

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL VE BİR ENDÜSTRİYEL
MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Serdar ÖZDEMİR

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

EKİM 2015

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL VE BİR ENDÜSTRİYEL
MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL UYGULAMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Serdar ÖZDEMİR
(518121027)**

Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Mekatronik Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ

EKİM 2015

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 518121027 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi Serdar ÖZDEMİR, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL VE BİR ENDÜSTRİYEL MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL UYGULAMASI ” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Yrd. Doç. Dr. Yaprak YALÇIN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Türker TÜRKER
Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **23 Aralık 2015**
Savunma Tarihi : **28 Ekim 2015**

Anneme,

ÖNSÖZ

Çalışmamın her aşamasında, özendirici ve düşünmeye sevk eden katkılarıyla, çalışmalarımı destekleyen ve yönlendiren tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Ali Fuat ERGENÇ'e çok teşekkür ederim.

Çalışmalarına vermiş olduğu büyük desteklerden dolayı başta patronum Cüneyt KARAN'a ve büyük İzofarm ailesine minnettarım.

Bugünlere gelebilmemde en büyük destekçim fedakâr anneme, her zaman bizim iyiliğimiz için çalışan babama ve çok sevdiğim kardeşime sonsuz şükranlarımı sunarım.

Ekim 2015

Serdar ÖZDEMİR
(Elektronik Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Model Öngörülü Kontrol Özellikleri.....	1
1.2 Model Öngörülü Kontrolün Endüstride Kullanımı	3
1.3 Dörtlü Tank Sistemi	3
1.4 Tezin Amacı	4
2. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL.....	5
2.1 Gerileyen Ufuk Yapısı Fikri.....	7
2.2 Optimum Girişlerin Hesaplanması.....	9
2.3 Durum Uzay Modeli.....	12
2.4 Öngörülü Kontrolün Basitçe Formülünün Çıkartılması.....	12
2.5 Kısıtlamalar	13
2.6 Öngörülü Kontrol Probleminin Çözümü.....	14
2.7 Kısıtlanmış MPC Problemlerinin İkinci Dereceden Programlama Şeklinde Tanımlanması.....	20
2.8 Lineer Programlama ve İkinci Dereceden Programlama Problemlerinin Karakteristikleri.....	22
2.9 Bölge Ve Huni Terimleri.....	22
2.10 Birinci Dereceden Sistemler İçin Birim Basamak Fonksiyonu	24
2.11 İkinci Dereceden Sistemler İçin Birim Basamak Fonksiyonu	25
2.12 Dörtlü Tank Sistemi ve Modellenmesi.....	27
3. ENDÜSTRİDE KULLANILAN BAZI MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL TEKNOLOJİLERİ	31
3.1 Dayanıklı Çok Değişkenli Model Öngörülü Kontrol (RMPCT).....	33
3.2 RMPCT Çalışma Adımları.....	34
3.3 Dinamik Kontrol/Optimizasyonlu Genelleştirilmiş Aralık Kontrol.....	39
4. PROFIT LOOK PKS.....	43
4.1 PID_PLA Bloğu	43
4.2 Profit Loop PKS Assistant	46
4.2.1 Sisteme ait bilinen Laplace modeli kullanarak model tanımlama	47
4.2.2 PID ayar parametreleri kullanarak model tanımlama	48
4.2.3 Döngü çeşidine göre model tanımlama.....	48
4.2.4 Basamak fonksiyonu kullanarak model tanımlama	49

5. DENEYSEL ÇALIŞMA	53
5.1 Sistem Modeli.....	54
5.2 Alt Tank Kontrol İşlemi	61
5.2.1 Alt tank PI ile kontrol işlemi	61
5.2.2 Alt tank MPC ile kontrol işlemi	62
5.3 Çift Tank Kontrol İşlemi	64
5.3.1 Çift tank PI ile kontrol işlemi	65
5.3.2 Çift tank ayar değerli MPC ile kontrol işlemi	65
5.3.3 Çift tank aralık değerli MPC ile kontrol işlemi	66
5.4 Gerçek Sistem Kontrol İşlemi Sonuçları	67
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	69
KAYNAKLAR.....	71
ÖZGEÇMİŞ.....	73

KISALTMALAR

APCS	: Adaptive Predictive Control System
CTLEQN	: Control Equation
DMC	: Dynamic Matrix Control
EPF	: Efficient prediction Form
EQA	: Equation A
EQB	: Equation B
GPC	: Generalized Predictive Control
HEICON	: Hierarchical Constraint Control
IDCOM	: Identification and Command
IDCOM-M	: Identification and Command – Multivariable
LP	: Linear Programing
MAC	: Model Algorithmic Control
MBPC	: Model Based Predictive Control
MPC	: Model Predictive Control
OP	: Operating Point
OPC	: Optimum Predictive Control
PCT	: Predictive Control Technology
PFC	: Predictive Function Control
PID	: Proportional Integral Derivative
PID_PLA	: Proportional Integral Derivative – Profit Loop
PL PKS	: Profit Loop Process Knowledge System
PKS	: Process Knowledge System
PV	: Process Value
QP	: Quadratic Programing
RMPCT	: Robust Model Predictive Control Technology
SISO	: Single Input Single Output
SL-MPC	: Single Loop Multi Variable Predictive Controller
SMCA	: Setpoint Multivariable Control Architecture
SP	: Setpoint
SPHI	: Setpoint High Limit
SPLI	: Setpoint Low Limit

SEMBOLLER

$u(k+i)$	: Giriş Sinyali
$y(k+k)$	: Sistem Çıkışı
$r(k+i)$	: Referans Yörüngesi
$s(k+i)$	: Ayar Yörüngesi
$\hat{y}(k+i)$	: Öngörülen Sistem Çıkışı
$\hat{u}(k+i)$	: Öngörülen Giriş Sinyali
$\Delta\hat{u}(k)$	: Öngörülen Giriş İle Bilinen En Son Giriş Sinyali Arasındaki Fark
T_{ref}	: Zaman Sabiti
T_s	: Örnekleme Zamanı
$\hat{z}(k+i)$	: Öngörülen Sistem Çıkışı
$\hat{y}_f(k + H_p k)$	: Sistemin Serbest Hal Cevabı
P	: Çakışma Noktaları
H_p	: Öngörü Ufku
H_u	: Kontrol Ufku
H_w	: Pencere Parametresi
x	: Durum Vektörü
u	: Giriş Vektörü
y	: Hesaplanan Çıkış Vektörü
z	: Kontrol Edilen Çıkış Vektörü
V	: Değer Fonksiyonu
E	: Aktüatörlere Ait Dönüş Oranlarındaki Kısıtlar
F	: Aktüatörlere Ait Aralık Kısıtları
G	: Kontrol Edilen Değerlere Ait Kısıtlar
w_n	: Doğal Salınım Frekansı
ζ	: Sönüm Oranı
w_d	: Sönümlü Doğal Salınım Frekansı
A_i	: Tankın Kesit Alanı
a_i, S	: Tankın Çıkış Deliği Kesit Alanı
h_i	: Tankın Sıvı Yüksekliği
g	: Yer Çekim İvmesi
γ_i	: Vana Açıklık Oranı
V_i	: Motora Gönderilen Gerilim
J	: Ortak Amaç Fonksiyonu
C_0	: Delik Çıkış Katsayısı
D	: Tankın Çıkış Deliği Kesit Çapı
H	: Tankın Sıvı Yüksekliği Karekökü
Q_{in}	: Tanka Saniyede Giren Sıvı Miktarı

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1 : Sistem cevabının $t = n\tau$ anlarındaki yüzde değerleri.....	25
Çizelge 5.1 : Tank 1 ve tank 2 giriş/çıkış değerleri	59
Çizelge 5.2 : Alt tank kontrol işlemleri çıktıları	67
Çizelge 5.3 : Çift tank kontrol işlemleri çıktıları.....	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Model öngörülü kontrol örneği[3].....	6
Şekil 2.2	: Model öngörülü kontrol[7].....	8
Şekil 2.3	: Kısıtlamasız durumlar için model öngörülü kontrolcü [7].....	18
Şekil 2.4	: Gözlemciye sahip model öngörülü kontrolcü[7].....	19
Şekil 2.5	: Bölge terimi[7]	23
Şekil 2.6	: Huni terimi[7].....	23
Şekil 2.7	: Doğrusal Referans Yörüngesi ve Huni Terimi.....	24
Şekil 2.8	: Dörtlü Tank Sistemi[5].....	28
Şekil 3.1	: Honeywell kontrol sistemi genel yapısı[12].....	34
Şekil 3.2	: Honeywell kontrolcü iç yapısı[12]	35
Şekil 3.3	: Basamak ve Qmap matrisleri[12].....	36
Şekil 3.4	: Öngörülü zorlanmamış cevap[12]	36
Şekil 3.5	: Genel ve yerel kontrolcüler[12]	38
Şekil 3.6	: Dinamik kontrol/optimizasyonlu genelleştirilmiş aralık kontrolcü iç yapısı[13].....	40
Şekil 3.7	: Aralık kontrol formülasyonuna ait zaman diyagramı[13].....	41
Şekil 4.1	: PID_PLA Modül Görünümü[14]	43
Şekil 4.2	: PID_PLA ile AYAR DEĞERİ kontrol şeması	45
Şekil 4.3	: PID_PLA ile RANGE kontrol şeması.....	46
Şekil 4.4	: Sisteme ait Laplace modeli ile model tanımlama.....	47
Şekil 4.5	: PID parametreleri ile model tanımlama	48
Şekil 4.6	: PL PKS Assistant Ekran Çıktısı	49
Şekil 4.7	: Basamak fonksiyonu ile model tanımlama hazırlık adımı	50
Şekil 4.8	: Basamak fonksiyonu ile model tanımlama test adımı.....	51
Şekil 4.9	: Basamak fonksiyonu ile model tanımlama sonuç adımı	52
Şekil 5.1	: 4 Tank sıvı seviye kontrol düzeneği.....	53
Şekil 5.2	: 4 Tank sıvı seviye kontrol HMI Sayfası.....	54
Şekil 5.3	: Matlab Üst tank basamak cevabı.....	55
Şekil 5.4	: Matlab Alt tank basamak cevabı	56
Şekil 5.5	: PL PKS basamak cevabı ile model oluşturma.....	57
Şekil 5.6	: PL PKS basamak cevabı ile model çıktısı.....	57
Şekil 5.7	: Üst tank pompa çalışma eğrisi	58
Şekil 5.8	: Alt tank pompa çalışma eğrisi	58
Şekil 5.9	: Vanaya ait çalışma eğrisi[18]	58
Şekil 5.10	: Gerçek sistem üst tank basamak cevabı	60
Şekil 5.11	: Gerçek sistem alt tank basamak cevabı.....	60
Şekil 5.12	: Alt tank için gerçekleştirilen PI kontrolü ve çıktıları	62
Şekil 5.13	: Performans oranı 0.5 için MPC çıktısı	63
Şekil 5.14	: Performans oranı 1 için MPC çıktısı	63
Şekil 5.15	: Performans oranı 1.2 için MPC çıktısı	64
Şekil 5.16	: Çift tank kontrol diyagramı	64

