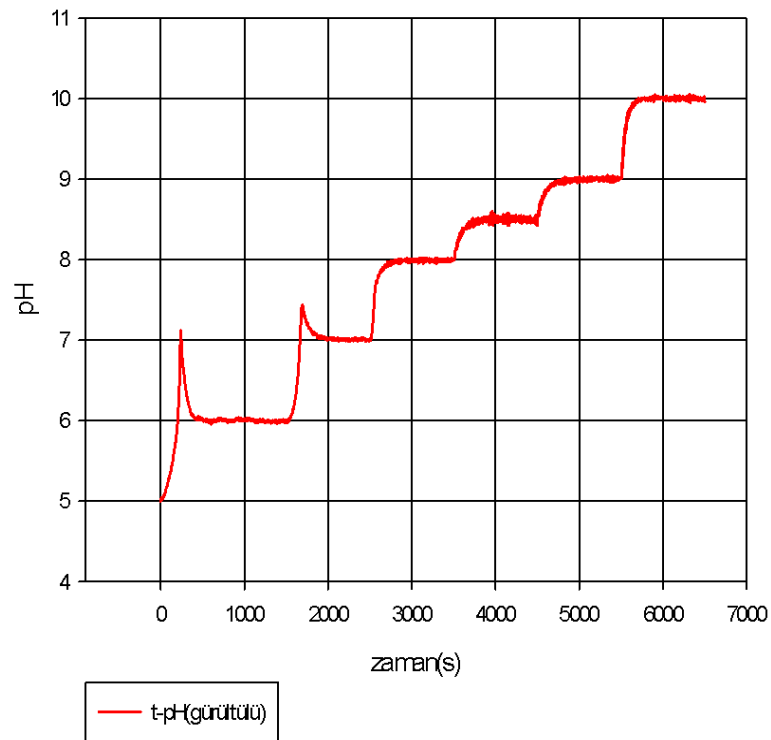
Biraz geriye gidildiğinde çıkarılan 6 uyumsuzluk seviyesi yüksek kural, 14 tane de fazlalık seviyesi yüksek kural var. Bu noktadan sonra kural fazlalık seviye tablosundan başka kural atılabilir mi ona bakıldı.

60,28 seviyesindeki 12 kuraldan oluşan 4. grup tamamen çıkarılarak sonuç alındı.

ITSE= $5,0029 \cdot 10^5$, ISE=352,38 olduğu görüldü.(20+12 kural çıkarılmış oldu)

20 kural çıkarıldığında ITSE= $4,99 \cdot 10^5$, ISE=347,55 idi.

20 kurala göre çok az bir artış var ve bu artış 75 kurala göre de iyi bir sonuç. Ayrıca gürültü varlığındaki performansa da bakıldı.

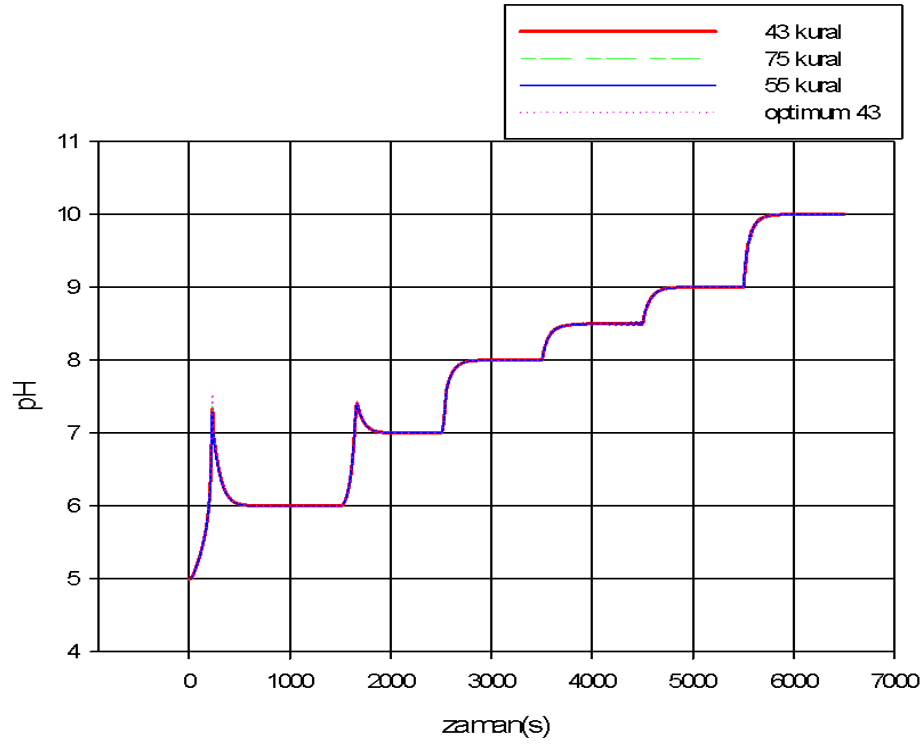


Şekil 5.28. Yeni elde edilen 43 kuralın gürültü varlığındaki performansı

Sonuç gayet iyi, gürültü varlığında da kural tabanı iyi bir performans sergiledi.(uyumsuzluk seviye tablosundan da bundan sonra kural çıkarıldığında performans etkilendiğinden, sistem kontrol edilemediğinden artık kural çıkarılmadı).

Şekil 5.29 da 3 kural tabanının performansı aynı grafikte gösterilmiştir. Değerler birbirine çok yakın olduğundan gözle bir ayırım yapmak zor olmaktadır. Fakat sayısal

değerlerle fark zaten üstte ortaya konmuştu. Ayrıca bunlara ilaveten yeni kural tabanı için skala katsayıları tekrardan optimize edildi amaç fonksiyonu $ITSE=4,96 \cdot 10^5$ ve $ISE=357,8$ olarak hesaplandı. Birincil amaç fonksiyonu $ITSE$ olduğundan bunda iyileşme söz konusu iken ISE değeri biraz arttı.



Şekil 5.29. Farklı kural tabanları ile elde edilen kontrol performansları

Tablo 5.15. Kural sayısı-Amaç fonksiyon tablosu

	$ITSE \cdot 10^{-5}$	ISE
75 KURAL	5,02	356,80
55 KURAL	4,99	347,55
43 KURAL	5,00	352,38
Opt.43 KURAL	4,96	357,80

5.9.2.2. Kişisel İndirgeme Yöntemi

Son çalışma olarak kural sayısı kişisel indirgeme (personal initiative) denilen yöntemle azaltılamaya çalışıldı ve buradaki bulgular 5.9.2.1 deki algoritma ile karşılaştırıldı.

