

**T.C.
CELAL BAYAR ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
KONTROL VE KUMANDA BİLİM DALI**

**ÇOK DEĞİŞKENLİ SİSTEMLERDE ETKİLEŞİMİN YOK
EDİLMESİ: PROSES KONTROL SİSTEMİ UYGULAMASI**

Mehmet Ali ÜSTÜNER

**Danışman
Doç. Dr. Sezai Taşkın**



MANİSA-2016

**Mehmet Ali
ÜSTÜNER**

**ÇOK DEĞİŞKENLİ SİSTEMLERDE ETKİLEŞİMİN YOK EDİLMESİ: PROSES
KONTROL SİSTEMİ UYGULAMASI**

2016

TEZ ONAYI

Mehmet Ali ÜSTÜNER tarafından hazırlanan "**ÇOK DEĞİŞKENLİ SİSTEMLERDE ETKİLEŞİMİN YOK EDİLMESİ: PROSES KONTROL SİSTEMİ UYGULAMASI**" adlı tez çalışması 01/02/2016 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri önünde Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü **Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak başarı ile savunulmuştur.

| | | |
|-------------------|--|-------|
| Danışman | Doç. Dr. Sezai Taşkın Celal Bayar Üniversitesi | |
| Jüri Üyesi | Prof.. Dr. Aydoğan SAVRAN Ege Üniversitesi | |
| Jüri Üyesi | Yrd. Doç. Dr. Mustafa NİL Celal Bayar Üniversitesi | |

TAAHHÜTNAME

Bu tezin Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nde, akademik ve etik kurallara uygun olarak yazıldığını ve kullanılan tüm literatür bilgilerinin referans gösterilerek tezde yer aldığını beyan ederim.

Mehmet Ali ÜSTÜNER

İÇİNDEKİLER

| | |
|--|-----|
| İÇİNDEKİLER | I |
| SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ | II |
| ŞEKİLLER DİZİNİ..... | III |
| TABLO DİZİNİ | IV |
| TEŞEKKÜR..... | V |
| ÖZET..... | VI |
| ABSTRACT..... | VII |
| 1. GİRİŞ | 1 |
| 2. ÇOK GİRİŞLİ-ÇOK ÇIKIŞLI SİSTEMLER | 4 |
| 2.1 Çok Girişli-Çok Çıkışlı Sistem Tanımı | 4 |
| 2.2 Çok Girişli-Çok Çıkışlı Sistem Analizi..... | 6 |
| 3. KONTROL SİSTEMLERİ..... | 10 |
| 3.1. PID Kontrol | 11 |
| 3.1.1 Oransal Etki ve Oransal Kontrol (P Etki) | 13 |
| 3.1.2 Oransal + İntegral Kontrol (PI Etki) | 14 |
| 3.1.3 Oransal + Türev Kontrol (PD Etki) | 16 |
| 3.1.4 Oransal + İntegral + Türev Kontrol (PID Etki) | 17 |
| 4. ÇOK DEĞİŞKENLİ KONTROL | 20 |
| 4.1. Çok Değişkenli Kontrol Genel Yapısı..... | 20 |
| 4.2. Decoupling (Etkileşimsiz) Kontrol | 21 |
| 4.2.1. Dinamik Decoupling..... | 22 |
| 4.2.2. Statik (kalıcı hal) Decoupling..... | 22 |
| 4.2.3. Yaklaşık Decoupling..... | 22 |
| 5. MATERYAL | 26 |
| 5.1. Festo Didactic MPS-PA Compact Workstation Deney Seti | 26 |
| 5.1.1. Seviye Takibi | 29 |
| 5.1.2 Pompa | 31 |
| 5.1.3. Oransal Valf..... | 31 |
| 5.1.4 Seviye Kontrol Fonksiyonu | 32 |
| 5.1.5 Akış Hızı Kontrol Fonksiyonu..... | 33 |
| 5.1.6 Basınç Kontrol Fonksiyonu | 34 |
| 6 DENEY SETİ ÜZERİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR | 36 |
| 6.1 Deney Setinin MIMO Sisteme Dönüştürülmesi..... | 36 |
| 6.2 Akış Hızı-Basınç Sisteminin Modellenmesi | 36 |
| 6.3 Decoupler (Kompansatör) Bloklarının Tasarımı..... | 39 |
| 6.4 Akış-Hızı-Basınç Sisteminin Simulinkte Modellenmesi..... | 42 |
| 6.5 Akış-Hızı-Basınç Sistemi için Tasarlanan LabVIEW Arayüzü | 43 |
| 7. SONUÇ VE ÖNERİLER | 45 |
| 8. KAYNAKLAR | 49 |
| ÖZGEÇMİŞ | 51 |

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

| | |
|---------------|--|
| MPS-PA | Modular Production System Process Automation |
| PLC | Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Denetleyici) |
| PI | Piping and Instrumentation (Borulandırma ve Enstrümantasyon) |
| MIMO | Multi-Input Multi-Output (Çok Girişli Çok Çıkışlı) |
| TITO | Two-Input Two-Output (İki Girişli İki Çıkışlı) |
| SISO | Single-Input Single-Output (Tek Girişli Tek Çıkışlı) |
| PID | Proportional-Integral-Derivative (Oransal-İntegral-Türev) |
| YSA | Yapay Sinir Ağları |

ŞEKİLLER DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Şekil 2.1. Kimyasal karıştırma reaktör tankı | 5 |
| Şekil 2.2. Saflaştırma Sütunu..... | 6 |
| Şekil 2.3. MIMO sistem genel yapısı (2x2)..... | 7 |
| Şekil 2.4. MIMO sistemlerin genel yapısı | 7 |
| Şekil 2.5. Çok girişli çok çıkışlı sistem iç modeli | 9 |
| Şekil 2.6. (a) Sistemdeki iç ilişkilerin bulunması, (b) herhangi bir çıkışın basamak cevabı | 9 |
| Şekil 3.1. Açık çevrim Kontrol sistemi..... | 10 |
| Şekil 3.2. Kapalı çevrim kontrol blok şeması | 10 |
| Şekil 3.3. Standart PID Kontrol | 12 |
| Şekil 3.4. Oransal etki ile çalışan kontrol sistemi..... | 14 |
| Şekil 3.5. PI kontrolün dinamik özellikleri..... | 15 |
| Şekil 3.6. Türev etkinin sistem cevabına etkisi | 17 |
| Şekil 3.7. PD kontrolün dinamik özellikleri | 17 |
| Şekil 3.8. Kontrol etkilerinin karşılaştırılması..... | 18 |
| Şekil 4.1. Kontrol etkilerinin karşılaştırılması..... | 20 |
| Şekil 4.1. Decoupling (etkileşimsiz) kontrolör genel yapısı..... | 22 |
| Şekil 4.2. Giriş-Çıkış Genel Yapıları | 23 |
| Şekil 4.3. Etkileşimsiz (decoupling) kontrol diyagramı Luyben(1970) yöntemi | 24 |
| Şekil 5.1. MPS-PA Compact Workstation Deney seti..... | 26 |
| Şekil 5.2. PI Diyagram MPS-PA Compact Workstation | 27 |
| Şekil 5.3. Kapasitif yaklaşım sensörleri B113(1) ve B114(2) ile seviye takibi..... | 29 |
| Şekil 5.4. Taşma güvenliği için şamandıra anahtarı (1) ile seviye takibi | 30 |
| Şekil 5.5. Eşik işlev için şamandıra anahtarı S112(1) ile seviye izleme..... | 30 |
| Şekil 5.6. Kontrol elemanı – Pompa P101 (1) | 31 |
| Şekil 5.7. Kontrol elemanı – Oransal Valf V106 (1)..... | 32 |
| Şekil 5.8. Seviye kontrol sistemi – B102 tankı (1) ve ultrasonik sensör B101(2)..... | 32 |
| Şekil 5.9. Kapalı çevrim seviye kontrol sistemi akış şeması | 33 |
| Şekil 5.10. Kontrol edilen akış hızı sistemi | 34 |
| Şekil 5.11. Kapalı çevrim akış hızı kontrol sistemi akış şeması..... | 34 |
| Şekil 5.12. Kontrol edilen basınç sistemi. Oransal valf V106 (1) ve piezorezistif.... | 35 |
| Şekil 5.13. Kapalı çevrim basınç kontrol sistemi akış şeması | 35 |
| Şekil 6.1. Sistemin Modeli..... | 37 |
| Şekil 6.2. Sistem transfer fonksiyonlarının benzetim sonuçlarının deney setindeki birim basak cevaplarıyla karşılaştırılması..... | 39 |
| Şekil 6.3. Decoupling (Etkileşimsiz) kontrol blok şeması..... | 40 |
| Şekil 6.4. Ziegler-Nichols yöntemi için elde edilen salınım grafiği | 41 |
| Şekil 6.4. Decoupling (Etkileşimsiz) kontrol Simulink Tasarımı..... | 42 |
| Şekil 6.5. Akış hızı-basınç sistemi için LabVIEW’de oluşturulan arayüz | 43 |
| Şekil 6.6. Akış hızı-Basınç sisteminin akış şeması..... | 44 |
| Şekil 6.7. LabVIEW’de yazılan decoupling kontrol programı | 44 |
| Şekil 6.8. Akış hızı-Basınç sisteminin detaylı akış şeması..... | 44 |
| Şekil 7.1. Etkileşimli sistem ve sistem etkileşimsiz sistem simulink sonuçları..... | 45 |
| Şekil 7.2. Etkileşimli sistem ve etkileşimsiz sistem deney sonuçları | 46 |
| Şekil 7.3. Etkileşimli sistem ve sistem etkileşimsiz sistem simulink sonuçları..... | 47 |
| Şekil 7.4. Etkileşimli sistem ve etkileşimsiz sistem deney sonuçları | 47 |

TABLO DİZİNİ

| | |
|---|----|
| Tablo 3.1. K_p , K_i ve K_d katsayı değişimlerinin sisteme etkisi..... | 19 |
| Tablo 6.1. Decoupling yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları..... | 40 |
| Tablo 6.2. Ziegler-Nichols katsayı ayarı formülleri..... | 42 |

TEŞEKKÜR

Bilgi ve tecrübesi ile lisansüstü öğrenim hayatımın tüm zorlu aşamalarında maddi manevi her yönden yardımcı olan, tecrübeleri ile beni aydınlatan ve desteğini hiç eksik etmeyen, kendisini tanımaktan büyük onur duyduğum danışman hocam Sayın Doç. Dr. Sezai TAŞKIN' a, çalışmamın her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren arkadaşım Arş. Gör. Ali BAKBAK'a, çalışmalarım sırasında manevi desteğini her zaman hissettiğim değerli arkadaşlarım Arş. Gör. Hasan SÖZEN ve Elektrik Elektronik Mühendisi Mehmet Akif ERKOÇ'a, öğrenim hayatım boyunca beni maddi ve manevi olarak destekleyen ve hep yanımda olan aileme yürekten teşekkür ederim.

Mehmet Ali ÜSTÜNER
Manisa,2016

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

ÇOK DEĞİŞKENLİ SİSTEMLERDE ETKİLEŞİMİN YOK EDİLMESİ: PROSES KONTROL SİSTEMİ UYGULAMASI

Mehmet Ali ÜSTÜNER

**Celal Bayar Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Sezai TAŞKIN

Son yıllarda özellikle kimya endüstrisinde, çok değişkenli kontrol teknikleri artan bir önem kazanmıştır. Endüstriyel sistemlerde birden fazla giriş ve birden fazla çıkışlı sistemler kullanıldığından, böyle sistemlerin kontrol uygulamalarında çeşitli problemlerle karşılaşılabilir. Bu tip sistemlere çok girişli çok çıkışlı sistemler (Multi Input-Multi Output-MIMO) denilmektedir. Bu problemlerin başında, sistem çıkışlarından birinin diğer çıkışlardan ya da diğer çıkışlara bağımlı girişlerden olumsuz yönde etkilenmesi gelmektedir. Bu olumsuz etki çıkışların girişler üzerinde yaptığı etkiler olabileceği gibi endüstride üstünde durulması gereken güvenlik, ürün kalitesi, verimlilik gibi gereksinimleri sebebi ile çıkışlarda da olabilir. Bunun için MIMO sistemlerdeki giriş-çıkış etkileşimlerinin incelenmesi ve ortadan kaldırılması önem arz etmektedir. Bu sebeplerden dolayı MIMO sistemlerdeki etkileşim önemli bir araştırma alanı haline gelmiştir.

Bu çalışmada öncelikle MIMO sistemlerdeki girişlerin ve çıkışların birbirleriyle etkileşimi incelenmiştir. Deney aracı olarak Festo marka MPS-PA Compact Workstation deney seti kullanılmıştır. Normalde tek girişli tek çıkışlı (Single Input Single Output-SISO) dört ayrı tek çevrim kontrol sistemine sahip bu deney setine, iki girişli iki çıkışlı (Two Input Two Output-TITO) sistem olacak şekilde düzenlemeler yapılmıştır. Oluşturulan sistemin giriş çıkış ilişkilerinden deneysel veriler alınarak MATLAB ortamında sistemin transfer fonksiyon parametreleri hesaplanmıştır. Transfer fonksiyonlar kullanılarak decoupling kontrolör tasarımı yapılmış ve Simulink ortamında etkileşimsiz sistem test edilmiştir. Tasarlanan kontrolör LabVIEW ortamında da oluşturulup etkileşimsiz sistem deneysel olarak da test edilmiştir. Sonuçlar birbiriyle karşılaştırıldığında simülasyon ortamında başarılı bir sonuç veren decoupling kontrol uygulaması, deneysel olarak gerçek sistemde başarılı sonuçlar vermiştir.

Anahtar Kelimeler: MIMO, PID, Decoupling, Proses Kontrol

2016, 61 sayfa

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

DECOUPLING CONTROL OF MULTIVARIABLE SYSTEMS: AN APPLICATION OF A PROCESS CONTROL SYSTEM

Mehmet Ali ÜSTÜNER

**Celal Bayar University
Graduate School of Applied and Natural Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Sezai TAŞKIN

In recent years, especially in chemical industry, control techniques of multiple variables have been gaining an increasing importance. In industrial systems, due to using systems which have more than one input and output, various problems are encountered in the application control of such systems. This kind of systems are called as “Multi Input Multi Output (MIMO) Systems”. Negatively affected one of system output from the other outputs or inputs which are connected to the other outputs is one of these problems. This negative effects can be on the inputs due to outputs as well as on the outputs due to worth stressing safety, product quality and efficiency requirements in industry. Therefore, analyzing and decoupling of Input-Output interactions on MIMO systems have importance. Because of these reasons, interactions on MIMO systems have become an important research area.

In this study, firstly, interactions of Inputs Outputs on MIMO systems have been analyzed. In experiments, FESTO Didactic Company MPS-PA Compact Workstation training test-bed have been used. Normally this experimental set have Single Input Single Output (SISO) with four separate unique loop control system. It has been configured as to be two input two output (TITO) system. Experimental data has been imported from Input output interactions of constructed system and transfer function parameters of system have been estimated with MATLAB. Decoupling controller design has been made using transfer functions and decoupled system has been tested on SIMULINK. Designed controller also has been constructed on LabVIEW and decoupling system also has been tested experimentally. When results have been compared with each other, decoupling control application which gives a successful result on simulation, gives also satisfactory result as experimentally in real system.

Keywords: MIMO, PID, Decoupling, Process Control

2016, 61 pages

1. GİRİŞ

Endüstride kullanılan birçok sistem, tek bir çıkışın, tek bir değişkenle kontrol edilebildiği yapıya uymazlar. Sistemler birden fazla giriş ve çıkışa sahip olabilirler. Bu tip sistemlere, çok giriş - çok çıkışlı (Multi Input Multi Output- MIMO) sistemler ya da çok değişkenli sistemler adı verilir. Çok girişli - çok çıkışlı sistemlerin kontrolünde çeşitli problemlerle karşılaşılmaktadır. Bu problemlerin başında, sistem çıkışlarından birinin diğer çıkışlardan ya da diğer çıkışlara bağımlı girişlerden olumsuz yönde etkilenmesi gelmektedir. Bugüne kadar çeşitli kontrol yapıları bu sistemlerin kontrolünde uygulanmıştır. Seviye, basınç, akış ve sıcaklık gibi kontrol işlemlerinin bir arada bulunduğu üniteler için tasarlanan kontrolörler, genelde her bir işlemi bağımsız olarak kontrol etmektedir [1].

MIMO sistemlerdeki çevrim etkileşimlerinden dolayı SISO sistemlerdeki kontrol yöntemlerini MIMO sistemlere uyarlamak zordur. MIMO sistemleri kontrol etmek için öncelikle bu sistemlerin matematiksel modelinin çıkarılması gerekir. Böylece sistem daha anlaşılır ve kontrolü daha kolay olur. Matematiksel model çıkarılırken sistem değişkenleri arasındaki ilişki analiz edilmelidir.

Sistemin modelinden yararlanılarak MIMO sistemlerdeki etkileşimi yok etmeye “decoupling (etkileşimsiz) kontrol” adı verilmektedir. Decoupling kontrol, bir proses değişkenindeki değişimin diğer proses değişkenlerindeki çevrim etkilerini ortadan kaldırılması için, sisteme, esas kontrolörlerle birlikte çalışan kompensatör (decoupler) eklenerek yapılır.