Şekil 5.17 : Çift tank için gerçekleştirilen PI kontrol grafiği.....	65
Şekil 5.18 : Çift tank için gerçekleştirilen ayar değerli MPC kontrol grafiği.....	66
Şekil 5.19 : Çift tank için gerçekleştirilen ayar değerli MPC kontrol grafiği.....	66

MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL VE BİR ENDÜSTRİYEL MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL UYGULAMASI

ÖZET

Model tabanlı öngörülü kontrol (MBPC) veya diğer bir adıyla model öngörülü kontrol (MPC) standart PID kontrolünden daha gelişmiş ve endüstriyel proses kontrolünde önemli ve geniş çaplı etki yapmış, gelişmiş bir kontrol teknolojisidir. Günümüze kadar ki ana kullanım alanının kimya ve petrokimya endüstrileri olmasına karşın son zamanlarda getirdiği avantajlardan dolayı diğer proses endüstrilerinde de kullanımı hızla yaygınlaşmış ve hızla yaygınlaşmaya devam etmektedir. Çok değişkenli kontrol problemlerini ele alabilmesi, proses için önemli olabilecek sınır değerlerinde güvenle çalışabilmesi, aktüatörlere ait sınırlamaları analiz edebilmesi ve uzun ölü zaman problemlerini ortadan kaldırabilmesi bu kontrol teknolojisinin hızla yaygınlaşmasında önemli paya sahiptir.

Tezin birinci bölümünde yukarıda bahsedilen model öngörülü kontrole daha detaylı bir giriş yapılmış, endüstride kullanılan model öngörülü kontrol ve dörtlü tank sistemi kısaca incelenmiş ve tezin amacı belirlenmiştir.

İkinci bölümde model öngörülü kontrol ve model tanımlama incelenmiştir. Model öngörülü kontrolün en iyi giriş ve çıkış değerlerini elde edebilmek için kullandığı birinci ve ikinci dereceden eniyileme yöntemleri araştırılmış, basamak fonksiyonları ile sistem modeli elde etme üzerinde durulmuştur. Ayrıca Honeywell'e ait aralık (range) değerli kontrol yapısının kullandığı huni (funnel) ve bölgeler (zones) terimleri incelenmiştir. Son olarak ise dörtlü tank sisteminin modellenmesi üzerine durulmuştur.

Üçüncü bölümde endüstride kullanılan model öngörülü kontrol teknolojilerine örnekler verilmiştir. Honeywell şirketi tarafından geliştirilmiş olan dayanıklı çok değişkenli model öngörülü kontrol (RMPCT) teknolojisi, kontrolcünün çalışma adımları ile birlikte aktarılmıştır.

Dördüncü bölümde Honeywell şirketinin tasarlamış olduğu PID_PLA kontrol modülü tanıtılmış, kontrolün endüstriyel proseslerde kullanılabilmesi için yapılması gereken işlemler belirlenmiş ve Profit Loop PKS Assistant programı kullanımı ve program kullanılarak model tanımlama işlemleri anlatılmıştır.

Son bölümde ise gerçek bir akış seviye kontrolü yapan bir proses işlemi, Honeywell kontrolcü kullanılarak sırası ile PID kontrol, ayar değerli ve aralık değerli model öngörülü kontrol işlemlerine tabi tutulmuştur. Son olarak bu işlemler sonrası elde edilen sonuçlar incelenmiş ve yorumlanmıştır. Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki; sistemin iyi modellenmesi ile yapılan model öngörülü kontrol işlemi, en az PID ile yapılan kontrol işlemi kadar iyi sonuçlar vermiştir.

MODEL PREDICTIVE CONTROL AND AN INDUSTRIAL MODEL PREDICTIVE CONTROL APPLICATION

SUMMARY

Predictive control, or model based predictive control (MPC or MBPC) as it is sometimes known, is the only advanced control technique –that is, more advanced than standard PID control- to have had a significant and widespread impact on industrial process control. The main reason;

- The only generic control technology which can deal routinely with equipment and safety constraints.

Operation at or near such constraints is necessary for the most profitable or most efficient operation in many cases. The penetration of predictive control into industrial practice has also been helped by the facts that

- Its underlying idea is easy to understand,
- Its basic formulation extends to multivariable plants with almost no modification,
- It is more powerful than PID control, even for single loops without constraints, without being much difficult to tune, even on difficult loops such as those containing long time delays.

Today's control software and technology offers the potential to implement more advanced control algorithms but often the preferred strategy of many industrial engineers is to design a robust and transparent process control structure that uses simple controllers. This is one reason why PID controller remains industry's most widely implemented controller despite the expensive developments of control theory; however, this approach of structured control can create limitations on good process performance. One such limitation is the possible lack of a coordinator within the hierarchy that systematically achieves performance objectives. Another is the omission of a facility to accommodate and handle process operational constraints easily. The method of model predictive control (MPC) can be used in different levels of the process control structure and is also able to handle a wide variety of process control constraints systematically. These are two of the reasons why MPC is often cited as one of the more popular advanced techniques for industrial process applications.

Surprisingly, MPC and the associated receding horizon control principle have a history of development and applications going back to the late 1960s; Jacques Richalet developed his predictive functional control technique for industrial application from that time onward. Work on using the receding horizon control concept with state space models can be identified in the literature of the 1970s, and the 1980s saw the emergence first of dynamic matrix control and then, towards the end of the decade, of the influential generalised predictive control technique.

The methodology of all the controllers belonging to the MPC family is characterized by the following strategy;

- 1) The future outputs for a determined horizon N , called the prediction horizon, are predicted at each instant t using the process model. These predicted outputs $y(t+k|t)$, for $k = 1, 2, \dots, N$ depend on the known values up to instant t (past inputs and outputs) and on the future control signals $u(t+k|t)$, $k = 0, 1, \dots, N-1$, which are those to be sent to the system and to be calculated.
- 2) The set of future control signals is calculated by optimizing a determined criterion in order to keep the process as close as possible to the reference trajectory $r(t+k)$ (which can be the setpoint itself or a close approximation of it). This criterion usually takes the form of a quadratic function of the errors between the predicted output signal and the predicted reference trajectory. The control effort is included in the objective function in most cases. An explicit solution can be obtained if the criterion is quadratic, the model is linear and there are no constraints, otherwise an iterative optimization method has to be used. Some assumptions about the structure of the future control law are also made in some cases, such as that it will be constant from a given instant.
- 3) The control signal $u(t|t)$ is sent to the process whilst the next control signals calculated are rejected, because at the next sampling instant $y(t+1)$ is already known and step 1 is repeated with new value and all the sequences are brought up to date. Thus the $u(t+1|t+1)$ is calculated (which in principle will be different to the $u(t+1|t)$ because of the new information available) using the receding horizon concept.

MPC and the associated receding horizon control principle have a history of development and applications going back to the late 1960s; Jacques Richalet developed his predictive function control technique for industrial application from that time onward. Work on using the receding horizon control concept with state-space models can be identified in the literature of the 1970s, and the 1980s saw the emergence first of dynamic matrix control and then, towards the end of the decade, of the influential generalised predictive control technique.

Predictive control Technologies that have great impact on the industrial world and commercially available. Although there are companies that make use of technology developed inhouse, that is not offered externally, the ones listed below can be considered representative of the current state of the art of model predictive control technology. Their product names and acronyms are:

- DMC Corp. : Dynamic Matrix Control (DMC)
- Adersa : Identification and Command (IDCOM), Hierarchical Constraint Control (HEICON) and Predictive Function Control (PFC)
- Honeywell Profimatics : Robust Model Predictive Control Technology (RMPCT) and Predictive Control Technology (PCT)
- Ayar değeri Inc. : Setpoint Multivariable Control Architecture (SMCA) and IDCOM-M (multivariable)
- Treiber Controls : Optimum Predictive Control (OPC)
- SCAP Europa : Adaptive Predictive Control System (APCS)

In this study, Honeywell Robust Model Predictive Control is introduced and a control application which is a flow and level control application is achieved by using Honeywell RMPCT.

First of all in first section general information and history of model predictive control is given and the aim of the thesis is announced.

In second section model predictive control is researched and analyzed associated with linear and quadratic programming optimization and robustness. And Funnel and zones parameters which are used in Honeywell RMPCT technology in range control applications are researched.

In third section model predictive control Technologies for industrial areas is introduced and detailed informations, structure and characteristics of RMPCT is investigated.

In fourth section PID_PLA model predictive control modul which is designed by Honeywell is presented with how can be used and how can be installed. Also Profit Loop PKS assistant software program is presented how can be used and how can defined a system or process model with using profit loop PKS assistant.

In last section flow-level control application is controlled by using PID control and setpoint model predictive control. And all results are analyzed and interpreted.

