



**SIVI SEVİYE VE AKIŞ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ,
SİMÜLASYONU VE MİKRO DENETLEYİCİLERLE
KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

Yener CESUR

**Yüksek Lisans Tezi
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Teknolojileri Anabilim Dalı
Tez Danışmanı: Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT
Temmuz 2019**

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SIVI SEVİYE VE AKIŞ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU
VE MİKRO DENETLEYİCİLERLE KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yener CESUR

(152138103)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 16 Temmuz 2019

Tezin Savunulduğu Tarih: 30 Temmuz 2019

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT (F.Ü)

Diğer Jüri Üyeleri: Dr. Öğr. Üyesi Cafer BAL (F.Ü)

Dr. Öğr. Üyesi Muzaffer ASLAN (B.Ü)

TEMMUZ-2019

**T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SIVI SEVİYE VE AKIŞ SİSTEMLERİNİN MODELLENMESİ, SİMÜLASYONU
VE MİKRO DENETLEYİCİLERLE KONTROLÜNÜN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Yener CESUR

(152138103)

Anabilim Dalı: Elektrik-Elektronik Mühendisliği Teknolojileri

Programı: Kontrol ve Kumanda Sistemleri

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 16 Temmuz 2019

TEMMUZ-2019

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca, laboratuvar imkânlarından yararlanmam için her türlü kolaylığı sağlayan Teknoloji Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği bölüm başkanı ve öğretim elemanlarına teşekkür ederim. Türkiye Cumhuriyeti ve Avrupa Birliği işbirliği programı kapsamında desteklenen “Endüstriyel Tasarımda Modern Kontrol Teknikleri” isimli proje ile kontrol laboratuvarı kurarak projenin yürütücülüğünü yapan ve bilgi ve tecrübesiyle bana yol gösteren hocam Prof. Dr. Muammer GÖKBULUT’a saygı ve şükranlarını sunarım. Ayrıca tez çalışması boyunca bana yol gösteren ve laboratuvar çalışmalarında her zaman yardım ve desteklerini gördüğüm Arş. Gör. Ahmet TOP’a teşekkürü bir borç bilirim.

**Yener CESUR
ELAZIĞ-2019**

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ÖNSÖZ	II
İÇİNDEKİLER	III
ÖZET	VIII
ABSTRACT	IX
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	X
TABLolar LİSTESİ.....	XV
KISALTMALAR LİSTESİ	XVI
SEMBOLLER LİSTESİ	XVIII
1. GİRİŞ.....	1
2. SÜREÇ KONTROL SİSTEMLERİ.....	3
2.1. Ölçme Birimi	3
2.1.1. Süreç Kontrol Sistemlerinde Seviye Ölçüm Yöntemleri.....	7
2.1.1.1. Saydam Seviye Göstergesi.....	7
2.1.1.2. Manyetik Şamandıralı Seviye Transduseri	8
2.1.1.3. Şamandıralı Seviye Transduseri.....	9
2.1.1.4. Manyetostriktif Seviye Transduseri	10
2.1.1.5. Mikro Darbe Seviye Transduseri	10
2.1.1.6. Kapasitif Seviye Transduseri	11
2.1.1.7. Eddy Akım Seviyesi Ölçer Seviye Transduseri	12
2.1.1.8. Ultrasonik Seviye Transduseri	13
2.1.1.9. Mikrodalga Seviye Transduseri	14
2.1.1.10. Lazer Seviye Transduseri.....	15

2.1.1.11. Radyometrik Seviye Transduseri	15
2.1.1.12. Manyetik Direnç Mikroelektromekanik Seviye Transduseri.....	16
2.1.1.13. Mikroelektromekanik Eğim Seviye Transduseri.....	17
2.1.1.14. Hidrostatik Basınç Seviye Transduseri.....	18
2.1.1.15. Diferansiyel Basınç Seviye Transduseri	18
2.1.1.16. Kabarcık Seviye Transduseri	19
2.1.1.17. Elektromekanik Seviye Transduseri.....	20
2.1.1.18. Displacer Seviye Transduseri.....	21
2.1.1.19. Yük Hücresi Seviye Transduseri.....	22
2.1.1.20. Diyafram Seviye Transduseri.....	22
2.1.1.21. Elektrot Seviye Anahtarı.....	23
2.1.1.22. Titreşim Seviye Anahtarı.....	24
2.1.1.23. Termal Diferansiyel Seviye Anahtarı.....	25
2.1.1.24. Ultrasonik Seviye Anahtarı.....	25
2.1.1.25. Mikrodalga Bariyer Seviye Anahtarı.....	26
2.1.1.26. Kapasitif Seviye Anahtarı.....	26
2.1.1.27. Frekans Süpürme Seviye Anahtarı	27
2.1.1.28. Optik Prizma Seviye Anahtarı	28
2.1.1.29. Pedal Seviye Anahtarı.....	28
2.1.1.30. Eğim Seviye Anahtarı.....	29
2.1.2. Süreç Kontrol Sistemlerinde Akış Ölçüm Yöntemleri.....	30
2.1.2.1. Rotametre Akış Göstergesi	30
2.1.2.2. Türbin Akış Transduseri	31
2.1.2.3. Vortex Akış Transduseri.....	32
2.1.2.4. Elektromanyetik Akış Transduseri.....	33
2.1.2.5. Coriolis Akış Transduseri	34

2.1.2.6. Ultrasonik Akış Transduseri	35
2.1.2.7. Sonar Akış Transduseri	35
2.1.2.8. Pistonlu Akış Transduseri	36
2.1.2.9. Çok Delikli Basınç Probu Akış Transduseri	37
2.1.2.10. Lazer- 2 Odak Akış Transduseri	38
2.1.2.11. Partikül Görüntü Velosimetrisi	38
2.1.2.12. Lazer Doppler Velosimetrisi	40
2.1.2.13. Açık Kanal Sıvı Yüzey Hızı Akış Transduserleri	40
2.1.2.14. Termal Kütle Akış Transduseri	41
2.1.2.15. Termal Kütle Mikroelektromekanik Akış Transduseri	42
2.1.2.16. Kütle Hava Akımı Akış Transduseri	43
2.1.2.17. Diferansiyel Basınç Akış Transduserleri	44
2.1.2.18. Orifis Plakalı Diferansiyel Basınç Akış Transduseri	44
2.1.2.19. Pitot Tüplü Diferansiyel Basınç Akış Transduseri	45
2.1.2.20. Laminar Diferansiyel Basınç Akış Transduseri	46
2.1.2.21. Venturi Tüplü Diferansiyel Basınç Akış Transduseri	47
2.1.2.22. Dall Tüplü Diferansiyel Basınç Akış Transduseri	47
2.1.2.23. Akış Nozullu Diferansiyel Basınç Akış Transduseri	48
2.2. Son Kontrol Elemanları	48
2.2.1. Otomatik Kontrol Vanaları	49
2.2.2. Solenoid Vanalar	50
2.3. Sinyal Çeviriciler	50
2.4. Veri Toplama Kartları	51
3. ENDÜSTRİYEL KONTROL SİSTEMLERİ	52
3.1. Endüstriyel Kontrolörler	52
3.1.1. Programlanabilir Lojik Kontrolörler	52

3.1.2. Dağıtık Kontrol Sistemi.....	53
3.1.3. Uzak Terminal Ünitesi	54
3.1.4. Programlanabilir Otomasyon Kontrolörü.....	55
3.1.5. Endüstriyel Güvenlik Sistemleri	55
3.1.6. Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama	56
3.1.7. Endüstriyel PID Kontrolörler.....	57
3.2. PID Kontrolörler de Kullanılan Otomatik Kontrol Formları.....	58
3.2.1. Aç-Kapa Kontrol.....	59
3.2.2. Oransal Kontrol.....	61
3.2.3. Oransal-İntegral Kontrol.....	63
3.2.4. Oransal-Türev Kontrol	64
3.2.5. Oransal-İntegral-Türev Kontrol	65
3.3. PID Kontrolör Tasarımı.....	66
3.3.1. Köklerin Yer Eğrisi ile PID Tasarımı.....	67
3.3.2. PID Parametrelerinin Ayarlanma Yöntemleri	68
3.3.2.1. Açık Çevrim Ayarlama Yöntemi	68
3.3.2.2. Kapalı Çevrim Ayarlama Yöntemi.....	70
4. SIVI SEVİYE KONTROL SİSTEMİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU.....	71
4.1. Sıvı Seviye Kontrol Seti.....	71
4.1.1. SC39 Standart Kontrol Cihazı	74
4.1.2. MVS-20NP-24 Otomatik Kontrol Vanası.....	74
4.1.3. EVI 5M/13 Solenoid Vana	77
4.1.4. ECAP – 101 Kapasitif Seviye Transduseri.....	78
4.1.5. USB 1902 Veri Toplama Kartı	80
4.2. Sıvı Seviye Kontrol Sisteminin Yaklaşık Modelinin Çıkarılması	81

4.3. Sıvı Seviye Kontrol Sistemi için KYE ile PID Tasarımı ve MATLAB Simülasyonu ...	85
4.4. Sıvı Seviye Kontrol Sistemi için PID Parametrelerinin Ayarlanması	89
4.5. Sıvı Seviye Kontrol Sistemi Deneysel Sonuçları.....	91
4.5.1. Seviye Kontrol Sisteminin Aç-Kapa Kontrolü	92
4.5.2. Seviye Kontrol Sisteminin Oransal Kontrolü	92
4.5.3. Seviye Kontrol Sisteminin Oransal-İntegral Kontrolü	93
4.5.4. Seviye Kontrol Sisteminin Oransal-İntegral-Türev Kontrolü.....	94
5. SIVI AKIŞ KONTROL SİSTEMİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU	96
5.1. Sıvı Akış Kontrol Seti	96
5.1.1. 2008 4F17 Türbin Akış Transduseri	98
5.1.2. E-700 Sinyal Çevirici	99
5.2. Sıvı Akış Kontrol Sisteminin Yaklaşık Modelinin Çıkarılması	100
5.5. Sıvı Akış Kontrol Sistemi Deneysel Sonuçları.....	108
5.5.1. Akış Kontrol Sisteminin Aç-Kapa Kontrolü	108
5.5.2. Akış Kontrol Sisteminin Oransal Kontrolü	109
5.5.3. Akış Kontrol Sisteminin Oransal-İntegral Kontrolü	111
5.5.4. Akış Kontrol Sisteminin Oransal-İntegral-Türev Kontrolü.....	112
6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	114
KAYNAKLAR.....	115
EKLER	119
ÖZGEÇMİŞ	120

ÖZET

Bu tez çalışmasında, endüstriyel amaçlı seviye ve akış transduseri, solenoid ve oransal vana ile birlikte mikro işlemci esaslı süreç kontrolörlerle donatılan bir sıvı seviye ve akış kontrol sistemi hazırlanmıştır. Öncelikle kontrol sistemlerinde kullanılan transduserler ve vanaların karakteristikleri çıkarılmış ve endüstriyel süreç kontrolörlerin kullanımı ve programlanması araştırılmıştır. Hazırlanan kontrol düzeneklerinin deneysel olarak elde edilen basamak cevaplarından yararlanarak yaklaşık matematiksel modelleri çıkarılmıştır. Bulunan yaklaşık matematiksel modeller, PID kontrolör tasarımı ve PID parametresi ayarlama yöntemleri için kullanılmıştır.

Deneysel olarak elde edilen matematiksel modellerden yararlanarak sıvı seviye ve sıvı akış kontrol sistemleri için köklerin yer eğrisi tekniği ile PID kontrolör tasarımı incelenmiş ve MATLAB/Simulink ortamında kontrol sisteminin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Diğer taraftan sistemlerin deneysel olarak elde edilen cevaplarından yararlanarak Ziegler–Nichols gibi çeşitli PID parametresi ayarlama yöntemleri ile PID kontrolörün parametreleri hesaplanmıştır. Kontrol sisteminden elde edilen simülasyon ve deneysel sonuçlar, kontrol sisteminin performansının tatmin edici olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Süreç denetleyiciler, Sıvı Seviye Kontrolü, Sıvı Akış Kontrolü, PID Kontrol, Aç-Kapa Kontrol.

ABSTRACT

Modeling, Simulation and Control of Liquid Level and Flow Systems Using Industrial Microcontroller

In this thesis, liquid level and flow control systems equipped with industrial type liquid level and flow sensors, solenoid and proportional valves and microprocessor based process controller are constructed. Firstly, characteristics of the sensors and valves used in the control sets are determined and programming of process controllers are examined. Approximate mathematical models of the systems are derived by utilizing the experimental results obtained from step responses of processes. Mathematical models and step responses of the systems are required for PID controller design and PID tuning methods.

PID controllers are designed by using root locus analysis technique utilizing the mathematical models of the systems obtained from experiments and some simulation studies are implemented using the MATLAB/Simulink environment. On the other hand, PID controller parameters are calculated from the experimental results using the PID tuning methods such as Ziegler-Nichols and the others. Simulation and experimental results showing the performance of the control systems are given.

Keywords: Process Controllers, Liquid Level Control, Liquid Flow Control, PID Control, On / Off Control.

ŞEKİLLER LİSTESİ

	Sayfa No
Şekil 2. 1. Kapalı çevrim süreç kontrol sistemi.....	3
Şekil 2. 2. Saydam cam göstergeler (val.co).....	8
Şekil 2. 3. Manyetik şamandıralı seviye transduseri (abb)	9
Şekil 2. 4. Şamandıralı seviye transduseri (omega).....	9
Şekil 2. 5. Manyetostriktif seviye transduseri (abb)	10
Şekil 2. 6. Mikro darbe seviye transduserleri (siemens)	11
Şekil 2. 7. Kapasitif seviye transduserleri (siemens)	12
Şekil 2. 8. Eddy akım seviyesi ölçer seviye transduseri (shinagawa)	13
Şekil 2. 9. Ultrasonik seviye transduseri (siemens)	13
Şekil 2. 10. Mikrodalga seviye transduseri (siemens)	14
Şekil 2. 11. Lazer seviye transduseri (abb)	15
Şekil 2. 12. Radyometrik seviye transduseri (vega)	16
Şekil 2. 13. Manyetik direnç mikroeletromekanik seviye transduseri (cies)	17
Şekil 2. 14. Mikroeletromekanik eğim (inclinometer) seviye transduseri (2gig).....	17
Şekil 2. 15. Hidrostatik basınç seviye transduseri (emerson)	18
Şekil 2. 16. Diferansiyel basınç seviye transduseri (abb)	19
Şekil 2. 17. Kabarcık (bubbler) seviye transduseri (spw)	20
Şekil 2. 18. Elektromekanik seviye transduseri (endress-hauser)	21
Şekil 2. 19. Displacer seviye transduseri (emerson)	21
Şekil 2. 20. Yük hücresi seviye transduseri (siemens)	22
Şekil 2. 21. Diyafram seviye transduseri (tork).....	23
Şekil 2. 22. Elektrot seviye anahtarı (vega)	23
Şekil 2. 23. Titreşim seviye anahtarı (siemens).....	24
Şekil 2. 24. Termal diferansiyel seviye anahtarı (abb)	25
Şekil 2. 25. Ultrasonik seviye anahtarı (kenco).....	26
Şekil 2. 26. Mikrodalga bariyer seviye anahtarı (endress-hauser)	26
Şekil 2. 27. Kapasitif seviye anahtarları (baumer)	27
Şekil 2. 28. Frekans süpürme seviye anahtarı (baumer)	27
Şekil 2. 29. Optik prizma seviye anahtarı (wika)	28

Şekil 2. 30. Pedal seviye anahtarları (siemens)	29
Şekil 2. 31. Eğim seviye anahtarı	29
Şekil 2. 32. Şeffaf rotametre akış göstergesi	30
Şekil 2. 33. Manyetik rotametre akış göstergesi (yokogawa)	31
Şekil 2. 34. Türbin akış transduseri (omega)	32
Şekil 2. 35. Vortex akış transduseri (abb)	33
Şekil 2. 36. Elektromanyetik akış transduseri (siemens)	34
Şekil 2. 37. Coriolis akış transduseri (siemens)	34
Şekil 2. 38. Ultrasonik akış transduseri (siemens)	35
Şekil 2. 39. Sonar akış transduseri (sonartrac)	36
Şekil 2. 40. Pistonlu akış transduseri	37
Şekil 2. 41. Çok delikli basınç probu akış transduseri (vectoflow)	37
Şekil 2. 42. Lazer- 2 odak akış transduseri (ofs)	38
Şekil 2. 43. Partikül görüntü velosimetrisi çalışma prensibi	39
Şekil 2. 44. Partikül görüntü velosimetrisi düzeneği	39
Şekil 2. 45. Lazer doppler velosimetrisi	40
Şekil 2. 46. Açık kanal sıvı yüzey hızı akış transduseri	41
Şekil 2. 47. Termal kütle akış transduseri (kenco)	42
Şekil 2. 48. Termal kütle mikroeletromekanik akış transduseri (digi-key)	42
Şekil 2. 49. Kütle hava akımı akış transduseri (bosch)	43
Şekil 2. 50. Diferansiyel basınç akış transduseri (siemens)	44
Şekil 2. 51. Orifis plakalı diferansiyel basınç akış taransduseri (abb)	45
Şekil 2. 52. Pitot tüplü diferansiyel basınç akış transduseri (emerson)	46
Şekil 2. 53. Laminar diferansiyel basınç akış transduseri (meriam)	47
Şekil 2. 54. Venturi tüplü diferansiyel basınç akış transduseri	47
Şekil 2. 55. Dall tüpü	48
Şekil 2. 56. Akış nozulu	48
Şekil 2. 57. Otomatik kontrol vanaları (siemens)	49
Şekil 2. 58. Üç yollu solenoid vana (siemens)	50
Şekil 2. 59. Sinyal çeviriciler (siemens)	51
Şekil 2. 60. Veri toplama kartı (htaip1)	51
Şekil 3. 1. Programlanabilir lojik kontrolör (abb)	53
Şekil 3. 2. Dağıtık kontrol sistemi (emerson)	53

Şekil 3. 3. Uzak terminal ünitesi (abb)	54
Şekil 3. 4. Programlanabilir otomasyon kontrolörü (schneider)	55
Şekil 3. 5. Endüstriyel güvenlik sistemi (yokogawa)	56
Şekil 3. 6. Denetleyici kontrol ve veri toplama bilgisayar yazılımı digivis500 (abb)	57
Şekil 3. 7. Endüstriyel PID kontrolör (yokogawa)	58
Şekil 3. 8. Kapalı çevrim kontrol sisteminin laplace bölgesindeki blok şeması	59
Şekil 3. 9. Aç-kapa kontrol yanıt eğrisi	60
Şekil 3. 10. Histerisizli aç-kapa kontrol yanıt eğrisi.....	60
Şekil 3. 11. Oransal kontrol yanıt eğrisi	61
Şekil 3. 12. Geniş oransal bant	62
Şekil 3. 13. Dar oransal bant	63
Şekil 3. 14. Oransal-integral kontrol yanıt eğrisi	63
Şekil 3. 15. Oransal-türev kontrol yanıt eğrisi	64
Şekil 3. 16. Oransal-integral-türev kontrol yanıt eğrisi	65
Şekil 3. 17. Açık çevrim süreç yanıtı.....	69
Şekil 3. 18. Kapalı çevrim osilasyon yanıtı.....	70
Şekil 4. 1. Sıvı seviye kontrol sistemi süreç şeması	71
Şekil 4. 2. Sıvı seviye kontrol sistemi.....	72
Şekil 4. 3. Sıvı seviye kontrol sisteminin elektriksel bağlantı şeması	73
Şekil 4. 4. SC39 Kontrolör (tekon).....	74
Şekil 4. 5. MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanası (ontrol).....	75
Şekil 4. 6. MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanası vana açıklık yüzdesinin kontrol gerilimi ile değişimi	76
Şekil 4. 7. MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanasının vana kontrol gerilimine göre izin verdiği sıvı akışı.....	76
Şekil 4. 8. EVI 5M/13 solenoid vana (amisco)	78
Şekil 4. 9. ECAP – 101 kapasitif seviye transduseri (ensim).....	79
Şekil 4. 10. Transduserin ölçüm gerilimine (2 – 10 V) bağlı kontrolörden okunan seviye değişimi	80
Şekil 4. 11. USB 1902 veri toplama kartı (adlink)	80
Şekil 4. 12. Veri kartı MATLAB/Simulink arayüzü	81
Şekil 4. 13. Sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı.....	82

Şekil 4. 14. Şebeke vanasından akan sıvı miktarı yaklaşık 0.1 litre/sn. iken sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı	84
Şekil 4. 15. Şebeke vanasından akan sıvı miktarı biraz daha arttırıldığında oluşan sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı	85
Şekil 4. 16. Sıvı seviye kontrol sisteminin KYE ile MATLAB simülasyonu.....	86
Şekil 4. 17. Sıvı seviye kontrol sisteminin köklerin yer eğrisi a) P, b) PI	86
Şekil 4. 18. Sıvı seviye kontrol sisteminin KYE ile PID tasarımı MATLAB simülasyonu ..	87
Şekil 4. 19. $K_p = 0.5$ iken 20 cm set değerindeki sıvı seviye kontrol sisteminin davranışı a) Vana çalışma gerilimi (V) b) Giriş debisi (l/sn) c) Seviye (cm)	88
Şekil 4. 20. $K_p = 0.3$, $K_i = 0.0001$ iken 20 cm set değerindeki sıvı seviye kontrol sisteminin davranışı a) Vana çalışma gerilimi (V) b) Giriş debisi (l/sn) c) Seviye (cm)	89
Şekil 4. 21. Ziegler-Nichols yöntemi ile MATLAB/Simulink parametrelerinin karşılaştırması.....	90
Şekil 4. 22. Sıvı seviye kontrol sistemi.....	91
Şekil 4. 23. Sıvı seviye kontrol sisteminin 20 cm set değerindeki aç-kapa kontrol yanıtı (histerezis=0)	92
Şekil 4. 24. Sıvı seviye kontrol sisteminin $PB = \%20$ iken 20 cm değeri için oransal (P) kontrol yanıtı a) Seviye (cm), b) Vana Çalışma Gerilimi (V)	93
Şekil 4. 25. Sıvı seviye kontrol sisteminin $PB = \%20$ ve $\tau_i = 11$ iken 20 cm set değeri için PI kontrol yanıtı a)Seviye (cm), b) Vana Çalışma Gerilimi (V)	94
Şekil 4. 26. Sıvı seviye kontrol sisteminin $PB = \%20$, $\tau_i = 11$ ve $\tau_d = 4$ iken 20 cm set değeri için PID kontrol yanıtı a) Seviye (cm), b) Vana Çalışma Gerilimi (V) ...	95
Şekil 5. 1. Sıvı akış kontrol seti süreç şeması	96
Şekil 5. 2. Sıvı akış kontrol sistemi	97
Şekil 5. 3. Sıvı akış kontrol sisteminin elektriksel bağlantı şeması.....	98
Şekil 5. 4. 2008 4F17 türbin akış transduseri (vision)	99
Şekil 5. 5. E-700 sinyal çevirici (elimko)	100
Şekil 5. 6. Sıvı akış kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı (küresel ve tahliye vanası tam açık).....	101
Şekil 5. 7. Sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı (küresel ve tahliye vanası tam açık)	102
Şekil 5. 8. Sıvı akış kontrol sistemi için KYE ile PID tasarımı MATLAB simülasyonu	104

Şekil 5. 9. $K_p = 0.5$ iken 5 (litre/dk) set değerindeki a) Vana çalışma gerilimi (V), b) Giriş debisi (litre/sn), c) Akış (litre/dk)	105
Şekil 5. 10. $K_p = 0.4$, $K_i = 0.005$ iken 5 (litre/dk) set değerindeki a) Vana çalışma gerilimi (V), b) Giriş debisi (litre/sn), c) Akış (litre/dk)	106
Şekil 5. 11. Sıvı akış tankı Ziegler-Nichols yöntemi (PI) ile MATLAB/Simulink parametrelerinin karşılaştırması	107
Şekil 5. 12. Sıvı akış kontrol sistemi	108
Şekil 5. 13. Sıvı akış kontrol sisteminin 5 litre/dk set değerindeki aç-kapa kontrol yanıtı (histerezis=0)	109
Şekil 5. 14. Sıvı akış kontrol sisteminin $PB = \%40$ iken 5 litre/dk set değeri için oransal (P) kontrol yanıtı a) Akış (litre/dk), b) Vana Çalışma Gerilimi (V).....	110
Şekil 5. 15. Sıvı akış kontrol sisteminin $PB = \%50$ iken 5 litre/dk set değeri için oransal (P) kontrol yanıtı a) Akış (litre/dk), b) Vana Çalışma Gerilimi (V).....	111
Şekil 5. 16. Sıvı akış kontrol sisteminin $PB = \%50$ ve $\tau_i = 16$ iken 5 litre/dk set değeri için PI kontrol yanıtı a) Akış (litre/dk), b) Vana Çalışma Gerilimi (V).....	112
Şekil 5. 17. Sıvı akış kontrol sisteminin $PB = \%50$, $\tau_i = 16$ ve $\tau_d = 4,4$ iken 5 litre/dk set değeri için PID kontrol yanıtı a) Akış (litre/dk), b) Vana Çalışma Gerilimi (V)	113

TABLÖLER LİSTESİ

	Sayfa No
Tablo 3. 1. Oransal, integral ve türev kazançlarının kontrol yanıtına etkileri	66
Tablo 3. 2. Ziegler-Nichols açık çevrim PID parametrelerinin hesaplanması	69
Tablo 3. 3. Chien-Hrones-Reswich (CHR) açık çevrim PID parametrelerinin hesaplanması	69
Tablo 3. 4. Ziegler-Nichols kapalı çevrim PID parametrelerini hesaplaması	70
Tablo 4. 2. SC39 kontrolörünün giriş-çıkış modülleri	74
Tablo 4. 3. MVS-20NP-24 otomatik kontrol vanası teknik bilgiler	75
Tablo 4. 4. EVI 5M/13 solenoid vana teknik özellikleri	78
Tablo 4. 5. ECAP – 101 kapasitif seviye transduseri teknik özellikleri.....	79
Tablo 4. 6. Sıvı seviye kontrol sisteminin Ziegler-Nichols açık çevrim ayarlama yöntemi P, PI, PID kontrol parametreleri ($K = 45$, $L = 72 \text{ sn}$, $\tau_y = 700 \text{ sn}$).....	89
Tablo 5. 1. 2008 4F17 türbin akış transduseri teknik özellikleri	99
Tablo 5. 2. E-700 sinyal çevirici teknik özellikleri.....	100
Tablo 5. 3. Sıvı akış kontrol sisteminin Ziegler-Nichols açık çevrim ayarlama yöntemi P, PI, PID kontrol parametreleri ($K=0.154 \cdot 60=9.24$, $L = 10 \text{ sn}$, $\tau_y = 40 \text{ sn}$).....	106

KISALTMALAR LİSTESİ

P	: Oransal Kontrol (Proportional Control)
I	: İntegral Kontrol (İntegral Control)
D	: Türev Kontrol (Derivative Control)
PI	: Oransal-İntegral Kontrol (Proportional-İntegral Control)
PD	: Oransal-Türev Kontrol (Proportional-Derivative Control)
PID	: Oransal-İntegral-Türev Kontrol (Proportional-İntegral-Derivative Control)
ZN	: Ziegler-Nichols
CHR	: Chien-Hrones-Reswich
CC	: Choen-Coon
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
IMC	: Dâhili Model Kontrolü (Internal Model Control)
MPC-PID	: Model Öngörücü PID Kontrolör (Model Predictive PID Controller)
NCS	: Ağ Bağlantılı Kontrol Sistemleri (Networked Control Systems)
NN	: Sinir Ağı (Neural Network)
MRAC	: Model Referans Uyarlamalı Kontrol (Model Reference Adaptive Control)
RLS	: Özyinelemeli en küçük kare (Recursive Least Square)
LPRE	: Sıvı Yakıtlı Roket Motoru (Liquid Propellant Rocket Engine)
KYE	: Köklerin Yer Eğrisi
MATLAB	: Matris Laboratuvarı (Matrix Laboratory)
LabVIEW	: Laboratuvar Sanal Enstrüman Mühendisliği Tezgâhı (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench)
pH	: Hidrojen Gücü (Power of Hydrogen)
ECLM	: Eddy Akım Seviyesi Ölçer (Eddy Current Level Meter)
MEMS	: Mikroelektromekanik Sistemler (Micro-Electro-Mechanical Systems)
RTD	: Direnç Sıcaklık Dedektörleri (Resistance Temperature Detectors)
LED	: Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode)
AC	: Alternatif Akım (Alternative Current)
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
L2F	: 2 Odaklı Lazer (Laser 2 Focus)
PIV	: Partikül Görüntü Velosimetrisi (Particle Image Velocimetry)

CCD	: Şarj Eşleştirmeli Cihaz (Charge-Coupled Device)
CCMOS	: Cambridge Tamamlayıcı Metal Oksit Yarı İletkeni (Cambridge Complementary Metal Oxide Semiconductor)
LDV	: Lazer Doppler Velosimetrisi (Laser Doppler Velocimetry)
MAF	: Kütle Hava Akımı (Mass Air Flow)
DAQ	: Veri Toplama (Data Acquisition)
PLC	: Programlanabilir Lojik Kontrolörler (Programmable Logic Controller)
SCADA	: Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama (Supervisory Control and Data Acquisition)
USB	: Evrensel Seri Veriyolu (Universal Serial Bus)
RAM	: Rastgele Erişilebilir Bellek (Random Access Memory)
DCS	: Dağıtık Kontrol Sistemi (Distributed Control System)
RTU	: Uzak Terminal Ünitesi (Remote Terminal Unit)
PAC	: Programlanabilir Otomasyon Kontrolörü (Programmable Automation Controller)
SIS	: Endüstriyel Güvenlik Sistemi (Safety Instrumented System)
PB	: Oransal Band (Proportional Band)
SP	: Set Noktası (Set Point)

SEMBOLLER LİSTESİ

$u(t)$	: Süreç girişi (Kontrolör çıkışı)
$y(t)$	: Süreç çıkışı
$r(t)$	: Set değeri
$u_c(t)$	: Kontrol sinyali
$R(s)$	: Laplace bölgesindeki referans sinyali
$E(s)$	: Laplace bölgesindeki elektriksel hata sinyali
$G_c(s)$	: Transfer fonksiyonu
$U_c(s)$	: Laplace bölgesindeki kontrol sinyali
$G_y(s)$	: Yükselticinin transfer fonksiyonu
$U(s)$	: Laplace bölgesindeki kontrolör çıkış sinyali
$G_p(s)$	: Kontrol edilecek sürecin transfer fonksiyonu
$Y(s)$	: Laplace bölgesindeki süreç çıkışı
$H(s)$	: Laplace bölgesindeki ölçme birimi transfer fonksiyonu
$Y_e(s)$	: Sistemin gerçek çıkışının transduserden ölçülen gerçek karşılığı
K_y	: Yükselticinin kazancı
K_s	: Transduser kazancı
$e(t)$	: Elektriksel hata sinyali
K_p	: Oransal kazanç
PB	: Oransal bant
K_i	: İntegral kazanç
K_d	: Türev kazancı
τ_i	: İntegral zaman sabiti
τ_d	: Türev zaman sabiti
ζ	: Sönüm faktörü
w_n	: Doğal frekans
$s_{1,2}$	: KYE baskın kapalı çevrim kutuplarının yerleştirilmesi istenen nokta
M	: Maksimum aşma
t_r	: Yükselme süresi

t_s	: Yerleşme süresi
K_v	: MVS–20NP–24 Otomatik kontrol vanası kontrol kazancı
τ_v	: Vana zaman sabitesi
$G_v(s)$	: MVS–20NP–24 Otomatik kontrol vanasının modeli
$Q_i(s)$	: Laplace bölgesindeki giriş debisi
$V_c(s)$	: MVS–20NP–24 Otomatik kontrol vanası kontrolü
q_i	: Kaynaktan tanka akan sıvı miktarı
K	: Adım yanıtının kararlı duruma ulaştığı değer
τ	: Sistem zaman sabiti
L	: Sistem gecikme süresi (ölü zaman)
$G_1(s)$	: Giriş debisine göre sıvı seviye sisteminin transfer fonksiyonu
$G_2(s)$	: Giriş debisine göre sıvı seviye sisteminin transfer fonksiyonu
z	: Köklerin yer eğrisi sıfırı
τ_y	: Tankın dolma zaman sabitesi
τ_b	: Tankın boşalma zaman sabitesi
q_o	: Tanktan çıkan sıvı miktarı (m^3/sn)
v_c	: Vana kontrol gerilimi
$G_a(s)$	: Adım yanıtı Giriş debisine göre sıvı akış sisteminin transfer fonksiyonu
$Q_o(s)$	: Laplace bölgesindeki çıkış debisi
T	: Salınım periyodu
K_{pcr}	: Sistemin osilasyona girdiği andaki nihai kazanç değeri
S1	: Üniversal transduser giriş modülü
PS	: Besleme gerilim girişi modülü
R1	: Röle çıkış modülü
O1	: Analog çıkış modülü
Y	: MVS–20 NP–24 Otomatik kontrol vanası kontrol gerilimi girişi

1. GİRİŞ

Endüstriyel otomasyon, insan müdahalesi olmadan endüstriyel süreçlerin maliyetlerini azaltıp ürünün kalitesi ile üretim hızını arttırarak otomatik çalışmasını ve kontrolünü sağlayan otomatik kontrol cihazlarının esnek, verimli, tutarlı, mümkün olduğunca az işlem ile kullanımı olarak tanımlanabilir. Endüstriyel otomasyon petrokimya, gıda işleme, şişeleme, kimyasal üretim, ilaç, rafineri, içecek, enerji üretim santralleri gibi endüstrilerde makine, sistem ve süreçlerin izlenmesi ve kontrol edilmesinde kullanılır.

Endüstriyel otomasyonun avantajları:

- Verimliliği arttırır. Ürünün üretim sürecindeki tüm aşamalarının takip ve kontrolünü sağlayarak kullanıcı hatalarından kaynaklanan olumsuzlukları ortadan kaldırır.
- Ürün kalitesini arttırır. Üretimin daha iyi kontrol edilmesi ile kaliteli ürün üretimi artar.
- Rutin kontrolleri azaltır. Endüstriyel otomasyon, kapalı çevrim kontrol tekniklerini kullanarak süreç değişkenlerini istenen değerlere otomatik olarak ayarlar.
- Güvenliği arttırır. Tehlikeli çalışma koşullarında kontrol işlemi otomatik makinelerle yerine getirilir.

Endüstriyel süreç kontrol işlemlerinin %95'inden fazlasını oluşturan PID kontrol, ölçülen süreç değişkeni ile istenen set noktası arasındaki farkı alarak hata değerini hesaplayan ve hatayı en aza indirmek için sistemi kontrol eden bir kapalı çevrim kontrol yapısıdır. Oransal (P), integral (I) ve türev (D) işlemleri, kontrol edilen sistemin yapısına ve sistemden beklenen performans özelliklerine göre P, PI, PD veya PID biçiminde uygun kombinasyonlar halinde kullanılır. PID kontrolör parametrelerini ayarlamak için Ziegler–Nichols (ZN), Chien-Hrones-Reswich (CHR), Choen-Coon (CC), Tyreus Luyben, Sönümlü sinüsoidal, nöral ağ, bulanık mantık kontrolü, genetik algoritma, parçacık sürü optimizasyonu (PSO) vb. yöntemler kullanılır [1].

Peterson, Eilers ve Whitmore'un birlikte yaptıkları çalışmada kapalı çevrim kontrol yapısı tasarlanarak azot oksit ve hidroksil kullanan bir hibrit roket motoru için gaz kontrol ünitesinin (itici gaz olarak polibütadien) PID çalışma performansını incelemişlerdir. Sistemi daha iyi sınıflandırmak için ilk önce açık çevrim motor testleri yapılarak PID parametreleri ve motor performans değerlerini bulmuşlardır. Açık çevrim testleri ile motorun azami itiş gücünün % 10'undan daha azını kısma yeteneğini gösterdiği görülmüştür [2].

Vincent A. K. ve Nersisson R.'un birlikte yaptıkları çift tanklı bir sıvı seviye kontrol sistemin de MATLAB programının kullanılması ile PID kontrol parametrelerinin Dâhili Model Kontrolü (IMC) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ile bulunması ve bu kontrol parametrelerinin uygulanmasını içermektedir. Çalışmada PSO yöntemi ile elde edilen parametreler daha iyi kontrol performansı sağlamıştır [3].

Lee, Jin ve So tek bir su tankı sisteminin kontrolü için bulanık bir modele dayalı bulanık PID kontrolör tasarım tekniği incelenmişlerdir. Bir su tankı sistemi çalışma noktasına bağlı olarak bir dizi alt model olarak doğrusallaştırılmış ve bulanık birleştirme ile bulanık bir model elde edilmiştir. Her bir alt model, birinci dereceden bir zaman gecikme modeli olarak elde edilmiş ve bir PID kontrolör, mevcut çeşitli ayarlama teknikleri kullanılarak tasarlanmıştır. Daha sonra, tasarlanan bulanık modelin simülasyonu gerçekleştirilerek performansı PID kontrolör ile karşılaştırılmıştır [4].

Medewar, Sonawane ve Munje yaptıkları çalışmada çift tanklı sıvı seviye kontrolü için bulanık ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) bazlı PID'nin performansını incelemişlerdir. Asıl amaçları, yükselme süresi, yerleşme süresi, aşma ve en yüksek aşma gibi performans özelliklerini en aza indirmektir. İlk önce bulanık kontrolör uygulamış ve daha sonra kontrol sisteminin performansın da daha fazla iyileştirme sağlamak için PSO denenmiştir. Çalışma sonucunda PSO'dan bulanık denetleyiciye göre daha iyi ve tatmin edici bir cevap elde etmişlerdir [5].

Jafari R., Razvarz S., Vargas C. ve Yu W. boru hatlarındaki yağın akış hızını kontrol etmek için bir PID kontrolörü ile pompa motoru kullanmışlardır. Çalışma boru hatlarındaki akış hızlarının kontrolünde PID kontrolörün etkinliğini kanıtlayan sayısal simülasyonlar ve analizler kullanılarak doğrulanmıştır [6].

Markus D. ve Apprey M. açık deniz petrol üretim platformu için bir model öngörücü PID kontrolör (MPC-PID) yöntemi önermektedirler. Model öngörücü kontrolörü, optimal kontrol problemini çözmek için süreç modeline dayanan bir yöntem kullanır. Önerilen yaklaşım, MATLAB / Simulink'te mühendislik tasarım araçları kullanılarak daha da geliştirilmiştir. Sonuç olarak MPC kontrolörünün gerekli enerjiyi azaltırken üretim maliyetinde maksimum performansla genel bir azalma sağlanır [7].