MIMO sistemlerin kimya endüstrisi başta olmak üzere, endüstride fazlaca kullanılmasından dolayı decoupling kontrol üzerine çeşitli çalışmalar yapılmıştır [2]. Huang ve ark., 2003 [3], direkt yöntem ismini verdikleri çok çevrimli sistemleri ayrı ayrı tek çevrim olarak kontrol edebilecek PI/PID kontrolör üzerine çalışmışlardır. Zhai ve ark., 2005 [4] YSA ile lineer olmayan çok değişkenli decoupling PID kontrol üzerine çalışmışlardır. Yine Zhai ve ark., 2006 [5] karmaşık endüstriyel sistemler için akıllı decoupling PID kontrol adlı bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışmalarında geleneksel PID kontrolörlerinin etkileşimler üzerinde tatmin edici olmadığını söylemişler ve modellenmemiş dinamikleri olan sistemler için geleneksel PID

kontrolöre decoupling ve YSA ekleyerek sağlam etkili bir akıllı kontrolör tasarlamışlardır. Liu T. ve ark., 2007 [6] MIMO sistemler için analitik decoupling kontrol yöntemi önermişlerdir. Bu yöntemde decoupling kontrol matrisinin uygulamasını hafifletmek için analitik bir yaklaşım kullanarak pratik bir forma dönüştürmüşlerdir. Shen ve ark., 2010 [7] yüksek boyutlu MIMO sistemler için normalize edilmiş decoupling kontrol isimli yeni bir kontrolör tasarlamışlardır. Bu kontrolörün en büyük avantajı kapsamlı bir hesaplama çabası gerektirmemesidir. Vrančić D. 2011 [8] ters decoupling ile MIMO kontrolörler üzerine bir çalışma yapmıştır. Garrido J. ve ark., 2011 [9] ters decoupling kontrolüne genişletilmiş bir yaklaşım sunmuşlardır. Bu yaklaşımlarıyla ayrılmış sistemin transfer fonksiyonu seçiminde esneklik sağladığını belirtmişlerdir. Morilla F. ve ark., 2008 [10] iki girişli iki çıkışlı (TITO) sistemlerin decoupling kontrolü için yeni bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntemde dört gecikmeli PID kontrolör ve iki P kontrolör kullanmışlar ve daha iyi sonuçlar aldıklarını belirtmişlerdir. Jevtović ve ark., 2010 [11] TITO sistemler için ideal kompensatör (decoupler) temelli PID kontrolör tasarlamışlardır.

Bu çalışmaların yanı sıra çok değişkenli sistemlerin kontrolünde bulanık mantık ve YSA kullanarak ve kendinden parametre ayarlamalı decoupling PID çalışmaları da vardır. Fu Y. ve ark. [12] doğrusal olmayan ve güçlü etkileşimi bulunan sistemler için YSA kullanarak akıllı decoupling kontrol yöntemi geliştirmişlerdir. Tang Y. Ve ark. [13] çok değişkenli etkileşimli sistemlerde CMAC YSA ve PID kontrolörü bir arada kullanarak kendinden ayarlamalı yeni bir decoupling kontrolör yöntemi önermişlerdir.

Bu çalışmada, etkileşimli sıvı akış hızı-basınç sistemine dönüştürülen Festo Didactic MPS-PA Compact Workstation deney setinden yararlanarak, deney setinin giriş ve çıkışları arasındaki etkileşimi ortadan kaldırmak için ters decoupling tekniği uygulanmıştır. Veri toplama kartıyla alınan basamak giriş cevapları ile sıvı akış hızı, basınç ve etkileşimlerin transfer fonksiyon parametreleri oluşturulmuştur. Sistemdeki etkileşimi kaldırmak için bu transfer fonksiyonlarıyla kompensatör (decoupler) tasarlanmıştır. Simulink ortamında oluşturulan sistem modeline tasarlanan kompensatör eklenmiş ve decoupling kontrol ile sistemdeki etkileşim yok edilmiştir. Tasarlanan kompensatör aynı şekilde kontrolörün tasarlandığı LabVIEW ortamına

eklenerek deneysel olarak da etkileşim gözlemlenmiş ve simulink sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır.

Bölüm 2’de çok girişli çok çıkışlı sistemlerden bahsedilmiştir. Bölüm 3’de kontrol yöntemleriyle ilgili genel bilgiler verilmiştir. Bölüm 4’te decoupling kontrolden bahsedilmiş ve decoupler (kompansatör) tasarımı anlatılmıştır. Bölüm 5’te kullanılan materyaller ve özellikleri yer almaktadır. Bölüm 6’da sistemden alınan verilerle sistemin transfer fonksiyonu bulunmuş ve gerçek sisteme uygunluğu test edilmiş, sistemin decoupling kontrole uygun olup olmadığı araştırılmış ve decoupler (kompansatör) tasarımı anlatılmıştır. Bölüm 7’de Simulink ve deney sonuçları paylaşılmış, birbiriyle karşılaştırılıp değerlendirilmiş ve ileride yapılabilecek çalışmalardan bahsedilmiştir.

2. ÇOK GİRİŞLİ-ÇOK ÇIKIŞLI SİSTEMLER

Günümüzde özellikle kimya ve petro-kimya endüstrisinde çok girişli çok çıkışlı sistemlerle karşılaşmaktadır. Bu sistemler, kendi durağan ve dinamik davranışlarını etkileyen birden fazla eyleyiciden meydana gelmişlerdir. Sistemlerde değişken değerlerinin alındığı algılayıcılar da bulunmaktadır. Bu da birden fazla kontrol çevrimlerin aynı sistem içerisinde bulunmasını sağlamaktadır. Çok değişkenli sistemlerin amacı birkaç giriş kanalını aynı anda ayarlayarak, çıkışta istenilen değişimi elde etmektir.

2.1 Çok Girişli-Çok Çıkışlı Sistem Tanımı

Tek bir çıkışın tek bir değişken tarafından kontrol edildiği sistemler tek giriş tek çıkış sistemler (Single Input Single Output-SISO) olarak sınıflandırılırlar. Ancak birçok sistem bu basit kontrol konfigürasyonuna uymaz. Örneğin herhangi bir ürünün imalat veya rafine işlemlerini yapan bir birimin kontrolü böyle tek kontrollü bir çevrim ile yapılamaz. Hatta her bir birim işlemi en az iki değişken üzerinde kontrol gerektirir. Örneğin ürün hızı ve ürün kalitesi. Bu yüzden genellikle en az 2 tane çevrimle baş etmek gerekir. Birden fazla çevrime sahip sistemlere çok girişli çok çıkışlı sistemler(Multi Input Multi Output-MIMO) denir [2].

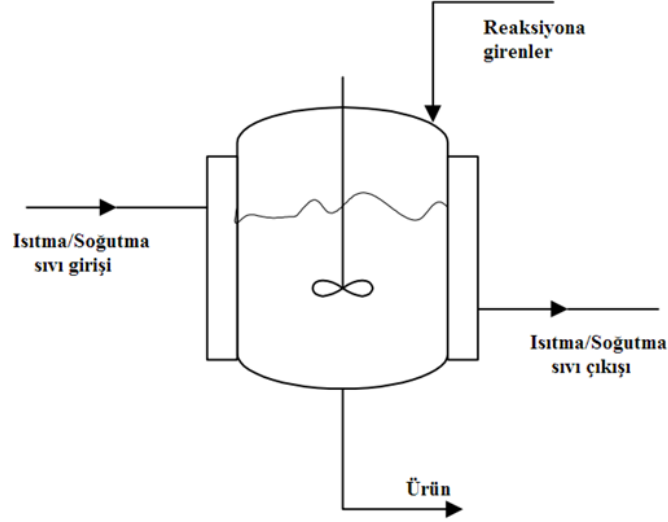
Genel olarak MIMO sistemlere;

- a. Kimyasal reaktörler
- b. Saflaştırma sütunları
- c. Isı değiştiricileri

örnek verilebilir.

Kimyasal Reaktörler: Özellikle petro-kimya ve ilaç endüstrisinde kullanılan kimyasal reaktörlerdeki reaksiyon sisteminde görülen değişkenler genellikle üretim malzemesi ve reaksiyon kütlelerinin sıcaklığıdır (Şekil 2.1). Bundan dolayı bu sistemdeki malzeme, üretim kontrol çevriminde olduğu gibi sıcaklık kontrol çevriminde de olmalıdır. Genelde reaktör sıcaklığı, bobinlerin ve kaplamaların ısıtılıp/soğutulması yoluyla sıcaklık kontrolünün tepkimededen enerjinin

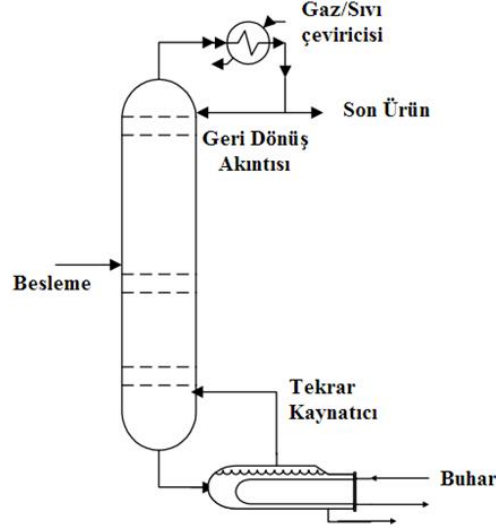
eklenip/çıkartılmasıyla ürün kısmının ayarlanmasında kullanılır. Ürün kısmının istenilen düzeye getirmek etkileşim kütlelerinin sıcaklığını da değiştirir. Diğer taraftan ısının sürülmesi veya eklenmesi ürün kısmına ve etkileşim oranına bağlıdır. İki kontrol çevriminin doğru şekilde çalışabilmesi için birbirlerinin ne yaptığının tam olarak bilmelidir. Amaçlarına uygun olmayı denemeli aksi taktirde, iki çevrim birbirinin ilgilerine ters hareket eder. Bu olaya “çevrim etkileşimi” denir.



Şekil 2.1. Kimyasal karıştırma reaktör tankı

Safılaştırma Sütunları: Ayırıştırma ve damıtma işlemlerinde sıklıkla kullanılan safılaştırma sütunları, bu işlemler için belli bir enerjiye ihtiyaç duyarlar (Şekil2.2). Bununla beraber, alt ve üst malzemelerin üretim akışını kontrol eden tasarım değişkenlerinin kontrolü için kullanılan enerjinin küçültülmesi mümkündür. Genel planda alt ürün malzemesinin kontrolünde kullanılan ısıtıcı girişiyken üst ürün malzemesinin kontrolünde geri dönüş akısı kullanılır. Bununla birlikte, alt ürün malzemesi geri dönüş akısının değişiminden etkilenir ve hatta üst ürünün küçük bir parçasının akımı da giriş ısısının değişiminden etkilenir.

Örnekten de anlaşılacağı gibi çevrim etkileşimi doğal olarak onların fiziksel ve kimyasal sonuçlarını yaratır. Tipik olarak geri dönüş akısının kullanılmasının amacı ısının iyileşmesi içindir, bu da çevrim etkilerinin süreç tasarımının sonucunda çıkmaktadır.



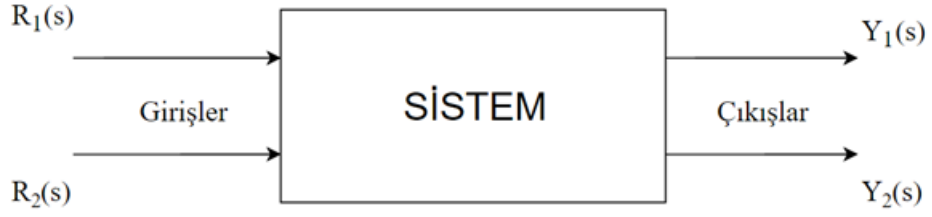
Şekil 2.2. Safılaştırma Sütunu

Kontrol sistemi tasarımında gerekli önlemler alınmadıkça, çevrim etkileşimleri sistemin kararsızlığına neden olur. Çevrim etkileriyle uğraşmanın iki basit yaklaşımı vardır ki bunlar; çıkış çiftlerinin girişlerinin kontrol edilmesindeki en uygun metoda karar vermek ve çok değişkenli kontrol tasarım stratejisi ile kontrol çevrimleri arasındaki etkileşimleri ortadan kaldırmaktır.

Örneklerden de anlaşılabilceği gibi, birçok karmaşık mühendislik sistemi, sistemin durağan ve dinamik davranışını etkileyen birkaç kontrol organından oluşmuştur. Çok değişkenli sistemlerin amacı birkaç giriş kanalını aynı anda ayarlayarak, çıkışta istenilen değişimi elde etmektir.

2.2 Çok Girişli-Çok Çıkışlı Sistem Analizi

Çok girişli çok çıkışlı sistemlerde herhangi bir çıkış, diğer girişten ya da herhangi bir giriş, diğer bir çıkıştan etkilenmektedir. Bu etkileşimin hangi düzeyde olduğunu bilinmesi gerekir. Ancak bu şekilde kontrol tasarımın başarıya ulaşması sağlanır. Çok değişkenli sistem analizi için örnek olarak 2 Girişli ,2 Çıkışlı (2x2 Two Input-Two Output -TITO) süreç örnek olarak verilmiştir (Şekil 2.3). Çok değişkenli sistemlerin ve sinyallerin normları ile kazancın, band genişliğinin ve diğer sistem özelliklerinin elde edilmesi mümkündür.



Şekil 2.3. MIMO sistem genel yapısı (2x2)

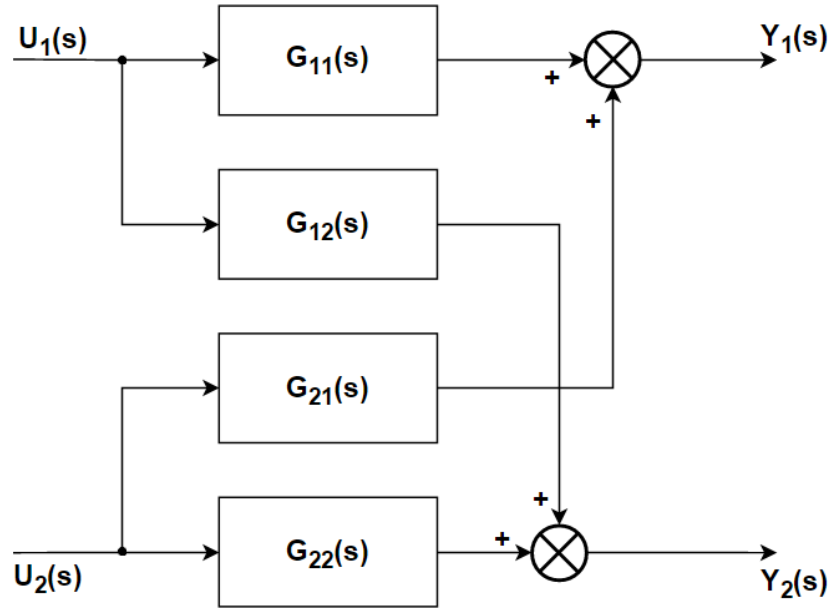
Transfer fonksiyon ilişkilerini kullanarak bu sistem değişkenlerini;

$$Y_i(s) = G_{ii}(s)R_i(s) + G_{ij}(s)R_j(s) \quad (2.1)$$

$$Y_1(s) = G_{11}(s)R_1(s) + G_{12}(s)R_2(s) \quad (2.2)$$

$$Y_2(s) = G_{21}(s)R_1(s) + G_{22}(s)R_2(s) \quad (2.3)$$

denklemleri ile tanımlayabiliriz. Burada $G_{ij}(s)$ fonksiyonu i . çıkış değişkeni ile j . giriş değişkeni arasındaki ilişkiyi içeren transfer fonksiyonudur. Bu denklem setinin 2x2 sistemler için blok diyagram ile gösterimi de Şekil 2.4 te görülmektedir.



Şekil 2.4. MIMO sistemlerin genel yapısı

Bu sistemi tamamlayan transfer fonksiyonunu kısaca; $Y(s)=G(s)R(s)$ şeklinde ifade edebiliriz ki burada; $Y(s)$ ve $R(s)$ matrisleri i çıkış ve j giriş değişkenlerini ifade eden sütun matrislerdir, $G(s)$ ise i den j ye transfer fonksiyonunu ifade eder. Matris gösterimi birçok değişken içeren karmaşık çok değişkenli sistemlerin iç ilişkilerin gösterilmesinde kullanılır.

Çok girişli çok çıkışlı sistemleri, en basit anlamıyla m girişli L çıkışlı sistemler olarak tanımlayabilir. Dolayısıyla bu sistem için basit transfer fonksiyonu $Y(s)=G(s)U(s)$ olur ki burada; $Y(s)$ $L \times 1$ 'lik bir vektör, $G(s)$ ise $L \times m$ 'lik transfer fonksiyonu matrisidir.

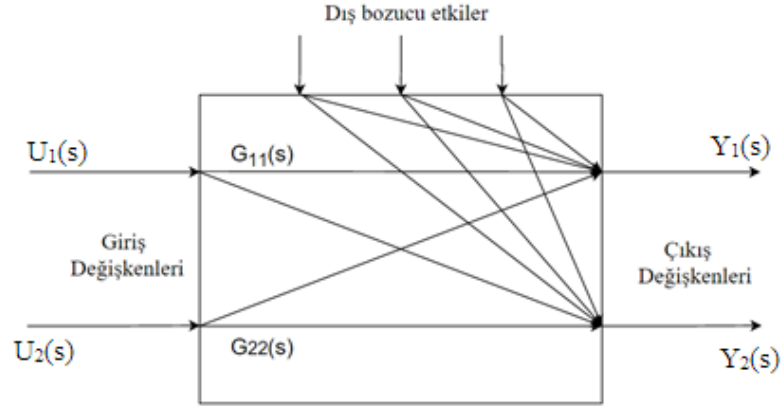
Eğer bu sistemde ilk giriş olan U_1 değişecek olursa, doğal olarak girişler ile çıkışlar arasında etkileşim var ise, Y_1, Y_2, \dots, Y_L çıkışları etkilenir. Etkileşimsiz bir durumda ise bunun sonucu olarak U_1 sadece Y_1 'i, U_2 yalnızca Y_2 'yi etkiler.

Tek girişli tek çıkışlı skaler (SISO) sistemler ile MIMO sistemler arasındaki yapıda yön kavramı en temel farktır. Yön kavramı sadece vektörler ve matrisler için geçerlidir, skalerler için bundan bahsedilemez. Yön kavramının getirdiği karmaşıklığı bir kenara bırakacak olunursa, SISO sistemler için geçerli olan birçok teknikleri MIMO sistemleri de kapsayacak şekilde genişletilebilir. Buradaki tek istisna, Bode kararlılık ölçütünün tekil değerler için genelleştirilememesidir. Bu da MIMO transfer fonksiyonlarının faz değerlerinin tespitinde güçlükler çıkarmaktadır.

Çok girişli çok çıkışlı sistemin bozucu etkilerini de içeren daha detaylı blok şeması Şekil 2.5'te verilmiştir.