1. GİRİŞ

Modele dayalı bir kontrol yönteminde süreçte olabilecek sapmalar, sürece ait sistem modeliyle tahmin edilerek kontrol eylemi gerçekleştirilir. Bu kontrol yöntemi zamana bağlı tahmin ve kontrol yapar. Optimal kontrol bir amaç fonksiyonuna (performans fonksiyonu) dayanarak kontrol problemini formüle eder ve belirli süre için optimal performansı veren kontrol sinyallerini bulmaya çalışır. Model öngörülü kontrol (MPC) ise optimal kontrol yönteminin geri besleme ile geliştirilmiş şeklidir [1].

1.1 Model Öngörülü Kontrol Özellikleri

Model öngörülü kontrol (MPC) terimi, esas olarak belirli bir kontrol stratejisini işaret etmez. MPC, sistem modelini kullanarak bir amaç fonksiyonunu minimize etmeyi hedef alan kontrol sinyalini oluşturan çok sayıda kontrol stratejisinin (MAC, DMC, GPC vb.) genel adıdır. Bu yöntemlerin temel özellikleri, içsel model içermeleri, kayan ufuk prensibini benimsemeleri ve sistemin tahmin edilen cevaplarına göre bir kontrol sinyali hesaplamalarıdır. MPC yöntemleri arasındaki fark, kontrolörün hesaplanması için kullandıkları amaç fonksiyonları ve içsel model tipleridir.

MPC modeller, bağımsız değişkenlerde meydana gelen değişimlerin, modellenmiş sistemin bağımlı değişkenlerindeki değişimini öngörürler. Kontrolcü tarafından ayarlanamayan bağımsız değişkenler sistemin gürültü modeli olarak kullanılırken, proseste bulunan diğer değişkenler sistemin kontrol amacını veya proses kısıtlarını belirler. MPC, proses modelini, prosesin mevcut dinamik durumunu ve mevcut ölçümlerini kullanır [2].

Günümüzde bir çok kullanım alanına sahip olan model öngörülü kontrol tekniğinin avantajları aşağıdaki gibi maddeler halinde yazılabilir.

- Öngörülü kontrolün, sistemleri sezgisel tanımlayabilmesi ve kontrol parametrelerinin kolay ayarlanabilmesi, sistem bilgilerinin limitli olduğu durumlarda bile kolaylıkla uygulanabilmesini sağlar.

- Basit dinamiğe sahip sistemlerden karmaşık dinamiğe sahip (faz kayması fazla olan sistemler, minimum fazlı olmayan sistemler gibi) bir çok uygulamalarda kullanılabilir.
- Durum değişkeni fazla olan sistemlere kolaylıkla uygulanabilir.
- Sistemlerin sahip olduğu ölü zamanlar ile mücadele edebilir.
- İleri beslemeli bir kontrol gibi çalıştığından ölçülebilen gürültüleri sönümleme etkisine sahiptir.
- Elde edilen kontrolcü lineer kontrol yasasını uygulayabilmek için oldukça uygundur.
- Gelecekteki ayar noktaları biliniyorsa oldukça yararlı ve kullanışlıdır.

Bu kontrol stratejisinin dezavantajları ise;

- Sistem dinamiğinin değişmediği durumlarda, kontrolcüye ait parametreler önceden bulunabilir. Ancak adaptif kontrolde olduğu gibi model öngörülü kontrolde de her bir adımda kontrol kazançları sistem giriş-çıkışına göre yeniden hesaplanacağından, işlem yükü oldukça fazladır.
- Sistemin matematiksel ifadesi ile gerçek sistem arasındaki fark attıkça sistemin gelecekteki giriş-çıkışlarına ilişkin tahminlerin doğruluğu azalacaktır ve öngörülü kontrolün istenilen performans aralığında çalışması zorlaşacaktır.

Model Öngörülü Kontrol algoritmasında, gereken modelleri elde edebilmek ve ifade edebilmek için çeşitli yöntemler vardır. Bu yöntemlerin bazıları aşağıdaki gibidir;

- Basamak cevap modeli
- Darbe cevap modeli
- Transfer fonksiyonu modeli
- Durum-uzay modeli

Basamak cevap modelinin ana fikri, sistemin girişine birim basamak girdisi uygulamak ve açık döngü cevabını elde etmekten geçer. Bu model sadece sistemin bütün parametreleri ölçülebiliyorsa yeterlidir, aksi halde ölçülemeyen değişkenleri tahmin edebilmek için bir gözlemci gerekir [3].

1.2 Model Öngörölü Kontrolün Endüstride Kullanımı

MPC, endüstride bugüne kadar uygulanmış en başarılı ve gelişmiş kontrol yöntemlerinden biridir [4].

İlk olarak model öngörölü kontrol, iki öncü endüstriyel araştırma grubu tarafından 1970'lerde geliştirilmiştir. Fransız şirketi Adersa'da çalışan Richalet ve arkadaşları (1978) model öngörölü deneysel kontrolünü (MPHC) ve Shell Oil (Cutler ve Ramaker, 1980) dinamik matris kontrolünü (DMC) geliştirmiştir ve her iki teknolojiye benzer yeteneklere sahiptir. Clarke ve arkadaşları (1987) tarafından geliştirilen adaptif model öngörölü kontrol tekniği de oldukça ilgi çekmiştir. Model öngörölü kontrolün en önemli bölümlerinden biri olan gerileyen ufuk yapısı (receding horizon principle) ise Propoi (1963) tarafından önerilmiştir. Model öngörölü kontrol, algoritmasının kolaylığı ve kontrol edilmek istenilen sistemin darbe veya basamak cevabı sonucunda elde edilen matematiksel modelinin yeterli olması sayesinde, başta petrokimya tesisleri ve petrol rafinerileri olmak üzere, endüstride oldukça popüler hale gelmiştir. Qin ve Badgwell tarafından 2003 yılında yapılan model öngörölü kontrol anketlerine göre, 1999 yılı sonunda dünya çapında 4500'ün üzerinde model öngörölü kontrol uygulaması kullanılmaktadır. Bu endüstrilerde, model öngörölü kontrol, eşitsizlik kısıtları içeren çok değişkenli kontrol problemleri için oldukça kullanışlı hale gelmiştir. Kaydetmiş olduğu başarısına bakıldığında, model öngörölü kontrol, akademik ve endüstriyel araştırmalar için oldukça popüler bir konu durumuna gelmiştir [3].

1.3 Dörtlü Tank Sistemi

Dörtlü tank sistemi oldukça kullanışlı olan bir karmaşık dinamiğe sahiptir. Sahip olduğu bu özellik sayesinde kontrol alanında ciddi araştırma konularından biri olmuştur. Sistemin sahip olduğu dinamik karakterler sayesinde, sistem transfer fonksiyonu ayarlanabilir sıfırlara sahiptir. Transfer fonksiyonun sahip olduğu sıfırlardan bir tanesi her zaman sol düzlemde, diğeri ise sol veya sağ yarı düzlemde yer alabilir. Çok değişkenli yapısı sebebi ile uygun ayarlamalar yapıldığında sistem non-minimum fazlı bir davranış gösterir. Bu sebeplerden dolayı dörtlü tank sistemi farklı kontrol teknolojilerinin ve gelişmiş çok değişkenli kontrol teknolojilerini araştırma konusunda iyi bir ortam oluşturmaktadır [5].

1.4 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasının amacı; model öngörülü kontrol kavramını detaylıca kavramak ve elde ettiğimiz bilgiler ışığında endüstride kullanım alanlarını tespit edip, onu endüstri kullanımında üstün kılan özelliklerini kavrayabilmektir. Dörtlü tank sistemini ile ilgili gerekli araştırmaları yaptıktan sonra, dörtlü tank sistemi üzerinde model öngörülü kontrol yapmak ve endüstride günümüze kadar çok fazla sayıda uygulaması bulunan PID ile de kontrol işlemini gerçekleştirdikten sonra, gerekli kıyaslamaları yapmaktır.

2. MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL

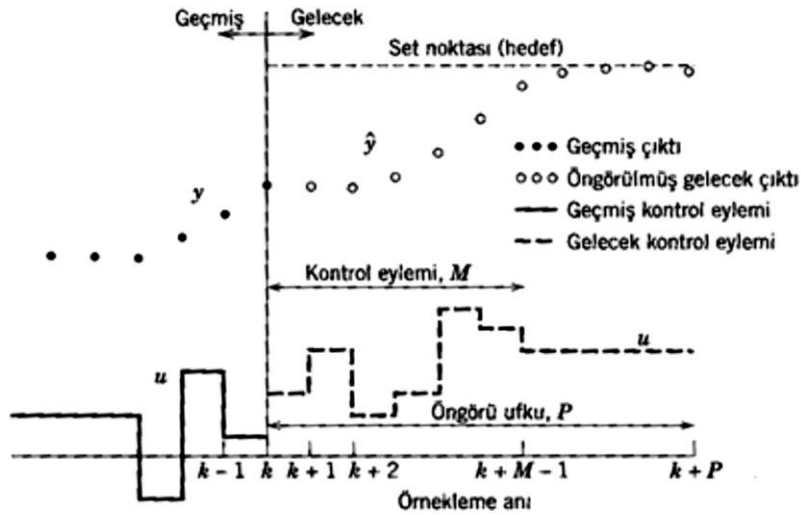
Model öngörülü kontrolün genel amaçları, Qin ve Badgwell (2003) tarafından özetlenmiştir. Bu amaçlar aşağıda listelenmiştir.

- 1) Girdi ve çıktı kısıtlarının ihlalinin önlemek.
- 2) Diğer çıktıları belirli aralıklar içinde tutarken, bazı çıktı değişkenleri optimum set noktalarına getirmek.
- 3) Girdi değişkenlerinin fazladan hareketlenmesini engellemek.
- 4) Algılayıcı veya çalıştırıcı mevcut olmadığında, mümkün olduğu kadar çok proses değişkenini kontrol etmek.

Gerçek ve öngörülen çıktılar arasındaki farklar, öngörü bloğuna giden geri besleme sinyali olarak işlev görürler. Öngörüler, her örnekleme zamanında yapılan set noktası ve kontrol hesaplamalarında kullanılırlar. Üst ve alt limitler gibi girdi ve çıktı değişkenleri üzerindeki eşitsizlik kısıtları iki hesaplamada da kullanılabilir.

