

**ZAYIF ASİT KUVVETLİ BAZ PROSESLERİNDE MODELLEME VE GÜRBÜZ  
KONTROL BENZETİM ÇALIŞMALARI**

**Mesut UYSAL**

**Bülent Ecevit Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**ZONGULDAK**

**Haziran 2015**

**KABUL:**

Mesut UYSAL tarafından hazırlanan “ZAYIF ASİT KUVVETLİ BAZ PROSESLERİNDE MODELLEME VE GÜRBÜZ KONTROL BENZETİM ÇALIŞMALARI” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Bülent Ecevit Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 16/06/2015

Başkan: Yrd. Doç. Dr. İbrahim ALIŞKAN  
Bülent Ecevit Üniversitesi



Üye : Yrd. Doç. Dr. Rukiye UZUN  
Bülent Ecevit Üniversitesi



Üye : Yrd. Doç. Dr. Şevket ATA  
Bülent Ecevit Üniversitesi



---

**ONAY:**

Yukarıdaki imzaların adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylarım. .../.../2015

  
Prof. Dr. Kemal BÜYÜKGÜZEL  
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

*“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”*



Mesut UYSAL

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **ZAYIF ASİT KUVVETLİ BAZ PROSESLERİNDE MODELLEME VE GÜRBÜZ KONTROL BENZETİM ÇALIŞMALARI**

**Mesut UYSAL**

**Bülent Ecevit Üniversitesi**

**Fen Bilimleri Enstitüsü**

**Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. İbrahim ALIŞKAN**

**Haziran 2015, 67 sayfa**

pH Nötralizasyon proseslerindeki baz ve asit çözelti konsantrasyonlarında meydana gelen herhangi bir değişiklik, pH değerinde doğrusal olmayan bir davranış görülmesine neden olmaktadır. Bu tarz doğrusallıktan sapmaya eğilimli olan pH denetiminde, alışlagelmiş denetim yöntemlerinin başarısı yeterli görülmemektedir. Bu amaçla klasik denetim yöntemlerinin ötesinde doğrusal olmayan sistemler için performans gösteren yeni denetim yöntemleri geliştirilmiştir.

Bu tezde, hidroflorik (HF) asit - sodyum hidroksit (NaOH) pH nötralizasyonu (zayıf asit kuvvetli baz reaksiyonu) prosesinin, Matlab Simulink yazılımsal ortamında Lyapunov fonksiyonu ile doğrusal olmayan gürbüz denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Prosesin çıkış baz konsantrasyonu üzerinde etkili olan beyaz gürültünün yok edilmesinde gürbüz denetimin ne denli başarılı olduğunu görebilmek için ayrıca bir klasik denetleme yöntemi olan PI denetleyici ile de karşılaştırma yapılmıştır.

## **ÖZET (devam ediyor)**

**Anahtar Kelimeler:** pH, Nötralizasyon, Lyapunov Fonksiyonu, Gürbüz Denetleyici, PI Denetleyici

**Bilim Kodu:** 608.01.00

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

### **MODELLING AND SIMULATION OF ROBUST CONTROL IN WEAK ACID STRONG BASE PROCESS**

**Mesut UYSAL**

**Bülent Ecevit University  
Graduate School of Natural and Applied Sciences  
Department of Electrical and Electronics Engineering**

**Thesis Advisor: Asst. Prof. İbrahim ALIŞKAN**

**June 2015, 67 pages**

Any change in the concentration of base and acid solutions of pH neutralization process leads to non-linear behavior in pH. The success of the conventional control method in the pH control which is prone to deviation from linearity is not considered satisfactory enough. For this purpose, new control methods have been developed to perform to nonlinear systems unlike conventional control methods

In this thesis, nonlinear robust control design with lyapunov function of hydrofluoric acid (HF) - sodium hydroxide (NaOH) pH neutralization (weak acid and strong base reaction) process was applied in Matlab Simulink software. Also, a comparison with PI controller, which is a classical control technique is made in order to see the success of the robust control in destroying the white noise which is in the base concentration of the process.

**Key Words:** pH, Neutralization, Lyapunov Function, Robust Control, PI Control

**Science Code:** 608.01.00



## TEŞEKKÜR

Yapmış olduğum çalışmanın her safhasında benden yardımlarını esirgemeyen, yaşadığım problemlerimde her zaman yanımda olan hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. İbrahim ALIŞKAN' a, çalışmalarım süresince izin konusunda destekleri için BEÜ Bilgi İşlem Daire Başkanı Sayın Yrd. Doç. Dr. Erkan ÇETİNER' e, gösterdiği sabır için, her zaman yanımda olduğunu bildiğim eşim Emel UYSAL' a en derin duygularıyla teşekkür ederim.





## İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL .....	ii
ÖZET .....	iii
ABSTRACT .....	v
TEŞEKKÜR .....	vii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ .....	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1 GİRİŞ .....	1
1.1 LİTERATÜR TARAMASI .....	2
BÖLÜM 2 KURAMSAL KAVRAMLAR .....	5
2.1 KONTROL SİSTEMLERİNİN AMACI VE KAPSAMI .....	5
2.1.1 Kontrol Sistemlerinin Sınıflandırılması.....	6
2.1.1.1 Açık Çevrim Kontrol Sistemleri .....	6
2.1.1.2 Kapalı Çevrim Kontrol Sistemleri.....	7
2.2 PROSES DENETİM YÖNTEMLERİ.....	7
2.2.1 PID Denetim Sistemi .....	8
2.2.1.1 PID Katsayılarının Ayarlanması .....	10
2.2.1.1.1 Ziegler-Nichols Ayarlama Yöntemi.....	10
2.2.1.1.1.1 Birinci Ayarlama Yöntemi.....	10
2.2.1.1.1.2 İkinci Ayarlama Yöntemi .....	12
2.2.2 Lyapunov Fonksiyonu İle Doğrusal Olmayan Sistemlerin Gürbüz Denetimi.....	13
2.2.2.1 Lyapunov Kararlılık Çalışması .....	14

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
2.2.2.1.1 Ön Tanımlar .....	14
2.2.2.1.1.1 Pozitif ve Negatif Fonksiyonlar .....	14
2.2.2.1.1.2 Pozitif ve Negatif Matrisler .....	14
2.2.2.1.1.3 Simetrik ve Anti-Simetrik Matrisler .....	15
2.2.2.1.1.4 Denge Noktası, Kararlılık ve Diğer Kavramlar .....	15
2.2.2.1.2 Lyapunov Kararlılık Teoremi.....	17
2.2.2.1.3 Lyapunov Fonksiyonunun Doğrusal Zamanla Değişmeyen Sistemlere Uygulanması.....	18
2.2.2.2 Lyapunov Fonksiyonu ile Doğrusal Olmayan Denetleyici Tasarımı.....	18
BÖLÜM 3 ZAYIF ASİT KUVVETLİ BAZ pH NÖTRALİZASYON PROSESLERİ .....	19
3.1 ASİTLER VE BAZLAR .....	19
3.1.1 Suda Asit ve Baz Dengeleri .....	20
3.2 pH, TİTRASYON VE NÖTRALİZASYON KAVRAMLARI .....	22
3.2.1 Suyun İyonlaşma Sabiti ve pH Kavramı.....	22
3.2.2 Titrasyon Kavramı .....	24
3.2.2.1 Zayıf Asit - Kuvvetli Baz Titrasyonu.....	24
3.2.3 Nötralizasyon İşlemi ve Önemi .....	27
3.3 MATEMATİKSEL MODELLEME.....	28
3.3.1 Zayıf Asit - Kuvvetli Baz Modeli .....	28
3.3.1.1 Kimyasal Denklemler.....	28
3.3.1.2 Durum-Uzay Modellemesi.....	30
3.3.1.3 Prosesin Ölü Zamanı ve Transfer Fonksiyonu.....	32
3.4 BEYAZ GÜRÜLTÜ VE pH NÖTRALİZASYON PROSESLERİNDEKİ ÖNEMİ.....	33
BÖLÜM 4 BENZETİM ÇALIŞMALARI.....	35
4.1 MATLAB .....	37
4.1.1 Simulink.....	37

## İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
4.2 PROSESİN PI DENETLEYECİ TASARIMI VE UYGULAMASI .....	38
4.2.1 Prosesin PI Denetleyici Tasarımı .....	38
4.2.2 Prosesin PI Denetleyici Uygulaması .....	39
4.3 PROSESİN LYAPUNOV FONKSİYONU İLE GÜRBÜZ DENETİMİ .....	46
4.3.1 Prosesin Lyapunov Fonksiyonu Tasarımı .....	46
4.3.2 Prosesin Lyapunov Fonksiyonu Uygulaması .....	49
BÖLÜM 5 TARTIŞMA VE SONUÇLAR .....	57
KAYNAKLAR .....	61
EK AÇIKLAMALAR A FONK_2 BLOĞU MATLAB KODU .....	63
ÖZGEÇMİŞ .....	67



## ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Basit kontrol sistemi blok diyagramı.....	6
2.2 Geri beslemeli sistem blok diyagramı.....	7
2.3 Bir prosesin PID denetimli blok diyagramı.....	8
2.4 Prosesin birim-basamak yanıt gösterimi.....	10
2.5 S-biçimli yanıt eğrisi grafiği.....	11
2.6 Orantılı denetleyiciye sahip kapalı çevrim sistemi blok diyagramı.....	12
2.7 $P_{kr}$ periyotlu kalıcı salınımlar grafiği.....	12
3.1 50 mL 0,1 M asetik asitin 0,1 M sodyum hidroksit ile titrasyon eğrisi.....	25
3.2 Zayıf asit kuvvetli baz titrasyon eğrisinin hesaplanması gösterimi.....	26
3.3 Benzetim çalışması yapılan zayıf asit (HF) - kuvvetli baz (NaOH) prosesinin titrasyon eğrisi.....	26
3.4 Aç-kapa tipi karışımli nötralizasyon gösterimi.....	27
3.5 İki giriş akımlı reaktör gösterimi.....	28
4.1 Benzetim çalışmasının basitleştirilmiş genel gösterimi.....	36
4.2 PI Denetleyici ile gürültüsüz pH nötralizasyon prosesi denetimi benzetim çalışması.....	40
4.3 Gürültüsüz prosesin PI denetimde referans pH (siyah) ve ölçülen pH (kırmızı) değerleri grafiği.....	41
4.4 Gürültüsüz prosesin PI denetimde referans çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.....	41
4.5 Gürültüsüz prosesin PI denetimde ölçülen çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.....	42
4.6 Gürültüsüz prosesin PI denetimde ölçülen baz akış hızı değeri grafiği.....	42
4.7 PI Denetleyici ile gürültülü pH nötralizasyon prosesi denetimi benzetim çalışması.....	43
4.8 Gürültülü prosesin PI denetimde referans pH (siyah) ve ölçülen pH (kırmızı) değerleri grafiği.....	44

## ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
4.9 Gürültülü prosesin PI denetimde referans çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.....	44
4.10 Gürültülü prosesin PI denetimde ölçülen çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.....	45
4.11 Gürültülü prosesin PI denetimde ölçülen baz akış hızı değeri grafiği.....	45
4.12 Lyapunov fonksiyonu enerji grafiği.....	47
4.13 Gürbüz denetleyici ile gürültüsüz pH nötralizasyon prosesi denetimi benzetim çalışması.....	50
4.14 Gürültüsüz prosesin gürbüz denetiminde referans pH (siyah) ve ölçülen pH (kırmızı) değerleri grafiği.....	51
4.15 Gürültüsüz prosesin gürbüz denetiminde referans çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği...	51
4.16 Gürültüsüz prosesin gürbüz denetiminde ölçülen çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği....	52
4.17 Gürültüsüz prosesin gürbüz denetiminde ölçülen baz akış hızı değeri grafiği.....	52
4.18 Gürültülü prosesin gürbüz denetleyici ile pH nötralizasyon prosesi denetimi benzetim çalışması.....	53
4.19 Gürültülü prosesin gürbüz denetiminde referans pH (siyah) ve ölçülen pH (kırmızı) değerleri grafiği.....	54
4.20 Gürültülü prosesin gürbüz denetiminde referans çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.....	54
4.21 Gürültülü prosesin gürbüz denetiminde ölçülen çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği...	55
4.22 Gürültülü prosesin gürbüz denetiminde ölçülen baz akış hızı değeri grafiği.....	55

## ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
2.1 Ziegler-Nichols birinci ayar yöntemi .....	11
2.2 Ziegler-Nichols ikinci ayar yöntemi.....	13
3.1 50 mL 0,1 M asetik asitin 0,1 M sodyum hidroksit ile titrasyonunda pH değerleri. ....	25





## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

- $A$  : Durum uzay gösteriminde durum matrisi  
 $B$  : Durum uzay gösteriminde girdi matrisi  
 $C$  : Durum uzay gösteriminde çıktı matrisi  
 $C_a$  : Giriş asit konsantrasyonu (mol/l)  
 $C_b$  : Giriş baz konsantrasyonu (mol/l)  
 $D$  : Durum uzay gösteriminde doğrudan iletim matrisi  
 $e$  : Hata sinyali (değeri)  
 $F_a$  : Asit akış hızı (l/dk)  
 $F_b$  : Baz akış hızı (l/dk)  
 $G(s)$  : “s” domeninde transfer fonksiyonu  
 $G_2(s)$  : “s” domeninde ölü zaman transfer fonksiyonu  
 $G_y(s)$  : “s” domeninde PID denetleyici fonksiyonu  
 $k$  : Lyapunov fonksiyonu sabit değeri  
 $K, T, L$  : Ziegler-Nichols açık çevrim ayar parametreleri  
 $K_a$  : Asitin sudaki çözünürlük sabiti  
 $K_b$  : Bazın sudaki çözünürlük sabiti  
 $K_d$  : Türev kazancı  
 $K_{denge}$  : Denge sabiti  
 $K_{kr}, P_{kr}$  : Ziegler-Nichols kapalı çevrim ayar parametreleri  
 $K_p$  : Oransal kazanç  
 $K_{su}$  : Suyun iyonlaşma sabiti  
 $K_i$  : İntegral kazancı  
 $P, Q$  : Matris tanımları  
 $pH$  : Asitlik derecesi

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

- $pOH$  : Bazlık derecesi  
 $r$  : Giriş sinyali (değeri)  
 $T$  : Ölü zaman (reaksiyonu gecikmesi)  
 $T_d$  : İntegral zamanı  
 $T_i$  : Türev zamanı  
 $u$  : Proses girdi sinyali (değeri)  
 $U(s)$  : “s” domeninde proses girdi fonksiyonu  
 $V(x)$  : Lyapunov fonksiyonu  
 $\dot{V}(x)$  : Lyapunov fonksiyonu türevi  
 $x, u, y$  : Durum uzay gösteriminde durum vektörü, girdi vektörü, çıktı vektörü  
 $x_a$  : Reaksiyon tankındaki asit konsantrasyonu  
 $x_b$  : Reaksiyon tankındaki baz konsantrasyonu  
 $y$  : Çıkış sinyali (değeri)  
 $Y(s)$  : “s” domeninde çıktı fonksiyonu  
 $\lambda$  : Özdeğer

### KISALTMALAR

- P : Oransal Denetleyici  
PI : Oransal Integral Alan Denetleyici  
PID : Oransal Integral ve Türev Alan Denetleyici  
SKTR : Sürekli Karıştırmalı Tank Reaktörü

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Yıllarca proses denetleme bilim insanlarının başlıca ana problemlerinden biri olmuştur. Hatta bu denetleme bilim dalından daha çok bir sanat ve eğitim alanı haline gelmiştir. Bu alanda çalışanlar, bilimsel verilerden daha çok kendi deneyimlerine güvenmişler ve deneme yanılma yöntemleri ile sorunlara çözüm bulmaya çalışmışlardır. Ancak bu kişiler için olayın matematiksel olarak ifadesi ve çözümü oldukça zor görünmüştür (Caldwell et al. 2012). Karmaşık proseslerin denetlenmesi için karmaşık denetleyicilerin tasarlanması ve bu doğrultuda uygulama geliştirilmesi gerekmektedir.

1930'lara kadar kimyasal proses denetimi konusunda ancak birkaç teorik yayın mevcut iken son 30 yılda bu alanda yazılan kitap, yayınlanan 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 (Aras 2010).

Kimyasal proses denetimi uygulamalarını diğer denetim 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 denetiminde zaman gecikmesi ve transport-lag (taşıma gecikmesi), denetimi etkileyen önemli faktörler arasında yer alır (Aras 2010).

Bir kimyasal proses olan pH denetiminin günümüzde atık su arıtımı, yağ ve sabun endüstrisi, ilaç endüstrisi, maden ve biyoteknolojik prosesler gibi pek çok endüstri alanında uygulamaları genişlemektedir. Dolayısıyla bu alanlar için pH denetimi önemli bir yer teşkil etmektedir. Bu duruma paralel olarak pH denetimi halen önemli bir denetim problemi olmaya da devam etmektedir. pH nötralizasyon proseslerinin denetimindeki en büyük zorluk titrasyon eğrisinin ileri derecede doğrusal olmayan yapısıdır. Geleneksel, alışlagelmiş PID (oransal-integral-

türevsel) denetimi ve daha ileri doğrusal denetim tekniklerinin dahi bu konuda yetersiz kaldığı görülmesi sebebiyle doğrusal olmayan denetim teknikleri üzerinde yoğunlaşmaktadır.

Bu tezde, bilindik bir pH nötralizasyon prosesine örnek olması itibari ile, zayıf asit (hidroflorik asit) - kuvvetli baz (sodyum hidroksit) reaksiyonlu sürekli karıştırmalı tank reaktöründe (SKTR) pH'ın denetim altına alınması ve çıkış baz konsantrasyonu üzerinde etkili olan sabit genlikli beyaz gürültünün yok edilmesi için gerekli olan Lyapunov fonksiyonu yaklaşımı ile doğrusal olmayan gürbüz denetleyicinin geliştirilmesine çalışılmıştır. Bu bağlamda öncelikle tezin ikinci ve üçüncü bölümünde bu konudaki kuramsal kavramlara kısaca yer verilmiş, prosesin kimyasal denklemleri, matematiksel modeli elde edilmiş, beyaz gürültünün pH nötralizasyon proseslerindeki önemine değinilmiştir. Dördüncü kısımda, çıkış baz konsantrasyonu ( $X_b$ ) üzerinde etkili olan beyaz gürültünün yok edilmesi ve pH'ın denetim altına alınması için hem alışlagelmiş denetleme tekniği olan PI denetleyici hem de Lyapunov fonksiyonu yaklaşımı ile doğrusal olmayan gürbüz denetleyici tasarımı ve uygulamalarının Matlab-Simulink ortamında benzetim çalışmaları yapılmıştır. Beşinci ve son kısımda ise PI ve Lyapunov yaklaşımlı doğrusal olmayan gürbüz denetleme tekniklerinin elde edilen sonuçları sunularak tartışılmıştır.

## 1.1 LİTERATÜR TARAMASI

Gustafsson (1985), Adaptif denetim yöntemini kullanarak kuvvetli asit-kuvvetli baz reaksiyon sisteminde pH denetimi gerçekleştirmiştir. Çalışmada ayarlanabilen değişken olarak baz akış hızı seçilmiş, pH=7'de denetim gerçekleştirilmiştir. Çeşitli model parametreleriyle deneyler yapılarak adaptif denetim ile geleneksel denetim performansları karşılaştırılmıştır.

Henson and Seborg (1994), doğrusal olmayan adaptif denetim yöntemini pH nötralizasyon prosesi için geliştirmişlerdir. Çalışmalarında adaptif doğrusal olmayan denetimin adaptif olmayan ve doğrusal olmayan denetime ve PI'a göre daha etkin olduğunu belirtmişlerdir.

Kahvecioğlu (1999), doğrusal ve doğrusal olmayan Self Tuning PID denetim yöntemi ile bir biyoreaktörün çoğalma ortamı sıcaklık denetimini gerçekleştirmiştir. Sistem modeli için, doğrusal ARMAX ve doğrusal olmayan NARMAX modelleri kullanmıştır. Sistemi tanımlamak için PRBS sinyalleri göndererek çıkış değişkenlerini ölçmüş; model parametrelerini Bierman Algoritması kullanarak hesaplamıştır.

Yadagiri et al. (2000), sodyum hidroksit (kuvvetli baz) - asetik asit (zayıf asit) nötralizasyon prosesinin denetimi için birinci mertebeden zaman gecikmeli olarak bir PID denetleyici ile pH denetimi tasarlamışlardır.

Tezcan (2001), çalışmalarında kireçtaşının sülfürik asitle nötralizasyonunun gerçekleştiği sürekli bir reaktörde pH denetimi için çeşitli denemeler yapmıştır. Yuwana-Seborg yöntemi ile parametreleri hesaplanan PID denetleyici algoritmasını kullanarak pH denetimini başarı ile gerçekleştirmiştir.

Wang et al. (2001), doğrusal olmayan sürekli bir sistem için fuzzy denetim çalışmaları yapmışlardır. Fuzzy denetim sisteminin iki bölümden meydana geldiğini; bunların dinamik fuzzy model ve tamamlayıcı denetim olduğunu vurgulamışlardır.

Huang and Yu (2001), kurutma seviyesinin tekstil endüstrisinde önemli bir yeri olduğunu, bunun ayarlanabilmesi için pH denetimi yapılması gerektiğini ancak, proses dinamiğinin değişmesi ve doğrusal olmayan özelliğinden dolayı, pH denetiminin zor olduğunu belirtmişlerdir. Bu denetim sisteminde gerekli model oluşumunun zor olduğunu ileri sürerek Fuzzy kazançlı PID denetleyicilerin boya tankının pH'ını denetlemek için ümit verici bir sistem olduğunu söylemişlerdir.