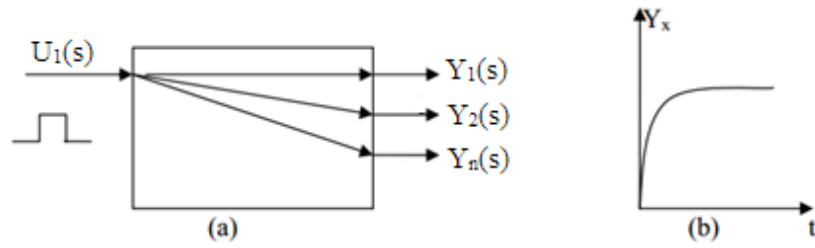
Burada gösterilen yapıda temel olarak tüm giriş ve çıkış değişkenlerinin birbirleri ile belli bir ilişkide olduğu düşünülecek olursa, bunların her birinin ayrı ayrı transfer fonksiyonlarından bahsedilebilir. Sistemin genel transfer fonksiyonu yazıldığında sistemin dinamiği Denklem 2.4'teki gibi ifade edilir.

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (2.4)$$



Şekil 2.5. Çok girişli çok çıkışlı sistem iç modeli

Denklem 2.4'te verildiği gibi çok değişkenli sistemin dinamik matrisini yazabilmek için öncelikle iç ilişkilerin bulunması gerekir. Bunun için en basit deneysel yöntem her bir giriş değişkenine diğerlerini sabit tutmak koşulu ile basamak fonksiyonları uygulamak ve her bir çıkışın değerlerini ayrı ayrı gözlemleyerek o giriş değişkeni ile çıkış değerleri arasındaki ilişkiyi Şekil 2.6'daki gibi belirlemek olacaktır.



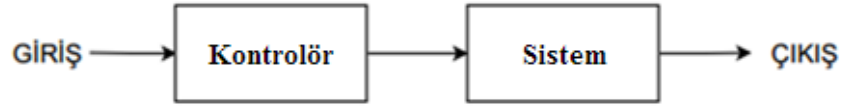
Şekil 2.6. (a) Sistemdeki iç ilişkilerin bulunması, (b) herhangi bir çıkışın basamak cevabı

Sistemin iç dinamikleri belirlendikten sonra, öncelikle sistemin kontrol edilebilmesi için en temel yapılması gereken sistemdeki iç ilişkilerin ortadan kaldırılması ve birinci girişin sadece birinci çıkışa etkisinin, ikinci girişin sadece ikinci çıkışa etkisinin olması sağlanmalıdır. Daha sonra sistemin kararlılığı ve genel performansı da göz önünde bulundurularak bir kontrolör tasarlanarak sisteme eklenir [1].

3. KONTROL SİSTEMLERİ

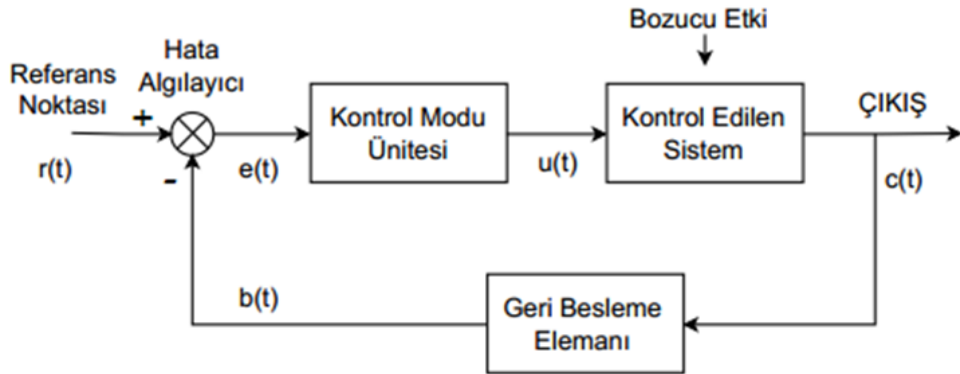
Kontrolde amaç, bir sistemde istenilen çıkışı elde etmek için uygun giriş sinyalleri üretmektir. Mühendislikte kontrol sistemleri açık çevrim kontrol ve kapalı çevrim kontrol olarak ikiye ayrılır [14].

Bir sistemde kontrolörün sistemin çıkışından etkilenmediği, kontrolün yalnızca verilen referans değerine göre yapıldığı sistemlere açık çevrim kontrol denilmektedir. Açık çevrim kontrol hassas kontrol gereksinimi olmayan sistemlerde kullanılmaktadır. Blok şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir. Açık çevrim kontrol genelde yapısı çok iyi bilinen sistemlerde kullanılır.



Şekil 3.1. Açık çevrim Kontrol sistemi

Kapalı çevrim denetim sisteminde ise çıkış değişkeni bir ölçme elemanı ile ölçülür ve geri besleme ile girişteki referans değeri ile karşılaştırılarak bir hata sinyali elde edilir. Bu hata sinyaline göre de çıkış değişkenine uygun bir kontrol sinyali üretilir. Kapalı çevrim kontrol sistemleri “geri beslemeli kontrol sistemleri” olarak da adlandırılabilir. Kapalı çevrim kontrolün blok şeması Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. Kapalı çevrim kontrol blok şeması

Kapalı çevrimin en önemli özelliği geri beslemedir. Geri besleme çıkışın girişe tekrar uygulanmasıdır. Negatif ve pozitif olmak üzere iki çeşit geri besleme vardır.

Negatif geri beslemede, çıkıştaki değişimler girişe ters yönde etki eder. Bu sistemde çıkış istenilen değerden yüksek ise kontrol etkisi azaltılarak çıkışın istenilen değere düşmesi sağlanır. Aksi durumda, çıkış istenilen değerden düşük ise kontrol etkisi artırılarak çıkışın istenilen değere ulaşması sağlanır. Negatif geri beslemede her zaman giriş ile çıkışın farkı alınır ve bu değer hata sinyali olarak isimlendirilir. Hata sinyali pozitif veya negatif değerli olabilir. Kontrol organına iletilen bu hata sinyali ile çıkışın istenilen değerde tutulması sağlanır. Negatif geri besleme endüstriyel sistemlerin en önemli özelliğidir ve hatayı daima azaltmaya ve sıfır yapmaya çalışır.

3.1. PID Kontrol

PID kontrolde yer alan P,I,D harfleri İngilizce Proportional, Integral ve Derivative (oransal, integral ve türev) kelimelerinin baş harflerinde oluşur. PID kontrol endüstriyel alanda yeterli ve uygun bir kontrol sağlayan en basit yapıda kontrolör olarak bilinir. Basit ve kullanışlı olmasına rağmen karmaşık yapıdaki sistemlere uygulanamamaktadır. PID kontrol çoğunlukla doğrusal ve basit yapıdaki tek çevrim sistemlere kolaylıkla uygulanabilmektedir. Kontrol edilecek sistemde doğrusal olmayan etkiler meydana geliyorsa, bu tür kararsız sistemleri PID kontrol ile kararlı hale getirmek mümkün değildir.

PID kontrolde bulunan üç temel bileşenlerden, kontrol edilecek sisteme uygun en basit bileşim kullanılır. Bu bileşimler P, PI, PD ve PID şeklinde olabilir.

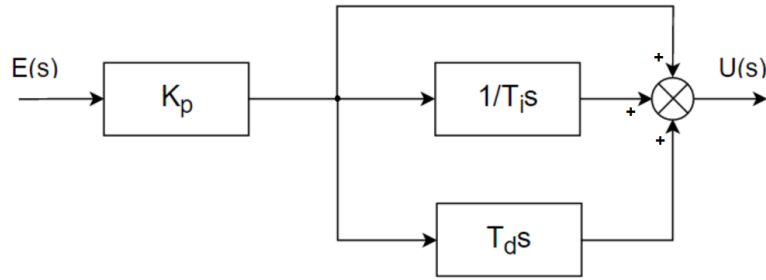
Standart PID kontrol yapısının blok şeması Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Standart PID kontrol yasasına bağlı $u(t)$ kontrol sinyali çıkışı Denklem 3.1'de gösterildiği gibi üç temel kontrol etkisini toplamı şeklinde ifade edilir. Bu ifadeden yola çıkarak PID kontrol transfer fonksiyonu ise Denklem 3.2'deki gibi olacaktır.

PID kontrol üç temel kontrol etkisinin üstünlüklerini tek bir birim içinde birleştiren bir kontrol etkisidir. İntegral etki sistemde ortaya çıkan kalıcı durum

hatasını sıfırlamak için kullanılır. Türev etki ise PI kontrol etkisi kullanıldığı zaman sistemin cevap hızını arttırır.

$$u(t) = K_p \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (3.1)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (3.2)$$



Şekil 3.3. Standart PID Kontrol

Denklem 3.2'deki standart PID yordamından başka koşut ve ardışık olarak bilinen, uygulamada kullanılan iki farklı türde daha PID yordam biçimi vardır. Bu PID kontrolör yordamı biçimlerinin transfer fonkniyonları denklem 3.3 ve 3.4'te verilmiştir.

$$G_d(s)_{koşutPID} = K_{pp} + \frac{1}{T_{ip}s} + T_{dp}s \quad (3.3)$$

$$G_d(s)_{ardışıkPID} = K_{ps} \left(1 + \frac{1}{T_{is}s} \right) (1 + T_{ds}s) \quad (3.4)$$

Denklem 3.2, 3.3 ve 3.4'te verilen oransal, integral ve türev sabitleri her bir PID yordamı için farklıdır. Bundan dolayı farklı PID yordamı biçimleri arasındaki parametreler için dönüşüm ifadesi çıkarılması gerekmektedir.

3.1.1 Oransal Etki ve Oransal Kontrol (P Etki)

Kontrol edilen sistemde integral etki sonsuz türev etki de sıfır olarak ayarlandığında PID kontrolörü yalnızca oransal etki ile çalışır. Oransal kazanç K_p ayarlanarak kontrol organının kontrol duyarlılığı artırılabilir.

P kontrol, hatanın anlık değişimiyle orantılı bir kontrol etkisi sağlar. Matematiksel ifadesi Denklem 3.5'te gösterilmiştir. Bu denklemde K_p oransal kazanç veya oransal etki parametresi olarak isimlendirilir.

$$u(t) = K_p e(t) \quad (3.5)$$

Oransal kontrol transfer fonksiyonu Denklem 3.6'da da görüleceği üzere oransal kazançtır.

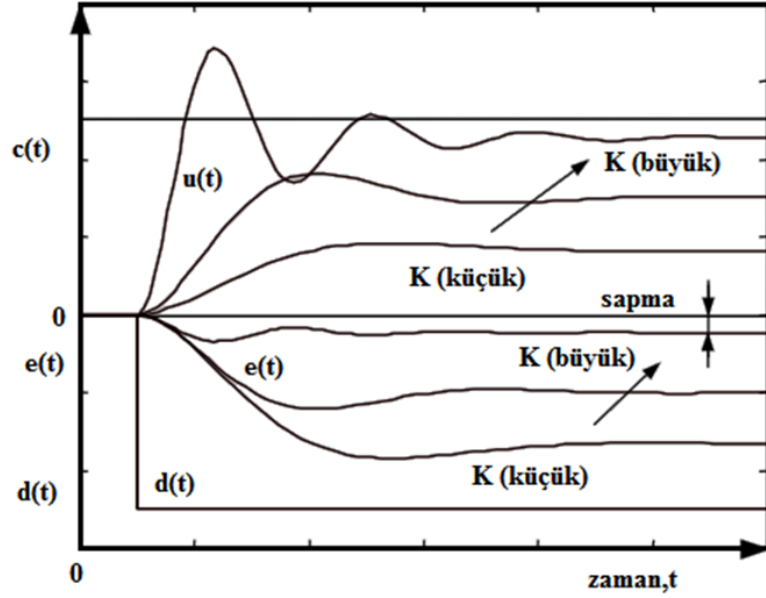
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (3.6)$$

P kontrolde oransal kazanç K_p sabit iken $u(t)$ kontrol etkisinin şiddeti hatanın şiddetine bağlıdır. Hatanın şiddeti ne kadar fazla olursa oransal etkinin de hatayı düzeltme etkisi o kadar büyük olur. Hata azaldıkça kontrol etkisinin şiddeti de azalır. Fakat hata belli bir değere düştükten sonra kontrol etkisinin şiddeti hatayı tamamen yok etmeye yetmez ve bu durumda geri beslemeli sistemlerde kalıcı durum hatası meydana gelebilir. Oransal kazancın büyük tutulması ile kalıcı durum hatası küçük bir değerde tutulabilir. Fakat bu durumda sistem aşırı salınımlı ve kararsız hale gelebilir. Oransal etki en iyi şekilde kazanç artımı karşısında kararsız hale geçmeyen sistemlerde iyi bir sonuç verir.

Oransal etkinin en büyük üstünlüğü yapısının basit olmasıdır. Basit bir kuvvetlendirici yardımı ile dahi oransal etkide çalışan bir kontrolör tasarlamak mümkündür.

Şekil 3.4'de oransal etki ile çalışan bir kapalı çevrim kontrol sisteminin bozucu basamak giriş karşısında gösterdiği dinamik davranış eğrileri verilmiştir. Bu eğrilerden $e(t)$ hata ve $u(t)$ kontrol sinyalinin, K_p oransal etki parametresine göre

değişimi gözlenebilir. Burada $e(t)$ sinyalindeki değişim ile $u(t)$ kontrol sinyalindeki değişimin birbirine göre 180° değiştiği görülmektedir. Bu durum negatif geri beslemenin bir özelliğidir.



Şekil 3.4. Oransal etki ile çalışan kontrol sistemi

3.1.2 Oransal + İntegral Kontrol (PI Etki)

Oransal etkiye integral etki ilavesi veya PID kontrolde türev etkinin (D) devre dışı bırakılmasıyla PI kontrolü yapılabilir. PI tipi kontrol nispeten basit olup endüstriyel uygulamaların % 90'ında PI kontrol kullanılmaktadır. İntegral etkinin olumlu tarafı biriktirilmiş hataya orantılı bir kontrol çıkışı oluşturarak hatanın zaman içinde sıfırlanmasını sağlamasıdır olumsuz yanı ise, hatayı biriktirerek düzelttiği için kontrol etkisinin ve hatayı düzeltmesinin zaman almasıdır. Bu da integral etkiyi yavaş bir kontrol biçimi yapar. Ayrıca integral etkiden dolayı paydaya katılan bir s çarpanı integral etkili kontrole 90° 'lik faz gecikmesi verir. Geri beslemeli sistemlerde faz gecikmesi sistemin kararlılığını kötüleştirir.

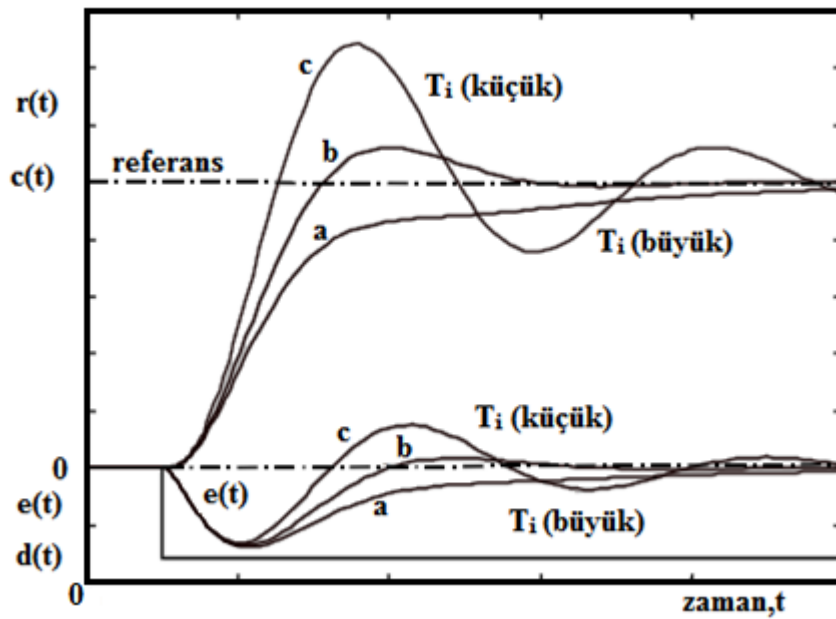
İntegral etkinin kullanım amacı sistemin değişen istekleri üzerinde yeterli bir kontrol sağlamaktır. Oransal (P) etkiye integral (I) etkisi eklendiğinde kontrol çıkışında sürekli artan denetim etkisi elde edilir. Böylece kontrol edilen elemanın

hatayı yok edecek kadar çalışması sağlanır. Bu işlem sonucunda kontrol edilen çıkışta ortaya çıkan sapma sıfırlanmış olur.

Standart PI kontrolün matematiksel ifadesi ve transfer fonksiyonu sırasıyla Denklem 3.7 ve 3.8'te gösterilmiştir.

$$u(t) = K_p \left(e(t) + K_i \int_0^t e(t) d(t) \right) \quad (3.7)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (3.8)$$



Şekil 3.5. PI kontrolün dinamik özellikleri

Şekil 3.5'de PI kontrollü geribeslemeli sistemin basamak bozucu giriş karşısında hata ve kontrol edilen çıkışın zaman bağlı değişim eğrileri verilmiştir. İntegral etkiden dolayı hatanın sıfırlandığı görülmektedir. Bu eğrilerden T_i integral etkisine bağlı olarak hatanın ne kadar zamanda sıfırlandığı da görülmektedir. Burada integral etkisi küçüldükçe hatanın giderilme hızı artmaktadır. Diğer taraftan küçük integral etkinin sistemi aşırı salınımlı hale getirdiği ve sistemin kararlılığını bozduğu da görülmektedir. Buna göre uygun bir integral etki değeri seçilerek sistemin talebine uygun bir kontrol sağlanabilir.

3.1.3 Oransal + Türev Kontrol (PD Etki)

Standart PD kontrolü oransal etkiye türev etki ilavesiyle oluşturulabilir. Türev etki hatanın kendisi yerine hatanın değişimi üzerinde etkili olur. Bundan dolayı hatanın değişimini önceden belirleyerek hatanın büyümesine fırsat vermeden hatayı çok hızlı şekilde düzeltebilir. Türev etki aynı zamanda geribeslemeli sisteme sönüm katar. Böylece sistemin cevap hızını değiştirmeden kararlılığını artırır. Diğer bir deyişle türev etki açık çevrim transfer fonksiyonu payına 's' çarpanı getirdiğinden sisteme s-düzlemi orijininde bir sıfır ilave etmiş olur. Bu da sistemin kararlılığını iyileştirici etki yapar.