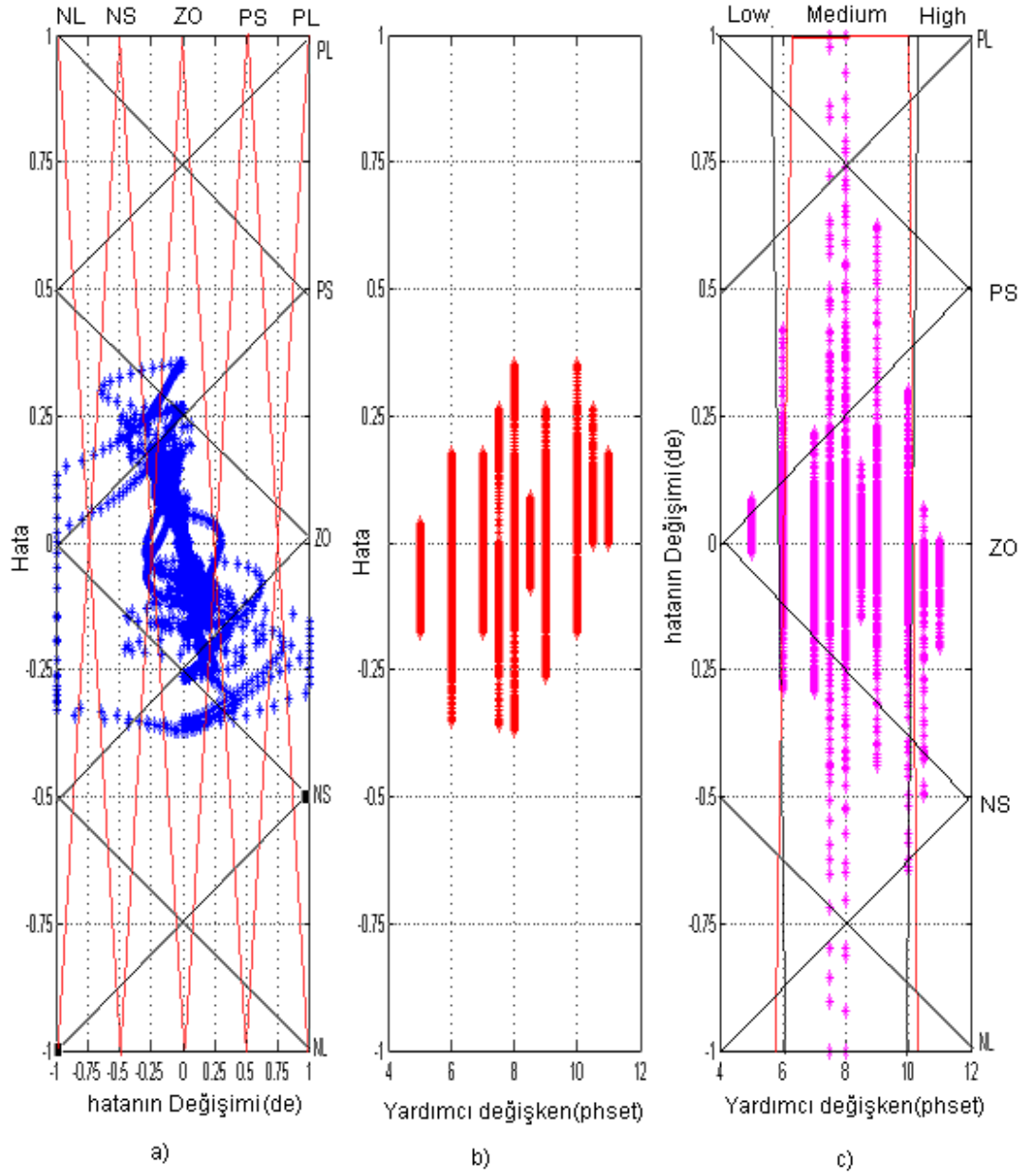
Bu yöntemde hata, hata değişimi ve pHset(AV) dataları yardımı ile saçılım diagramları elde edilebilir ve kullanılmayan kurallar listeden çıkarılabilir. Buradaki ana tema şudur: Daha önce oluşturulan kurallar mekanik kurallardır, yani olasılık hesabına göre oluşturulmuşlardır, kimi durumlarda bu kuralların bazıları hiç kullanılmayabilir veyahut o anki duruma özel olarak kullanılmayabilir[Şen, 2009]. Örneğin çalışılan konuya atfen yardımcı değişken (pHset)'in düşük kazançlı olduğu bölgelerde hatanın değişimi (de) NL veya PL gibi çok büyük değişimler sergilemeyecektir, çünkü böyle bir etki oluşturmak için çok anormal değişimlerin olması gerekecektir (asit debisinin 10-20 kat artması, pHset noktasının 7-8 birim birden değiştirilmesi v.s).

Eldeki 75 mekanik kural ve optimize edilmiş skala katsayıları kullanılarak simülasyon yapıldı. Geniş bir spektrumda hata(e), hata değişimi(de) ve bunlara mukabil pHset dataları toplandı. Ardından şekil 5.30 da ki saçılım diyagramları çizildi.

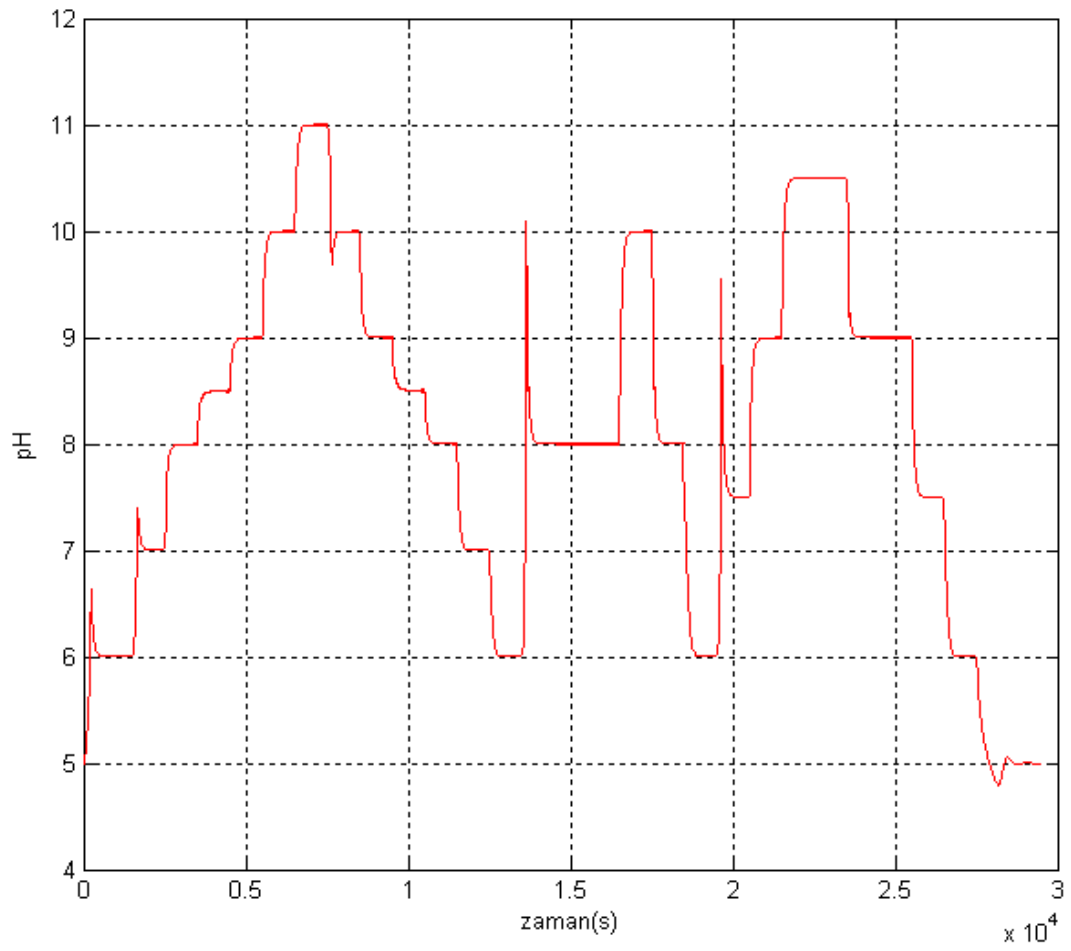
İlk olarak Şekil 5.30-a ve b' ye bakılsın (haliyle buradaki datalar daha öce elde edilen skala katsayıları ile çarpıldıktan sonra toplanan datalardır), hatanın PL ve NL olduğu bölgede hiçbir data olmadığı görülmektedir. Buna göre; hata 5 üyelik fonksiyonundan oluşmasına rağmen bu 5 üyelik fonksiyonundan ikisi kullanılmamaktadır, bu $2*5*3 = 30$ kuralın birden fazlalık olduğu anlamına gelmektedir