Kontrol hesaplamalarındaki set noktaları, prosesin yatışkın durum modeline dayalı olan optimizasyondan hesaplanırlar. Tipik optimizasyon hedefleri, kar fonksiyonunu en fazla yapmayı, amaç fonksiyonunu en az yapmayı veya üretim hızını en hızlı hale getirmeyi hedefler [2].

MPC hesaplamaları, çıktıların gelecekteki değerlerinin öngörülerine ve çıktıların şu anki değerlerine dayalıdır. MPC kontrol hesaplamalarının amacı, öngörülen yanıtın en iyi şekilde set noktasına hareket etmesi için kontrol hareketlerinin sırasını tespit etmektir. Tek girişli tek çıkışlı bir sistem için gerçek çıktı , öngörülen çıktı, kontrol sinyali, Şekil 2.1’de örneklendirilmiştir.



Şekil 2.1 : Model öngörülü kontrol örneği [3].

MPC stratejisi, k ile gösterilen şu anki örnekleme anında, kontrol sinyalinin $\{u(k+i-1), i=1,2,\dots,M\}$ değerlerini hesaplar. Set, şu anki kontrol sinyali $u(k)$ ve $M-1$ noktasındaki gelecek kontrol sinyallerini içerir. Kontrol sinyali, P öngörülü çıkışın $\{\hat{y}(k+i), i=1,2,\dots,P\}$ en iyi bir şekilde set noktasına ulaşması için hesaplanır ve M kontrol hareketinden sonra sabit tutulur. Kontrol hesaplamaları, amaç fonksiyonunun en iyilemesine dayalıdır. M kontrol hareketinin sayısı kontrol ufku olarak adlandırılırken, öngörülerin sayısı P , öngörü ufku olarak adlandırılır.

MPC'nin ayırt edici bir diğer özelliği ise gerileyen ufuk yaklaşımıdır. Camacho ve Bordons (1999), bu kavrama göre kontrol işleminin aşağıdaki sırayla yapıldığını yazmışlardır.

- 1) Gelecek çıkış değerleri her t anında bir öngörü ufku boyunca hesaplanır. Bu öngörülen çıkışlar, geçmiş giriş ve çıkış değerlerine ve gelecekteki kontrol işaretlerine bağlı olarak bulunur.
- 2) Gelecek kontrol işaretleri bir eniyileme yöntemi kullanılarak, süreci, referans yörüngesine mümkün olduğu kadar yakınsayacak biçimde hesaplanır. Genelde bu eniyileme yöntemi, öngörülen çıkış ve öngörülen referans yörüngesi arasındaki farkın ikinci dereceden (Quadratic) bir fonksiyonu şeklindedir. Ve çoğunlukla kontrol artımları da başarımlı ölçütü içinde bulunur.
- 3) Bulunan kontrol işaretinden sadece ilki sisteme gönderilir çünkü bir sonraki örnekleme anında bir sonraki çıkış değeri ölçülebilir olacaktır. Dolayısıyla

yeni bir kontrol işareti hesaplaması yapılmalıdır. Bu durum gerileyen ufuk kavramı olarak bilinmektedir [6].

Gerileyen ufuk yaklaşımı ile ilgili onlarca araştırma bulunmaktadır. Gerileyen ufuk yaklaşımı, günümüz araştırmacılarının önem verdikleri konulardan biridir.

2.1 Gerileyen Ufuk Yapısı Fikri

Model öngörülü kontrolün ana fikri Şekil 2.2’de gösterildiği üzeredir. Bu kısımda tek giriş ve tek çıkışlı (SISO) bir sistem için kontrol işlemi tartışılmıştır. Hesaplamanın yapıldığı zamanın “ k ” anında olduğu varsayarsak, sistemin çıkışı $y(k)$ olarak verilmiş ve çıkış yörüngesinin daha önceki aldığı değerler de gösterilmiştir. Aynı zamanda istenilen çıkış olarak devam etmesi gereken yörünge, ayar yörüngesi olarak belirtilmiştir. Ayar yörüngesi boyunca herhangi bir t anında seçilen değer $s(t)$ şeklinde gösterilmiştir. Sistem çıkışı $y(k)$ ’nın ayar değerine ulaşması için seçilmiş olan yörüngeye referans yörüngesi denir. Çoğunlukla referans yörüngesinin, o andaki çıkış değerinden ayar değerine, üstel olarak yakınlığı varsayılır. Cevabın hızını çözümlmek için de üstel fonksiyonun zaman sabiti T_{ref} ile gösterilmektedir. Sonuç olarak anlık hata ifadesi aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\varepsilon(k) = s(k) - y(k) \quad (2.1)$$

Eğer çıkış, referans yörüngesini izleyecek ise, i adım sonra hata ifadesini şu şekilde verecektir:

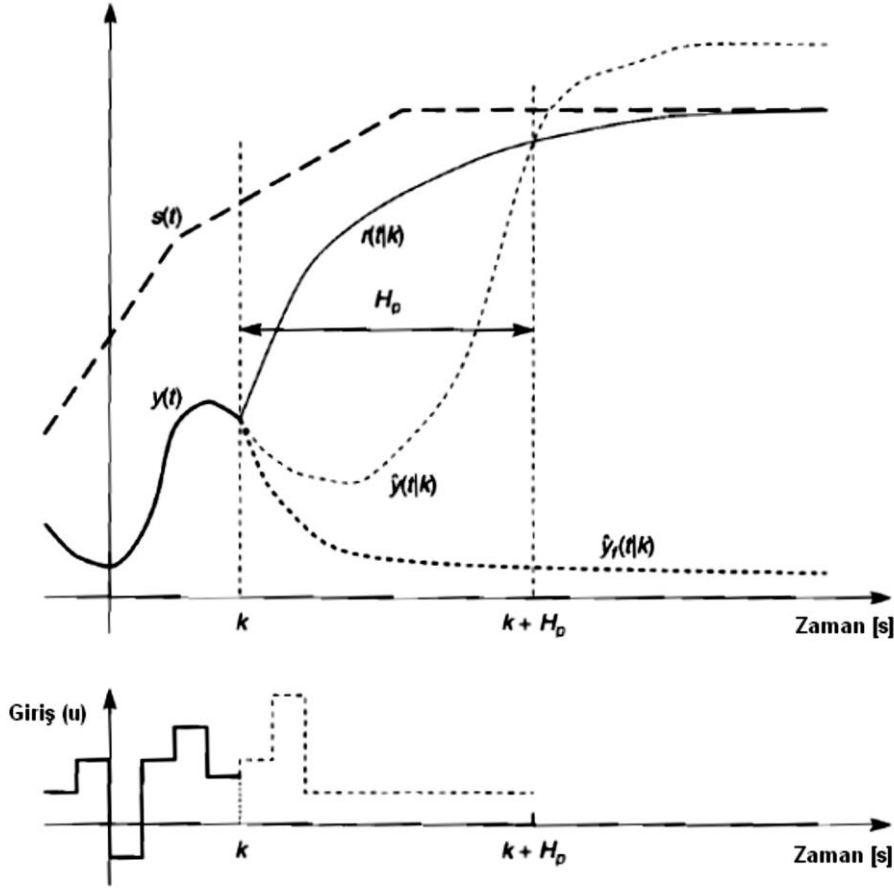
$$\varepsilon(k+i) = e^{-i T_s / T_{ref}} \varepsilon(k) = \lambda^i \varepsilon(k) \quad (2.2)$$

Yukarıdaki gösterimde de T_s örnekleme zamanıdır ve $\lambda = e^{-T_s / T_{ref}}$ tir. Buna göre referans yörüngesi şu şekilde verilebilir:

$$r(k+i|k) = s(k+i) - \varepsilon(k+i) = s(k+i) - e^{-T_s / T_{ref}} \varepsilon(k) \quad (2.3)$$

Genel olarak, $r(k+i|k)$ gösterimi, referans yörüngesinin k anındaki şartlara bağımlı olduğunu göstermektedir. Daha farklı referans yörüngesi tanımları da mevcuttur.

Örneğin referans yörüngesi üstel bir fonksiyon yerine doğrusal bir fonksiyonda olabilmektedir.



Şekil 2.2 : Model öngörülü kontrol [7].

Öngörülü kontrolör, şimdiki zamandan başlayarak, gelecekte ki öngörü ufku boyunca sistem hakkında öngörüler üretebilmesi için bir içsel modele ihtiyaç duyar. Öngörülü sistem davranışı, en iyi öngörü davranışını uygulayabilmesi için bir öngörü ufku boyunca uygulanacak en iyi giriş yörüngesinin $\hat{u}(k+i|k)(i=0,1,\dots,H_p-1)$ seçimine bağlıdır. İçsel modelin lineer olduğunun varsayılması, en iyi girişlerin hesaplanmasını nispeten kolaylaştırmaktadır. u gösterimi yerine $\hat{u}$ 'nun seçilmesi, k anında girişin o andaki değerinden ziyade, $k+i$ anındaki değişiminle ilgili öngörüye sahip olduğunu gösterir. Ayrıca giriş değeri $u(k)$ 'nın ne seçileceğine karar verirken, çıkış değeri $y(k)$ 'nın bilindiği varsayılmaktadır. Bu göstermektedir ki $y(k)$ çıkış değeri o andaki giriş olan $u(k)$ ya değil, daha önceki giriş değerleri olan $u(k-1)$, $u(k-2)$,... girişlerine bağlıdır. Ayrıca öngörülen çıkışlar ile gerçek sistem çıkışının aynı veya benzer olabilmesi için seçilmiş olan içsel model ile gerçek sistemin birbirine çok benzemesi gerekmektedir.

En basit durumda, öngörü ufku boyunca $(k, k+1, \dots, k+H_p)$ seçilen giriş değerleri ile (sisteme uygulanan girişlerin olabildiğince az değişmesi istenir) sistemin çıkışının, referans yörüngesini takip ederek istenilen ayar noktasına ulaşması hedeflenmektedir. Şekil 2.2’de gösterildiği gibi, girişler öngörü ufku boyunca ilk üç adım için değiştirilmiş ardından sabit tutulmuştur. Yani giriş yörüngesi $\hat{u}(k|k)$, $\hat{u}(k+1|k), \dots, \hat{u}(k+H_u - 1|k)$ adımları için seçilecek ve diğer adımlarda $\hat{u}(k+H_u - 1|k) = \hat{u}(k+H_u|k) = \dots = \hat{u}(k+H_p - 1|k)$ sabit olacaktır. En basit çözüm için ilk üç teriminde sabit olması hedeflenebilir.