PD kontrolün sağladığı çıkışın matematiksel ifadesi ve transfer fonksiyonu sırasıyla Denklem 3.9 ve 3.10'de gösterilmiştir.

$$u(t) = K_p e(t) + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.9)$$

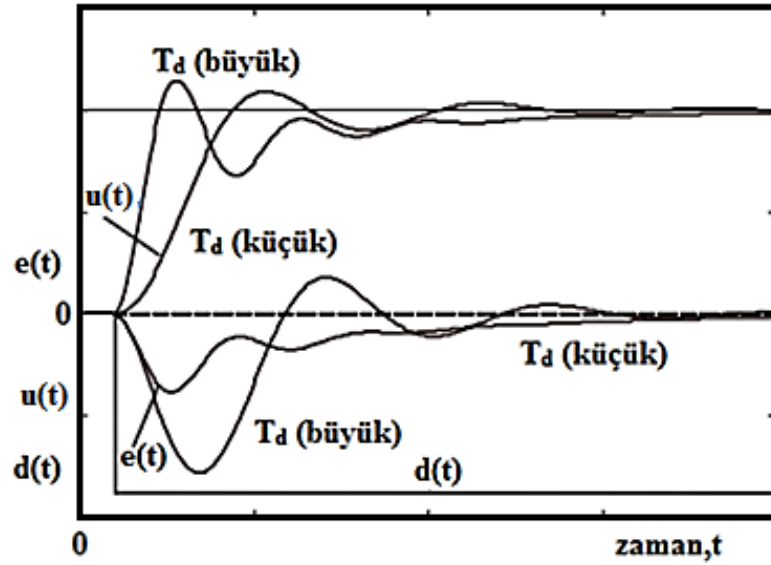
$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_p T_d s \quad (3.10)$$

Bir sabitin türevi sıfır olduğundan türev etkinin sabit kalan hatalara etkisi yoktur. Türev etki sadece hatanın zamana göre değişimiyle işlem yaptığından tek başına kontrolör olarak kullanılmaz.

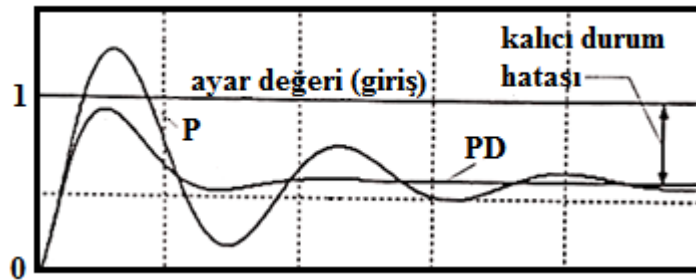
Şekil 3.6'da bir bozucu basamak giriş karşısında türev etkinin sistem cevabı üzerindeki etkisi yer almaktadır. Kontrol sinyali (u(t)) ve çıkışa (c(t)) bakıldığında türev etki zamanı (T_d) artınca sistemin cevap hızının arttığı görülmektedir. Fakat türev etki zamanının artması aynı zamanda sistemin salınımını da arttırmaktadır ve kararlılığını bozmaktadır. Türev etkinin diğer bir olumsuz yönü ise ani hata değişimlerinde türev etkinin sağladığı kontrol etkisinin çok ani olması ve sistemi aşırı titreşimli hale sokmasıdır.

Şekil 3.7'de oransal etkiye türev etki ilavesi ile sistemin sönümü ve kararlılığının iyileşmesi gösterilmiştir. Türev etkinin kalıcı durum hatasına hiçbir

etkide bulunmadığı da şekilden anlaşılmaktadır. Bundan dolayı PD kontrol, kalıcı durum hatası vermeyen aşırı salınımlı sistemlerde iyi sonuç vermektedir.



Şekil 3.6. Türev etkinin sistem cevabına etkisi



Şekil 3.7. PD kontrolün dinamik özellikleri

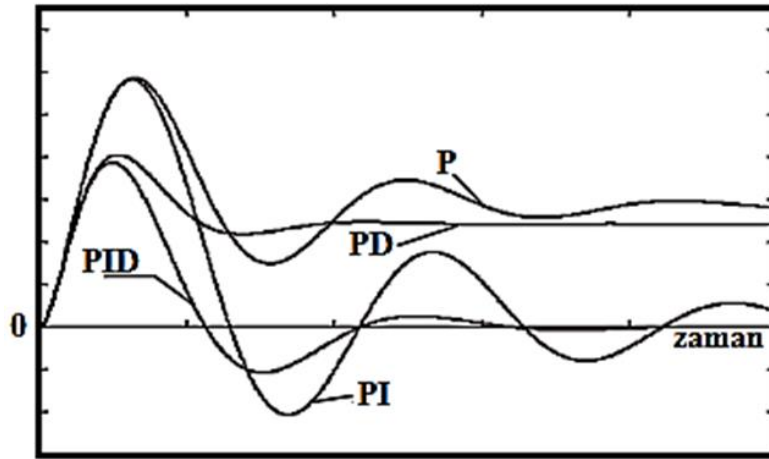
3.1.4 Oransal + İntegral + Türev Kontrol (PID Etki)

Uzun ölü zaman gecikmelerinin olduğu proses kontrol sistemlerinde, PI kontrole integral etkinin tamamlayıcısı olarak türev etki eklenir.

Düşük şiddetli bozucu girişlere maruz bir sistemin PI etki ile kontrol edilmesi halinde integral etki ayarının düşük tutulması tercih edilir. Bu ayarlar altında, sisteme uzun zaman aralıkları içerisinde şiddeti yüksek bozucu girişler etki edince, PI kontrol hatada meydana gelen değişimleri izlemekte ve düzeltmekte yetersiz kalır. Bu durumda türev etki ilavesi oransal kazanç ayarının daha yüksek tutulmasına olanak

tanıyarak kontrol organı tepki süresini hızlandırır. Aşırı salınımlı sönümü düşük sistemlerde PI kontrol tek başına yeterli olmaz. Bu tür sistemlere türev etki ilavesi, sistemde fazla bir kararsızlık problemi yaratmadan oransal kazancın yüksek tutulmasını sağlayarak sistemin kararsızlığa yatkınlığını önlemiş olur. Böylece PID kontrol etkisi ile sistemin hem kalıcı durum hatası giderilir hem de sistemin geçici durum davranışı iyileştirilmiş olur.

Şekil 3.8’de P, PI, PD ve PID kontrol ile çalışan geribeslemeli sistemin basamak bozucu giriş karşısında hata sinyalinin gösterdiği değişim eğrileri verilmiştir.



Şekil 3.8. Kontrol etkilerinin karşılaştırılması

Bu eğrileri birbiriyle karşılaştırdığımızda;

P Kontrol: Yalnızca P kontrol halinde cevap eğrisi birkaç salınım yaptıktan sonra kararlı durum halinde olması gereken noktadan belli bir sapma yapar.

PI Kontrol: PI kontrol halinde P kontrole benzer şekilde hareket eder ve iyileşme olarak kalıcı durum hatası meydana getirmez. Fakat oransal etkiye integral etki ilavesiyle sistemin kararsızlığa yatkınlığı artar. Bu durumu engellemek için PI kontrolde P kontrole göre oransal kazanç daha düşük seçilmelidir. Bu durumda da hatanın düzeltilmesi oransal etkideki gibi hızlı olmaz ve başlangıç değeri e daha yüksek değerde ortaya çıkar.

PD Kontrol: PD kontrolde, hata oluştuğunda hem oransal etki hem de türev etki hatayı azaltır. İki etki de aynı anda çalıştığından hatanın ilk en yüksek değeri

oransal kontrole göre daha düşük olur. Türev kontrol hatanın değişim oranına ters yönde etki ederek değişimi önlemeye çalıştığından, sistem üzerinde kararlılık kazandırıcı bir etki yaratır ve oransal kazancı daha kuvvetli kullanma olanağı sağlar. PD kontrol kullanıldığında, P kontrole göre daha az başlangıç sapması ve daha az kalıcı durum hatası ortaya çıkar.

PID Kontrol: PID kontrolde kalıcı durum hatası tamamen ortadan kalkar ve daha büyük bir başlangıç hatası ortaya çıkmasına rağmen bu sapma PI kontrole göre daha düşüktür.

PID kontrolün kapalı döngü sistemin performans koşullarını sağlayabilmesi için K_p , K_i ve K_d katsayılarının bulunması veya ayarlanması gereklidir. PID katsayılarının belirlenmesinde Ziegler-Nichols, Cohen Coon, Ho-Hang-Cao gibi yöntemler mevcuttur [15]. Temel olarak kontrol edici tasarlanırken sistemin açık döngü çalışmasına bakılır ve nelerin geliştirilmesi gerektiğine karar verilir. Sistemin yükselme zamanını iyileştirmek için oransal denetleyici, ani tepkinin iyileştirilmesi için türevsel denetleyici, kalıcı durum hatasını gidermek için integral denetleyicisi eklenir. Sistem istenilen tepkiyi verene kadar katsayılar ayarlanır. K_p , K_i ve K_d 'nin değişimine göre her bir denetleyicinin sisteme etkisi aşağıdaki tabloda özet olarak gösterilmiştir.

Tablo 3.1 K_p , K_i ve K_d katsayı değişimlerinin sisteme etkisi [16]

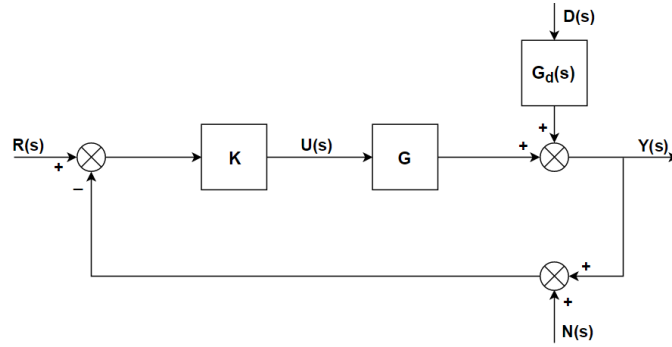
| Kontrolör | Yükselme Zamanı | Aşma | Oturma Zamanı | Kalıcı Durum Hatası | Kararlılık |
|---------------|-----------------|-------|---------------|---------------------|------------|
| K_p artarsa | Kısalır | Artar | Az değişir | Azalı | Azalı |
| K_i artarsa | Kısalır | Artar | Artar | Ortadan kalkar | Azalı |
| K_d artarsa | Az değişir | Azalı | Azalı | Az değişir | Artar |

K_p , K_i ve K_d katsayıları birbirlerine bağımlı olduklarından bu bağıntılar kesin doğruluk taşımazlar. Tablo, katsayıların belirlenmesinde referans olarak kullanılabilir. Ayrıca her bir denetleyici tüm kapalı döngü sistemlerde kullanılmak zorunda değildir. Yalnızca P veya PI kontrolörler yeterince iyi sonuçlar verebilirler. Bu gibi durumlarda işlem yükünü artırmamak adına türevsel denetleyici kullanmaya gerek yoktur.

4. ÇOK DEĞİŞKENLİ KONTROL

4.1. Çok Değişkenli Kontrol Genel Yapısı

Çok girişli çok çıkışlı sistemlerin yapısından dolayı girişler ve çıkışlar arasında etkileşimin olduğu bir gerçektir. Şekil 4.1'de tek giriş tek çıkış (SISO) sistemlerde kullanılan bir serbestlik derecesine sahip kontrol yapısı görülmektedir. Çok değişkenli sistemlerde SISO sistemlerden farklı olarak transfer fonksiyonları matris biçimindedir [17].



Şekil 4.1. Kontrol etkilerinin karşılaştırılması

Bu sistemde; $K(s)$ kontrolörün giriş sinyali $R(s)-Y_m(s)$ dir. $Y_m(s)$ ($Y_m(s)=Y(s)+N(s)$) sistem çıkışı ve ölçülebilen gürültülerden oluşur. Sistem girişi ise;

$$U(s) = K(s)(R(s) - Y(s) - N(s)) \quad (4.1)$$

şeklindedir. Sistemin kapalı çevrim cevabı;

$$Y(s) = G(s)U(s) + G_d(s)D(s) \quad (4.2)$$

$$Y(s) = G(s)K(R(s) - Y(s) - N(s)) + G_d(s)D(s) \quad (4.3)$$

$$(I + G(s)K)Y(s) = G(s)KR(s) + G_d(s)D(s) - G(s)KN(s) \quad (4.4)$$

$$Y(s) = (I + G(s)K)^{-1}G(s)KR(s) + (I + G(s)K)^{-1}G_d(s)D(s) - (I + G(s)K)^{-1}G(s)KN(s) \quad (4.5)$$

Çok değişkenli kontrol algoritmalarında genel olarak iki yaklaşım vardır. Bunlardan ilki G transfer fonksiyonundaki etkileşimi ilgilenen “kompansatör” tasarımı diğeri ise “diyagonal-köşegensel” kontroller tasarımıdır. Çok yaygın olarak kullanılan kompansatör, sisteme yeni bir yapı kazandıran ve etkileşimlere karşı koyan ön-kompansatördür ($W_1(s)$).

$$G_s(s) = G(s)W_1(s) \quad (4.6)$$

Ön-kompansatörün bulunmasından sonra kolaylıkla köşegensel-kontrolör $K_s(s)$, yeni oluşan sistem olan $G_s(s)$ kullanılarak tasarlanabilir.

$$K(s) = W_1(s)K_s(s) \quad (4.7)$$

Birçok etki durumlarında, kompansatör fiziksel yapıdan bulunur ve doğrusal olmayan yapı içerebilir.

Genellikle çok değişkenli sistemler birden fazla giriş-çıkış değişkenine sahip olmasına karşın yapısındaki simetriden dolayı ayırık sistemler olarak da ele alınabilmektedir. Bu sistemlerde esas, ana dinamik kanalları birbirine eşit ve aynı zamanda çapraz ilişki kanalları da birbirine eşit olursa, sistem simetrik olarak sadece eş değer kanal üzere tek çevrimli bir kontrol sistemi gibi tasarlanır. Eğer, çapraz ilişki kanalları birbirlerine eşit değil ise, eşdeğer yöntem ile sistem köşegen matris haline getirilerek tasarlanabilir. Bu amaçla çok değişkenli paralel sistemlerin kontrol tasarımı için ilk önce sistemin statik ve dinamik özelliklerinin belirlenmesi ve bunlara ilişkin sistem modelleme çıkarılması gerekir. Çok değişkenli sistemlerin dinamik karakteristiklerinin belirlenmesinde deneysel yöntemlerden yararlanılması daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Çok değişkenli kontrollerinin genel yapısı giriş ve çıkışlar arasındaki etkileşimi yok edecek şekilde tasarlanmasıdır.

4.2. Decoupling (Etkileşimsiz) Kontrol

Genelde üç farklı decoupling durumu vardır.

4.2.1. Dinamik Decoupling

Bütün çevrimlerdeki etkileşimi yok eder. Bu decoupling yönteminde denklem 4.6'da tanımlanan $G_s(s)$ transfer fonksiyon matrisi köşegen matristir. Örnek olarak $G_s(s) = I$ alınırsa kompensatör $W_1(s)=G^{-1}(s)$ olur.

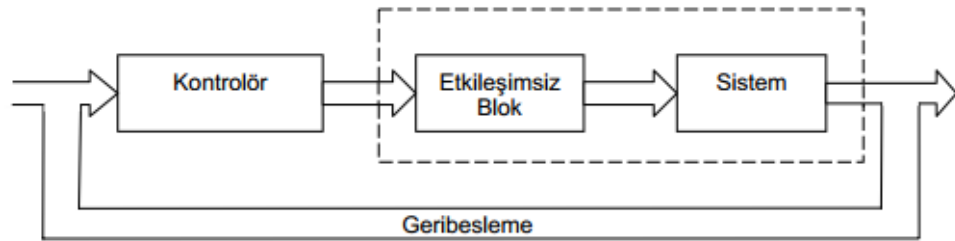
4.2.2. Statik (kalıcı hal) Decoupling

Bütün çevrimlerdeki kalıcı hal durumundaki etkileşimleri yok eder. Bu yöntemde ise $G_s(0)$ transfer fonksiyon matrisi köşegen matristir. Ön-kompansatör $W_1(s)=G_0^{-1}(s)$ olarak alınabilir.

4.2.3. Yaklaşık Decoupling

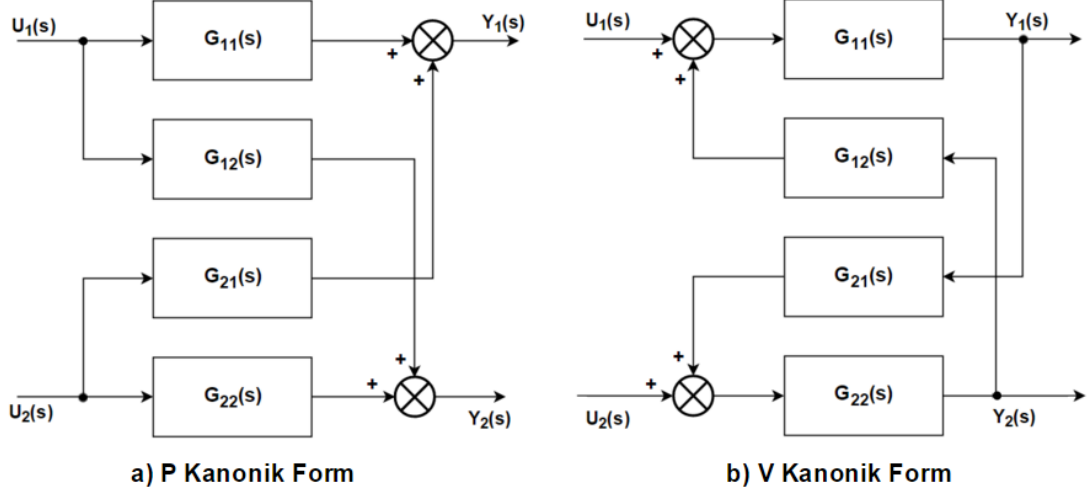
Bu yöntemde ise ω_0 frekansı için $G(j \omega_0)$ transfer fonksiyon matrisi köşegen matris şeklindedir. Burada tasarlanacak kompensatör $W_1(s)=G_0^{-1}(s)$ olarak bulunabilir. $G_0(s)$ yaklaşık olarak $G(j \omega_0)$ değeridir. Band genişliği frekansı ω_0 için iyi bir seçimdir. Çünkü sistemdeki en büyük etkileşim bu frekans civarında olur.