Şekil 5.30-c de ise yardımcı değişkenin(pHset) düşük kazançlı oluğu bölgelerde (1.(low) ve 3.(High) bölgelerde) hatanın değişiminin NL ve PL olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla kural tabanından bu kurallarda bulunup çıkarıldı geriye kural tabanında sadece 33 kural kaldı. Bu kurallarla model 6500 sn çalıştırıldı, ITSE= $5.4*10^5$ ve ISE=318.3 olarak bulundu. Sonuçta, ISE değeri diğer kural tabanlarına nazaran çok daha iyi bir seviyeye geldi üstelik kural tabanı diğer kural

tabanlarına nazaran minimum sayıya ulaştı. Elde edilen bu kural tabanı ile nötralizasyon eğrisinin tamamını kapsayacak şekilde çeşitli adım etkiler verilerek son bir deneme yapılarak Sonuç Şekil 5.31 de gösterildi.



Şekil 5.30. Saçılım diyagramları



Şekil 5.31. 33 kuraldan oluşan kontrolün performansı

SONUÇ

Bu tez çalışmasından elde edilen bulguları kısaca özetlemek gerekirse; Öncelikle, yaygın ve bilinen bir denetleyici olmasının yanında basit anlaşılabilir bir matematiğe sahip olması göz önüne alarak PID kontrol tekniğinin pH kontrolünde uygulanması uygun görüldü. pH'ın 6-7-8 olduğu ekivalent nokta civarlarında, kararlı halde çalışan sistemlere adım etkiler verilerek, bu sistemlerin PID kontrolünün yapılabilmesi için optimum PID katsayıları arandı. pH'ın 8-8.5 olduğu noktalarda yoğun titreşimler gözlemlendi, bu titreşimleri gidermek amacıyla yerleşme zamanına doğru oluşan titreşimlere yüksek ceza puanları uygulandı, dolayısıyla sistem biraz daha geç oturdu fakat titreşimler elimine edildi. Bu şekilde elde edilen PID katsayılarla denetleyicinin iyi bir performansla sistemi kontrol ettiği gözlemlendi. Buna ek olarak, kontrol devresinde son kontrol elemanı olan pompa dinamiğinin kontrol üzerindeki etkisine bakıldı, pompa dinamiği modelde iken kontrol devresinin yavaş yanıt verdiği gözlemlendi, buradan pompa dinamiği hesaba katılmadan elde edilen PID katsayıları ile denetleyicinin dönüm noktası civarında iyi bir kontrol yapamayacağı anlaşıldı.

Daha sonra sistemdeki zaman gecikmesi tespit edildi, yine zaman gecikmesinin kontrol üzerindeki etkileri gerek deneysel gerekse simülasyon sonuçları ile ortaya kondu, zaman gecikmesi varlığında sistem kontrol edilirken ciddi salınımların olduğu görüldü. Ayrıca sisteme dışarıdan bir etki verildiğinde sistemin her an kontrolden çıkabilme eğiliminde olacağı kanısına varıldı, dolayısıyla iyi bir kontrol için deney düzeneğinde zaman gecikmesinin minimize edilmesinin gerekliliği ortaya çıktı.

Bu kısımda elde edilen sonuçlara göre yukarıda bahsedilen hususlar proses ve kontrol sisteminde göz önüne alındığında, noktasal pH kontrol için PID kontrolün iyi bir performans sergilediği, buna karşılık şartlara göre birden fazla ayar noktasında pH kontrolü gerektiren ve değişen sistem parametreleri ile çalışan çok ünlü (çok amaçlı) kimyasal tesislerde PID kontrolün yetersiz kalacağı sonucuna varıldı.

Çalışmanın ikinci kısmında bulanık mantık denetleyicilere geçildi, her biri 5 üyelik fonksiyonlu olmak üzere 3 girişli, 75 kurallı bir bulanık denetleyici tasarlandı. Bulanık denetleyicinin ayar parametreleri optimizasyon metotları ile bulunmaya çalışıldı, bunun için ITSE ve ISE kriteri kullanıldı, kontrol edilebilirlik açısından

ITSE kriterinin optimizasyonu ile elde edilen sonuçların kayda değer olduğu görüldü, ISE kriteri ile titreşimli sistemler elde edildi, bu titreşim sorunu ceza puanı ile giderilmeye çalışıldı fakat sistem kontrol edilemedi.

Diğer yandan, çalışmada 3 giriş yerine yardımcı değişkenin olmadığı iki girişli bir bulanık denetleyici tasarlanarak yardımcı değişkenin kontrole getirisine bakıldı, parametreleri ITSE kriteri ile optimize edilen denetleyici ile kontrol edilebilirlik açısından iyi bir sonuç alındı, fakat 3 girişliye göre daha düşük performans elde edildi, yardımcı değişken farklı bölgelerde farklı kontrol hareketi öngörerek kontrol işleminde performanstan ödün vermezken, 2 girişli bulanık denetleyicide, denetleyici hangi bölgede (yüksek kazançlı, düşük kazançlı) çalışıldığı bilgisinden yoksun olduğundan performansı düşük çıktı.

Çalışmanın son kısmında, 3 girişli 75 kurallı bulanık denetleyicinin kural sayısını azaltmak için 2 yöntem denendi. İlk önce “bulanık küme eşleştirme yöntemi” ile kural sayısı 43’e kadar indirildi aynı zamanda performansta bir miktar iyileşme gözlemlendi. İkinci bir yöntem olarak “kişisel indirgeme” yöntemi kullanıldı, hâlihazırda çalışılan sistemde hata(e) ya ait iki üyelik fonksiyonunun ve bazı kuralların kullanılmadığı görüldü, bunların çıkarılması ile kural sayısı 33’e kadar indirildi, aynı zamanda performansta çok daha iyi bir seviyeye getirildi.

KAYNAKLAR

Babuska, R., Oosterhoff, J., Oudshoorn, A., Bruijn, P.M., 2002. Fuzzy self-tuning PI control of pH in fermentation. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 15, 3–15.