Vural (2002), doğrusal olmayan pH denetiminin borsal akış reaktörüne uygulanması üzerine çalışmalar yapmışlardır. Bu amaçla zayıf asit-kuvvetli baz nötralizasyon prosesinde PID, kendinden ayarlamalı PID ve fuzzy denetim yöntemlerini uygulayarak farklı denetim algoritmalarının nötralizasyon sistemi üzerindeki etkinliklerini karşılaştırmıştır.

Alışkan (2006) doğrusal olmayan pH denetiminin alışlagelmiş PID denetimi ve bulanık mantık-yapay sinir ağı tabanlı denetimini hem Matlab Simulink ortamında benzetim çalışmalarını hem de mikro denetleyici yardımı ile gerçek uygulamasını yapmış, sistemlerin ne denli cevap verdiğini avantaj ve dezavantajları ile ortaya koymuştur.



## BÖLÜM 2

### KURAMSAL KAVRAMLAR

#### 2.1 KONTROL SİSTEMLERİNİN AMACI VE KAPSAMI

Otomatik kontrolün amacı ve kapsamını anlayabilmek için bazı temel kavramların açıklanmasına gerek vardır. Bu kapsamda başvurulacak temel kavramların başında sistem ve kontrol sistemi kavramları gelir.

Sistemin tanımı, tüm bir birim olarak davranacak ya da bir bütünü meydana getirecek biçimde birbiriyle ilişkilendirilmiş, bağlanmış fiziksel bileşenlerin düzenlemesi olarak yapılabilir. Diğer bir kavram olan kontrol sistemi ise, kendisini ya da başka bir sistemi yönlendirecek, düzenleyecek veya ona kumanda edecek biçimde ilişkilendirilmiş fiziksel bileşenler topluluğudur. Kontrol sistemlerini, insan tarafından yapılan suni kontrol sistemi ki bu çalışmamızda yaptığımız, biyolojik sistemleri de içine alan doğal kontrol sistemi ve bileşenleri gerek biyolojik ya da doğal gerekse insan yapımı olan kontrol sistemleri olarak üç farklı sınıfta toplayabiliriz. Kontrol sistemini tanımda ve tanıtmada yardımcı iki temel terim vardır; giriş ve çıkış. Giriş, bir kontrol sisteminde belirlenebilen bir cevabı üretmek amacıyla dış bir enerji kaynağından kontrol sistemine uygulanan uyarmadır. Çıkış ise kontrol sisteminden elde edilen gerçek cevaptır. Bir kontrol sisteminin amacından giriş ve çıkış büyüklükleri bilinen bir fiziksel bileşenin tabiatını anlamak mümkündür.

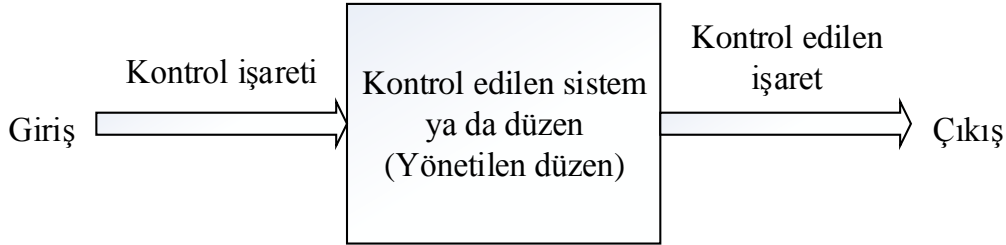
Sistemde bir veya birden fazla parametrenin ölçülerek, ölçülen parametre ya da parametrelerin belli değer ya da değerlerde tutulmasının sağlamak otomatik kontrol sistemlerinin amacıdır. Böylelikle makine, alet, araç, tesis ve sistemlerin tehlikeden uzak, güvenlikle çalışmaları sağlandığı gibi işletme koşullarının da iyileştirilmesi mümkün olacaktır. Burada sözü geçen “sistem” sözcüğü sadece mekanik sistemlerle sınırlı olmayıp aynı zamanda hidrolik, pnömatik (havalı), elektriksel, ısı sistemleri de kapsamına almaktadır (Akçalı 2001).



Bir sistem problemini çözümlenebilmek otomatik kontrol kapsamında atılması gereken adımlardan ilkinin oluşturur. Bunun için sistemi oluşturan bileşenlerin ya da onu anlatabilecek özelliklerin analiz, sentez, tasarım ve değerlendirmelere uygun hale getirilmesi gerekir. Bu da belli başlı şu iki yolla gerçekleştirilir (Akçalı 2001):

1. Sistemin ya da bileşenlerin davranışının matematiksel bağıntılar şeklinde ifade edilmesi,
2. Sistem ya da bileşen davranışlarının blok diyagramları (şemaları) ve sinyal (işaret) akış grafikleri olarak adlandırılan temsili çizimlerle gösterilmesidir.

Bu tanımlardan dayanarak en basit kontrol sistemi blok biçimde Şekil 2.1' deki gibi gösterilebilir.



Şekil 2.1 Basit kontrol sistemi blok diyagramı (Sarıoğlu 2000).

### 2.1.1 Kontrol Sistemlerinin Sınıflandırılması

Kontrol sistemlerinin sınıflandırılması bu kısımda sadece çıkış işaretinin kontrol ya da yönetilmesi açısından ele alınacaktır. Çıkışın ya da kontrol edilen büyüklüğün kumanda edilmesi bakımından kontrol sistemleri açık çevrim kontrol sistemleri ve kapalı çevrim kontrol sistemleri olmak üzere iki türe ayrılır.

#### 2.1.1.1 Açık Çevrim Kontrol Sistemleri

Girişindeki kumanda ya da kontrol işareti çıkıştan bağımsız olan bir kontrol sistemidir. Bununla beraber bu tür sistemlerde çıkış, giriş işaretinin bir fonksiyonudur.

Açık çevrim kontrol sistemlerinin belli başlı özellikleri şunlardır;

1. İşleyiş büyük ölçüde giriş ve çıkış büyüklükleri arasındaki kalibrasyon ilişkisine dayanır.
2. Genellikle kararsızlık sorunları yoktur (Akçalı 2001).

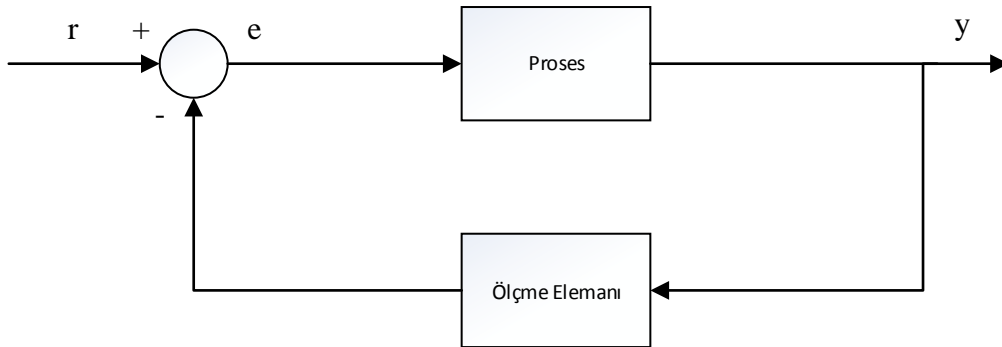
### 2.1.1.2 Kapalı Çevrim Kontrol Sistemleri

Girişindeki kumanda ya da kontrol işareti, çıkış işaretine ya da çıkış işaretinden üretilen işaretle bir referans işaret arasındaki farka ya da bunların toplamına bağlı olan bir kontrol sistemidir. Bu sistemlere geri beslemeli kontrol sistemleri de denilmektedir (Sarıoğlu 2000).

Geri beslemeli sistemlerde (Şekil 2.2) giriş ve çıkış büyüklükleri karşılaştırılarak uygun bir denetim hareketi yapılabilir. Dolayısıyla sistemin değişkenleri arasında neden-sonuç ilişkisi varsa, o sistemde geri besleme vardır denilebilir. Bu çalışmada da üzerinde durduğumuz pH nötralizasyon prosesi benzetimi geri beslemeli olarak tasarlanmıştır.

Geri beslemenin genel özellikleri şöyle sıralanabilir;

1. Kesinliği artırır. Başka bir deyişle, giriş değerinin büyük bir yakınlıkla elde edilmesine yol açar.
2. Çıkış – Giriş oranının sistem özelliklerindeki değişmelere karşı duyarlılığını azaltır.
3. Doğrusallıktan sapmaların etkilerini azaltır.
4. Sistemin iyi yanıt vereceği frekans aralığını, bant genişliğini artırır.
5. Salınım ya da kararsızlıklara eğilimi oluşturur (Akçalı 2001).



Şekil 2.2 Geri beslemeli sistem blok diyagramı.

## 2.2 PROSES DENETİM YÖNTEMLERİ

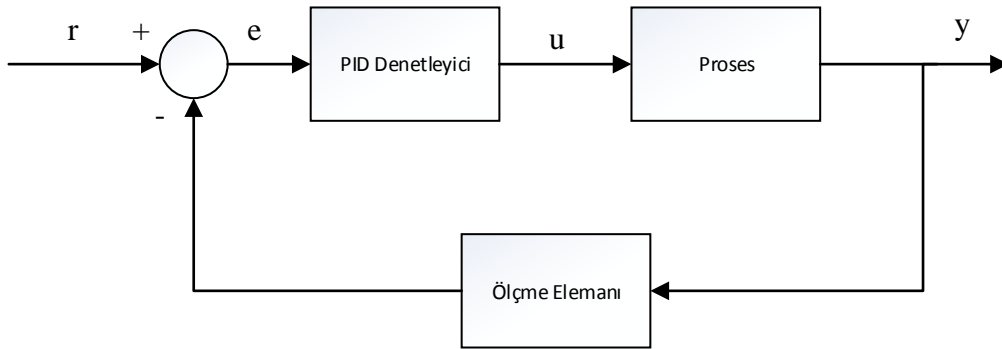
Günümüz endüstrisinde klasik kontrol yöntemlerinin halen yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir. En basit kontrol yöntemi olan aç-kapa ve daha gelişmiş olan “PID (proportional, integral, derivative) denetim” yöntemleri bu klasik kontrol yöntemlerine örnek verilebilir. Doğrusal olmayan proseslerin denetimindeki zorlukların görülmesi ve klasik

denetleme yöntemlerinin bu proseslerde yeteri kadar başarılı olamaması nedeni ile de Lyapunov yaklaşımını bu çalışmada incelediğimiz gürbüz, bulanık mantık ve yapay sinir ağları ile geliştirilen denetleme yöntemleri uygulanmaya başlanmıştır. Çalışmamızda doğrusal olmayan pH nötralizasyon prosesinin klasik denetleme tekniği olan PI ile de Matlab-simulink yazılımsal ortamında benzetim çalışmaları yapılmış, Lyapunov fonksiyonu yaklaşımlı gürbüz denetleme yöntemine nazaran ne denli başarısız olduğu çok açık görülmüştür.

### 2.2.1 PID Denetim Sistemi

PID denetimi bir geri beslemeli denetim yöntemidir. Bu denetim, birçok denetim sistemine uygulanabilirliği nedeni ile her ne kadar verilen bir çok durumda optimal denetim sağlamıyorsa da halen endüstrinin yarından fazlasında tercih sebebidir.

Şekil 2.3’de bir prosesin PID denetimi gösterilmektedir. Eğer proses girişinin, çıkışa bağlı olarak matematiksel modeli çıkartılabilirse o zaman kapalı çevrim sistemin geçici ve durağan durum değerlerini karşılayan denetleyicinin parametrelerini belirlemek mümkün olur. Aksi takdirde yani prosesin matematiksel modeli elde edilemeyecek kadar karmaşıkta PID denetleyici için analitik yaklaşım mümkün olmayacaktır. Bu durumda PID katsayıları ayarlama tekniklerinde de belirteceğimiz Ziegler-Nichols yöntemi gibi deneysel yaklaşımlara başvurmamız gerekecektir (Ogata 2003).



Şekil 2.3 Bir prosesin PID denetimli blok diyagramı.

PID denetiminde süreç şu şekilde ilerlemektedir; çıkış değeri (y) bir ölçüm elemanı ile ölçüldükten sonra karşılaştırma elemanında istenilen değerde olup olmadığına bakılır, aradaki fark alınarak bir hata (e) değeri elde edilir. PID Denetleyici bu hatayı küçültecek yönde giriş

değişkenine bir sinyal ( $u$ ) gönderir. İşte kontrolörün gönderdiği bu sinyal hatanın fonksiyonudur. PID denetleyici yapısında şunları barındırır;

**P (oransal) Etki:** Oransal denetleyici, çıkış sinyalini karşılaştırma elemanından aldığı hata sinyaliyle doğru orantılı olarak değiştirir. “ $K_p$ ” oransal kazanç, “ $u$ ” denetleyici çıktısı, “ $e$ ” ise hata terimi olmak üzere;

$$u(t) = K_p e(t)$$

(2.1)

Sistem giriş değişkeninin bağlı olduğu son kontrol elemanına denklem 2.1’den de görüleceği üzere hata ile orantılı bir sinyal gönderilir.

**I (integral) Etki:** Oransal etkinin kararlı hal hatasını yok etmek amacı ile kontrole integral etkisi ilave edilir. Böylece kontrol çıkışı hatanın o andaki değerine bağlı kalmayıp aynı zamanda hatanın geçmişteki değerlerine de bağlı olacaktır. “ $K_i$ ” integral kazancı olmak üzere;

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

**D (türevsel) Etki:** Kontrol edilen değişkenin istenilen değerden uzaklaşmasını önlemek amacı ile denetleyiciye türevsel etki ilave edilir. Denetleyici üzerine etkisi ani ve fark edici olabilir. Dolayısıyla bu durum sisteme yansır, sinyallerde gürültü varlığında kullanılması pek tercih edilmez. “ $K_d$ ” türevsel kazanç olmak üzere;

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

Bu üç etkinin beraber kullanılması ile PID denetleyici elde edilmiş olur (Aras 2010).

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

Uygun tasarlanmış bir PID denetleyici, denetlenen prosesin davranışını şu şekilde etkiler:

1. Sönümü düzeltir ve aşımı azaltır.
2. Yükselme zamanını azaltır.
3. Band genişliğini azaltır.
4. Kazanç payı, faz payı ve rezonans tepesini iyileştirir.
5. Yüksek frekans gürültülerini süzer.

### 2.2.1.1 PID Katsayılarının Ayarlanması

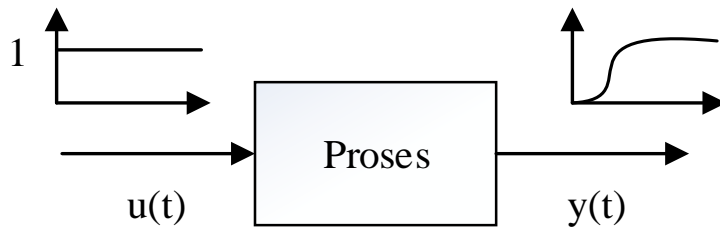
Öngörülen performans spesifikasyonlarını karşılamak için denetleyici parametrelerini seçme işlemine “denetleyici ayarı” denilmektedir. PID katsayılarının ayarlanmasında kullanılan Cohen-Coon, Yuwana-Seborg gibi birçok yöntem bulunmaktadır. Fakat bu yöntemlerin içinde kullanımı itibari ile en belirgin olarak karşımıza çıkan ve çalışmamızın dördüncü bölümünde de kullanacağımız Ziegler-Nichols’un yöntemidir.

#### 2.2.1.1.1 Ziegler-Nichols Ayarlama Yöntemi

Daha önceki başlıklarda da belirttiğimiz üzere prosesin matematiksel modeli elde edilemiyor ise PID denetleyici için analitik yaklaşım mümkün olamayacaktır. Bu durumda Ziegler-Nichols yöntemi gibi deneysel yaklaşımları deneriz. Bu ayarlama iki yöntem kullanılmaktadır.

##### 2.2.1.1.1.1 Birinci Ayarlama Yöntemi

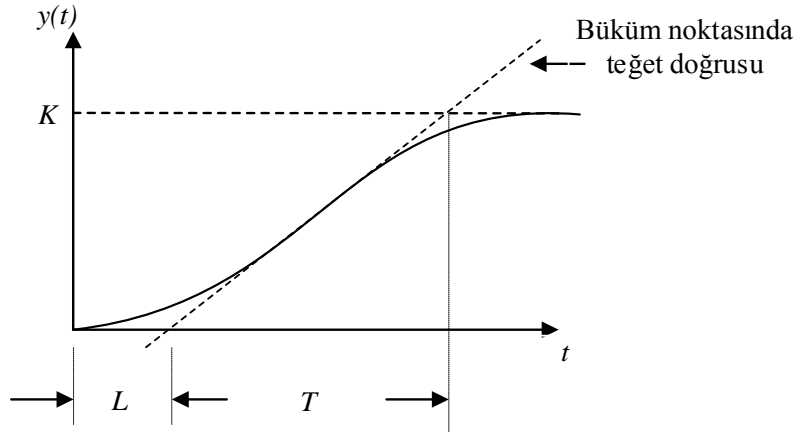
Bu ayarlama yöntemi açık çevrim ayarlama yöntemidir. Denetleyici devreden çıkartılır. Sisteme birim basamak verilerek sistem cevabının Şekil 2.4’teki gibi “S” biçiminde bir eğri gibi olması beklenir. Eğer yanıt “S” biçimli olmazsa bu yöntem uygulanamaz.



Şekil 2.4 Prosesin birim-basamak yanıtı gösterimi.

“S” biçimli eğri, kendisine büküm noktasında bir teğet çizilerek belirlenen gecikme zamanı  $L$  ve zaman sabiti  $T$  ile betimlenebilir. Bu sabitler, Şekil 2.5’te gösterildiği gibi teğet doğrusunun, zaman eksenini ve  $y(t) = K$  doğrusu ile kesiştiği noktalar tarafından belirlenir. Bunun sonrasında sistemin transfer fonksiyonu yani prosesin çıktısının girdisine oranı, taşınım gecikmeli birinci dereceden bir sistem ile denklem (2.5)’teki gibi yaklaşık olarak ifade edilebilir. Çalışmamızın ileriki bölümlerinde de belirtilecek olan zayıf asit – kuvvetli baz nötralizasyon prosesimizin transfer fonksiyonu da birinci dereceden bir fonksiyon olarak elde edilecektir (Ogata 2003).

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts+1} \quad (2.5)$$



Şekil 2.5 S-biçimli yanıt eğrisi grafiği.

Bulunan bu değerler ve çizelge 2.1’den de yararlanarak denklem (2.6)’daki PID denetleyicisi tasarlanmış olur. Burada “ $T_i$ ” integral zaman sabitini, “ $T_d$ ” ise türev zaman sabitini belirtmektedir.

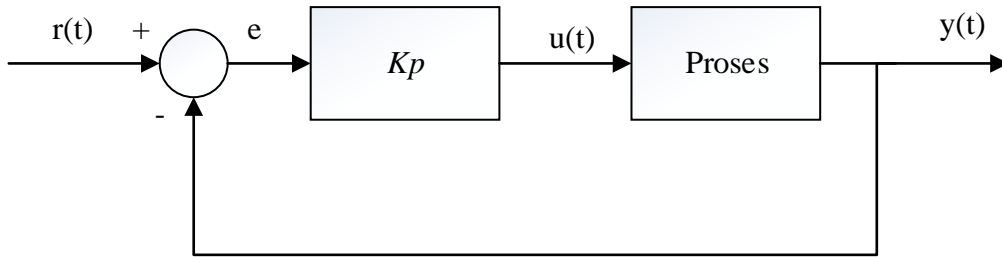
Çizelge 2.1 Ziegler-Nichols birinci ayar yöntemi.

Denetleyici Tipi	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$T/L$	$\infty$	0
PI	$0.9 \cdot T/L$	$L/0.3$	0
PID	$1.2 \cdot T/L$	$2 \cdot L$	$0.5 \cdot L$

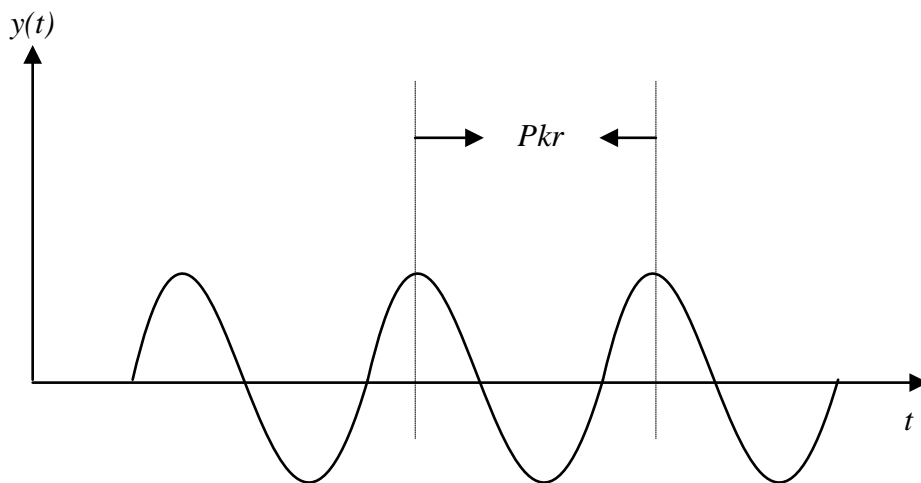
$$G_y(s) = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (2.6)$$

### 2.2.1.1.1.2 İkinci Ayarlama Yöntemi

Bu ayarlama yöntemi ise kapalı çevrim ayarlama yöntemidir. Denetleyici devreden çıkartılmaz. Öncelikle  $T_i = \infty$  ve  $T_d = 0$  alınır. Şekil 2.6'da da görüldüğü üzere sadece orantılı denetleyiciyi kullanarak  $K_p$ 'yi sıfırdan proses cevabının ilk defa kalıcı salınımlar (osilasyonlar) gösterdiği bölgedeki kritik kazanç değeri  $K_{kr}$ 'ye kadar artırırız. Böylece  $K_{kr}$  ve buna karşılık gelen Şekil 2.7'de de belirtilmiş olan periyot  $P_{kr}$ , deneysel olarak belirlenmiş olur. Şunu da söylemek gerekir ki  $K_p$  hangi değeri alırsa alsın eğer proses cevabı kalıcı salınımlar göstermiyorsa bu yöntem uygulanamaz (Ogata 2003).