Getu B.N. tank içerisini doldurmak için kullandığı DC motorlu su pompasını kontrol etmek için PID tabanlı kontrolör kullanmış ve kontrol parametrelerinin performansını MATLAB simülasyonu ile incelemiştir [8].

Wanigasekara C., Nguang S. K., Padmanaban S., Swain A., Subramaniyan U. ve Almakhes D. yaptıkları çalışma da ağ bağlantılı kontrol sistemi (NCS) için bir sinir ağı (NN) tabanlı kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Bu kontrolörün performansı klasik PID kontrolörler ile karşılaştırılarak sinir ağı (NN) tabanlı kontrolörlerin ağ ortamındaki sağlamlığı, bir DC servo mekanizması üzerinde test edilerek, parametrik belirsizliklerin değişimleri incelenmiştir. Karşılaştırmalı incelemenin sonuçları, sinir ağı (NN) tabanlı kontrolörün performansının diğer kontrolörlere kıyasla daha yüksek olduğunu göstermektedir [9].

Cartes D. ve Wu L. konvansiyonel olmayan bir PID kontrolör ve üç farklı adaptif kontrolörü (Model referans uyarlamalı kontrol (MRAC), Lyapunov kestirimli dolaylı bir MRAC ve sıvı seviye için özyinelemeli en küçük kare (RLS) güncelleme tahminini içeren dolaylı bir MRAC) birbirine bağlı üç tanklı bir sisteme uygulayarak, her birinin performansı karşılaştırmışlardır. Tüm kontrolörlerin sinüzoidal bir girişi çok iyi takip ettiği ve genel olarak biraz değişken performans göstermelerine rağmen içlerinden doğrudan MRAC ve RLS tahminli dolaylı MRAC en iyi performansı sağlamıştır [10].

Carlucho I., Paula M.D. ve Acosta G.G. mobil robotlardaki PID kontrolörlerin parametrelerinin tespitini yapmak için bir yapay zekâ tabanlı sistem geliştirmişlerdir. Mobil robotlarda yapılan kapsamlı bir karşılaştırmalı simülasyon çalışması ve deneyler, mobil robot platformlarında PID kontrolörler için önerilen algoritmanın yüksek performans sağladığını göstermektedir. PID parametreleri son derece kısa bir sürede elde edilmesini sağlayan algoritmanın gerçek zamanlı robotik uygulamalar için uygulanması mümkündür [11].

Behn C. ve Siedler K. bir robot kolunu çift sarkaçlı bir yapı şeklinde kontrol etmek için uyarlamalı PID kontrolör tasarımı incelenmişlerdir. Kas benzeri aktüatörlerle çalışan kontrolör, sistemdeki kolun istenen hareketi için öngörülen yörüngeleri mümkün olduğunca çabuk ve tam olarak izlemesi sağlanmıştır. Sistemin çeşitli sayısal simülasyonları, kontrolör parametreleri ve çalışma performansı incelenerek kontrolörün verimliliği deneyler ile doğrulanmıştır [12].

Roca S., Marzat J., Langlois N., Farago F., Galeotta M. ve Gonidec S. sıvı yakıtlı roket motorlarında (LPRE) yanma odası basıncı ve karışım oranlarındaki ayar noktalarının düzenlenmesini sağlayan akış kontrol valflerinin kontrolünü PID kontrolör yoluyla sağlayarak sıvı yakıtlı roket itiş kontrolünün performansını iyileştirilmiştir [13].

Ou K., Wang Y., Li Z., Shen Y. ve Xuan D. yakıt hücresi sistemi koruması ve performans gelişimi için oksijen fazlalığı oranını düzenlemek amacıyla hava akış hızını kontrol etmek üzere bulanık PID kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre önerilen ileri beslemeli bulanık PID kontrolörün oksijen oranının düzenlenmesinde ve güç kaybının azaltılmasında iyi kontrol performansı ortaya koymaktadır [14].

Daudab W.R.W., Roslia R.E., Majlana E.H., Hamida S.A.A., Mohamedc R. ve Husainia T. reaksiyon, sıcaklık, kontrol, güç elektroniği gibi yakıt hücresi kontrol alt sistemlerinin kontrolünde kullanılmak üzere tasarladıkları PID kontrolör ile yakıt hücresinin hidrojen ve hava akış hızı kontrolünü sağlanmaktadır [15].

Bieda R., Blachuta M. ve Grygiel R. yaptıkları tek ve çift tanklı kontrol sistemlerinin dinamiği derinlemesine incelenerek PI / PID kontrolör tasarımı ile daha yüksek dinamik doğruluk sağlamaktadırlar. Birleştirilmiş tank setinin kontrolör ayarları ve kontrol sistemi davranışı üzerindeki etkisi incelenerek uygulanan tasarım yöntemleri ile ilgili deneysel sonuçlar çıkarılmıştır [16].

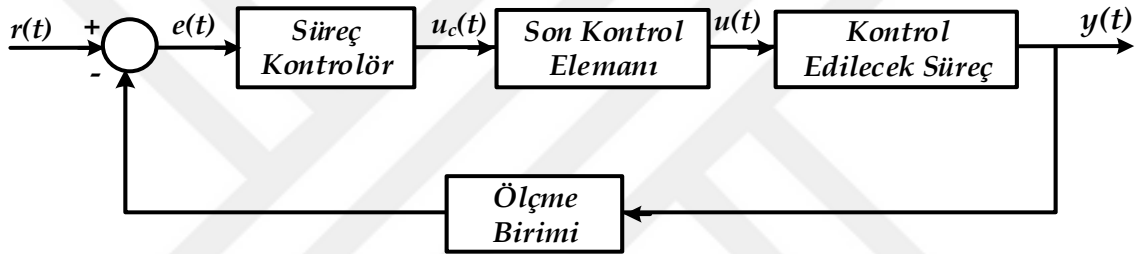
Tapak P. ve Huba M. karmaşık kontrol sistemleri için de kullanılabilecek birleştirilmiş tank sisteminin laboratuvar modelini hazırlayarak tek bir tankta doğrusal olmayan sıvı seviyesinin P ve PI kontrolünü gerçekleştirmişlerdir [17].

Kadua C.B. ve Patilb C.Y. PID kontrolör tasarımı için bir kararlı bölge analizi yöntemi tasarlamışlardır. Çalışmada sunulan kontrol yaklaşımı PID parametrelerini gözden geçirmeden ve karmaşık bir matematiksel model olmadan tatmin edici bir şekilde çalışmaktadır [18].

Bu tez çalışmasında endüstride kullanılan sinyal çevirici, veri kartı, seviye-akış transduseri, oransal ve solenoid vana ile montajları yapılan birer sıvı seviye ve akış kontrol sistemleri hazırlanmıştır. Tezin 2. bölümünde endüstride kullanılan süreç kontrol birimleri tanıtılmaktadır. Sıvı seviye ve akış kontrol sistemlerinin kontrolü endüstride kullanılan mikro işlemcili süreç kontrolörü ile gerçekleştirilmiştir. Tezin 3. bölümünde endüstride kullanılan kontrolörler tanıtılarak aç-kapa, P, PI, PD, PID kontrol formları açıklanmıştır. Kontrol sistemlerinin deneysel olarak elde edilen açık çevrim basamak yanıtlarından yararlanılarak matematiksel modelleri çıkarılmıştır. Elde edilen matematiksel modellerden yararlanılarak sıvı seviye ve akış kontrol sistemleri için köklerin yer eğrisi (KYE) yöntemi ile PID kontrolör tasarımı incelenmiş ve MATLAB/Simulink programında kontrol sistemlerinin simülasyonları gerçekleştirilmiştir. Ayrıca sistemlerin deneysel olarak elde edilen cevaplarından yararlanılarak Ziegler-Nichols'un PID parametrelerini ayarlama yöntemi ile PID kontrolörün parametreleri hesaplanmıştır. Tezin 4. bölümünde sıvı seviye kontrol sisteminde, 5. bölümünde ise sıvı akış kontrol sisteminde kullanılan kontrol birimleri, matematiksel modellenmeleri, MATLAB/Simulink simülasyonları ve mikro denetleyici ile elde edilen deneysel sonuçları yer almaktadır.

2. SÜREÇ KONTROL SİSTEMLERİ

Süreç kontrolü, ölçülen süreç değişkeninin istenen set değerinden sapması durumunda sapmayı düzeltmek üzere bir son kontrol elemanını tarafından otomatik olarak kontrolüdür. Yaygın süreç değişkenleri: basınç, akış, seviye, sıcaklık, yoğunluk, iletkenliktir. Farklı türde süreç kontrol birimleri vardır. Bunların ortak özelliği sistemin istenilen set değerinde çalışmasını sağlamaktır. Kapalı çevrim süreç kontrol sistemleri kontrol edilecek süreçle birlikte ölçme birimi, son kontrol elemanı ve değerlendirme-kontrol olmak üzere dört ana birimden meydana gelir [19, 20].



Şekil 2. 1. Kapalı çevrim süreç kontrol sistemi

Şekil 2.1. kapalı çevrim süreç kontrol sistemi blok şemasındaki kontrol edilecek süreç, sıvı seviye ve sıvı akış kontrol sisteminin ifade eder. Dolayısıyla süreç girişi $u(t)$, giriş sıvısının debisidir, süreç çıkışı $y(t)$ ise tanktaki sıvı seviyesi ya da sıvı akışını göstermektedir. Ölçme birimi ise süreç çıkışı olan sıvı seviyesi ve sıvı akışını ölçerek mikro işlemcili süreç kontrolörüne iletir. Kontrol sisteminden istenilen set değeri $r(t)$, kontrolörün tuş takımından girilir. Süreç kontrolörünün ürettiği kontrol sinyali $u_c(t)$ (4 – 20 mA ya da 0 – 10 V DC) ile son kontrol elemanı olarak kullanılan oransal ve solenoid vananın açılıp kapanması kontrol edilerek süreç değişkeni ayarlanır.

2.1. Ölçme Birimi

Süreç değişkeninde meydana gelen değişimlerin elektriksel gerilim ya da akım gibi analog işarete dönüştürülmesi anlamına gelir.

Gösterge: Süreç değişkenini görüntüleyen, okunabilir cihazlardır. Basınç, sıcaklık, akış gibi süreç değişkenlerini görüntüleyen dijital ve analog göstergeler vardır.

Sensör: Süreç değişkenindeki fiziksel büyüklüğü ölçerek bir sinyal üretir. Basınç, sıcaklık, akış, seviye, pH, kuvvet, ağırlık, titreşim vb. gibi değişkenlerin ölçülmesi için farklı sensör türleri vardır.

Transmitter (Verici): Sensörden alınan sinyali kontrol döngüsünde aktarılabilir standart bir voltaj (0 – 10 V DC) veya mili amper (0 – 20 mA) sinyaline dönüştürürler.

Transduser (Dönüştürücü): Fiziksel süreç değişkeninin (basınç, sıcaklık, seviye, akış vb.) büyüklüğünü kontrolörde anlaşılabilir işlenebilecek bir sinyale (0 – 10 V DC, 2–10 V DC, 0–20 mA, 4 – 20 mA) dönüştürür. Transduserler, sensörden alınan çok küçük elektriksel sinyalleri filtreleme ve doğrusal yükseltme işlevini yaptıktan sonra sinyalleri yükselterek ya 0-10 V gibi gerilimsel büyüklüğe ya da 4 – 20 mA gibi akım türüne dönüştürürler. Endüstriyel uygulamalarda kontrol, koruma ve izleme gibi alanlarda çok sık kullanılan transduserler seviye, akış, sıcaklık, basınç, kuvvet, gerinim ölçmek için kullanılan sensörler içerir. Süreç değişkenine bağlı olarak transduser seçerken çıkış türüne, boyutuna, şok, titreşim, aşırı sıcak-soğuk, kir, toz, nem gibi koşullara dikkat edilmelidir. Transduser seçimi hassasiyet, doğruluk payı, ölçüm skalası, sensör, sinyal çıkışı ve dış ortam gibi birçok duruma göre değişiklik gösterir [19, 20].

2.1.1. Süreç Kontrol Sistemlerinde Seviye Ölçüm Yöntemleri

Endüstriyel süreçler için seviye izleme yönteminin seçimini etkileyen birçok fiziksel uygulama değişkeni vardır. Bunlardan bazıları: faz (sıvı, katı veya bulamaç), sıcaklık, basınç, nem, kimyasal yapı, dielektrik sabiti, yoğunluk, elektriksel gürültü, titreşim, buhar, sis, toz, mekanik şok, fiyat, doğruluk, görünüm, yanıt oranı, fiziksel boyut, montaj, sürekli veya nokta düzeylerinin kontrolüdür. Bu nedenle uygulama gereksinimi için uygun bir transduser seçimi çok önemlidir [21, 22].

2.1.1.1. Saydam Seviye Göstergesi

Seviye ölçümü yapılacak tank altına açılan girişe dikey olarak bağlanan cam veya plastik den yapılan saydam bir boru (tüp) içindeki malzemenin seviyesi ile tank içerisindeki malzemenin seviyesi karşılıklı olarak eşitlenir. Bu yöntemle seviye tank dışarısından görsel olarak doğrudan kolaylıkla izlenebilir. Ancak göstergenin süreç değişkeninin sıcaklığından

daha düşük bir sıcaklıkta olduğu sistemlerde, göstergenin dışında oluşabilecek yoğuşma, okuma doğruluğunu bozar. Şekil 2.2.'de Val.co firmasına ait saydam cam göstergelerin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 2. Saydam cam göstergeler (val.co)

Kırılğan yapıda olduklarından saydam boruların içerisinde sızma, yanma ve patlama gibi olumsuz yanları vardır. Tehlikeli sıvıların seviyesini ölçerken bu yöntem kullanılmamalıdır. Koyu veya kirli sıvılarda, tortu birikmesi gerçekleştiğinden kullanımı uygun değildir. Bakım, temizlik gerektirirler.

Tank üzerine yerleştirilecek saydam boruların tank boyunda olması gerekir. Saydam boruların boyunu düşürebilmek için boru içerisine ağır bir sıvı (cıva vb.) konularak aynı basıncı daha az bir yükseklikle karşılamak mümkün olur. Fakat seviyeyi tam olarak ölçebilmek için seviye aralıkları ile tank içerisindeki seviye birbiriyle uyumlu olmalıdır [21, 22].

2.1.1.2. Manyetik Şamandıralı Seviye Transduseri

Bu yöntem birleşik kap ilkesi ile çalışan şeffaf borulu seviye göstergelerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Sıvı yüzeyinde bulunan bir mıknatısın seviye göstergesinde bulunan diğer mıknatısı hareket ettirmesiyle seviye hem görsel hem de sinyal çıkışı (4 – 20 mA) olarak belirlenmiş olur. Manyetik şamandıralı seviye transduserlerinde seviye borusu plastik veya özel alaşım metal gibi manyetik olmayan malzemelerden yapılır. Şekil 2.3.'de ABB firmasına ait manyetik şamandıralı seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 3. Manyetik şamandıralı seviye transduseri (abb)

Bu transduserler yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve korozyif sıvıların seviye ölçümünde kolay ve ucuz bir yöntemdir. Ekonomik oluşu, bakım-montaj kolaylığı ve değişik montaj şekilleriyle kullanıcısına avantaj sağlar. Butane, propan, yağ, asit, su ya da iki farklı tür sıvının arayüz ölçümünde belirli yerçekimleri için şamandıra optimize edilir [23-25].

2.1.1.3. Şamandıralı Seviye Transduseri

Şamandıra elektrik sinyali üreten bir potansiyometre veya reosta' ya bağlıdır. Tank süreç değişkeni ile doldukça şamandıra yukarı hareket ederek direnci azaltır, boşaldıkça şamandıra aşağı inerek direnci arttırır. Artan veya azalan direnç, akımı (4 – 20 mA) bu doğrultuda çıkış sinyali olarak verir. Şekil 2.4.'de Omega firmasına ait şamandıralı seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 4. Şamandıralı seviye transduseri (omega)

Bu yöntem kimyasal işleme, ilaç, gıda işleme, atık su arıtma ve diğer uygulamaların sıvı seviye ölçümleri için idealdir. Şamandıra süreç sıvısıyla tepkimeye girmeyecek yapıda olmalıdır. Her türlü sıvıya ve aşırı sıcaklığa karşı dayanabilmesi için çok çeşitli malzemelerden yapılırlar. Seviyesi ölçülen malzemenin üst yüzeyi çalkantılı ise ölçümde salınımına neden olur [21, 22].

2.1.1.4. Manyetostriktif Seviye Transduseri

Manyetostriktif (magnetostrictive) seviye transduser probu üzerinde içerisinde kalıcı mıknatıs bulunan biri sabit diğeri sıvının yükselip alçalmasına bağlı olarak hareket eden hareketli şamandıra bulunur. Sıvı seviyesine bağlı olarak konumu değişen manyetik alana sahip bir manyetik şamandıra transduser tarafından manyetostriktif telden gönderilen düşük sinyal darbelerini geri yansıtarak transdusere gönderir. Bu olay sırasında darbe sinyallerinin transduserden çıkıp tekrar geri dönme süresi sıvının yüksekliğine karşılık gelir ve transduser tarafından seviye bir elektrik sinyaline dönüştürülür. Bu yöntem sıcaklık, basınç, gürültü ve köpükten etkilenmez ancak güçlü elektromanyetik radyasyona maruz kalmaları ölçümde hatalara neden olur [23]. Şekil 2.5.'de ABB firmasına ait manyetostriktif seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 5. Manyetostriktif seviye transduseri (abb)

2.1.1.5. Mikro Darbe Seviye Transduseri

Mikro Darbe (micro İmpulse - guided wave radar) seviye transduserinde bir elektrik sinyal darbesi, iletim hattı gibi davranan transduser probu boyunca ilerleyip seviyesi ölçülecek malzeme ile karşılaştığında kısmen yansıtılır. Yansıtılan darbe prob üzerinden

tekrar transdusere iletilir. Bu işlem sırasında darbelerin transduserden çıkıp tekrar transdusere geri dönme süresi seviye ile doğru orantılıdır. İki arayüz (hava-sıvı ve sıvı-sıvı) arasında ölçüm alırken süreç değişkenlerinden yansıyan iki sinyal arasındaki zaman arayüz seviyesini verir. Ölçüm sıcaklık, basınç, dielektrik sabitinden etkilenmez [23, 26, 27]. Şekil 2.6.'da Siemens firmasına ait çeşitli boyut ve yapıda mikro darbe seviye transduserlerinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 6. Mikro darbe seviye transduserleri (siemens)

2.1.1.6. Kapasitif Seviye Transduseri

Metal bir tanka monte edilen yalıtılmış bir metal prob, seviye arttıkça metal duvar ile birlikte bir kondansatör oluşturur. Kondansatörün kapasitesi, iletkenlerin alanı ve birbirlerine olan uzaklıklarından başka aradaki sıvının dielektrik katsayısına bağlıdır. Kondansatör levhaları arasındaki alan ve mesafe sabit kalırsa, kapasite sadece plakaların arasındaki boşluğu dolduran süreç değişkeninin dielektrik sabitine bağlı olarak değişir. Süreç değişkeninin içerisindeki yabancı maddeler dielektrik sabitini değiştirdiğinden ölçüm doğruluğu olumsuz etkilenir. Çoğu arayüz uygulamasında, daha düşük dielektrik katsayılı süreç değişkeni üstte bulunur. Üstteki süreç değişkeni, genel kapasite değerinde çok düşük bir değişim yaptığından, seviye olarak sadece yüksek dielektrik katsayılı süreç değişkeninin seviyesi ölçülür. Şekil 2.7.'de Siemens firmasına ait çeşitli boyut ve yapıda kapasitif seviye transduserlerinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 7. Kapasitif seviye transduserleri (siemens)

Sıvı ve taneli katıların seviye ölçümünde kullanılırlar. Kullanılacak uygulamaya göre doğru prob seçilmelidir. Uzun proplar katı tanelerinin seviye ölçümünde mekanik gerginlikten dolayı kırılabilirler. Yapışkan, yağ ve gres gibi yüksek viskoziteli malzemelerin seviye ölçümünde prob üzerinde malzeme birikebilir. Transduser propları kurşundan yapıldığı için uzun ölçüm aralıklarında düzensiz veya bozuk sinyaller oluşur [21, 26, 27].

2.1.1.7. Eddy Akım Seviyesi Ölçer Seviye Transduseri

Eddy akım seviyesi ölçer (ECLM) seviye transduserleri tarafından süreç değişkeninin ölçümde kullanılan sensörün içerisinde iki tane bobin yer alır. Yüksek frekans (AC) akımı ile çalışan bobin tarafından oluşturulan bir elektromanyetik alan erimiş metal yüzeyinde girdap akımı üretir. Ölçüm bobini sensör ve erimiş metal yüzey arasındaki mesafenin bir fonksiyonu olan indüklenen girdap akımı kuvvetini alır. Ölçüm bobini tarafından ölçülen değer işlemci tarafından "kalıp seviyesi kontrol sistemi için" elektrik sinyaline dönüştürülür. Metal kalıpların seviyesi düşük olduğunda girdap akımı daha büyük bir manyetik alan ve ölçüm bobini tarafından alınan daha güçlü bir sinyal üretilir. Metal kalıpların seviyesi yüksek olduğunda girdap akımlarının miktarı azalarak daha düşük bir manyetik alan ve daha zayıf bir sinyal alınır. Şekil 2.8.'de Shinagawa firmasına ait eddy akım seviyesi ölçer seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 8. Eddy akım seviyesi ölçer seviye transduseri (shinagawa)

Kalıp seviyesi kontrol sistemi için uygulanan yöntem, erimiş metal seviyesinin dalgalanmasına en aza indirerek yüksek hassasiyet ve hızlı tepki süresi ile çalışır. Metal kalıplarının yüksekliğinin ölçülmesi yanı sıra metal kalıplardaki yarık, çatlak gibi bozulmaların tespiti içinde kullanılan bir yöntemdir. Her tür kalıp şekli için kolay ve güvenli kullanım sağlar [28].

2.1.1.8. Ultrasonik Seviye Transduseri

Piezoelektrik kristallere bir voltaj uygulandığında piezoelektrik kristal genişler veya daralır böylelikle kristal titreşir ve bu titreşimler ultrasonik ses dalgaları (20 – 200 kHz) üretmek için bir diyaframa aktarılır. Ultrasonik dalganın yayılmaya başlamasıyla, yüzeyden yansiyarak geri dönmesi arasında geçen süre seviye ile orantılı bir elektrik sinyaline dönüştürülür. Şekil 2.9.'de Siemens firmasına ait ultrasonik seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 9. Ultrasonik seviye transduseri (siemens)

Türbülans, nem, sıcaklık, köpük, buhar, kimyasal sisler ve süreç değişkeninin konsantrasyonunda yapılan değişiklikler ultrasonik transduserin yanıtını da etkiler. Yüksek basınç altında kullanılabilirler [23, 24, 26, 27].

2.1.1.9. Mikrodalga Seviye Transduseri

Ultrasonik sistemin benzeri olup, ses ötesi dalga yerine GHz düzeyinde yüksek frekanslı elektromanyetik dalga (mikrodalga) kullanılır. Mikrodalga (micro wave) sinyalinin ürün yüzeyine çarpıp geri gelmesi için geçen süreden süreç değişkeninin seviyesi hesaplanır. Radar sinyalleri ürün yüzeyine çarptıkça, gönderilen sinyallerin yalnızca bir kısmı geriye yansır. Özellikle dielektrik katsayısı düşük ürünler söz konusu olduğunda, kalan sinyaller ürüne nüfuz eder. Sinyal, dielektrik katsayısı daha yüksek olan alttaki ürüne ulaştığında bir kez daha geri yansıma yapar. Sinyalin üstteki ürünün içinden geçerken harcadığı süre kullanılarak ara yüzey mesafesi de hesaplanabilir. Çok düşük dielektrik sabitli sıvılar, mikrodalga sinyallerini çok az yansıtır. Şekil 2.10.'da Siemens firmasına ait mikrodalga seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 10. Mikrodalga seviye transduseri (siemens)

Radar seviye ölçümü, yüksek basınç ve yüksek sıcaklık altındaki süreç koşullarındaki sıvılar için seviye ölçümü yapar. Ancak köpük ile türbülans ölçümde hatalara neden olur. Katılarda görülen farklı açıdaki yüzeyler veya çukurlaşmalar ölçümü etkilemez [24-27].

2.1.1.10. Lazer Seviye Transduseri

Sistem bir ışık verici ve bir ışık alıcıdan oluşur. Işığın ürün yüzeyine çarpıp geri gelmesi için geçen süreden süreç değişkeninin seviyesi hesaplanır. Gidiş dönüş süresi, seviyeyi belirlemek için hassas zamanlama devresi ile ölçülür. Şekil 2.11.'de ABB firmasına ait lazer seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 11. Lazer seviye transduseri (abb)

Lazer ışık konsantre bir yapıda olduğundan katı, sıvı yüzeylerde güvenli ölçüm yapar. Ancak tozlu, sisli ve parlak süreç değişkenleri ölçüm doğruluğunu bozar. Ölçüm doğruluğunu korumak için optikler sıklıkla temizlenmelidir [21-23].

2.1.1.11. Radyometrik Seviye Transduseri

Tankın yan yüzeyine yerleştirilen sezyum veya kobalt izotopundan oluşan gama kaynağı, tank duvarı ve ürüne nüfuz ettiği sırada zayıflayan bir radyasyon yayar. Tankın diğer yüzeyindeki dedektör, algılanan radyasyonu elektrik sinyaline çevirir. Bu yöntemde gama ışınının ne kadarının radyasyon kaynağından dedektöre ulaştığı ölçülür. Dedektöre ulaşan gama ışın miktarı ne kadar fazla ise tank içindeki süreç değişkeninin miktarı o kadar düşüktür. Ölçülen gama ışın miktarındaki azalma süreç değişkeni seviyesinin yükseldiğini gösterir. Şekil 2.12.'de Vega firmasına ait radyometrik seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.

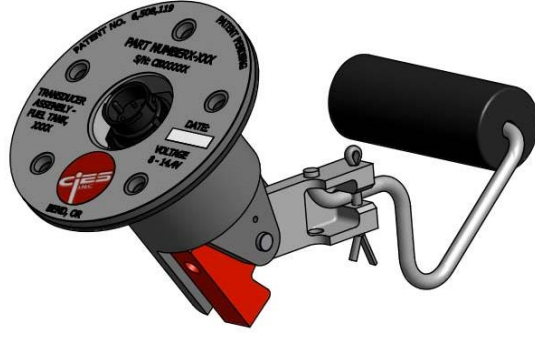


Şekil 2. 12. Radyometrik seviye transduseri (vega)

Tanka temas etmeden harici montajı mümkündür. Bu avantaj devam eden ürün üretimi sırasında montajının yapılması kolaylığını sağlar. Kullanımı için özel güvenlik önlemleri ve resmi kurumlardan lisans alınması gereklidir. Süreç değişkeninde meydana gelen yoğunluk değişiklikleri, tank yüzeyini kaplayan malzemeler ölçüm hatalarına neden olur. Süreç değişkeni radyoaktif özellikli olmamalıdır [22, 25, 27].

2.1.1.12. Manyetik Direnç Mikroelektromekanik Seviye Transduseri

Magneto resistive etkisi, bir manyetik alan nedeniyle akım taşıyan ferromanyetik malzemenin direnç değişimidir. Akım ferromanyetik maddeden geçirildiğinde, ferromanyetik malzemenin iç manyetizasyon vektörünün akımı geçen akıma paraleldir. Harici bir manyetik alan, geçerli akış yönüne karşı uygulanırken, dâhili manyetizasyon vektörü manyetik alanın gücüne bağlı olarak pozisyonu bir açı ile değiştirir. Direnç, ferromanyetik malzemenin iç manyetizasyon vektörünün ve akım akışının yönünü oluşturduğu açıya bağlıdır. Mevcut akım akışı ve iç manyetizasyon vektörünün paralel olması durumunda direnç en büyüktür. Akım akışı ve dâhili manyetizasyon vektörünün açısı 90° ise, ferromanyetik materyaldeki direnç en küçüktür. Bu transduserler deniz, araç, havacılık, kimyasal işleme, ilaç, gıda işleme, atık arıtma ve diğer uygulamalarda sıvı seviye ölçümleri için kullanılır [29]. Şekil 2.13.'de Cies firmasına ait manyetik direnç mikroelektromekanik (magneto resistive MEMS) seviye transduserinin görünüşü yer almaktadır.



Şekil 2. 13. Manyetik direnç mikroeletromekanik seviye transduseri (cies)

2.1.1.13. Mikroeletromekanik Eğim Seviye Transduseri

İnclinometreler, bir cismin oryantasyon açısını yerçekimi kuvvetine göre ölçer. Bu, yerçekiminin elastik bir destek yapısında asılı küçük bir kütle üzerindeki etkisini izleyen bir ivmeölçer ile yapılır. Transduser eğildiğinde, bu kütle hafifçe hareket eder ve kütle ile destek yapısı arasında kapasitans değişikliğine neden olur. Eğim açısı ölçülen kapasitanslardan hesaplanır. Şekil 2.14.'de 2GIG firmasına ait mikroeletromekanik eğim (inclinometer MEMS) seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 14. Mikroeletromekanik eğim (inclinometer) seviye transduseri (2gıg)

İnclinometreler, mobil makinelerde eğim veya eğim açılarını sürekli izleyerek işletme güvenliğini önemli ölçüde artırabilir. Güneş paneli pozisyon geribildirimi, yapı ve jeofizik izleme, araç ve vinç eğim algılama, demiryolu ve tren kontrol sistemleri, tıbbi malzeme, endüstriyel vanalar, su-atık su, malzeme taşıma, yenilenebilir enerji alanlarında kullanılırlar [30].

2.1.1.14. Hidrostatik Basınç Seviye Transduseri

Hidrostatik basınç, sıvı yüksekliği ve sıvının özgül ağırlığının çarpımıyla doğru orantılı olarak zemine uygulanan basınçtır. Hidrostatik basınç transduseri, sıvının hacmine veya tankın şekline bakılmaksızın ölçülen basıncı tankta bulunan sıvının yüksekliği ile orantılı bir akım sinyaline çevirir. Şekil 2.15.'de Emerson firmasına ait hidrostatik basınç seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 15. Hidrostatik basınç seviye transduseri (emerson)

Toz, köpük, buhar, iletkenlik, dielektrik katsayısı veya viskozite gibi birçok fiziksel özellikten etkilenmezler. Sıcaklık sıvıların özel yerçekiminde değişikliklere neden olduğundan ve derinliğe bağlı olarak basınç değiştiğinden transduserler her uygulama için kalibre edilmelidir [24-27].

2.1.1.15. Diferansiyel Basınç Seviye Transduseri

Diferansiyel basınç seviye transduseri “yüksek basınç” ve “alçak basınç” diye iki girişe sahiptir. Seviyesi ölçülecek tankın alt kısmına yüksek basınç kısmı, üst kısmına ise düşük basınç kısmı monte edilir. Alçak ve yüksek basınç kollarına uygulanan iki basınç arasındaki fark alınarak süreç değişkeninin seviyesi belirlenir. Şekil 2.16.'da ABB firmasına ait diferansiyel basınç seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 16. Diferansiyel basınç seviye transduseri (abb)

Ölçülmekte olan süreç değişkeninde diferansiyel basınç yöntemini kullanmak için süreç değişkeni sabit bir yoğunluğa sahip olmalıdır. Süreç değişkeninin yoğunluğunun sabit kalması koşuluyla temiz sıvıların geniş seviye ölçüm aralıkları üzerinde iyi bir doğruluk sunar [24-27].

2.1.1.16. Kabarcık Seviye Transduseri

Atmosfere açık olan tankın tabanına ince bir tüp (boru) ile iletilen hava basıncı nedeniyle borunun alt ucunda hava kabarcıkları oluşur. Hava basıncı, sıvı hidrostatik basıncından küçük veya eşit ise kabarcıklar durur ve bu noktada hava basıncı, sıvının derinliği ve yoğunluğu ile orantılıdır. Tüpteki gaz basıncı sadece sıvı hidrostatik basıncı dengeleyene kadar artmaya devam edecektir. Basınç orantılı olarak artıp azalarak bir manometre veya kalibre edilmiş bir basınç göstergesi üzerinde okunur. Gaz kaynağı sürekli kullanıldığı için düzgün şekilde ayarlanması ve kalibre edilmesi için bakım gerektirir. Şekil 2.17.'de spw firmasına ait kabarcık (bubbler) seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 17. Kabarcık (bubbler) seviye transduseri (spw)

Su, mürekkep, lağım çamuru ve erimiş metal gibi çeşitli süreç değişkenleri için kullanılırlar. Süreç değişkeni içerisinde yüzen katılar var ise, kimyasal olarak korozif veya radyoaktif ise, süreç değişkenine doğrudan temas edilmemesi istenen durumlarda bu seviye transduserleri tercih edilir. Tüpün tortu veya çamur tarafından tıkanmasını önlemek için tüp tank tabanından belirli bir yükseklikte ve çapı nispeten büyük (yaklaşık 5 cm) olmalıdır. Daldırma tüpünün ucu kabarcıkların sürekli oluşması için çentiklidir. Suyun sıcaklığı, ölçüm hatasına neden olur [21, 22].

2.1.1.17. Elektromekanik Seviye Transduseri

Elektromekanik seviye transduserleri sensör işlevi gören bir ağırlığı kullanarak tozlu, ince taneli veya kaba taneli dökme katı içeren tanklarda veya silolarda seviye ölçümü yapar. Ucuna ağırlık bağlı, sayma özelliğine sahip makaraya sarılan bir şerit, tank içerisine sarkıtılır. Transduser ucundaki ağırlık aşağıya doğru sarkıtılırken makaranın tur sayısı transduser tarafından sayılır. Her bir tur, önceden tanımlı bir uzunluğa karşılık gelir. Bu uzunluk, tankın bilinen yüksekliğinden çıkartılarak seviye elde edilir. Tahıl, plastik granülleri ve toz gibi malzemelerin söz konusu olduğu uygulamalarda kullanılırlar [21, 22, 27]. Şekil 2.18.'de Endress-Hauser firmasına ait elektromekanik seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 18. Elektromekanik seviye transduseri (endress-hauser)

2.1.1.18. Displacer Seviye Transduseri

Sıvı içerisindeki displacer sıvının yüksekliğine bağlı olarak bir miktar kilo kaybına uğrar. Böylece ölçülen sıvının seviyesindeki değişimler displacer konumunda bir değişikliğe neden olur. Bu konum değişikliği displacer ucuna bağlı tork iğnesinde bir döner hareket oluşturacaktır. Bu hareket sonucunda oluşan manyetik alan sinyali pozisyon sensörü tarafından elektrik sinyali ($4 - 20 \text{ mA}$) dönüştürülür. Üretilen tork miktarı % seviye açısından ölçülür. İki bilinen nokta arasındaki sıvı seviyesini ölçmek için kullanılan bir seviye ölçüm yöntemidir. Bu nedenle ölçüm yapılmadan önce ölçülecek seviye aralığına göre displacer yerleştirilmelidir. Displacer seviyesi ölçülecek sıvının kaldırma kuvvetinden daha ağır bir cisim olmalıdır [22, 24]. Şekil 2.19.'da Emerson firmasına ait displacer seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 19. Displacer seviye transduseri (emerson)

2.1.1.19. Yük Hücresi Seviye Transduseri

Yük hücresi (load cell) içerisinde bulunan uzama telinin (strain gage) zerine bir kuvvet uygulandığında uzama telinin direnci değişir ve buna bağlı olarak transduserine uygulanan elektriksel gerilim ile çıkış gerilimi arasında fark oluşur. Oluşan bu gerilim farkı tank içerisindeki ürün miktarı (hacim veya kütle) ve seviyesini ölçmede kullanılır. şekil 2.20.'de Siemens firmasına ait yük hücresi seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



şekil 2. 20. Yük hücresi seviye transduseri (siemens)

Seviye lm yapılacak tank bu yönteme uygun biçimde tasarlanmalıdır. Tank üzerinde yük oluşturan faktörler ölçüm doğruluğunu olumsuz etkileyebilir. Örneğin düzensiz şekilde tankın ısınması (sabah ve akşam güneşi), tank üzerine rzgrın etkisi seviye olarak yansıtılabilir [21, 22, 26].

2.1.1.20. Diyafram Seviye Transduseri

Süreç değişkeninin oluşturduğu basıncın doğrudan diyafram tarafından hissedilmesi ilkesine dayanır. Süreç değişkeni tarafından diyafram üzerinde oluşturulan basınç, diyafram içerisindeki havanın sıkıştırılmasına neden olur. Diyafram zerine oluşturulan sıvı basıncına karşı diyafram içerisindeki hava veya sıvı tarafından uygulanan basınç, seviyenin sıvı basıncını temsil eder. Diyafram hissettiği basıncı pnömatik sinyal olarak üretir ve bu sinyal seviye kontrolü yapmak için sinyal çevirici ile akıma dönüştürülür. Akışkan katı malzemelerin seviye ölçümünde kullanılmaları avantaj sağlar ancak basınçlı tanklarda bu yöntem uygulanamaz [21, 22]. şekil 2.21.'de tork firmasına ait diyafram seviye transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 21. Diyafram seviye transduseri (tork)

2.1.1.21. Elektrot Seviye Anahtarı

Mikroişlemci kontrollü frekans durumu değişikliği algılama yöntemi de denen bu yöntemde, farklı uzunluklarda birden fazla sensör problemleri üzerinde oluşturulan düşük genlik sinyali kullanılır. Her prob, dizideki diğer tüm problemlerden ayrı bir frekansa sahiptir ve süreç değişkeni ile temasında diğer problemlerden bağımsız olarak sinyal üretir. Her prob üzerindeki frekans durumu değişikliği, birden çok süreç değişkeni seviyesi kontrol fonksiyonu gerçekleştirebilecek bir mikroişlemci tarafından izlenir. Süreç değişkeni seviyesi arttıkça elektrot prob üzerinden akan akımı engelleyerek proba bağlı kontağı kapatacaktır. Bu kontak kapanışı röleler, pompalar, solenoid vanalar veya diğer donanımları çalıştırmak için kullanılabilir. Şekil 2.22.'de Vega firmasına ait elektrot (conductivity probes) seviye anahtarının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 22. Elektrot seviye anahtarı (vega)

Özellikle sodyum hidroksit, hidroklorik asit, nitrik asit, demir klorür gibi yüksek korozif sıvıların seviye ölçümü için uygundur. Korozif olan bu iletken sıvılar için, elektrotlar

titanyum veya paslanmaz çelikten imal edilmelidir ve üzerleri seramik, polietilen veya teflon bazlı malzemeler ile yalıtılmalıdır [21, 22, 25].