Giriş yörüngesi belirlendikten sonra, giriş sinyalinin ilk elemanı $u(k) = \hat{u}(k|k)$ sistem girişine uygulanır. İlk giriş sinyali sisteme uygulandıktan sonra tekrar bir ilk giriş sinyali olan $u(k+1) = \hat{u}(k+1|k+1)$ sinyalini elde etmek için en başından beri yapılan işlemler tekrar yapılır. $y(k+1)$ ifadesi bulunur; yeni bir referans yörüngesi $r(k+i|k+1)$ $i=2,3,\dots$ tanımlanır; $k+i+1$ ($i = 1,2,\dots,H_p$) öngörü ufku süresince öngörüler tamamlanır; yeni bir giriş yörüngesi $\hat{u}(k+1+i|k+1)$ ($i=2,3,\dots,H_p - 1$) belirlenir ve sonunda bir sonraki giriş değeri $u(k+1) = \hat{u}(k+1|k+1)$ sisteme uygulanır. Böylece öngörü ufkunun uzunluğu aynı kalarak her bir adım için öngörü ufku bir örnekleme süresi kaydırılmış olur, her bir örnekleme zamanı için yapılan işlemler tekrarlanarak, elde edilen giriş sinyali sistem girişine uygulanır. Bu kontrol tekniğine gerileyen ufuk yapısı denir [7].

2.2 Optimum Girişlerin Hesaplanması

En basit şekilde sadece bir tane çakışma noktası var olduğunda giriş yörüngesi tektir ve çözüm bir tanedir. Ancak daha yaygın olanı bir çok çakışma noktasının olması , hatta gerileyen ufuk yapısı boyunca tüm noktaların çakışması da mümkündür. Bu gibi durumlarda giriş yörüngesini eşitlik sayısının çok fazla olmasından dolayı tayin etmek ve çözmek neredeyse imkansızdır. Bunu ortadan kaldırabilmek için yaklaşık çözümlere ihtiyaç vardır. Çok yaygın kullanım metodlarından biri olan en iyi kareler yöntemi çakışma noktalarındaki hataların karelerinin toplamını alarak $\sum_{i \in P} [r(k+i|k) - \hat{y}(k+1|k)]^2$ işlem yapar. Burada P , çakışma noktalarının kümesidir.

Yine durumu en basit haliyle ele alalım ve tek çakışma noktası $k+H_p$ olsun ve seçilmesi gereken tek giriş değeri de $\hat{u}(k|k)$ olsun. Son giriş değerinin $u(k-1)$ ‘in

sabit kalması durumunda, içsel model yardımıyla çakışma noktalarında ki değerler sistemin serbest cevabı $\hat{y}_f(k + H_p|k)$ olarak tanımlanır ve bu yolla elde edilir. Elimizde tüm sistemin geçmişteki giriş değerlerinin ve basamak cevabının bulunduğu varsayalım. $S(H_p)$, sistem modeline birim basamak uygulanmasının ardından H_p adım sonra verdiği yanıttır. Buna göre $k + H_p$ anında ki öngörülü çıkış:

$$\hat{y}(k + H_p|k) = \hat{y}_f(k + H_p|k) + S(H_p)\Delta\hat{u}(k|k) \quad (2.4)$$

$$\Delta\hat{u}(k|k) = \hat{u}(k|k) - u(k - 1) \quad (2.5)$$

Üst tarafta verilen $\Delta\hat{u}(k|k)$ ifadesi öngörülü giriş işareti ile bir önceki bilinen giriş işareti arasındaki farktır. Yerine getirilmek istenen

$$\hat{y}(k + H_p|k) = r(k + H_p|k) \quad (2.6)$$

buna göre $\Delta\hat{u}(k|k)$ aşağıdaki gibi bulunur:

$$\Delta\hat{u}(k|k) = \frac{r(k + H_p|k) - \hat{y}_f(k + H_p|k)}{S(H_p)} \quad (2.7)$$

Birden fazla çakışma noktası olması durumunda ise yaklaşık çözümlere ihtiyaç vardır. c adet çakışma noktası olduğu düşünülürse, her bir çakışma noktasında ki referans yörüngesi değeri bulunur. Ardından öngörü yörüngesini bu referans noktalarına taşıyacak öngörülü giriş değerleri bulunmaya çalışılır. $i=1,2,...,c$, için $\hat{y}(k + P_i|k) = r(k + P_i|k)$ $i=1,2,...,c$, dir. Buna göre aşağıdaki eşitleri çözebilmek için $\hat{u}(k|k)$ ' nın seçilmesi lazımdır.

$$\begin{aligned} \hat{r}(k + P_1|k) &= \hat{y}_f(k + P_1|k) + S(P_1)\Delta\hat{u}(k|k) \\ \hat{r}(k + P_2|k) &= \hat{y}_f(k + P_2|k) + S(P_2)\Delta\hat{u}(k|k) \\ &\vdots \\ \hat{r}(k + P_c|k) &= \hat{y}_f(k + P_c|k) + S(P_c)\Delta\hat{u}(k|k) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Genellikle, bu eşitlikler, 'en küçük kareler' sistemi ile çözülür.

$$T = \begin{bmatrix} \hat{r}(k + P_1|k) \\ \hat{r}(k + P_2|k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k + P_c|k) \end{bmatrix} \quad y_f = \begin{bmatrix} \hat{y}_f(k + P_1|k) \\ \hat{y}_f(k + P_2|k) \\ \vdots \\ \hat{y}_f(k + P_c|k) \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} S(P_1) \\ S(P_2) \\ \vdots \\ S(P_c) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

Buna göre en doğru giriş değişimi denklem (2.10)' daki gösterimiyle hesaplanır.

$$\Delta \hat{u}(k|k) = S \backslash (T - y_f) \quad (2.10)$$

Şimdi ise farklı bir denklem olan daha karmaşık bir giriş yörüngesi olduğunu varsayalım. Girişin sondaki H_u adım boyunca değiştiğini ve H_u adım sonra sabit kaldığını düşünelim ($H_u < H_p$). Bu durumda aşağıdaki eşitlik ile $k + P_i$ anındaki öngörülen çıkış değeri bulunabilir:

$$\begin{aligned} \hat{y}(k + P_i|k) = & \hat{y}_f(k + P_i|k) + H(P_i)\hat{u}(k|k) + H(P_i - 1)\hat{u}(k + 1|k) + \\ & \cdots + H(P_i - H_u + 2)\hat{u}(k + H_u - 2|k) + \\ & + S(P_i - H_u + 1)\hat{u}(k + H_u - 1|k) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Burada $H(j)$ j adımındaki birim darbe cevabıdır ve $H(j) = S(j) - S(j-1)$ eşitliğine sahiptir.

$$\begin{aligned} \hat{y}(k + P_i|k) = & \hat{y}_f(k + P_i|k) + S(P_i)\Delta \hat{u}(k|k) + S(P_i - 1)\Delta \hat{u}(k + 1|k) \\ & + \cdots + S(P_i - H_u + 1)\Delta \hat{u}(k + H_u - 1|k) \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$y = y_f + \Theta \Delta u \quad (2.13)$$

$$y = \begin{bmatrix} \hat{y}(k + P_1|k) \\ \hat{y}(k + P_2|k) \\ \vdots \\ \hat{y}(k + P_c|k) \end{bmatrix} \quad \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta \hat{u}(k|k) \\ \Delta \hat{u}(k + 1|k) \\ \vdots \\ \Delta \hat{u}(k + H_u - 1|k) \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} S(P_1) & S(P_1 - 1) & \cdots & S(1) & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ S(P_2) & S(P_2 - 1) & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & S(1) & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S(P_c) & S(P_c - 1) & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & S(P_c - H_u + 1) \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$\Delta u = \Theta \backslash [T - y_f] \quad (2.16)$$

Sisteme uygulanacak $u(k)$ giriş değerinin bulunabilmesi için ΔU 'e ait ilk değer ile bilinen bir önceki giriş değeri toplanır ve yeni giriş $u(k)$ değeri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$u(k) = \Delta \hat{u}(k|k) + u(k-1) \quad (2.17)$$

Bir sonraki sistem çıktısı $y(k+1)$ 'in ölçülmesinin ardından bütün işlem adımları aynı şekilde yenilenir:

Görüldüğü üzere model öngörülü kontrol için ayrık zaman modeli şart değildir. Ancak pratikte, ayrık zaman doğrusal modeli sürekli zaman doğrusal modeline göre daha kullanışlı ve model oluşturma daha kolaydır [7].

2.3 Durum Uzay Modeli

Bir sistemin doğrusallaştırılmış, ayrık zamanlı durum uzay modeli aşağıdaki gibi verilebilmektedir. x , n boyutlu durum vektörü, u , l boyutlu giriş vektörü, y , m_y boyutlu hesaplanan çıkış vektörü, ve z ise m_z boyutlu kontrol edilen çıkışların vektörüdür. y ve z vektörlerindeki değişkenler uzun vadede üst üste gelmesiyle çoğunlukla aynı kabul edilecektir. Doğal olarak tüm kontrol edilen çıkışların ölçülerek hesaplandığı varsayılacaktır. Yani $y \equiv z$ olduğu düşünülecektir. C_y ve C_z matrisleri için ortak olarak C , m_y ve m_z için ortak olarak m gösterimi uygulanacaktır [7].