Şekil 2.6 Orantılı denetleyiciye sahip kapalı çevrim sistemi blok diyagramı.



Şekil 2.7  $P_{kr}$  periyotlu kalıcı salınımlar grafiği.

Birinci yöntemde olduğu gibi yine bulunan tüm bu değerler ve çizelge 2.2'den de yararlanarak denklem (2.6)'daki PID denetleyicisi tasarlanmış olur.

Çizelge 2.2 Ziegler-Nichols ikinci ayar yöntemi.

Denetleyici Tipi	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0.5 * K_{kr}$	$\infty$	0
PI	$0.45 * K_{kr}$	$1/1.2 * P_{kr}$	0
PID	$0.6 * K_{kr}$	$0.5 * P_{kr}$	$0.125 * P_{kr}$

### 2.2.2 Lyapunov Fonksiyonu İle Doğrusal Olmayan Sistemlerin Gürbüz Denetimi

Denetleyici tasarımına geçmeden önce bundan sonra  $V(x)$  olarak tanımlanacak olan Lyapunov fonksiyonunun tayin edilebilmesi için hangi gerek ve yeter koşulların oluşması gerektiğini belirtmek gerekmektedir. Öncelikle denetleyicinin oluşturulma gerekçesini açıklayalım; daha önceki bölümlerde de kısaca değinildiği üzere doğrusal olmayan proseslerin alışlagelmiş denetleme yöntemi olan PID denetleyicileri ile istenilen seviyede başarımlar elde edilemeyiş bilim insanlarını daha karmaşık yapıdaki denetleyici tasarımlarına yöneltmiştir.

Bu tasarımlardan bir tanesi de Rus bilim adamı Lyapunov'un ortaya koymuş olduğu Lyapunov fonksiyonu yaklaşımı gürbüz denetim yöntemidir. Lyapunov'a göre kapalı çevrim bir proseste girilen referans değere göre ortaya çıkan her hata değeri ( $e$ ) bir enerjiye sahiptir. Hatanın yok edilebilmesi ve istenilen proses yanıtının alınabilmesi, için ise bu enerjinin sönmülmesi yani hatanın sifıra doğru gitmesi, yakınsaması zaruridir. Bu bağlamda Lyapunov, tasarlanacak olan denetleyici için rastgele bir fonksiyon tanımlayacak, fakat bu fonksiyonu kullanabilmek için yine belirlemiş olduğu Lyapunov kararlılık kriterlerine uyumluluğunu test edecektir. Bu kriterleri sağlayan rastgele belirlenmiş Lyapunov fonksiyonu, prosesin matematiksel modelinde girişini şekillendirebilmek için kullanılabilir.



### 2.2.2.1 Lyapunov Kararlılık Çalışması

Tasarımın detaylarına geçmeden önce bazı ön tanımların yapılması, kararlılığın, dolayısıyla sistemin denge noktasının ve Lyapunov kararlılık kriterlerinin ortaya konulması gerekmektedir.

#### 2.2.2.1.1 Ön Tanımlar

Belirlenecek olan Lyapunov fonksiyonu  $V: R^n \rightarrow R$  olsun. Bunun bağımsız değişkenini,  $n$ . mertebeden bir sistemin  $x$  durum değişkeni vektörü olarak düşünmek, anlama kolaylığı sağlayacaktır.  $V(x)$ 'in skaler bir büyüklük olduğu unutulmamalıdır.

##### 2.2.2.1.1.1 Pozitif ve Negatif Fonksiyonlar

$\forall x \in R^n$  için  $V(x) > 0$  ve  $V(x) = 0 \Leftrightarrow x = 0$  ise  $V$  fonksiyonuna “kesin pozitif” denir.

$\forall x \in R^n$  için  $V(x) < 0$  ve  $V(x) = 0 \Leftrightarrow x = 0$  ise  $V$  fonksiyonuna “kesin negatif” denir.

$\forall x \in R^n$  için  $V(x) > 0$  ve  $x = 0 \Rightarrow V(x) = 0$  ise  $V$  fonksiyonuna “yarı kesin pozitif” denir.

$\forall x \in R^n$  için  $V(x) < 0$  ve  $x = 0 \Rightarrow V(x) = 0$  ise  $V$  fonksiyonuna “yarı kesin negatif” denir.

##### 2.2.2.1.1.2 Pozitif ve Negatif Matrisler

$Q \in R^{n \times n}$  bir kare matris ve  $x \in R^n$  bir vektör değişkeni olsun. Buna göre skaler  $x^T Q x$  fonksiyonu;

Kesin pozitif ise  $Q$  matrisine “kesin pozitif ( $Q > 0$ )” denir.

Kesin negatif ise  $Q$  matrisine “kesin negatif ( $Q < 0$ )” denir.

Yarı kesin pozitif ise  $Q$  matrisine “yarı kesin pozitif ( $Q \geq 0$ )” denir.

Yarı kesin negatif ise  $Q$  matrisine “yarı kesin negatif ( $Q \leq 0$ )” denir.

Bu bilgiler ışığında  $Q$  matrisinin  $ij$  konumu elemanı  $q_{ij}$  ile gösterilirse,

$$x^T Q x = q_{11}x_1^2 + q_{22}x_2^2 + \dots + (q_{12} + q_{21})x_1x_2 + (q_{13} + q_{31})x_1x_3 + (q_{23} + q_{32})x_2x_3 + \dots \quad (2.7)$$

biçiminde tanımlanabilir.

### 2.2.2.1.1.3 Simetrik ve Anti-Simetrik Matrisler

$Q^T = Q$  ise  $Q$  matrisi “simetrik”,  $Q^T = -Q$  ise  $Q$  matrisi “anti-simetrik” tir.

$Q$  matrisi simetrik ise,  $x^T Q x$  fonksiyonu;

$$x^T Q x = q_{11}x_1^2 + q_{22}x_2^2 + \dots + 2q_{12}x_1x_2 + 2q_{13}x_1x_3 + 2q_{23}x_2x_3 + \dots \quad (2.8)$$

biçiminde tanımlanabilecektir.

$Q$  simetrik reel kare matrisin tüm özdeğerleri ( $\lambda$ ) reeldir. Dolayısıyla;

$|x|^2 = x^T x = x_1^2 + x_2^2 + \dots$  olmak üzere,

$$\lambda_{\min} |x|^2 \leq x^T Q x \leq \lambda_{\max} |x|^2 \quad (2.9)$$

yazılabilir. Bu bilgiler doğrultusunda şunları söyleyebiliriz;

$Q$  simetrik reel kare matrisin bütün özdeğerleri;

pozitif ise  $Q > 0$ ,

negatif ise  $Q < 0$ ,

pozitif ya da sıfır ise  $Q \geq 0$ ,

negatif ya da sıfır ise  $Q \leq 0$  denilebilir.

### 2.2.2.1.1.4 Denge Noktası, Kararlılık ve Diğer Kavramlar

Sistem kararlılığı için Lyapunov haricinde de kararlılık tanımları mevcuttur. Tüm kararlılık tanımlarında, ana fikir, sistem davranışının, kabul edilebilir sınırlar içinde kalıp kalmadığını tespit etmektir. Burada önemli olan nokta, iyi bir sistem davranışının ne anlama geldiği ve

matematiksel olarak nasıl ifade edilebileceğidir. Herhangi bir diferansiyel denklemin çözümlerini anlamak için yapmak gereken ilk şey, varsa sistemin denge noktalarını (kritik noktalarını) bulmaya çalışmaktır. Bir dinamik sistemin birden fazla denge noktası olabilir. Kararlılık kuramlarının tanımında ve ispatında denge noktası çoğunlukla merkez olarak alınır.

### **Denge Noktası:**

$\dot{x} = f(x)$   $f : D \rightarrow R^n (D \in R)$  olan otonom bir diferansiyel denklem için denge noktasını  $x = x_e$  olarak kabul edelim. Diğer bir deyişle  $f(x_e) = 0$  olduğu görülecektir.

### **Kararlılık:**

Eğer her  $\varepsilon > 0$  için  $\delta(\varepsilon) > 0$  koşulunu sağlayan bir  $\delta$  var ve  $\|x(0) - x_e\| < \delta \Rightarrow \|x(t) - x_e\| < \varepsilon$  koşulu sağlanıyor ise sistemin denge noktası  $x = x_e$  kararlıdır. Aksi takdirde kararsızdır.

Bu kararlılık tanımı,  $\dot{x} = f(x)$  denkleminin çözümünün  $t \geq t_0$  için denge noktasının yakınında kalması gerektiğini söyler. Bu kararlılık koşuluna uyan sistem, denge noktasına yakın bir başlangıç koşulu ile başlarsa, denge noktasına yakın bir bölgede kalmaya devam eder. Bu tanım çok zayıf bir tanımdır ve çözümün denge noktasına yakınsamasını gerektirmez. Fakat çoğu sistem için çözümün denge noktasına yakın kalması yeterli değildir.

### **Yakınsama:**

Denge noktası  $x = x_e$  olan bir sistem verilsin. Eğer,  $\|x(0) - x_e\| < \delta \Rightarrow \lim_{t \rightarrow \infty} x(t) = x_e$  koşulunu sağlayan bir  $\delta_1 > 0$  bulunabiliyorsa,  $x = x_e$  denge noktası yakınsaktır denir. Yakınsak bir denge noktası verildiğinde, denge noktasına yeterince yakın başlayan her çözümün,  $t \rightarrow \infty$  iken, denge noktasına geleceği anlaşılır. Kararlılık ve yakınsama iki farklı kavramdır ve biri diğerini zorunlu kılmaz.

### **Asimtotik Kararlılık:**

Eğer bu denge noktası, hem kararlı hem de yakınsak ise, o zaman bu denge noktasına asimtotik kararlıdır denir. Asimtotik kararlılık çoğu uygulama için istenen bir kararlılıktır. Bu kararlılığın zayıf yanı sistemin denge noktasına hangi hızda gittiğini söylememesidir.

### **Üssel Kararlılık:**

Asimtotik kararlılığın daha güçlü formu, üssel asimtotik kararlılıktır. Denge noktası  $x = x_e$  olan bir sistem eğer  $\forall t > 0$  için  $\|x(0) - x_e\| < \delta \Rightarrow \|x - x_e\| \leq \|x(0) - x_e\| e^{-\lambda t}$  koşulunu sağlayan iki gerçel sabit  $\alpha, \beta > 0$  varsa,  $x = x_e$  denge noktası üssel kararlıdır. Belirtilen koşul tüm  $x \in R^n$  için sağlıyorsa küresel olarak üssel kararlıdır denir.

#### **2.2.2.1.2 Lyapunov Kararlılık Teoremi**

Bir önceki bölümde verilen bir diferansiyel denklemin açık çözümlerini bularak sistemin kararlılığını, yakınsaklığını ve diğer özelliklerini tanımlamayı gördük. Fakat diferansiyel denklemlerin açık çözümlerini bulmak genelde zordur ve bu gibi durumlarda sistemin çözümünün zaman sonsuza giderken nasıl davrandığını anlamaya çalışmak, sistem hakkında oldukça fazla bilgi verebilir. Diferansiyel denklemini çözmeden sistemin özelliklerini tanımlamak için Lyapunov fonksiyonu kullanmamız gerekmektedir. Bu method Rus matematikçi Aleksandr Mikhailovich Lyapunov tarafından 1892 yılında bulunmuş ve onun doktora tezinde yer almıştır. Teoremi şu şekilde tanımlayabiliriz:

$\dot{x} = f(x); x(t_0) = x_0$  sistemini düşünelim. Lyapunov fonksiyonu olarak belirlenecek olan kesin pozitif  $V(x)$  fonksiyonunun zamana göre türevini negatif bulabiliyorsak, sistem asimtotik kararlıdır yani Lyapunov ölçütüne göre kararlıdır diyebiliriz. Kısacası her  $x_0$  başlangıç şartı ile  $t \rightarrow \infty$  için  $x(t) \rightarrow 0$  oluyorsa sistem Lyapunov ölçütüne göre kararlıdır denilir.

Bu teoremin mantığı, sürekli azalan kesin pozitif bir fonksiyonun sifıra gitmek zorunda olduğudur. Yukarıdaki şartın sağlanmadığı durumda sistemin kararsız olduğunu

söyleyemeyiz. Belki bir başka  $V(x)$  Lyapunov fonksiyonu seçimiyle o şartı sağlamak mümkün olabilir. Ancak  $V(x)$  kesin ya da yarı kesin pozitif bulunuyorsa sistemin kararsız olduğu söylenebilir.

### 2.2.2.1.3 Lyapunov Fonksiyonunun Doğrusal Zamanla Değişmeyen Sistemlere Uygulanması

$\dot{x} = Ax$  sistemini düşünelim.  $P$  simetrik kesin pozitif bir matris olmak üzere Lyapunov fonksiyonunu  $V = x^T Px$  seçelim. Bu fonksiyonu kullanabilmek için türevini kesin negatif yapmaya çalışalım. Buna göre;

$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{x}^T Px + x^T P\dot{x} \\ V &= x^T A^T Px + x^T PAx \\ \dot{V} &= x^T (A^T P + PA)x\end{aligned}\tag{2.10}$$

Eğer simetrik kesin pozitif olduğu bilinen belli bir  $Q$  matrisi ile,

$$A^T P + PA = -Q\tag{2.11}$$

Simetrik denklemden çözülen  $P$ , simetrik kesin pozitif bulunuyorsa sistem kararludur denir (Slotine and Li 1991).

### 2.2.2.2 Lyapunov Fonksiyonu ile Doğrusal Olmayan Denetleyici Tasarımı

Doğrusal olmayan denetleyici tasarımındaki amaç, çok kısa zaman diliminde giriş değeri ile çıkış değeri arasındaki farkı sifira taşımaktır. Hata dinamiğinin sifira taşınması için Lyapunov kararlılık kriterleri doğrultusunda  $\dot{V}(x)$  kesin negatif çıkacak şekilde giriş değişkeni atanabilirse kararlı bir denetim elde edilmiş olur.

Belirlenecek olan kesin pozitif herhangi bir  $V(x)$  Lyapunov fonksiyonu için  $k < 0$  olmak üzere  $\dot{V}(x) = kV(x)$  olacak şekilde sistemin giriş değişkeni atanırsa,  $\dot{V}(x)$  kesin negatif olmuş olur. Dolayısıyla denetim belirlenen bu fonksiyon ile gerçekleştirilmiş olur. Çalışmamızın ileriki bölümlerinde denetimin nasıl tasarlandığı detaylı bir şekilde anlatılacaktır.

## BÖLÜM 3

### ZAYIF ASİT KUVVETLİ BAZ pH NÖTRALİZASYON PROSESLERİ

#### 3.1 ASİTLER VE BAZLAR

Kimyada bugüne kadar çeşitli asit-baz tanımları yapılmış ve kullanılmıştır. İlk zamanlarda yalnızca sulu çözeltiler gözlemlenmiş ve turnusol kağıdını kırmızıya çeviren, tadı ekşi olan maddeler asit, turnusol kağıdını maviye çeviren ve tadı acı olan maddeler ise baz olarak isimlendirilmiştir. Zamanla bilim adamlarının araştırmaları arttıkça, maddelerle ilgili daha fazla bilgi edinilerek asit ve bazlarla ilgili daha ayrıntılı tanımlar yapılmış ve günümüzde de hala kullanılmaktadır (Say vd. 2009).

**Arrhenius asit-baz tanımı:** 1884 yılında Svanté Arrhenius tarafından ilk defa vurgulanan ve daha sonra Wilhelm Oswald tarafından desteklenerek geliştirilen ve günümüzde hala kullanılan tanıma göre; sulu çözeltilerinde iyonlaşarak hidronyum iyonu oluşturan maddelere asit, sulu çözeltilerinde iyonlaşarak hidroksit iyonu oluşturan maddelere baz denir.

**Brønsted-Lowry asit-baz tanımı:** 1923 yılında Johannes Nicolaus Brønsted ve Thomas Martin Lowry adlı iki kimyacı özellikle analitik kimyada çok kullanılan asit-baz kavramını önerdiler. Buna göre, proton veren maddeler asit, proton alan maddeler ise baz olarak tanımlanmıştır.

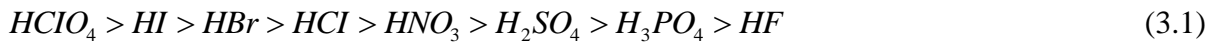
**Lewis asit-baz tanımı:** Gilbert N. Lewis'in 1923 yılında önerdiği ve 1938 yılına kadar geliştirmeye devam ettiği asit-baz tanımında ise bir atom, molekül veya iyon ile kovalent bağ oluşturmak için uygun eşleşmemiş elektron çifti içeren maddeler baz, kovalent bağ oluşturabilmek için bazdan gelecek elektron çiftini kabul edebilecek maddeler ise asit olarak isimlendirilmiştir.

Asit ve bazların dengesi dünyanın en önemli araştırma konularından biri olmuştur. Asit-baz dengelerinin matematik problemlerine girilmeden önce, asit ve bazların kuvvetlerinin ele almanız gerekmektedir. Zira ele alınan prosesin yapısının daha iyi anlaşılabilmesi için bu gereklidir (Say vd. 2009).

### 3.1.1 Suda Asit ve Baz Dengeleri

Bir asit veya baz suda çözüldüğünde iyonlaşır (dissosiyasyon). İyonlaşmanın derecesi asit veya bazın kuvvetiyle ilişkilidir. Kuvvetli bir asit %100 iyonlaşır, zayıf bir asit ise kısmen iyonlaşır. Aynı durum bazlar için de geçerlidir.

$HCl$ ,  $HBr$ ,  $HI$ ,  $HNO_3$ ,  $HClO_4$  ve  $H_2SO_4$  gibi asitler kuvvetli asitlerdir. Su, oldukça kuvvetli bir baz olduğundan bu asitlerin sudaki iyonlaşması %100 olup asit kuvvetleri arasında bir fark görülmez. Bu durum suyun dengeleme etkisi olarak bilinir. Bu asitlerin asit kuvvetlerinin farkının belirlenmesi için daha zayıf bazik karakterde bir çözücüye karşı davranışlarını incelemek gerekir. Örneğin asetik asit,  $CH_3COOH$ , bu amaçla kullanıldığında suya göre aynı kuvvette görünen asitler, kısmen ve farklı derecede iyonlaşma gösterirler. Böylece kuvvetliliklerinin farklılandırılması mümkün olur. Sonuçta asitlerin, azalan kuvvetlerine göre sırası denklem (3.1)'deki gibidir (Demirci ve Özkan 1998).

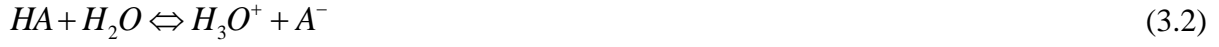


Periyodik çizelgede IA grubu elementlerinin hidroksitleri (alkali metal hidroksitleri), suda kuvvetli bazik çözelti oluştururlar. IIA grubu elementlerinin çözünen hidroksitleri de kuvvetli baz olarak tanımlanabilir.

Sulu çözeltide kısmen iyonlaşan asit ve bazlar, zayıf asit ve bazlardır.  $CH_3COOH$ ,  $HNO_2$ ,  $Al(H_2O)_6$  zayıf asitlere örnek olarak verilebilir. Zayıf bazlara ise  $NH_3$ ,  $C_6H_5NH_2$ ,  $CH_3NH_2$ ,  $NO_2$ ,  $HCO_3$  örnekleri düşünülebilir (Demirci ve Özkan 1998).

Zayıf asit ve bazların sudaki çözeltilerinde meydana gelen denge tepkimelerini ele alalım. Bir tek  $H$  iyonu verebilen zayıf bir asidi  $HA$  genel formülü ile gösterelim. Böyle bir çözeltide iki

denge söz konusudur. Biri asidin iyonlaşma dengesi (denklem (3.2)), diğeri ise hem asit hem de baz gibi hareket eden suyun iyonlaşma dengesidir (denklem (3.3)).



Çok zayıf olmayan asit çözeltilerinde genellikle denklem (3.3)' deki denge, denklem (3.2)' dekinin yanında ihmal edilir. Dolayısıyla zayıf asit çözeltisindeki etkin denge, denklem (3.2) dengesidir. Bu dengenin denge sabiti ifadesi ise denklem (3.4)' de verilmiştir.

$$K_{denge} = \frac{[H_3O^+][A^-]}{[HA][H_2O]} \quad (3.4)$$

Çalışma çözeltilerinde suyun derişimi hemen hemen sabittir (55.6 M). Bu nedenle denklem (3.4) eşitliği, denklem (3.5)' daki şekle getirilebilir.

$$K_{denge} \cdot [H_2O] = \frac{[H_3O^+][A^-]}{[HA]} = K_a \quad (3.5)$$

$K_a$  denge sabitine asitlik sabiti denir.

Bir tek proton alabilen zayıf bir bazı  $B$  genel formülüyle gösterelim. Suda zayıf asit çözeltisine benzer şekilde denklem (3.6) ve denklem (3.7)' deki iki denge tepkimesinden söz edebiliriz.