Biasizzo, K.K., Skrjanc, I., Matko, D., 1997. Fuzzy predictive control of highly nonlinear pH process. *Computers and Chemical Engineering* 21, s613–s618.

Chan, H.-C., Yu, C.-C., 1995. Autotuning of gainscheduled pH control: An experimental study, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 1718-1729.

Chen, C. -T., Peng, S.-T., 1999. Intelligent process control using neural fuzzy techniques, *Journal of Process Control*, 9 493-503.

Ciliz, M.K., 2005. Rule base reduction for knowledge-based fuzzy controllers with application to a vacuum cleaner. *Expert systems with applications* 28 175-184

Coker, A.K., 2001. Modeling of chemical kinetics and reaktor design, *Gulf professşonal publishing*, 0-88415-481-5

Edgar, C.R., Postlethwaite, B.E., 2000. MIMO fuzzy internal model control. *Automatica* 34, 867–877.

Sperka, L., Meszaros, A., Mizsey, P., Andrasik, A., 2005. Control of pH in a laboratory fermenter using neuro fuzzy technique, *Proceedings of the 16th IFAC World Congress*, 16-1

Fuente, M.J., Robles, C., Casado, O., Tadeo, F., Syefiie, S., 2006. Fuzzy control of a neutralization process. *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 19 905–914.

Fuente, M.J., Sainz, G.I., Alanso, M., Aguado, A., 2005. Neuro- Fuzzy control of pH plant. *Proceedings of the 16th IFAC world congress*

Galan, O., Romagnoli, J.A., Palazoglu, A., 2000. Robust H_{∞} control of nonlinear plants based on multi-linear models: an application to a bench-scale pH neutralization reactor. *Chemical Engineering Science* 55, 4435–4450.

Garrido, R., Adroer, M., Poch, M., 1997. Wastewater neutralization control based in fuzzy logic simulation results, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 36, 1665-1674.

Ghee, N., T., Kumeresan, S., Fan, L.C., 2002. Fuzzy PID control to control the pH neutralization process. *Student conference on research and development proceeding, Malaysia* 0-7803-7565-3, 330- 334

Gustafsson, T.K., Waller, K. V., 1992. Nonlinear and adaptive control of pH, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 31, 2681-2693.

Gustafsson, T.K., Skrifvars, B. O., 1995. Sandström, K. V., Waller, K. V., Modelling of pH for control, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 34, 820-827.

Hall, R. C., Seborg, D. E., 1989. Modelling and self-tuning control of a multivariable pH neutralization process. Part I: Modelling and multiloop control, *Proc. Am. Contr. Conf., Pittsburg*, 2, 1822-1827.

Qini S.J., Borders, G., 1994. A multiregion fuzzy logic controller for nonlinear process control, *IEEE Transaction on Fuzzy System* 2-1

Kazemian, H. B., 2001. Comparative study of a learning fuzzy PID controller and a self-tuning controller, *ISA Transactions*, 40, 245-253.

Kelkar, B., Postlethwaite, B., 1994. Study of pH control process using fuzzy modelling. *Control '94 International Conference on* 1 272-275.

Kulkarni, B. D., 1991. Tambe, S. S., Shukla, N. V., Deshpande, P. D., Nonlinear pH control, *Chem. Eng. Sci.*, 46, 995-1003.

Kumar, A.A., 2004. Chidambaram, M., Nonlinear PI controller for pH process., *Chem. Eng. Comm.*, 191: 241-261.

Linkens, D. A., Abbod, M., 1991. Self-organising fuzzy logic control for real-time processes, *IEE Control*, 971-976.

Loh, A.P., K.O. Looi and K.F. Fong. 1995. Neuralnetwork modelling and control strategies for pHprocess. *Journal of Process Control* 6, 355–362.

Mamdani, E. H., 1993. "Twenty Years of Fuzzy Control: Experiences Gained and Lessons Learnt," *Proc. of IEEE International Conf. on Fuzzy Systems*, pp. 339-344.

Nakamura, E., Kehtarnamaz, N., 1995. Optimization of fuzzy membership function parameters. *Systems, Man and Cybernetics. Intelligent Systems for the 21st Century., IEEE International Conference on.*

Nie, J. H., Loh, A. P., Hang, C. C., 1996. Modeling pH neutralization processes using fuzzy neural approach. *Fuzzy sets and system* 78:5-22.

Norquay S. J., Palazoglu, A., Romagnoli, J. A., 1988. Model predictive control based on Wiener models, *Chem. Eng. Sci.*, 53, 75-84.

Norquay, S.J., Palazoglu, A., Romagnoli, A., 1998. Model predictive control based on Wiener models. *Chemical Engineering Science* 53, 75–84.

Nystrom, R.H., Sandstrom, K.V., Gustafsson, T.K., Toivonen, T.H., 1998. Multimodel robust control applied to a pH neutralization process. *Computer Chemical Engineering* 22, s467–s474.

Palancar, M., Aragon, J., Miguens, J., Torrecilla, J., 1996. Application of a model reference adaptive control system to pH control, effects of lag and delay time. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 35, 4100–4110.

Pröll, T., Karim, N., 1994. Model predictive pH-control using real-time NARX approach, *AIChE J.*, 40(2), 269–282.

Qin, S.J., Borders, G., 1994. A multiregion fuzzy logic controller for nonlinear process control. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems* 2, 74–81.

Ross, T. J., 1995 Fuzzy logic with engineering applications, *McGraw-Hill*, 183–210. U.S.A.

Seborg, D. E., Edgar, T. F., Shah, S. L., 1986. Adaptive control strategies for process control: A survey, *AIChE J.*, 32(6), 881–913.

Sing, C.H., Postlethwaite, B., 1997. pH control: handling nonlinearity and dead-time with fuzzy relational model-based control. *IEE proceedings of Control Theory and Applications* 144, 263–268.

Sousa, J.M., Babuska, R., Verbruggen, H.B., 1997. Fuzzy predictive control applied to an air-conditioning system. *Control Engineering Practice* 5, 1395–1406.

Sung, S.W., Lee, I.B., 1995. pH control using a simple set point change. *Industrial and Engineering Chemistry Research* 34, 1730–1734.

Şen Z., 2009. Fuzzy Logic and hydrological modeling. *CRC press* 978-1439809396.

Toivonen, H.T., Sandstrom, K.V., Nystrom, R., 2003. Internal model control of nonlinear systems described by velocity-based linearization. *Journal of Process Control* 13, 215–224.

Tadeo, F., A. Holohan and P. Vega. 1998. L1 optimal regulation of a pH control plant. *Computers Chem. Eng.* 22, 459–466

Yeo, Y.-K., Kwon, T.-I., 1999. A Neural PID controller for the pH neutralization process, *Ind. Engin. Chem. Res.* 38 978.

Ylén, J.-P., 1998. pH-value and the dynamic chemical state of wet end. Scientific & Technological Advances in the Measurement & Control of Papermaking, *Edinburgh, UK, 9th & 10th November* Pira International, UK.