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k)$$

$$y(k) = C_y x(k) \quad (2.18)$$

$$z(k) = C_z x(k)$$

2.4 Öngörülü Kontrolün Basitçe Formülünün Çıkartılması

Öngörülü kontrolün basitçe formülünü elde etmek istediğimizde; sistem modelinin lineer, değer fonksiyonunun ikinci dereceden, kısıtlamaların lineer eşitsizlik ve

hepsinin zamanla değişmeyen sistemler olduğu varsayılır. Ayrıca değer fonksiyonun hiç bir zaman giriş vektörü $u(k)$ 'yı değil , giriş vektörünün değişimini ($\Delta u(k)$ 'yı) cezalandırdığı varsayılacaktır.

Değer fonksiyonu V 'nin amacı; öngörülen çıkışların $\hat{z}(k + 1|k)$ referans yörüngesinden $r(k + i|k)$ sapmasını cezalandırmaktır.

Değer fonksiyonu şu şekilde tanımlanır:

$$V(k) = \sum_{i=H_w}^{H_p} \|\hat{z}(k + i|k) - r(k + i|k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta \hat{u}(k + i|k)\|_{R(i)}^2 \quad (2.19)$$

Öngörü ufkunun H_p boyuta sahip olmasına karşın, z 'nin r ' den sapmasını derhal cezalandırmaya gerek yoktur ($H_w > 1$). Bunun nedeni girişin uygulanması ile etkisinin görülmesi arasında bir gecikme oluşudur. Burada H_u kontrol ufkudur. Tüm durumda $H_u \leq H_p$ olacağı düşünülecektir. Değer fonksiyonu V , hata vektörü $\hat{z}(k + i|k) - r(k + i|k)$ 'yi $H_w \leq i \leq H_p$ aralığındaki tüm noktada cezalandıracaktır. Bu durum öngörülü kontrolde oldukça yaygın kullanılan bir durumdur. $Q(i)=0$ yaparak hatayı sadece bir kaç çakışma noktası için cezalandırmakta mümkündür.

Öngörü ve kontrol ufukları H_p ve H_u , pencere parametresi H_w , ağırlık matrisleri $Q(i)$ ve $R(i)$, referans yörüngesi $r(k+i)$, kapalı çevrim sistem davranışını ve öngörülü kontrolü değiştiren faktörlerdir [7].

2.5 Kısıtlamalar

İkinci dereceden problemleri, kısıt değerleri elde edilen problemlerin çözümlenmesinde kullanacağız. Sonuçta tüm endüstriyel problem bazı kısıtlamaları ve kısıt değerleri vardır.

$vec(0)$ tüm elemanları sıfır olan sütun vektörünü göstermektedir. Ek olarak $vec(a,b,c)$ vektörü $[a, b, c]^T$ vektörünü gösterir. Kontrolü ve öngörü ufkunu üzerinde tutan kısıtlamalar aşağıda verildiği gibi açıklanmaktadır.

$$E \, vec(\Delta \hat{u}(k|k), \dots, (\Delta \hat{u}(k + H_u - 1|k) \leq vec(0) \quad (2.20)$$

$$F \text{ vec}(\hat{u}(k|k), \dots, (\hat{u}(k + H_u - 1|k) \leq \text{vec}(0) \quad (2.21)$$

$$G \text{ vec}(\hat{z}(k + H_w|k), \dots, (\hat{z}(k + H_p|k) \leq \text{vec}(0) \quad (2.22)$$

Burada denklem (2.20) aktüatörlere ait dönüş oranlarındaki kısıtları, denklem (2.21) aktüatörlere ait aralık kısıtlarını ve denklem (2.22) kontrol edilen değişkenlere ait kısıtları göstermektedir.

2.6 Öngörülü Kontrol Problemlerinin Çözümü

Kısıtsız öngörülü kontrol problemleri için değer fonksiyonu aşağıdaki gibidir:

$$V(k) = \sum_{i=H_w}^{H_p} \|\hat{z}(k + i|k) - r(k + i|k)\|_{Q(i)}^2 + \sum_{i=0}^{H_u-1} \|\Delta\hat{u}(k + i|k)\|_{R(i)}^2$$

Yukarıda verilen fonksiyon aşağıdaki gibi de yazılabilir:

$$V(k) = \|Z(k) - T(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 \quad (2.23)$$

$$Z(k) = \begin{bmatrix} \hat{z}(k + H_w|k) \\ \vdots \\ \hat{z}(k + H_p|k) \end{bmatrix} \quad (2.24)$$

$$T(k) = \begin{bmatrix} \hat{r}(k + H_w|k) \\ \vdots \\ \hat{r}(k + H_p|k) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

$$\Delta U(k) = \begin{bmatrix} \Delta\hat{u}(k|k) \\ \vdots \\ \Delta\hat{u}(k + H_u - 1|k) \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Ağırlık matrisleri Q ve R aşağıda verildiği gibi bulunabilirler:

$$Q = \begin{bmatrix} Q(H_w) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & Q(H_w + 1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & Q(H_p) \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

$$R = \begin{bmatrix} R(0) & 0 & \dots & 0 \\ 0 & R(1) & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & R(H_u - 1) \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Aynı zamanda $\mathcal{Y}$, Y ve Θ matrisleri için $Z(k)$, eşitlik (2.28) de gösterildiği gibi hesaplanır:

$$Z(k) = \mathcal{Y}x(k) + Yu(k-1) + \theta\Delta U(k) \quad (2.29)$$

$$\mathcal{Y} = \begin{bmatrix} C_z & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_z & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A \\ \vdots \\ A^{H_u} \\ A^{H_u+1} \\ \vdots \\ A^{H_p} \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$Y = \begin{bmatrix} C_z & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_z & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B \\ \sum_{i=0}^{H_u} A^i B \\ \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\theta = \begin{bmatrix} C_z & 0 & \dots & 0 \\ 0 & C_z & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & C_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B & \dots & 0 \\ AB + B & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_u-1} A^i B & \dots & B \\ \sum_{i=0}^{H_u} A^i B & \dots & AB + B \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \sum_{i=0}^{H_p-1} A^i B & \dots & \sum_{i=0}^{H_p-H_u} A^i B \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

Bu aşamada hata aşağıda verilen ifadedeki gibi tanımlanır:

$$\varepsilon(k) = T(k) - \mathcal{Y}x(k) - Yu(k-1) \quad (2.33)$$

Eğer hata $\varepsilon(k)=0$ olursa, $\Delta U(k) = 0$ almak doğru olur. Sonuç olarak $\Delta U(k) = 0$ olması durumunda:

$$\begin{aligned}
V(k) &= \|\theta \Delta U(k) - \varepsilon(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 \\
&= [\Delta U(k)^T \theta^T - \varepsilon(k)^T] Q [\theta \Delta U(k) - \varepsilon(k)] + \Delta U(k)^T R \Delta U(k) \\
&= \varepsilon(k)^T Q \varepsilon(k) - 2 \Delta U(k)^T \theta^T Q \varepsilon(k) + \Delta U(k)^T [\theta^T Q \theta + R] \Delta U(k)
\end{aligned} \tag{2.34}$$

Yukarıda verilen denklem aşağıdaki bir biçime sahiptir:

$$V(k) = \text{sabit} - \Delta U(k)^T G + \Delta U(k)^T H \Delta U(k) \tag{2.35}$$

$$G = 2 \theta^T Q \varepsilon(k) \tag{2.36}$$

$$H = \theta^T Q \theta + R \tag{2.37}$$

Bu denklemde görülen G ve H ifadelerinin hiçbirisi $\Delta U(k)$ ' ya bağlı değildir. En iyi $\Delta U(k)$ değerini belirlemek için, değer fonksiyonu olan $V(k)$ ' nın gradyanını alıp sıfıra eşitlemek gereklidir. Sonuç olarak en doğru gelecek giriş hareketleri kümesi eşitlik (2.38)' deki verilmiştir:

$$\Delta U(k)_{opt} = \frac{1}{2} H^{-1} G \tag{2.38}$$

Eğer sistemin girişlerinin sayısı l ise, $\Delta U(k)_{opt}$ ' un ilk l satırını uygulamak yeterlidir.

$$\Delta U(k)_{opt} = [I_l, 0_l, \dots, 0_l] \Delta U(k)_{opt} \tag{2.39}$$

Yukarıda verilen $I_l, l \times l$ boyutlu birim matris, 0_l ise $l \times l$ boyutlu sıfır matrisidir. Gerçekten denklem (2.39)'da bulduğumuz değer fonksiyonunun minimum olduğunu hesaplayabilmek için değer fonksiyonun $\Delta U(k)$ ' ya göre ikinci dereceden türevi alınır (Hessian matrisi) ve denklem (2.40) elde edilir.

$$\Delta \frac{d^2 V}{d \Delta U(k)^2} = 2H = 2 \theta^T Q \theta + R \tag{2.40}$$

Eğer $Q(i) \geq 0$ olduğunu varsayarsak $\theta^T Q \theta \geq 0$ olur ve $R > 0$ için Hessian matrisi pozitif tanımlı olur. Bu elde edilen $\Delta U(k)_{opt}$ nın minimum olduğunu garanti eder. Ancak bazen giriş işareti cezalandırılmak istenmez ve $R = 0$ seçilir. Bu durumda $R > 0$ değil $R \geq 0$ olur. $R = 0$ olduğunda gerçekten minimum

$\Delta U(k)_{opt}$ seçtiğimizden emin olabilmek için $\theta^T Q \theta > 0$ olmalıdır ve $R \geq 0$ için $\theta^T Q \theta + R \geq 0$ olmalıdır.

Eşitlik (2.39)' de gösterilen giriş hareketleri çözümü, hiç bir zaman H matrisinin tersi alıp oluşturulmamalıdır. Bunun nedeni, θ matrisinin çoğunlukla kötü karakterde (ill-conditioned) bulunmasına bağlı olarak H matrisinin de kötü karakterde (ill-conditioned) bulunmasındandır. Bu sebepten dolayı en iyi çözümü bulunurken dikkat edilmelidir.