Çok zayıf olmayan baz çözeltisinde denklem (3.7)' deki denge ihmal edilebilir. Denge sabiti denklem (3.8)' deki gibi verilebilir.



$$K_{denge} = \frac{[BH^+][OH^-]}{[B][H_2O]} \quad (3.8)$$

Daha sonra denklem (3.9)'deki biçime getirilebilir.

$$K_{denge} \cdot [H_2O] = \frac{[BH^+][OH^-]}{[B]} = K_b \quad (3.9)$$

$K_b$  denge sabitine bazlık sabiti denir (Demirci ve Özkan 1998).

## 3.2 pH, TİTRASYON VE NÖTRALİZASYON KAVRAMLARI

### 3.2.1 Suyun İyonlaşma Sabiti ve pH Kavramı

Saf su, zayıf asit ve bazlara benzer şekilde az miktarda iyonlaşır, yani amfiprotik özellik gösterir. Suyun iyonlaşma dengesini denklem (3.12)'deki gibi göstermek mümkündür.



$$K_{denge} = \frac{[H_3O^+][OH^-]}{[H_2O]^2} \quad (3.11)$$

$$K_{denge} \cdot [H_2O]^2 = [H_3O^+][OH^-] = K_{su} \quad (3.12)$$

Bütün denge sabitlerinde olduğu gibi suyun iyonlaşma sabiti,  $K_{su}$ , sıcaklığa bağlıdır. Uygulamada en çok kullanılan sıcaklık olan  $25^\circ C$ 'de  $K_{su}$ 'nun değeri  $10^{-14}$  dür. Sıcaklık arttıkça iyonlaşma yüzdesi artacağından  $K_{su}$  yükselir. Örneğin  $60^\circ C$ 'de bu değer  $9.55 \times 10^{-14}$  ve  $1000^\circ C$ 'de  $5.50 \times 10^{-13}$ 'e ulaşır. Analitik deneylerin çoğu, oda sıcaklığında yapıldığından suyun denge sabiti olarak çalışmamızda  $10^{-14}$  değeri kullanılacaktır. Saf suda hidronyum ve hidroksit iyonu derişimlerinin aynı olacağı kesindir (denklem (3.13)). Dolayısıyla;

$$[H_3O^+] = [OH^-] \quad (3.13)$$

$$K_{su} = [H_3O^+]^2 = [OH^-]^2 \quad (3.14)$$

$$[H_3O^+] = [OH^-] = \sqrt{10^{-14}} = 10^{-7} \quad (3.15)$$

bulunur.

Genellikle asit veya baz çözeltilerindeki hidronyum veya hidroksit iyonlarının derişimleri  $10^{-3}, 10^{-5}, 10^{-7}$  gibi üstel sayılar olduğundan, bunlarla hesaplar yapmak uygun görülmemektedir ve bunun yerine yeni bir derişim kavramı geliştirilmiştir, bu “ $p$ ” (power) kavramıdır. “ $p$ ”,  $-\log$  anlamına gelir. Bu nedenle,

$$pH = -\log [H_3O^+] \quad (3.16)$$

$$pOH = -\log [OH^-] \quad (3.17)$$

$$pK_{su} = -\log K_{su} \quad (3.18)$$

$$pK_a = -\log K_a \quad (3.19)$$

$$pK_b = -\log K_b \quad (3.20)$$

olacaktır.

$25^\circ C$  de saf suda ise denklem (3.21) ‘deki gibidir.

$$\begin{aligned} pH + pOH &= 14 \\ pH &= pOH = 7 \end{aligned} \quad (3.21)$$

Saf su için ve bütün nötral çözeltiler için  $pH$  ve  $pOH$  değerleri birbirine eşit olup 7 dir. Ancak çoğu çözeltilerde hidronyum iyonları derişimi hidrosit iyonları derişimine eşit değildir.  $pH$  değeri 0-7 olan çözeltiler “asidik”, 7-14 olan çözeltiler ise “baziktir” (Demirci ve Özkan 1998)

### 3.2.2 Titrasyon Kavramı

Hacim ölçümüne dayanan analize volumetrik analiz denir. Bu tür analizler oldukça çabuk yapılabilir ve yeterli doğrulukta sonuçlar verir. Volumetrik analiz işlemine titrasyon denir. Titrasyon, bir çözeltiliyi (buna genellikle titrant adı verilir), büret kullanarak diğeri bir maddenin çözeltilisine (buna genellikle analit adı verilir) yavaş yavaş ilave etmek demektir. Titrasyonları tepkime türlerine göre asit-baz (nötralizasyon), çöktürme, kompleksleştirme ve indirgenme-yükseltgenme titrasyonları şeklinde gruplara ayırmak mümkündür (Demirci ve Özkan 1998).

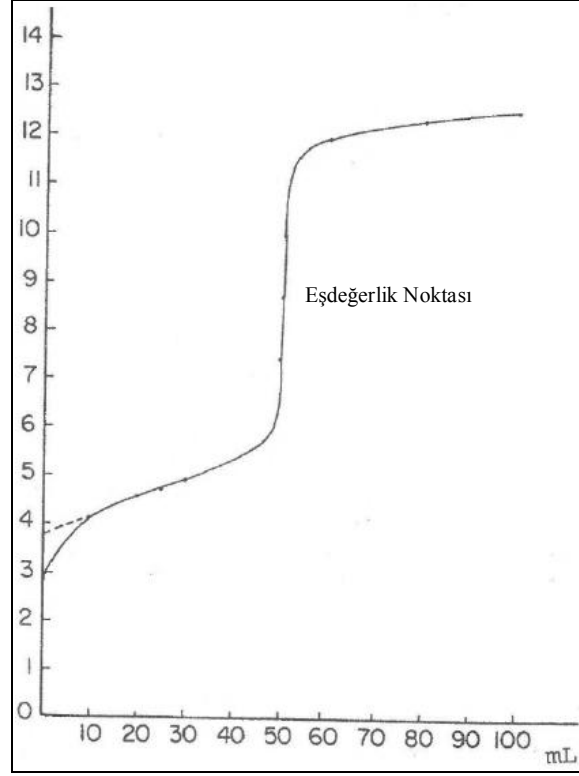
#### 3.2.2.1 Zayıf Asit - Kuvvetli Baz Titrasyonu

Dört farklı titrasyon durumu söz konusudur. Bunlar kuvvetli asit-kuvvetli baz titrasyonu, zayıf asit-kuvvetli baz titrasyonu ki çalışmamızda üzerinde duracağımız ve benzetim çalışması yapacağımız olan, kuvvetli asit-zayıf baz titrasyonu ve son olarak zayıf asit-zayıf baz titrasyonudur.

Zayıf asidin kuvvetli bazla titrasyonunda tepkime, zayıf asit molekülü ile  $OH^-$  arasındaki tepkime olarak gösterilebilir. Örneğin  $CH_3COOH$  (asetik asit) nin  $NaOH$  (sodyum hidrosit) ile titrasyonu denklem (3.22) ‘deki gibidir.



Tepkimede  $CH_3COO^-$  konjuge bazı olduğundan çözelti  $pH$  ’ı üzerinde etkilidir.  $K_a = 1,76 \times 10^{-5}$  olan 50mL, 0,1M  $CH_3COOH$  ’in 0,1M  $NaOH$  ile titrasyonunun sonucunda çizelge 3.1’ deki  $pH$  değerlerinden meydana gelen titrasyon eğrisi Şekil 3.1’ de verilmiştir.



Şekil 3.1 50 mL 0,1 M asetik asitin 0,1 M sodyum hidroksit ile titrasyon eğrisi (Demirci ve Özkan 1998).

Çizelge 3.1 50 mL 0,1 M asetik asitin 0,1 M sodyum hidroksit ile titrasyonunda pH değerleri (Demirci ve Özkan 1998).

$V_{\text{NaOH}}$ , mL	pH	$V_{\text{NaOH}}$ , mL	pH
0.0	2.88	50.0	8.73
10.0	4.15	50.1	10.00
20.0	4.58	60.0	11.96
25.0	4.75	70.0	12.22
30.0	4.93	80.0	12.36
40.0	5.36	100.0	12.52
49.9	7.45	$\infty$	13.00

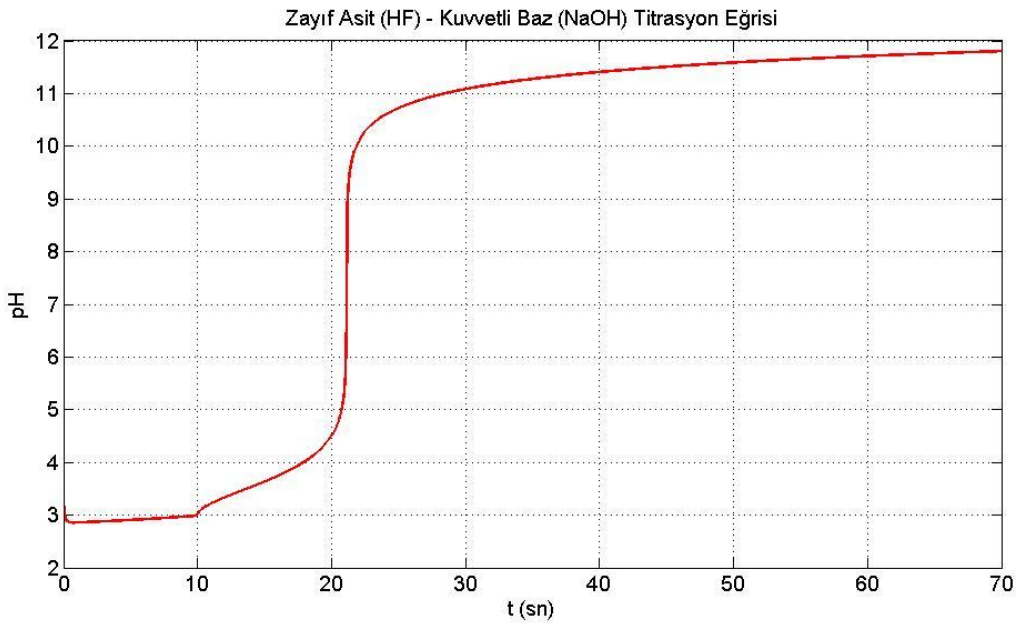
Genel olarak zayıf asit veya zayıf baz titrasyon eğrileri, kuvvetli asit kuvvetli baz eğrileri gibi keskin bir pH değişimi göstermezler. Zayıf asitin kuvvetli bazla titrasyonunda eşdeğer noktada pH mutlaka yediden büyük olur. Dolayısıyla bu tür titrasyonlarda bazik bölgede etkili indikatörlerin kullanılması gerekir (Demirci ve Özkan 1998).

Zayıf asit kuvvetli baz titrasyon eğrilerinin hesaplamaları dört farklı yaklaşımla yapılır. Şekil 3.2’ de de görüleceği üzere bu hesaplamalar eğrinin her farklı konumuna göre değişiklik gösterir (Alışkan 2006).



Şekil 3.2 Zayıf asit kuvvetli baz titrasyon eğrisinin hesaplanması gösterimi.

Düzenli artan baz akış hızı değerine karşın benzetim çalışmasını yaptığımız zayıf asit (hidroflorik asit, HF) kuvvetli baz (sodyum hidroksit, NaOH) prosesinin titrasyon eğrisi ise Şekil 3.3’ de ki gibi oluşmaktadır.



Şekil 3.3 Benzetim çalışması yapılan zayıf asit (HF) - kuvvetli baz (NaOH) prosesinin titrasyon eğrisi.

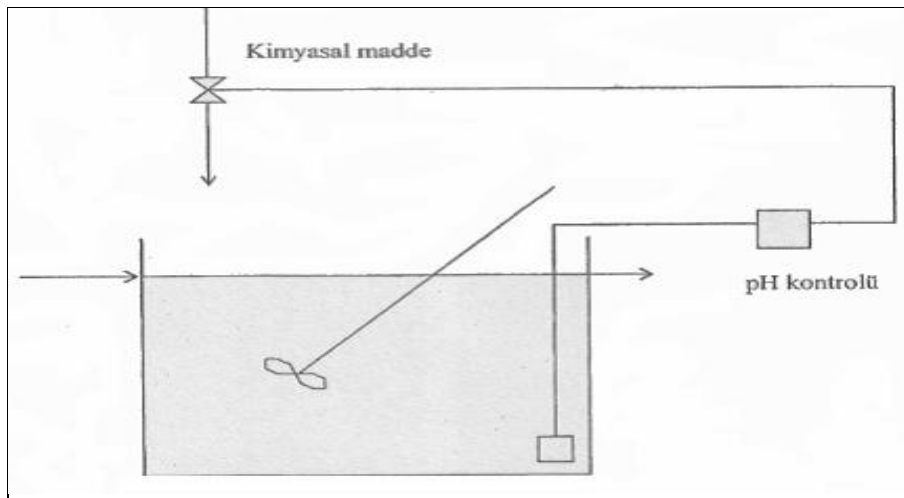
### 3.2.3 Nötralizasyon İşlemi ve Önemi

Asit-baz nötralizasyon işlemleri günümüzde bir çok alanda kullanılmaktadır. Bu çalışmamızda çıkış akımlarının (asit ve baz konsantrasyonları)  $pH$  değerinin çevre ve insan sağlığının korunması için çok önemli olduğu, dolayısıyla bu işlemin kanunlar ve yönetmeliklerle limitlere bağlandığı atık su arıtma tesislerindeki nötralizasyon işleminin bir benzetim çalışmasını gerçekleştireceğiz.

Atık su arıtma tesislerindeki nötralizasyon işlemi atık suyun alıcı ortama veya kanalizasyona deşarjından önce deşarj standartlarını sağlamak için  $pH$  'ın nötr  $pH$  civarına getirilmesi, arıtma düzenlerinde biyolojik arıtmaya girişten önce  $pH$  ayarlanması ve kimyasal çöktürme için uygun  $pH$  sağlanması amacıyla yapılır.

Bilindiği gibi suların ne asit ne de baz özelliği gösterdikleri tek nokta  $pH$  'ın 7 olduğu noktadır. Bu noktanın yakalanması su kalitesinin en önemli unsurlarından birisidir. Çalışmamızın dördüncü bölümünde bu nötralizasyon işleminin çıkış akımlarından biri olan baz konsantrasyonu üzerinde etkili olan beyaz gürültünün yok edilmesinin Lyapunov fonksiyonu yaklaşımlı doğrusal olmayan gürbüz denetimin, klasik denetim yöntemlerine nazaran ne denli performans ve başarımlı sağladığına değineceğiz.

Şekil 3.4 'de tipik bir aç-kapa tipi karışımli nötralizasyonun diyagramı gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Aç-kapa tipi karışımli nötralizasyon gösterimi (Alışkan 2006).

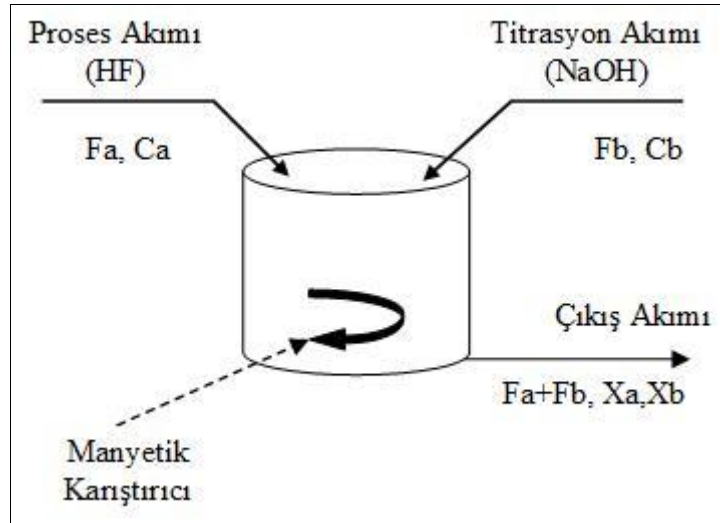
### 3.3 MATEMATİKSEL MODELLEME

#### 3.3.1 Zayıf Asit - Kuvvetli Baz Modeli

pH prosesi asidik ve bazik bölgeler arasındaki kimyasal reaksiyon olarak düşünülebilir. Sistemin modeli, materyal dengesi, kimyasal ve iyonik denge eşitlikleri kullanılarak elde edilebilir (Kotz and Treichel 1996). Çalışmamızda ise bir zayıf asit olan hidroflorik asit ( $HF$ )'in bir kuvvetli baz olan sodyum hidroksit ( $NaOH$ ) ile sürekli karıştırılmalı tank reaktördeki reaksiyonu incelenmiştir. İleriki bölümde bu reaksiyonun sırası ile kimyasal denklemleri ve bundan yola çıkarak önce durum uzay gösterimi daha sonra reaksiyon ölü zamanı da içine alan bir transfer fonksiyon gösterimi elde edilecektir.

##### 3.3.1.1 Kimyasal Denklemler

Zayıf asitlerin temel göstergesi suda tamamen çözünmemesi olarak belirtilebilir. Bu asitlerin her biri suda kendine has çözünürlük sabiti ile orantılı olarak çözülürler. Şekil 3.5'de ki proses gösteriminde, proses giriş akımı, titrasyon giriş akımı ve bunların kütlece toplamından oluşan çıkış akımları görülmektedir.



Şekil 3.5 İki giriş akımlı reaktör gösterimi.

Belirtilen bu pH prosesine ait denge eşitliklerini  $V$  hacimli bir reaktörde denklem (3.23) ve denklem (3.24)'deki gibi yazabiliriz;

$$V\dot{x}_a = F_a C_a - (F_a + F_b)x_a \quad (3.23)$$

$$V\dot{x}_b = F_b C_b - (F_a + F_b)x_b \quad (3.24)$$

Suyun içerisinde hidroflorik asit ve sodyum hidroksitin ayrışma reaksiyonları ise denklem (3.25)' deki gibidir;



Suyun içerisindeki toplam iyon dengesinin elektriksel olarak sağlanması yani elektronötrallik gereği iyonik yükler toplamının sıfır olması sebebiyle denklem (3.26) eşitliği yazılabilir;

$$[Na^+] + [H^+] = [F^-] + [OH^-] \quad (3.26)$$

Hidroflorik asit ve sodyum hidroksitin reaktörün çıkış akımındaki konsantrasyon değerleri sırası ile;

$$\begin{aligned} x_a &= [HF] + [F^-] \\ x_b &= [Na^+] \end{aligned} \quad (3.27)$$

olacaktır. Bu denklemlere göre zayıf asit olan hidroflorik asitin reaktör çıkışında tam olarak ayrışmadığı da anlaşılmaktadır.

Oda sıcaklığında hidroflorik asitin ve suyun çözünürlük sabiti ise;

$$\begin{aligned} K_a &= \frac{[F^-][H^+]}{[HF]} = 6.8 \times 10^{-4} \\ K_{su} &= 10^{-14} \end{aligned} \quad (3.28)$$

dir. Denklem (3.26)' daki eşitlikten yararlanarak denklem (3.29) elde edilir;



$$[H^+]^3 + [H^+]^2 \{K_a + x_b\} + [H^+] \{K_a (x_b - x_a) - K_{su}\} - K_{su} K_a = 0 \quad (3.29)$$

$$\begin{aligned} pH &= -\log H^+ \\ pK_a &= -\log K_a \end{aligned} \quad (3.30)$$

kabulleri ile;

$$x_b + 10^{-pH} - 10^{pH-14} - \frac{x_a}{1 + 10^{pK_a - pH}} = 0 \quad (3.31)$$

pH değerinin rahatlıkla bulunabileceği, denklem (3.31)' deki eşitlik elde edilmiş olur (Leondes 1998).

### **pH Prosesine Wiener Doğrusal Olmayan Model Yaklaşımı:**

Sabit hızda akan proses asit akış hızının ( $F_a$ ), değişken baz akış hızından ( $F_b$ ) çok büyük olduğu koşullarda matematikçi Nobert Wiener tarafından geliştirilen Wiener modeline göre sürekli karıştırılmalı tank reaktörünün dinamikleri bir doğrusal proses gibi modellenebilecektir.

Buna göre  $F_a \gg F_b$  koşulu altında prosesin denklem (3.23) ve denklem (3.24)' deki denge eşitliklerinden  $F_b$  ' ler ihmal edilebilir olacaktır. Bu duruma göre denge eşitlikleri denklem (3.32)' deki gibi şekillenir (Wright et al. 1991).

$$\begin{aligned} V\dot{x}_a &\approx F_a C_a - F_a x_a \\ V\dot{x}_b &\approx F_b C_b - F_a x_b \end{aligned} \quad (3.32)$$

#### **3.3.1.2 Durum-Uzay Modellemesi**

Karmaşık yapıya sahip ve yüksek hassasiyet gerektiren pH prosesleri gibi dinamik sistemlerin incelenmesinde çok güçlü bir yaklaşım, durum kavramına dayanır. Bu kavram yeni olmayıp klasik dinamik alanında veya diğer alanlarda uzun zamandan beridir kullanılmaktadır. Yeni olan ise bilgisayarların kullanılması ile diferansiyel denklemlerin yüksek hızla çözülebilmeye olanağı ile bu kavramın birleştirilmiş olmasıdır.

Durum-uzayı analizinde, dinamik sistemlerin modellenmesinde gerek duyulan üç tip değişken ile ilgileniriz. Bunlar girdi değişkenleri, çıktı değişkenleri ve durum değişkenleridir.

Durum-uzayı gösteriminde kullanılan denklemler olan durum denklemi ve çıktı denklemi;

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3.33)$$

biçiminde gösterilir. Burada A, B, C, D matrislerine sırası ile durum matrisi, girdi matrisi ya da kontrol matrisi, çıktı matrisi, doğrudan iletim matrisi; x, u, y vektörlerine ise sırası ile durum vektörü, girdi vektörü ya da kontrol vektörü ve çıktı vektörü denilmektedir (Ogata 2003).