2.1.1.22. Titreşim Seviye Anahtarı

Titreşim anahtarı ile seviye ölçümü, süreç değişkeninin titreşim çatallarında meydana getirdiği titreşim frekansındaki değişikliğin belirlenmesine dayanır. Çatallar süreç değişkeni içerisine daldığında, titreşim frekansındaki değişim analiz edilerek anahtarlama sinyal çıkışına dönüştürülür. Çatalların titreşimine piezoelektrik kristali neden olur. Başka bir piezoelektrik kristal titreşim sıklığını ölçer. Her titreşim anahtarının kendine özgü karakteristik frekansı mevcuttur. Kullanılan çatal türü ve rezonans frekansı (120, 200, 400, 85 Hz) ölçülecek malzemeye bağlıdır. Şekil 2.23.'de Siemens firmasına ait titreşim seviye anahtarının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 23. Titreşim seviye anahtarı (siemens)

Sıvı, katı, bulamaç, macun, kum, toz, tahıl, un, çimento, çamur gibi süreç değişkenlerinin seviye ölçümünde kullanılabilirler. Çatallar çamur, macun gibi yapışkan süreç değişkenlerinin seviye tespitinden sonra temizlenmelidir. Süreç değişkeninin yoğunluk, iletkenlik, basınç, sıcaklık, dielektrik katsayısı, viskozite gibi fiziksel değişimlerinden etkilenmeden çalışırlar. Süreç değişkeni yüzeyindeki yüzen parçacıklar da dâhil maksimum 10 mm büyüklüğündeki katıların nokta seviye tespitinde kullanılırlar [23, 25, 26, 27].

2.1.1.23. Termal Diferansiyel Seviye Anahtarı

Termal diferansiyel seviye anahtarları (thermal switch) iki direnç sıcaklık dedektöründen (RTD) oluşur. Bir RTD çevresindeki sıvının sıcaklığını ölçer, diğeri de ısıtılır ve böylelikle bu iki RTD arasında bir sıcaklık farkı oluşturulur. Tüm süreç değişkenlerinin karakteristik bir ısı transfer katsayısı olduğundan, termal diferansiyel anahtarlar herhangi bir süreç değişkeninin varlığını veya yokluğunu algılamak için kalibre edilebilir. Şekil 2.24.'de ABB firmasına ait termal diferansiyel seviye anahtarının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 24. Termal diferansiyel seviye anahtarı (abb)

Sıvı ve gazlar da seviye, arayüz (sıvı-sıvı, köpük-sıvı, katı-sıvı, hava-köpük), sıcaklık ve akış algılama için kullanılacak uygulamaya göre kalibre edilerek kullanılırlar. Bu anahtarlar seviye ölçümünde alarm sesi veya süreç tankının doldurulup boşaltılmasını kontrol etmek için kullanılırlar [21-23].

2.1.1.24. Ultrasonik Seviye Anahtarı

Ultrasonik anahtar, belirtilen bir noktada bir sıvının varlığını veya yokluğunu algılamak için duyulabilir yüksek frekanslı ses kullanır. Ultrasonik seviye anahtarı, süreç sıvısı olmadığında rezonans frekansında titrer, süreç sıvısı bulunduğunda titreşim söner. Bu seviye anahtarları sıvılarda kullanılır, çünkü katıların sönümleme etkisi yetersizdir. Süreç değişkeni içerisinde % 5'ten daha az yüzen katı madde bulunmalıdır. -40 ile 121 C° arasındaki süreç sıcaklığında ölçüm yapabilirler. Ultrasonik seviye anahtarı, bir elektronik kontrol ünitesi ve bir sensörden oluşur [23, 31]. Şekil 2.25.'de Kenco firmasına ait ultrasonik seviye anahtarının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 25. Ultrasonik seviye anahtarı (kenco)

2.1.1.25. Mikrodalga Bariyer Seviye Anahtarı

Gönderen ve alıcı arasındaki mikrodalga enerjisi herhangi bir süreç değişkeni tarafından engellenirse alıcı sinyali algılayamaz. Bu değişiklik alıcı tarafından bir anahtarlama sinyaline dönüştürülerek kontrol amacıyla kullanılır. Gönderen ve alıcı tankın dış yüzeyine monte edilmelidir ancak metalik olmayan tankların dış yüzeyine monte edilmeden de ölçüm almak mümkündür. Tanklara, kanallara, şaflara veya kuyulara monte edilebilir. Süreç koşullarından etkilenmeden sıvı ve katıların seviye tespiti için kullanılırlar. Talaş, kâğıt, karton kırıkları, kireç, çakıl ve kum gibi her türlü dökme katıda ölçüm yapabilirler [27]. Şekil 2.26.'da Endress-Hauser firmasına ait mikrodalga bariyer seviye anahtarının gönderen ve alıcısının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 26. Mikrodalga bariyer seviye anahtarı (endress-hauser)

2.1.1.26. Kapasitif Seviye Anahtarı

Manyetik alan iletken sıvı veya katı ile etkileşime girince kapasitif bir değişiklik anahtar tarafından algılanır. Kapasitif seviye anahtarları (inductive switch) iletken sıvılar ve katıların nokta seviye tespitinde kullanılırlar. Ayrıca iletken ve iletken olmayan sıvıların

arayüz ölçümü için de kullanılırlar [32]. Şekil 2.27.'de Baumer firmasına ait farklı boyut ve yapıda kapasitif seviye anahtarlarının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 27. Kapasitif seviye anahtarları (baumer)

2.1.1.27. Frekans Süpürme Seviye Anahtarı

Anahtarın ucuna entegre edilmiş bir elektrot, çevre ile birlikte bir kondansatör oluşturarak dielektrik sabitine bağlı bir kapasite oluşturur. Bu, seviye anahtarı içerisinde bir bobin ile birlikte, bir rezonans devresi bulunur. Ölçülen rezonans frekansına ve programlanabilir tetik eşiklerine bağlı olarak, anahtarlama sinyali tetiklenir. Endüstriyel ve hijyen gerektiren uygulamalar için kullanılırlar. Şekil 2.28.'de Baumer firmasına ait frekans süpürme seviye anahtarının (cleverlevel) görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 28. Frekans süpürme seviye anahtarı (baumer)

Sıvı, köpük, hamur, yapışkan malzemeler, katılar, türbülanslı ortamlar, katı parçacıkları içeren ortamlarda sorunsuz nokta seviye ölçümü yaparlar ancak süreç değişkeninin sıcaklığına duyarlıdırlar. Temizliği, kurulumu ve bakımı kolaydır. Ölçüm yapılacak kabın tabanından belirli bir yüksekliğe montajı yapılmalıdır [32].

2.1.1.28. Optik Prizma Seviye Anahtarı

Optik prizma seviye anahtarı, kızılötesi LED ve ışık alıcısından (fotocell) oluşur. Prizma üzerinde süreç değişkeni olmadığında LED 'den gelen ışık prizma ve alıcı (fotocell) içinde yansıtılır. Süreç değişkeni prizma üzerinde olduğunda ise prizmadan yansıyan ışık süreç değişkeni içerisinde kırılarak azalır böylece alıcıya (fotocell) ışık ulaşmaz. Bu değişikliği algılayan alıcı, harici alarm veya kontrol devresi için elektronik anahtarlama özelliğini etkinleştirir. Prizma üzerinde kalan süreç değişkeni damlaları hatalı okumalara neden olur. Çamur gibi kirli, yapışkan süreç değişkenlerinin seviyesin ölçümünden sonra prizma temizlenmelidir [21, 22]. Şekil 2.29.'da Wika firmasına ait optik prizma seviye anahtarının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 29. Optik prizma seviye anahtarı (wika)

2.1.1.29. Pedal Seviye Anahtarı

Elektrik motoru ile yavaşça döndürülen bir pedal istenilen set seviyesine yerleştirilir. Set seviyesine süreç değişkeni ulaştığında pedalın dönmesini engeller ve motoru durdurur. Seviye düştükçe, yay kuvvetinin etkisiyle sürücü eski pozisyonuna gelir ve motor yeniden çalışır. Motorun çalışması ya da durması bir anahtar ile ölçülecek süreç değişkeninin nokta seviye tespitinde kullanılır. Bu yöntem de ölçülecek süreç değişkeni nem nedeniyle yapışkan hale gelirse motorun çalışmasında sorun ortaya çıkabilir. Seviyesi ölçülecek malzemenin yapısına göre özel pedal tasarımları ve düşük tork motorları kullanılmaktadır [26, 27]. Şekil 2.30.'da Siemens firmasına ait çeşitli yapıda pedal seviye anahtarlarının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 30. Pedal seviye anahtarları (siemens)

2.1.1.30. Eğim Seviye Anahtarı

Eğim anahtarlarının (tilt switches) istenilen yükseklikte dikey olarak tank veya bir konveyör bandının üst kısmına paslanmaz çelik zincir ile monte edilir. Katı parçacıkları eğim anahtarına ulaştığında anahtara dokunur ve eğim başlar ya da seviye azaldığında dikey konumuna döner. Anahtarın konumu değiştiğinde oluşan titreşim düzensiz sinyaller yaratacaktır. Düzensiz sinyaller önemli titreşim koşullarında hatalı sonuçlar oluşturur. Eğim anahtarları optimum eğme işlemini sağlamak için tank duvarlarından belirli bir uzaklıkta olmalıdır. Şekil 2.31.'de endüstride kullanılan eğim seviye anahtarının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 31. Eğim seviye anahtarı

Kontrolörler tarafından çeşitli açık ve kapalı depolama uygulamalarının seviye kontrolü için kullanılabilir. Eğim anahtarları tahıl, hayvan maması, taşlar, mineraller, talaş, vb. katıların seviyesinin ölçümünde kullanılan basit, güvenilir ve ekonomik katı seviye ölçüm

teknolojisi. Tahıl siloları, liman siloları, havaalanı siloları, depolama kutuları gibi çeşitli depolama alanlarının doldurulmasını durdurmak için eğim anahtarları kullanılır [21, 22].

2.1.2. Süreç Kontrol Sistemlerinde Akış Ölçüm Yöntemleri

Birim zamanda birim kesitten geçen akışkan miktarına debi denir. Tüm gazların ve sıvıların debileri hacimsel ve kütsel debi miktarı olarak ölçülebilir. Debinin birimi hacimsel olarak ölçüldüğünde litre/saniye, kütsel olarak ölçüldüğünde kilogram/saniye olmaktadır. Debi ölçüm yöntemi akan ortama ve akışkanın yapısına bağlıdır.

Akış miktarını ölçerken bazı durumlar ölçüm hatalarına neden olabilir. Bunlar:

- Katı parçacıklar akış hattını daraltabilir, hatta ve transdusere zarar verebilir.
- Tıkanık veya sızdıran akış hatları ölçüm hatasına neden olur.
- Transduserden kaynaklanan ölçüm hatası.
- Akış hızı arttıkça akış ölçümünde hata artacaktır [21, 22].

2.1.2.1. Rotametre Akış Göstergesi

Rotametreler akış hattına dikey olarak yerleştirilmiş bir konik cam tüp ile içerisinde serbest hareket edebilen bir şamandıradan meydana gelir. Şamandıra tüpün içerisinde akışkanın hızı ile orantılı olarak aşağı ve yukarı hareket eder. Rotametre de akış olmadığı zaman tüpün çapı en üst noktası en alt noktasına göre daha büyük olduğundan şamandıra dibinde kalır, akıştan dolayı basınç farkı oluştuğunda ise dengelendiği noktada sabit kalır. Akış hızı doğrudan üzerindeki ölçekten okunur. Şekil 2.32.'de endüstride kullanılan şeffaf rotametre akış göstergesinin görüntüsü yer almaktadır [21, 22].



Şekil 2. 32. Şeffaf rotametre akış göstergesi

Metal rotametreler, içerisinde bulunan mıknatıslı şamandıranın yükselip alçalmasıyla oluşturduğu manyetik alanı göstergede döner harekete dönüştürür. Hiçbir güç kaynağı gerektirmez. Sadece dikey konumda çalışırlar. Şekil 2.33.'de Yokogawa firmasına ait manyetik rotametre akış göstergesinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 33. Manyetik rotametre akış göstergesi (yokogawa)

Bu ölçüm yöntemi sıvı ve gazların hacimsel akışlarını ölçmek için kullanılır. Şamandıranın yoğunluğu ölçülecek malzemeninkinden büyük olmalı bu yüzden şamandıra ölçülecek malzemenin yoğunluğuna göre seçilmelidir. Genellikle küçük akış ve sıcaklıklarda kullanılırlar. Basınç kaybı sabit ve küçüktür [23, 26].

2.1.2.2. Türbin Akış Transduseri

Akış hızı türbin kanatlarını ve rotoru akış ile orantılı bir hızda döndürür. Rotorun manyetik algılayıcı önünden her geçişi belirli bir akış miktarını belirten bir adet alternatif akım darbesi meydana getirir. Sıvı ve gazların akış ölçümünde kullanılırlar. Ölçüm yoğunluk ve viskozite dalgalanmalarına karşı duyarlıdır. Türbin akış transduserleri çoklu pervaneye sahip rotor, rotor destekleri, rotor rulmanları ve sinyal alıcı bobinden oluşmaktadır. Ayrıca yabancı maddelerin neden olabileceği kirlenme ve hasara karşı süzgeç (filtre) kullanılır. Özetle, zaman ve kullanım ile bozulacak hareketli parçaları vardır. Şekil 2.34.'de Omega firmasına ait türbin akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 34. Türbin akış transduseri (omega)

Petrol, gaz, su, kimya, güç, gıda, içecek, havacılık, ilaç, madencilik, kâğıt endüstrilerinde kullanılırlar. Türbin tipi akış transduserleri, yoğunluğa ve viskozite dalgalanmalarına karşı duyarlıdır. Tanecik içeren akışkanlar debi ölçümünde, özellikle yüksek akış hızlarında türbin kanatlarında aşınma oluşturur [21, 22, 24].

2.1.2.3. Vortex Akış Transduseri

Tüm vortex transduserlerin içerisinde borunun ortasına yerleştirilmiş bir dik bariyer bulunur. Akış bariyere (silindirik, üçgen veya dikdörtgen) çarparak akış hızıyla orantılı bir basınç farkı yaratır. Oluşan basınç farkı bariyer çevresinde girdaplar oluşturur. Bu vorteks saçılması ortalama akış hızıyla ve dolayısıyla hacimsel akışla doğru orantılıdır. Sadece girdapların frekansı ölçülerek akış hızını ölçmek mümkündür. Girdapların frekansı çok yüksek olduğundan burada girdap frekanslarının ölçümü için iki adet darbe sinyali üreten piezoelektrik sensör kullanılır. Sensörler hava geçirmez şekilde kapatılmış ve işlemle temas halinde değildir. Şekil 2.35.'de ABB firmasına ait vortex akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 35. Vortex akış transduseri (abb)

Vorteks akış transduserleri kimya ve petrokimya endüstrilerinde, enerji üretiminde ve ısıtma sistemlerinde sıkça kullanılan doymuş buhar, kızgın buhar, basınçlı hava, nitrojen, sıvılaştırılmış gazlar, baca gazları, karbon dioksit, su, solventler, ısı aktarımı yağları, kazan besleme suyu gibi çok farklı sıvı, gaz ve buharın hacimsel akışını ölçmede kullanılır. Viskozite, yoğunluk, basınç ve sıcaklıktan etkilenmezler [23, 24, 26, 27].

2.1.2.4. Elektromanyetik Akış Transduseri

Elektriksel olarak yalıtılmış bir borunun içerisinde manyetik alanı meydana getiren bobin ile karşı karşıya yerleştirilmiş iki elektrottan oluşurlar. Bobin enerjilendiğinde (AC) sıvı etrafında akım etkisi ile bir manyetik alan oluşur. Daha sonra karşılıklı yerleştirilmiş iki elektrot tarafından manyetik alandan geçen elektrik yüklü parçacıkların ortalama hızıyla doğru orantılı bir gerilim oluşturulur. İki ölçüm elektrotu tarafından yakalanan bu voltaj, akış hızı ve dolayısıyla akış hacmiyle doğru orantılıdır. Şekil 2.36.'da Siemens firmasına ait elektromanyetik (lorentz force velocimetry) akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 36. Elektromanyetik akış transduseri (siemens)

Elektrotlar sıvı ile temas halinde olduğundan sıvı aşındırıcı olmamalıdır. Süreç sıvısı elektriksel olarak borudan uygun bir astar ile yalıtılır. Yalnızca iletken sıvıların akış ölçümünde kullanılırlar. Viskozite, yoğunluk, basınç, sıcaklık, iletkenlik değişikliği ve türbülans etkilenmezler [23, 24, 26, 27].

2.1.2.5. Coriolis Akış Transduseri

Her Coriolis akış ölçerin içerisinde bir veya daha fazla sayıda ölçüm tüpü bulunur. Bir titreştirici ile bu tüpler sürekli olarak titreştirilir. İki sensör, tüp titreşimindeki bu değişimin zamanını ve mesafesini “faz farkı” olarak algılar. Bu fark, doğrudan kütleli akış miktarını belirtir. Ayrıca ölçüm tüplerinin titreşim frekansı kullanılarak sıvı yoğunluğu da belirlenebilir. Coriolis akış sayaçları genellikle 2,5 mm den daha küçük bir genlikle (80 Hz) titreşmektedir. Şekil 2.37.’de Siemens firmasına ait coriolis akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 37. Coriolis akış transduseri (siemens)

Endüstride genellikle doğal gaz akışının ölçülmesi için kullanılırlar. Kalibre edildiği takdirde neredeyse her uygulama için de kullanılabilirler. Aynı anda kütle akışını, yoğunluğu ve sıcaklığı ölçmek mümkündür. Sıcaklık, ağırlık, basınç, iletkenlik ve yoğunluktan etkilenmezler [23, 24, 26, 27].

2.1.2.6. Ultrasonik Akış Transduseri

Ölçüm kesiti boyunca çapraz olarak gönderilen ultrasonik darbeler alıcı tarafından algılanarak çapraz iki yön arasındaki zaman farkından akış hızı hesaplanır. İki sensör tarafından ölçülen akış süresi farkı akış hızı ile doğru orantılıdır. Transduser alıcı ve göndericisi akış hattının karşıt veya aynı yüzeyine monte edilerek iki farklı şekilde ölçüm almak mümkündür. Montajı yapılırken gönderici ve alıcı sensörler doğru açılara yerleştirilmelidir. Şekil 2.38.'de Siemens firmasına ait ultrasonik akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 38. Ultrasonik akış transduseri (siemens)

Çok çeşitli gazların ve sıvıların hacimsel akış ölçümünde kullanılırlar. Metal, plastik ve seramik borulara monte edilebilir. Ölçüm yapılacak kesitte daha sonradan montaj mümkündür. Gaz kabarcıkları hatalara neden olur. Sıcaklık, yoğunluk ve konsantrasyon nedeniyle ses hızı etkilenir [24, 26, 27].

2.1.2.7. Sonar Akış Transduseri

Sonar akış ölçümünde kullanılan temel prensip sualtı akustiğinde kullanılan teknik ve algoritmalarla aynıdır. Bir boru hattı kesiti üzerine sıralı ve karşılıklı şekilde yerleştirilen

sensörler tarafından akışta meydana gelen türbülansın oluşturduğu basınç alanlarının birim zamandaki değişimi ölçülerek akış miktarı bulunur. Şekil 2.39.'da Sonartrac firmasına ait sonar akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 39. Sonar akış transduseri (sonartrac)

Endüstride petrol-gaz sanayisi, madencilik, metal işleme, enerji üretimi, kimya sanayisi, su-atık su arıtma, kâğıt sanayisi sektörlerinde kullanılırlar. Büyük çaplı borular için uygundur. Akışa engel olmadığından basınç kaybına sebep olmaz. Hareketli parçaları olmadığından uzun çalışma ömrüne sahiptir. Hızlı tepki verir. Akışkanın yapısındaki değişikliklerden etkilenmez [33].

2.1.2.8. Pistonlu Akış Transduseri

Bu akış ölçüm yönteminde piston odası içinde rotasyon yapan bir piston her rotasyon için, belirli bir akış miktarıyla orantılı bir miktar suyu piston odasından geçirir. Pistondan dik bir şekilde uzanan pin salınım hareketlerini izleyen bir mıknatısa bağlıdır. Birim zamandaki ölçülen salınım hareketi ile akış ölçülür. Düşük basınç kaybına neden olurlar. Endüstride (kimyasal, ilaç, petrokimya, gıda, içecek) çeşitli sıvıları işlemek için kullanılırlar. Birçok boyut ve kapasitede çok çeşitli malzemelerden yapılabilirler. Viskozite değişimleri ölçüm hassasiyetlerini etkiler [21, 22]. Şekil 2.40.'da endüstride kullanılan pistonlu akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 40. Pistonlu akış transduseri

2.1.2.9. Çok Delikli Basınç Probu Akış Transduseri

Ölçüm ucu üzerinde bulunan üç veya daha fazla delikteki diferansiyel basınçlar ölçülerek toplam basınç, statik basınç, akış açısı ve akış hızı tespit edilir. Ölçülen bu parametreler gerçek zamanlı olarak veri bilgisayarı tarafından değerlendirilir. Uygulamaya bağlı olarak en iyi sonucu elde etmek için prob ölçüm ortamı ve uygulamaya göre farklı basınç prob başlıkları (3, 5, 7 delikli veya özelleştirilmiş) kullanılır. Aynı zamanda diğer sensör türleri prob içine entegre edilerek farklı türdeki ölçümler bir arada yapılabilir. Şekil 2.41.'de Vectoflow firmasına ait çok delikli basınç probu akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 41. Çok delikli basınç probu akış transduseri (vectoflow)

Bu ölçüm yöntemi günümüzde uzay-havacılık araştırmaları, uçak motorları, petrol-gaz-enerji üretimi, otomotiv-kimya endüstrisi, gemi imalatı ve üç boyutlu yazıcılarda kullanılmaktadır [34].

2.1.2.10. Lazer- 2 Odak Akış Transduseri

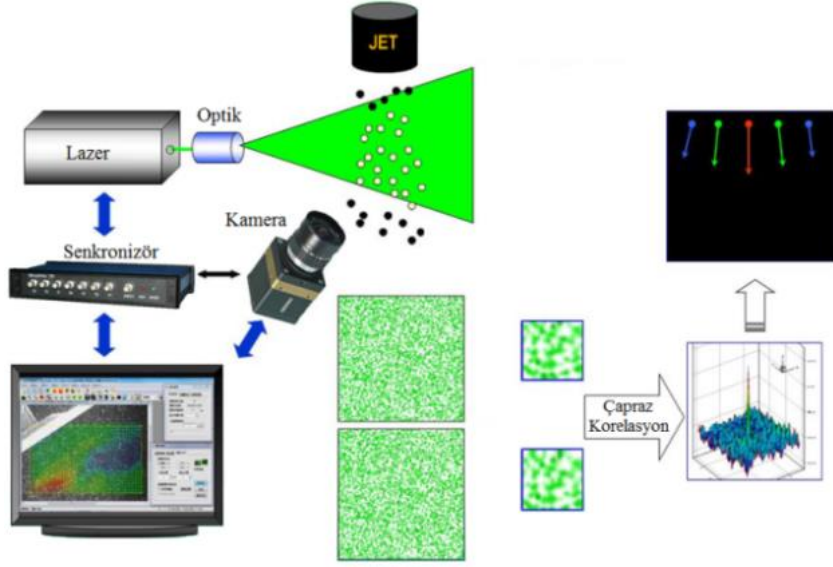
Lazer- 2 odak (L2F) ölçüm yönteminde bir kanaldan geçen süreç değişkeni (sıvı ve gaz) içerisindeki küçük parçacıklar lazer ışını tarafından aydınlatılarak oluşturulan dağınık ışık bir fotodedektör tarafından darbe sinyallerine dönüştürülür. İki ardışık darbe arasındaki zaman gecikmesi parçacık hızıyla ters orantılıdır. Bu parçacıklar akışkan içerisindeki sıvı damlacıkları, hava kabarcıkları ve katı tanecikleri olabilir. Çalışma prensibi yüksek sıcaklık, düşük debi, yüksek basınç, yüksek nem, titreşim ve akustik gürültü içeren zorlu ölçüm koşullarında son derece hassas ölçüm verilerini sunmasını sağlar [21, 22].



Şekil 2. 42. Lazer- 2 odak akış transduseri (ofs)

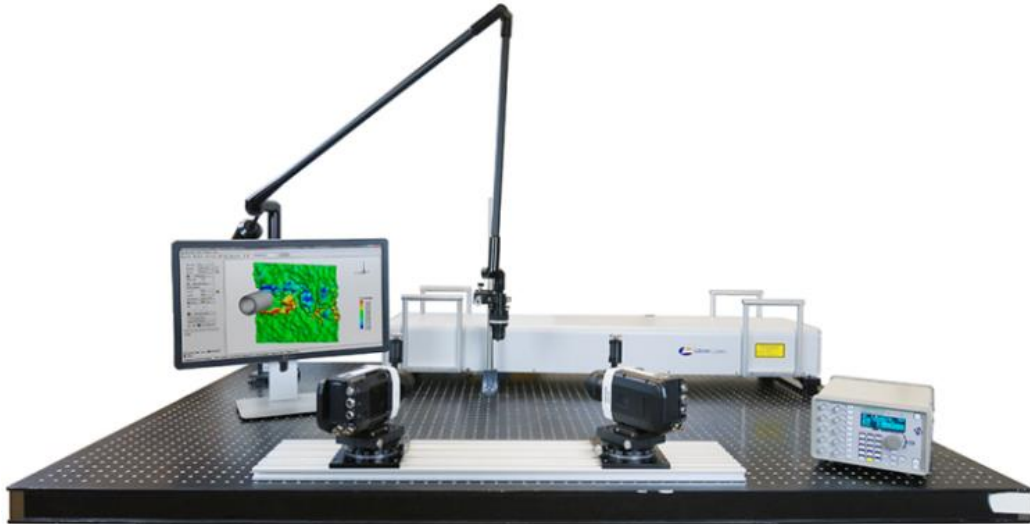
2.1.2.11. Partikül Görüntü Velosimetrisi

Partikül görüntü velosimetrisi (PIV), eğitim ve araştırmalarda sıvı, gaz ve katıların akış, sıcaklık, seviye, basınç ölçümlerinde kullanılan optik bir görselleştirme yöntemidir. PIV akış ölçüm sistemi dijital kameralar (CCD veya CMOS), akış kesitini aydınlatan bir lazer, izleyici partiküllerini akışa karıştıran bir jet ve optik görüntüleri işleyen bilgisayar yazılımından oluşur. PIV akış ölçüm sisteminde ölçüm yapılacak akışa eklenen izleyici partiküller lazer tarafından aydınlatılarak lazer ışığını dağınıkları sağlanır ve daha sonra kameralar tarafından akışın görüntüleri alınır. Hareket halindeki izleyici partiküllerinden alınan görüntüler hız alanı, akış hızı ve akış yönünü hesaplamak için bilgisayar yazılımı tarafından işlenir. Şekil 2.43.'de partikül görüntü velosimetrisi çalışma prensibi görülmektedir.



Şekil 2. 43. Partikül görüntü velosimetrisi çalışma prensibi

Farklı akış uygulamaları için uygun izleyici partikülleri gereklidir. Seçilen izleyici partikül çeşidine göre de uygun bir tohumlama jeti kullanılır. Eklenen izleyici partikülleri genellikle akışta ihmal edilir ancak bazı durumlarda partiküller yüksek yoğunluk nedeniyle akış hareketini iyi bir şekilde takip etmez. Yoğunluk akışkanın sıcaklığını arttırıp azaltarak ayarlanabilir. Şekil 2.44.'de deneysel amaçlı kurulan partikül görüntü velosimetrisi düzeneğinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 44. Partikül görüntü velosimetrisi düzeneği

Endüstriyel uygulamalarda PIV ölçüm sistemleri yüksek maliyet ve güvenlik nedeniyle tercih edilmemesine rağmen rüzgâr-su tüneli ölçümleri, türbülans çalışmaları, protez kalp

valflerindeki girdap oluşumunun ölçülmesine kadar çok çeşitli akış ölçümlerinde uygulanır [35].

2.1.2.12. Lazer Doppler Velosimetrisi

Lazer doppler velosimetrisi (LDV), akış alanının anlık hızını ölçmek için kullanılan bir tekniktir. LDV akış içerisine doğru bir lazer ışını gönderir ve akış içerisindeki parçacıklar tarafından yansıyan ışını fotodedektör ile toplar. Ancak parçacık hareket ederse lazer ışınının yansıtıldığı dalga boyu iletilen dalga boyundan farklı olacaktır. Doppler etkisine göre yansıyan ışının dalga boyu değişimi akış hızının bir ölçüsüdür. Doğruluk yayılan ve yansıyan ışınların açısına bağlıdır. Lazer kaynak hedef yüzey ve alıcı (fotodedektör) arasında yeterli şeffaflık gereklidir. Akış çok küçük parçacıklar içermelidir. Şekil 2.45.'de tıbbi uygulamalarda kullanılan lazer doppler velosimetrisinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 45. Lazer doppler velosimetrisi

Bu yöntem sıvı ve gazların akış ölçümünde kullanılır. Endüstride rüzgâr tüneli, tıbbi uygulamalar, rüzgâr hızı ölçümü, gemi imalatı, üretim hatları, uzay-havacılık sanayisinde kullanılmaktadırlar [21, 22].

2.1.2.13. Açık Kanal Sıvı Yüzey Hızı Akış Transduserleri

Sıvı yüzey hızı ve sıvı seviyesi ölçülerek akış hızı tespit edilir. Yüzey hızını ölçmek için radar, lazer seviye ölçümünde ise ultrasonik, radar veya basınç transduserleri kullanılır. Yüksek frekanslı radar veya lazer sinyalleri sıvı yüzeyinden yansyarak akış hızı ile orantılı bir frekans farkı oluşturur. Sıvının ortalama hızı dijital sinyal işlemcisi tarafından yüzey hızı

frekans dağılımı analiz edilerek bulunur. Seviye ise iletilen ve geri yansıyan sinyaller arasındaki geçen süreden kanal şekli ve boyutları dikkate alınarak ölçülür. Akış daha sonra akış alanı ile ortalama yüzey hızının çarpılmasıyla bulunur. Şekil 2.46.'da açık kanallardan akan akışkanların debisini ölçmede kullanılan akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 46. Açık kanal sıvı yüzey hızı akış transduseri

Ölçülecek sıvı kanalının üzerine konumlandırılırlar. Her türlü akış ölçümü için idealdirler. Şiddetli yağmur ve türbülans etkilenmezler. Bu ölçüm yöntemi endüstriyel deşarj işlemleri, atık su arıtma tesisleri, nehir ve dere izleme, sulama kanalları, katı içeren açık kanal akışlarında kullanılır [21, 22].

2.1.2.14. Termal Kütle Akış Transduseri

Akış ölçümünde iki adet direnç sıcaklık dedektörü (RTD) kullanılır. Bir RTD sensör çevresindeki sıvının sıcaklığını ölçer diğeri ise ısıtılır. Akış başlar başlamaz ısıtılmış olan RTD akış nedeniyle soğur. Akış hızı ne kadar fazla olursa soğuma o kadar yüksek olur ve RTD'ler arasındaki sıcaklık farkı azalır. Bu nedenle sıcaklık farkını korumak için gereken elektrik akımı miktarı doğrudan kütle akışı temsil eder. Termal kütle akış ölçümü endüstride çoğunlukla kimyasal reaksiyonlardaki gazların kütle akışını ölçerek süreçlerin izlenmesi ve kontrolü için kullanılmaktadır. Şekil 2.47.'de Kenco firmasına ait termal kütle akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 47. Termal kütle akış transduseri (kenco)

Bu ölçüm yöntemi basınçlı hava, nitrojen, karbondioksit, azot, helyum, argon, oksijen, doğalgaz ölçümleri için nükleer enerji santralleri, kimya-petrokimya sanayisinde, laboratuvarlarda, medikal tıp sanayisinde, endüstriyel baca gazı ölçümlerinde kullanılmaktadır. Bu ölçüm yöntemi yoğunluk, basınç ve sıcaklıktan etkilenmediğinden hassas yanıt verir [23, 27].

2.1.2.15. Termal Kütle Mikroelektromekanik Akış Transduseri

Termal kütle mikroelektromekanik akış transduserleri, merkezi bir ısıtıcı kaynağından (mikro ısıtıcı) ve simetrik olarak mikro ısıtıcının önüne ve altına yerleştirilmiş iki sıcaklık sensöründen (termopiller) oluşur. Sensörler termal olarak izole edilmiştir, bu nedenle yalnızca akıştan dolayı ısı transferi gerçekleşebilir. Şekil 2.48.'de Digi-Key firmasına ait termal kütle mikroelektromekanik akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 48. Termal kütle mikroelektromekanik akış transduseri (digi-key)

Termal kütle mikroelektromekanik akış transduserleri küçük boyut, kısa tepki süresi, düşük güç tüketimi, düşük akış hızlarına karşı daha yüksek hassasiyet gibi avantajlara

sahiptir. Motor-jeneratör yakıt tüketimi ölçümü, klima-buzdolabı soğutucu akışının kontrolü ve genel amaçlı sıvı akışı gibi çok çeşitli endüstriyel ve ticari uygulamalar için kullanılmaktadırlar [36].

2.1.2.16. Kütle Hava Akımı Akış Transduseri

Kütle hava akımı akış transduseri (MAF), araç motoruna giren havanın kütle akışını ölçmek için kullanılan bir yöntemdir. Hava akışını ölçmek için kırılabilen ince bir platin telden oluşan sıcaklık sensörü kullanılır. Isıtılan sıcaklık sensöründen geçen hava sensör de akım değişimine neden olur. Akım değişiminden motora alınan havanın kütleli miktarı ölçülerek aracın elektronik kontrol ünitesine bildirilir. Aracın elektronik kontrol ünitesi ölçüm sinyallerine göre motorun yakıt ihtiyacını kontrol eder. Böylece yakıt tasarrufu sağlanır ve motor performansı artırılır. Şekil 2.49.'da Bosch firmasına ait kütle hava akımı akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 49. Kütle hava akımı akış transduseri (bosch)

Burada dikkat edilmesi gereken şey, motora alınan havanın hacmi değil kütlesi ölçülür böylece motora giren hava miktarı daha doğru tespit edilmiş olur. Çünkü hava sıcaklığına bağlı olarak, havanın hacmi sürekli değişmektedir ve içerisindeki oksijen miktarı, ısınan havanın hacmine bakıldığında, soğuk havaya göre daha az olacaktır. Bu hacimsel değişimden etkilenmemek için, giren havanın kütlesi ölçülür [21, 22]. Şekil 2.50.'de Siemens firmasına ait diferansiyel basınç akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.

2.1.2.17. Diferansiyel Basınç Akış Transduserleri

Diferansiyel basınç transduseri, basınç ölçümlerini akış ile orantılı 4 – 20 mA veya 1 – 5 V DC gibi çıkış sinyaline dönüştürerek bir kontrolör, kaydedici, gösterge veya benzer bir cihaza giriş olarak gönderir. Sıvı ve gazların akış ölçümünde kullanılırlar. Akışın serbest geçişini azaltarak bir basınç kaybına neden olurlar. Sıvı özelliklerindeki değişiklikler (yoğunluk) ölçümleri etkileyebilir. Farklı uygulamalar için çeşitli kullanım versiyonları bulunur [24, 26, 27]. Şekil 2.50.'de Siemens firmasına ait diferansiyel basınç akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 50. Diferansiyel basınç akış transduseri (siemens)

2.1.2.18. Orifis Plakalı Diferansiyel Basınç Akış Transduseri

Orifis, içinde belirli oranlarda delinmiş bir delik çapına sahip olan düz bir metal plakadan oluşur. Bir orifis plaka içinden ölçülecek sıvı akışının geçtiği kesite dik yerleştirilir. Akışın geçtiği kesiti daraltarak akış hızının artmasına ve basıncın azalmasına neden olur. Bu basınç düşüşü bir diferansiyel basınç transduseri kullanılarak ölçülür. Şekil 2.51.'de ABB firmasına ait orifis plakalı diferansiyel basınç akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 51. Orifis plakalı diferansiyel basınç akış taransduseri (abb)

Akışta önemli ölçüde basınç kaybına neden olurlar. Sıvının yoğunluk, basınç ve viskozitesinden etkilenirler. Doğru ölçüm almak için düz bir boruya montajı gereklidir. Çok yüksek akış ölçümlerinde kullanılmazlar. Orifis deliğinin keskin kenarları zamanla aşınır. Plaka değiştirilmediğinde yanlış ölçüm yapılmasına neden olur [21, 22, 24].

2.1.2.19. Pitot Tüplü Diferansiyel Basınç Akış Transduseri

Ölçme için iki girişi vardır ve iki basıncı aynı zamanda iki ayrı tüp aracılığıyla ölçer. Statik basınç ile boru içindeki sıvının akan basıncı arasındaki fark hız ile orantılıdır. Boru hattının akış hızına göre, akış hızı karesi ile orantılı bir ortalama diferansiyel basınç sinyali üretir. Tüpler genellikle birbiri içine takılır. İçteki tüpün bir ucu açıktır ve akışın kaynağını işaret edecek şekilde dik açıyla kıvrılmıştır. Bu giriş tam akış yönünde ve akışa karşıdır. Şekil 2.52.'de Emerson firmasına ait pitot tüplü diferansiyel basınç akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 52. Pitot tüplü diferansiyel basınç akış transduseri (emerson)

Bir pitot tüp gaz, buhar veya sıvı akışını ölçmek için kullanılır. Düşük hızdaki hava akışının ölçülmesinde avantaj sağlarlar. Pitot tüpler yalnızca temiz akışkanlar için kullanılırlar. Çünkü bu küçük açıklıklar kolaylıkla tıkanabilir ve böylece ölçümde hataya neden olurlar. Petrol üretimi, yağ arıtma, kimyasal, ilaç, enerji üretimi vb. endüstrilerde kullanılırlar. Torbar ve annubar olmak üzere kullanılan iki özelleştirilmiş tüp şekli vardır [21, 22, 24].