Bu yöntemlerde, amaç tamamıyla çevrim etkileşimin etkilerinden kurtulmaktır. Buna da etkileşimsiz olarak bilinen kompanzasyon bloklarının özellikleri aracılığıyla ulaşılır. Aslında bu blokların görevi çok işlemlenmiş girişleri birbirinden bağımsız olan tek bir çevrimli alt sistem şekline ayırmaktır. Eğer böyle bir şey başarılırsa, tam ya da ideal etkileşimsizlik meydana gelir ve çok değişkenli işlem bağımsız çevrim kontrolörleri kullanılarak kontrol edilebilir. Aşağıdaki diyagram genel etkileşimsiz (Decoupling) yapısını göstermektedir (Şekil 4.1).



Şekil 4.1. Decoupling (etkileşimsiz) kontrolör genel yapısı

Çok değişkenli işlemlerin giriş-çıkış gösterimlerinde farklı yapılar olabilir. Örneğin P veya V etkileşimsiz blokları. Burada P etkileşimsiz bloğu diğerine göre daha yaygındır. P ve V kanonik formlar Şekil 4.2’de gösterilmektedir [2].

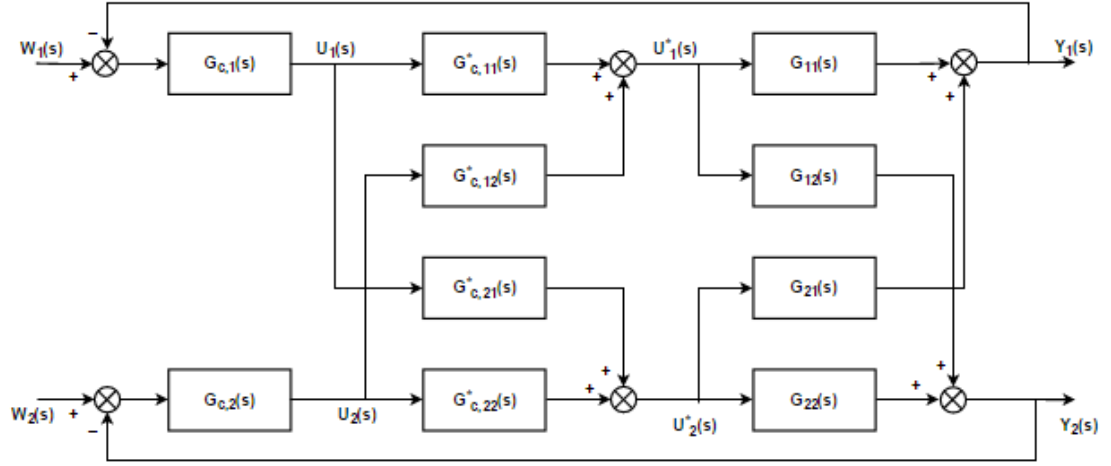


Şekil 4.2. Giriş-Çıkış Genel Yapıları

P ve V Kanonik Formların Seçimi: P ve V sistemlerden hangisinin daha kullanışlı olduğu gibi bir sorun ortaya çıkmaktadır. Bu seçim için rehberlik edebilecek çok hızlı ve sıkı kurallar yoktur. Fakat aşağıdaki faktörler bu seçimde yardımcı olabilirler:

- Deneysel olarak modelin parametreleri saptanabilmelidir.
- Model sistemi temsil edebilmeli ve de diğer işlemleri de kapsayacak şekilde genel olmalı.
- Model kontrol sistem tasarımıyla ilgili bilgi sağlayabilmeli.
- Model basit olmalı.

Çok değişkenli etkileşimsiz (decoupling) kontrol algoritmaları için literatürde birçok yöntem ve blok yapısı vardır [18,19]. Şekil 4.3’te verilen yöntem, yöntemler içerisinde en yaygın olarak kullanılanıdır [18].



Şekil 4.3. Etkileşimsiz (decoupling) kontrol diyagramı Luyben(1970) yöntemi

Burada, etkileşimsiz (decoupling) bloklarına ek olarak, ileri yol kontrolörlerini temsil eden iki tane daha blok vardır. İleri yol kontrol matrisi U çıkışlı $G_c(s)$ 'i temsil edecek olursa ve etkileşimsiz (decoupling) bloklarının çıkışı da $U^*(s)$ olduğu kabul edilirse. Sistem aşağıdaki gibi şekillenir:

$$Y(s) = G(s)U^*(s), \quad U^*(s) = G_c^*(s)U(s), \quad U(s) = G_c(s)[W(s) - Y(s)] \quad (4.8)$$

Bu nedenle

$$Y(s) = G(s) G_c^*(s) U(s) = G(s) G_c^*(s) G_c(s) [W(s) - Y(s)] \quad (4.9)$$

şeklinde olur. Tekrar etmek gerekirse, amaç iki bağımsız çevrimi kontrol eden ileri yol kontrolörlerin durumunu yapay olarak oluşturmaktır. $G_c(s)$ köşegen matris olduğunda, eğer

$$X = GG_c^* = \text{diag}[x_1, x_2] \quad (4.10)$$

olursa amaca ulaşılmış olunur.

$G_c^*(s)$ 'i kararlaştırmak için $G(s)$ 'nin tersini hesaplamamız gerekir.

$$G_c^*(s) = G^{-1}(s)X, \quad G^{-1}(s) = \frac{adj(G(s))}{\det(G(s))} \quad (4.11)$$

Burada $adj(G)$ G 'nin adjointi ve $\det(G)$ G 'nin determinantıdır.

$$\det(G(s)) = G_{11}(s)G_{22}(s) - G_{12}(s)G_{21}(s) \quad (4.12)$$

$$adj = \begin{bmatrix} G_{22}(s) & -G_{12}(s) \\ -G_{21}(s) & G_{11}(s) \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

$$X = diag[x_1 - x_2] \quad (4.14)$$

olduğundan

$$G_c^*(s) = G^{-1}(s)X = \begin{bmatrix} G_{22}(s)x_1 & -G_{12}(s)x_2 \\ -G_{21}(s)x_1 & G_{11}(s)x_2 \end{bmatrix} \frac{1}{\det(G(s))} \quad (4.15)$$

şeklinde ifade edilir. Decoupling (etkileşimsiz) matrisin en basit formu birim köşegen elemanlarının olmasıdır.

$$G_{c,11}^*(s) = G_{c,22}^*(s) = 1 \quad (4.16)$$

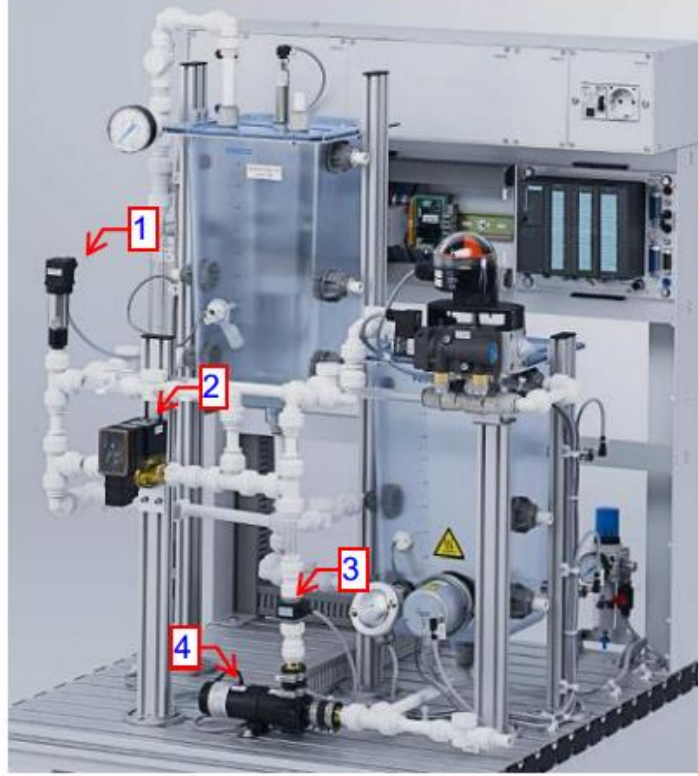
$$G_{c,12}^*(s) = -G_{12}(s)/G_{11}(s) \quad \text{ve} \quad G_{c,21}^*(s) = -G_{21}(s)/G_{22}(s) \quad (4.17)$$

4.16 ve 4.17'deki denklemlerden de görülüyor ki decoupling elemanları ileri yol kontrolörlerinden bağımsızdırlar. Bu yüzden kontrolörlerin çevrim içi ayarları decoupling elemanlarının tekrar tasarlanmasına ihtiyaç duymaz. Kontrolör modları PI ve PID'lerde değiştirilebilir ve her iki ileri yol kontrolörleri decoupling kaybı olmaksızın yerleştirilebilirler.

5. MATERYAL

5.1. Festo Didactic MPS-PA Compact Workstation Deney Seti

Bu tezde, Festo marka MPS-PA Compact Workstation deney seti uygulama aracı olarak kullanılmıştır. Deney seti Şekil 5.1’de gösterilmiştir.

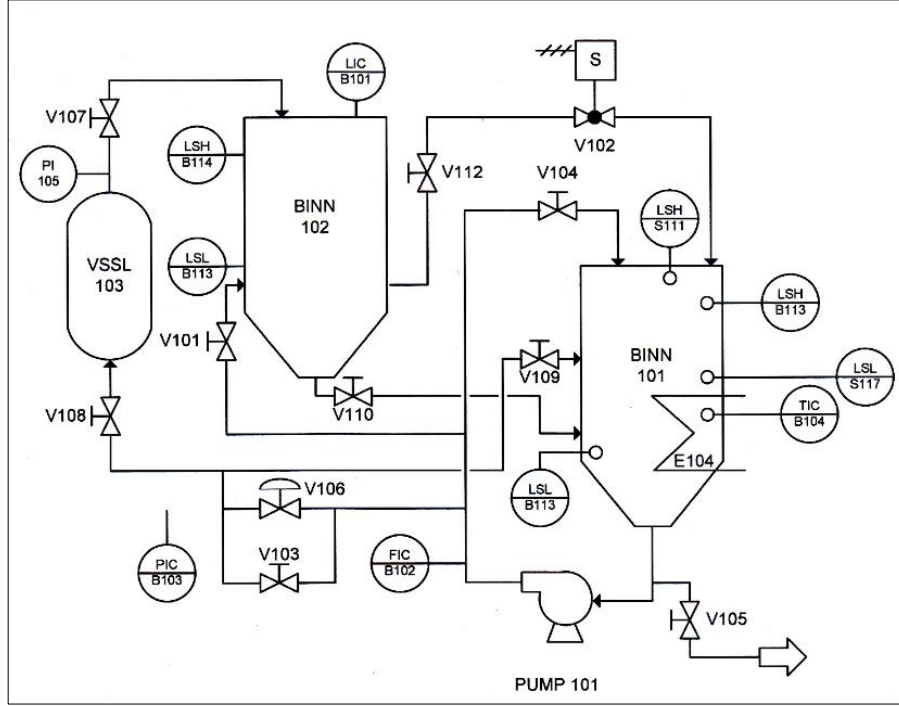


Şekil 5.1. MPS-PA Compact Workstation Deney seti; 1) Basınç sensörü, 2) Oransal valf, 3) Akış sensörü, 4) Pompa motoru

MPS-PA Compact Workstation deney setinde dijital ve analog sensörlerle birlikte 4 kapalı çevrim sistemi bulunmaktadır. PLC veya herhangi bir kontrolör ile bu kapalı çevrimleri ayrı ayrı veya kaskat kullanmak mümkündür [20].

- Seviye kontrol sistemi
- Akış hızı kontrol sistemi
- Basınç kontrol sistemi
- Sıcaklık kontrol sistemi

Sistem mevcut halde bir PLC donanımı üzerinden yukarıda sayılan her bir kapalı çevrim için tek giriş tek çıkışlı olarak kontrol edilebilmektedir. Kullanıcının kontrolör parametrelerine erişimi bir operatör paneli üzerinden sağlanmaktadır. Deneysel setinin PI diyagramı Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.2. PI Diyagram MPS-PA Compact Workstation (ISA 5.5 / ISA 5.1 Standart)

Bu 4 kapalı çevrim sistemi kullanarak aşağıda sıralanan fonksiyonlarla çalışmak mümkündür:

- Bir standart analog sinyal ile bir seviye kontrol sisteminin iki nokta kontrolü
- Bir standart analog sinyal ile bir seviye kontrol sisteminin sürekli kontrolü
- Akış hızı kontrol sisteminin pompa ve frekans ölçümü için darbe sinyali ile sürekli kontrolü
- Akış hızı kontrol sisteminin oransal valf ve frekans ölçümü için darbe sinyali ile sürekli kontrolü
- Akış hızı kontrol sisteminin pompa ve analog standart sinyal ile sürekli kontrolü

- Akış hızı kontrol sisteminin oransal valf ve analog standart sinyal ile sürekli kontrolü
- Basınç kontrol sisteminin pompa ve analog standart sinyal ile sürekli kontrolü
- Basınç kontrol sisteminin oransal valf ve analog standart sinyal ile sürekli kontrolü
- Sıcaklık kontrol sisteminin analog standart sinyal ile iki nokta kontrolü.

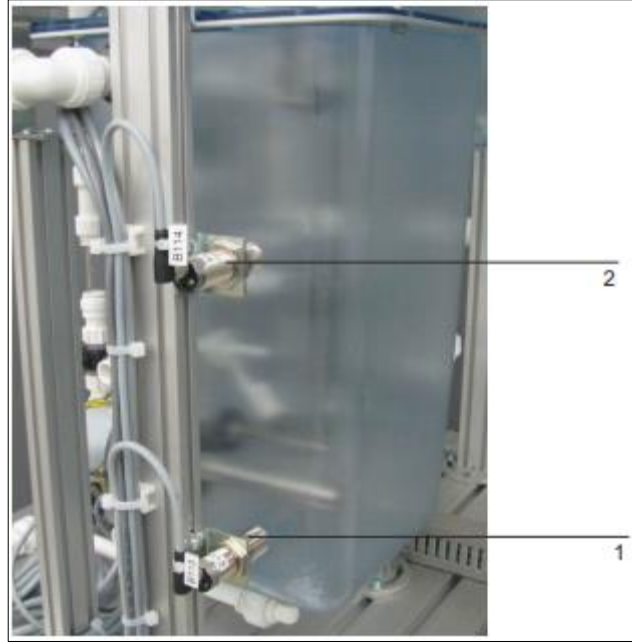
MPS-PA Compact Workstation deney setinin ana bileşenleri:

- Analog ultrasonik sensör
- Frekans sinyali ile akış sensörü
- Basınç sensörü, 0-1 bar arası piezorezistif basınçölçer
- PT100 sıcaklık sensörü
- Alttaki tankın min/max seviye kontrolü için 2 adet kapasitif yakınlık sensörü
- Üst tanktaki elektromekanik eşik işlevi için şamandıra anahtarı
- Alt tankta taşma alarmı için şamandıra anahtarı
- Isıtma sistemini korumak için şamandıra anahtarı
- Santrifüj pompa
- Pompa için motor kontrol cihazı
- Elektronik kontrol modüllü oransal valf
- Entegre kontrol röleli ısıtma sistemi
- 2W ball valve with pneumatic rotary drive (SYPAR) with sensor box
- I/O klemensi
- Analog sinyaller için klemens
- Sinyal çevirici: akımı gerilime, frekansı gerilime, PT100'ü gerilime
- PLC veya kapalı çevrim kontrolör kontrol paneli
- Boru sistemine dahil 4 şeffaf bölüm
- Basınç tankı
- Su tankları
- Manuel valf
- Tahliye için manuel küresel valf

5.1.1. Seviye Takibi

Seviye takibi için MPS-PA Compact Workstation deney setine aşağıdaki teknik özellikler entegre edilmiştir:

Yaklaşım sensörleri: Kapasitif yaklaşım sensörleri olan B113(1) ve B114(2) sensörleri alt tank B101 tarafında bir profil plaka üzerine monte edilmiştir (Şekil 5.3). Bu yaklaşım sensörleri mekanik olarak ayarlanabilir. Tank duvarından algılama mesafesi bir vida ile ayarlanabilir. İkilik 24V giriş sinyali I/O klemensi XMA1'e bağlanır.



Şekil 5.3. Kapasitif yaklaşım sensörleri B113(1) ve B114(2) ile seviye takibi

B101 tankının minimum seviyesi alt sensör B113 ile maksimum seviyesi ise üst sensör B114 ile belirtilir. Minimum seviyede ısıtma elemanı E104 tamamen sıvı içine dalmış olmalıdır. Sistemin reset pozisyonunda her iki sensörün de aktive edilmesi gerekir.

Taşma güvenliği için şamandıra anahtarı: B101 tankındaki taşma şamandıra anahtarı S111(1) ile izlenir (Şekil 5.4). Eğer tanktaki sıvı seviyesi belirli düzeyi aşarsa şeffaf şamandıra yukarı doğru itilir ve şamandıranın içindeki mıknatıstar kontaktları aktif eder.

İkili 24V giriş sinyali I/O klemensi XMA1'e bağlanır. Taşma anahtarı sinyali PLC programında bir alarm işlevi etkinleştirmesi gerekir. Küresel valf (V102) ve pompa (P101) üzerinde etkisi vardır. Elektriksel değişim olduğunda pompayı veya valfi bir röle devresiyle durdurabilir.



Şekil 5.4. Taşma güvenliği için şamandıra anahtarı (1) ile seviye takibi

Eşik işlevi için şamandıra anahtarı: B102 tankındaki (üst tank) artan sıvı seviyesi S112(1) şamandıra anahtarı ile belirli minimum seviyede izlenir (Şekil 5.5). Montaj konumu değiştirildiğinde anahtar da azalan seviyeyi gösterebilir.



Şekil 5.5. Eşik işlev için şamandıra anahtarı S112(1) ile seviye izleme

İkilik 24 V giriş sinyali I/O klemensi XMA1'e bağlanır. Anahtarın montaj konumunu değiştirirken kolay kablo bağlantısı için fiş bağlantısı vardır.

5.1.2 Pompa

Santrifüj pompa P101(1) tüm kontrol sistemlerinde kullanılan kontrol elemanıdır (Şekil 5.6). Pompa, boru sistemi aracılığıyla sıvıyı B101 tankına aktarır.



Şekil 5.6. Kontrol elemanı – Pompa P101 (1)

Pompa sistemde sıvı yokken kullanılmamalıdır. Devreye alınmadan önce rezervuar tankı veya boru sistemi sıvı ile dolu olmalıdır.