Bu ön bilgilerin sonrasında prosesimizin modellenmesine geçebiliriz. Bir önceki bölümde prosesin denge eşitliklerinin  $F_a \gg F_b$  koşuluna göre en son halini belirlemiştik (denklem (3.32)). Bu eşitliklerin yanı sıra A matrisinin bir kare matrise çevrilebilmesi adına, titrasyona sahip  $C_a$  değeri,  $\alpha$  gibi herhangi bir alternatif taşıyıcı ile modüle edilip, durum değişkeni olarak denkleme dâhil edilebilir. Buna göre durum-uzay modeli;

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \begin{bmatrix} \frac{-F_a}{V} & 0 & \frac{F_a}{V} \\ 0 & \frac{-F_a}{V} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ C_a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{C_b}{V} \\ 0 \end{bmatrix} F_b \\ y &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ C_a \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.34)$$

olacaktır. Modelde  $F_b$ , pH değerinin belirlenmesinde kontrol vektörü,  $x_a, x_b$  ve  $C_a$  ise durum değişkenleridir.

### 3.3.1.3 Prosesin Ölü Zamanı ve Transfer Fonksiyonu

Durum-uzay modeli tanımlanan proses için, prosesin transfer fonksiyonuna gitmek gayet kolaydır. Denklem (3.33) ile tanımlanan bir proses için transfer matrisi; transfer fonksiyonu  $G(s)$ , çıktı fonksiyonu  $Y(s)$  ve girdi fonksiyonu  $U(s)$ 'yi,

$$Y(s) = G(s)U(s) \quad (3.35)$$

formülü ile ilişkilendiren matristir. Durum-uzayı denklemlerinin Laplace dönüşümleri ile denklem (3.36) elde edilir.

$$\begin{aligned} sX(s) - x(0) &= AX(s) + BU(s) \\ Y(s) &= CX(s) + D(s) \end{aligned} \quad (3.36)$$

Transfer matrisi için  $x(0) = 0$  kabulü yapılması ile;

$$\begin{aligned} X(s) &= (sI - A)^{-1}BU(s) \\ Y(s) &= [C(sI - A)^{-1}B + D]U(s) \end{aligned} \quad (3.37)$$

Bu son eşitlik olan denklem (3.37) 'yi, denklem (3.35) ile karşılaştırılması ile proses transfer fonksiyonu denklem (3.38) elde edilmiş olur (Ogata 2003).

$$G(s) = C(sI - A)^{-1}B + D \quad (3.38)$$

#### Proses Transfer Fonksiyonu:

Prosesimizin girdi ve titrasyon akım değerlerini ( $F_a = 0,7l/dk$ ,  $C_a = 0,03gmol/l$ ,  $C_b = 0,1gmol/l$ ,  $V = 10lt$ ) yerine koyarak transfer fonksiyonunu;

$$G(s) = \frac{x_b}{F_b} = \frac{0,01}{s + 0,07} \quad (3.39)$$

elde ederiz. Buradan da anlaşılacağı üzere pH değerini belirlemede yalnızca prosesin baz akış hızı  $F_b$  ve prosesin baz çıkış konsantrasyonu  $x_b$  etkili olmaktadır.

Elde edilen bu transfer fonksiyonunun en son halini oluşturmak için pH proseslerinde sabit akan asit ile bazın reaktöre girmesi ile meydana gelecek tepkimenin oluşma süresini de yani reaksiyonun ölü zamanını da hesaba katmamız gerekecektir.

Bir "T" ölü zaman elemanın transfer fonksiyonu;

$$G_2(s) = e^{-sT} \quad (3.40)$$

olarak ifade edilir (Akçalı 2001).

Prosesimizde benzetim çalışmaları için zayıf asit-kuvvetli bazın reaksiyon gecikmesini  $T=5$ sn olarak varsayarsak, Transfer fonksiyonu en son hali ile denklem (3.41) 'deki gibi olacaktır.

$$G(s) = \frac{x_b}{F_b} = \frac{0,01}{s+0,07} e^{-5s} \quad (3.41)$$

### 3.4 BEYAZ GÜRÜLTÜ VE pH NÖTRALİZASYON PROSESLERİNDEKİ ÖNEMİ

Kontrol mühendislerinin en çok tercih ettiği ölçüm yöntemi, ölçümlerin görsel olarak yapılmasıdır. Bu termometrelerdeki sıcaklığın uzunluğa dönüştürülmesi, tartılardaki ağırlığın açığa dönüştürülmesi gibi düşünülebilir.

Asıl önemli olan mesele ölçülen ve ölçüm yapanın aynı çevre içerisinde yer aldıklarıdır. Dolayısıyla ölçüm işlemi de ölçüleni etkilemektedir. Ayrıca doğanın ölçümler üzerinde karışıklığa neden olması durumu da söz konusudur. Doğa, sıcaklık ve miktarın ölçülmesinde karışıklık yaratırken, insan yapımı ölçümlerde de girişim yaratan sinyallerin varlığı ve materyal sınırlamalar karışıklık yaratmaktadır.

Herhangi bir alandaki ölçüm yapılan proseste, ölçümün doğruluğunu ve hassasiyetini sınırlayan en büyük etken, "gürültü" denen yabancı ve istenmeyen sinyallerin varlığıdır.

Bunlar, ölçülecek analitik sinyalin üzerine binerler. Bu durumda arzu edilen sonuçların alınamamasına neden olur (Skoog and West 1980).

Ölçümü yapılacak enstrümanda bulunan direnç, transistör vb. elemanların sahip olduğu serbest elektronlar, doğadan veya insandan kaynaklanan ortam sıcaklığının artması ile hareketlenebilirler. Hareket, elemanlarda belirli bir yönde ilerleyen elektronlarının ortalama sayısını aniden artmasına veya azalmasına neden olur ve dolayısıyla elektronlardan kaynaklanan gerilim farklılıkları meydana gelir. Bu durum, proseste gürültü oluşturma sebebi olacaktır. Oluşan bu çeşit gürültüye beyaz gürültü adı verilmiştir (Skoog and West 1980).

Çalışmamızın ana meselesi, pH nötralizasyon proseslerinde doğadan veya sistemin tasarımından kaynaklanan bir sebeple ortam sıcaklığına bağlı olarak, proses çıkış akımı olan baz konsantrasyonunda ( $x_b$ ) beyaz gürültünün oluşmasıdır.  $x_b$ 'nin etkilenmesi dolayısıyla pH ölçümünü de etkileyeceği düşünülerek, gürültünün yok edilmesi için benzetim çalışmaları yapılmıştır.

## BÖLÜM 4

### BENZETİM ÇALIŞMALARI

Çalışmamızın bu bölümünde dünyada yaygın olarak kullanılan Matlab yazılımı ile gerçekleştirilen benzetim çalışmalarına yer verilecektir. Öncelikle her iki benzetim çalışmamızda kullanacağımız proses, titrasyon akımları ve tank hacim değerlerini verelim:

$$\begin{aligned}F_a &= 0,7l / dk \\F_b &= 0,0217l / dk \\C_a &= 0,003gmol / l \\C_b &= 0,1gmol / l \\V &= 10l\end{aligned}\tag{4.1}$$

Burada dikkat edilmesi gereken husus, belirtilen değerlere göre prosesin titrasyon akımlarından biri ve denetleyici tasarımında girdi değişkeni olarak kullanılacak olan baz akış hızının ( $F_b$ ), en büyük değerine karşın hala asit akış hızı ( $F_a$ )' dan oldukça küçük olmasıdır. Bu durum 3.3.1.1 bölümünde de değinildiği üzere prosesin doğrusal olmasına mahal vermektedir (Leondes 1998).

Benzetim çalışmalarımızda proseslere, gürültü gücü  $5 \times 10^{-9}$  W, örnekleme zamanı 0.01 sn olan beyaz gürültü uygulanacaktır. Tasarım ve uygulamalara geçmeden önce Matlab - Simulink ortamında oluşturulan ve benzetimde kullanılan blok ve fonksiyonların tanımını açıklamak gerekirse:

**FONK\_1 fonksiyonu:** Referans girilen 3.2, 8.8 ve 12.0 pH değerlerinin oluşmasında kullanılan çıkış baz konsantrasyonlarını ( $x_b\_set$ ) bulmaktadır. İçinde var olan fonksiyon:

$$u(2) / (1 + 10^{(3,167 - u(1))}) + 10^{(u(1) - 14)} - 10^{(-u(1))}\tag{4.2}$$

olarak yazılmıştır.

**FONK\_2 fonksiyonu:** Prosesin gerçek uygulaması olması neticesinde girilen referans pH değerlerine karşın oluşacak asit ve baz konsantrasyonlarından ( $x_b, x_a$ ) ölçülen pH değerlerini bulmaktadır. Fonksiyonun içine yazılan matlab programı EK-1’ de verilmiştir.

**LYAPUNOV\_FONK fonksiyonu:** Lyapunov fonksiyonu yaklaşımı ile yapılan gürbüz denetleyici içeriğidir (denklem (4.17)).

**PI(s) bloğu (Gy(s)):** PI denetleyici içeriğidir.

**G bloğu:** Prosesin transfer fonksiyonu;

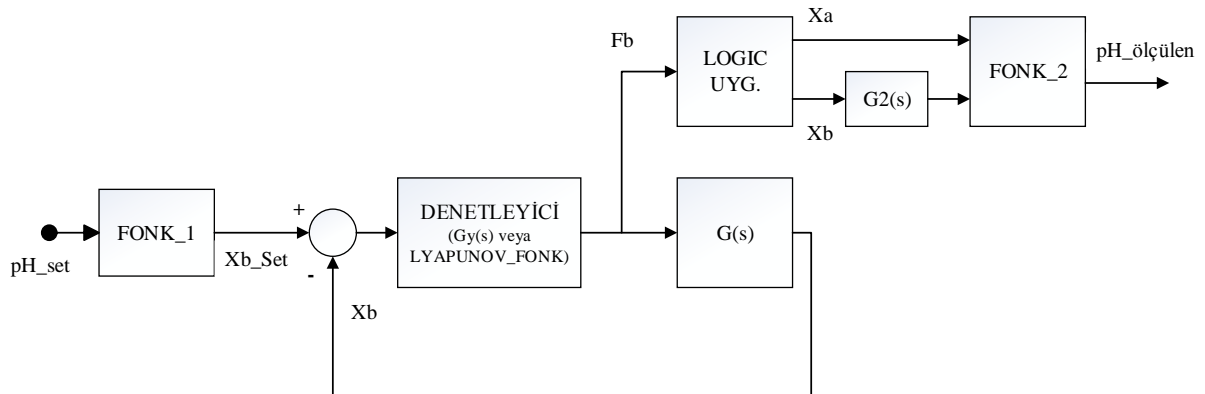
$$G(s) = \frac{x_b}{F_b} = \frac{0,01}{s + 0,07} e^{-5s} \quad (4.3)$$

olarak yazılmıştır.

**G2 bloğu:** Reaksiyon gecikmesi olan 5 sn’nin gerçek uygulama olması neticesinde baz konsantrasyonu üzerinde etkili olacak gecikme fonksiyonu;

$$G_2(s) = e^{-5s} \quad (4.4)$$

biçiminde yazılmıştır. Bahsi geçen blokların benzetim çalışmasındaki genel gösterimi Şekil 4.1’ de verilmiştir.



Şekil 4.1 Benzetim çalışmasının basitleştirilmiş genel gösterimi.

## 4.1 MATLAB

MATLAB (matrix laboratory), bilim, mühendislik ve ekonomi alanlarında sayısal hesaplama için kullanılan bir yazılımdır. Bu yazılım, matrislerin işlenmesi, fonksiyonlar ve veri çizilmesi, algoritmalar uygulanması, kullanıcı ara yüzü oluşturulması ve diğer dillerle yazılmış programlar ile etkileşim oluşturulmasına kadar bir çok alanda kabiliyete sahiptir. Yazılım dilleri olarak C, C++, Java, ve Fortran dillerini içerir.

MATLAB, isteğe bağlı olarak sembolik hesaplama yapabilen MuPAD sembolik motorunu kullanır. Ek paketi, dinamik ve gömülü sistemler için Simulink'i, grafiksel çoklu alan benzetimi (simulasyonu) ve model tabanlı tasarımı ekler.

Akademik alanda ve endüstride, dinamik sistemlerin modellenmesi ve benzetimi için dünya genelinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

### 4.1.1 Simulink

Matlab yazılımının ek paketi olan Simulink, bize karmaşık sistemleri tasarlama ve benzetim yapma olanağı tanımaktadır. Mühendislik sistemlerinde benzetimin önemi gün geçtikçe artmaktadır. Sistemlerin tasarımında büyük oranda bilgisayar benzetimlerinden faydalanmakta, mümkün olduğunda tasarımın test aşamaları da bilgisayarlar yardımıyla yapılmaktadır. Bu da ilk örneklere olan ihtiyacı azaltarak maliyetlerin büyük oranda düşmesini sağlamaktadır.

Simulink' i çalıştırdığınızda karşınıza Simulink Kütüphanesi gelecektir. Benzetim çalışmamızı yaparken kullanacağımız bloklar kategorilere ayrılmış biçimde burada bulunmaktadır. Simulink, iş akış kontrolü, ısı, soğutma, süspansiyon ve fren sistemleri, sayısal işaret işleme ve haberleşme, diferansiyel denklem çözümü, durum-uzay modelleri, transfer fonksiyonları, Neuro-Fuzzy sistem modelleme, elektrik devre çözümü, kontrol sistemleri (PID kontrolü vd.), dış ortam ile veri alışverişi, uzaktan ve web temelli kontrol gibi birçok elektrik, elektronik, finans, mekanik ve termodinamik gerçek dünya sisteminin benzetimini yapmaktadır.



## 4.2 PROSESİN Pİ DENETLEYECİ TASARIMI VE UYGULAMASI

Bu bölümde ilk olarak zayıf asit kuvvetli baz prosesimizin matematiksel yapısına uygun Pİ denetleyici tasarımı gerçekleştirilecektir. Tasarlanan bu denetleyici prosesimize uygulanacak ve prosesin çıkış akımı olan baz konsantrasyonu ( $x_b$ ) üzerindeki beyaz gürültü ve pH denetimi için sonuçlar alınacaktır. Böylece daha sonra tasarımı ve uygulaması gerçekleştirilecek olan Lyapunov fonksiyonu ile gürbüz denetim performansına bir kriter olarak ele alınabilecektir.

### 4.2.1 Prosesin Pİ Denetleyici Tasarımı

Prosesin transfer fonksiyonu olan;

$$G(s) = \frac{x_b}{F_b} = \frac{0,01}{s+0,07} e^{-5s} \quad (4.5)$$

ifadesinin birim basamak girişe yanıtı, Pİ tasarımında kullanılan Ziegler-Nichols kurallarının birinci ayarlama yöntemini uygulamaya imkân tanımaktadır. Buna göre Pİ denetleyici;

$$G_y(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (4.6)$$

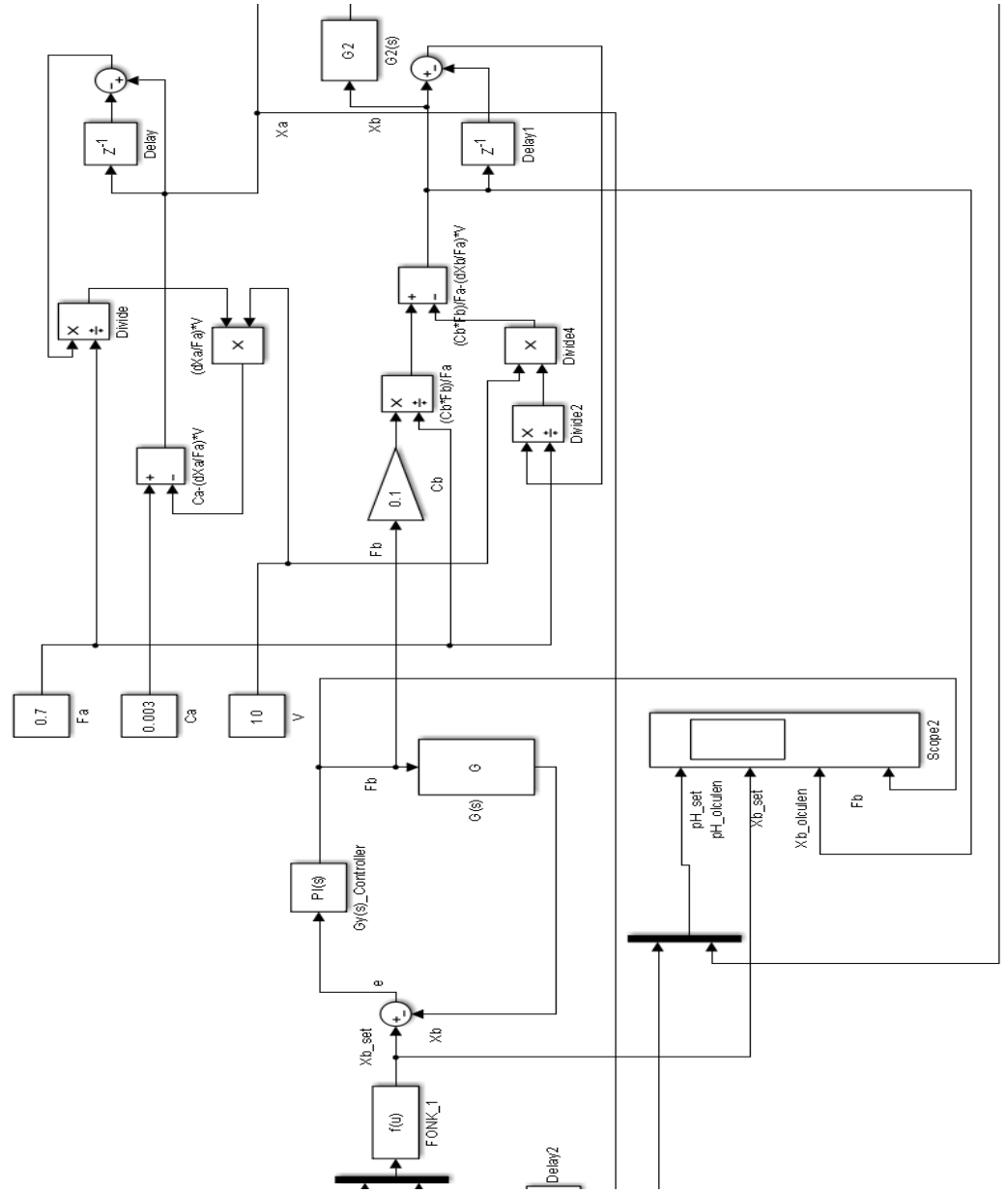
Denklem (4.6) için gerekli olan  $K_p$  ve  $T_i$  değerleri  $L = 5$ ,  $K = 0,14285$ ,  $T = 17,5$  için;

$$T_i = \frac{L}{0,3} = 16,667 \quad (4.7)$$
$$K_p = 0,9 \frac{T}{L} = 3,15$$

olacaktır.

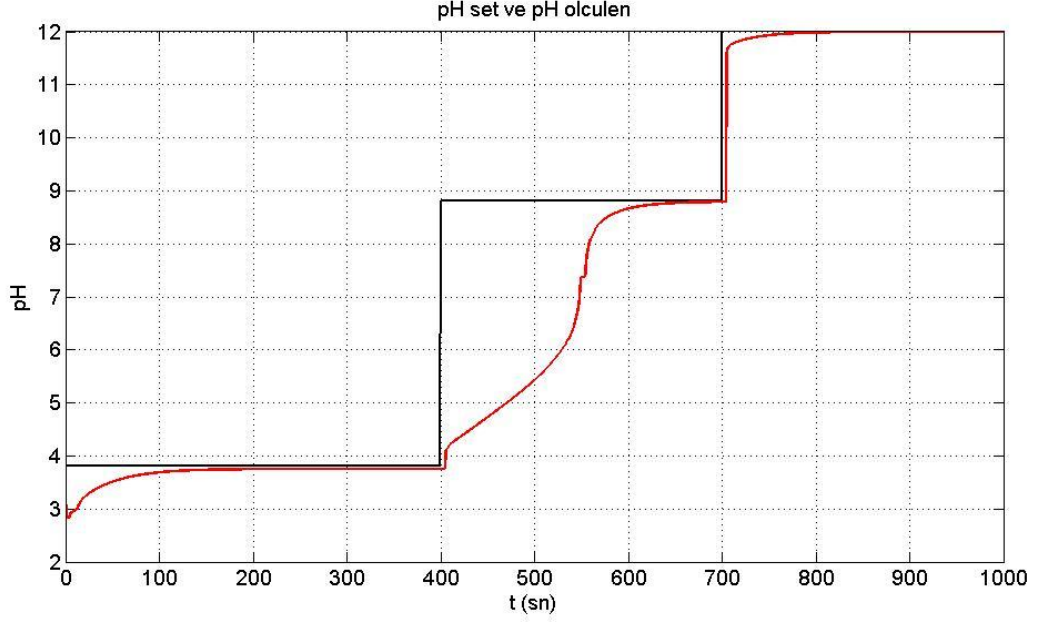
#### **4.2.2 Prosesin PI Denetleyici Uygulaması**

Benzetim çalışması yapılacak olan zayıf asit kuvvetli baz pH prosesinin PI denetleyicisi tasarlandı. Öncelikle Matlab ortamında beyaz gürültü yokken benzetim işlemi için kurulan proses yapısı verilecek (Şekil 4.2), daha sonra beyaz gürültülü prosesin yapısı (Şekil 4.7) verilecektir. Tüm değerlendirmeler ve kıyaslamalar beşinci bölümde detaylandırılacaktır.