2.1.2.20. Laminar Diferansiyel Basınç Akış Transduseri

Bir sıvının kütle akışını ölçmek için kullanılan bir geniş alanda paketlenmiş çok sayıda küçük çaplı tüpün sıvı viskozitesi için engelleyici yüzey alanı sağlayarak oluşturduğu basınç farkı diferansiyel basınç transduseri ile ölçülür. Özellikle akışkan viskozitesini ve akış tüpünün çapını etkileyen sıcaklık değişikliklerine duyarlıdır. Laminar akış çok düşük akış hızı veya yüksek viskozitelerde oluşur [37]. Şekil 2.53.'de Meriam firmasına ait laminar diferansiyel basınç akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 53. Laminar diferansiyel basınç akış transduseri (meriam)

2.1.2.21. Venturi Tüplü Diferansiyel Basınç Akış Transduseri

Venturi tüpünün gövdesi dökme demir, bronz veya paslanmaz çelikten üretilmektedir. Venturi tüpü, uygulama ve boruların gereksinimlerine uygun herhangi bir pozisyonda (dikey, yatay veya eğimli) monte edilebilir. Boyutları büyüktür. Uzun montaj uzunluğu gerektirir. Çapı 7,5 cm'den az olan borularda kullanılamaz [21, 22, 24]. Şekil 2.54.'de endüstride kullanılan venturi tüplü diferansiyel basınç akış transduserinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 54. Venturi tüplü diferansiyel basınç akış transduseri

2.1.2.22. Dall Tüplü Diferansiyel Basınç Akış Transduseri

Dall tüpü, yerleştirildiği kanalın kesitini daraltarak oluşturduğu basınç farkından akış hızı ölçümü yapılır. Düşük basınç kaybına neden olduklarından yüksek akış oranlarını ölçmek için yaygın olarak kullanılırlar. Dall tüpü tarafından üretilen diferansiyel basınç

venturi tüpü ve akış nozuluna göre daha yüksektir [21, 22, 24].Şekil 2.55.'de diferansiyel basınç akış transduserlerinde kullanılan dall tüpünün görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 55. Dall tüpü

2.1.2.23. Akış Nozullu Diferansiyel Basınç Akış Transduseri

Akış nozulu, eliptik veya eliptiğe yakın şekle sahip giriş kısmı ve buna teğet silindirik bir boğaz kısmıyla biten bir kısıtlayıcıdır. Yüksek hızlı akışlarda ve özellikle gazlarda kullanılırlar. Orifis plakasındaki keskin kenarlar burada olmadığı için yıpranma ve basınç kaybı daha azdır. Şekli dolayısıyla katı maddelerin boğaz kısmında birikmesi söz konusu değildir [21, 22, 24]. Şekil 2.56.'da çeşitli boyutlarda akış nozullarının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 56. Akış nozulu

2.2. Son Kontrol Elemanları

Kontrolörden aldığı sinyali süreç değişkenini fiziksel olarak değiştirmek için sürece etkiyecek oransal bir işleme dönüştürür. Süreç kontrolünde, son kontrol elemanının set noktası dışında olan bir değişkeni düzeltmek için verdiği tepki hızı çok önemlidir. Son

kontrol elemanlarındaki teknolojik gelişmelerin birçoğu tepki sürelerini iyileştirilmesi ile ilgilidir. Pompalar, ısıtıcılar, kazanlar, kompresörler, vanalar, elektrik motorları son kontrol elemanlarıdır.

Aktüatör: Bir sistemi kontrol etmek için son kontrol elemanında fiziksel değişikliğe neden olan bir tür motordur. Bir aktüatör pnömatik, hidrolik veya elektrikle kontrol edilebilir. Diyaframlar, körükler, yaylar, dişliler, pistonlar veya elektrik motorları genellikle bir aktüatör sisteminin parçalarıdır.

Enkoder: Bir motor milinin hareketine göre shaftın açısal konumunu, dönme hareketini ardışık sayısal sinyallere çevirerek dönme miktarı ve dönme sayısı hakkında bilgi verir [19, 20].

2.2.1. Otomatik Kontrol Vanaları

Süreç kontrol endüstrisinde kullanılan akışkanları (gaz, buhar, su veya kimyasallar) set noktasında istenilen şekilde durduran, kısar veya akışkana yol vermeye yarayan son kontrol elemanlarıdır. Otomatik kontrol vanalarının açılması veya kapatılması genellikle elektrik ($4 - 20 \text{ mA} / 0 - 10 \text{ V}$), hidrolik veya pnömatik ($0.2 - 1.0 \text{ bar}$) aktüatörler tarafından yapılır. Şekil 2.57.'de Siemens firmasına ait çeşitli boyut ve yapıda otomatik kontrol vanalarının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 57. Otomatik kontrol vanaları (siemens)

Otomatik kontrol vanası seçerken kontrol edilecek süreç değişkeninin yapısı (sıvı, gaz), kontrol aralığı, çalışma sıcaklığı, çalışma ortamının yapısı (ıslak, kirli, patlayıcı) göz önünde bulundurulmalıdır [19, 20].

2.2.2. Solenoid Vanalar

Solenoid vanalar, çeşitli akışkan hatlarının aç-kapa kontrolünü yapmak için bobin, çekirdek kovan ve gövdeden oluşurlar. Akışkan hattının kontrolü 6, 12, 24, 48, 72, 110, 220 V AC veya DC verilmesiyle bobin üzerinde meydana gelen elektromanyetik kuvvetin bobin çekirdeğini hareket ettirmesiyle yapılmaktadır. Şekil 2.58.'de Siemens firmasına ait üç yollu solenoid vananın görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 58. Üç yollu solenoid vana (siemens)

Solenoid vanalar, birçok sistem için sıvı ve gaz akışını kontrol ederler. Doğru süreç kontrolü için solenoid vanalar süreç değişkeni ve kontrol sisteminin yapısına göre seçilmelidir. Vana gövdesi pirinç, paslanmaz çelik, alüminyum ve plastikten yapılmaktadır. Bu yüzden kontrol edilecek süreç değişkeninin yapısına uygun gövde seçilmelidir. Ayrıca kontrol edilen süreç değişkeninin sisteme giriş-çıkış durumuna göre normalde açık veya normalde kapalı solenoid vana türlerinden biri seçilmelidir. Kontrol edilecek sürece göre değişik ölçülerde solenoid vanalar iki veya daha çok yollu üretilirler [19, 20].

2.3. Sinyal Çeviriciler

Sinyal çeviriciler endüstriyel sistemlerde kullanılan farklı sinyalleri standart şekilde kullanılan analog sinyal (4 – 20 mA, 0 – 20 mA, 0 – 10 V vb.) aralıklarına dönüştürürler. Kullanılacak alana ve uygulanacak yöntemin türüne göre çeşitlilik gösteren pek çok sinyal çevirici mevcuttur. Bu ürünlerdeki giriş ve çıkış sinyalleri bilgisayar veya üzerlerindeki dip switch ile yapılandırılabilir [19, 20]. Şekil 2.59.'da Siemens firmasına ait çeşitli boyut ve yapılar da sinyal çeviricilerin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 59. Sinyal çeviriciler (siemens)

Sinyal çeviriciler üç temel nedenden kullanılırlar. Bunlar:

- Sinyalin başka bir sinyale dönüştürülmesi (0 – 5 V veya 4 – 20 mA gibi) için.
- Sinyalin kuvvetlendirilmesi ve lineerleştirilmesi için.
- Galvanik izolasyon gerçekleştirmek için. Besleme, giriş ve çıkışların arasındaki galvanik izolasyon ile sinyal gürültüden etkilenmez [19, 20].

2.4. Veri Toplama Kartları

Endüstriyel transduserlerin çıkış büyüklüğü genellikle analog voltaj sinyali olduğu için, bunlardan gelen verilerin bilgisayar gibi dijital çalışan bir sisteme aktarılmadan önce dijital (1/0) veriye çevrilmesi gerekmektedir. PC veri yoluna takılarak kullanılan veri toplama kartları (DAQ - Data Acquisition) analog sinyalleri dijital sinyale çevirerek toplayan, saklayan ve dağıtan yazılıma dayanan bir bilgi sistemidir. Veri toplama uygulamaları genellikle, temel, C, C++, C#, Fortran, Java, LabVIEW, lisp, Pascal gibi çeşitli genel amaçlı programlama dilleri kullanılarak geliştirilen yazılım programları tarafından kontrol edilir. Ayrıca, farklı kontrol birimleri ile veri elde etmek için gerekli tüm araçları sağlayan açık kaynak yazılım paketleri de vardır [19, 20]. Şekil 2.60.'da htaipl firmasına ait veri toplama kartının görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 2. 60. Veri toplama kartı (htaipl)

3. ENDÜSTRİYEL KONTROL SİSTEMLERİ

Süreç kontrol sistemlerinin değerlendirme ve kontrol aşamasında ölçüm incelenir ve yapılması gereken düzeltici hareket belirlenir. Değerlendirme, ölçüm ve set noktasının karşılaştırılması ve denetlenen süreç değişkenini set noktasına getirmek için gerekli işleme karar verilmesinden oluşmaktadır.

Kontrolör (Denetleyici): Süreç değişkenini set değeri ile karşılaştıran ve süreç değişkenini set değerinde tutmak için son kontrol elemanını kontrol eden süreç kontrolünün merkezidir. Kontrolör, son kontrol elemanına iletilecek çıkış sinyalini belirli bir süre içerisinde hesaplamak için bir matematik algoritmasına sahiptir.

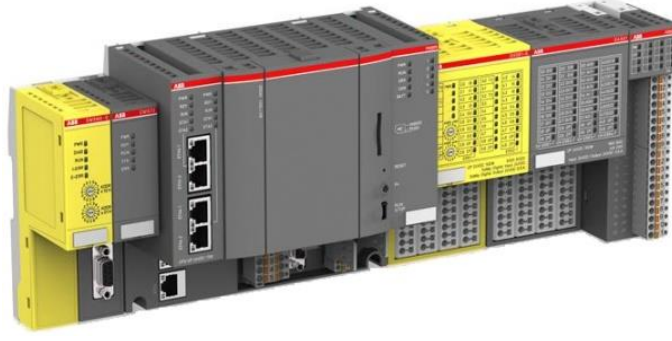
Kaydedici (Recorder): Kritik ölçüm noktaları kaydedilerek zamanla sürecin sonuçları ile karşılaştırılmasında kullanılır. Kaydediciler tarafından kaydedilen süreçteki değişimlerin değerlendirilmesi yapılarak süreç kontrolü iyileştirilir [19, 20].

3.1. Endüstriyel Kontrolörler

Endüstriyel kontrol sistemi, endüstriyel süreç kontrolü için kullanılan çeşitli kontrol sistemlerini ve ilişkili enstrümanları kapsayan genel bir terimdir. Bu tür sistemler kimyasal işleme, kâğıt imalatı, güç üretimi, petrol-gaz endüstrisi ve telekomünikasyon gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Aşağıda süreç kontrolünde yaygın olarak kullanılmakta olan kontrol sistemleri tanıtılmıştır [23, 26, 38].

3.1.1. Programlanabilir Lojik Kontrolörler

Programlanabilir lojik kontrolörler (PLC) programlanabilir bellekten sıralama, zamanlama, sayma gibi işlemleri gerçekleştiren mikroişlemci temelli cihazlardır. PLC, kısa sürede daha çok ve kaliteli ürün üretme, çok düşük hata oranlarına sahip üretim yapma gibi avantajlara sahiptir. PLC'ler, onlarca giriş çıkış birimi ile diğer otomasyon ve denetleyici kontrol ve veri toplama (SCADA) sistemlerine bağlanabilir. PLC çıkışında gösterge lambası, siren, elektrik motoru, manyetik röle, solenoid gibi elemanlar bulunabilir. PLC'ler genellikle sadece birkaç analog kontrol döngüsü ile yapılandırılmıştır. Şekil 3.11.'de ABB firmasına ait programlanabilir lojik kontrolörün (PLC) görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3. 1. Programlanabilir lojik kontrolör (abb)

Her PLC'nin kendine özgü programı vardır. Bilgisayarda yazılan uygulama programı doğrudan USB, Ethernet, RS-232, RS-485, RS-422 gibi yerleşik iletişim bağlantı noktalarıyla PLC'ye yüklenir. Program, RAM veya geçici Flash bellekte saklanır [23, 26, 38].

3.1.2. Dağıtık Kontrol Sistemi

Dağıtık kontrol sistemleri (DCS), genellikle çok sayıda kontrol döngüsüne sahip bir bilgisayarlı kontrol sistemidir. DCS, tüm sistemin veya çeşitli alt sistemlerin yapısını veri akışıyla birleştirerek tek bir otomasyon sistemi olarak organize eder. DCS, tek bir kontrol fonksiyonu yerine her bir süreç veya makine grubuna özel veri toplama ve kontrol fonksiyonları için mikro-denetleyici tabanlı işlemciler ve PLC'ler kullanır. Kontrol mekanizması çok sayıda kontrolörden oluşmaktadır. Her bir kontrolör, operatör terminali veya diğer kontrolörler ile bağlantı kurabilir. Dağıtık kontrol sistemlerinin başlıca avantajı tesisin bir kısımda meydana gelen hatadan bağımsız olarak diğer kısımların çalışmaya devam etmesini sağlamasıdır. Şekil 3.2.'de Emerson firmasına ait dağıtık kontrol sisteminin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3. 2. Dağıtık kontrol sistemi (emerson)

DCS binlerce input/output (giriş-çıkış) noktası bulundurabilir ve yeni kontrol birimleri ile kolayca uyum sağlayabilir. DCS, gelişmiş işlem kontrolü gerektiren büyük bir tesisi ya da geniş bir coğrafik alanı kontrol etmek için kullanılabilecek en uygun kontrol sistemidir. Günümüzde kimyasal tesisler, petrol ve gaz endüstrileri, gıda işleme tesisleri, nükleer santraller, su kontrol sistemleri, otomobil endüstrisi vb. birçok endüstriyel alanda dağıtık kontrol sistemi kullanılmaktadır [23, 26, 38].

3.1.3. Uzak Terminal Ünitesi

Uzak Terminal ünitesi (RTU), otomasyon için çeşitli kontrol birimlerinin ve sistemlerin uzaktan izlenmesi ve kontrolü için kullanılan çok amaçlı bir elektronik cihazdır. Bir RTU, hem analog hem de dijital alan verilerini bağlı cihazlar ve sensörler aracılığıyla izler ve verileri merkezi izleme istasyonuna RS485 veya kablosuz iletişim bağlantıları ile iletir. RTU, verileri insan makine arayüzü aracılığıyla kullanıcıya sunmadan önce bu ham verileri, kalan su miktarı, sıcaklık dereceleri veya megavat gibi uygun birimlere dönüştürür. Şekil 3.3.'de ABB firmasına ait uzak terminal ünitesinin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3. 3. Uzak terminal ünitesi (abb)

RTU, DCS veya SCADA ile bağlanıp bu sistemlere telemetri verileri göndererek arabirim görevi görür. Modern RTU'lar genellikle dağıtımı basitleştirmek ve güvenlik nedenleriyle DCS veya SCADA sistemini dâhil etmeden basit programları özerk bir şekilde yürütebilirler. Bu nedenle, bir montaj hattının bir bölümü gibi bir işlemi otomatikleştiren kontrol birimleri için akıllı denetleyici veya ana denetleyici olarak kullanılabilir. RTU'lar, bir istasyon bataryasının bulunmadığı kritik uygulamalar için AC güç kesintisi durumunda çalışmaya devam etmek için bir batarya ve şarj devresi içerebilir [23, 26, 38].

3.1.4. Programlanabilir Otomasyon Kontrolörü

Tümleşik yazılım içeren tek bir kontrolör, birden çok etki alanında birden çok işlevi yönetir. Programlanabilir otomasyon kontrolörü (PAC) yazılımı süreç kontrolü, hareket kontrolü, uzaktan izleme ve veri edinme işlemlerini aynı anda yapmaktadır. PAC'ler geniş ağ kapasitelerini, bellek ve işlem güçlerini kullanarak uzaktan izlemeyi, veri toplamayı ve basit arayüzleri düzenleme yetenekleri sayesinde çok daha gelişmiş bir role sahiptir. PAC'ler, PLC'lerin kontrol edebildiğinden çok daha karmaşık uygulamalarda kullanılabilir. Buna ek olarak PAC'ler, bir fabrika, depo veya dağıtım merkezindeki üretim ve sipariş değişimi gibi işlemleri PC tabanlı kontrolör gibi gerçekleştirebilir. Şekil 3.4.'de Schneider firmasına ait programlanabilir otomasyon kontrolörünün (PAC) görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3. 4. Programlanabilir otomasyon kontrolörü (schneider)

PAC'lerin esnek ve modüler tasarımları, daha geniş ağlara eklenebilen bağımsız otomasyon hücrelerinin yaratılmasını sağlar. Bu durum bakımı kolaylaştırır, arıza süresini azaltır ve sonsuz modüler tasarım yeteneği sunar. Kullanılan sistemler geliştikçe PAC'ler de genişletilebilir yapıları itibarıyla gelişir [23, 26, 38].

3.1.5. Endüstriyel Güvenlik Sistemleri

Endüstriyel güvenlik sistemleri (SIS), tehlikeli tesislerde insan, endüstriyel tesisi ve çevreyi korumak için önceden belirlenmiş set değerleri veya güvenli çalışma koşulları aşıldığında sistemin güvenliğini sağlamak için "özel denetim işlevlerini" gerçekleştirmek üzere kullanılırlar. SIS düzgün çalışması için yüksek akış, düşük seviye veya yanlış vana konumlandırma gibi anormal çalışma koşullarını tespit edebilen transduser ve süreç

anahtarlarına sahip olmalıdır. Şekil 3.5.'de Yokogawa firmasına ait endüstriyel güvenlik sisteminin görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3. 5. Endüstriyel güvenlik sistemi (yokogawa)

SIS, temel süreç kontrol sistemlerinde kullanılan aynı türde kontrol elemanlarından oluşur. Ancak, bir SIS içindeki tüm kontrol öğeleri yalnızca SIS 'in düzgün işleyişine adanmıştır. SIS sürecin tehlikeye atılmadığından emin olmak için aynı donanımı kontrol eden diğer tüm kontrol sistemlerinden bağımsız ve süreç güvenliğini zamanında sağlayan yapıda olmalıdır. SIS 'in uygun çalışması, geleneksel sistemlere kıyasla daha iyi performans ve tanı koşulları gerektirir [39].

3.1.6. Denetleyici Kontrol ve Veri Toplama

Denetleyici kontrol ve veri toplama (SCADA); PLC, DCS, akıllı sensörler gibi çeşitli cihazlardan saha verilerini sürekli ve gerçek zamanlı olarak toplayıp bu bilgileri görsel olarak takip edilmesini sağlamak amacıyla bilgisayar, ağ veri iletişimi ve grafik kullanıcı arayüzleri kullanılan bir kontrol sistemi mimarisidir. Set noktası değişiklikleri gibi işlem komutlarının verilmesini sağlayan operatör arabirimleri bilgisayar sistemi aracılığıyla işlenir. Ancak, gerçek zamanlı kontrol mantığı veya denetleyici hesaplamaları, PLC, RTU ve ayrık PID denetleyiciler gibi diğer çevre aygıtlarına bağlanan ağ modülleri tarafından gerçekleştirilir. Şekil 3.6.'da ABB firmasına ait denetleyici kontrol ve veri toplama bilgisayar yazılımı digivis500'ün ekran görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3. 6. Denetleyici kontrol ve veri toplama bilgisayar yazılımı digivis500 (abb)

SCADA sistemi, veri toplama ve telemetri (kablosuz veri aktarma)’nın bir kombinasyonudur. SCADA sistemleri; kullanıcılarına merkezi bir kontrol noktasından geniş bir coğrafi alana kesicileri, ayırıcıları, motor, valf gibi kontrol birimleri ile sıcaklık, basınç, akış, nem, frekans, ağırlık, akım, gerilim gibi ölçü bilgilerini görüntüleme, kaydetme, kontrol etme işlevlerini güvenilir, emniyetli ve ekonomik olarak yerine getirme avantajı sunmaktadır [23, 26, 38].

3.1.7. Endüstriyel PID Kontrolörler

Hassas kontrol gerektiren endüstriyel sistemlerin kapalı çevrim kontrolü, hata sinyalinin değerine bağlı olarak sürekli bir kontrol sinyali hesaplayan PID kontrolörler ile gerçekleştirilir. Kontrolör tarafından PID kontrol algoritmasına göre hesaplanan kontrol sinyali kontrol edilecek son kontrol elemanına uygulanır. Kontrolörlerin analog giriş ve çıkışlarında 4-20 mA, 0-20 mA, 0-10 mA, 0-1 V, 0-5 V, 0-10 V, 2-10 V sinyalleri sıcaklık, basınç, seviye, akış gibi süreç değişimlerinin kontrol edilmesi için kullanılır. Şekil 3.7.’de Yokogawa firmasına ait endüstriyel PID kontrolörün görüntüsü yer almaktadır.



Şekil 3. 7. Endüstriyel PID kontrolör (yokogawa)

Kontrolörün PID parametrelerinin seçimi, süreç kontrolü için çok önemlidir. Yanlış parametre seçimi aşağıdaki problemlere neden olur:

- İstenen set noktasında sistem kararlı çalışamaz.
- Set noktasında sürekli salınımlar oluşturur.
- Son kontrol elemanında aşırı aşınma ve yıpranmalara neden olur.
- Set noktası değişikliklerine yanıt olarak fazladan işlem hareketi oluşturur.

Bu problemler üretim sürecinde; ürün kalitesi, enerji maliyeti ve üretim hızı üzerinde doğrudan ve dolaylı olarak olumsuz etki yaratır [23, 26, 38].

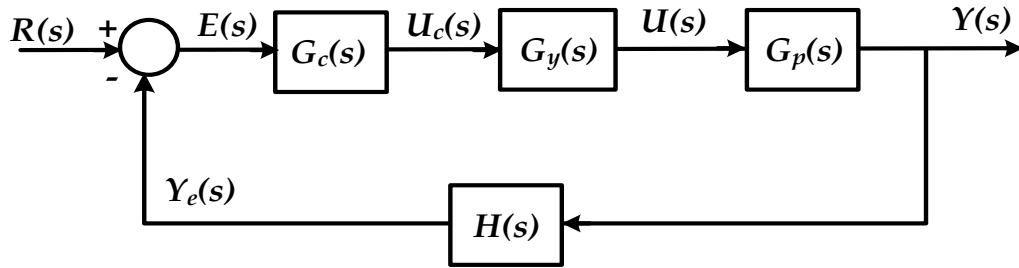
3.2. PID Kontrolörler de Kullanılan Otomatik Kontrol Formları

Otomatik kontrol sistemlerin de istenilen set değerine göre sistemi sürekli ve hassas bir şekilde kontrol etmek için hata değerini en aza indirebilecek çeşitli kontrol biçimleri vardır.

Bunlar:

- Aç-Kapa Kontrol (On-Off)
- Oransal Kontrol (P)
- Oransal-İntegral Kontrol (PI)
- Oransal-Türev Kontrol (PD)
- Oransal-İntegral-Türev Kontrol (PID)

Kontrol sistemlerinin oluşturulan transfer fonksiyonlarından yararlanılarak sistemlerin kontrol kriterlerini karşılayan en uygun PID kontrolörü tasarlamak gerekir. Kapalı çevrim kontrol sistemlerinin Laplace bölgesindeki blok şeması Şekil 3.8.'de yer almaktadır.



Şekil 3. 8. Kapalı çevrim kontrol sisteminin laplace bölgesindeki blok şeması

Transduserlerin giriş-çıkış sinyalleri lineerleştirilir ya da lineer çalışma aralığında kullanılır. Ayrıca, ölçüm sırasındaki zaman sabiteleri genellikle çok küçük olduğundan normal bir kazanç yükseltici gibi çalışırlar. Yükseltici/dönüştürücü birim de benzer şekilde bir kazanç yükseltici olarak ele alınabilir. Transduser ve yükselticinin transfer fonksiyonları Denklem 3.1 ve Denklem 3.2'de olduğu gibi birer kazanç olarak gösterilebilir [40].

$$G_y(s) = \frac{U(s)}{U_c(s)} = K_y \quad (3.1)$$

$$H(s) = \frac{Y_e(s)}{Y(s)} = K_s \quad (3.2)$$

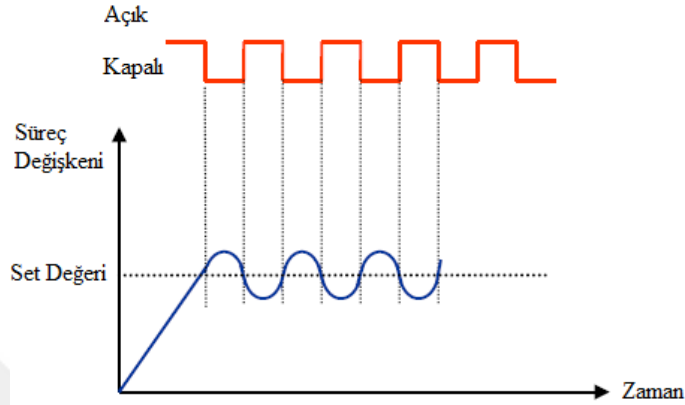
Burada, K_y yükselticinin kazancını, K_s transduserin kazancını, $Y_e(s)$ ise sistemin gerçek çıkışının transduserden ölçülen elektriksel karşılığıdır. Dolayısıyla, referans sinyali $R(s)$ ' in de elektriksel olarak tanımlandığı dikkate alınırsa, elektriksel hata sinyali Denklem 3.3'deki gibi olur [39].

$$E(s) = R(s) - Y_e(s) \quad (3.3)$$

3.2.1. Aç-Kapa Kontrol

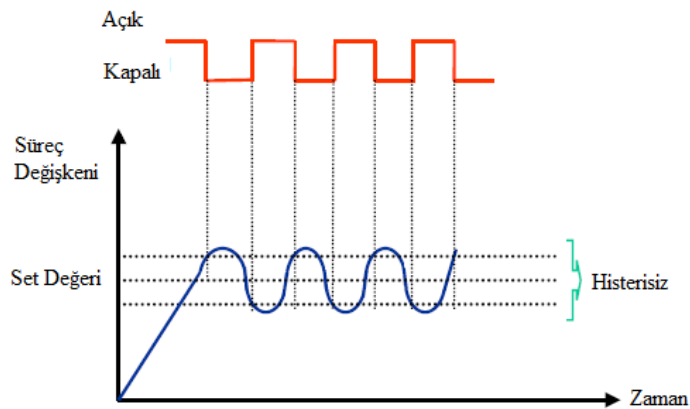
Açma ve kapama (on-off) yapan anahtarlar, süreç değişkeni set değeri altında olduğunda açık set değeri üzerinde olduğunda kapalı olacak şekilde sürekli salınım oluştururlar.

Kontrol edilen süreç değişkeninin set değeri etrafında oluşturduğu salınımların tepeden tepeye değişimi ve salınım sıklığı süreç karakteristiklerine bağlıdır. Sürekli olarak salınım meydana geldiğinden enerji tüketimi fazladır. Şekil 3.9.'da aç-kapa kontrol ile süreç değişkeninin zamana göre nasıl kontrol edildiğine dair yanıtı görülmektedir.



Şekil 3. 9. Aç-kapa kontrol yanıt eğrisi

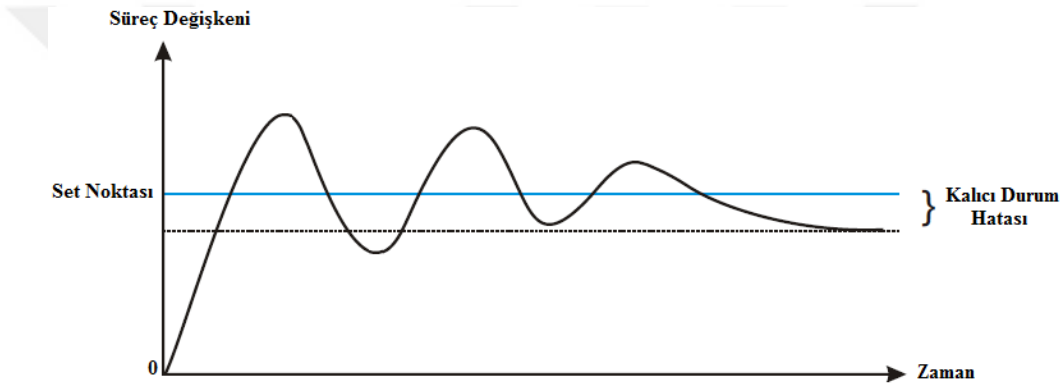
Aç-kapa kontrol, sistem çıkışını set değeri civarında tutma işleminde genellikle başarılı olur. Ancak süreçteki bozucu faktörler ve elektriksel gürültü nedeniyle sistem osülasyona geçer ve devamlı set değeri etrafında sık aralıklı açma, kapama yapar. Özellikle bu durum son kontrol elemanlarının çok kısa sürede tahrip olmasına sebep olur. Açma-kapama mekanizmasının sık olarak çalışmasını önlemek için set değeri geçişlerinde “histerisiz (diferansiyel aralık - sabit bant)” oluşturulur [41, 42]. Şekil 3.10.'da aç-kapa kontrol ile set değeri etrafında oluşan salınımları azaltmak için kullanılan sabit bantla birlikte süreç değişkeninin zamana göre nasıl kontrol edildiğine dair yanıtı görülmektedir.



Şekil 3. 10. Histerisizli aç-kapa kontrol yanıt eğrisi

3.2.2. Oransal Kontrol

Oransal (P) kontrolde, süreç değişkeninin alınan ölçüm bilgisi ile set değerinin farkı alınarak bulunan hata değeri ile orantılı zamanda sürekliliği olan bir çıkış üretilir. Oransal kontrolörler, doğrudan sistemin kazancını artırdığından oransal kazanç artırılarak sistemin cevap hızı artırılacağı gibi kalıcı durum hatası da azaltılabilir. Ancak oransal kontrolör, orantılı bir çıkış oluşturmak için bir hata gerektirdiğinden, süreçlerde hatayı ortadan kaldıramaz [40-43]. Şekil 3.11.'de oransal kontrol (P) ile süreç değişkeninin istenen set noktasındaki kalıcı durum hatasıyla birlikte zamana göre oluşan kontrol yanıtı görülmektedir.



Şekil 3. 11. Oransal kontrol yanıt eğrisi

Oransal kontrolde kontrolör çıkışı $u(t)$ ile kontrolör girişi $e(t)$ arasında sabit bir oransal ilişki vardır.

$$u(t) = K_p \cdot e(t) \quad (3.4)$$

Dolayısıyla oransal kontrolün transfer fonksiyonu:

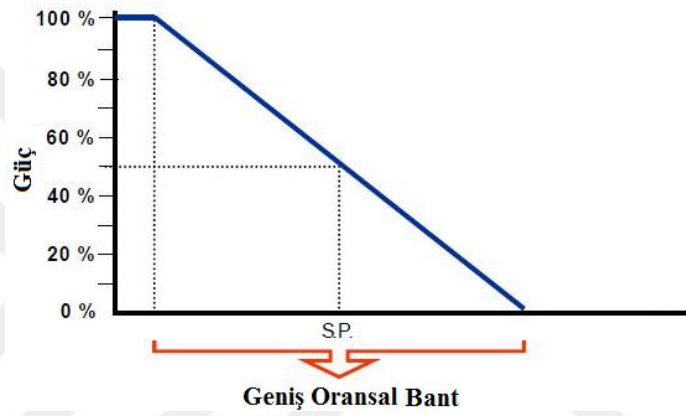
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (3.5)$$

Oransal Bant: Oransal kontrolde; son kontrol elemanı, kontrol edilen süreç değişkeninin değişim miktarına bağlı olarak konumlanır. Son kontrol elemanının kontrolünde kullanılan enerjinin % 0-100'e kadar ayarlanabilmesi için kontrol edilen süreç değişkenindeki sapma miktarı (oransal bant) kontrolörün kontrol kazancının bir yüzdesi olarak tanımlanır. Denklem 3.6'da görüldüğü gibi kazanç arttıkça oransal bant daralmaktadır. Kalıcı durum

hatasının azaltmak için oransal bant küçültülebilir. Ancak oransal bant küçüldükçe, iki konumlu (on-off) kontrole yaklaşıldığı için set değeri etrafında salınımlar artabilir ve sistem dengeye oturamaz [42].

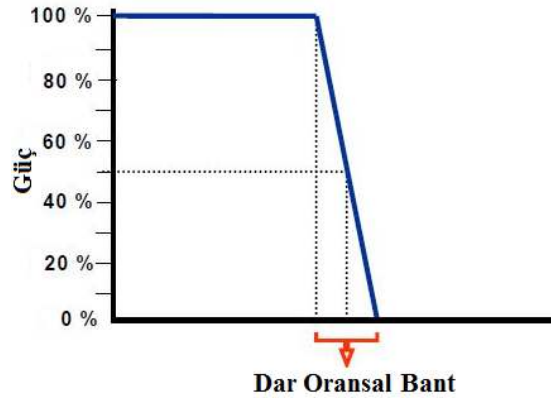
$$\% PB = \frac{\%100}{\text{Kazanç}} \quad (3.6)$$

Çeşitli endüstriyel üretimlerde süreç kontrolü için en uygun oransal bant seçilerek oransal kontrol yapılır. Şekil 3.12.'de enerjinin 0-100 % ayar aralığındaki geniş oransal bant durumu görülmektedir.



Şekil 3. 12. Geniş oransal bant

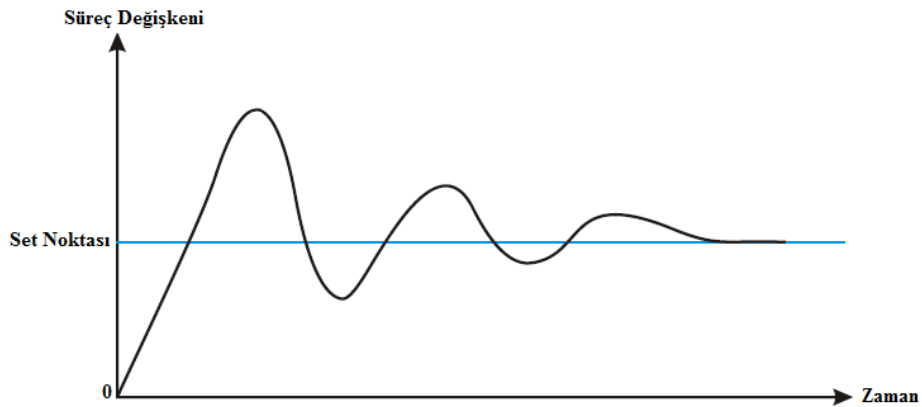
Geniş seçilen oransal bantlar az miktarda enerji artışı ve yüksek oranda süreç değişkeni artışına sebep olur veya az miktarda enerji azalışı yüksek bir süreç değişkeni azalışına sebep olur. Şekil 3.13.' de dar oransal bantta ise küçük bir süreç değişkeni artışı veya düşüşü sağlamak için, büyük oranda enerji artışı veya düşüşü yapmak gerekir. Oransal bantı giderek daraltıp sıfırlayacak olursak kontrolör aç-kapa kontrol yaparak çalışacaktır [42]. Şekil 3.13.'de enerjinin 0-100 % ayar aralığındaki dar oransal bant durumu görülmektedir.



Şekil 3. 13. Dar oransal bant

3.2.3. Oransal-İntegral Kontrol

Oransal-integral kontrol (PI) kontrolörleri esas olarak oransal (P) kontrolöründen kaynaklanan kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmak için kullanılır. Ancak, yanıtın hızı ve sistemin genel kararlılığı açısından olumsuz bir etkisi vardır. Bu denetleyici, çoğunlukla sistemin hızının sorun olmadığı alanlarda kullanılır. Süreç değişkeni set değeri etrafında sistem yük değerine bağlı olarak set değerine oturur [40-43]. Şekil 3.14.'de oransal-integral (PI) kontrol ile süreç değişkeninin istenen set noktasındaki zamana göre oluşan kontrol yanıtı görülmektedir.



Şekil 3. 14. Oransal-integral kontrol yanıt eğrisi

Kontrol girişi $u(t)$,

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int_0^t e(t) dt \quad (3.7)$$

PI kontrolörün transfer fonksiyonu ise,

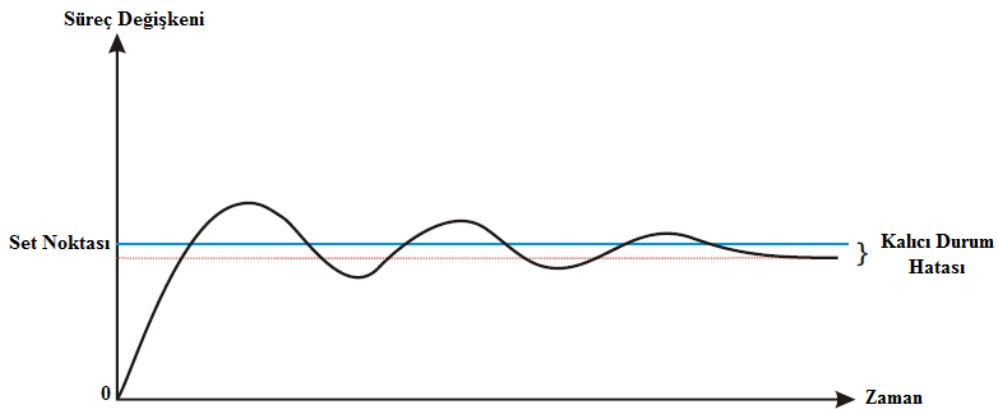
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (3.8)$$

Endüstriyel kontrolörlerde, integral kazancı yerine integral zaman sabiti ($\tau_i = \frac{K_p}{K_i}$) tanımı kullanılabilir.

$$G_c(s) = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s}\right) \quad (3.9)$$

3.2.4. Oransal-Türev Kontrol

Oransal (P) kontrolde oluşan kalıcı durum hatası türev (D) kontrol eklenerek azaltılabilir. Ancak bir miktar kalıcı durum hatası yine de kalır. Oransal-türev kontrol de (PD) set değeri ile ölçülen değer arasındaki fark sinyalinin türevi alınır. Türevi alınan fark sinyali, tekrar fark sinyali ile toplanır ve oransal devreden geçer. Bu şekilde düzeltme yapılmış olur. Türev kontrolün asıl işlevi salınım sonucu oluşan aşmaları azaltmak içindir. Türevsel etki, düzeltici etkisini hızlı bir şekilde gösterdiği için hızlı değişimlerin olduğu kısa süreli süreçlerde kullanılması uygundur. Sürekli tip uzun süreli süreçlerde ve sapma istenmeyen durumlarda PI veya PID tip seçilebilir. Ayrıca PD kontrolörler, türev etkisi nedeni ile gürültüyü de yükselteceğinden özellikle gürültülü sistemlerde pratik olarak kullanılmaları sorunludur ve bu nedenle D kontrol yalnız başına kullanılmaz [40-43]. Şekil 3.15.'de 3.2.4. oransal-türev kontrol (PD) ile süreç değişkeninin istenen set noktasındaki kalıcı durum hatasıyla birlikte zamana göre oluşan kontrol yanıtı görülmektedir.