Pompa motor kontrolörü A4 ve K1 rölesi ile sürülür. Bir dijital çıkış ile (XMA1'deki O2) dijital ikilik kontrolden 0-24 V arası analog kontrole geçiş yapmak mümkündür. Dijital ikilik kontrolde (O2=0) ek bir çıkışla (XMA1'deki O3) pompaya aç/kapa yaptırılır. Analog kontrolde ise (O2=1) analog çıkış sinyal kanalından (X2'deki UA1) alınan 0-10 V arasındaki sürücü gerilim pompanın hızını ayarlar.

5.1.3. Oransal Valf

Oransal valf (1) sıvıların akış kontrolü için doğrudan harekete geçirilen iki yönlü valfdır (Şekil 5.7). Açık veya kapalı döngü sistemlerde ayarlanabilir uzaktan eleman olarak kullanılabilir. Manyetik bobinin fonksiyonuyla valf pistonu yerleştiği yerden kalkarak sıvının valf içinden geçmesini sağlar.

Oransal valf kontrolü ikilik bir çıkış ile aktif edilir (XMA1'deki O4). Oransal valf, kanal 1'deki (X2'deki UA2) 0-10 V arası standart analog sinyal ile sürülür.



Şekil 5.7. Kontrol elemanı – Oransal Valf V106 (1)

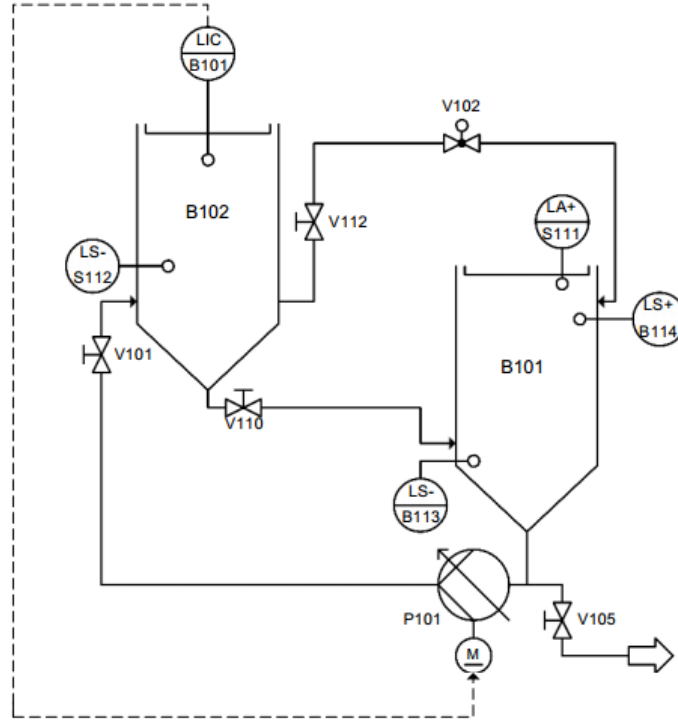
5.1.4 Seviye Kontrol Fonksiyonu

Seviye kontrol sistemi fonksiyonu B102 tankının dolum seviyesini ayarlamaktadır. Ultrasonik sensörün yeri Şekil 5.8'de gösterilmiştir.



Şekil 5.8. Seviye kontrol sistemi – B102 tankı (1) ve ultrasonik sensör B101(2)

Pompa, boru sistemi ile B101 tankından sıvı sağlar. B102 tankı içindeki sıvı ölçüm noktası LIC B101’de gerçek değer okuyan bir analog ultrasonik sensör B101 (2) ile izlenir. Şekil 5.9’da seviye kontrol sisteminin akış şeması gösterilmiştir.



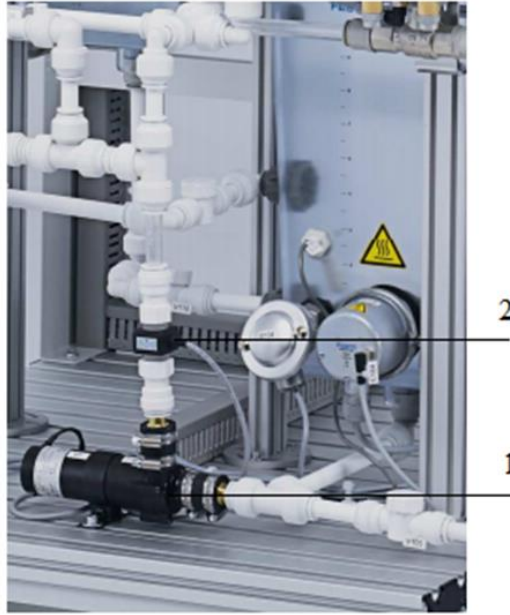
Şekil 5.9. Kapalı çevrim seviye kontrol sistemi akış şeması

5.1.5 Akış Hızı Kontrol Fonksiyonu

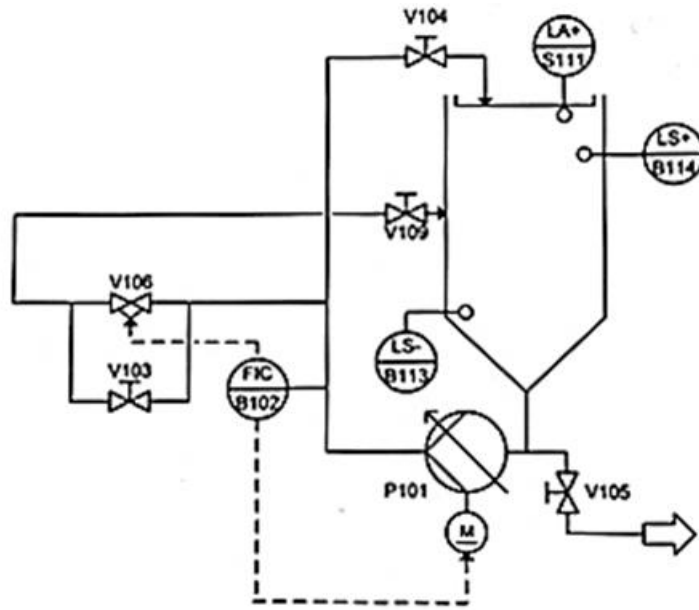
Akış hızı kontrol fonksiyonu akış sensöründen bilgi alarak pompadan çıkan borudaki sıvı akış hızını ayarlamaktadır. Akış sensörünün sistemdeki yeri Şekil 5.10’da gösterilmiştir.

Pompa, boru sistemi ile B101 tankından sıvı sağlar. Akış hızının gerçek değeri FIC B102 (2) sensörü ile ölçülür. Şekil 5.11’de akış hızı kontrol sisteminin akış şeması gösterilmiştir. Sistemde akış hızı kontrolü iki şekilde yapılabilir:

- Pompa (P101) ile yapılan akış hızı kontrolü: Pompa motorunun gerilimi değiştirilerek pompanın dönüş hızı ayarlanır.
- Oransal valf (V106) ile yapılan akış hızı kontrolü: Pompa sabit hızda çalışırken valf bobininin gerilimi değiştirilerek valf pistonu ile akış hızı ayarlanır.



Şekil 5.10. Kontrol edilen akış hızı sistemi. Pompa P101(1) ve Akış sensörü B102(2)



Şekil 5.11. Kapalı çevrim akış hızı kontrol sistemi akış şeması

5.1.6 Basınç Kontrol Fonksiyonu

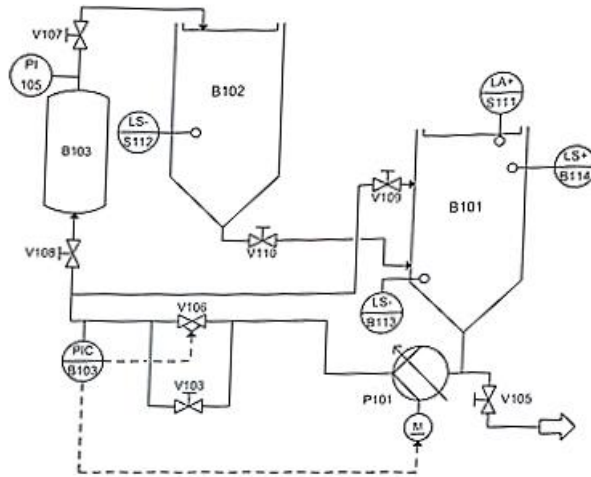
Basınç kontrol sisteminde, bir kısmı gazla doldurulmuş basınç tankındaki (1) basınç ayarlanır (Şekil 5.12). Şekil 5.13’de akış hızı kontrol sisteminin akış şeması gösterilmiştir.

Pompa (P101) boru sistemiyle gaz doldurulmuş tanka sıvı akışı sağlar. Basınç tankındaki gazın basıncı piezorezistif basınç sensörü ile gerçek değer olarak ölçülür. Sistemde basınç kontrolü iki şekilde yapılabilir:

- Pompa (P101) ile yapılan basınç kontrolü: Pompa motorunun gerilimi değiştirilerek pompanın dönüş hızı ayarlanır.
- Oransal valf (V106) ile yapılan basınç kontrolü: Pompa motoru (P101) sabit dönüş hızında çalıştırılarak oransal valfın (V106) bobinindeki gerilim değiştirilerek valf pistonunun konumu ayarlanır.



Şekil 5.12. Kontrol edilen basınç sistemi. Oransal valf V106 (1) ve piezorezistif basınç sensörü B102(2)



Şekil 5.13. Kapalı çevrim basınç kontrol sistemi akış şeması

6 DENEY SETİ ÜZERİNDE YAPILAN ÇALIŞMALAR

6.1 Deney Setinin MIMO Sisteme Dönüştürülmesi

Bölüm 4.1’de de belirtildiği gibi dört ayrı tek giriş tek çıkış (seviye kontrol sistemi, akış hızı kontrol sistemi, basınç kontrol sistemi, sıcaklık kontrol sistemi) olarak çalışan sistem, akış hızı kontrol sistemi ve basınç kontrol sistemi aynı anda kontrol edilebilecek şekilde düzenlenmiştir. Bunun için öncelikle sıvı akışının ve basıncının aynı boru sistemi üzerinde ölçülebilmesi için, sıvı akışını istenilen yörengenin dışına çıkaran borular sistemden çıkarılmıştır. İki giriş iki çıkış sisteme dönüşen deney setinin etkileşimli olması için basıncın ve akış hızının her ikisinin de pompa ve valften doğrudan etkilenmesi gerektiğinden, basınç sensörü valf ile pompa arasındaki boru sistemine monte edilmiştir. Akış hızı sensörü (flowmetre) ise zaten valf ile pompa arasında yer aldığından yerinde bir değişiklik yapılmamıştır.

6.2 Akış Hızı-Basınç Sisteminin Modellenmesi

Akış hızı-Basınç sistemi, giriş çıkış ilişkisindeki değerler MATLAB programının System Identification aracı vasıtasıyla, sistem cevabına uygun G_{11} , G_{12} , $G_{21}(s)$ ve $G_{22}(s)$ transfer fonksiyonları elde edilerek modellenmiştir. Akış hızı-Basınç sisteminin iki girişi iki çıkışı bulunmaktadır.

Sistemdeki girişler:

- $U_1(s)$: Pompaya uygulanan kontrol sinyali
- $U_2(s)$: Oransal valfe uygulanan kontrol sinyali

Sistemdeki çıkışlar:

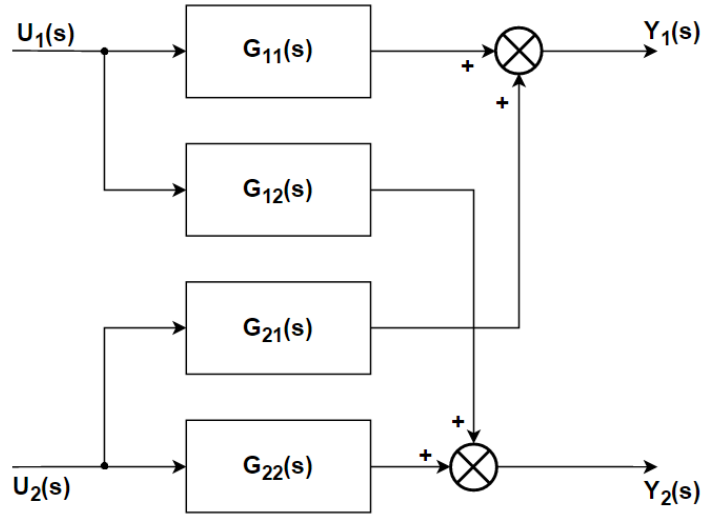
- $Y_1(s)$: Sıvı akış hızı çıkış sinyali
- $Y_2(s)$: Basınç değeri çıkış sinyali

Giriş ve çıkışlara göre 2x2 sistemin genel transfer fonksiyonu:

$$Y_1(s)=G_{11}(s)U_1(s) + G_{12}(s)U_2(s) \quad (6.1)$$

$$Y_2(s)=G_{21}(s)U_1(s) + G_{22}(s)U_2(s) \quad (6.2)$$

şeklinde elde edilir. Sistemin giriş çıkış ilişkisini gösteren model Şekil 6.1’de görülmektedir.



Şekil 6.1. Sistemin Modeli

$G_{11}(s)$ sistemde 1 nolu giriş ile 1 nolu çıkış arasındaki ilişkiyi gösteren transfer fonksiyonudur. Aynı şekilde $G_{12}(s)$ 2 nolu giriş ile 1 nolu çıkış arasındaki, $G_{21}(s)$ 1 nolu giriş ile 2 nolu çıkış arasındaki, $G_{22}(s)$ 2 nolu giriş ile 2 nolu çıkış arasındaki ilişkiyi gösteren transfer fonksiyonlarıdır. Sistemdeki çevrimlerde pompa motoru veya oransal valf olduğundan transfer fonksiyonlarının 2. dereceden tahmin ettirilmesi uygun görülmüştür.

Sistemin basamak giriş sinyallerine karşılık cevap sinyallerini almak için veri toplama kartı kullanılmıştır (NI USB-6009). $G_{11}(s)$ transfer fonksiyonunun bulunması amacıyla; $U_2(s)$ kontrol girişine 10V gerilim uygulanarak (oransal valf tamamen açılarak) $U_1(s)$ girişine basamak fonksiyonu uygulanmıştır (pompa motoruna 10V gerilim uygulanmıştır) ve $Y_1(s)$ çıkışı (akış hızı) ölçülmüştür.

$G_{22}(s)$ transfer fonksiyonunun bulunması amacıyla; $U_1(s)$ kontrol girişine 10V gerilim uygulayarak (Pompa en yüksek hızda çalışırken) $U_2(s)$ girişine basamak fonksiyonu uygulanmıştır (oransal vanaya 10V gerilim uygulanmıştır) ve $Y_2(s)$ çıkışı (basınç) ölçülmüştür.

$G_{12}(s)$ transfer fonksiyonunun bulunması amacıyla; $U_1(s)$ kontrol girişine 10V gerilim uygulayarak (Pompa en yüksek hızda çalışırken) $U_2(s)$ girişine basamak fonksiyonu uygulanmıştır (oransal vanaya 10V gerilim uygulanmıştır) ve $Y_1(s)$ çıkışı (akış hızı) ölçülmüştür.

$G_{21}(s)$ transfer fonksiyonunun bulunması amacıyla; $U_2(s)$ kontrol girişine 10V gerilim uygulanarak (oransal valf tamamen açılarak) $U_1(s)$ girişine basamak fonksiyonu uygulanmıştır (pompa motoruna 10V gerilim uygulanmıştır) ve $Y_2(s)$ çıkışı (basınç) ölçülmüştür.

Alınan veriler ile MATLAB System Identification aracı kullanılarak sisteme uygun 2. derece transfer fonksiyon tahmin ettirilmiştir. Yapılan işlemler sonucunda sistemin transfer fonksiyonu denklem 6.3-6.7 arasında gösterilmiştir. Ayrıca deneysel olarak alınan sistemin basamak cevapları ile System Identification aracının sisteme ait transfer fonksiyonlarının benzetim basamak cevaplarının karşılaştırılması da Şekil 6.2’de görülmektedir.

$$G(s) = \begin{bmatrix} G_{11}(s) & G_{12}(s) \\ G_{21}(s) & G_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (6.3)$$

$$G_{11} = \frac{0.038576s + 0.00337}{s^2 + 0.14223s + 0.00704} \quad (6.4)$$

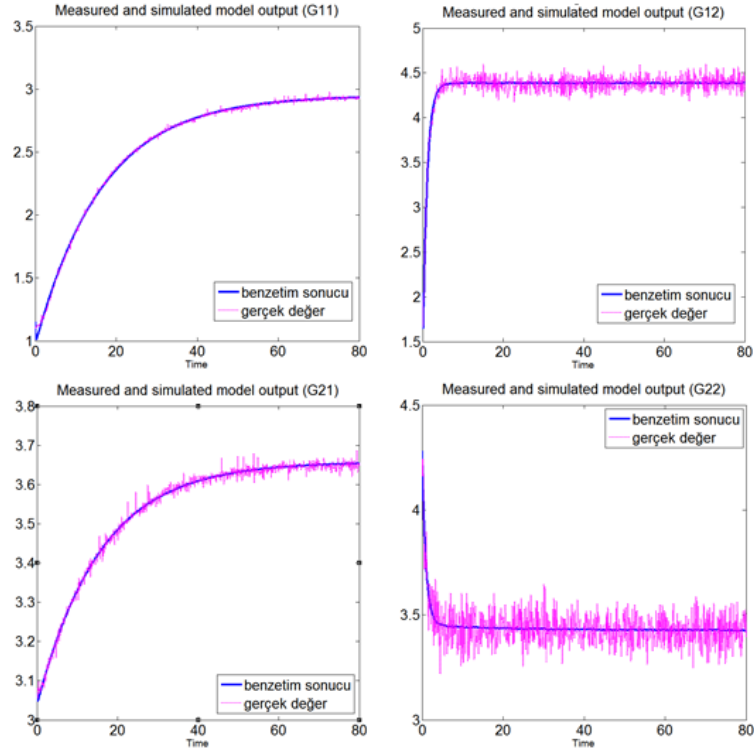
$$G_{12} = \frac{0.2426s + 0.00351}{s^2 + 0.71824s + 0.00991} \quad (6.5)$$

$$G_{21} = \frac{0.06655s + 0.00151}{s^2 + 0.51484s + 0.006264} \quad (6.6)$$

$$G_{22} = \frac{0.42814s^2 + 0.385s + 0.0182}{s^2 + 1.10336s + 0.05312} \quad (6.7)$$

Not olarak eklemek gerekirse; sistemin basamak giriş fonksiyonu olarak 10V seçilmiştir. 3V, 5V gibi değişik basamak girişleri de uygulanmış fakat kullanılan

deney setinin dinamik karakteristiğinden dolayı en uygun basamak giriş değerinin 10V olduğu görülmüştür.