Çözümü belirlemenin en doğru yöntemi, 'en küçük kareler' sistemini kullanmaktır. $Q \geq 0$ ve $R \geq 0$ olması nedeniyle bu iki matrisin karekökleri olan S_Q ve S_R matrisleri elde edilebilir. Eğer Q ve R köşegen matrisler ise matrislerin karekökleri kolaylıkla bulunabilir. Eğer köşegen matris değilse, pozitif tanımlı matrisler için Cholesky algoritması ve ya pozitif yarı tanımlı matrisler için tekil değer ayrışımı algoritması gibi algoritmalar ile bulunabilir.

$$S_Q^T S_Q = Q \quad S_R^T S_R = R \quad (2.41)$$

Sonuç olarak aşağıdaki vektör uygulanacak olursa:

$$\begin{bmatrix} S_Q \{\theta \Delta U(k) - \varepsilon(k)\} \\ S_R \Delta U(k) \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

Yukarıda verilen elemanların karelerinin toplamının veya vektörün uzunluğunun karesinin toplamının değer fonksiyonu $V(k)$ ' ye eşit olacağı ve $\Delta U(k)_{opt}$ ' un $\Delta U(k)$ ' yi en aza indirgeyen değer olduğu gösterilmelidir.

$$\begin{aligned} \left\| \begin{bmatrix} S_Q \{\theta \Delta U(k) - \varepsilon(k)\} \\ S_R \Delta U(k) \end{bmatrix} \right\|^2 &= \left\| \begin{bmatrix} S_Q \{Z(k) - T(k)\} \\ S_R \Delta U(k) \end{bmatrix} \right\|^2 \\ &= [Z(k) - T(k)]^T S_R^T S_Q [Z(k) - T(k)] + \Delta U(k)^T S_R^T S_R \Delta U(k) \\ &= \|Z(k) - T(k)\|_Q^2 + \|\Delta U(k)\|_R^2 \\ &= V(k) \end{aligned} \quad (2.43)$$

Yukarıda verildiği üzere $\Delta U(k)_{opt}$ eşitlik (2.44)' ün 'en küçük kareler' çözümüdür.

$$\left\| \begin{bmatrix} S_Q \{\theta \Delta U(k) - \varepsilon(k)\} \\ S_R \Delta U(k) \end{bmatrix} \right\| = 0 \quad (2.44)$$

Eşitlik (2.43) aşağıdaki biçimde de yazılabilir:

$$\begin{bmatrix} S_Q \theta \\ S_R \end{bmatrix} \Delta U(k) = \begin{bmatrix} S_Q \varepsilon(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

En iyi çözüm $\Delta U(k)_{opt}$ aşağıda verildiği gibi hesaplanır:

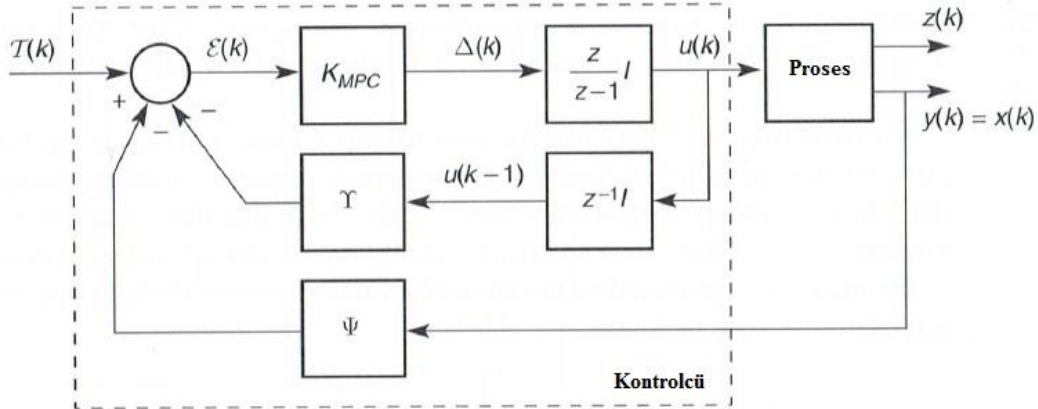
$$\Delta U(k)_{opt} = \begin{bmatrix} S_Q \theta \\ S_R \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} S_Q \varepsilon(k) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Yukarıdaki gibi gösterilen denklemin tek çözümü olması için, $S_Q \theta$ matrisinin tekil olmayan ve kare matris olması gerekir. Genel bir çözüm elde edebilmek için (2.39) ve (2.33) numaralı eşitlikleri göz önüne almak gerekir:

$$\Delta U(k)_{opt} = [I_l, 0_l, \dots, 0_l] H^{-1} \theta^T Q \varepsilon(k)$$

$$\varepsilon(k) = T(k) - \Upsilon x(k) - Y u(k-1)$$

Yukarıda verilen çözümün bütün adımlarında tek değişken eleman ‘izleme hatası’ $\varepsilon(k)$ ’ dir. Kısıtlamasız durum için öngörülü kontrolcü Şekil 2.3 gibi olacaktır.



Şekil 2.3 : Kısıtlamasız durumlar için model öngörülü kontrolcü [7].

Eğer K_{MPC} değişkeni aşağıda verildiği üzere ifade edilirse:

$$K_{MPC} = [I_l, 0_l, \dots, 0_l] H^{-1} \theta^T Q \quad (2.47)$$

$$K_{full} = \begin{bmatrix} S_Q \theta \\ S_R \end{bmatrix} \setminus \begin{bmatrix} S_Q \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.48)$$

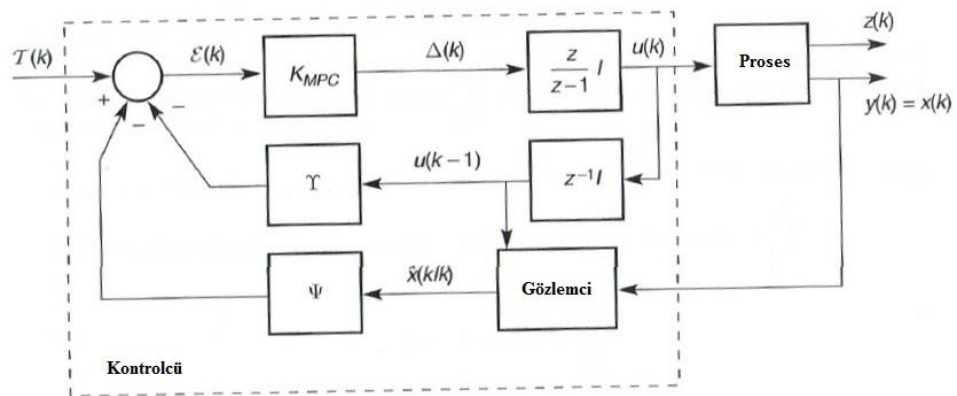
K_s ile K_{MPC} arasındaki ilişki aşağıda verildiği üzere bulunabilir:

$$K_s = K_{MPC} \begin{bmatrix} I \\ I \\ \vdots \\ I \end{bmatrix}, -\Psi, -Y \quad (2.49)$$

$$\Delta u(k)_{opt} = K_s \begin{bmatrix} T(k) \\ x(k) \\ u(k-1) \end{bmatrix} \quad (2.50)$$

Denklem (2.49)'daki K_s ; K_{MPC} 'e bağlı olarak Matlab programına ait Model Predictive Control araç çubuğuna ait `mpccon` fonksiyonu yardımı ile bulunabilir.

Daha gerçekçi olursak ve tüm durum vektörlerini hesaplayamadığımızı düşünürsek, bu durumda Şekil 2.4'te görüldüğü gibi bir gözlemci kullanmak gerekir. Tüm kazanç matrisleri Şekil 2.3'te olduğu gibi aynı kalacaktır. Burada meydana gelen tek değişiklik ölçülen durum değeri $x(k)$ yerine, tahmini durum değeri $\hat{x}(k|k)$ 'nin uygulanmasıdır. Yine zamandan bağımsız bir sistem elde edilir ancak gözlemciden dolayı daha karmaşık dinamiğe sahip bir sistem meydana gelir. Burada $Z(k)$ ve $\varepsilon(k)$ sırasıyla denklem (2.51) ve (2.52) deki gibi elde edilir [7].



Şekil 2.4 : Gözlemciye sahip model öngörülü kontrolcü [7].

$$Z(k) = \Psi \hat{x}(k|k) + Yu(k-1) + \theta \Delta U(k) \quad (2.51)$$

$$\varepsilon(k) = T(k) - \Psi \hat{x}(k|k) - Yu(k-1) \quad (2.52)$$

2.7 Kısıtlanmış MPC Problemlerinin İkinci Dereceden Programlama Şeklinde Tanımlanması

(2.20) , (2.21) ve (2.22) denklemlerini tekrar düzenleyecek olursak;

$$E \begin{bmatrix} \Delta U(k) \\ 1 \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2.53)$$

$$F \begin{bmatrix} U(k) \\ 1 \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2.54)$$

$$G \begin{bmatrix} Z(k) \\ 1 \end{bmatrix} \leq 0 \quad (2.55)$$

Burada $U(k) = [\hat{u}(k|k)^T, \dots, \hat{u}(k+H_u-1|k)^T]^T$ biçiminde yazılabilir. Ayrıca $\Delta U(k)$ da $U(k)$ 'ya benzer olarak yazılabilir ve aynı zamanda $\Delta U(k)$ ya ait tüm kısıt değerlerinin tanımlanması lazımdır.

$$F = [F_1, F_2, \dots, F_{H_u}, f] \quad (2.56)$$

Her F_i $q \times m$ boyutunda ve f $q \times 1$ boyutundadır. Denklem şu şekile dönüştürülür.

$$\sum_{i=1}^{H_u} F_i \hat{u}(k+i-1|k) + f \leq 0 \quad (2.57)$$

$$\hat{u}(k+i-1|k) = u(k-1) + \sum_{j=0}^{i-1} \Delta \hat{u}(k+j|k) \quad (2.58)$$

Ve denklemin yeni hali ile aşağıdaki gösterimi verilmiştir.

$$\begin{aligned}
& \sum_{j=1}^{H_u} F_j \Delta \hat{u}(k|k) + \sum_{j=2}^{H_u} F_j \Delta \hat{u}(k+1|k) + \dots + F_{H_u} \Delta \hat{u}(k+H_u-1|k) \\
& + \sum_{j=1}^{H_u} F_j u(k-1) + f \leq 0
\end{aligned} \tag{2.59}$$