Şekil 3. 15. Oransal-türev kontrol yanıt eğrisi

Kontrol sinyali $u(t)$,

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \cdot \frac{d}{dt} e(t) \quad (3.10)$$

PD kontrolörün transfer fonksiyonu ise,

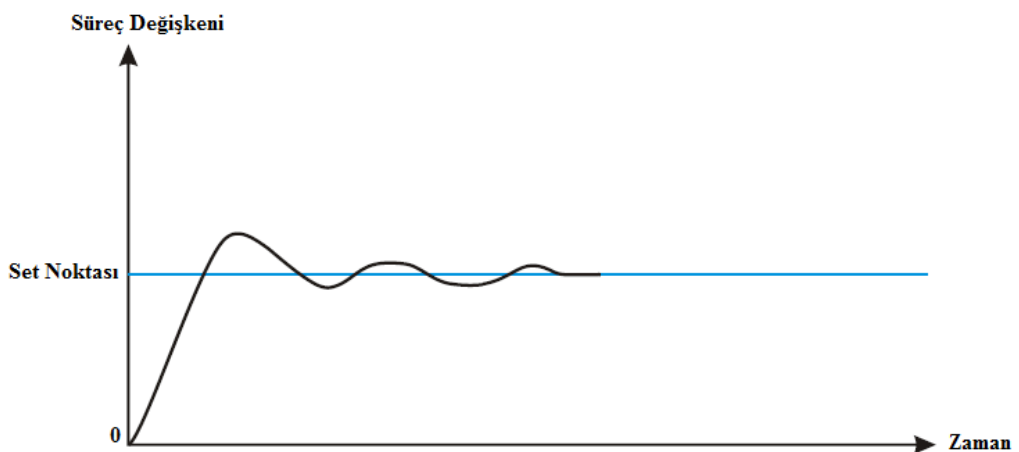
$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d s \quad (3.11)$$

Endüstriyel kontrolörlerde, türev kazancı yerine türev zaman sabiti ($\tau_d = \frac{K_d}{K_p}$) tanımı kullanılabilir.

$$G_c(s) = K_p \cdot (1 + \tau_d s) \quad (3.12)$$

3.2.5. Oransal-İntegral-Türev Kontrol

Oransal (P) kontrolde oluşan kalıcı durum hatası, oransal-integral (PI) kontrolle giderilir. Ancak, meydana gelen salınımdaki aşmalar bu kontrole türev (D) kontrolün de eklenmesi ile minimum seviye indirilir veya tamamen kaldırılır [40-43]. Şekil 3.16.'da oransal-integral-türev (PID) kontrol ile süreç değişkeninin istenen set noktasındaki zamana göre oluşan kontrol yanıtı görülmektedir.



Şekil 3. 16. Oransal-integral-türev kontrol yanıt eğrisi

Kontrol sinyali $u(t)$,

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt} \quad (3.13)$$

PID kontrolörün transfer fonksiyonu ise,

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.14)$$

Endüstriyel PID kontrolörlerde integral ve türev kazancı yerine integral zaman sabiti ($\tau_i = \frac{K_p}{K_i}$) ve türev zaman sabiti ($\tau_d = \frac{K_d}{K_p}$) parametreleri kullanılabilir. PID kontrolörün transfer fonksiyonu zaman sabitleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir. Tablo 3.1.'de oransal (K_p), integral (K_i), türev (K_d) kazançlarının kontrol yanıtındaki yükselme zamanı, aşma, yerleşme zamanı, kalıcı durum hatası ve kararlılık üzerindeki olumlu ve olumsuz etkileri yer almaktadır.

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \cdot \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} + \tau_d s\right) \quad (3.15)$$

Tablo 3. 1. Oransal, integral ve türev kazançlarının kontrol yanıtına etkileri

Kazanç	Yükselme Zamanı	Aşma	Yerleşme Zamanı	Kalıcı Durum Hatası	Kararlılık
K_p	Azaltır	Arttırır	Az arttırır	Azaltır	Azaltır
K_i	Az azaltır	Arttırır	Arttırır	Çok azaltır	Arttırır
K_d	Az azaltır	Azaltır	Azaltır	Hafif değiştirir	Arttırır

3.3. PID Kontrolör Tasarımı

Kontrol sistemlerinin tasarımında temel amaç, bir kontrol sisteminden beklenen kontrol kriterlerini karşılayacak şekilde kontrol yapısının seçimi ve kontrolör parametrelerinin belirlenmesidir.

Matematiksel modeli bilinen sistemler için PID kontrolörler, köklerin yer eğrisi (KYE) tekniği, frekans cevabı eğrileri gibi çeşitli yöntemlerle tasarlanabilir. En çok bilinen Ziegler-Nichols, Cohen-Coon, Tyreus-Luyben vs. gibi çeşitli PID kontrolör ayarlama teknikleri ile kontrolör parametreleri ayarlanır [40].

3.3.1. Köklerin Yer Eğrisi ile PID Tasarımı

PID kontrolörler, sistemin köklerinin yer eğrisini (KYE) değiştireceği için sisteme bağlanan bir PID kontrolör ile KYE'nin istenilen bir noktadan geçmesi sağlanabilir. İstenilen nokta, geçici rejim kriterlerini tanımlayan sönüm faktörü (ζ) ve doğal frekans (w_n) parametrelerine göre hesaplanan baskın kapalı çevrim kutuplarının yerleştirilmesi istenen noktadır.

$$s_{1,2} = -\zeta w_n \pm jw_n \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3.16)$$

Bir sistemin nasıl bir kontrolörle kontrol edilebileceği KYE'nin Denklem 3.16 ile tanımlanan noktadan geçip geçemeyeceği ile belirlenebilir. Kapalı çevrim kontrol sisteminin kutupları tanımlanan noktadan geçiyorsa kontrolör parametrelerini denklemdeki noktaya taşıyacak açı ve genlik koşulu sistemin açık çevrim transfer fonksiyonuna uygulanarak bulunur. Kontrol sistemlerinde sönüm faktörü (ζ) ve doğal frekans (w_n) parametrelerine bağlı olarak maksimum aşma (M), yükselme süresi (t_r) ve yerleşme süresi (t_s) aşağıdaki denklemler ile hesaplanır [40].

$$M = e^{-\frac{\zeta\pi}{\sqrt{1-\zeta^2}}} \quad (3.17)$$

$$t_r = \frac{\pi - \cos^{-1}\zeta}{w_n \sqrt{1-\zeta^2}} \quad (3.18)$$

$$t_s = \frac{4}{\zeta w_n} \quad (3.19)$$

Sonuç olarak, bir sistemin PID kontrolör tasarımını yapmak için aşağıdaki tasarım aşamaları izlenebilir.

- Geçici rejim kontrol taleplerinden (en büyük aşma, yükselme ve yerleşme süresi ya da sönüm katsayısı ve doğal frekans gibi) yararlanarak sistemin baskın ya da istenilen kutuplarının olması gereken yeri belirlenir.
- KYE'nin, istenilen kutuplardan geçebilmesi için açı koşulu kullanılarak kontrolörün sisteme eklemesi gereken faz açısı belirlenir.
- Faz açısından yararlanarak kontrolörün kutupları ya da sıfırları kolayca belirlenebilir.

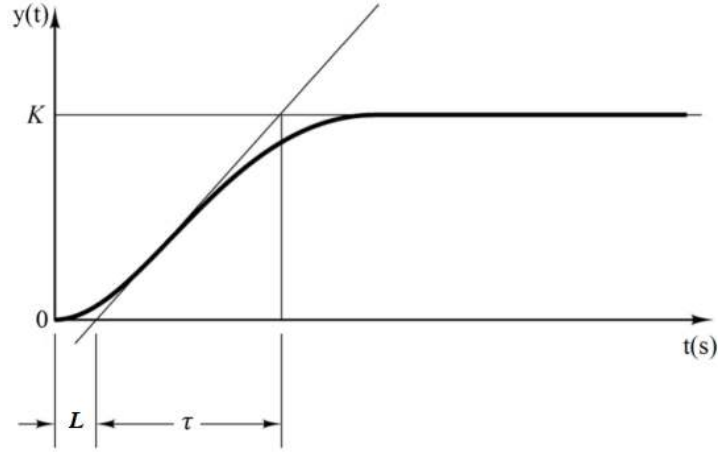
- Kontrolörün, kutup ve sıfırları belirlendikten sonra, KYE'nin istenilen kutuplardan geçmesini sağlayacak şekilde genlik koşulundan yararlanılarak kontrolör kazancı belirlenir.

3.3.2. PID Parametrelerinin Ayarlanma Yöntemleri

Matematiksel modeli bilinmeyen, doğru bir matematiksel modeli elde edilemeyen ya da edilmesi zor olan sistemler için uygun kontrolör parametrelerini belirlemek amacıyla çeşitli PID parametrelerini ayarlama yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler de genellikle deneysel ya da deneme-yanılma yaklaşımları kullanılır ve sistemlerin basamak cevapları üzerinden belirlenen çeşitli kritik noktalar kullanılarak PID kontrol parametreleri hesaplanır.

3.3.2.1. Açık Çevrim Ayarlama Yöntemi

Kontrolör ile son kontrol elemanları arasında bulunan kontrol döngüsünün bağlantısı kontrol faaliyeti gerçekleşmemesi için açıldıktan sonra kontrol sistemi normal çalışma koşullarına getirilmelidir. Daha sonra açık çevrim basamak yanıtı testi yapılır. Sistemin süreç değişkenine karşı verdiği tepkinin zamana göre çizilen grafiği, süreç reaksiyon eğrisidir. Bu eğride sistem basamak yanıtında eğimin en büyük olduğu nokta bulunur ve bu noktadan geçen teğet çizilir. Bu teğetin basamak giriş öncesi ve sonrasındaki sistem çıkış değerlerini kestiği noktalar bulunur. Şekil 3.17.'deki gibi elde edilen süreç reaksiyon eğrisinden ölü zamanı (L), sistem zaman sabiti (τ) ve adım yanıtının kalıcı duruma ulaştığı değer (K) elde edilir. PID parametrelerini hesaplamak için tablo 3.2.'deki Ziegler-Nichols açık döngü ayarlama denklemlerine bulunan bu değerleri koyarak PID parametreleri çıkarılır. Diğer yöntemlere göre güvenli, hızlı ve kolay kullanım sağladığı için sık kullanılan bir yöntemdir. I, D ve PD denetleyicileri için uygulanmaz [41-44]. Tablo 3.2.'de Ziegler-Nichols açık çevrim P, PI, PID parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan formüller yer almaktadır.



Şekil 3. 17. Açık çevrim süreç yanıtı

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \cdot e^{-Ls} \quad (3.20)$$

Tablo 3. 2. Ziegler-Nichols açık çevrim PID parametrelerinin hesaplanması

Kontrolör	K_p	τ_i	τ_d
P	$\frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L}$	$2 \cdot L$	$0.5 \cdot L$

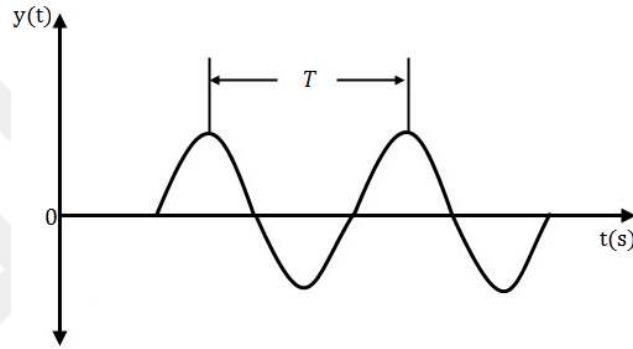
Chien-Hrones-Reswch (CHR) yönteminde ise Ziegler-Nichols açık çevrim PID parametrelerinde kullanılan formüller de bazı düzenlemeler yapılarak sıfır aşma için ve %20 aşma için en hızlı yanıtı elde edecek şekilde kontrolör parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan formüller elde edilmiştir. Tablo 3.3.'de Chien-Hrones-Reswch (CHR) açık çevrim P, PI, PID parametrelerinin hesaplanmasında kullanılan formüller yer almaktadır.

Tablo 3. 3. Chien-Hrones-Reswch (CHR) açık çevrim PID parametrelerinin hesaplanması

Aşma	%0			%20		
Kontrolör	K_p	τ_i	τ_d	K_p	τ_i	τ_d
P	$0.3 \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L}$	∞	0	$0.7 \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L}$	∞	0
PI	$0.35 \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L}$	$1.2 \cdot \tau$	0	$0.6 \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L}$	τ	0
PID	$0.6 \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L}$	τ	$0.5 \cdot d$	$0.95 \cdot \frac{1}{K} \cdot \frac{\tau}{L}$	$1.4 \cdot \tau$	$0.47 \cdot L$

3.3.2.2. Kapalı Çevrim Ayarlama Yöntemi

Kontrol sistemi normal çalışma koşullarına getirildikten sonra oransal kazanç dışındaki integral ve türev zaman sabitleri kaldırılarak oransal kazanç süreç değişkenindeki salınımlar sabit genliğe sahip olana kadar arttırılır. Sistemin osilasyona girdiği andaki oransal kazanç nihai kazanç değeri (K_{pcr}) olarak adlandırılır. Şekil 3.18.'deki elde edilen osilasyon yanıtında bulunan nihai kazanç değeri (K_{pcr}) ve salınım periyodu (T) değerleri tablo 3.4.'deki Ziegler-Nichols kapalı çevrim denklemlerinde yerlerine koyularak PID parametreleri belirlenir [41-44].



Şekil 3. 18. Kapalı çevrim osilasyon yanıtı

Tablo 3. 4. Ziegler-Nichols kapalı çevrim PID parametrelerini hesaplaması

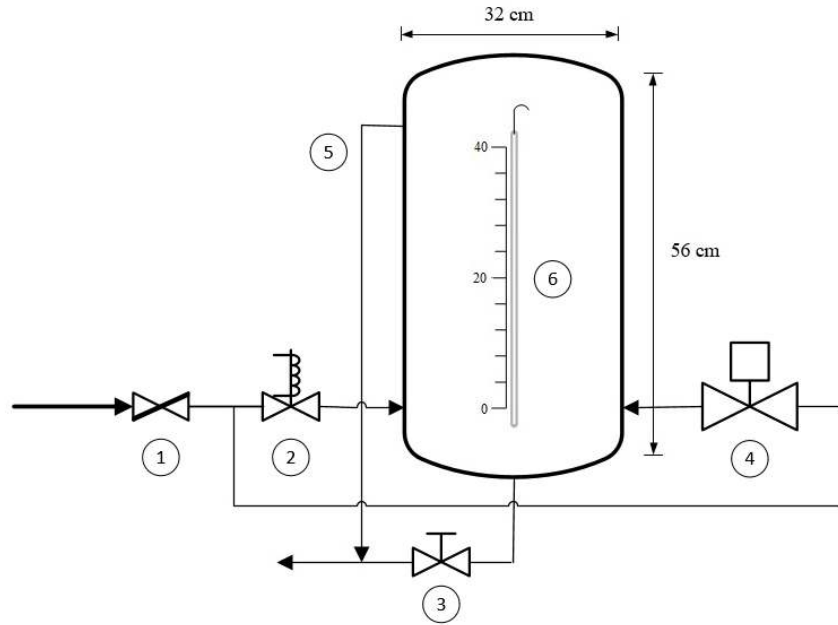
Kontrolör	K_p	τ_i	τ_d
P	$0.5 \cdot K_{pcr}$	∞	0
PI	$0.45 \cdot K_{pcr}$	$\frac{1}{1.2} \cdot T$	0
PID	$0.6 \cdot K_{pcr}$	$0.5 \cdot T$	$0.125 \cdot T$

4. SIVI SEVİYE KONTROL SİSTEMİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Bu bölümde, elektriksel ve mekanik montajı yapılan sıvı seviye kontrol sisteminde kullanılan süreç kontrol birimlerinin karakteristik özellikleri anlatılarak hazırlanan sıvı seviye kontrol sisteminin modellenmesi, MATLAB/Simulink simülasyonu ile oluşturulan PID kontrolör tasarımı ve elde edilen deneysel sonuçlar açıklanmıştır.

4.1. Sıvı Seviye Kontrol Seti

Şekil 4.1.'deki sıvı seviye kontrol sisteminin süreç şemasında süreç değişkeninin giriş-çıkışının kontrol edilmesinde kullanılan kontrol birimleri numaralandırılarak gösterilmiştir.



Şekil 4. 1. Sıvı seviye kontrol sistemi süreç şeması

Küresel vana (1), sıvı seviye kontrol sistemine süreç değişkeninin girişini manuel kontrol yapılarak durdurup başlatmak için kullanılır. Solenoid vana (2), sıvı seviye kontrol sisteminde istenilen set değerinde aç-kapa yaparak süreç değişkende salınım oluşacak şekilde kontrol etmek için kullanılır. Manuel vana (3), süreç değişkeninin tank içerisinden tahliyesini yapmak ve kontrol sistemi içerisinde bozucu giriş etkisi yaratmak amacıyla

kullanılır. Otomatik kontrol vanası (4), PID kontrolör tarafından belirlenen bir açıklıkta kalarak süreç değişkeninin istenilen set değerinde kalmasını sağlamada kullanılır. Taşma çıkışı (5), süreç değişkeninin tank içerisinde en son yükseleceği noktadan tahliyesini sağlamak amacıyla kullanılır. Ölçekli şeffaf seviye göstergesi (6), tank içerisine dolan süreç değişkeninin seviyesinin tank dışından izlenmesi amacıyla kullanılır.



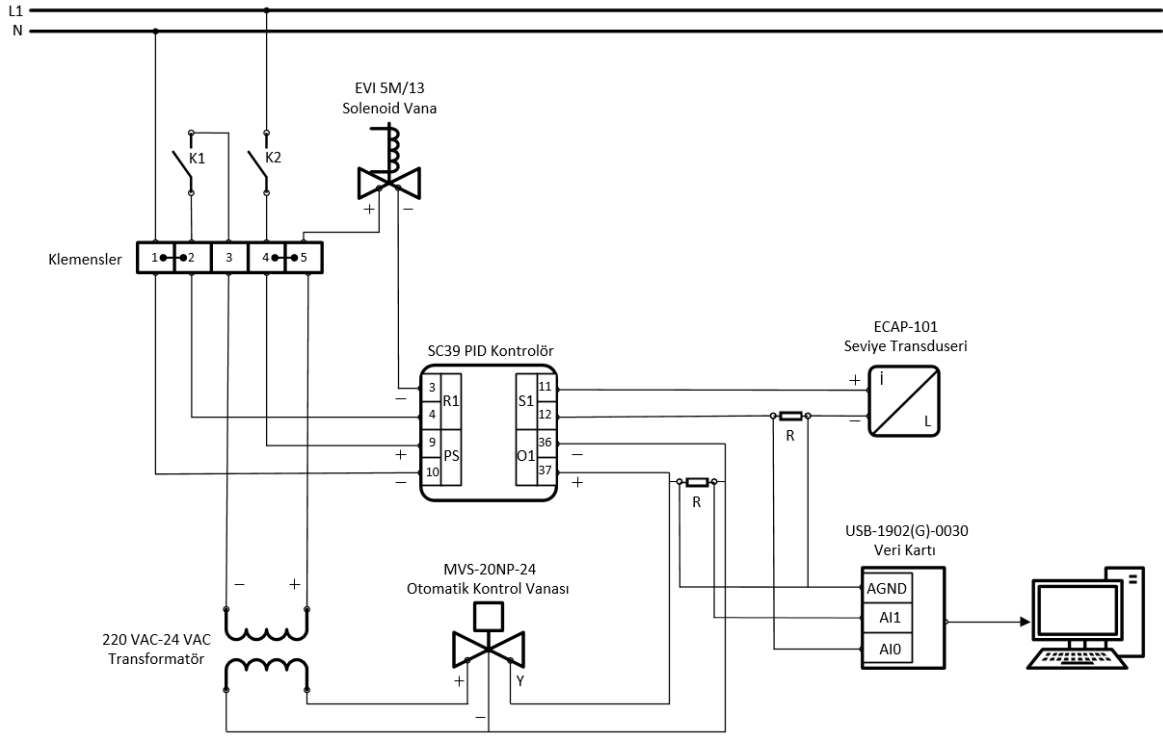
Şekil 4. 2. Sıvı seviye kontrol sistemi

Şekil 4.3.'de mekanik montajı yapılmış sıvı seviye kontrol sistemi birer adet kapasitif seviye transduseri (ECAP-101), PID kontrolör (SC39), oransal kontrol vanası (MVS- 20 NP -24), solenoid vana (EVI 5M/13) ve şeffaf seviye göstergesi (0 – 42 cm) olmak üzere endüstriyel kontrol birimlerinden oluşmaktadır.

Şekil 4.2.'deki sıvı seviye kontrol sisteminin elektriksel bağlantı şemasında süreç değişkenini kontrol etmek için kullanılan kontrol birimlerinin PID kontrolör ve birbirleriyle olan elektrik bağlantıları görülmektedir.

1, 2, 3 numaralı klemensler 220 V AC nötr (N) hattına, 4 ve 5 numaralı klemensler 220 V AC besleme (L1) hattına bağlanmıştır. 1 ile 2 ve 4 ile 5 numaralı klemensler birbirleriyle köprülenmiştir. 1 numaralı klemense gelen nötr (N) buradan kontrolörün PS modülündeki 10 numaralı girişine bağlanmıştır. 4 numaralı klemense gelen besleme (L1)

kontrolörün PS modülündeki 9 numaralı girişine bağlanmıştır. Burada besleme (L1), 4 numaralı klemense gelmeden önce K2 kontağı ile manuel olarak SC39 PID kontrolörün açıp kapatılması sağlanır.



Şekil 4. 3. Sıvı seviye kontrol sisteminin elektriksel bağlantı şeması

2 numaralı klemens ile hem SC39 PID kontrolörün R1 modülünün 4 numaralı girişi hem de K1 kontağı ile 3 numaralı klemense nötr (N) bağlantısı yapılmış olunur. 3 numaralı klemensin nötrü (N) ile 5 numaralı klemensin beslemesi (L1) transformatöre bağlanarak 220 V AC otomatik kontrol vanasını nominal beslemesini sağlamak amacıyla 24 V AC'ye dönüştürülür. 24 V AC'nin besleme ucu MVS- 20NP -24 otomatik kontrol vanasının besleme girişine, nötr ucu ise vananın nötr girişine ve oradan SC39 PID kontrolörün O1 modülündeki 36 numaralı girişine bağlanır. O1 modülündeki 37 numaralı besleme girişi ise vananın kontrol girişine (Y) bağlanarak kontrolörün vanaya oransal kontrol sinyali girişi vermesi sağlanır. Burada dikkat edilmesi gereken husus SC39 PID kontrolörün O1 kontrol modülünün 20 – 4 mA analog kontrol sinyali verecek şekilde ayarlandığı ancak vananın 2 – 10 V kontrol gerilimi aralığında çalışıyor olduğudur. Bu durum kontrolörün 20 – 4 mA analog kontrol çıkışına R (500 Ω) direnci bağlanarak 10 – 2 V analog kontrol gerilimine çevrilmiştir.

4.1.1. SC39 Standart Kontrol Cihazı

Şekil 4.4.'de görüntüsü verilen SC39 serisi kontrolörler endüstriyel ortamlardaki birçok süreç değişkeninin ölçümü ve kontrolü amacı ile tasarlanmış, çok amaçlı süreç kontrolü kullanımı için uluslararası standartlara uygun, güvenli ve kolay kullanımlı ergonomik kontrolörlerdir. Bu kontrolörler çok farklı giriş sinyalleri ile çalışabilmekte ve her çıkışı ayrı bir kontrol için kullanılabilir. SC39 serisi kontrolörler de ürün koduna bağlı olarak 1 adet analog giriş, bir adet analog çıkış ve dört adet röle çıkış modülü bulunabilir [45]. Tablo 4.2.'de SC39 PID kontrolörün giriş-çıkış modülleri verilmiştir.



Şekil 4. 4. SC39 Kontrolör (tekon)

Tablo 4. 1. SC39 kontrolörünün giriş-çıkış modülleri

S1	Üniversal transduser giriş modülü: 1 Adet üniversal transduser girişi (<i>TC, RT, mA, mV, V</i>), 1 adet transduser besleme çıkışı (24 V DC)
O1	Analog çıkış modülü: 1 Adet analog çıkış (0/4 – 20 mA, 0/2 – 10 V) ON/OFF, P, PI, PD, PID kontrol
R1, R2, R3, R4	Röle çıkış modülleri: 4 Adet röle veya lojik çıkış (24 V), 4 adet LED gösterge
PS	Besleme gerilim girişi: 100 – 240 V AC üniversal besleme

4.1.2. MVS–20NP–24 Otomatik Kontrol Vanası

Şekil 4.5.'de görüntüsü verilen MVS serisi otomatik kontrol vanaları, ısıtma havalandırma iklimlendirme sistemlerinde sıvı akışının hassas kontrolü için kullanılır. Vana'ya gelen kontrol sinyaline göre sıvı akışını oransal olarak ayarlamaktadır. 2 –

10 V DC oransal çıkışları olan kontrolörler ile uyumludur [46]. Tablo 4.3.'de MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanasının teknik bilgileri verilmiştir.



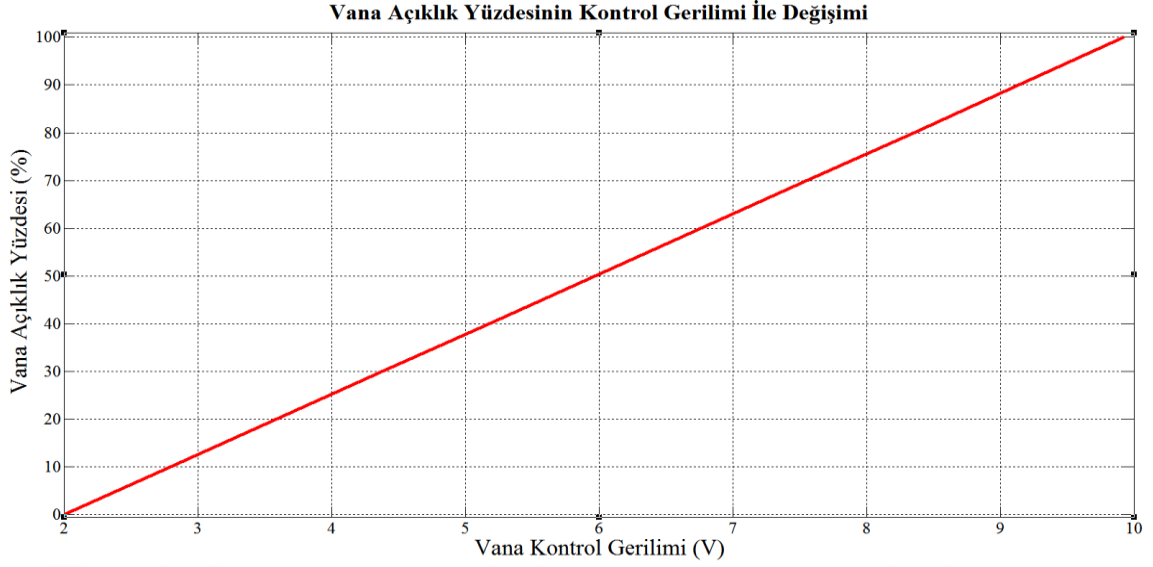
Şekil 4. 5. MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanası (ontrol)

Tablo 4. 2. MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanası teknik bilgiler

Nominal Besleme	24 V AC (20,4 ... 26,4 V AC)
Güç Tüketimi	11 VA
Strok	20 mm (MVS-20NP-24)
Manuel Müdahale	El ile otomatik resetleme
Açma veya Kapatma Süresi	114 sn (MVS-20NP-24)
Kuvvet	1800 N
Konum Göstergesi	%0 ... 100
Ortam Sıcaklığı	0° ... + 45 °C
Ortam Nemi	%95 (yoğuşmasız)

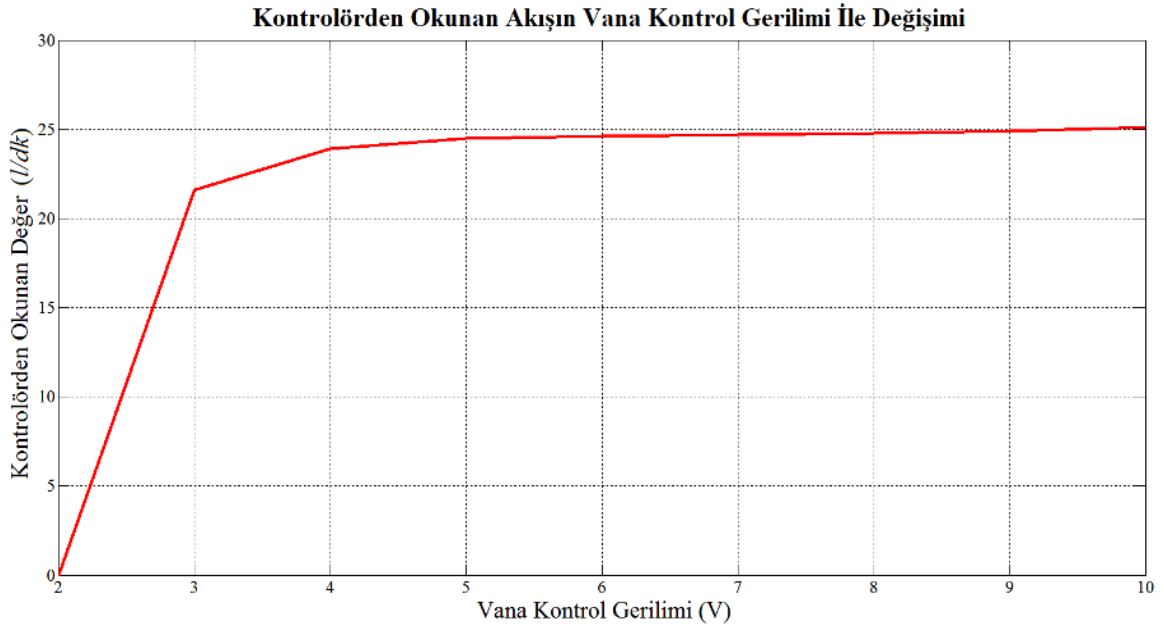
MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanası 10 V DC kontrol geriliminde tam kapanmakta, 2 V DC kontrol geriliminde tam açılmaktadır. Ancak vananın 2 – 10 V DC kontrol gerilimi bilgisayar ekranından 2 V DC kontrol geriliminde tam kapalı, 10 V DC kontrol geriliminde tam açık olacak şekilde deneysel sonuçlar elde edilmiştir. Ayrıca MATLAB/Simulink simülasyonunda bu kontrol gerilimi aralığı değişimini 0 V DC kontrol geriliminde tam kapalı, 10 V DC kontrol geriliminde tam açık olacak şekilde kontrol yaklaşımına daha uyumlu hale getirilerek simülasyon sonuçları elde edilmiştir.

MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanasının sıvı giriş-çıkış karakteristiği, kontrol sistemlerinin performansını etkileyen en önemli parametredir. Vanada aktüatör olarak kullanılan ağır servo motor yavaş hareket ettiğinden kontrol süresini arttırmaktadır. Tablo 4.3.'de görüldüğü gibi vananın açma veya kapama süresi 114 saniyedir.



Şekil 4. 6. MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanası vana açıklık yüzdesinin kontrol gerilimi ile değişimi

Şekil 4.6.'da MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanasının kontrol gerilimine göre doğrusal bir şekilde açıldığı deneysel olarak belirlenmiştir. Ancak, sıvı seviye ve akış kontrol sistemlerinde otomatik kontrol vanasının kontrol gerilimine bağlı olarak çeşitli kontrol gerilimlerine göre akışına izin verdiği kalıcı durumdaki sıvı debilerinin doğrusal olmadığı Şekil 4.7.'de görülmektedir. Süreç değişkeni olarak kullanılan şebeke suyunun kontrol sistemlerinde maksimum 25 litre/dk değerinde sıvı akışı gerçekleştirmektedir.



Şekil 4. 7. MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanasının vana kontrol gerilimine göre izin verdiği sıvı akışı

Şekil 4.7.'de MVS–20NP–24 otomatik kontrol vanasının izin verdiği sıvı akışının doğrusal olmadığı ve yaklaşık üstel değişim olarak kabul edilebileceği görülmektedir. Küçük kontrol gerilimi değişimleri önemli ölçüde debinin değişmesine neden olurken yüksek kontrol gerilimlerindeki değişimler çok daha az debi değişimine neden olmaktadır. Bu nedenden dolayı otomatik kontrol vanasının kontrol gerilimine göre izin verdiği sıvı debisinin değişimi, aç-kapa karakteristiğine oldukça yakındır. Vananın çalışması direkt olarak PID parametrelerini etkilediğinden MATLAB/Simulink simülasyonunda kullanmak üzere elde edilen vananın modeli Denklem 4.1'de yer almaktadır.

$$G_v(s) = \frac{Q_i(s)}{V_c(s)} = \frac{K_v}{23s+1} \quad (4.1)$$

Vananın, düşük çalışma gerilimleri, normal çalışma aralığı kabul edilirse bu aralıktaki giriş-çıkış karakteristiği de doğrusal kabul edilerek sabit bir K_v kazancı ile gösterilebilir. Ayrıca, vananın açma-kapa süresi 114 saniye olduğuna göre vana modeli, zaman sabitesi $\tau_v = 114/5 = 23 \text{ sn.}$ olan birinci dereceden bir sistem ile yaklaşık olarak gösterilebilir.

Şekil 4.7'de süreç değişkeninin debisi yaklaşık 25 l/dk olan sisteme göre düşük gerilimlerdeki (2 – 3 V DC arası) vana kazancı Denklem 4.2'de yer almaktadır.

$$K_v = \frac{22}{(3-2) \cdot 60} = 0.367 \text{ litre/sn} \quad (4.2)$$

Bölüm 4.2.'de nedenleri açıklandığı gibi şebeke besleme vanası oldukça kısılarak (yaklaşık 6 – 12 litre/dk ya da 0.1 – 0.2 litre/sn) deneylerin yapılması gerektiğinden vana kazancı da aynı oranda azalacaktır. Süreç değişkeninin debisi 6 litre/dk ayarlanırsa Şekil 4.7.'deki vana karakteristiğinden yararlanarak yapılacak kazanç uyarlamasına göre vana kazancı $K_v = 0.088 \text{ litre/sn}$ ve dolayısıyla vana modeli Denklem 4.3'de olduğu gibi elde edilir.

$$G_v(s) = \frac{Q_i(s)}{V_c(s)} = \frac{0.088}{23s+1} \quad (4.3)$$

4.1.3. EVI 5M/13 Solenoid Vana

Şekil 4.8.'de görülen EVI 5M/13 solenoid vana cam dolgulu termoplastik polyester (%30) malzemeden kalıplanmış kapsül ile ısıya dayanıklı bobinden (200 °C ye kadar dayanıklı) meydana gelir. 10 milyondan fazla açma kapama yapabilirler. Yüksek nemli

ortamlarda kullanmak için uygundur [47]. Tablo 4.4.'de solenoid vana'nın teknik bilgileri verilmiştir.



Şekil 4. 8. EVI 5M/13 solenoid vana (amisco)

Tablo 4. 3. EVI 5M/13 solenoid vana teknik özellikleri

Standart Gerilim	24-110-230 V AC 12-24 V DC		
Gerilim toleransı	± % 10		
Sıcaklık Aralığı °C	-20 °C...+50 °C		
Görev Döngüsü	% 100		
	DC	AC (50 Hz)	AC (60 Hz)
Nominal Besleme DC W	10		
Güç Tüketimi AC VA		23	19
Nominal Besleme AC VA		13	11
Röle Sıcaklığı °C	50	50	45
Bakır Sıcaklığı °C	85	70	60

4.1.4. ECAP – 101 Kapasitif Seviye Transduseri

Şekil 4.9.'da görülen ECAP – 101 kapasitif seviye transduseri, iletken sıvılarda, düşük iletkenlikli sıvılarda, katı partiküllü ve toz malzemelerde, yapışkan ve asit/bazik sıvılarda seviyenin ölçülmesi amacıyla kullanılır. Sıvı tankları, glikol tankları, gıda makinaları, soğutma suyu tankları, gemiler, salamura tankları, atık su, şarap depoları, temiz su depoları, yağ tankları, sıvı tankları, yüksek sıcaklıklı tanklar, tahıl deposu, çimento silosu, kum, süt tozu, yem, un, organik ve plastik granül tanklarında kullanılırlar [48]. Tablo 4.5.'de ECAP – 101 kapasitif seviye transduserinin teknik bilgileri verilmiştir.

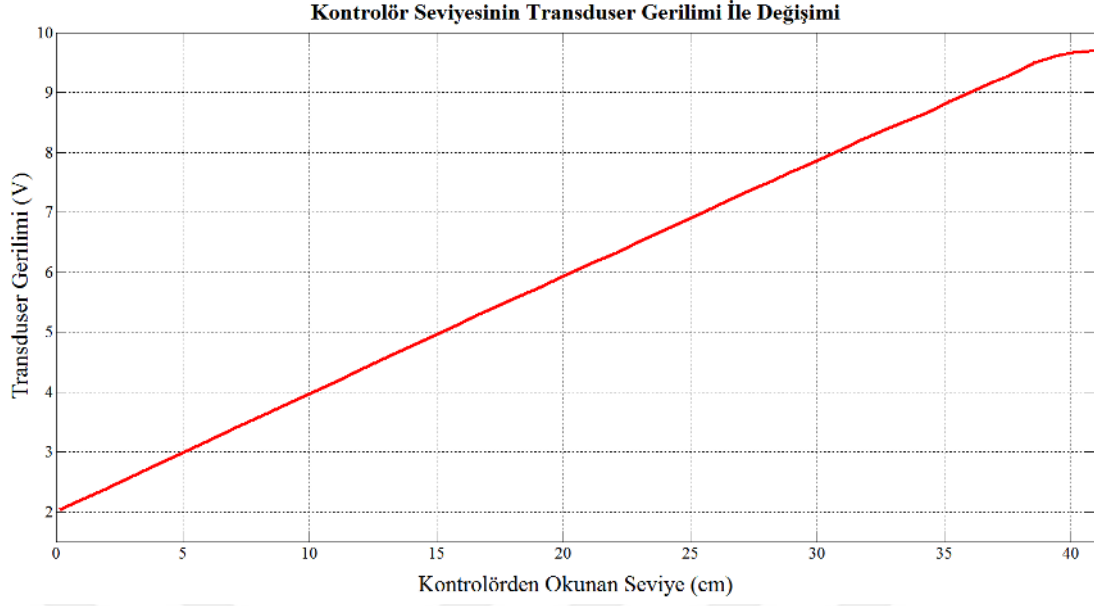


Şekil 4. 9. ECAP – 101 kapasitif seviye transduseri (ensim)

Tablo 4. 4. ECAP – 101 kapasitif seviye transduseri teknik özellikleri

Besleme	9-36 V DC
Çıkış	4-20 mA iki telli Std. 0-20 mA – 4-20 mA, 0-10 V üç telli Ops.
Hassasiyet	$\pm \% 0,5$, $\mp \% 0,8$, $\mp \% 1$
Kapasite Ölçü Sahası	1 pF...3nF
Min. Di-Elektrik Sabiti	1,6 ϵ_r
Çalışma Basıncı	(-)1...100 bar (Modele göre değişir)
Ortam Sıcaklığı	(-)20 / (+)60°C
İzolasyon	Maks. 500 V
Güç Tüketimi	Maks. 50 Mw
Elektrik Bağlantısı	Klemens
Koruma Sınıfı (EN60529)	PBT – IP 66, Alüminyum, Pas. Çelik IP 65
Test	EMC, Düşük Voltaj
Proba Gelebilecek Kuvvet	Maks. 40 NM

Şekil 4.10.'da Ecap-101 kapasitif seviye transduserininden alınan 4 – 20 mA analog sinyal çıkışına seri direnç (500 Ω) bağlanarak 2 – 10 V DC gerilim elde edilerek 2 – 10 V DC gerilim aralığına karşılık kontrolörden ayarlanan 0 – 40 cm ölçüm aralığı karşılaştırılmasında gerilimin seviye ile doğrusal bir şekilde değiştiği görülmektedir.