Şekil 6.2. Sistem transfer fonksiyonlarının benzetim sonuçlarının deney setindeki birim basamak cevaplarıyla karşılaştırılması

6.3 Decoupler (Kompansatör) Bloklarının Tasarımı

Sistem için tasarlanan çok değişkenli kontrol blok şeması Şekil 6.3'te verilmiştir. Burada G_{c1} ve G_{c2} kontrolör blokları, D_1 ve D_2 decoupler (kompansatör) blokları, G_{11} , G_{12} , G_{21} , G_{22} sistemin transfer fonksiyonunun elemanlarıdır.

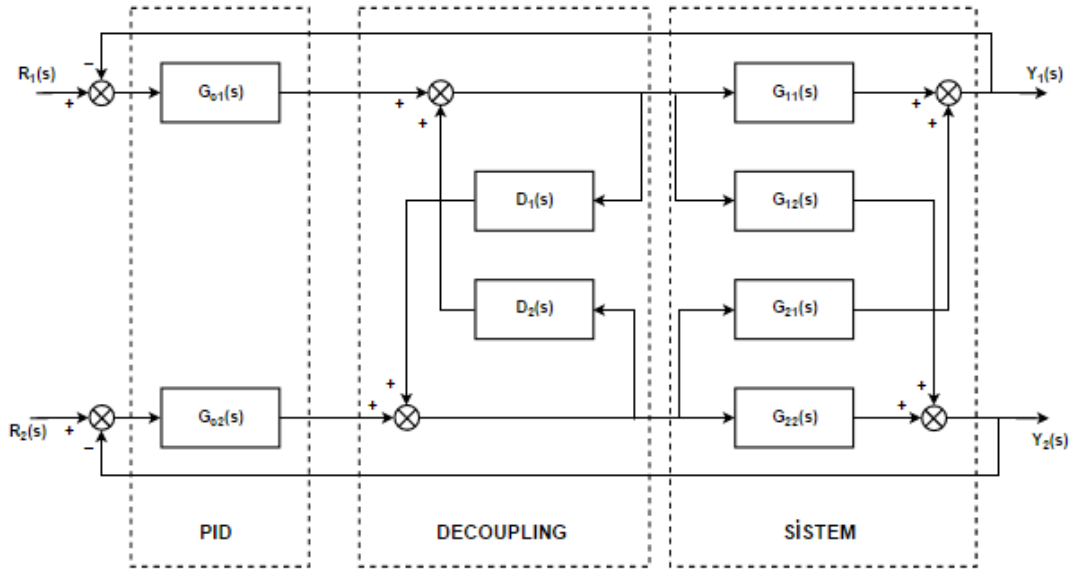
Kompansatör tasarımı yapılırken uygulaması ve tasarımı diğer yöntemlere nazaran daha basit olan inverted (ters) decoupling yöntemi kullanılmıştır [8]. Tablo 6.1'de ters decoupling yönteminin avantajları gösterilmiştir. Tablo 6.1'den de anlaşılacağı gibi ters decoupling yöntemini kullanmak, tasarımı ve uygulanması diğerlerine göre basit olduğundan ve uygulama performansı açısından daha uygundur. Denklem 6.8 ve 6.9'da kompansatör bloklarının transfer fonksiyonları görülmektedir.

$$D_1 = -\frac{G_{12}}{G_{11}} \quad (6.8)$$

$$D_2 = -\frac{G_{21}}{G_{22}} \quad (6.9)$$

Tablo 6.1. Decoupling yöntemlerinin avantajları ve dezavantajları [8]

| Decoupling Yöntem Karakteristiği | Basitleştirilmiş Decoupling | İdeal Decoupling | Ters Decoupling |
|---|-----------------------------|------------------|-----------------|
| Decoupling elemanları transfer fonksiyonların tamamını içermez. | Evet | Hayır | Evet |
| Decoupling sistem başlangıcı basittir. | Hayır | Hayır | Evet |
| Ayarlanan değişkenler ileri besleme girişi PID bloğu ile kolayca doygunluğa ulaşır. | Hayır | Hayır | Evet |
| Gecikme fonksiyon blokları uygulama performansını düşürebilir. | Evet | Evet | Hayır |
| PID fonksiyonu bloğuna bir ileri besleme girişi decoupling sistem uygulamasına olanak sağlar. | Hayır | Hayır | Evet |



Şekil 6.3. Decoupling (Etkileşimsiz) kontrol blok şeması

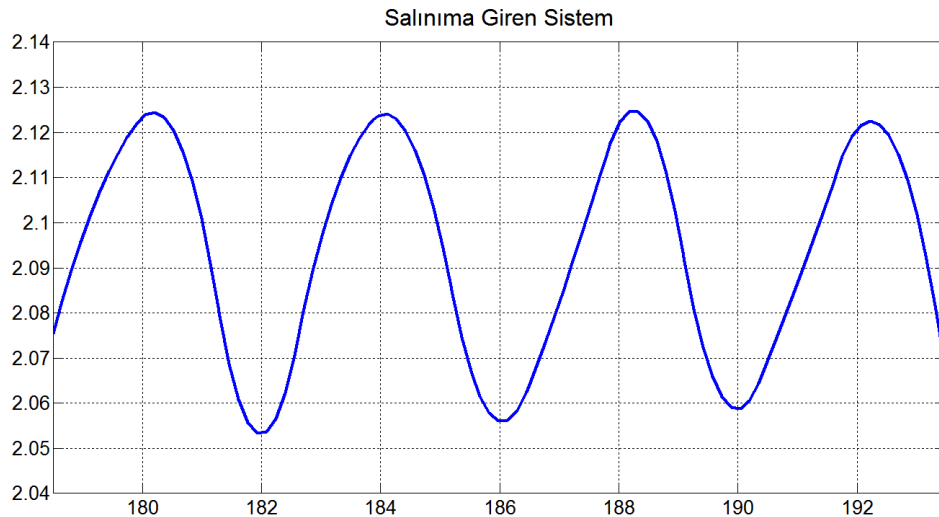
Denklem 6.4-6.7’de verilen akış hızı-basınç sistemine ait transfer fonksiyonlarını kullanarak tasarladığımız kompensatör bloklarının transfer fonksiyonları;

$$D_1(s) = \frac{-0.0666s^3 - 0.011s^2 - 0.0007s - 1.065e - 05}{0.0386s^3 + 0.0232s^2 + 0.002s + 2.111e - 05} \quad (6.10)$$

$$D_2(s) = \frac{-0.2426s^3 - 0.2712s^2 - 0.0168s - 1.864e - 04}{0.4281s^4 + 0.6925s^3 + 0.299s^2 + 0.0169s + 1.8e - 04} \quad (6.11)$$

şeklinde olur.

Yapılan deneylerde ve simulink programında PID katsayıları olarak literatürde çokça rastlanan Ziegler-Nichols yöntemi ile elde edilen katsayılar kullanılmıştır [21]. Ziegler-Nichols yöntemi uygulanırken, sistem sadece oransal kazanç ile kontrol edilir ve K_p değeri sistem salınım yapana kadar artırılır. Sistemi salınıma götüren en küçük oransal kazanç (K_u) değeri bulunur. Salınım yapan sistemin periyodu (P_u) hesaplanarak Tablo 6.2’deki Ziegler-Nichols katsayı ayarı formülleri ile sisteme uygun PID parametreleri hesaplanır. Sistemden elde edilen salınım grafiği Şekil 6.4’te verilmiştir.



Şekil 6.4. Ziegler-Nichols yöntemi için elde edilen salınım grafiği

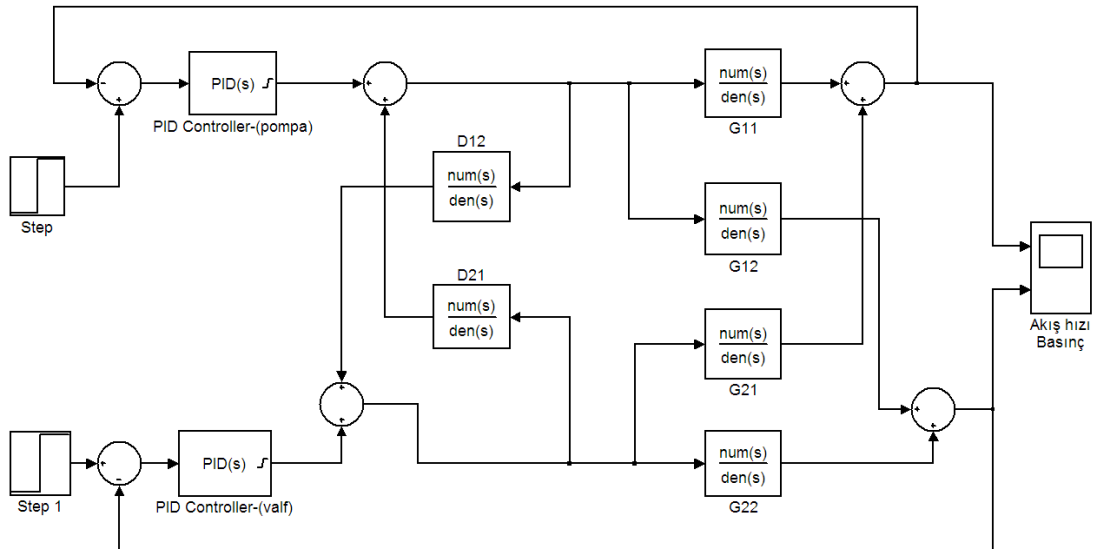
Tablo 6.2. Ziegler-Nichols katsayı ayarı formülleri

| | K_p | T_i | T_d |
|-------------|-------------|-------------|-----------|
| P Kontrol | $K_u / 2$ | | |
| PI Kontrol | $K_u / 2.2$ | $P_u / 1.2$ | |
| PID Kontrol | $K_u / 1.7$ | $P_u / 2$ | $P_u / 8$ |

Şekil 6.4'teki deney sonucundan $K_u=6$ ve $P_u=3.9$ bulunmuştur. Tablo 6.2'yi kullanarak PID katsayılarını hesapladığımızda $K_p=3.53$, $T_i=1.95$ ve $T_d=0.4875$ olarak hesaplanmıştır. Sistemin daha kararlı çalışması için Tablo 3.1 kullanılarak katsayılar düzenleme yapılmış ve sistemde kullanılan katsayılar $K_p=2.47$, $T_i=1.2$ ve $T_d=0.325$ olarak belirlenmiştir.

6.4 Akış-Hızı-Basınç Sisteminin Simulinkte Modellenmesi

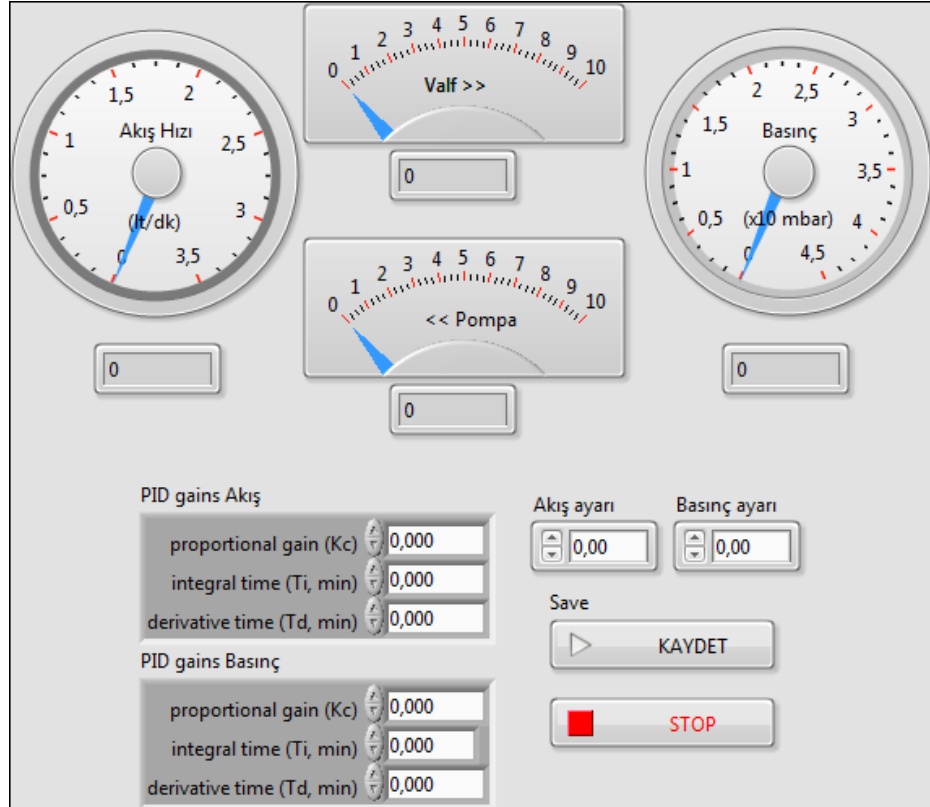
Konu 6.2'de bulunan sistemin transfer fonksiyonunun elemanları G_{11} , G_{12} , G_{21} , G_{22} ve konu 6.3'de bulunan decoupler (D_1 ve D_2) blokları ile şekil 6.3'teki decoupling kontrol blok şemasına göre tasarlanan akış hızı-basınç sistemi modeli şekil 6.4'te görülmektedir. Sistemin simulink ortamında çalışma sonucu sonuç kısmında Şekil 7.2'de verilmiştir.



Şekil 6.4. Decoupling (Etkileşimsiz) kontrol Simulink Tasarımı

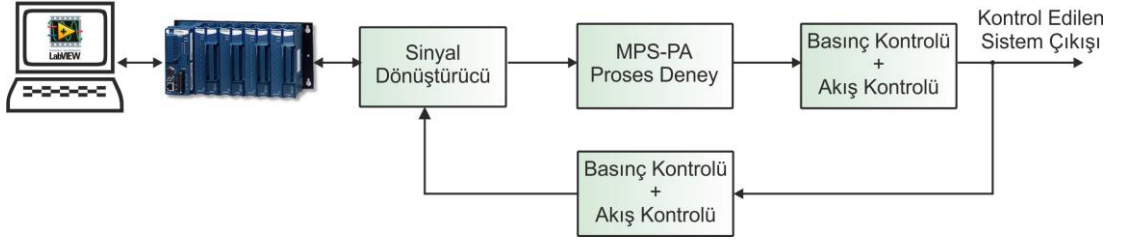
6.5 Akış-Hız-Basınç Sistemi için Tasarlanan LabVIEW Arayüzü

Akış hızı-basınç sistemi için LabVIEW'de oluşturulan arayüz Şekil 6.5'te verilmiştir. Bu arayüz ile pompa motoru ve valfin PID parametreleri kolaylıkla ayarlanabilirken, aynı anda akış hızı, basınç, pompa motorunun ve valfin gerilimi gözlenebilmektedir. Ayrıca sistem çalışırken istenilen tüm verileri almak için de arayüze veri kaydı butonu yerleştirilmiştir.

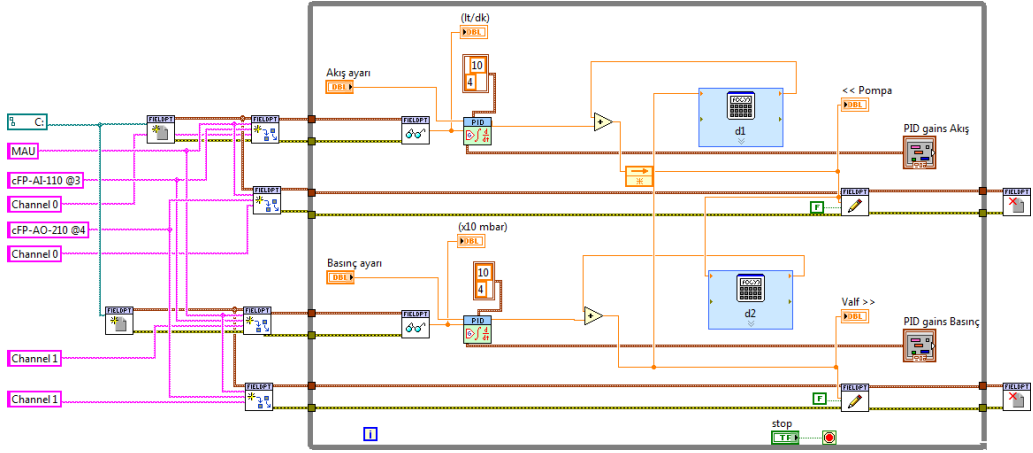


Şekil 6.5. Akış hızı-basınç sistemi için LabVIEW'de oluşturulan arayüz

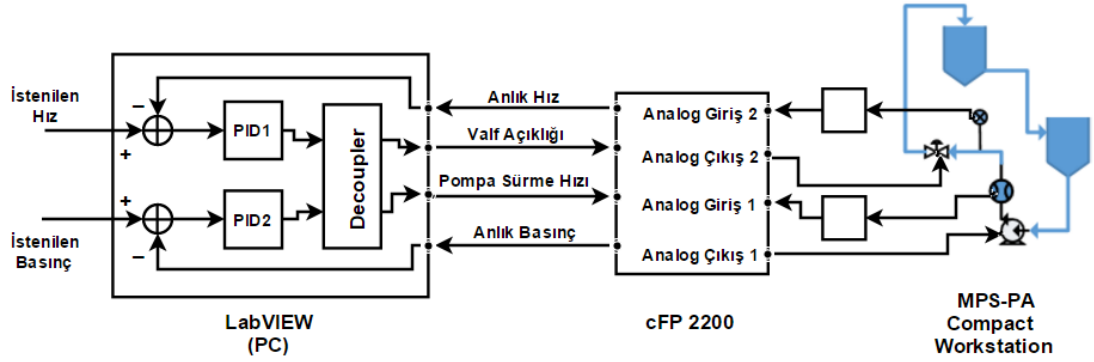
Şekil 6.6'da akış hızı basınç sisteminin akış şeması verilmiştir. LabVIEW'de hazırlanan arayüz ve yazılan program cFP 2200 kontrolör ile birlikte deney setinden gelen verileri işleyip istenilen referansa göre çıkış üreterek tekrar deney setine göndermektedir. LabVIEW'de yazılan program Şekil 6.7'de verilmiştir. cFP 2200, LabVIEW ve deney seti arasında çift yönlü çalışmaktadır. Deney setinin sinyal dönüştürücülerinden gelen sinyaller ve pompa motoru ile oransal valf bobinine giden sinyaller doğrudan kontrolörün analog girişlerine ve analog çıkışlarına bağlıdır. cFP 2200 ve LabVIEW ise bilgisayarın Ethernet kartıyla haberleşmektedir. Şekil 6.8'de daha detaylı akış şeması da verilmiştir.