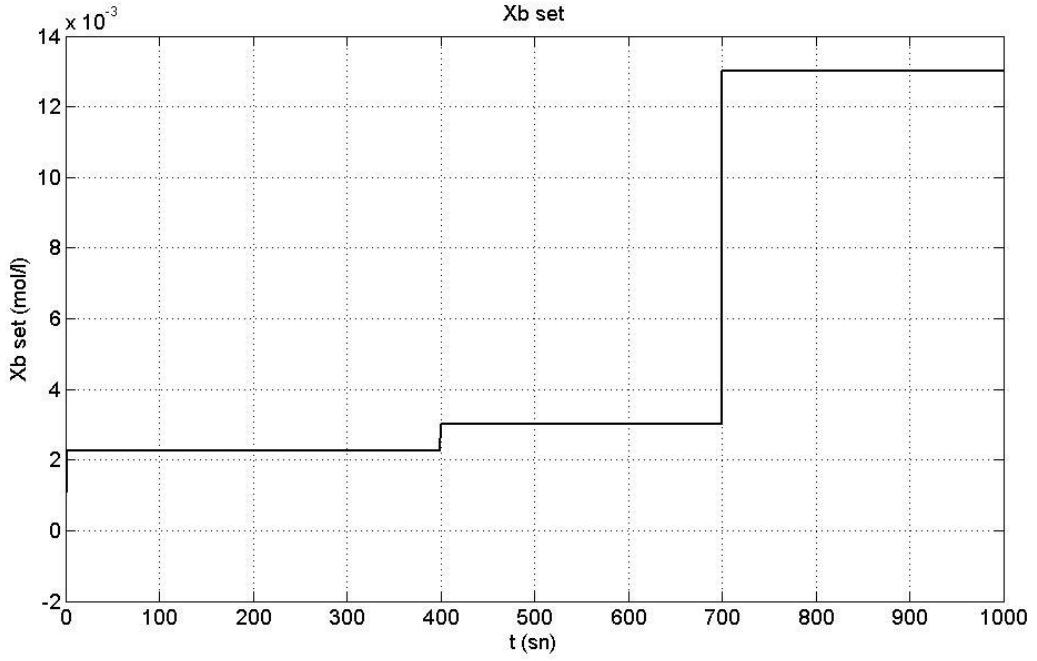


Şekil 4.2 PI Denetleyici ile gürültüsüz pH nötralizasyon prosesi denetimi benzetim çalışması.

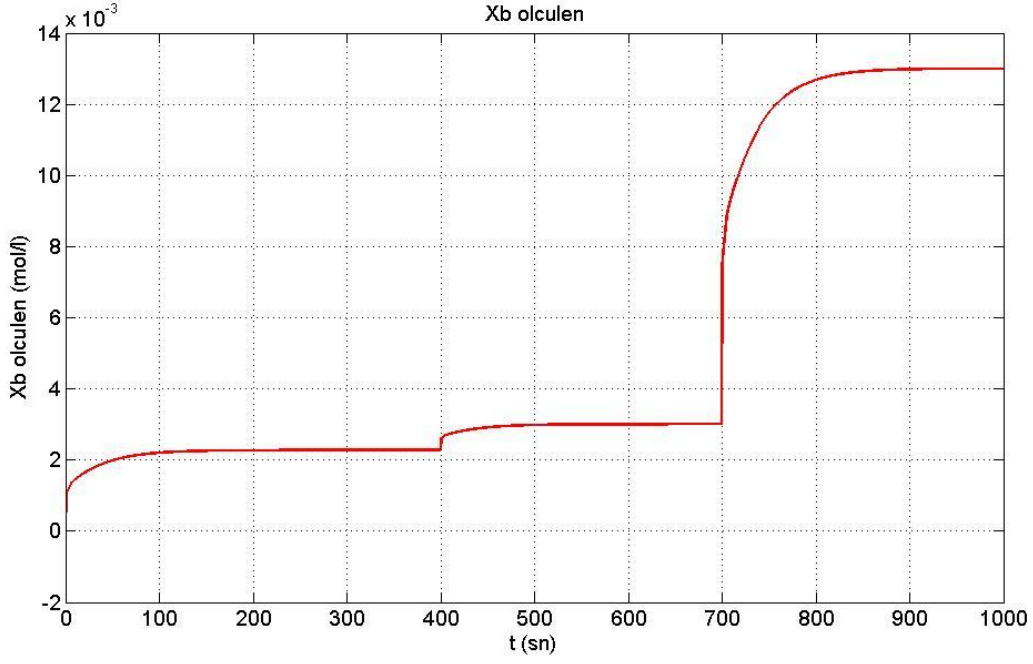
Beyaz gürültüsüz prosesin çalıştırılması ile Şekil 4.3, 4.4, 4.5 ve 4.6 grafikleri elde edilecektir.



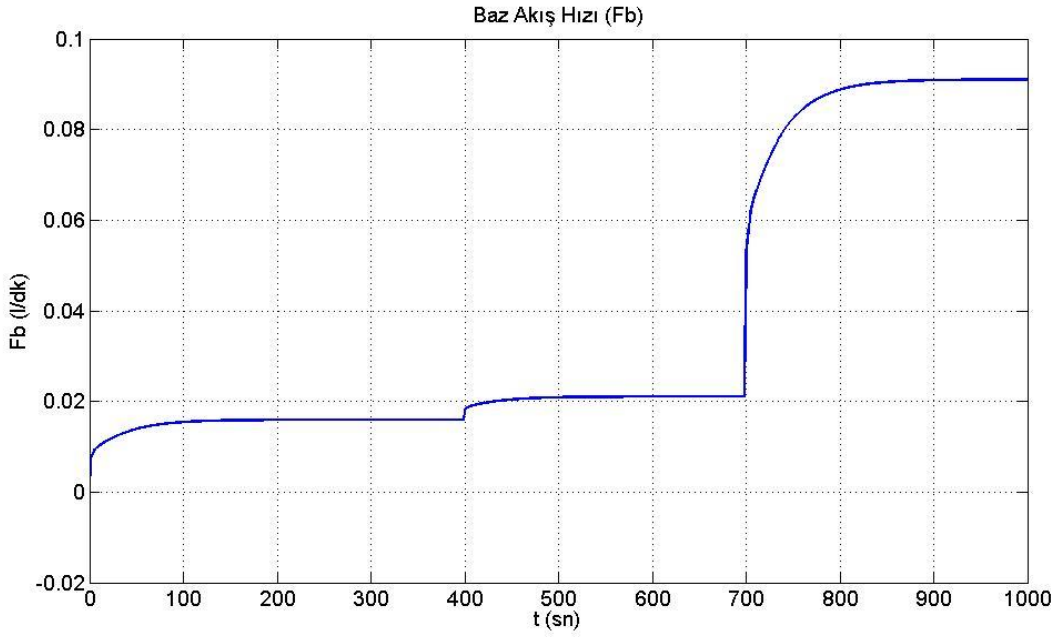
Şekil 4.3 Gürültüsüz prosesin PI denetimde referans pH (siyah) ve ölçülen pH (kırmızı) değerleri grafiği.



Şekil 4.4 Gürültüsüz prosesin PI denetimde referans çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.

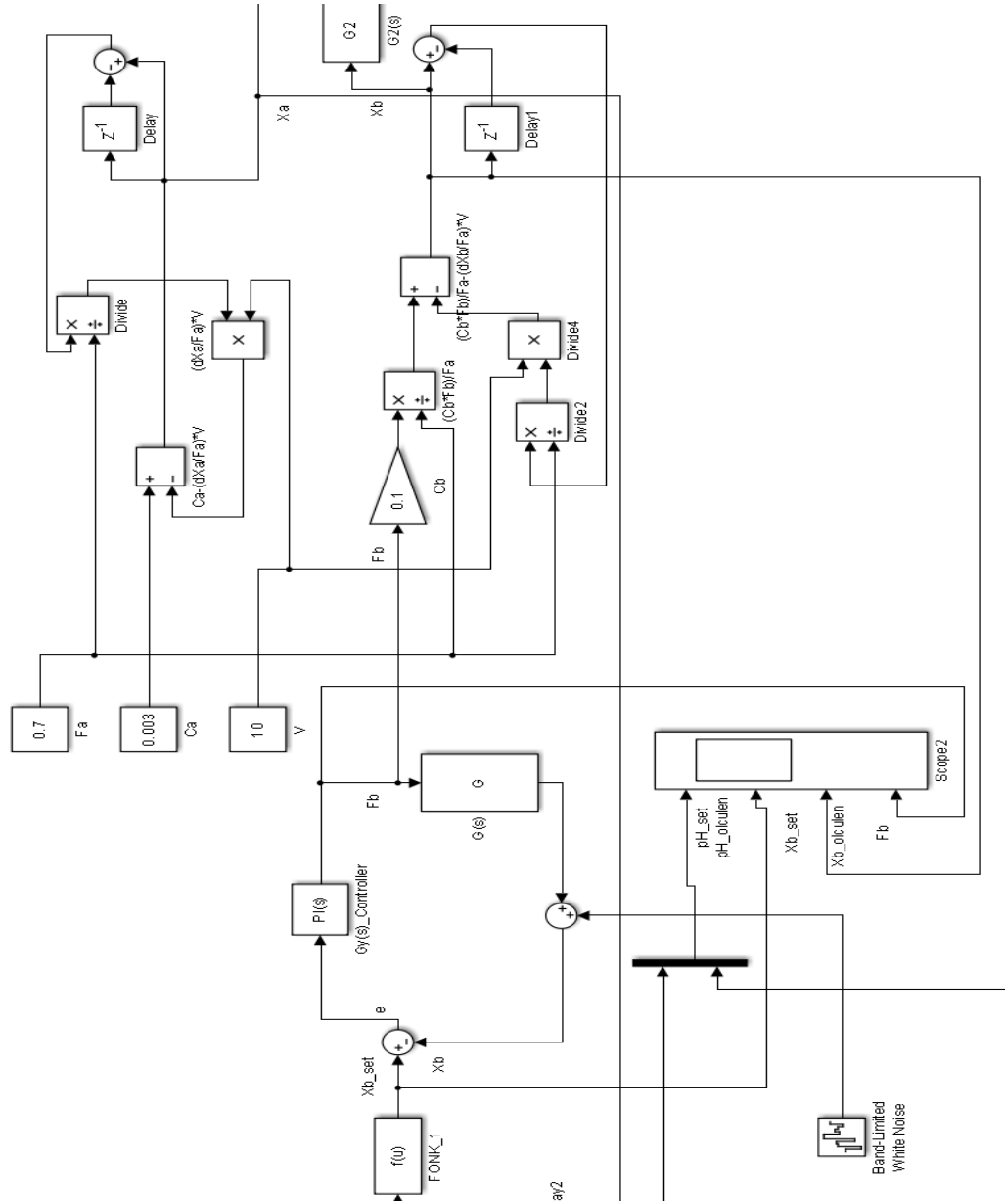


Şekil 4.5 Gürültüsüz prosesin PI denetimde ölçülen çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.



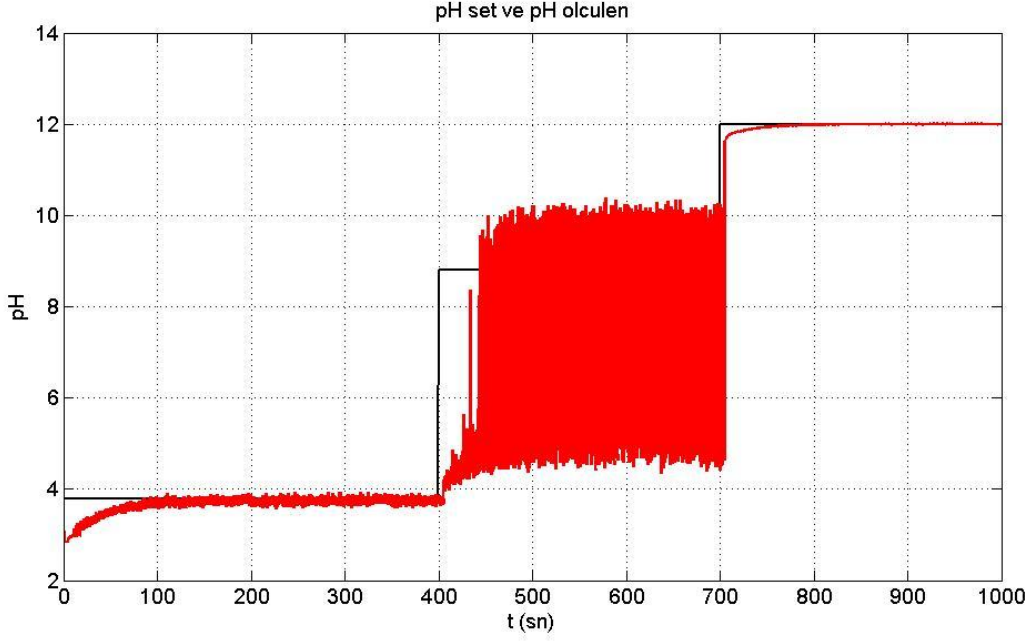
Şekil 4.6 Gürültüsüz prosesin PI denetimde ölçülen baz akış hızı değeri grafiği.

Prosele daha önceki bölümlerde belirtilen özelliklere sahip beyaz bir gürültünün uygulanması ile Şekil 4.7' deki benzetim çalışmasına ulaşılabacaktır. Buna göre;

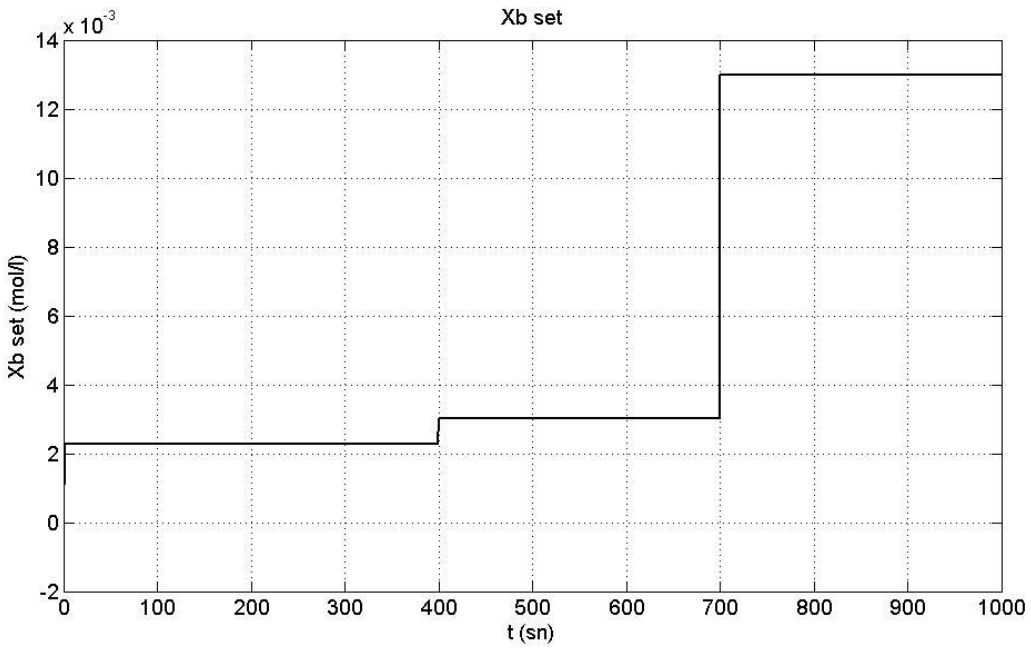


Şekil 4.7 PI Denetleyici ile gürültülü pH nötralizasyon prosesi denetimi benzetim çalışması.

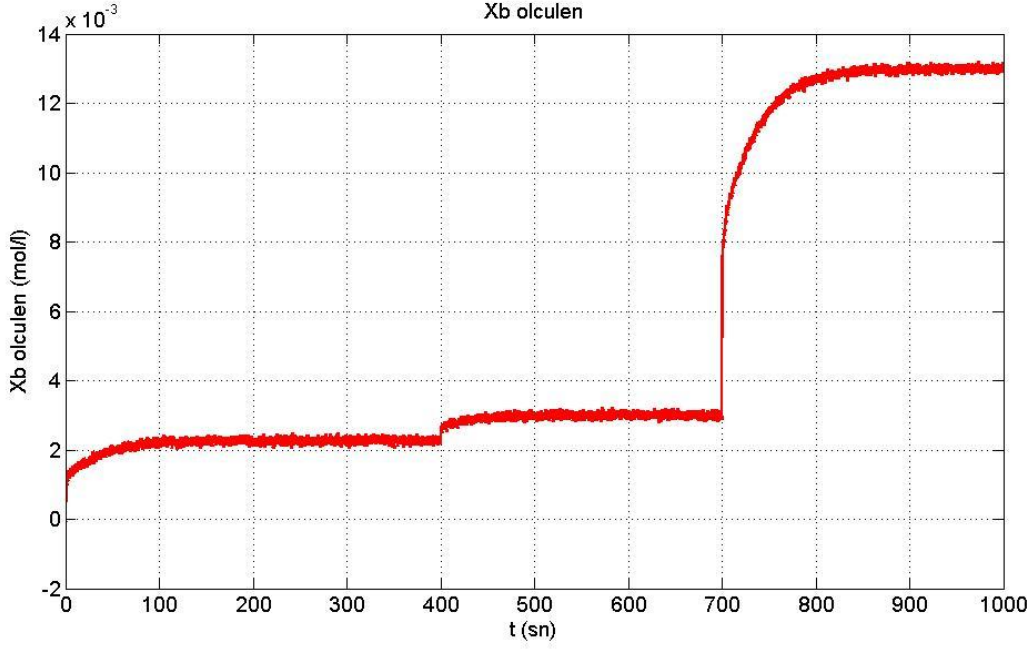
Beyaz gürültülü proses (Şekil 4.7) çalıştırıldığında ise Şekil 4.8, 4.9, 4.10 ve 4.11’ de verilen grafikler elde edilmiştir. Neticeye ilişkin değerlendirmeler beşinci bölümde yapılacaktır.



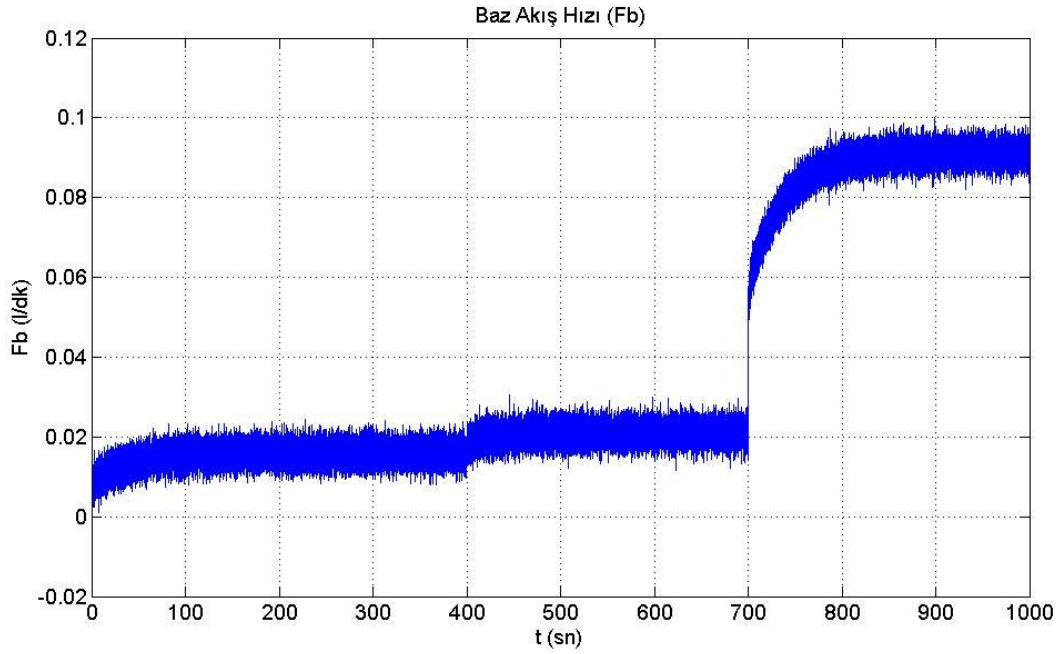
Şekil 4.8 Gürültülü prosesin PI denetimde referans pH (siyah) ve ölçülen pH (kırmızı) değerleri grafiği.



Şekil 4.9 Gürültülü prosesin PI denetimde referans çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.



Şekil 4.10 Gürültülü prosesin PI denetimde ölçülen çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.



Şekil 4.11 Gürültülü prosesin PI denetimde ölçülen baz akış hızı değeri grafiği

Bir önceki bölümde elde ettiğimiz PI denetleyici parametrelerini prosese uyguladığımızda, girilen farklı pH\_set değerleri neticesinde çıkış baz konsantrasyonu üzerindeki beyaz gürültü etkisi açıkça belli olmaktadır.



### 4.3 PROSESİN LYAPUNOV FONKSİYONU İLE GÜRBÜZ DENETİMİ

Bu bölümde ise prosesimizin matematiksel yapısına uygun Lyapunov fonksiyonu yaklaşımı ile gürbüz denetleyici tasarlanacaktır. Tasarlanan bu denetleyici PI denetleyici de olduğu gibi prosesimize uygulanacak ve prosesin çıkış akımı olan baz konsantrasyonu ( $x_b$ ) üzerindeki beyaz gürültü ve pH denetimi için sonuçlar alınacaktır.