Şekil 4. 10. Transduserin ölçüm gerilimine (2 – 10 V) bağlı kontrolörden okunan seviye değişimi

4.1.5. USB 1902 Veri Toplama Kartı

Şekil 4.11.'de görülen USB-1900 serisi veri toplama kartları karma sinyal testleri, laboratuvar araştırması ve fabrika otomasyonu gibi alanlarda kullanılmaktadır [49].

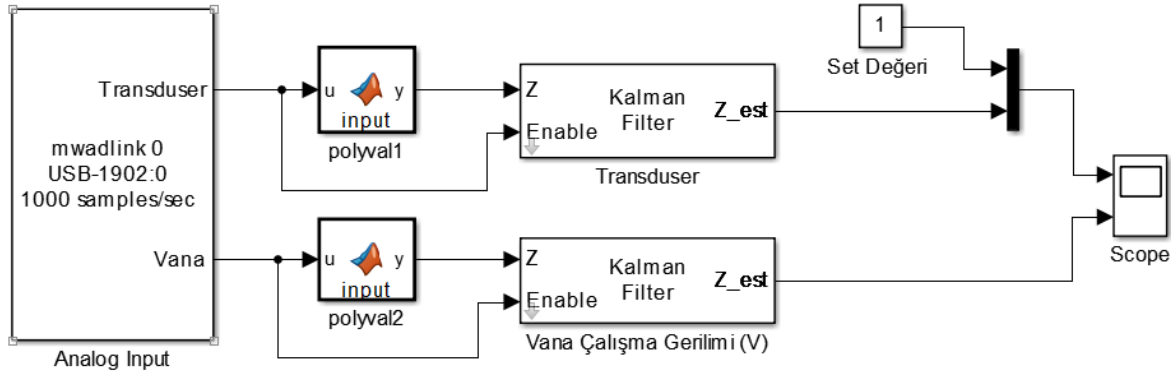


Şekil 4. 11. USB 1902 veri toplama kartı (adlink)

Özellikleri:

- USB 2.0 yüksek hızlı USB veri yolu desteğine sahiptir.
- 16-CH 250 KS/s voltaj girişi
- 2-CH 1 MS/s voltaj çıkışı
- Analog ve dijital tetikleyiciye sahiptir.
- Vida terminalleri çıkarılabilir yapıdadır.

- Desteklenen işletim sistemleri Windows 7/8/10, Linux ve Mac'dir.
- LabVIEW, MATLAB, C/C++, Visual Basic, Visual Studio.NET programları için kullanılabilir.
- Yazılım programı U-test'dir.



Şekil 4.12. Veri kartı MATLAB/Simulink arayüzü

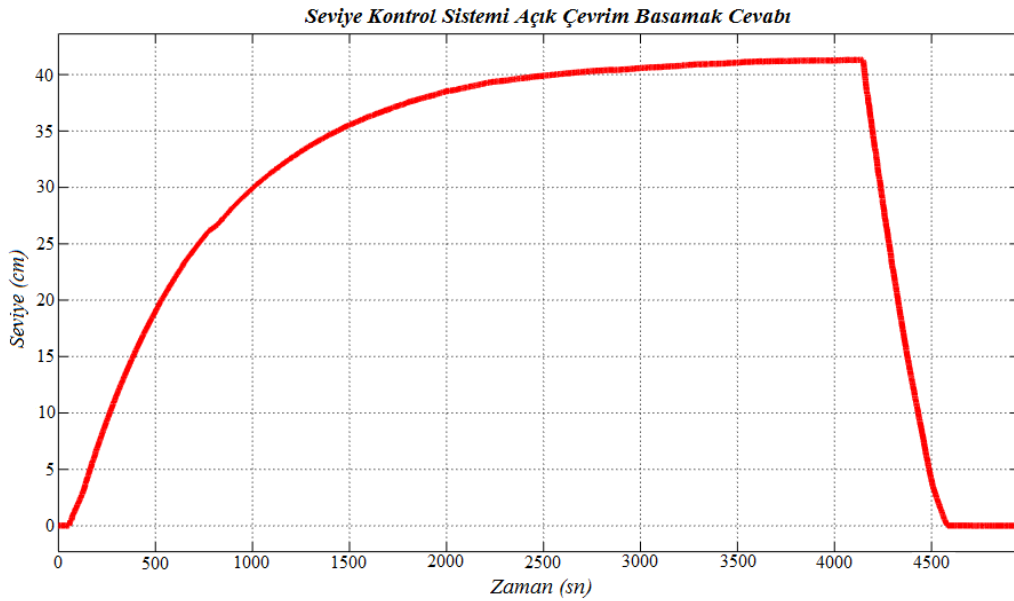
Şekil 4.12.'de transduserden ölçülen analog sinyal bilgisi $4 - 20\text{ mA}$ ve otomatik kontrol vanasının kontrolünde kullanılan $20 - 4\text{ mA}$ analog kontrol sinyali direnç ($500\ \Omega$) ile $2 - 10\text{ V DC}$ gerilimine dönüştürülerek veri kartına iletilmektedir. Veri kartı transduser ve vanadan aldığı analog sinyal bilgilerini dijital sinyale çevirerek bilgisayara aktarır. Aktarılan dijital sinyal bilgisi ile deneysel olarak transduser ve vanadan elde edilen analog sinyal bilgileri ile karşılaştırılıp ölçüm hatası azaltıldıktan sonra filtreden geçirilip oluşan gürültü azaltılarak kontrol sistemlerinin çalışmalarına ait grafikler elde edilmiştir.

4.2. Sıvı Seviye Kontrol Sisteminin Yaklaşık Modelinin Çıkarılması

Sıvı seviye kontrol sisteminin yaklaşık matematiksel modeli kontrol sisteminin deneysel olarak elde edilen açık çevrim basamak yanıtından yararlanılarak elde edilmiştir. Burada, hem sıvı seviye kontrol sisteminin basamak giriş debisine bağlı olarak transduserden ölçülen sıvı seviyesindeki değişimler hem de otomatik kontrol vanasının kontrol gerilimine bağlı olarak ölçülen sıvı seviyesindeki değişimler deneysel olarak elde edilmiştir. Ancak, deneysel ölçüm yaparken açık çevrim basamak yanıtını olumsuz etkileyen aşağıdaki problemler göz önünde bulundurularak süreç değişkeninin debisi ve tahliye vanasının açıklığı dikkate alınarak sıvı seviye kontrol sisteminin yaklaşık matematiksel modeli elde edilmiştir.

- Süreç değişkeninin girişi, tankın alt kısmında yer aldığı için tanktaki sıvı seviyesi yükseldikçe süreç değişkeninin giriş debisinde bir miktar azalma gerçekleşir.
- Sıvı seviye kontrol sisteminin tankı küçük boyutlu (yaklaşık 30 litre) ve Şekil 4.7.'de de görüleceği gibi otomatik kontrol vanasının çok küçük kontrol gerilimlerinde dahi sıvı akışının yüksek (2.5 volt da 20.20 litre/dk) olmasından kaynaklı olarak açık çevrim basamak yanıtının elde edilebilmesi amacıyla küresel vana kullanılarak süreç değişkeninin giriş debisi azaltılması (yaklaşık 0.1 litre/sn) gerektiğinden gerek kontrol sisteminin modellenmesinde gerek deneysel sonuçların elde edilmesinde bu durum göz önünde bulundurulmuştur. Küresel vana kullanılarak arttırılan giriş debisi süreç değişkeninin tank üzerindeki ölçüm aralığını aşır taşmaya neden olduğundan sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı elde edilememektedir.
- Sıvı seviye kontrol sistemindeki tahliye vanası açıklığı seviye değişimini önemli ölçüde etkiler.

Şekil 4.13'de, tahliye vanası tam açık ve besleme vanası oldukça kısık olmak kaydıyla yaklaşık $q_i = 0.1 \text{ litre/sn}$ giriş debisi için ve 4200. saniyede ise giriş debisi sıfır yapılarak elde edilen sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim yanıtı görülmektedir.



Şekil 4. 13. Sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı

Şekil 4.13.'deki sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtında yükselme ve düşme sürelerinin farklı olması kontrol sisteminin doğrusal olmamasından kaynaklanmaktadır. Süreç değişkeninin açık çevrim basamak yanıtındaki yükselme ve düşme sürelerinin farklı olması açık çevrim basamak parametrelerinin belirlenmesini zorlaştırmaktadır. Bu nedenden ötürü açık çevrim basamak yanıtındaki süreç değişkeninin yükselmesi dikkate alınarak açık çevrim basamak parametreleri belirlenmiştir. Süreç değişkeninin debisine bağlı olarak kontrol sisteminin birinci dereceden transfer fonksiyonu Denklem 4.4'deki gibidir.

$$G_1(s) = \frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (4.4)$$

L kontrol sisteminin gecikmesi, τ zaman sabitesi ve K ise kalıcı durum kazancıdır. Kontrol sistemi kalıcı duruma yaklaşık $t = 5\tau$ gibi bir süre sonunda ulaşır. Şekil 4.13.'deki sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtından sistemin gecikmesi $L = 60 \text{ sn}$ tankın dolma zaman sabitesi $\tau_y = 700 \text{ sn}$, tankın boşalma zaman sabitesi ise $\tau_b = 80 \text{ sn}$ 'dir. Sıvı seviye kontrol sisteminin süreç değişkeni debisi $q_i = 0.1 \text{ litre/sn}$, ölçüm aralığı $h = 42 \text{ cm}$ olarak kabul edilirse kalıcı durum kazancı $K = 420$ olarak belirlenmiştir. Sıvı seviye kontrol sisteminin yaklaşık tanı modeli Denklem 4.5'de olduğu gibidir.

$$G_1(s) = \frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{420}{700s + 1} e^{-60s} \quad (4.5)$$

Kontrol sistemlerinde gecikme süresi küçük ve gecikme terimi Denklem 4.6'da görüldüğü gibidir.

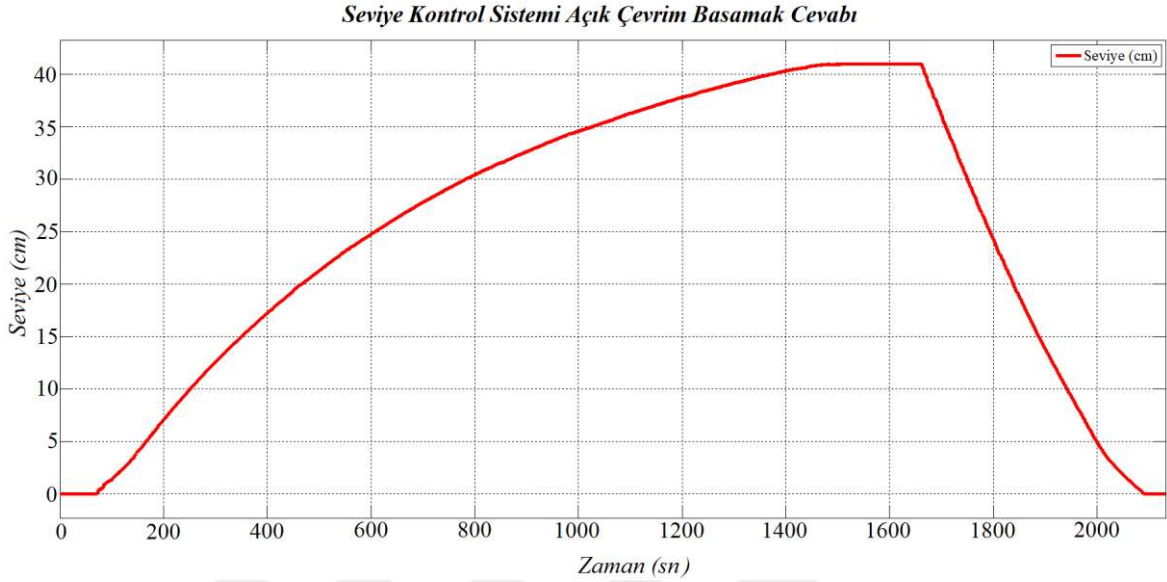
$$e^{-Ls} \cong \frac{1}{1 + Ls} \quad (4.6)$$

Sıvı seviye kontrol sisteminin ikinci dereceden aşırı sönümlü yaklaşık modeli Denklem 4.7'de gösterilmiştir.

$$G_1(s) = \frac{H(s)}{Q_i(s)} = \frac{K_d}{(\tau_y s + 1)(1 + Ls)} = \frac{0.01}{(s + 0.00143)(s + 0.0167)} \quad (4.7)$$

Şekil 4.14.'de tahliye vanası tam açık ve küresel vana kısık (yaklaşık 0.1 litre/sn) olacak şekilde $v_c = 3 - 2 = 1 \text{ volt}$ vana kontrol gerilimi için ve 1670. saniyede ise vana

kontrol gerilimi sıfır yapılarak elde edilen sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı verilmiştir.



Şekil 4. 14. Şebeke vanasından akan sıvı miktarı yaklaşık 0.1 litre/sn. iken sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı

Şekil 4.14.'de, tank 1470. saniyede taşmaya başladığı için basamak yanıtının sürekli durumdaki seviye ve zaman tespit edilmiştir. Buna rağmen süreç değişkeninin debisi dikkate alınarak sıvı seviye kontrol sisteminin birinci dereceden transfer fonksiyonunun parametreleri basamak yanıtından sistemin gecikmesi $L = 72 \text{ sn}$ tankın dolma zaman sabitesi $\tau_y = 700 \text{ sn}$, tankın boşalma zaman sabitesi ise $\tau_b = 85 \text{ sn}$ 'dir.

$$G_2(s) = \frac{H(s)}{V_c(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (4.8)$$

Otomatik kontrol vanasının zaman sabitesi kontrol sisteminin zaman sabitesinden oldukça küçük olduğundan Şekil 4.13.'deki sıvı seviye sisteminin açık çevrim basamak yanıtıyla Şekil 4.14.'deki basamak yanıtı birbirine yakın sonuç vermektedir.

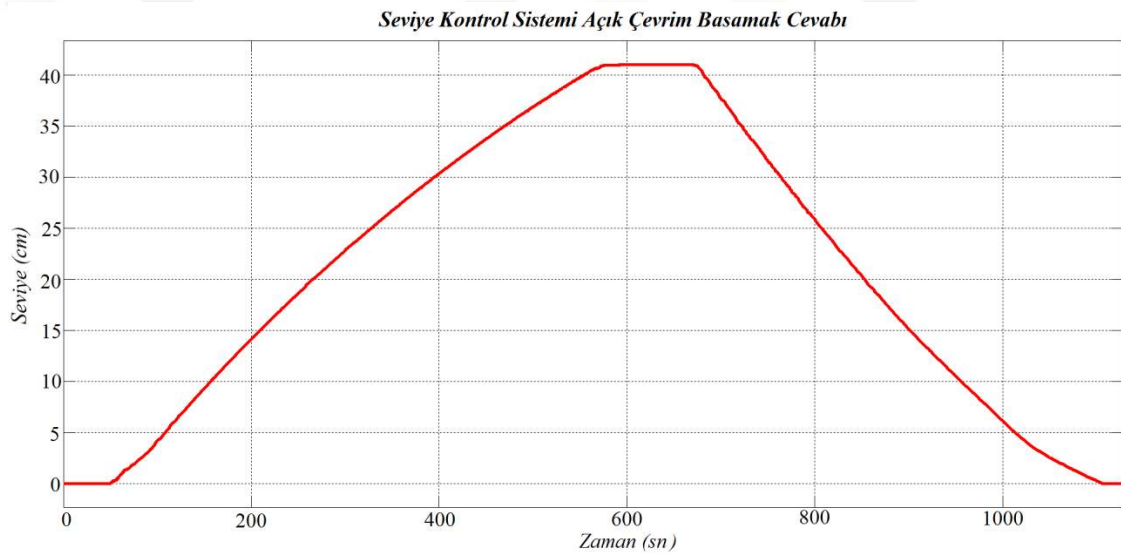
Vana kontrol gerilimi $v_c = 1 \text{ volt}$ ve kalıcı durumdaki tank seviyesi $h = 45 \text{ cm}$ 'ye ulaşacağı varsayılırsa kalıcı durum kazancı $K = 45 \text{ cm}$ olarak belirlenmiştir. Sıvı seviye kontrol sisteminin yaklaşık tanı modeli Denklem 4.9'da olduğu gibidir.

$$G_2(s) = \frac{H(s)}{V_c(s)} = \frac{45}{700s + 1} e^{-72s} \quad (4.9)$$

Kontrol sistemlerinde gecikme süresinin küçük olduğu ve gecikme süresinin yaklaşık değeri kullanılarak vana ile birlikte sıvı seviye kontrol sisteminin ikinci dereceden aşırı sönümlü yaklaşık modeli Denklem 4.10'da gösterilmiştir.

$$G_2(s) = \frac{H(s)}{V_c(s)} = \frac{K}{(\tau s + 1)(1 + Ls)} = \frac{0.00089}{(s + 0.00143)(s + 0.0139)} \quad (4.10)$$

Şekil 4.15.'de tahliye vanası tam açık ve küresel vana biraz daha açılarak süreç değişkeninin debisi artırıldığında $v_c = 3 - 2 = 1 \text{ volt}$ vana kontrol gerilimi için ve 690. saniyede ise vana kontrol gerilimi sıfır yapılarak elde edilen sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı verilmiştir.



Şekil 4. 15. Şebeke vanasından akan sıvı miktarı biraz daha artırıldığında oluşan sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı

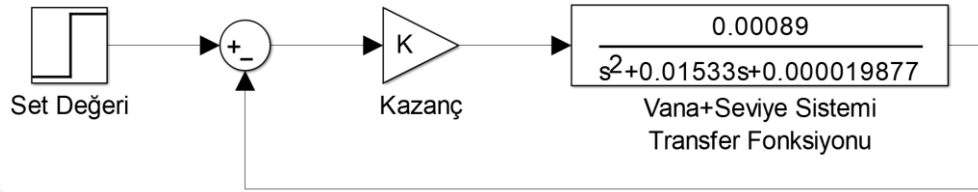
Tank çok daha kısa sürede dolmakla birlikte taşma seviyesine ulaştığı için yaklaşık modelin elde edilmesi için gerekli parametreleri belirlemek zorlaşmaktadır.

4.3. Sıvı Seviye Kontrol Sistemi için KYE ile PID Tasarımı ve MATLAB Simülasyonu

KYE ile tasarım yaklaşımını sadeleştirmek amacıyla sistemdeki gecikme teriminin yaklaşık karşılığı kullanılarak vana ile birlikte sıvı seviye sisteminin elde edilen Denklem 4.10'daki yaklaşık modeli esas alınmıştır.

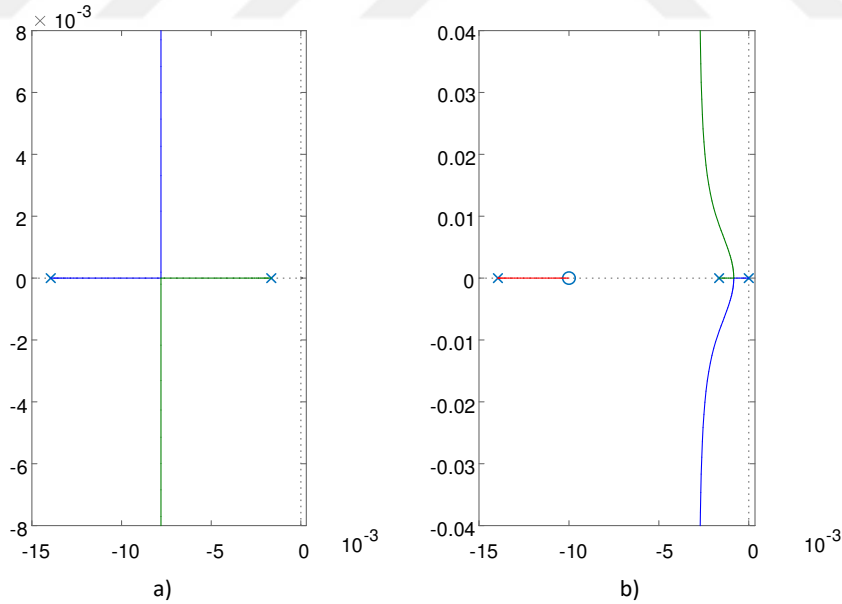
$$G_2(s) = \frac{H(s)}{V_c(s)} = \frac{K}{(\tau s+1)(1+Ls)} = \frac{0.00089}{(s+0.00143)(s+0.0139)} \quad (4.11)$$

Endüstriyel süreç kontrolörün set değeri sıvı seviyesi (*cm*) olarak kontrolöre girilmektedir ve maksimum sıvı seviyesi 42 *cm*'de 10 *volt* olacak şekilde kontrolör kalibre edilmiştir. Buna göre transduser kazancı bir olarak alınmıştır. Köklerin yer eğrisi (KYE) incelenecek kontrol sistemi aşağıdaki şekilde gösterilebilir.



Şekil 4. 16. Sıvı seviye kontrol sisteminin KYE ile MATLAB simülasyonu

Şekil 4.16.'daki blok şemaya göre sıvı seviye kontrol sisteminin P ve PI kontrolör ile çizilen KYE aşağıdaki Şekil 4.17.'de verilmiştir.

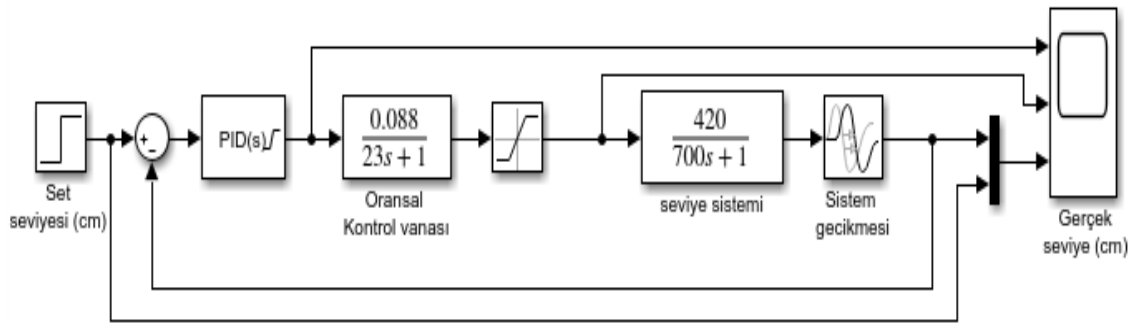


Şekil 4. 17. Sıvı seviye kontrol sisteminin köklerin yer eğrisi a) P, b) PI

Kontrol sistemi tip 0 ve aşırı sönümlü olduğu için düşük kazançlı bir oransal (P) kontrolör ile kontrol edilebilir ancak kalıcı durum hatası ortaya çıkacaktır. Oransal kazanç arttırıldıkça kalıcı durum hatası azalacaktır ancak kontrol sisteminin süreç değişkeni

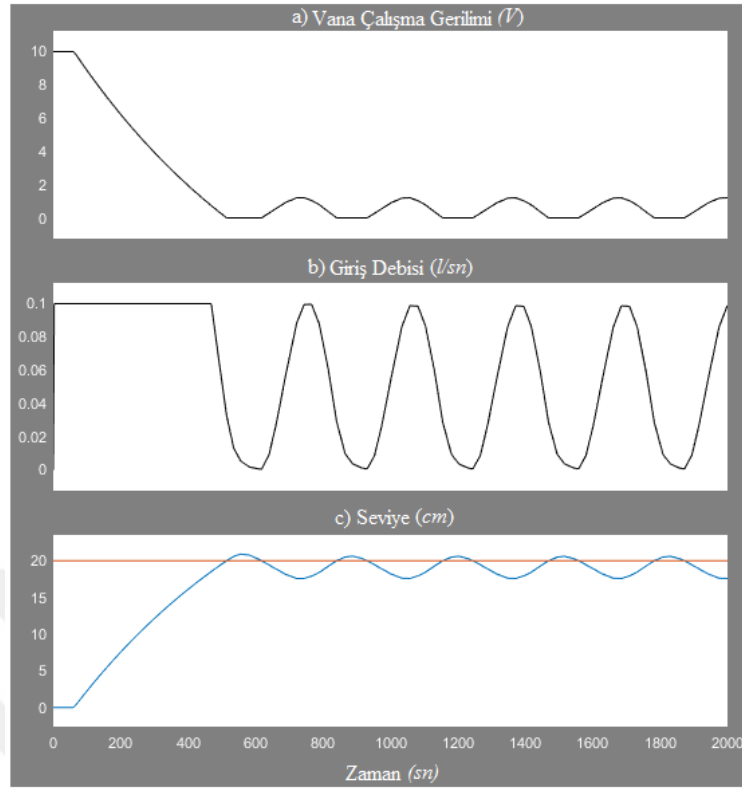
kontrolünde önemli salınımlar oluşacaktır. Şekil 4.17.b’de sıfırı $z = -0.01$ ‘ e yerleştirilen PI kontrolör ile sıvı seviye kontrol sisteminin KYE’si verilmiştir. Düşük kazançlı PI kontrolörlerle kontrol sistemi kalıcı durum hatası olmadan kontrol edilebilir. Dolayısıyla kontrol sistemi için analitik hesaplamalar yapmak yerine Şekil 4.17.’deki KYE’lerinden yararlanarak deneme-yanılma yöntemiyle düşük kazançlı P ve sıfırı $z = -0.01$ civarına ya da daha orijine yakın yerleştirilen PI kontrolör tasarlanabilir. Bu kontrol sistemi için PID kontrolör tasarlamak çok da anlamlı olmayacaktır.

KYE, otomatik kontrol vanasının modeli, belirlenen kontrol parametreleri ve sıvı seviye kontrol sisteminin belirlenen modeli kullanılarak oluşturulan kontrol sisteminin MATLAB/Simulink simülasyonu Şekil 4.18.’de verilmiştir. PID kontrolör çıkışı 2 – 10 volt aralığında ayarlanarak deneysel düzencele uyumlu hale getirilmiştir.



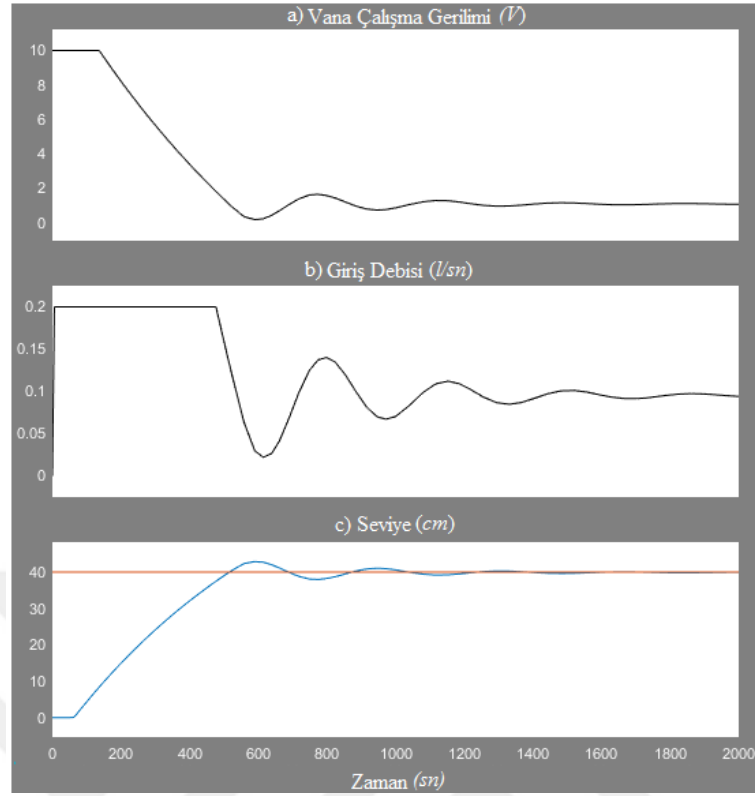
Şekil 4. 18. Sıvı seviye kontrol sisteminin KYE ile PID tasarımı MATLAB simülasyonu

$K_p = 0.5$ olan oransal kontrolör ile 20 cm set değeri için kontrol sisteminin değişkenleri Şekil 4.19.’da verilmiştir. Daha düşük oransal kazançlarda, salınımlar azalacak ancak set değerini yakalama süresi ve kalıcı durum hatası artacaktır. Sıvı seviye kontrol sistemi $K_p = 0.5$ ve 20 cm set değeri için yaklaşık 50 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 500 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 550. sn’de tepe süresine (t_p) ulaşp yaklaşık 600. sn’de set değerine salınım yaparak yerleştiği (t_s) görülmektedir. Vana kontrol gerilimine bağlı olarak oluşan vana % açıklığının 0 – 0.1 litre aralığında salınım yaparak sıvı geçişine izin verdiği Şekil 4.19.’da görülmektedir.



Şekil 4. 19. $K_p = 0.5$ iken 20 cm set değerindeki sıvı seviye kontrol sisteminin davranışı a) Vana çalışma gerilimi (V) b) Giriş debisi (l/sn) c) Seviye (cm)

$K_p = 0.3$, $K_i = 0.0001$ olan bir PI kontrolör ile Şekil 4.18.'deki blok şema esas alınarak elde edilen kontrol sisteminin değişkenleri Şekil 4.20.'de verilmiştir. Dolayısıyla I kontrolör etkisi ile kalıcı durum hatası ortadan kaldırılmıştır. Daha düşük oransal kazançlarda salınımlar azalacak ancak set değerine yerleşme süresi artacaktır. Sıvı seviye kontrol sistemi $K_p = 0.3$, $K_i = 0.0001$ ve 20 cm set değeri için yaklaşık 50 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 500 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 600 sn 'de tepe süresine (t_p) ulaşır yaklaşık 700 sn 'de set değerine yerleştiği (t_s) görülmektedir. Vana kontrol gerilimine bağlı olarak oluşan vana % açıklığının yaklaşık 0.1 litre ye bir miktar salınım yaptıktan sonra yerleştiği Şekil 4.20.'de görülmektedir.



Şekil 4. 20. $K_p = 0.3$, $K_i = 0.0001$ iken 20 cm set değerindeki sıvı seviye kontrol sisteminin davranışı a) Vana çalışma gerilimi (V) b) Giriş debisi (l/sn) c) Seviye (cm)

4.4. Sıvı Seviye Kontrol Sistemi için PID Parametrelerinin Ayarlanması

Ziegler-Nichols (ZN) açık çevrim PID parametrelerinin belirlenmesi için Şekil 4.14.'de sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtından belirlenen sistemin gecikmesi $L = 72 \text{ sn}$, tankın dolma zaman sabitesi $\tau_y = 700 \text{ sn}$, kalıcı durum kazancı $K = 45$ olarak alınmıştır. Ziegler-Nichols açık çevrim yöntemine göre hesaplanan P, PI ve PID parametreleri Tablo 4.6.'da verilmiştir.

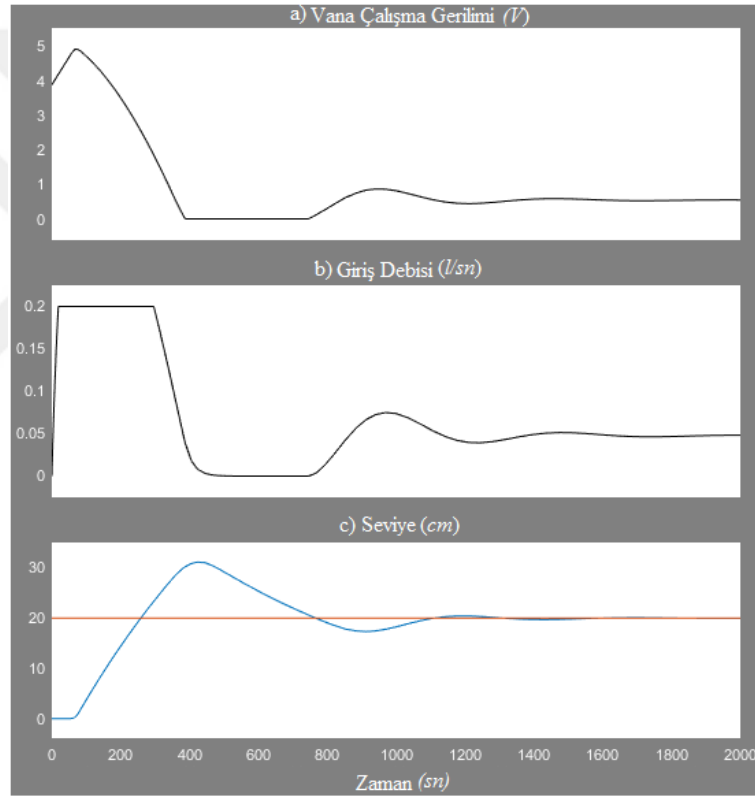
Tablo 4. 5. Sıvı seviye kontrol sisteminin Ziegler-Nichols açık çevrim ayarlama yöntemi P, PI, PID kontrol parametreleri ($K = 45$, $L = 72 \text{ sn}$, $\tau_y = 700 \text{ sn}$)

Kontrolör	K_p	τ_i	τ_d
P	0.216	∞	0
PI	0.194	240	0
PID	0.26	142	36

Tablo 4.6.'da Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanan PI kontrolör parametreleri ile yukarıda MATLAB/Simulink ile incelenen sistemden elde edilen sonuçlar aşağıdaki Şekil

4.21.'de verilmiştir ve yukarıda KYE yaklaşımına göre belirlenen parametrelerle uyumlu olduğu görülmektedir.

Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanan PI kontrolör parametreleri kullanılarak ve 20 cm set değeri için sıvı seviye kontrol sisteminde yaklaşık 50 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 150 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 450. sn'de tepe süresine (t_p) ulaşp yaklaşık 1450. sn' de set değerine yerleştiği (t_s), Şekil 4.21. görülmektedir. Vana kontrol gerilimine bağlı olarak oluşan vana % açıklığının yaklaşık 0.05 litreye salınım yaptıktan sonra yerleştiği Şekil 4.21.'de görülmektedir.



Şekil 4. 21. Ziegler-Nichols yöntemi ile MATLAB/Simulink parametrelerinin karşılaştırması

Bu bölümde yaklaşık modeli çıkarılarak KYE ve Ziegler-Nichols yöntemleri ile analitik olarak kontrolör tasarımları verilmiş ve MATLAB/Simulink ile simülasyonları yapılan sıvı seviye kontrol sisteminden elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

Şekil 4.19. ve 4.21.'de, kontrolör parametrelerini ve dolayısıyla kontrol sisteminin performansını etkileyen önemli parametreler;

- Giriş suyunun debisine bağlı olarak vana kazancının ve dolayısıyla sistem kazancının değişmesi,
- Sistem gecikmesinin değişmesidir.

Bu nedenlerle, aşağıdaki deneysel sonuçlarla Şekil 4.19. ve 4.21. karşılaştırılırken bu parametrelerin farklılığının etkileri dikkate alınmalıdır.

4.5. Sıvı Seviye Kontrol Sistemi Deneysel Sonuçları

Deneysel verilerden yararlanılarak elde edilen sıvı seviye kontrol sisteminin yaklaşık modeli kontrol sistemdeki en ufak değişiklik ile değişecektir. Örneğin tahliye vanasının konumunun değiştirilmesi, tahliye vanasının açıklığına bağlı olarak oransal vananın kazancının değişmesi, oransal vana ve transduser gibi elemanların giriş-çıkış karakteristiklerinin doğrusal olmaması, ölçme hataları, transduser ve vananın kalibrasyonu gibi etmenler sıvı seviye kontrol sisteminin performansını etkileyerek PID kontrol parametrelerinin belirlenmesini zorlaştırır. Şekil 4.22.'de endüstriyel PID kontrol tarafından kontrol edilen sıvı seviye kontrol sisteminin görüntüsü yer almaktadır.

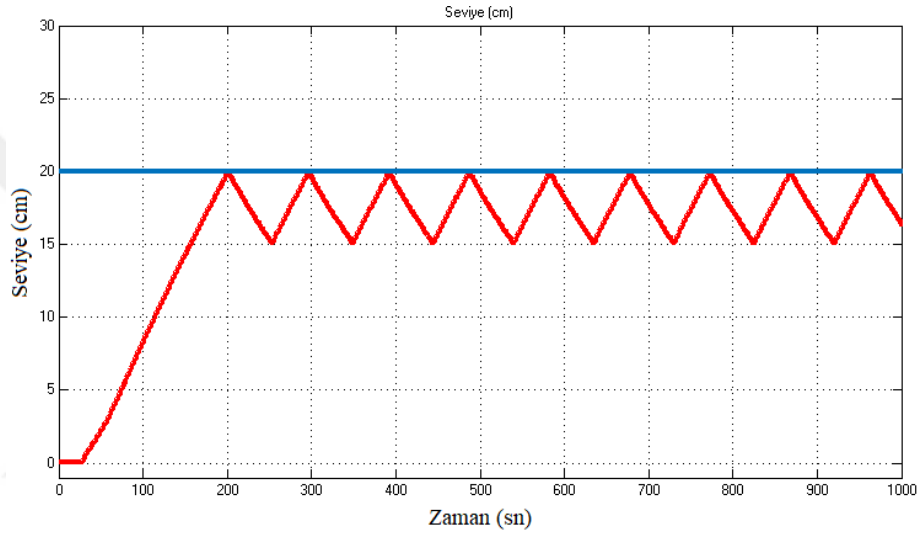


Şekil 4. 22. Sıvı seviye kontrol sistemi

Ziegler-Nichols'un açık çevrim yöntemine göre belirlenip sıvı seviye kontrol sisteminin yapısı göz önünde bulundurularak ayarlanan deneysel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

4.5.1. Seviye Kontrol Sisteminin Aç-Kapa Kontrolü

Şekil 4.23.'de sıvı seviye kontrol sisteminin mikro denetleyici tarafından gerçekleştirilen 20 cm set değerindeki aç-kapa kontrol yanıtı görülmektedir.