Şekil 6.6. Akış hızı-Basınç sisteminin akış şeması



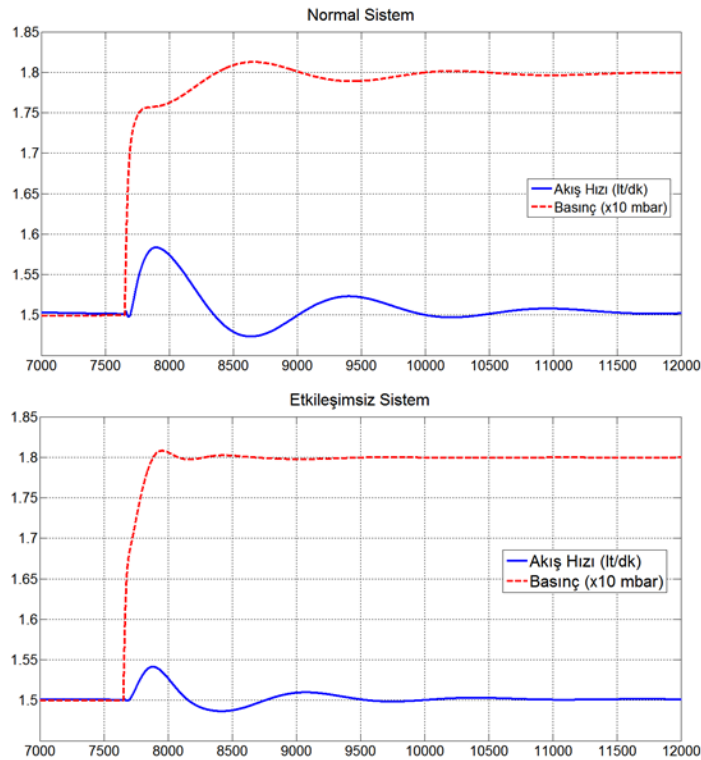
Şekil 6.7. LabVIEW'de yazılan decoupling kontrol programı



Şekil 6.8. Akış hızı-Basınç sisteminin detaylı akış şeması

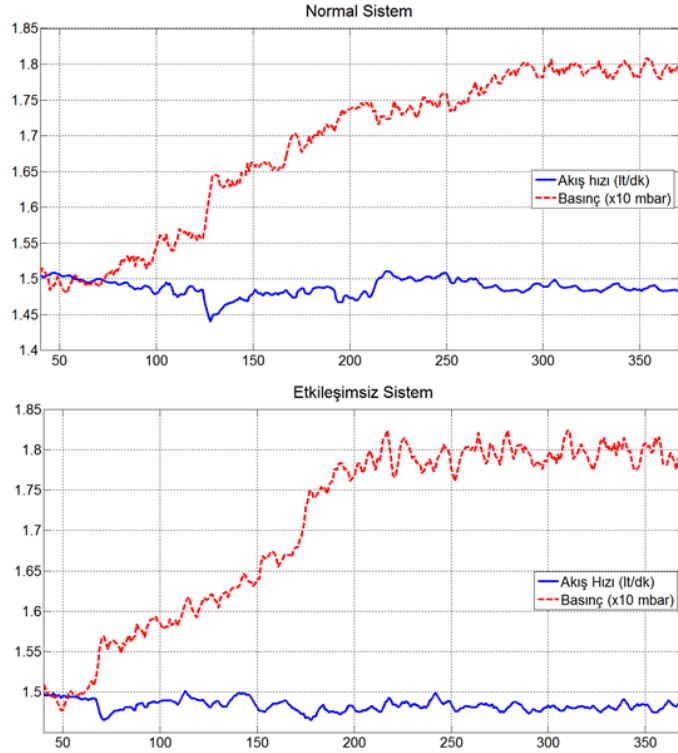
7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Şekil 6.2’de sistemin transfer fonksiyonlarının basamak cevaplarının, deneysel olarak alınan cevaplarla örtüştüğü gözlemlenmiştir. Şekil 6.1’deki etkileşimli modele basamak giriş uygulandığında elde edilen cevapla, MIMO sistem olarak çalıştırılan sistemin basamak cevaplarının aynı olup olmadığını öğrenmek amacıyla, sistem dengede iken girişlerden birinin referans değeri değiştirilerek sonuç gözlemlenmiştir. Yapılan ilk deneyde akış hızının başlangıç değeri 1,5 lt/dk ve basınç değeri 15 mbar olarak seçilmiştir. Sistem bu değerlerle dengede iken, basınç 18 mbar değerine arttırılmış, akış hızı değerinin ise referans değeri değiştirilmemiştir. Sistemden beklenen cevap, basıncı arttırmak için gerilimi azalan oransal valfin etkisiyle akış hızının azalması ve buna karşılık pompa motorunun geriliminin artarak akış hızını aynı referansta tutmasıdır. Şekil 7.1’de verilen simulink sonuçlarına baktığımızda, modellenen sistem beklenildiği gibi davranmış ve decoupling (etkileşimsiz) sistemde akış hızındaki sapma miktarı %1.73 iken normal sistemde bu değer %4.73 olarak ölçülmüştür.



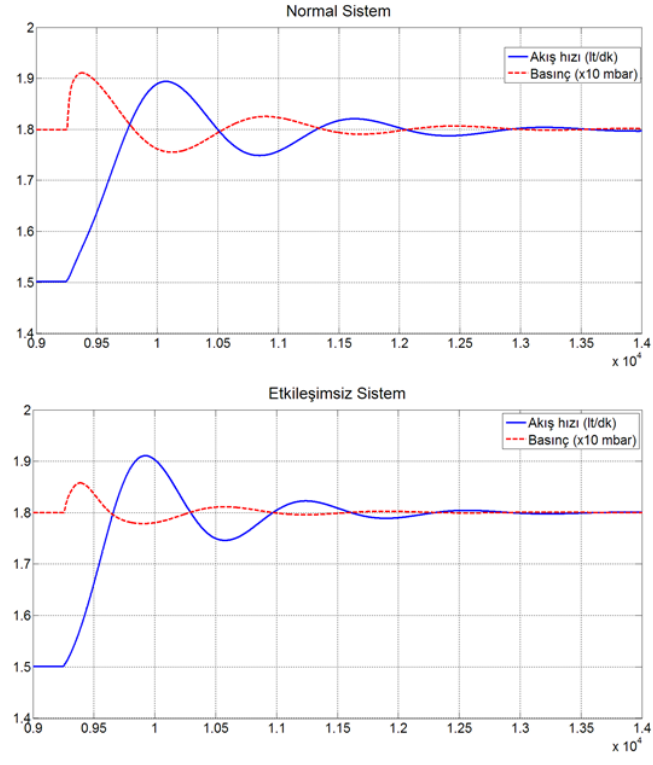
Şekil 7.1. Etkileşimli sistem ve sistem etkileşimsiz sistem simulink sonuçları

Şekil 7.2’de verilen deney sonuçlarına baktığımızda ise oransal valfin etkisine karşı pompa motorunun tepkisinin daha geç olduğu görülmektedir. Deney sonuçları birbiriyle kıyaslandığında decoupling (etkileşimsiz) sistemde akış hızındaki sapma miktarı %2.47 iken normal sistemde bu değer %4.8 olarak ölçülmüştür. Ayrıca etkileşimsiz sistemde etkilenmesini istemediğimiz akış hızının etkileşimli sisteme göre daha kararlı olduğu gözlemlenmiştir.

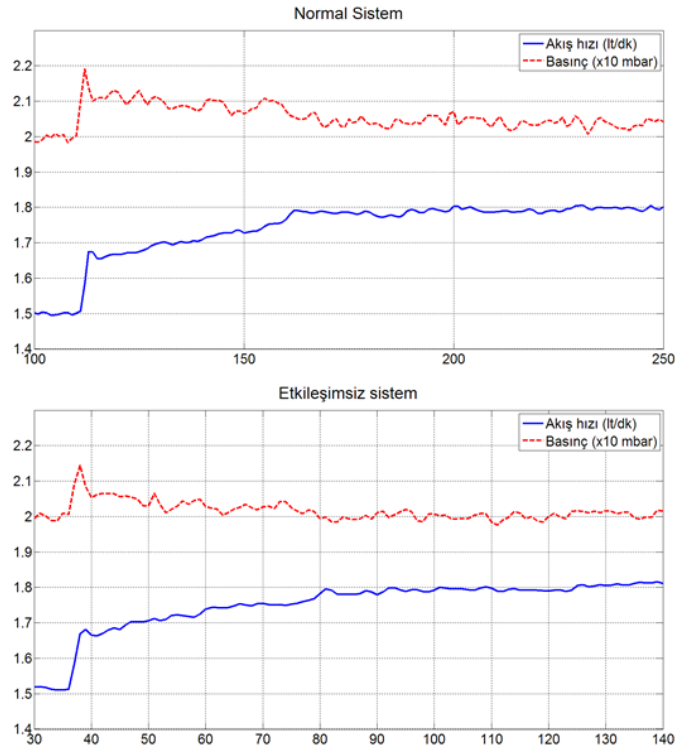


Şekil 7.2. Etkileşimli sistem ve etkileşimsiz sistem deney sonuçları

Yapılan ikinci deneyde akış hızının başlangıç değeri 1,5 lt/dk ve basınç değeri 18 mbar olarak seçilmiştir. Sistem bu değerlerle dengede iken, akış hızı 1.8 lt/dk değerine arttırılmış, basınç değerinin ise referans değeri değiştirilmemiştir. Sistemden beklenen cevap, akış hızını arttırmak için gerilimi artan pompanın etkisiyle basıncın artması ve buna karşılık oransal valf geriliminin artarak basıncı aynı referansta tutmasıdır. Şekil 7.3’te verilen simulink sonuçlarına baktığımızda, modellenen sistem beklenildiği gibi davranmış ve decoupling (etkileşimsiz) sistemde basınç değerindeki sapma miktarı %3.2 iken normal sistemde bu değer %6.17 olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.3. Etkileşimli sistem ve sistem etkileşimsiz sistem simulink sonuçları



Şekil 7.4. Etkileşimli sistem ve etkileşimsiz sistem deney sonuçları

Şekil 7.4'te verilen deney sonuçlarına baktığımızda basıncın başlangıç değeri sistem kısıtlamalarından dolayı 20 mbar seçilmiştir. Akış hızı ise simulinkteki gibi 1.5 lt/dk'dan 1.8 lt/dk'ya çıkarılmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere pompanın etkisine karşı oransal valfin tepkisinin daha geç olduğu görülmektedir. Deney sonuçları birbiriyle kıyaslandığında decoupling (etkileşimsiz) sistemde basınçtaki sapma miktarı %7.2 iken normal sistemde bu değer %9.55 olarak ölçülmüştür. Ayrıca etkileşimli sistemde basınç değeri olması gereken referans değerine dönememiş fakat etkileşimsiz sistemde referans değerine başarılı bir şekilde oturduğu gözlemlenmiştir.

Şekil 7.1 ile Şekil 7.3 ve Şekil 7.2 ile Şekil 7.4'teki grafikler incelendiğinde modellenen sistemin etkileşim miktarı ile gerçek sistemin etkileşim miktarının birbirinden farklı olduğu görülmektedir. Modellenen sistemde etkileşimden dolayı değişen akış hızı miktarı ve basınç değerleri, gerçek sistemde simulinkteki gibi değildir. Modellenen sistemde verilen etkiye karşılık transfer fonksiyonlarının verdiği tepki hızının, gerçek sistemde pompa motorundan ve oransal valften alınamadığı bu farka sebep gösterilebilir.

Elde edilen transfer fonksiyonlar yardımıyla sisteme kompensatör (decoupler) eklendiğinde, etkileşimsiz sisteme dönüşen akış hızı-basınç sistemi, simulinkte etkileşimi azalttığı görülmüştür (Şekil 7.1 ve 7.3). Aynı kompensatör LabVIEW ortamında hazırlanan kontrolöre eklenip deneyler yapıldığında ise etkileşimin kompensatörsüz sisteme göre azaldığı fakat sistemdeki gecikmelerden dolayı simulink sonuçlarıyla birebir örtüşmediği gözlenmiştir.

Decoupling kontrol yöntemleri sistemlerdeki etkileşimi yok etmeye yönelik çalışmalarına rağmen, akış hızı ve basınç gibi anlık dalgalanmalardan aşırı etkilenen girişlerin bir arada bulunduğu sistemlerde, sistemin yükselme zamanını normalden daha uzun tutan kontrolör tasarımı yapmak daha iyi sonuç vermektedir. Sisteme ilave olarak değişken PID parametreleri uygulayarak sistemin kararlılığı arttıracak ve yükselme zamanını kısaltacak çalışmalar yapılabilir. Bu tür sıvı dolaşımı olan sistemlerde daha güçlü pompa kullanmak kısıtlamaları azaltacağından daha verimli çalışmalar yapmaya olanak sağlayacaktır.

8. KAYNAKLAR

- [1] Kaplanoğlu, E. Çok Girişli Çok Çıkışlı Kısıtlamalı Sistemlerin Öngörülü Kontrol Uygulamaları. Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bilgisayar Kontrol Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul, 2006, 137 s. (Doktora Tezi).
- [2] Tham, M.T., "Multivariable Control (An Introduction To Decoupling Control), Department of Chemical Process Engineering University of Newcastle, United Kingdom, 1999, 19
- [3] Huang H.P., Jeng J.C., Chiang C.H., Pan W. A direct method for multi-loop PI/PID controller design. *Journal of Process Control*. 2003, 13, 769-786.
- [4] Zhai L., Chai T., Shi Y. Nonlinear Multivariable Decoupling PID Control Using Neural Networks. *International Conference on Neural Networks and Brain*, 13-15 Ekim, 2005, Pekin (Bildiriler Kitabı, 1843-1848)
- [5] Zhai L., Chai T. Intelligent Decoupling PID Control of a Class of Complex Industrial Processes. *Intelligent Control and Automation*. 2006, 6(1), 4827-4832.
- [6] Liu T., Zhang W., Gao F. Analytical decoupling control strategy using a unity feedback control structure for MIMO processes with time delays. *Journal of Process Control*. 2007, 17(2), 173-186
- [7] Shen Y., Cai W.J., Li S. Normalized decoupling control for high-dimensional MIMO processes for application in room temperature control HVAC systems. *Control Engineering Practice*. 2010, 18(6), 652-664.
- [8] Vrančić D. Design of MIMO Controllers with inverted decoupling. *8th Asian Control Conference (ASCC)*, 15-18 Mayıs, 2011, Tayvan (Bildiriler Kitabı, 1153-1158)
- [9] Garrido J., Vázquez F., Morilla F. An extended approach of inverted decoupling. *Journal of Process Control*. 2011, 21(1), 55-68.
- [10] Morilla F., Vázquez F., Garrido J. Centralized PID control by decoupling for TITO processes. *IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*, 15-18 Eylül, 2008, Hamburg (Bildiriler Kitabı, 1318-1325)
- [11] Jevtović B. T., Mataušek M. R. PID controller design of TITO system based on ideal decoupler. *Journal of Process Control*. 2010, 20(7), 869-876.
- [12] Fu Y., Chai T. Intelligent decoupling control of nonlinear multivariable system and its application to a wind Tunnel System. *IEEE Transactions on Control System Technology*. 2009, 17(6), 1376-1384.
- [13] Tang Y., Wang R. Decoupling control for nonlinear coupling systems based on CMAC & PID. *IEEE International Conference on Cognitive Informatics*. 15-17 Haziran, 2009, Hong Kong (Bildiriler Kitabı, 302-305)
- [14] Yüksel İ. Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri, Nobel Basımevi, Ankara, Türkiye, 2006, 391 s.
- [15] Yağsan, O. Bir Operatörsüz Vinç için PID ve Genetik Algoritma Temelli Minimum Salımlı Konum Kontrolü. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul, 2006, 93 s. (Yüksek Lisans Tezi)
- [16] Üstüner M.A., Taşkın S. Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistemlerde Etkileşimin Yok Edilmesi: Proses Kontrol Sistemi Uygulaması, *CBÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 2015, 11(2), 225-231
- [17] Skogestad S., Postlethwaite I. *Multivariable Feedback Control Analysis and Design*.

- [18] Luyben, W.L., Distillation decoupling. *AIChE Journal*, 1970, 16(2), 198-203.
- [19] Wardle A. P., Wood R. M. Problems of Application of Theoretical Feedforward Control Models to Industrian Scale Fractionating Plants. *ICHEME Symposium Series* 32. 8-10 Eylül 1969, İngiltere (Bildiriler Kitabı, 68-71)
- [20] Process automation MPS® PA Compact Workstation Manual, FESTO
- [21] Ziegler, J. G. ve Nichols, N. B., Optimum Settings for Automatic Controllers. *Transactions of the A.S.M.E*, 1942, 759-768.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mehmet Ali ÜSTÜNER
Doğum Yeri ve Yılı : Gaziantep, 1988
Medeni Hali : Bekar
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : mehmetali.ustuner@cbu.edu.tr

Eğitim Durumu

Lise : Gaziantep Anadolu Lisesi, 2006
Lisans : Gaziantep Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, 2012

Mesleki Deneyim

Gaziantep Meslek Yüksekokulu, Misafir Öğretim Görevlisi 2012-2012
Celal Bayar Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Araştırma Görevlisi 2012-Halen

Yayımları

Üstüner M.A., Taşkın S. Çok Girişli Çok Çıkışlı Sistemlerde Etkileşimin Yok Edilmesi: Proses Kontrol Sistemi Uygulaması, CBÜ Fen Bilimleri Dergisi, 2015, 11(2), 225-231

Üstüner M.A., Taşkın S. Bir Süreç Kontrol Sisteminde Bulanık-PID ayarı ile Etkileşimin Yok Edilmesi. Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı. 10-12 Eylül, 2015, Denizli (Bildiriler Kitabı, 682-687)