Ylén, J.-P., 1998. Measuring, modelling and controlling the pH value and the dynamic chemical state, Ph.D thesis, *Helsinki University of Technology, Control Engineering Laboratory, Finland*

Wright, R.A., Kravaris, C., 2001. On-line identification and nonlinear control of an industrial pH process. *Journal of Process Control* 11, 361–374.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi: 31.10.1984

Doğum yeri: Erzurum

Lise: 2000-2003

Erzurum Atatürk Lisesi

Lisans: 2003-2007

Atatürk Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Kimya Mühendisliği Bölümü.

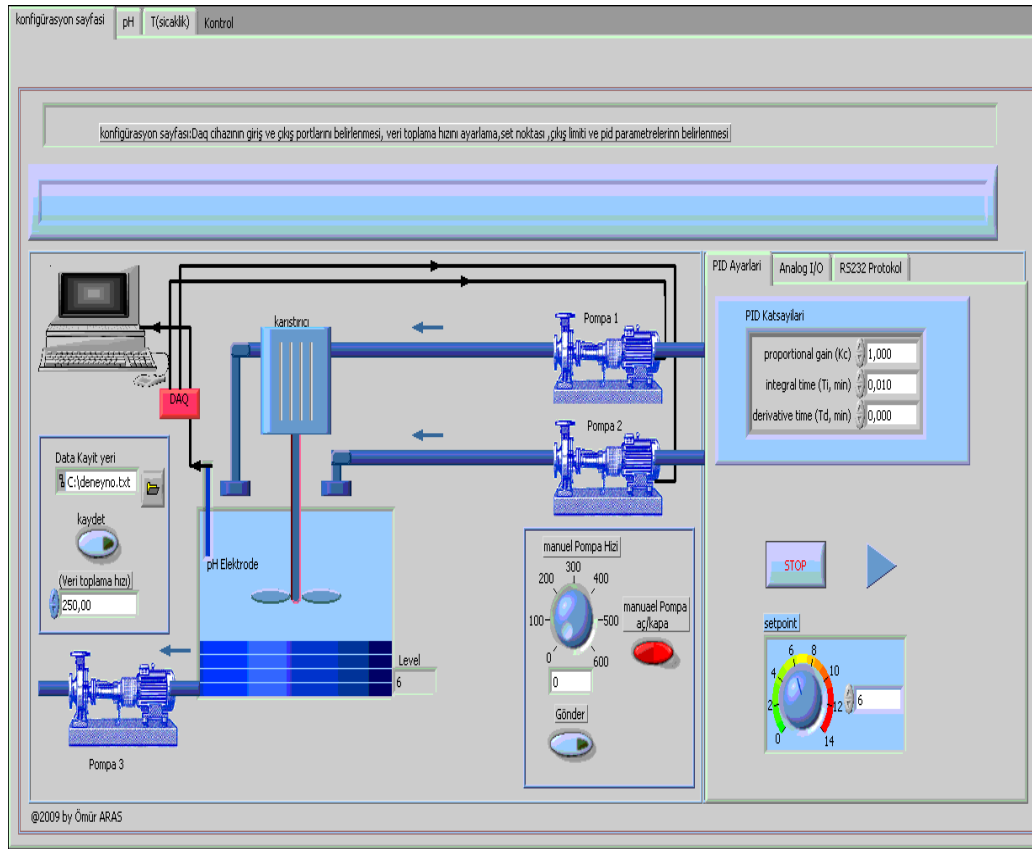
Yüksek Lisans. 2007-2010

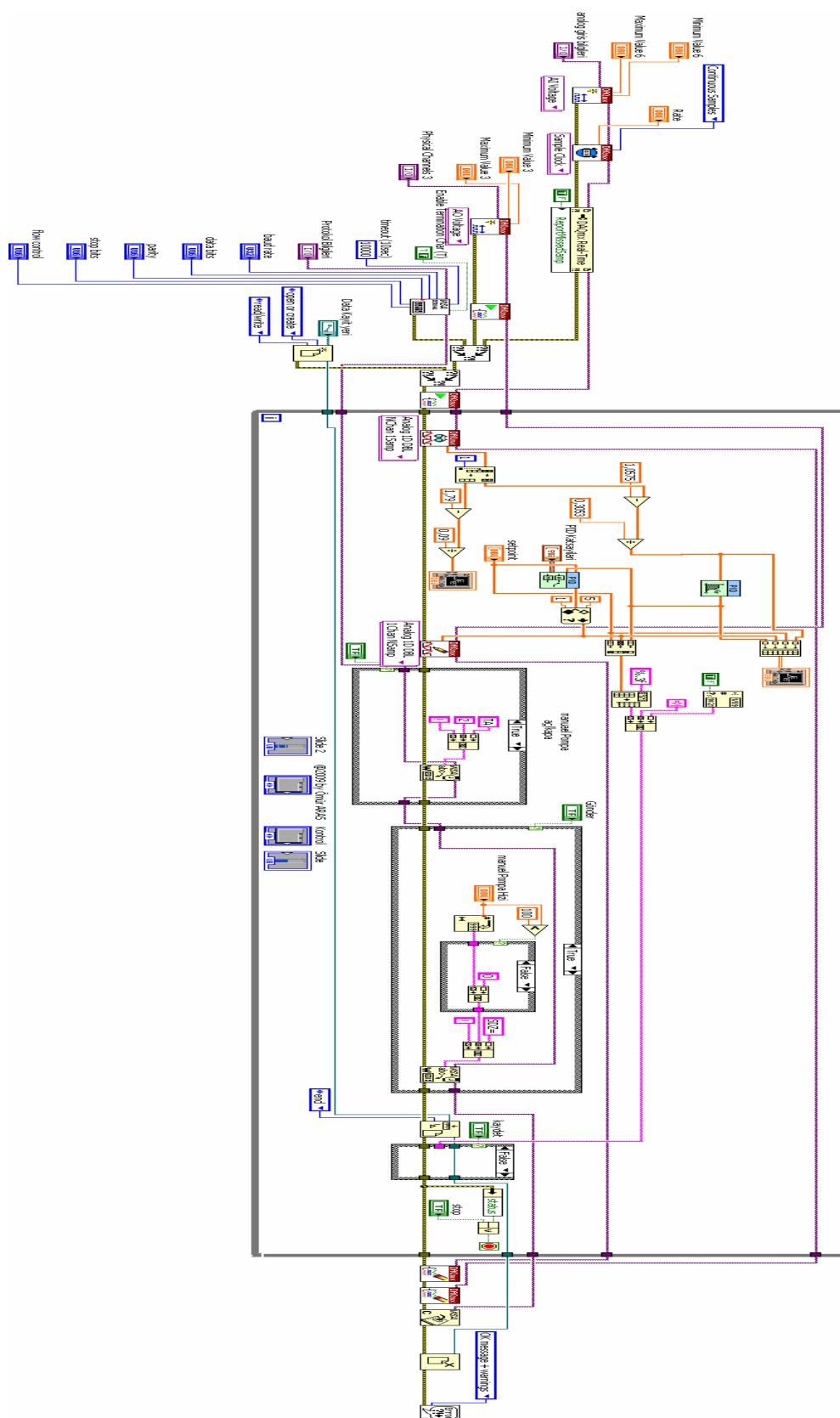
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü,
Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü,
Kimya Müh. Anabilim Dalı,
Proses ve Reaktör Tasarım Programı.