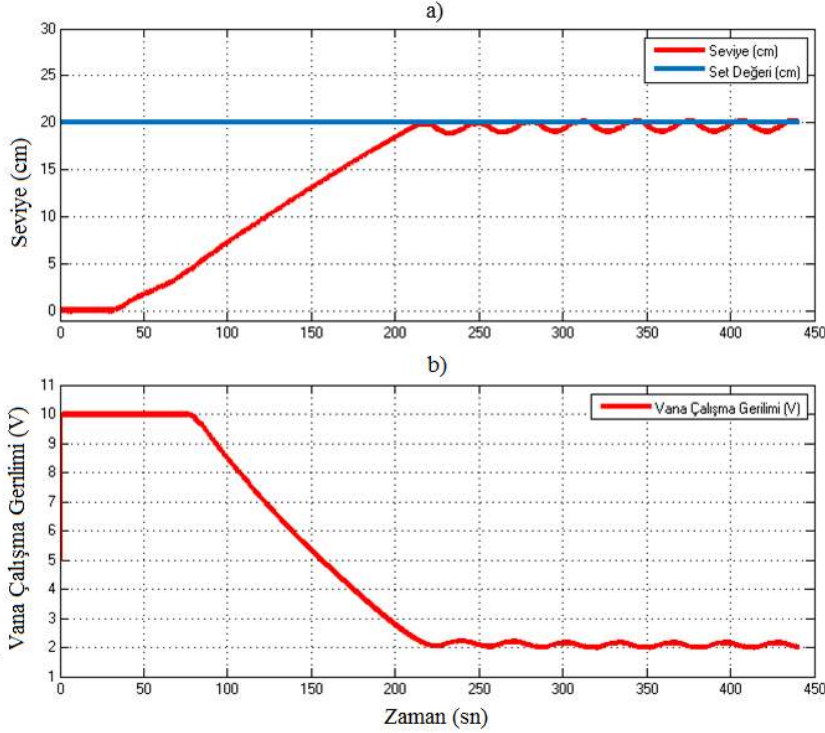
Şekil 4. 23. Sıvı seviye kontrol sisteminin 20 cm set değerindeki aç-kapa kontrol yanıtı (histerezis=0)

Şekil 4.23.'de sıvı seviye kontrol sistemi 20 cm set değerinde aç-kapa kontrol için yaklaşık 30 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 170 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 200.sn'de tepe süresine (t_p) ulaşır yaklaşık bu noktadan itibaren set değerine salınım yaparak yerleştiği (t_s) görülmektedir.

4.5.2. Seviye Kontrol Sisteminin Oransal Kontrolü

Şekil 4.24.'de süreç değişkeninin debisi azaltılıp oransal bant değeri $PB = \%20$ seçilerek ölçülen seviye ve vananın kontrol sinyali görülmektedir. Oransal bant artırıldıkça sürekli durumdaki salınımlar azalmakta ve oransal bant azaldıkça sürekli durumdaki salınımlar artmaktadır. Şekil 4.24.'de sıvı seviye kontrol sistemi $PB = \%20$ için yaklaşık 40 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 170 sn gibi bir yükselme

süresinden (t_r) sonra 210. sn'de tepe süresine (t_p) ulaşp bu noktadan sonra set değerine salınım yaparak yerleştiği (t_s) görülmektedir.



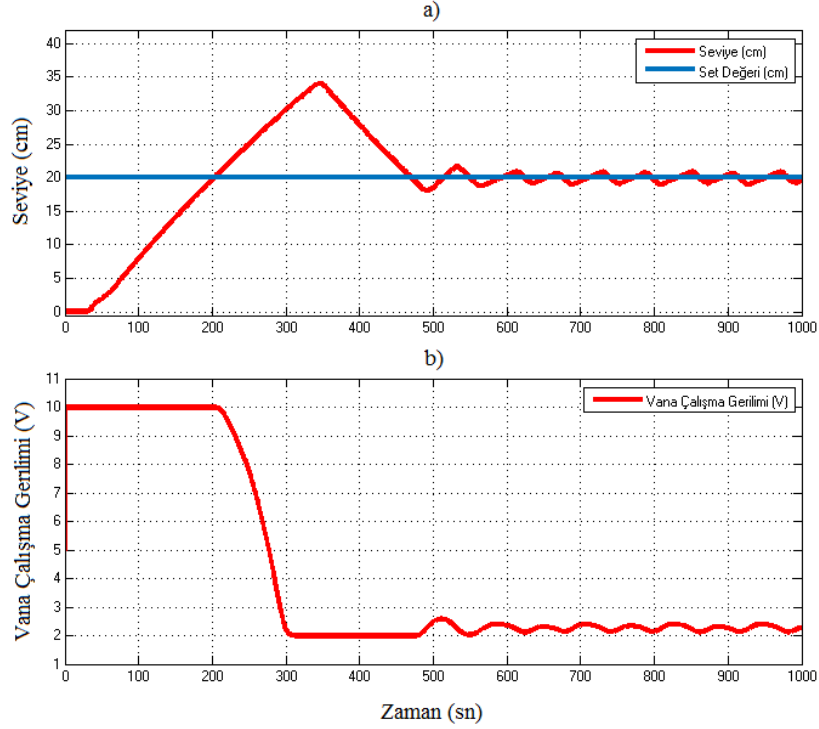
Şekil 4. 24. Sıvı seviye kontrol sisteminin $PB = \%20$ iken 20 cm değeri için oransal (P) kontrol yanıtı a) Seviye (cm), b) Vana Çalışma Gerilimi (V)

Şekil 4.24.'den, oransal kazancın yaklaşık $K_p = 0.67$ olduğu kolayca hesaplanabilir. Dolayısıyla besleme suyunun ayarlanan debisini de bağılı olarak değişen süreç kontrolörün kalibrasyonu gereği oransal bant ile oransal kazanç ilişkisinin yaklaşık $K_p = \frac{100}{\%X_p} \cdot \frac{1}{7.5}$ şeklinde olduğu anlaşılmaktadır.

4.5.3. Seviye Kontrol Sisteminin Oransal-İntegral Kontrolü

Şekil 4.25.'de süreç değişkeninin debisi çok azaltılıp oransal bant değeri $PB = \%20$ ve integral zaman sabiti $\tau_i = 11$ seçilerek elde edilen gerçek seviye ve vananın kontrol sinyali verilmiştir. İntegral zaman sabitinin kullanılmasıyla kalıcı durumdaki salınımlar artmakla birlikte kalıcı durum hatasının azaldığı görülmektedir. Ayrıca integral zaman sabiti set değerine kadar vananın kontrolünde bir gecikme yaratarak aşmaya neden olmaktadır. Şekil 4.25.'de sıvı seviye kontrol sistemi $PB = \%20, \tau_i = 11$ için yaklaşık 40 sn gibi bir sistem

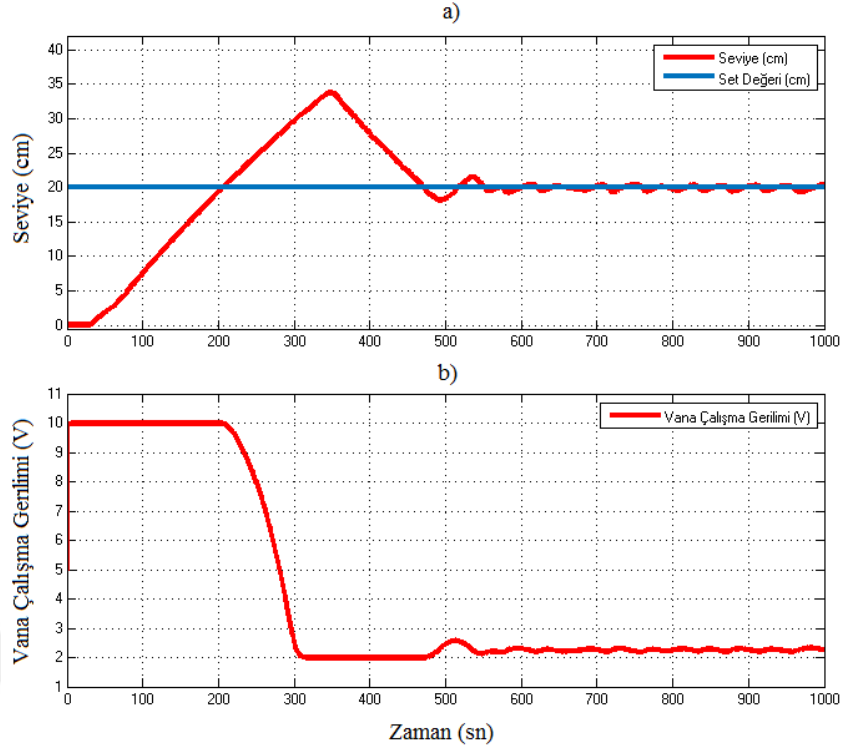
gecikmesi (L) ve 160 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 340. sn'de tepe süresine (t_p) ulaşp 600. sn'den sonra set değerine salınım yaparak yerleştiği (t_s) görülmektedir.



Şekil 4. 25. Sıvı seviye kontrol sisteminin $PB = \%20$ ve $\tau_i = 11$ iken 20 cm set değeri için PI kontrol yanıtı a)Seviye (cm), b) Vana Çalışma Gerilimi (V)

4.5.4. Seviye Kontrol Sisteminin Oransal-İntegral-Türev Kontrolü

Şekil 4.26.'da süreç değişkeninin debisi oldukça çok azaltılıp oransal bant değeri $PB = \%20$, integral zaman sabiti $\tau_i = 11$ ve türev zaman sabiti $\tau_d = 4$ seçilerek elde edilen seviye (cm) ve vananın kontrol sinyali verilmiştir. İntegral zaman sabitinin kullanılmasıyla oluşan salınım genliği türev zaman sabitinin kullanılmasıyla azalır. Ancak türev zaman sabitinin salınım sıklığını arttırdığı görülmektedir. Şekil 4.26.'da sıvı seviye kontrol sistemi $PB = \%20$, $\tau_i = 11$, $\tau_d = 4$ için yaklaşık 40 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 160 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 340. sn'de tepe süresine (t_p) ulaşp 550. sn'den sonra set değerine salınım yaparak yerleştiği (t_s) görülmektedir.



Şekil 4. 26. Sıvı seviye kontrol sisteminin $PB = \%20$, $\tau_i = 11$ ve $\tau_d = 4$ iken 20 cm set değeri için PID kontrol yanıtı a) Seviye (cm), b) Vana Çalışma Gerilimi (V)

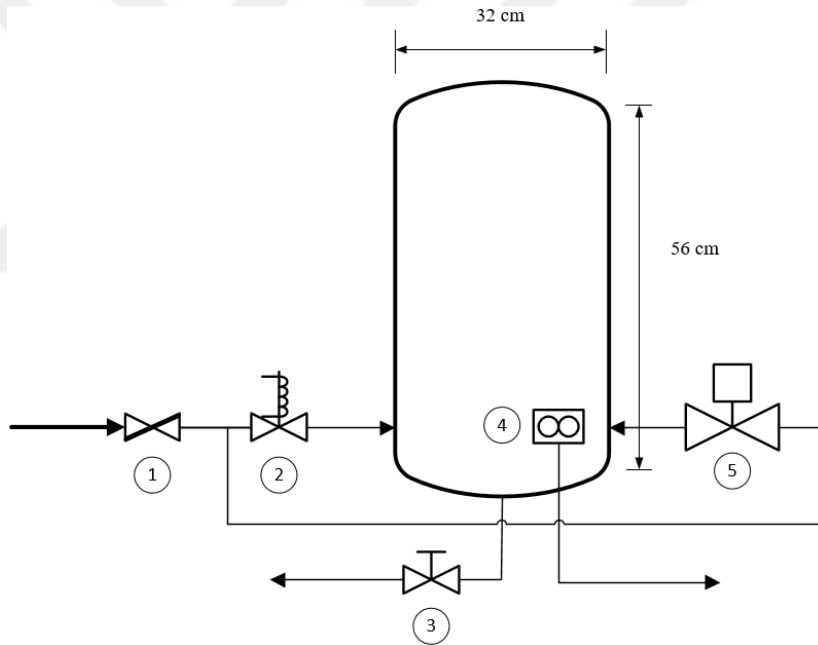
Şekil 4.24. ve 4.26.'da verilen deneysel sonuçlar, Şekil 4.19. ve 4.21.'de verilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında deneysel sonuçlarda kalıcı durumdaki salınımların fazla ve sürekli olduğu ve bunun nedeninin de kontrol vanasının doğrusal olmayan karakteristiğinden, açma-kapama süresinin çok fazla olmasından ve vananın daha çok aç-kapa etkisi ile çalışmasından ortaya çıktığı değerlendirilmektedir. Kontrolör parametreleri ile yükselme sürelerindeki küçük farklılıklar ise vana ve dolayısıyla sistem kazancındaki farklılıklardan ortaya çıkmaktadır.

5. SIVI AKIŞ KONTROL SİSTEMİNİN TASARIMI, MODELLENMESİ VE SİMÜLASYONU

Bu bölümde, elektriksel ve mekanik montajı yapılan sıvı akış kontrol sisteminde kullanılan süreç kontrol birimlerinin karakteristik özellikleri anlatılarak hazırlanan sıvı akış kontrol sisteminin modellenmesi, MATLAB/Simulink simülasyonu ile oluşturulan PID kontrolör tasarımı ve elde edilen deneysel sonuçlar açıklanmıştır.

5.1. Sıvı Akış Kontrol Seti

Şekil 5.1.'deki sıvı akış kontrol sisteminin süreç şemasında süreç değişkeninin giriş-çıkışının kontrol edilmesinde kullanılan kontrol birimleri numaralandırılarak gösterilmiştir.



Şekil 5. 1. Sıvı akış kontrol seti süreç şeması

Küresel vana (1), sıvı seviye kontrol sistemine süreç değişkeninin girişini manuel kontrol yapılarak durdurup başlatmak için kullanılır. Solenoid vana (2), sıvı seviye kontrol sisteminde istenilen set değerinde aç-kapa yaparak süreç değişkende salınım oluşacak şekilde kontrol etmek için kullanılır. Manuel vana (3), süreç değişkeninin tank içerisinden tahliyesini yapmak ve kontrol sistemi içerisinde bozucu giriş etkisi yaratmak amacıyla kullanılır. Sıvı akış transduseri (4), kontrolör tarafından kontrolöre girilen set değeri kadar

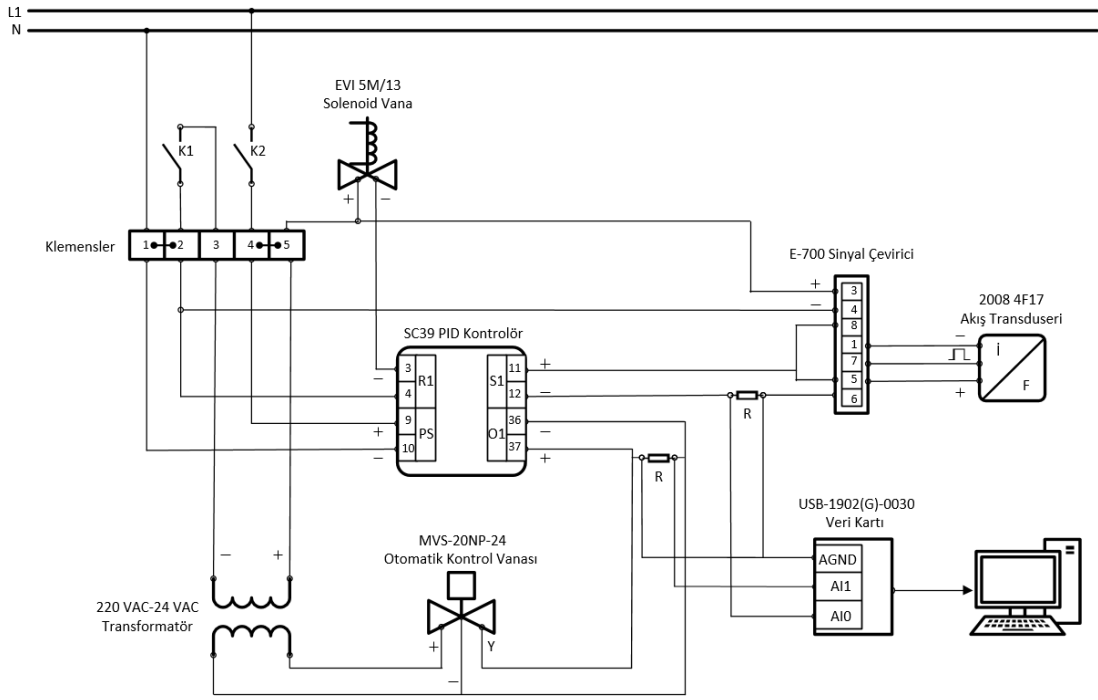
süreç değişkeninin geçişini sağlamakta kullanılır. Otomatik kontrol vanası (5), PID kontrolör tarafından belirlenen bir açıklıkta kalarak süreç değişkeninin istenilen set değerinde kalmasını sağlamada kullanılır.



Şekil 5. 2. Sıvı akış kontrol sistemi

Şekil 5.2.'de mekanik montajı yapılmış sıvı akış kontrol sistemi birer adet türbin akış transduseri (2008 4F17), PID kontrolör (SC39), oransal kontrol vanası (MVS- 20 NP -24), solenoid vana (EVI 5M/13) ve sinyal çevirici (E-700) olmak üzere endüstriyel kontrol birimlerinden oluşmaktadır.

Şekil 5.3.'deki sıvı akış kontrol sisteminin elektriksel bağlantı şemasında süreç değişkenini kontrol etmek için kullanılan kontrol birimlerinin PID kontrolör ve birbirleriyle olan elektrik bağlantıları görülmektedir.



Şekil 5. 3. Sıvı akış kontrol sisteminin elektriksel bağlantı şeması

Şekil 5.3.'de verilen sıvı akış kontrol sisteminin elektriksel bağlantı şemasının 4. bölümde verilen sıvı seviye kontrol sisteminin elektriksel bağlantı şemasından farkı sadece akış transduserinin pulse çıkışı vermesinden dolayı bu sinyallerin $4 - 20 \text{ mA}$ 'e çevirmede kullanılan sinyal çevirici bağlantısı yapılmasıdır. Bu bölümde PID kontrolör, oransal vana, solenoid vana, veri toplama kartı elektriksel bağlantıları tekrar anlatılmayacaktır. Akış transduseri pulse sinyal çıkışı verdiğinden dijital darbeler sinyal çevirici tarafından $4 - 20 \text{ mA}$ aralığına çevrilerek PID kontrolöre iletilmektedir.

5.1.1. 2008 4F17 Türbin Akış Transduseri

Şekil 5.4.'de görüntüsü verilen 2008 4F17 türbin akış transduserinin çıkışı dijital darbeler şeklinde olup gerektiğinde sinyal çeviriciler ile analog sinyaller elde etmek mümkündür. Basit mekanik yapısı ile herhangi bir doğruluk kaybı olmadan çalışır. Yanıt süresi çok kısadır. Soğutma sistemleri, çamaşır makineleri, su arıtma üniteleri, filtre izleme sistemleri, güneş santralleri, yakıt tüketimi ölçümü, kahve makineleri, otomatlar, dağıtım sistemleri, şişeleme tesisleri, sterilizatörler, su jetleri, diyaliz makinelerin de kullanılırlar [50]. Tablo 5.1.'de türbin akış transduserinin teknik bilgileri yer almaktadır.



Şekil 5. 4. 2008 4F17 türbin akış transduseri (vision)

Tablo 5. 1. 2008 4F17 türbin akış transduseri teknik özellikleri

Akış Oranı (l/min.)	2-35
K-faktör (PPL)	750
Frekans (Hz)	25-437.5
DN mm	8
İşletim Basıncı	25 bar
Patlama Basıncı	200 bar
İşletim Sıcaklığı	-20 °C...+100°C
Besleme Gerilimi	5-24 V DC
Güç Tüketimi	~8 mA
Çıkış Akım	Max. 20 mA
Ağırlık	~15 g

5.1.2. E-700 Sinyal Çevirici

Şekil 5.5.'de görüntüsü verilen E-700 serisi sinyal çeviriciler endüstrinin her alanında transduser veya sensörlerden alınan sinyallerin kontrol sistemlerinde kullanılan standart akım ve gerilim sinyallerine çevirir. E-700 serisi sinyal çeviricilerin konfigürasyonu, isteğe göre kullanıcı tarafından PC üzerinden E-PK700-I2 bağlantı kablosu ile RS 232 ara yüzü kullanılarak PC'ye yüklenen E-Y-700-V2 yazılımı ile değişik giriş ve çıkışlar için programlanabilir [51]. Tablo 5.2.'de Elimko firmasına ait E-700 sinyal çeviricinin teknik bilgileri yer almaktadır.



Şekil 5. 5. E-700 sinyal çevirici (elimko)

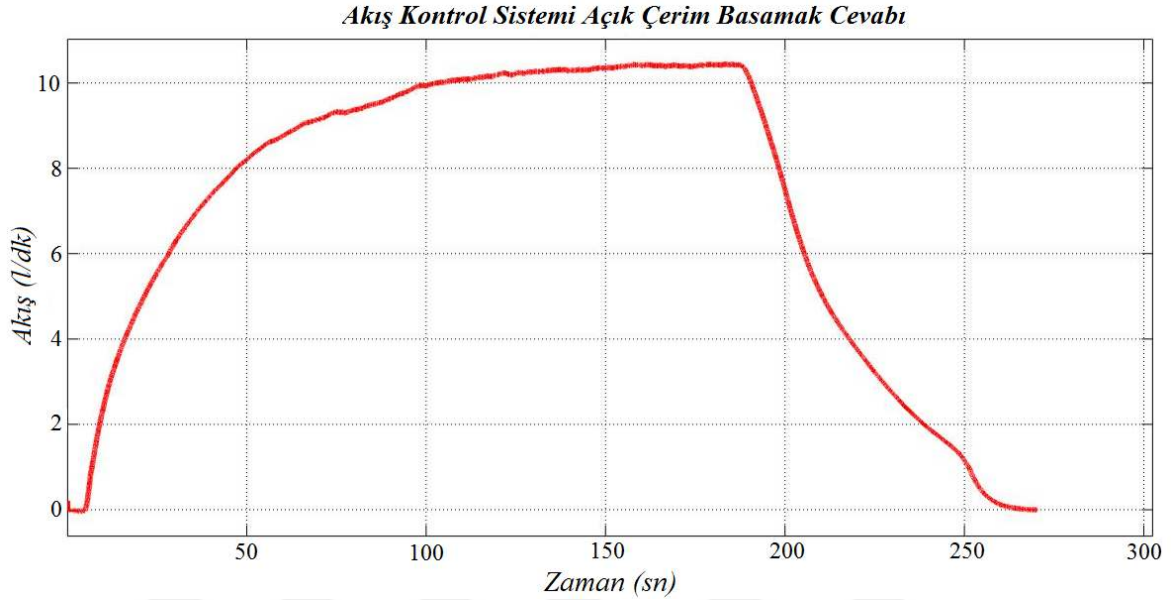
Tablo 5. 2. E-700 sinyal çevirici teknik özellikleri

Doğruluk Sınıfı	0.5 okunan değer
Gürültü Bastırması	120 dB de 50 Hz
Çalışma Ortamı Sıcaklığı	-10 °C... 55 °C
Sıcaklık Kayması	%0.01 / °C
CJ Kayması	0.2 °C / °C
Depolama Sıcaklığı	-25 °C... 65 °C (Yoğunlaşma ve buzlanma olmadan)
Giriş İşareti	T/C, R/T, Direnç, mV, V, mA, pulse, Loadcell
Çalışma Gerilimi	85-265 V AC / 85-375 V DC, 20-60 V AC / 20-85 VDC
Çıkış	0-20 mA / 4-20 mA, 0-10 V DC
Çıkış Modu	Düz (direct) / Ters (reverse) programlanabilir
Giriş Çıkış İzolasyonu	750 V AC
R/T Hat Direnci	Maksimum 100 Ω
T/C Hat Direnci	Maksimum 100 Ω
Linearizatör	Var/Yok (T/C ve R/T ler için programlanabilir)
Çıkış Modu programlanabilir.	Düz (direct)/Ters (reverse)
Program Ara Yüzü	USB
İletişim Ara Yüzü	RS485 (isteğe bağlı)
Güç Tüketimi	4 W
Montaj Şekli	Pano içi ray montaj
Koruma Sınıfı	IP 20
Ağırlık	140 gr

5.2. Sıvı Akış Kontrol Sisteminin Yaklaşık Modelinin Çıkarılması

Sıvı akış kontrol sisteminin yaklaşık matematiksel modeli kontrol sisteminin deneysel olarak elde edilen açık çevrim basamak yanıtından yararlanılarak elde edilmiştir. Küresel vana, tahliye vanası tam açıktır ve süreç değişkeninin debisi yaklaşık olarak $q_i =$

25 litre/dk veya 0.417 litre/sn'dir. Tank bir miktar süreç değişkeni ile dolduktan sonra tank içerisindeki havayıda sıkıştırarak tahliye vanasından $q_0 = 10.5 \text{ litre/dk}$ 'lık debi ile süreç değişkenini tahliye etmektedir. Dolayısıyla tanka akan süreç değişkeninin önemli bir bölümü tanktan boşalmaktadır.



Şekil 5. 6. Sıvı akış kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı (küresel ve tahliye vanası tam açık)

Süreç değişkeninin debisine bağlı olarak sıvı akış kontrol sisteminin birinci dereceden transfer fonksiyonu Denklem 5.1.'deki gibidir.

$$G(s) = \frac{Q_0(s)}{Q_i(s)} = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (5.1)$$

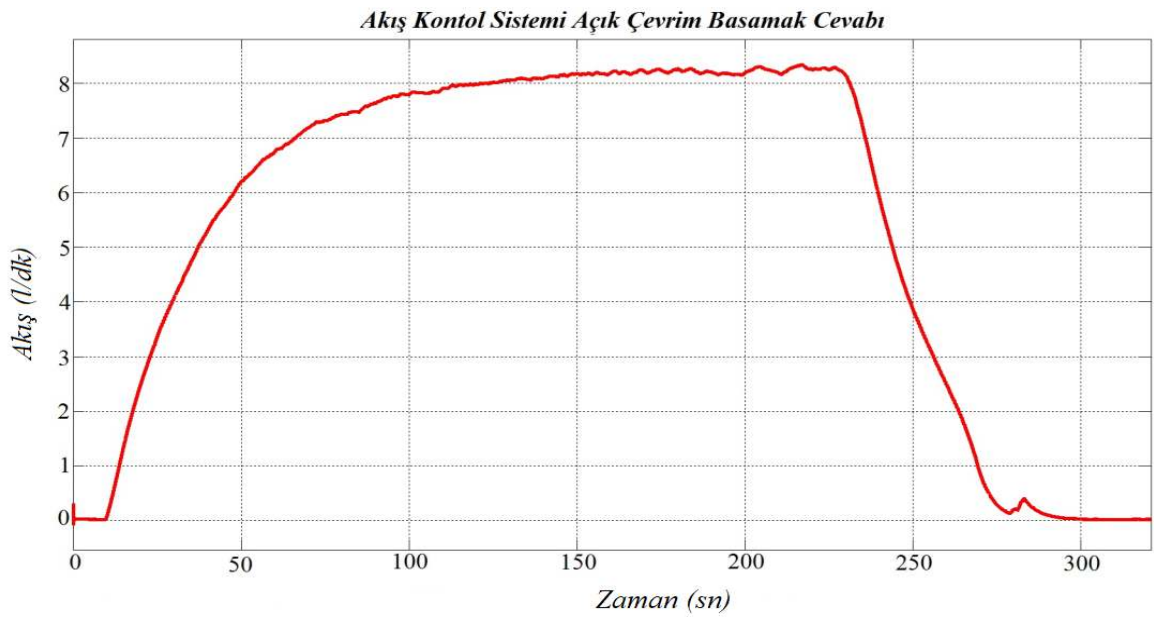
L kontrol sisteminin gecikmesi, τ zaman sabitesini ve K ise kalıcı durum kazancıdır. Kontrol sistemi kalıcı duruma yaklaşık $t = 5\tau$ gibi bir süre sonunda ulaşır. Şekil 5.6.'daki sıvı akış kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtından sistemin gecikmesi $L = 8 \text{ sn}$, tankın dolma zaman sabitesi $\tau_y = 35 \text{ sn}$, tankın boşalma zaman sabitesi $\tau_b = 6 \text{ sn}$ 'dir. Sıvı akış kontrol sisteminin kalıcı durum kazancı giriş-çıkış debilerine bağlı olarak $K = \frac{10.5}{25} = 0.42$ olur. Sıvı akış kontrol sisteminin tanı modeli Denklem 5.2'de olduğu gibidir.

$$G(s) = \frac{Q_0(s)}{Q_i(s)} = \frac{0.42}{35s + 1} e^{-8s} \quad (5.2)$$

Gecikme teriminin yaklaşık değeri kullanılırsa sistemin modeli ikinci dereceden aşırı sönümlü bir sistem olarak Denklem 5.3’de olduğu gibidir. Burada q_0 çıkış debisini , q_i ise kontrol sistemin giriş debisini (*litre/sn*) göstermektedir.

$$G(s) = \frac{Q_0(s)}{Q_i(s)} = \frac{K}{(\tau s+1)(1+ds)} = \frac{0.0015}{(s+0.0285)(s+0.125)} \quad (5.3)$$

Şekil 5.7.’de hem küresel vana hem de tahliye vanası tam açık olacak şekilde $v_c = 3 - 2 = 1 \text{ volt}$ vana kontrol gerilimi ve 235. saniyede ise vana kontrol gerilimi sıfır yapılarak elde edilen sıvı akış kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı verilmiştir.



Şekil 5. 7. Sıvı seviye kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtı (küresel ve tahliye vanası tam açık)

Vana gerilimine göre sıvı akış kontrol sisteminin Denklem 5.4’deki birinci dereceden transfer fonksiyonunun parametreleri açık çevrim basamak yanıtından; sistemin gecikmesi $L = 10 \text{ sn}$, tankın dolma zaman sabitesi $\tau_y = 40 \text{ sn}$, tankın boşalma zaman sabitesi $\tau_b = 14 \text{ sn}$ ’dir.

$$G_a(s) = \frac{Q_0(s)}{V_c(s)} = \frac{K}{\tau s+1} e^{-Ls} \quad (5.4)$$

Vana kontrol gerilimi $v_c = 1 \text{ volt}$ ve çıkış debisi ise $q_0 = 8.2 \text{ litre/dk}$ ya da $q_0 = 0.136 \text{ litre/sn}$ olduğuna göre sıvı akış kontrol sisteminin kalıcı durum kazancı $K =$

0.136 olarak belirlenmiştir. Sıvı akış kontrol sisteminin yaklaşık tanı modeli Denklem 5.5’de olduğu gibidir.

$$G_a(s) = \frac{Q_o(s)}{V_c(s)} = \frac{0.136}{40s+1} e^{-10s} \quad (5.5)$$

Gecikme teriminin yaklaşık değeri kullanılarak vana ile birlikte sıvı akış kontrol sisteminin ikinci dereceden aşırı sönümlü yaklaşık modeli Denklem 5.6’da yer almaktadır.

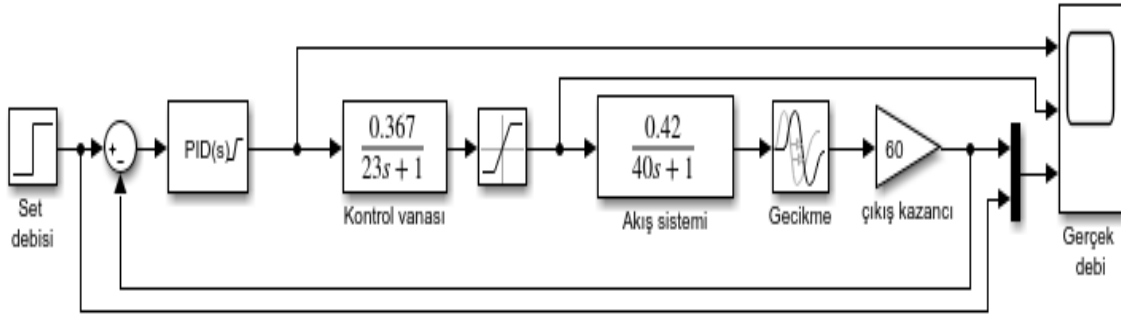
$$G_a(s) = \frac{Q_o(s)}{V_c(s)} = \frac{K}{(\tau s+1)(1+Ls)} = \frac{0.00034}{(s+0.025)(s+0.1)} \quad (5.6)$$

5.3. Sıvı Akış Sistemi için KYE ile PID Tasarımı ve MATLAB Simülasyonu

Denklem 5.6.’da transfer fonksiyonu çıkarılan sıvı akış kontrol sistemi, orijine yakın iki adet gerçek kutbu bulunan, tip 0 ve aşırı sönümlü bir sistemdir. Sıvı akış kontrol sisteminin modeli Bölüm 4’de çıkarılan sıvı seviye kontrol sisteminin modeli ile çok benzer olduğundan KYE davranışları da oldukça benzerdir. Kontrol sistemi tip 0 ve aşırı sönümlü olduğu için düşük kazançlı bir oransal (P) kontrolör ile kontrol edilebilir ancak kalıcı durum hatası ortaya çıkacaktır. Oransal kazanç arttırıldıkça kalıcı durum hatası azalacaktır ancak kontrol sisteminin süreç değişkenini kontrolünde önemli salınımlar oluşacaktır. PI kontrol kullanılarak kalıcı durum hatasının ortadan kaldırılması sağlanır.

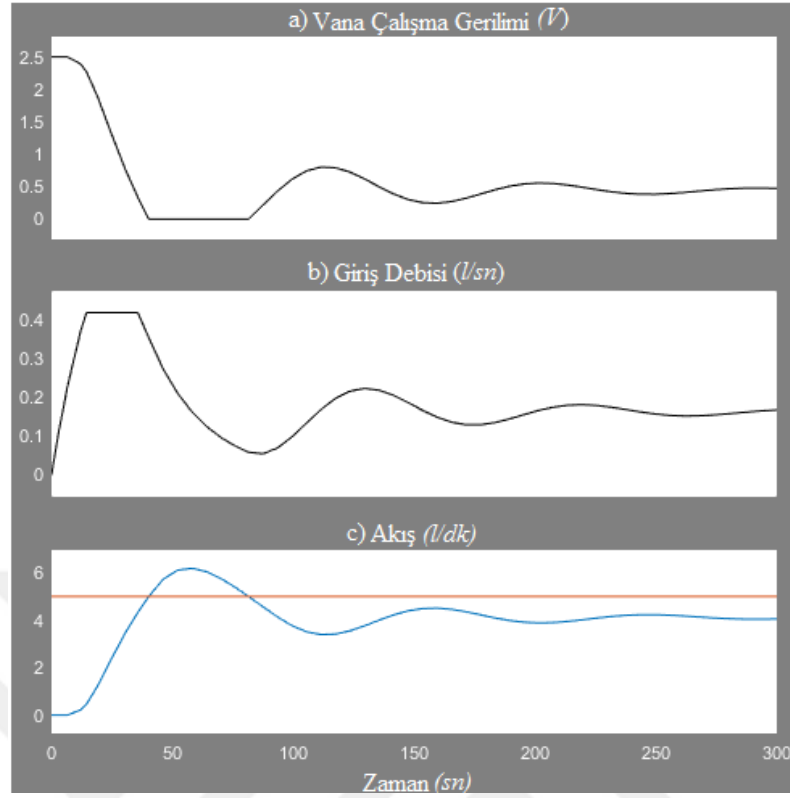
KYE, otomatik kontrol vanasının modeli, belirlenen kontrolör parametreleri ve sıvı akış kontrol sisteminin modeli kullanarak oluşturulan kontrol sisteminin MATLAB/Simulink simülasyonu Şekil 5.8.’de verilmiştir. PID kontrolör çıkışı 2 – 10 *volt* aralığında ayarlanarak deneysel düzenekle uyumlu hale getirilmiştir.

Endüstriyel süreç kontrolörünün set değeri sıvı akışı (*litre/dk*) olarak kontrolöre girilmektedir ve maksimum sıvı akışı 35 *litre/dk*’da 10 *volt* olacak şekilde kontrolör kalibre edilmiştir. Transduser kazancı 1 olarak alınmıştır.



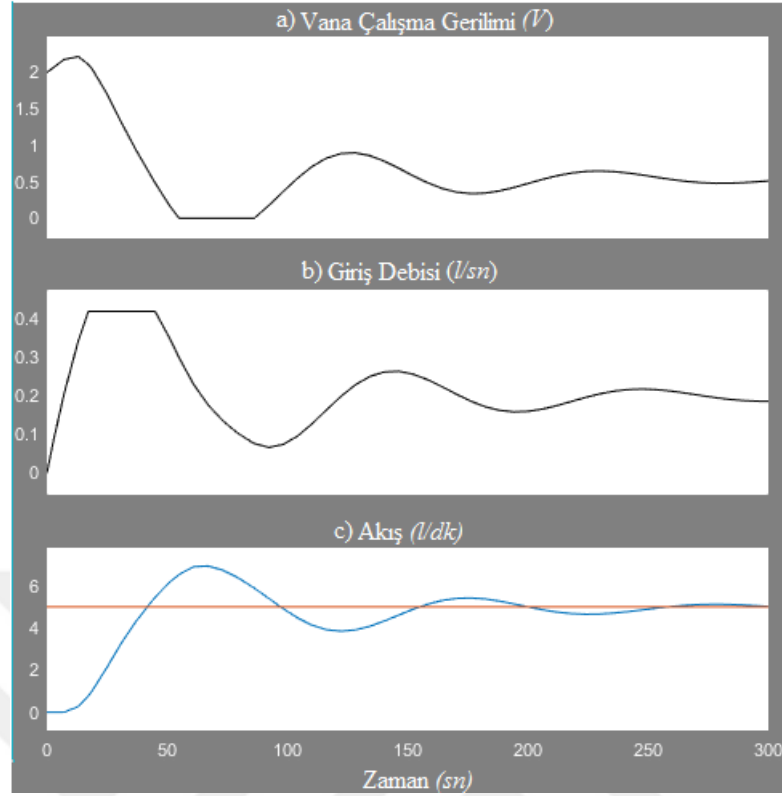
Şekil 5. 8. Sıvı akış kontrol sistemi için KYE ile PID tasarımı MATLAB simülasyonu

Şekil 5.8.’deki blok şemaya göre 5 litre/dk set değeri için $K_p = 0.5$ olan oransal kontrolör ile kontrol sisteminin değişkenleri Şekil 5.9.’da verilmiştir. Daha düşük oransal kazançlarda, salınımlar azalacak ancak set değerine yerleşme süresi ve kalıcı durum hatası artacaktır. Sıvı seviye kontrol sistemi $K_p = 0.5$ ve 5 litre/dk set değeri için yaklaşık 10 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 30 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 50.sn’de tepe süresine (t_p) ulaşır yaklaşık 240. sn’de set değerine yerleştiği (t_s) görülmektedir. Vana kontrol gerilimine bağlı olarak oluşan vana % açıklığının 0.1 litre aralığında salınım yaparak sıvı geçişine izin verdiği Şekil 4.19.’da görülmektedir.