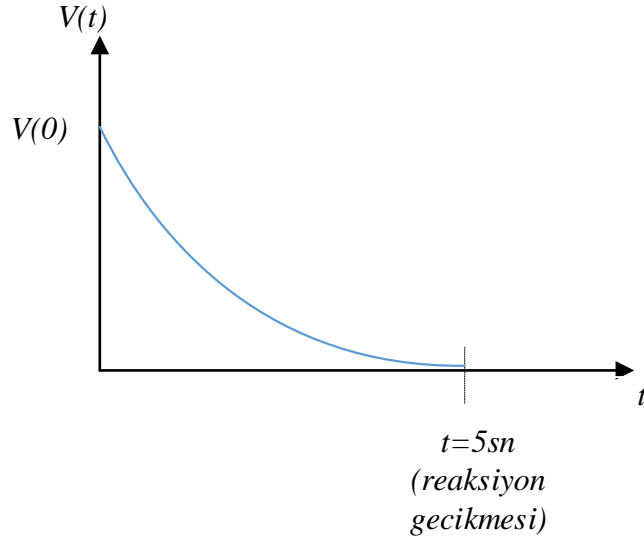
#### 4.3.1 Prosesin Lyapunov Fonksiyonu Tasarımı

Bölüm 2.2.2' de Lyapunov fonksiyonun atanması, Lyapunov kararlılık koşullarını sağlaması ve bu doğrultuda yapılacak olan denetleyici tasarımında proses girişine fonksiyonun uygulanması üzerine bilgiler verilmişti. İstenilen koşul atanacak Lyapunov fonksiyonun kesin pozitif ve türevinin 0'dan küçük olması idi. Böylelikle Lyapunov fonksiyonu sonlu ve sabit bir değere (ki bizim istediğimiz hatanın sifıra yakınsaması) yakınsaması olacaktı.

Asimtotik kararlı olan bir denge noktası için Lyapunov kararlılığı için yeter koşuldur denilmişti. Fakat tasarımıımızı üssel kararlılık yani asimtotik kararlılığın daha güçlü formu olan kararlılık üzerine kurgularsak, seçeceğimiz Lyapunov fonksiyonu denetleyici tasarımı için kusursuz olacaktır. Şayet

$$\begin{aligned}\dot{V}(x) &= -2kV(x) \\ \Rightarrow V(t) &= V(0)e^{-2kt}\end{aligned}\tag{4.8}$$

elde edilebilirse,  $V(x)$ 'in üssel olarak sifıra gideceği aşıkardır. Fonksiyonun sifır değerini alması, fonksiyonun bağlı olduğu değişkenlerinin de sifır değeri alması anlamına geleceğinden,  $x$  değişkeni için denge noktasına ulaşılacaktır (Alışkan vd. 2007). Şekil 4.12 üssel olarak sifıra giden Lyapunov fonksiyonunun enerji grafiğidir. Bu grafiğe göre  $t=0$  anında Lyapunov fonksiyonu en yüksek değere sahip olacaktır.



Şekil 4.12 Lyapunov fonksiyonu enerji grafiği.

Asıl sorunumuz tüm bu koşulları sağlayabilmek için bizim bu fonksiyona müdahale şansımızı doğuracak değişkenlere ihtiyacımızın olmasıdır. Prosesimize göre bu şansı bize verecek olan denetleme sinyali yani baz akış konsantrasyonudur ( $F_b$ ). Gayemiz referans giriş değeri  $x_b\_set$  ile çıkış değeri  $x_b$  arasındaki farkı sıfıra taşımak olduğuna göre;

$$e = x_b\_set - x_b \quad (4.9)$$

İfadesine dayanarak aşağıdaki gibi Lyapunov enerji fonksiyonunu denklem (4.10) gibi belirleyelim;

$$V = \frac{1}{2} ke^2 \quad (4.10)$$

İlk şartımız bu fonksiyonun kesin pozitif olması ( $V=0, e=0$  ve  $V>0, e\neq 0$ ). İkinci şartımız ise türevinin sıfırdan küçük olması ( $\dot{V} \leq 0$ ), dahası fonksiyonun üssel olarak sıfıra gitmesi. Bunun için belirlenen Lyapunov fonksiyonun türevi, olmasını istediğimiz üssel olarak sıfıra gitme koşuluna eşitlenirse;

$$\dot{V} = ke\dot{e} = -2kV \quad (4.11)$$

olur.  $x_b$  set sabit bir referans değeri olduğu için türevi sıfırdır. Buna göre;

$$\dot{V} = ke(-\dot{x}_b) = -2kV \quad (4.12)$$

olacaktır. Belirlediğimiz Lyapunov enerji fonksiyonunu da yerine koyarsak:

$$ke(-\dot{x}_b) = -2k\left(\frac{1}{2}ke^2\right) \quad (4.13)$$

$$\dot{x}_b = ke \quad (4.14)$$

olacaktır. pH nötralizasyon prosesinin denge eşitliklerinden çıkış baz konsantrasyonunun türevini yerine koyarsak:

$$\begin{aligned} 0,01F_b - 0,07x_b &= ke \\ F_b &= \frac{ke + 0,07x_b}{0,01} \end{aligned} \quad (4.15)$$

Olacaktır. “k” değeri ise Şekil 4.12 grafiği ile tayin edilebilir. Buna göre;

$$V(t) = V(0)e^{-2kt} = \frac{1}{2}k(x_b - set - x_b)^2 \quad (4.16)$$

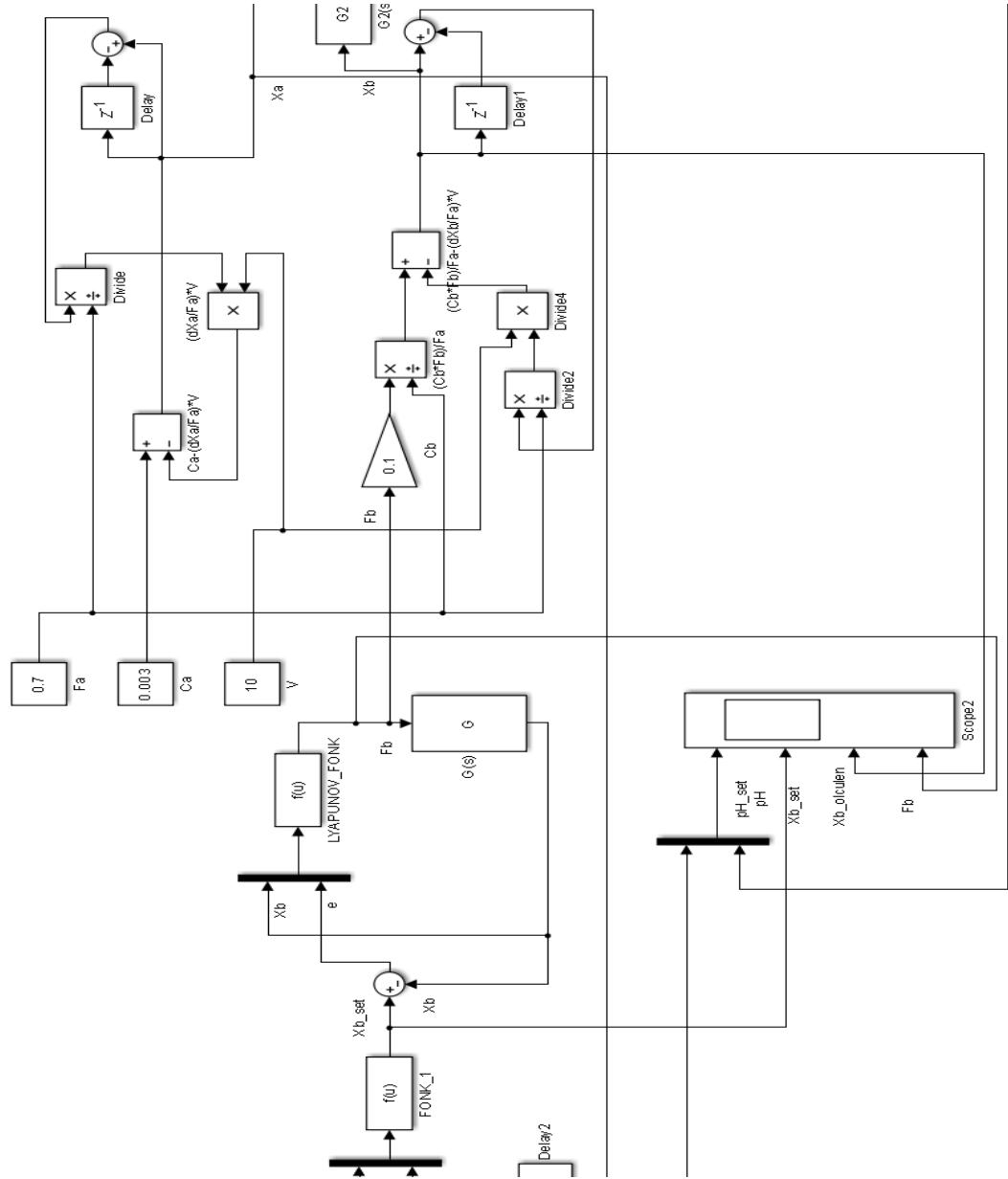
Benzetim çalışmasından elde edeceğimiz belli zaman dilimlerindeki pH değeri ile hata değerleri kıyaslanarak en uygun değer olan sabit k değeri tayin edilir. Bu değer de prosesimizin reaksiyon davranışına uygun olacak şekilde k=0,07 değeri olarak tayin edilebilir. Denetleyiciye uyarlanacak olan baz akış hızı buna göre:

$$F_b = \frac{0,07e + 0,07x_b}{0,01} \quad (4.17)$$

olarak belirlenecektir ve bu denklem (4.17), benzetim çalışmamızda LYAPUNOV\_FONK bloğu içeriği olacaktır.

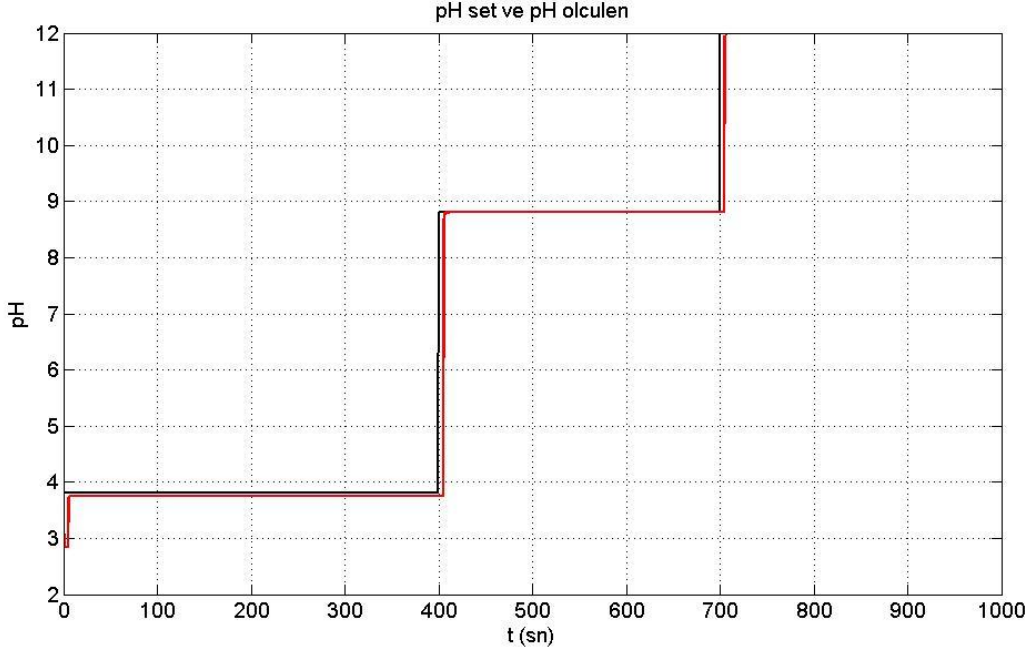
### **4.3.2 Prosesin Lyapunov Fonksiyonu Uygulaması**

PI denetleyicide yapıldığı gibi öncelikle gürültüsüz Lyapunov fonksiyonlu doğrusal olmayan gürbüz denetim benzetim çalışması yapılacak, daha sonra beyaz gürültünün uygulanması ile bu benzetim çalışması tekrarlanacaktır. Tasarımda bulunan değerler benzetim çalışmasında uygulanırsa Şekil 4.13 elde edilecektir.

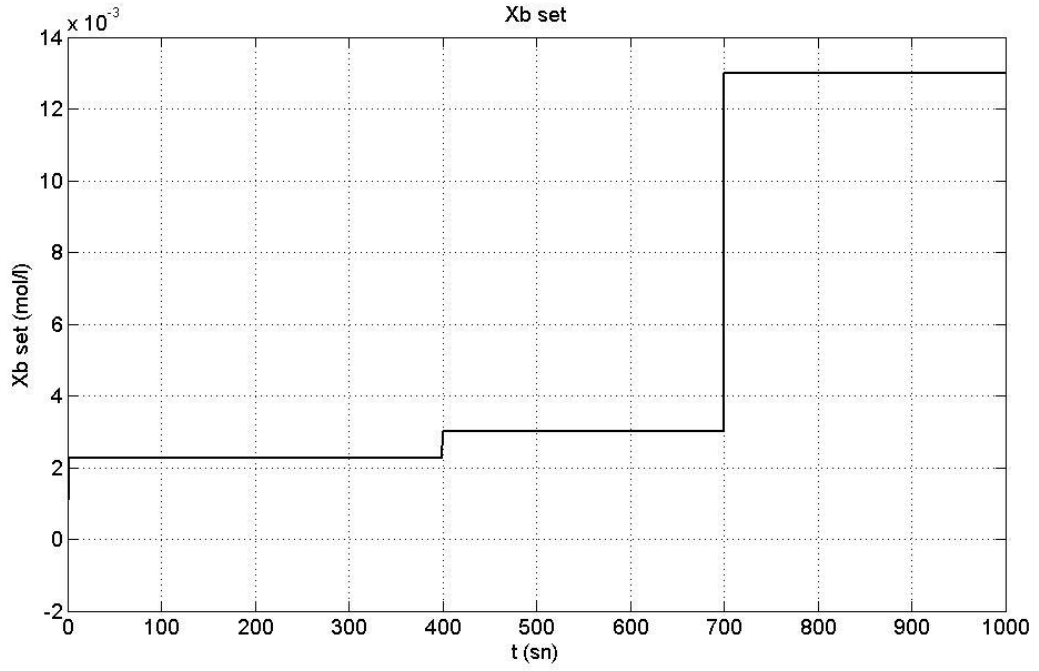


Şekil 4.13 Gürbüz denetleyici ile gürültüsüz pH nötralizasyon prosesi denetimi benzetim çalışması

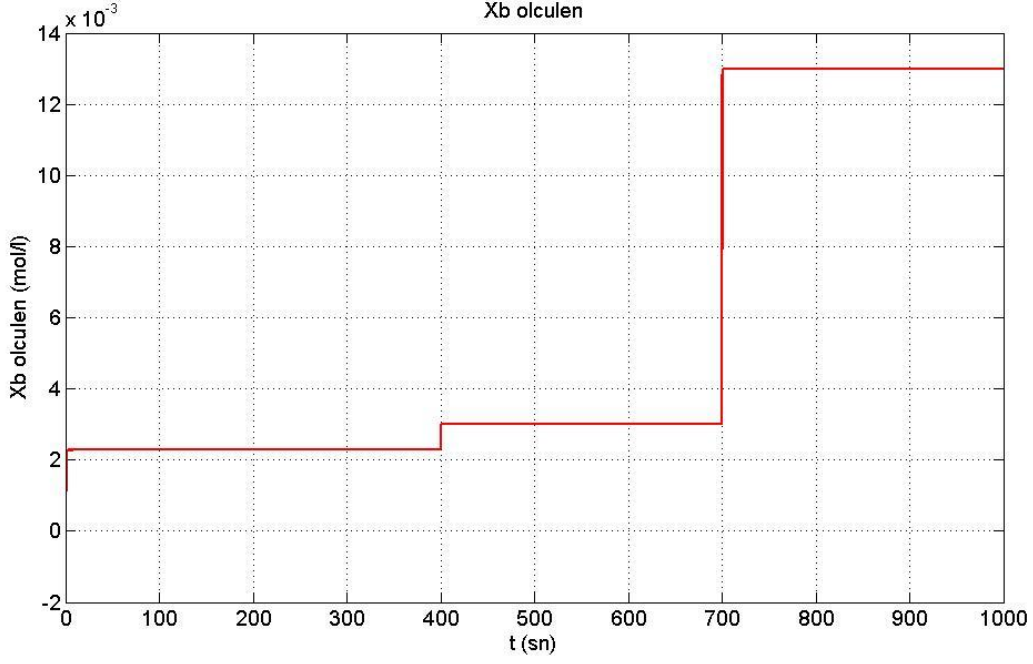
Şekil 4.13 'de ki benzetim çalışmasının çalıştırılması ile Şekil 4.14, 4.15, 4.16 ve 4.17 grafikleri elde edilecektir.



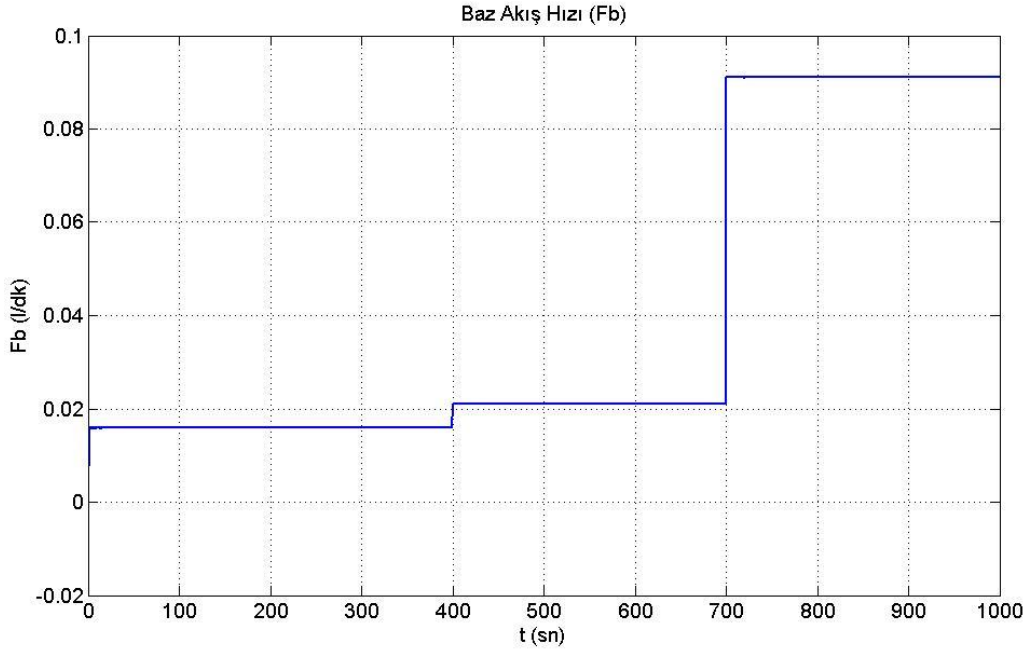
Şekil 4.14 Gürültüsüz prosesin gürbüz denetiminde referans pH (siyah) ve ölçülen pH (kırmızı) değerleri grafiği.



Şekil 4.15 Gürültüsüz prosesin gürbüz denetiminde referans çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.



Şekil 4.16 Gürültüsüz prosesin gürbüz denetiminde ölçülen çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.

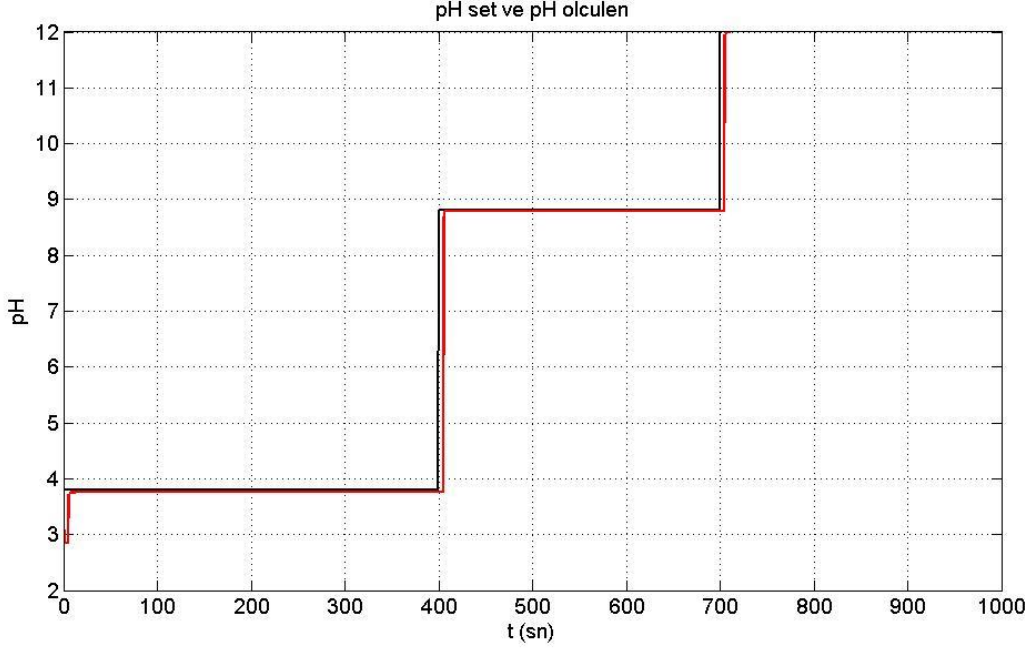


Şekil 4.17 Gürültüsüz prosesin gürbüz denetiminde ölçülen baz akış hızı değeri grafiği.