Çalıştığı kurum(lar):2009-devam ediyor

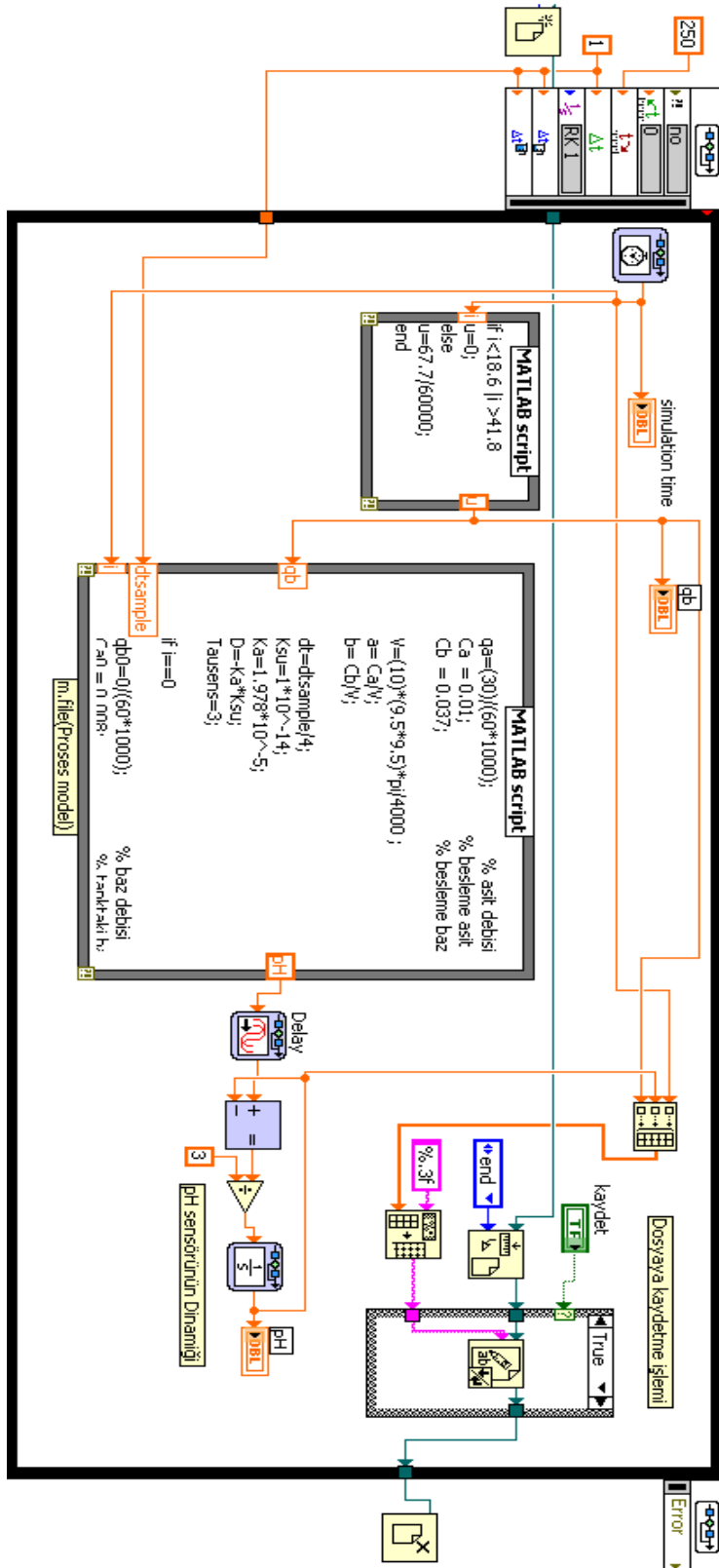
GYTE Araştırma Görevlisi

Ek-1a



Ek-1b

EK-2



EK-3

```

function [sys,x0,str,ts] = sntank(~,x,u,flag,Ka,Ksu,TauSens)
switch flag
%*****
case 0          % t=0 ,başlangıç
    sys = [4,      % number of continuous states
           0,      % number of discrete states
           1,      % number of outputs      x
           6,      % number of inputs      (qa,qb,Ca,Cb,V,qb0)
           0,      % (reserved must be zero)
           0,      % direct feedthrough flag
           1];     % number of sample times
    x0(1)=0.0199;% tank içerisindeki başlangıçtaki Na+
%konsantrasyonu
    x0(2)=0.0301;% tank içerisindeki başlangıçtaki xa
%konsantrasyonu
    D=-Ka*Ksu;
    B =Ka;
    C =-Ka*x0(2)-Ksu;
    P = (3*C-B^2)/3;
    q = (27*D-9*B*C+2*B^3)/27;
    R = (P/3)^3+(q/2)^2;
    AA=(-q/2+R^0.5)^(1/3);
    BB=(-q/2-R^0.5)^(1/3);
    H =AA+BB-B/3;
    x0(3)=abs(-log10(H));
    x0(4)=qb0;
    str = [];
    ts = [0 0]; % sample time: [period, offset]
%*****
case 1          % Girişler
    qa=u(1);
    Ca=u(2);
    qb=u(3);
    Cb=u(4);
    V =u(5);
    qb0=u6;

    % ***** türevler
%*****

    f(1)= (qb*Cb -x(1)*(qa+qb))/V ; % Na balansı
    f(2)= (qa*Ca -x(2)*(qa+qb))/V; % toplam asetat balansı
    D = -Ka*Ksu;
    B = Ka+x(1);
    C = Ka*x(1)-Ka*x(2)-Ksu;
    P = (3*C-B^2)/3;
    q = (27*D-9*B*C+2*B^3)/27;
    R = (P/3)^3+(q/2)^2;
    AA= (-q/2+R^0.5)^(1/3);
    BB= (-q/2-R^0.5)^(1/3);
    H = AA+BB-B/3; % H konst.
    pH= abs(-log10(H)); % Tank içi pH
    f(3)= (pH- x(3))/TauSens; % pH sensör dinamiği
    f(4)=(qb-x(4))/Taupomp;

    sys = f;
%*****

```

```

    case 2                                % Discrete state update
        sys = [];                        % do nothing
%*****
    case 3                                % output

        sys = [x(3)];
%*****
    case 9                                % Terminate
        sys = []; % do nothing
%*****
    otherwise                             % hata durumu
        error(['unhandled flag = ',num2str(flag)]);
end
%*****

```

EK-4

Bu kısımda tezde kullanılan bazı global optimizasyon yöntemlerinden kısaca bahsedilecektir.

1. Genetik algoritmalar

Doğal seçim ilkelerine dayanan bir arama ve en uygun şekle sokma yöntemidir. Temel ilkeleri John Holland tarafından ortaya atılmıştır. Geleneksel optimizasyon yöntemlerine göre farklılıkları olan genetik algoritmalar, parametre kümesini değil kodlanmış biçimlerini kullanırlar. Olasılık kurallarına göre çalışan genetik algoritmalar, yalnızca amaç fonksiyonuna gereksinim duyar. Çözüm uzayının tamamını değil belirli bir kısmını tararlar. Böylece, etkin arama yaparak çok daha kısa bir sürede çözüme ulaşırlar. Diğer bir önemli üstünlükleri ise çözümlerden oluşan popülasyonu eşzamanlı incelemeleri ve böylelikle yerel en iyi çözümlere takılmamalarıdır.