Şekil 5. 9. $K_p = 0.5$ iken 5 (litre/dk) set değerindeki a) Vana çalışma gerilimi (V), b) Giriş debisi (litre/sn), c) Akış (litre/dk)

$K_p = 0.4$, $K_i = 0.005$ olan bir PI kontrolör ile elde edilen kontrol sisteminin değişkenleri Şekil 5.10.'da verilmiştir. Dolayısıyla I kontrolör etkisi ile ofset hatası ortadan kaldırılmıştır. Sıvı akış kontrol sistemi $K_p = 0.4$, $K_i = 0.005$ ve 5 (litre/dk) set değeri için yaklaşık 10 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 30 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 60. sn'de tepe süresine (t_p) ulaşp yaklaşık 260. sn'de set değerine yerleştiği (t_s) görülmektedir. Vana kontrol gerilimine bağlı olarak oluşan vana % açıklığının yaklaşık 0.2 litreye salınım yaptıktan sonra yerleştiği Şekil 5.10.'da görülmektedir.



Şekil 5. 10. $K_p = 0.4$, $K_i = 0.005$ iken 5 (litre/dk) set değerindeki a) Vana çalışma gerilimi (V), b) Giriş debisi (litre/sn), c) Akış (litre/dk)

5.4. Sıvı Akış Kontrol Sistemi için PID Parametrelerinin Ayarlanması

Ziegler-Nichols'nun (ZN) açık çevrim PID parametrelerinin belirlenmesi için Şekil 5.7.'de sıvı akış kontrol sisteminin açık çevrim basamak yanıtından belirlenen sistemin gecikmesi $L = 10 \text{ sn}$, tankın dolma zaman sabitesi $\tau_y = 40 \text{ sn}$, kalıcı durum kazancı $K = 0.154$ olarak alınmıştır. Ziegler-Nichols açık çevrim yöntemine göre hesaplanan P, PI ve PID parametreleri Tablo 5.3.'de verilmiştir.

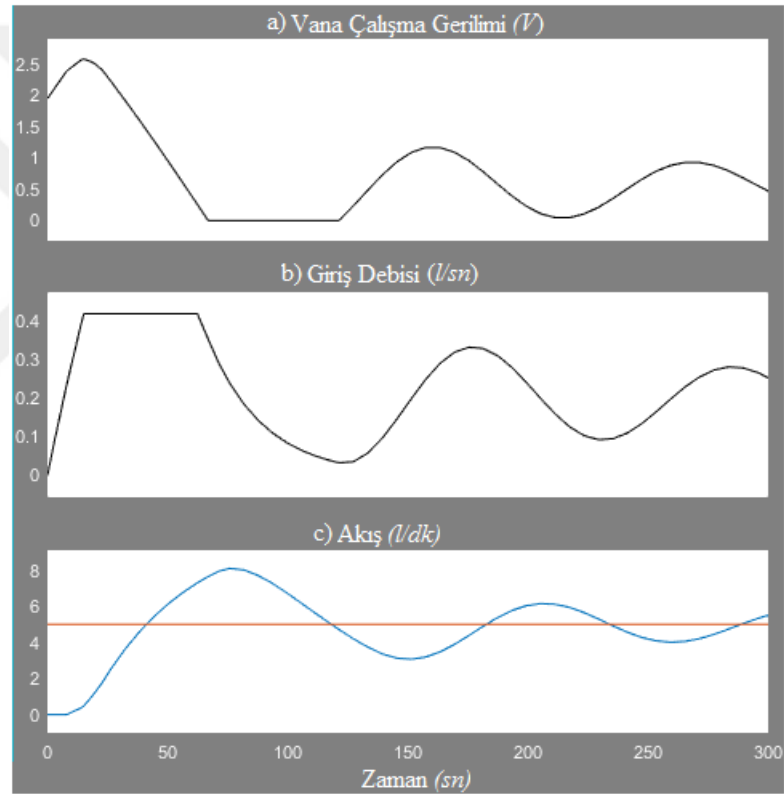
Tablo 5. 3. Sıvı akış kontrol sisteminin Ziegler-Nichols açık çevrim ayarlama yöntemi P, PI, PID kontrol parametreleri ($K=0.154 \cdot 60=9.24$, $L = 10 \text{ sn}$, $\tau_y = 40 \text{ sn}$)

Kontrolör	K_p	τ_i	τ_d
P	0.43	∞	0
PI	0.39	33,34	0
PID	0.516	20	5

Tablo 5.3.'de, Ziegler-Nichols yöntemi ile hesaplanan PI kontrolör parametreleri ile yukarıda MATLAB/Simulink ile incelenen sistemden elde edilen sonuçlar Şekil 5.11.'de

verilmiştir ve yukarıda KYE yaklaşımına göre belirlenen parametrelerle uyumlu olduğu görülmektedir.

Şekil 5.11.'de sıvı akış kontrol sistemi $K_p = 0.39$, $\tau_i = 33,34$ ve 5 (litre/dk) set değeri için yaklaşık 10 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 35 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 80 . sn'de tepe süresine (t_p) ulaşp yaklaşık 200 . sn'de set değerine yerleştiği (t_s) görülmektedir. Vana kontrol gerilimine bağlı olarak oluşan vana % açıklığının yaklaşık giriş debisinde salınım yaparak kalıcı duruma yerleştiği Şekil 4.21.'de görülmektedir.



Şekil 5. 11. Sıvı akış tankı Ziegler-Nichols yöntemi (PI) ile MATLAB/Simulink parametrelerinin karşılaştırması

5.5. Sıvı Akış Kontrol Sistemi Deneysel Sonuçları

Deneysel verilerden yararlanılarak elde edilen sıvı akış kontrol sisteminin yaklaşık modeli seviye kontrol sisteminde olduğu gibi kontrol sistemdeki en ufak değişiklik ile değişecektir. Tahliye vanasının konumunun değiştirilmesi, tahliye vanasının açıklığına bağlı olarak oransal vananın kazancının değişmesi, oransal vana ve transduser gibi elemanların giriş-çıkış karakteristiklerinin doğrusal olmaması, ölçme hataları, transduser ve vananın kalibrasyonu gibi etmenler sıvı akış kontrol sisteminin performansını etkileyerek PID kontrol parametrelerinin belirlenmesini zorlaştırır. Şekil 5.12.'de endüstriyel PID kontrol tarafından kontrol edilen sıvı akış kontrol sisteminin görüntüsü yer almaktadır.

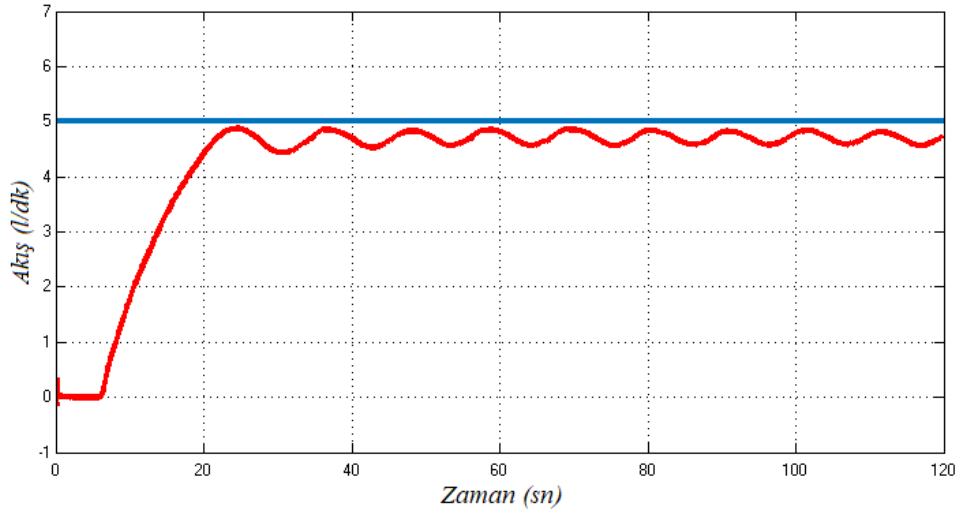


Şekil 5. 12. Sıvı akış kontrol sistemi

Ziegler-Nichols'un açık çevrim yöntemine göre belirlenip sıvı akış kontrol sisteminin yapısı göz önünde bulundurularak ayarlanan deneysel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

5.5.1. Akış Kontrol Sisteminin Aç-Kapa Kontrolü

Şekil 5.13.'de sıvı akış kontrol sisteminin mikro denetleyici tarafından gerçekleştirilen 5 litre/dk set değerindeki aç-kapa kontrol yanıtı görülmektedir.

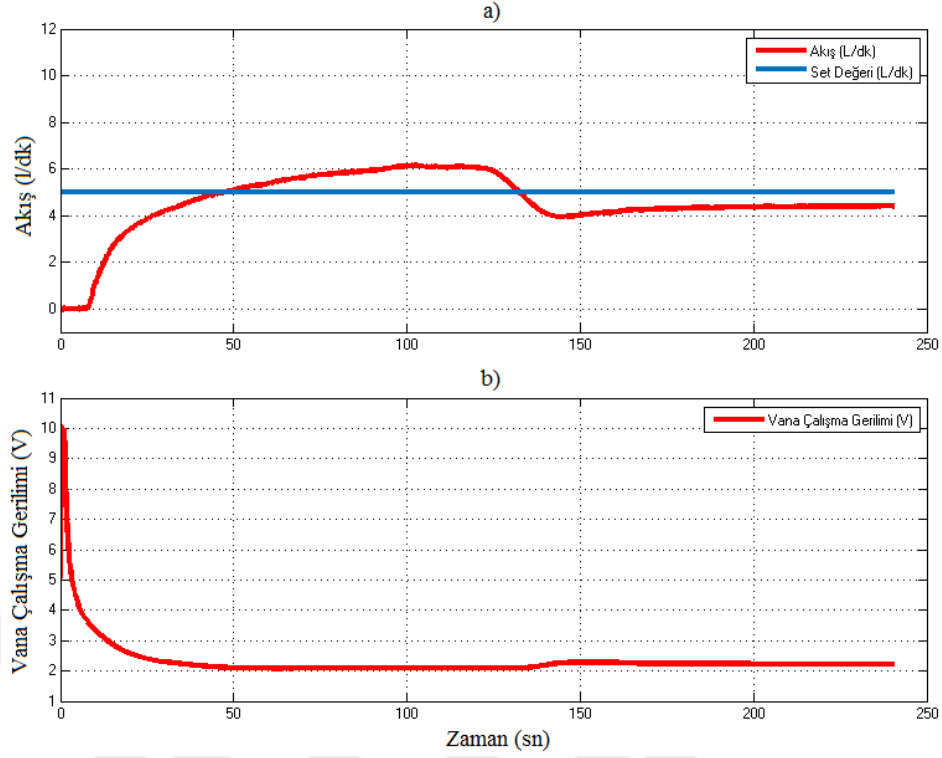


Şekil 5. 13. Sıvı akış kontrol sisteminin 5 litre/dk set değerindeki aç-kapa kontrol yanıtı (histerezis=0)

Şekil 5.13.'de sıvı akış kontrol sistemi 5 litre/dk set değerinde aç-kapa kontrol için yaklaşık 5 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 15 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 25. sn'de tepe süresine (t_p) ulaşır yaklaşık 30. sn'de set değerine salınım yaparak yerleştiği (t_s) görülmektedir.

5.5.2. Akış Kontrol Sisteminin Oransal Kontrolü

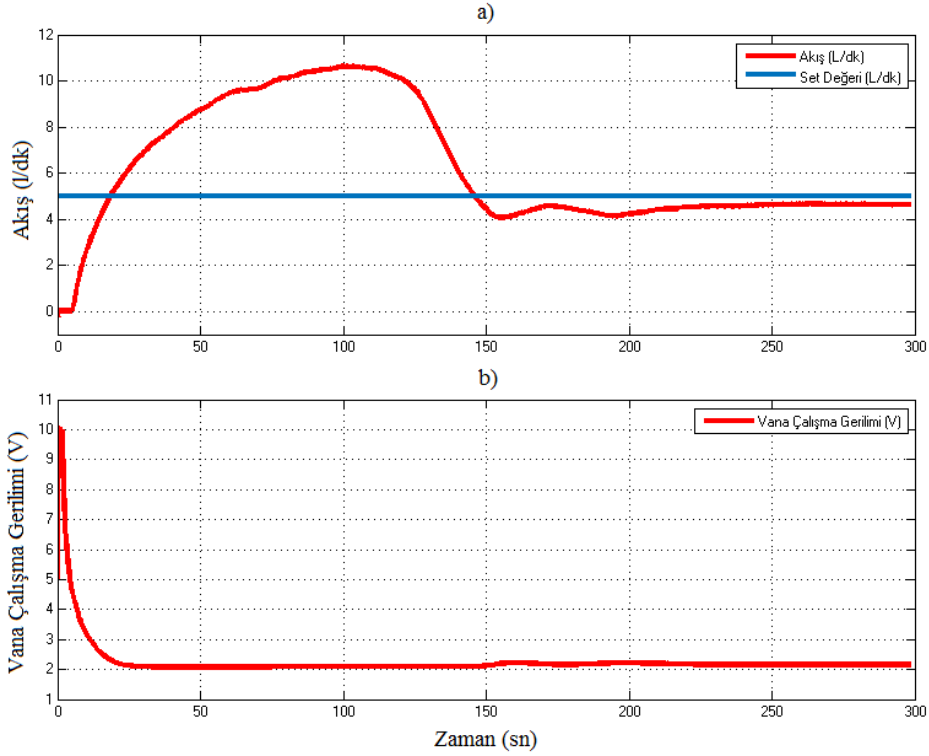
Şekil 5.14.'de süreç değişkeninin debisi azaltılıp oransal bant değeri $PB = \%40$ seçilerek elde edilen akış (litre/dk) ve vananın kontrol sinyali (V_{DC}) verilmiştir. Şekil 5.14.'de sıvı akış kontrol sistemi $PB = \%40$ için yaklaşık 10 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 40 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 110. sn'de tepe süresine (t_p) ulaşır 160. sn'de set değerine bir miktar kalıcı durum hatası oluşturarak yerleştiği (t_s) görülmektedir.



Şekil 5. 14. Sıvı akış kontrol sisteminin $PB = \%40$ iken 5 litre/dk set değeri için oransal (P) kontrol yanıtı a) Akış (litre/dk), b) Vana Çalışma Gerilimi (V)

Şekil 5.14.' den, oransal kazancın yaklaşık $K_p = 2$ olduğu görülmektedir. Dolayısıyla süreç kontrolörün kalibrasyonu gereği oransal bant ile oransal kazanç ilişkisinin burada da yaklaşık $K_p = \frac{100}{\%X_p} \cdot \frac{1}{1.25}$ şeklinde olduğu anlaşılmaktadır.

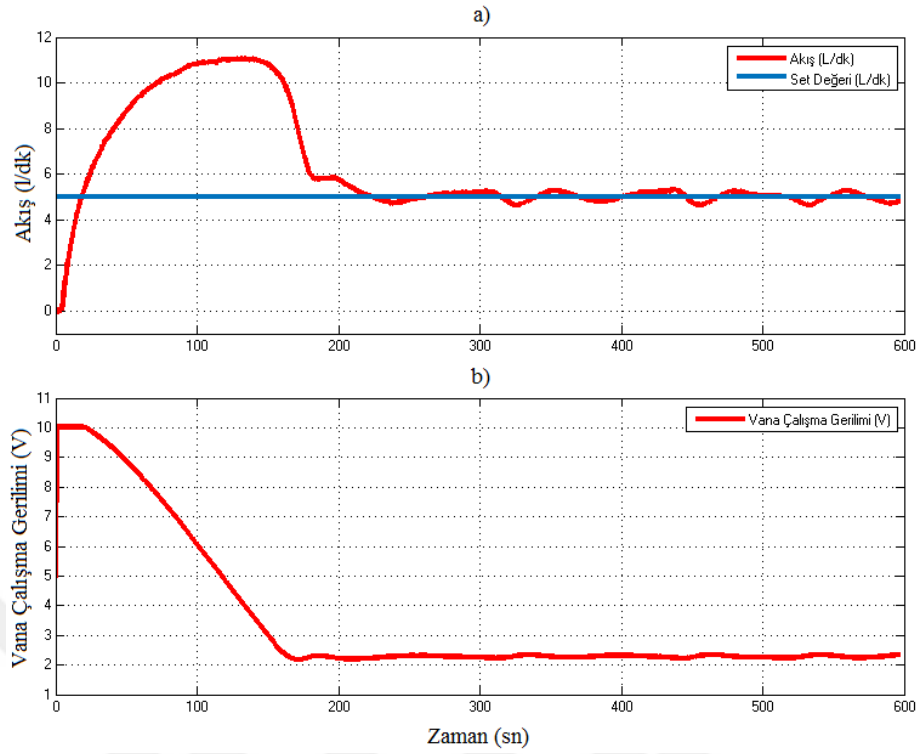
Şekil 5.15.'de süreç değişkeninin debisi artırılıp oransal bant değeri $PB = \%50$ seçilerek elde edilen akış (litre/dk) ve vananın kontrol sinyali verilmiştir. Oransal vananın açma-kapama süresinin uzun ve süreç değişkeninin debisinin yüksek olması nedeniyle aşma sorunu ortaya çıkmaktadır. Şekil 5.15.'de sıvı akış kontrol sistemi $PB = \%50$ için yaklaşık 5 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 15 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 100. sn'de tepe süresine (t_p) ulaşp 215. sn'de set değerine bir miktar kalıcı durum hatası oluşturarak yerleştiği (t_s) görülmektedir.



Şekil 5. 15. Sıvı akış kontrol sisteminin $PB = \%50$ iken 5 litre/dk set değeri için oransal (P) kontrol yanıtı a) Akış (litre/dk), b) Vana Çalışma Gerilimi (V)

5.5.3. Akış Kontrol Sisteminin Oransal-İntegral Kontrolü

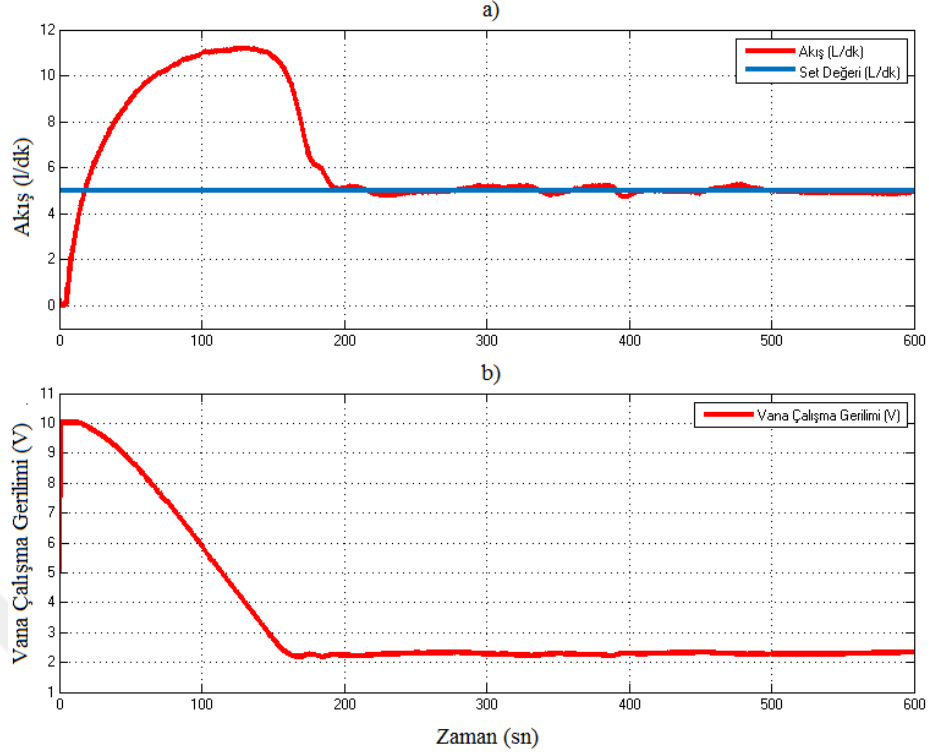
Şekil 5.16.'da süreç değişkeninin debisi artırılıp oransal bant değeri $PB = \%50$ ve integral zaman sabiti $\tau_i = 16$ seçilerek elde edilen akış (litre/dk) ve vananın kontrol sinyali verilmiştir. Vananın açma-kapama süresinin (114 sn) uzun ve süreç değişkeninin debisinin de yüksek olmasından dolayı bir aşma sorunu ortaya çıkmaktadır. Ancak integral zaman sabitinin kullanılmasıyla kalıcı durumdaki salınımlar artmakla birlikte kalıcı durum hatasının azaldığı görülmektedir. Şekil 5.16.'da sıvı akış kontrol sistemi $PB = \%50, \tau_i = 16$ için yaklaşık 5 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 15 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 125. sn'de tepe süresine (t_p) ulaşır 220. sn'den sonra set değerine salınım yaparak yerleştiği (t_s) görülmektedir.



Şekil 5. 16. Sıvı akış kontrol sisteminin $PB = \%50$ ve $\tau_i = 16$ iken 5 litre/dk set değeri için PI kontrol yanıtı a) Akış (litre/dk), b) Vana Çalışma Gerilimi (V)

5.5.4. Akış Kontrol Sisteminin Oransal-İntegral-Türev Kontrolü

Şekil 5.17.'de süreç değişkeninin debisi artırılıp oransal bant değeri $PB = \%50$, integral zaman sabiti $\tau_i = 16$ ve türev zaman sabiti $\tau_d = 4,4$ seçilerek elde edilen gerçek debi ve vananın kontrol sinyali verilmiştir. Vananın açma-kapama süresinin (114 sn) uzun ve süreç değişkeninin debisinin de yüksek olması nedeniyle aşma ortaya çıkmaktadır. İntegral zaman sabitinin kullanılmasıyla oluşan kalıcı durumdaki salınımların türev zaman sabitinin kullanılmasıyla çok azaldığı görülmektedir. Şekil 5.17.'de sıvı akış kontrol sistemi $PB = \%50, \tau_i = 16, \tau_d = 4,4$ için yaklaşık 5 sn gibi bir sistem gecikmesi (L) ve 15 sn gibi bir yükselme süresinden (t_r) sonra 125. sn'de tepe süresine (t_p) ulaşmış 220. sn'den sonra set değerine salınım genliğini azaltarak yerleştiği (t_s) görülmektedir.



Şekil 5. 17. Sıvı akış kontrol sisteminin $PB = \%50$, $\tau_i = 16$ ve $\tau_d = 4,4$ iken 5 litre/dk set değeri için PID kontrol yanıtı a) Akış (litre/dk), b) Vana Çalışma Gerilimi (V)

Şekil 5.14. ve 5.17.'de verilen deneysel sonuçlar, Şekil 5.9. ve 5.11.'de verilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırıldığında deneysel sonuçlarda kalıcı durumdaki salınımların fazla ve sürekli olduğu ve bunun nedeninin de kontrol vanasının doğrusal olmayan karakteristiğinden, açma-kapama süresinin çok fazla olmasından ve vananın daha çok aç-kapa etkisi ile çalışmasından ortaya çıktığı değerlendirilmektedir. Kontrolör parametreleri ile yükselme sürelerindeki küçük farklılıklar ise vana ve dolayısıyla sistem kazancındaki farklılıklardan ortaya çıkmaktadır.

6. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

Bu tez çalışmasında, endüstriyel üretimde kullanılan oransal vana, solenoid vana, PID kontrolör, veri toplama kartı, sinyal çevirici, seviye ve akış transduserleri ile birer sıvı seviye ve akış kontrol sistemlerinin montajı ve elektriksel bağlantısı yapılmıştır.

Sıvı seviye ve akış kontrol sistemlerinin açık çevrim basamak yanıtlarından yararlanarak sıvı seviye ve akış kontrol sistemlerinin yaklaşık matematiksel modelleri çıkarılmış ve bu modeller kullanılarak MATLAB/Simulink programında KYE ile yapılan PID kontrolör tasarımları açıklanmıştır. Ayrıca, Ziegler-Nichols açık çevrim yöntemi kullanılarak belirlenen PID parametreleri ile KYE kullanılarak elde edilen PID parametreleri karşılaştırılmıştır.

Sıvı seviye ve akış kontrol sistemlerinde gecikmelerin oluşması, süreç değişkeni girişinin tankın alt kısmında yer alması, oransal vananın açma veya kapama süresinin yüksekliği, tam doğrusal olmayan vana ve transduser, süreç değişkininde oluşan basınç dalgalanmaları, tank içerisindeki havanın giriş ve çıkışı etkilemesi gibi nedenlerden ötürü PID kontrolör parametrelerinin belirlenmesi ve kontrol sistemlerinin hesaplanan kontrol parametreleri ile kararlı çalışmasında zorluklar meydana gelmektedir.

Sıvı seviye ve akış kontrol sistemlerinden elde edilen yaklaşık matematiksel modelleri ve KYE yöntemine göre hesaplanan PID kontrolör parametreleri ile Ziegler-Nichols yöntemine göre belirlenen kontrolör parametreleri P, PI, PID kontrol formlarında belirgin bir uyum görülecek biçimde çalışmıştır.

KAYNAKLAR

- [1] Haugen F. " Basic Dynamics and Control ", TechTeach, August 2010
- [2] Peterson Z.W., Whitmore S. A. and Eilers S. D. " Closed-Loop Precision Throttling of a Hybrid Rocket Motor" Journal of Propulsion and Power Vol. 30, No. 2, March–April 2014
- [3] Vincent A. K. and Nersisson R. " Particle swarm optimization based PID controller tuning for level control of two tank system ", 14th ICSET-2017 IOP Publishing IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017
- [4] Lee Y. H., Jin G. G. and So M. O. " Level control of single water tank systems using Fuzzy-PID technique " Journal of the Korean Society of Marine Engineering, Vol. 38, No. 5 pp. 550~556, 2014
- [5] Sonawane R. R., Medewary P. G. and Munjez R. K. " Fuzzy Logic based Boiler drum level control with GUI ", Proceedings of International Conference (ICCCES-2016), January 2016
- [6] Jafari R., Razvarz S., Vargas C. and Yu W. "Control of Flow Rate in Pipeline Using PID Controller", 6th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC), May-2019, Canada
- [7] Markus D. and Apprey M. "MPC-PID Control of a Gas-Liquid Cylindrical Cyclone", International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research, May 2019, Ghana
- [8] Getu B. N. "Water Level Controlling System Using Pid Controller", International Journal of Applied Engineering Research ISSN, 2016
- [9] Wanigasekara C., Nguang S. K., Padmanaban S., Swain A., Subramaniyan U. and Almahles D. "Performance of Neural Network Based Controllers and $\Delta\Sigma$ -Based PID Controllers for Networked Control Systems: A Comparative Investigation", IEEE 3rd Industrial and Commercial Power System Europe, 19th International Conf. on Environment and Electrical Engg., June 2019
- [10] Cartes D. Wu L. "Experimental evaluation of adaptive three-tank level control" The Instrumentation, Systems, and Automation Society, July 2004
- [11] Carlucho I., Paula M.D. and Acosta G.G. "Double Q-PID algorithm for mobile robot control", ScienceDirect, December 2019
- [12] Behn C. and Siedler K., "Adaptive PID-tracking control of muscle-like actuated compliant robotic systems with input constraints ", ScienceDirect, March 2019

- [13] Roca S., Marzat J., Langlois N., Farago F., Galeotta M. and Gonidec S. "A survey of automatic control methods for liquid-propellant rocket engines", ScienceDirect, May 2019
- [14] Ou K., Wang Y., Li Z., Shen Y. and Xuan D. " Feedforward fuzzy-PID control for air flow regulation of PEM fuel cell system", ScienceDirect, September 2015
- [15] Daudab W.R.W., Roslia R.E., Majlana E.H., Hamida S.A.A., Mohamedc R. and Husainia T. "PEM fuel cell system control: A review" , ScienceDirect, December 2017
- [16] Bieda R., Blachuta M. and Grygiel R. "A New Look at Water Tanks Systems as Control Teaching Tools", IFAC (International Federation of Automatic Control) Hosting by Elsevier Ltd. All rights reserved, July 2017
- [17] Tapak P. and Huba M. " Nonlinear Control of Liquid Level", Proceedings of the 9th IFAC Symposium Advances in Control Education, June 2012
- [18] Kadua C.B. and Patilb C.Y. "Design and Implementation of Stable PID Controller for Interacting Level Control System", 7th International Conference on Communication, Computing and Virtualization, 2016
- [19] Bartelt T. "Industrial Control Electronics: Devices, Systems, and Applications",Cengage Learning products are represented in Canada by Nelson Education Ltd., 2006
- [20] Hughes T. A."Measurement and Control Basics", ISA Press, 2002.
- [21] <https://instrumentationtools.com/> 27 Mayıs 2019.
- [22] <https://automationforum.co/> 27 Mayıs 2019.
- [23] <https://new.abb.com/products/measurement-products/> Süreç Kontrol Sistemlerinde Endüstriyel Ölçüm Yöntemleri. 22 Mayıs 2019.
- [24] <https://www.emerson.com/en-us/automation/measurement-instrumentation> Süreç Kontrol Sistemlerinde Endüstriyel Ölçüm Yöntemleri. 25 Mayıs 2019.
- [25] <https://www.vega.com/en/products> Süreç Kontrol Sistemlerinde Endüstriyel Ölçüm Yöntemleri. 25 Mayıs 2019.
- [26] <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/process-instrumentation-solutions.html> Süreç Kontrol Sistemlerinde Endüstriyel Ölçüm Yöntemleri. 22 Mayıs 2019.
- [27] <https://www.uk.endress.com/en/field-instruments-overview> Süreç Kontrol Sistemlerinde Endüstriyel Ölçüm Yöntemleri. 22 Mayıs 2019.

- [28] https://www.shinagawa.co.jp/en/products/related_products/004.html ECLM seviye transduseri. 27 Mayıs 2019.
- [29] <https://ciescorp.net/> Manyetik direnç mikroeletromekanik seviye transduseri. 27 Mayıs 2019.
- [30] <https://www.2gig-eng.com/mems-inclinometer/> 28 Mayıs 2019.
- [31] <http://kenco-eng.com/electronic-level-measurement/> Ultrasonik seviye anahtarı termal kütle akış transduseri. 27 Mayıs 2019.
- [32] <https://www.baumer.com/ch/en/product-overview/process-sensors/level-measurement/c/306> Kapasitif ve Frekans Süpürme Seviye Anahtarı. 27 Mayıs 2019.
- [33] <https://www.cidra.com/cidra-products/sonartrac-flow-measurement> Sonar akış transduseri. 28 Mayıs 2019.
- [34] <https://www.vectoflow.de/en/> Çok delikli basınç probu akış transduseri. 22 Mayıs 2019.
- [35] <http://www.lavision.de/en/> Partikül görüntü velosimetrisi. 23 Mayıs 2019.
- [36] <https://www.digikey.com/en/product-highlight/i/idt/fs1012-fs2012-highperformance-mems-flow-sensor-modules> 27 Mayıs 2019.
- [37] <https://www.meriam.com/product-image-gallery/laminar-flow-elements/> Laminar akış transduseri. 22 Mayıs 2019.
- [38] <https://www.yokogawa.com/tr/solutions/products-platforms/control-system/> 27 Mayıs 2019.
- [39] <https://www.yokogawa.com/tr/solutions/products-platforms/control-system/safety-instrumented-systems-sis/> 27 Mayıs 2019.
- [40] Gökbulut M. "Otomatik Kontrol Sistemleri", Seçkin Yayıncılık San. Ve Tic. A.Ş., Ankara, Ağustos-2016.
- [41] Åström K. and Hägglund T. "PID Controllers Theory, Design and Tuning", Instrument Society of America, Lund, 1988
- [42] Bristol E. H., Hansen P. D., Hall G. A., Stevenson J., Osborne R. L., Magison E. C. and Nelson J. M. "Process/Industrial Instruments and Controls Handbook", 2004
- [43] Ogata K. "Modern Control Engineering", Pearson Education Inc., New Jersey, 2010.
- [44] Jose D.G. and George S. "Modelling and Controller of Liquid Level system using PID controller", International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), August 2016
- [45] <http://www.tekon.com.tr/sc39.html> SC39 Kontrolör. 25 Mayıs 2019.

- [46] <https://www.ontrol.com.tr/sites/default/files/katalog/VM0018D.pdf> MVS – 20 NP – 24 otomatik kontrol vanası. 25 Mayıs 2019.
- [47] http://www.amisco.it/public/2019/EVI_5.pdf EVI 5M/13 solenoid vana. 27 Mayıs 2019.
- [48] <http://www.ensim.com.tr/uploads/urun-belgeyukle-dosyalar/1351.pdf> ECAP–101 kapasitif seviye transduseri. 28 Mayıs 2019.
- [49] https://www.adlinktech.com/Products/Data_Acquisition/USBDAQ/USB-1901_1902_1903?lang=en ADLINK USB 1902 veri toplama kartı. 27 Mayıs 2019.
- [50] http://www.hemomatik.fi/wpcontent/uploads/2013/10/Vision_2000_en_13.pdf 2008 4F17 türbin akış transduseri. 22 Mayıs 2019.
- [51] <http://www.elimko.com.tr/tr/urunlerimiz/elektronik-cihazlar/sinyalceviriciler/e-700-serisi-sinyal-ceviriciler> Elimko E-700 sinyal çevirici. 25 Mayıs 2019.

EKLER

Ek 1: ECAP–101 kapasitif seviye transduserinin linerleştirilme değerleri

Tank Seviyesi (0-40 cm)	Kontrolör Seviyesi (0-40 cm)	Linerleştirilmiş Kontrolör Seviyesi (0-40 cm)	Transduser Akımı (4-20 mA)	Transduser Gerilimi (2-10 V)
0	0.16	-7,0687	3.98	2.03
1	0.87	-6,27625	4.25	2.17
2	1.85	-5,16095	4.63	2.36
3	3.06	-3,7815	5.10	2.60
4	4.41	-2,22595	5.63	2.87
5	5.85	-0,58235	6.19	3.15
6	7.12	0,88515	6.69	3.41
7	8.27	2,2059	7.14	3.63
8	9.70	3,8495	7.70	3.92
9	10.86	5,1996	8.16	4.14
10	12.16	6,69645	8.67	4.40
11	13.36	8,04655	9.13	4.64
12	14.50	9,3673	9.58	4.86
13	15.68	10,7174	10.04	5.09
14	16.66	11,86205	10.43	5.29
15	17.95	13,32955	10.93	5.54
16	19.02	14,56225	11.35	5.74
17	20.06	15,7656	11.76	5.95
18	21.10	16,9396	12.16	6.15
19	22.21	18,231	12.60	6.35
20	23.16	19,31695	12.97	6.55
21	24.11	20,4029	13.34	6.73
22	25.29	21,753	13.80	6.95
23	26.21	22,8096	14.16	7.14
24	27.22	23,9836	14.56	7.34
25	28.12	25,01085	14.91	7.50
26	28.99	26,00875	15.25	7.68
27	29.90	27,036	15.60	7.84
28	30.88	28,18065	15.99	8.03
29	31.74	29,1492	16.32	8.20
30	32.62	30,1471	16.66	8.37
31	33.31	30,9689	16.94	8.49
32	34.39	32,2016	17.36	8.67
33	35.21	33,17015	17.69	8.85
34	36.09	34,16805	18.03	9.01
35	36.93	35,10725	18.35	9.18
36	37.51	35,7823	18.58	9.27
37	38.53	36,9563	18.98	9.49
38	39.40	37,9542	19.32	9.61
39	40.09	38,74665	19.59	9.67
40	41.15	39,95	20.00	9.70

ÖZGEÇMİŞ

Yener CESUR	
KİŞİSEL BİLGİLER	
ADRES:	Elazığ / Merkez
ASKERLİK:	Yapıldı
EPOSTA:	yenercesur@yahoo.com.tr
EHLİYET:	B sınıfı
MEDENİ HALİ:	Bekâr
İŞ DENEYİMİ	
✓ DSİ 9. Bölge Elektrik Arıza / Stajyer Elektrik Mühendisi / Elazığ ✓ PALME ALES DGÇS / Stajyer Elektrik Mühendisi / Aydın ✓ GARZAN HES / Stajyer Elektrik Mühendisi / Batman ✓ Erzin Doğalgaz Çevrim Santrali / Elektrik Mühendisi / Hatay ✓ AVANOS TR MERKEZİ / Elektrik Mühendisi / Nevşehir ✓ ALİBEYHÜYÜĞÜ TR MERKEZİ / Elektrik Mühendisi / Konya ✓ BAYMİNA ENERJİ / Elektrik Mühendisi / Ankara (Polatlı) ✓ ENKA DGÇS / Elektrik Mühendisi / Sakarya ✓ Bandırma ENERJİSA / Elektrik Mühendisi / Balıkesir	
KURS & SEMİNER	
✓ Koç Üniversitesi (İşletme Yönetimi Semineri) ✓ Amerikan Kültür Derneği (İngilizce A1-A2)	
BİLDİĞİ YABANCI DİLLER	
✓ İngilizce A1-A2 ✓ Almanca A1	
ARAŞTIRMA DENEYİMİ	
✓ Word, Excel, PowerPoint, MATLAB, C, PROTEUS	
İLGİLENDİĞİ DİĞER BİLİMLER	
✓ Felsefe, Sanat	