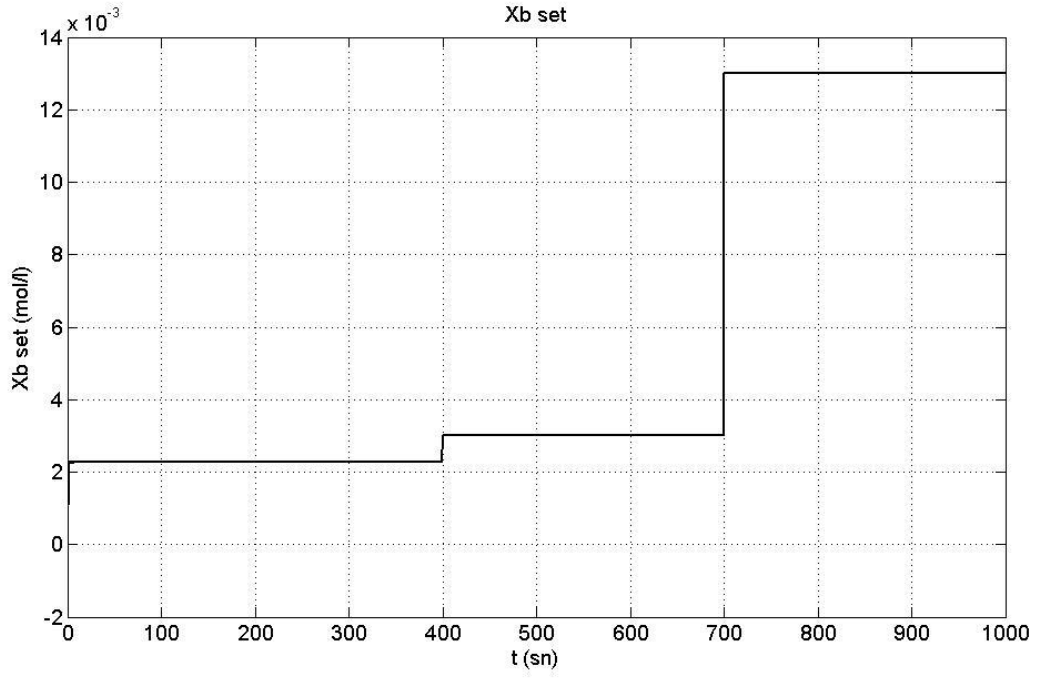
PI denetleyicide olduğu gibi, prosese belli özellikteki beyaz gürültü uygulanırsa, benzetim çalışması Şekil 4.18' deki gibi olacaktır.



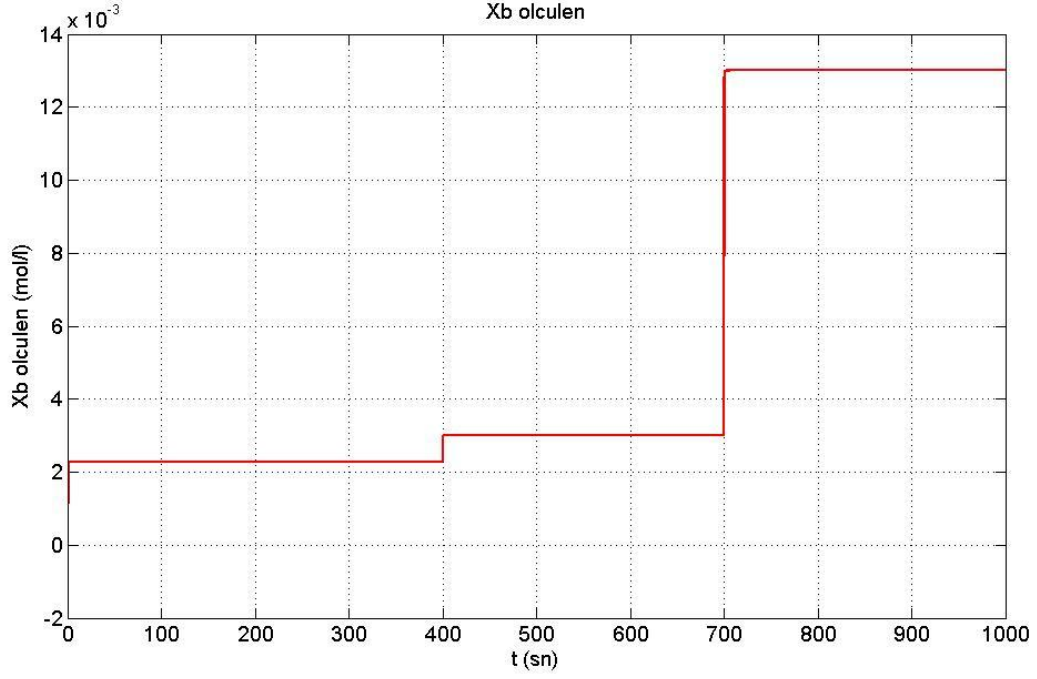




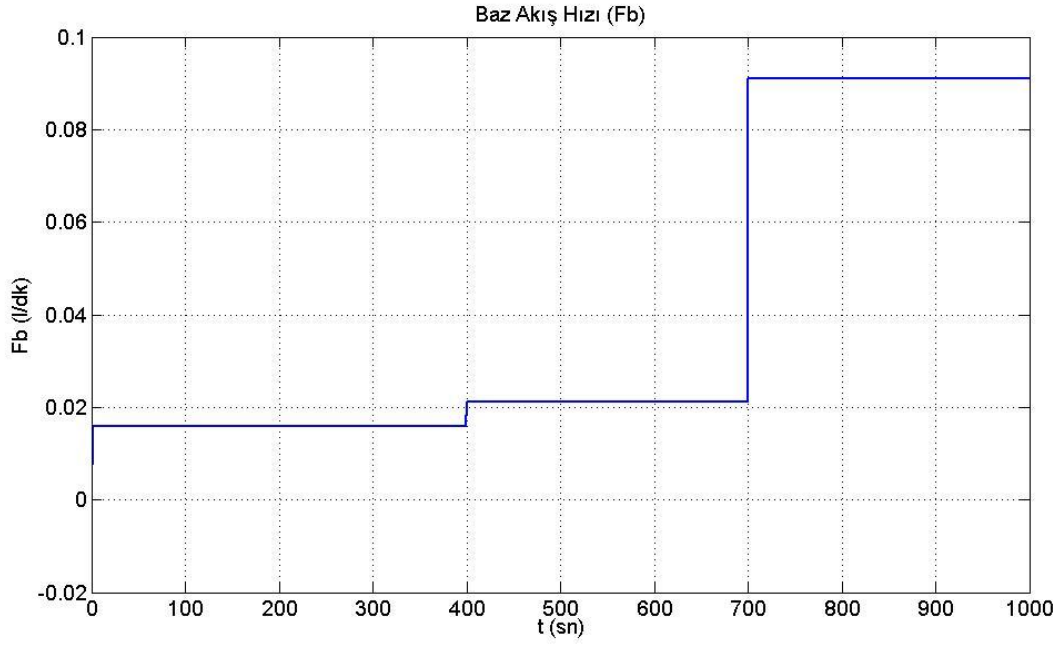
Şekil 4.19 Gürültülü prosesin gürbüz denetiminde referans pH (siyah) ve ölçülen pH (kırmızı) değerleri grafiği.



Şekil 4.20 Gürültülü prosesin gürbüz denetiminde referans çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği.



Şekil 4.21 Gürültülü prosesin gürbüz denetiminde ölçülen çıkış baz konsantrasyonu değeri grafiği



Şekil 4.22 Gürültülü prosesin gürbüz denetiminde ölçülen baz akış hızı değeri grafiği



## BÖLÜM 5

### TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Zayıf asit (hidroflorik asit) - kuvvetli baz (sodyum hidroksit) pH nötralizasyon prosesine uygulamış olduğumuz beyaz gürültülü ve beyaz gürültüsüz PI denetim ile Lyapunov fonksiyonu yaklaşımı doğrusal olmayan gürbüz denetimin, beyaz gürültüyü yok etmede ne denli başarılı olduklarını kıyaslamaya geçmeden önce, bu tez çalışmasında diğer bölümlerde nelere değindik kısaca açıklayalım:

Öncelikle kuramsal kavramların açıklamaları yapılmıştır. Kontrol sistemleri ve sınıflandırılmaları, proseslerin alışlagelmiş kontrolünde dünyada yaygın olarak kullanılan Ziegler-Nichols yöntemleri, Lyapunov'un kararlılık kriterleri ve denetim için belirlenecek olan Lyapunov fonksiyonunun denetleyici olarak tasarlanması konularına değinilmiştir.

Daha sonra asit, baz, pH, titrasyon ve nötralizasyon tanımları yapılmıştır. Benzetim çalışmasını yaptığımız, bir kimyasal proses olan zayıf asit kuvvetli baz pH nötralizasyonunun kimyasal denklemleri, durum uzay gösterimi, denetim aşamasında kullandığımız ve prosesin kısaca tanımı olan transfer fonksiyonu, reaksiyon gecikmesi çıkartılmıştır. Prosesimizin çıkış baz konsantrasyonu üzerinde etkili olan beyaz gürültünün ne olduğu ve nötralizasyon proseslerinde ne gibi olumsuz etkilerinin olduğu konularına değinilmiştir.

Benzetim çalışmalarını yaptığımız bölümde ise, çıkış baz konsantrasyonuna, sabit güce sahip beyaz bir gürültünün uygulandığı ve uygulanmadığı zayıf asit kuvvetli baz pH nötralizasyon prosesleri için klasik denetleme tekniği olan PI denetleyicinin, daha önceki bölümlerde anlatılan Ziegler - Nichols denetleme yöntemi ile tasarımı yapılmış ve Matlab Simulink yazılımı vasıtası ile nötralizasyon prosesine uygulanmıştır. Daha sonra aynı beyaz gürültülü ve gürültüsüz prosesler için Lyapunov fonksiyonu yaklaşımı ile gürbüz denetleyici tasarımı yapılmış ve uygulamaları Simulink üzerinde gerçekleştirilmiştir. Her iki denetleyici uygulaması sonucunda elde edilen sonuçlar çok net bir biçimde beyaz gürültü ve pH denetimi

noktasında hangi denetleyicinin başarılı olduğunu göstermiştir. Prosese referans verilen üç farklı pH değerine göre bu iki denetleyiciyi karşılaştırsak eğer:

**1. Referans pH' ın 3.8 değerinin verildiği 0 sn' den 400 sn' e kadar olduğu zaman diliminde;** PI denetleyicinin uygulandığı gürültüsüz prosesi incelersek eğer (Şekil 4.2), istenilen pH değerine 200 sn gibi uzun bir zaman diliminde, 0.045 gibi bir sürekli hal hatası ( $e_{ss}$ ) değeri (pH ölçülen = 3.755) ile ulaşıldığı açıkça görülecektir (Şekil 4.3). pH denetiminde daha önceki bölümlerde de belirtildiği gibi klasik yöntemlerin çok başarılı olmadığı bu benzetimden de anlaşılmaktadır. Fakat gürültüsüz prosesin, Lyapunov fonksiyonu yaklaşımli gürbüz denetiminde (Şekil 4.13) ise istenilen pH değerine, 6 sn' lik zaman diliminde, yine 0.045 değerinde sürekli hal hatası ile ulaşılmaktadır (Şekil 4.14).

PI denetleyicinin uygulandığı gürültülü prosesi incelersek eğer; beyaz gürültünün baz konsantrasyonu üzerinde etkili olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 4.7). PI denetleyicinin bu zaman diliminde Şekil 4.8' den de anlaşılacağı üzere gürültüyü etkisiz hale getirme adına hiçbir etkisi bulunmamakta, beyaz gürültü çıkışa yani ölçülen pH' a direk yansımaktadır. Oysaki Şekil 4.18'deki gürültülü prosesin Lyapunov fonksiyonu yaklaşımli gürbüz denetiminde aynı zaman dilimindeki beyaz gürültü tamamen etkisiz kalmaktadır (Şekil 4.19).

**2. Referans pH' ın 8.8 değerinin verildiği 400 sn' den 700 sn' e kadar olduğu zaman diliminde;** PI denetleyicinin uygulandığı gürültüsüz prosesi incelersek eğer (Şekil 4.2); bu kez istenilen pH değerine 300 sn sonra, 0.008 sürekli hal hata değeri ile ulaşıldığı görülecektir (Şekil 4.3). Ne var ki bu ulaşma süresi bu tarz hassas proseslerde kesinlikle istenilmemektedir. PI denetleyicinin pH denetiminde başarısız olduğunu bu zaman diliminde de söyleyebiliriz. Ancak gürültüsüz prosesin Lyapunov fonksiyonu yaklaşımli gürbüz denetiminde (Şekil 4.13) aynı zaman dilimindeki istenilen pH değerine, 6.2 sn' de ve 0.001 sürekli hal hata değeri ile ulaşılmakta ve bu pH değeri istikrarlı bir şekilde zaman diliminin sonuna kadar seyretmektedir (Şekil 4.14).

Bu aralıkta yine öncelikle PI denetleyicinin uygulandığı gürültülü prosesi incelersek eğer (Şekil 4.7) ; PI denetleyici bu kez beyaz gürültü üzerinde hiçbir varlık gösterememiş hatta gürültünün, pH çıkışını tamamen baskılamış olduğunu göreceğiz. Kullanıcılar tarafından istenilen değer olan pH=7' ye tekabül eden aralık olması sebebiyle de bu tarz kimyasal prosesler için çok tehlikeli andır (Şekil 4.8). Fakat gürültülü prosesin Şekil 4.18'deki

Lyapunov fonksiyonu yaklaşımlı gürbüz denetiminde, denetimin gayet başarılı olduğu, gürültünün tamamen etkisiz hale geldiği ve istenilen pH değerine çok hızlı oturduğu görülmektedir (Şekil 4.19).

**3. Referans pH' ın 12 değerinin verildiği 700 sn' den 1000 sn' e kadar olduğu zaman diliminde;** PI denetleyicinin uygulandığı gürültüsüz prosesi incelersek eğer (Şekil 4.2); istenilen pH değerine 150 sn' de, 0.0001 değerinde sürekli hal hatası ile ulaşıldığı görülmektedir (Şekil 4.3). Daha önce de bahsedildiği gibi bu tarz hassas proseslerde bu süre kabul edilebilir görünmemektedir. Diğer zaman dilimlerdeki gibi gürültüsüz prosesin Lyapunov fonksiyonu yaklaşımlı gürbüz denetiminde (Şekil 4.13) ise aynı zaman dilimindeki istenilen pH değerine 5 sn' de, sıfır sürekli hal hata değeri ile oturduğu görülecektir (Şekil 4.14).

Son aralıkta yine PI denetleyicinin uygulandığı gürültülü prosesi incelersek eğer (Şekil 4.7); PI denetleyicinin yine gürültünün yok edilmesinde yeteri kadar başarılı olamadığını görürüz (Şekil 4.8). Bu durum çıkış baz konsantrasyonu üzerinde de net bir şekilde görülmektedir (Şekil 4.10). Burada da gürültülü prosesin Lyapunov fonksiyonu yaklaşımlı gürbüz denetimi (Şekil 4.18) bu zaman diliminde de istenilen cevabı vermiş, beyaz gürültü etkisiz kalmıştır (Şekil 4.19). Çıkış baz konsantrasyonu da bu gürültüden etkilenmemiştir (Şekil 4.21).

Tüm bu gürültülü proses değerlendirmelerin yanı sıra asıl istenen durumlardan biri de referans pH' ın girilmesi ile ölçülen pH' ın çok kısa zaman diliminde istenilen değere oturmasıdır. Gürültülü veya gürültüsüz prosesin her durumunda Şekil 4.3, 4.8, 4.14 ve Şekil 4.19'dan açıkça belli oluyor ki Lyapunov fonksiyonu yaklaşımlı gürbüz denetim, PI denetleyiciye nazaran daha başarılı olmuş, her referans pH değeri çıkışta gürbüz denetim ile çok daha hızlı biçimde istenilen değere oturmuştur.

Netice olarak; klasik denetleme teknikleri bu tarz doğrusal olmayan proseslerde, yapılan çalışmalardan da görülmektedir ki çok başarılı olamamaktadır. Gürültü gibi bir etkenin varlığında prosesin kritik noktalarında (pH =7 gibi) çıkış değerinin en küçük bir sapması dahi istenilmeyen ve geri dönüşü olmayan sonuçlar doğurabilecektir. Bu da klasik denetim tekniklerinin bu tarz proseslerde geçersizliğini ortaya koymaktadır.



## KAYNAKLAR

- Akçalı İ D** (2001) *Otomatik Kontrol*, Nobel Kitabevi, Adana, 220 s.
- Alışkan İ** (2006) Mikroişlemci Kullanılarak Neuro-Fuzzy Proses Kontrol Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 120 s.
- Alışkan İ, Gülez K, Engin Ş N ve Cansever G** (2007) Ph Nötralizasyon Prosesine Lyapunov Fonksiyonu Tabanlı Denetleme Tekniğinin Uygulanması, TOK'07, İstanbul, 574-579 s.
- Aras Ö** (2010) Bulanık Mantık Teknikleri İle Nötralizasyon Prosesinde On-Line pH Kontrolü Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Gebze, 112 s.
- Caldwell W I, Coon G A and Zoss L M** (2012) *Frequency Response for Process Control*, Literary Licensing, LLC, 406 s.
- Demirci Ş ve Özkan G A** (1998) *Analitik Kimya Temel Kavramlar*, Ankara Üniversitesi, Ankara, 377 s.
- Gustaffson T K** (1985) An Experimental Study of a Class of Algorithms for Adaptive pH Control, *Chemical Engineering Science*, 50; 827-837 p.
- Henson M A and Seborg D E** (1994) Adaptive Non - linear Control of a pH Neutralization Process. *IEEE Transactions on Control System Technology*, 2,3; 169-182 p.
- Huang C C and Yu W H** (2001) Applying a Fuzzy Gain Scheduled PID Controller to Dyebath pH. *Textile Research Journal*, 71; 1074-1078 p.
- Kahvecioğlu A** (1999) Kendinden Ayarlamalı PID Kontrolün *Saccharomyces cerevisiae* Üretilen bir Biyoreaktöre Uygulanması ve Optimum Kontrol Parametrelerinin Bulunması. Yüksek Lisans Tezi, Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Kotz J C and Treichel P M** (1996) *Chemistry and Chemical Reactivity*, Saunders College Pub, Philadelphia, 1129 p.
- Leondes C T** (1998) *Industrial and Manufacturing Systems*, Academic Press, Los Angeles California, 395 p.
- Ogata K** (2003) *System Dynamics*, Prentice Hall, New Jersey, 768 p.
- Sarioğlu M K** (2000) *Otomatik Kontrol 1*, Birsen Yayınevi, İstanbul, 175 s.
- Say R, Uysal Ü D, Şahin M, Diltemiz S E, Özcan A, Ersöz A, Özcan A A, ve Şahin Y** (2009) *Analitik Kimya*, Anadolu Üniversitesi, Eskişehir, 247 s.



## KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Skoog D A and West D M** (1980) *Principles of Instrumental Analysis*, Saunders College Pub, Philadelphia, 769 p.
- Slotine J J E and Li W** (1991) *Applied Nonlinear Control*, Prentice Hall, New Jersey, 459 p.
- Tezcan G** (2001) Kireçtaşının Sülfürik Asitle Nötralizasyonunun Dinamik Analizi ve pH Kontrolü. Yüksek Lisans Tezi, Ankara, 112 s.
- Vural H** (2002) Doğrusal Olmayan pH Kontrolün Borusal Akış Reaktörüne Uygulanması. Doktora Tezi, Ankara, 180s.
- Wang L, Feng G and Ma J** (2001) Fuzzy Control Approach to a Class of Continuous Time Nonlinear Systems. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*,10;75-86 p.
- Wright R A, Soroush M and Kravaris C** (1991) Strong acid equivalent control of Ph processes: an experimental study, *Industrial Engineering and Chemistry Research* 30, 2437-2444
- Yadagiri P, Thyagarajan T, Panda R C and Rao P G** (2000) pH Control System Based on a Neuro-Fuzzy Approach. *Advances in Modeling and Analysis* B,43;41-63 p.

**EK AÇIKLAMALAR A**

**FONK\_2 BLOĞU MATLAB KODU**



## Ek-A: FONK\_2 Bloğu Matlab Kodu

```
function h = ph (u)
f=[1 10^(-3.17)+u(2) 10^(-3.17)*(u(1)-u(2))-10^(-14) 10^(-17.17)];
y = roots(f);
    r1=abs(y(1));
    r2=abs(y(2));
    r3=abs(y(3));

    a1 = -log10(r1);
    a2 = -log10(r2);
    a3 = -log10(r3);
    .
    .
    .
end;
```



## **ÖZGEÇMİŞ**

Mesut UYSAL Zonguldak'ta doğdu; ilk ve orta öğrenimini Zonguldak'ta tamamladı. 1998 yılında girdiği Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği bölümünden 2002 yılında mezun oldu. 2004 yılında askerlik görevini tamamladıktan sonra 2012 yılına kadar farklı sektörlerde faaliyet gösteren kurumsal şirketlerde Elektrik-Elektronik Mühendisi olarak görev yaptı. 2012 yılında Bülent Ecevit Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisansa başladı. Yine 2012 yılında başlayan BEÜ Bilgi İşlem Daire Başkanlığı bünyesindeki Ağ Sistem Uzmanı görevini halen devam ettirmektedir.

### **ADRES BİLGİLERİ**

Adres : BEÜ Bilgi İşlem Daire Başkanlığı Ağ Sistem Birimi  
İncivez – ZONGULDAK

Tel : 0372 291 40 10 – (1928)

E-posta : mesutuysal@beun.edu.tr