Genetik algoritmalar bir çözüm uzayındaki her noktayı, kromozom adı verilen ikili bit dizisi ile kodlar. Her noktanın bir uygunluk değeri vardır. Tek bir nokta yerine, genetik algoritmalar bir populasyon olarak noktalar kümesini muhafaza eder. Her kuşakta, genetik algoritma, çaprazlama ve mutasyon gibi genetik operatörleri kullanarak yeni bir populasyon oluşturur. Birkaç kuşak sonunda, populasyon daha iyi uygunluk değerine sahip üyeleri içerir. Genetik algoritmalar, çözümlerin kodlanmasını, uygunlukların hesaplanmasını, çoğalma, çaprazlama ve mutasyon operatörlerinin uygulanmasını içerir. Bir problemin çözümü için genetik algoritma geliştirmenin ilk adımı, tüm çözümlerin aynı boyutlara sahip bitler dizisi biçiminde gösterilmesidir. Olası çözümlerin kodlandığı bir çözüm grubu oluşturulur. Çözüm grubu populasyon, çözümlerin kodları da kromozom olarak adlandırılır. İkili alfabenin kullanıldığı kromozomların gösteriminde, ilk populasyonun oluşturulması için rastsal sayı üreticileri kullanılabilir. Bir kuşak oluşturulduktan sonraki ilk adım, popülasyondaki her üyenin uygunluk değerini hesaplama adımıdır. Örneğin, bir maksimizasyon problemi için i . üyenin uygunluk değeri $f(i)$, genellikle o noktadaki amaç fonksiyonunun değeridir. Çözümü aranan her problem için bir uygunluk

fonksiyonu mevcuttur. Verilen belirli bir kromozom için uygunluk fonksiyonu, o kromozomun temsil ettiği çözümün kullanımıyla veya yeteneğiyle orantılı olan sayısal bir uygunluk değeri verir. Bu bilgi, her kuşakta daha uygun çözümlerin seçiminde yol göstermektedir. Bir çözümün uygunluk değeri ne kadar yüksekse, yaşama ve çoğalma şansı o kadar fazladır ve bir sonraki kuşakta temsil edilme oranı da o kadar yüksektir.

Uygunluk değerinin hesaplanması adımından sonra mevcut kuşaktan yeni bir populasyon oluşturulmalıdır. Seçim işlemi, bir sonraki kuşak için yavru üretmek amacıyla hangi ailelerin yer alması gerektiğine karar vermektedir. Bu doğal seçimdeki en uygunun yaşaması durumuna benzerdir. Bu yöntemin amacı, ortalama uygunluğun üzerindeki değerlere çoğalma fırsatı tanımadır. Bir dizinin kopyalanma şansı, uygunluk fonksiyonuyla hesaplanan dizinin uygunluk değerine bağlıdır. Seçim yöntemlerine rulet tekerleği seçimi, turnuva seçimi ve sıralama seçimi gibi seçim yöntemleri örnek verilebilir. Mevcut gen havuzunun potansiyelini araştırmak üzere, bir önceki kuşaktan daha iyi nitelikler içeren yeni kromozomlar oluşturmak amacıyla çaprazlama operatörü kullanılmaktadır. En basit çaprazlama yöntemi tek noktalı çaprazlama yöntemidir. Tek noktalı çaprazlama yapılabilmesi için her iki kromozomun da aynı gen uzunluğunda olması gerekir. İki noktalı çaprazlamada ise kromozom iki noktadan kesilir ve karşılıklı olarak pozisyonlar yer değiştirilir. Çaprazlama mevcut gen potansiyellerini araştırmak üzere kullanılır. Fakat populasyon gerekli tüm kodlanmış bilgiyi içermez ise, çaprazlama tatmin edici bir çözüm üretmez. Bundan dolayı, mevcut kromozomlardan yeni kromozomlar üretme yeteneğine sahip bir operatör gerekmektedir. Bu görevi mutasyon gerçekleştirir. Yapay genetik sistemlerde mutasyon operatörü, bir daha elde edilemeyebilir iyi bir çözümün kaybına karşı koruma sağlamaktadır. Yeni kuşak çoğalma, çaprazlama ve mutasyon işlemlerinden sonra tanımlanmakta ve bir sonraki kuşağın ebeveynleri olmaktadır. Süreç yeni kuşakla çoğalma için belirlenen uygunluk ile devam eder. Bu süreç, önceden belirlenen kuşak sayısı kadar veya bir hedefe ulaşıncaya kadar ya da başka bir durdurma kriteri sağlanana kadar devam eder. İstenen hassasiyet derecesine göre de maksimum iterasyon sayısı belirlenebilmekte ve iterasyon bu sayıya ulaştığında döngü durdurulabilmektedir. Durdurma kriteri iterasyon sayısı olabileceği gibi hedeflenen uygunluk değeri de olabilmektedir.

Şimdi bu bir örnek üzerinde gösterilirse;

Burada amacımız genetik algoritmanın bilgisayarda nasıl çalışacağını kağıt üzerinde açıklayıcı şekilde anlatmaktır.

Amaç: $f(x)=x^2-4$, $x \in [0,31]$ şeklinde verilen bir fonksiyonun, verilen aralıkta maksimizasyonu yapılması istenmektedir. İlk olarak x sayısının kodlanması işlem yapılmalıdır. x 'in 0 ve 1'lerden oluşan 2 tabanındaki gösterilimi kullanılacaktır. Dolayısıyla x , 5 bit uzunluğunda bir kodla (string) temsil edilecektir.

Öyle ki 0: "00000" ve 31 "11111" olacaktır.

Toplulun birey sayısı $n:4$ olsun. Toplulu oluşturan dört birey, her biri 5 bit uzunluğunda birer kromozomla temsil edildiği için toplam 20 kere yazı tura atmak suretiyle belirlenmiştir. Elde edilen birey kromozomları aşağıdadır.

Birey 1: 01101, $x = 13$, $x^2-4 = 165$

Birey 2: 11000, $x = 24$, $x^2-4 = 572$

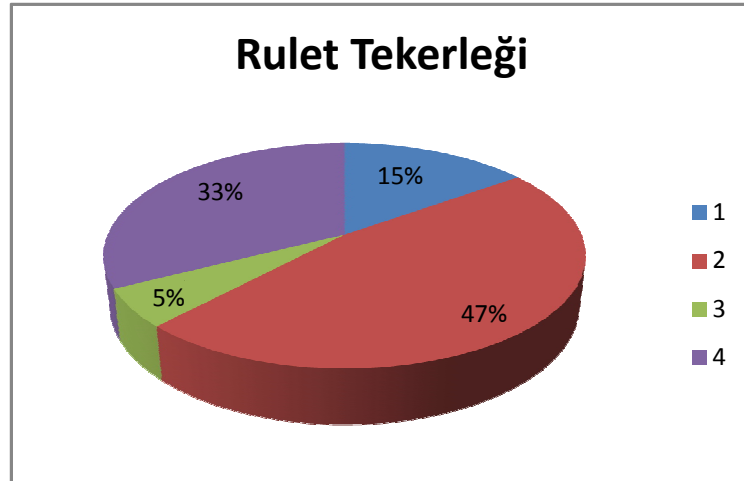
Birey 3: 01000, $x = 8$, $x^2-4 = 60$

Birey 4: 10011, $x = 19$, $x^2-4 = 357$

Yukarıda belirlenen bireyler için $f(x)=x^2-4$, bireylerin uygunluk değerlerini verir. Dört bireyin toplam uygunluk değerleri "169+576+64+361=1170" dir. Dolayısıyla her bir bireyin kaplayacağı alan tabloda gösterilmiştir:

No	Kromozom	Amaç Fonk.	Kendini Üretme olasılığı
1	01101	165	$165/1154=0.143(\%15)$
2	11000	572	$572/1154=0.446(\%47)$
3	01000	60	$60/1154=0.052(\%5)$
4	10011	357	$375/1154=0.309(\%33)$

Bundan sonra rulet tekerleği yöntemi(burada bu seçildi) ile doğal seçim(seleksiyon) ilkesine göre soyunu devam ettirecek bireyler seçilir.



4. birey (10011) ile 1.(01101) bireyin seçildiğini varsayalım(çünkü kötülerinde yaşama şansı vardır). Bu iki birey belirlenen oran ile çaprazlamaya tabi tutulur.

100|11 ve 011|01 → 10001 oluşan yeni bireydir ve yine belirlenen bir oran vasıtasıyla mutasyon işlemine tabi tutularak bireyin genlerinde değişikliğe gidilir. 10001 → 10101 popülasyona katılan yeni bireydir artık bunun uygunluk değeri hesaplanarak iterasyona devam edilir ve en kötü uyumluluğa sahip birey popülasyondan çıkarılır.

2. Parça Sürü Algoritması (Partical Swarm)

Bu algoritma türü kuş sürülerinin yemek bulduklarında birbirlerinden faydalanarak yemeğe ulaşmasındaki hareketleri taklit etmeye yöneliktir.

Bir grup kuşun bir bölgede tesadüfi hareketlerle yemek aradığını düşünelim. Tüm kuşlar yemeğin nerede olduğunu bilmiyor ve bölgede değerlendirilebilecek tek parça yemek var. Kuşlar yemeğin nerede olduğunu bilmiyorlar ama yemeğin ne kadar uzakta olduğunu biliyorlar. Bu durumda en mantıklı yol yemeğe en yakın kuşu takip etmek olacaktır.

PSO algoritması başlangıçta random parçacıklar (çözümler) seçer. Daha sonra bu çözümleri güncelleyerek optimum durumu bulmaya çalışır (Aslında algoritma bu yönüyle genetik algoritmalarla oldukça benzeşir ama genetik algoritmalarındaki parametre seçimindeki kadar özgür olmamamız aradaki farktır). Her parçacık iterasyonda algoritma kriteri olan 2 best değerine göre güncellenir. Bu değerlerden ilki şimdiye kadar ulaşılan en fit çözümü içeren pbest değeridir. Diğer best değeri ise popülasyondaki diğer kuşlar tarafından gözlemlenen gBest'dir. Bir parçacık popülasyonun tümünü değilde bir parçasını kale aldığına lbest değeri elde edilir. İki best durumu bulunduğunda parçacık yeni hızını ve konumunu şu bağıntılarla hesaplamaktadır ;

$$a) \quad v = v + c1 * rand * (pbest - present) + c2 * rand * (gbest - present)$$

b)

$$present = present + v$$

c) Bu ifadeleştirmede V hız büyüklüğünü, c1 ve c2 öğrenme katsayılarını, ifade etmektedir. Her adımda önce hız bilgisi daha sonra konum bilgisi güncellenerek algoritma her parçacık için çalışır.

d) Sözde kodun bize anlattığı her kuş etrafında dikkat ettiği komşularını da baz alarak hareket etmesidir. Bir kuş yemeği bulduğunda, bu yöne doğru bir hareket başlattığında, bu hareket onu komşu olarak kabul eden her kuşun hızını etkileyecektir. Bu etkilenmeyi yaşıyan kuşlarda komşu kabul eden diğer kuşlarda aynı etkiden nasibini alacaklardır.

3. Benzetimli Tavlama(Simulated Annealing)

Benzetimli tavlama algoritması, pek çok değişkene sahip fonksiyonların en büyük veya en küçük değerlerinin bulunması ve özellikle pek çok yerel en küçük değere sahip doğrusal olmayan fonksiyonların en küçük değerlerinin bulunması için tasarlanmıştır. Bu algoritma ve türevleri, katı cisimlerin soğurken mükemmel şekilde atomik dizilişlerini örnek aldığından ve özellikle metallerin (örneğin: çelik) tavlama işlemini andırdığından bu ismi almıştır. Diğer olasılıksal yaklaşımlar gibi en iyi

özümün en kısa zamanda üretimini sağlar. Bu sebeple, özellikle matematiksel modellerle gösterilemeyen kombinasyonel problemlerin eniyileme uygulamalarında tercih edilir.

Algoritmayı anlamak için şöyle bir örnekle benzeştirebiliriz. Diyelim ki en alçak noktasını aradığımız bol delikli bir golf sahamız var. Eğer sahanın eğimi yönünde ilerlemek gibi basit bir yöntem kullansak o zaman yüksek olasılıkla deliklerden birinde takılabiliriz. Bunun yerine şöyle yapıyoruz: Sahaya bir top koyup araziye olduğu gibi sallamaya başlıyoruz. Top arada bir deliklere girse de sürekli salladığımız için sonra çıkıyor. Zamanla sallama hızımızı ağır ağır azaltıyoruz. Tamamen durduğumuzda ise topumuzun sahanın en alçak noktasında (genel minimum) ya da yakın bir yerlerde olduğunu farz ediyoruz.

Gerçek dünyadaki katı cisimlerde de durum bu örnekteki benzer. Örneğimizdeki sallama hareketi cisimlerin sıcaklığına karşılık gelir. Bir gazı soğuturken atomlar bir süre sonra nasıl ki periyodik aralıklarla dizilip potansiyel enerjiyi minimize ediyorlar ise (kristalleşme) biz de aynı yöntemi kullanarak enerjiyi değil kendi tanımladığımız bir fonksiyonu minimize etmeye çalışıyoruz.

Bu yöntem bölgesel en iyi çözümlere (local optimum) takılmamak için iyidir. Soğutma işlemi bu algorithmada daha iyi sonuçların bulunmasını sağlayacak yeni komşu çözümlerin üretilmesini sağlayan üstel bir ifadedir.

Benzetilmiş tavlama algoritması; elektronik devre tasarımı, görüntü işleme, yol bulma problemleri, seyahat problemleri, malzeme fiziğı benzetimi, kesme ve paketleme problemleri, iş/akış çizelgeleme ve benzeri pek çok problemin çözümümde kullanılabilir.