F ifadesini tekrar tanımlayacak olursak

$$F \Delta U(k) \leq -F_1 u(k-1) - f \tag{2.60}$$

ifadesi oluşturulur ve eşitsizliğin sağ bölümü k 'ya bağlı bir vektördür. Böylece $\Delta U(k)$ 'ya ait lineer eşitsizlik kısıtları belirlenmiş olur. Eğer (2.60) denklemindeki gibi basit aralıklı sınırlar varsa, denklem daha basit bir hale dönüşür.

$$u_{low}(k+i) \leq \hat{u}(k+i|k) \leq u_{high}(k+i) \tag{2.61}$$

(2.55)'deki denkleme benzer işlemler uygularsak ve $Z(k)$ 'nin yerine (2.29) 'daki denklemle değiştirirsek

$$G \begin{bmatrix} \Psi x(k) + Yu(k-1) + \theta \Delta U(k) \\ 1 \end{bmatrix} \leq 0 \tag{2.62}$$

sonucuna ulaşırız ve $G = [\Gamma, g]$ yazılırsa ; (g G nin son sütun elemanıdır).

$$\Gamma \theta \Delta U(k) \leq -\Gamma [\Psi x(k) + Yu(k-1)] - g \tag{2.63}$$

Denklem (2.63)'ü elde ederiz. Denklem (2.53)'e yukarıda gösterildiği gibi aynı işlemleri uygularsak, aşağıda verilen denklem (2.64)'ü elde etmiş oluruz.

$$W \Delta U(k) \leq w \tag{2.64}$$

(2.60) , (2.62) ve (2.64) denklemlerinden faydalanarak aşağıda verilen genel denklem (2.62)'ye ulaşılır.

$$\begin{bmatrix} F \\ \Gamma \theta \\ W \end{bmatrix} \Delta U(k) \leq \begin{bmatrix} -F_1 u(k-1) - f \\ -\Gamma [\Psi x(k) + Yu(k-1)] - g \\ w \end{bmatrix} \tag{2.65}$$

Eğer gözlemci kullanılıyorsa $x(k)$ 'nin bulunduğu yere $\hat{x}(k|k)$ uygulanmalıdır. Kısıtsız durumdaki gibi kısıtlı durum için de değer fonksiyonumuz $V(k)$ 'yı en aza

indirgeme işlemini uygulamalıyız. Aşağıda verilen işlem çözülerek kısıtlı optimizasyon problemi çözülmüş olur.

$$\text{minimum } \Delta U(k)^T H \Delta U(k) \leq -G^T \Delta U(k) \quad (2.66)$$

İkinci dereceden programlama diye bilinen standart optimizasyon problemini çözebilmemiz için denklemini aşağıdaki formata getirmeliyiz.

$$\min_{\theta} \frac{1}{2} \theta^T \phi \theta + \phi^T \theta ; \Omega \theta \leq w \quad (2.67)$$

2.8 Lineer Programlama ve İkinci Dereceden Programlama Problemlerinin Karakteristikleri

$\hat{u}(k + i|k)$, $\Delta \hat{u}(k + i|k)$ ve $\hat{z}(k + i|k)$ kısıtlamalarına sahip değer fonksiyonu $V(t)$ ‘yi aşağıdaki gibi tüm hata değerleri için cezalandıracak şekilde güncellemek mümkündür.

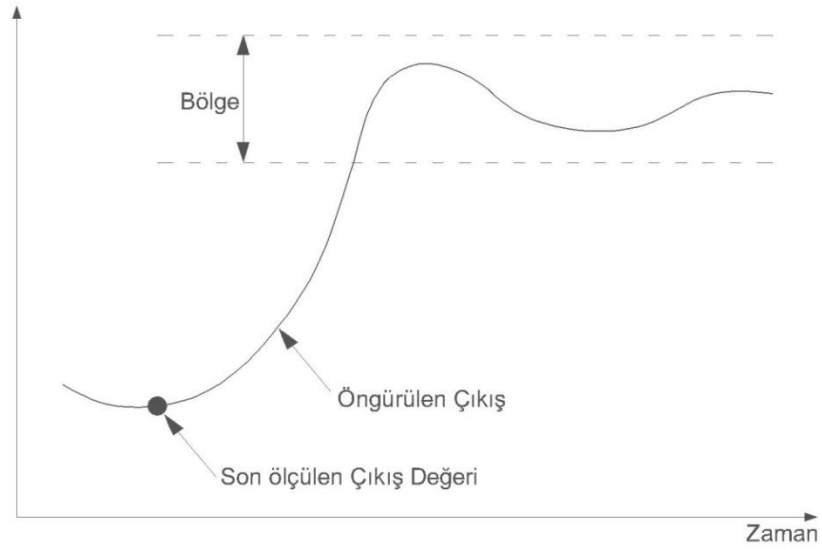
$$V(k) = \sum_{i=1}^{H_p} \sum_{j=1}^m |\hat{z}_j(k + i|k) - r_j(k + i)| q_j \quad (2.68)$$

q_j negatif olmayan ağırlıklardır. Lineer programlama problemleri yapıları gereği ikinci dereceden programlama problemlerine göre yazılımlar tarafından daha hızlı çözülmektedir. Ayrıca lineer programlamanın çözümleri her zaman kısıt değerlerinin kesişim noktalarındadır. Kuadratik programlama çözümlerinde ise, kısıtlarda nadiren de olsa kısıt değerlerinin kesişim noktalarında çözüme ulaşılamayabilir.

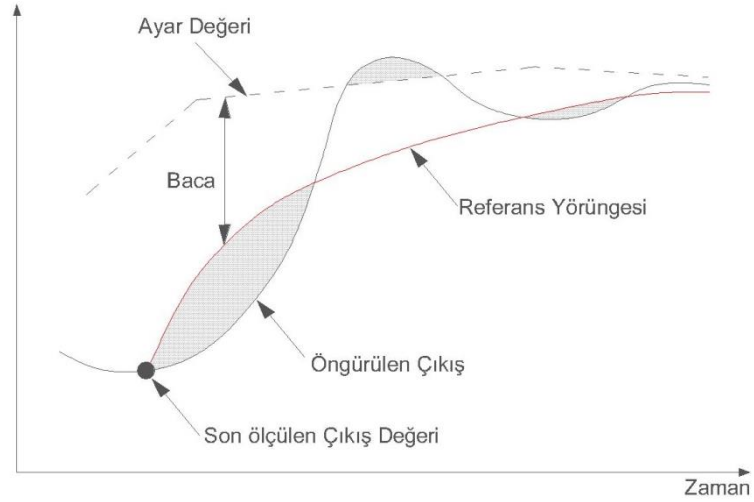
2.9 Bölge Ve Huni Terimleri

Daha önce de bahsedildiği gibi kontrol edilen sistemin belli bir ayar yörüngesinde ilerlemesi istenir. Ancak bazı uygulamalarda kontrol edilen çıkışların sabit bir ayar yörüngesini değil, alt ve üst sınırlar ile tanımlanmış bir bölge ayar yörüngesinde ilerlemesi istenir. Bölge tanımı Şekil 2.3 ‘te gösterilmektedir. Böylelikle $Q(i) = 0$ yapma işlemi daha kolay olacaktır ve kısıtlamaların sadece kontrol edilen çıkış değerine indirgenmesi sağlanacaktır. Eğer bütün değerler belirlenmiş bölgeler

içerisindeyse, optimizasyon probleminin ikinci dereceden değil birinci dereceden tanımlanmasında hiç bir sakınca yoktur [7].



Şekil 2.5 : Bölge terimi [7].



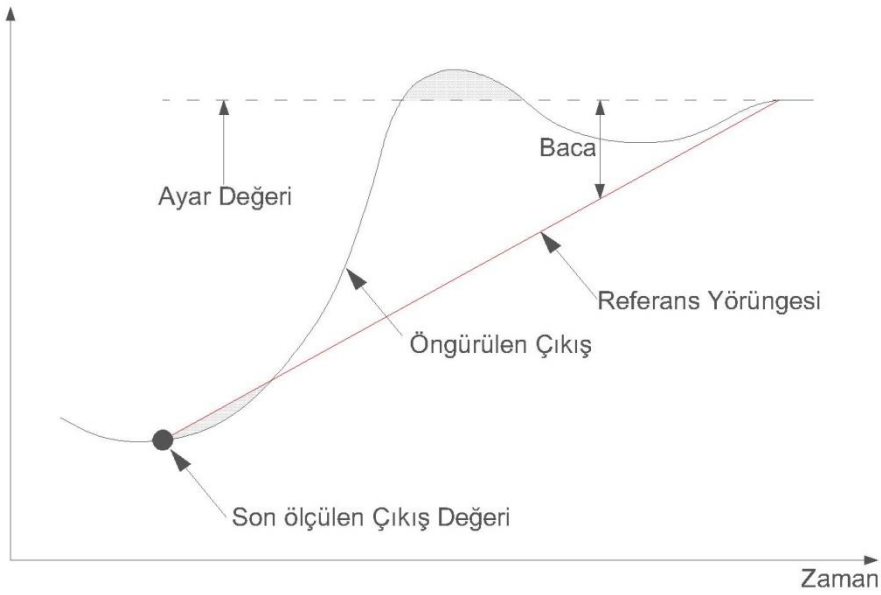
Şekil 2.6 : Huni terimi [7].

Diğer bir yaklaşım da huni modelidir. Bu da yine bölge modeline benzemektedir. Ancak huni modelinde Şekil 2.4 'te olduğu gibi bölge yapısının öngörü ufku boyunca azalması beklenir ve kontrol edilen çıkışların referans yörüngesini değil, referans bölgesini takip etmesi istenir. Huni yapısı ile bir referans bölgesi tanımlanmış olur.

Şekil 2.4'ten görüleceği üzere, öngörülen çıkış değeri huni teriminin dışına çıktığında cezalandırılmaktadır. Burada ana hedef öngörülen çıkışın huni sınırları içerisinde hareket ederek ayar değerine ulaşmasıdır. Bu şekildeki kontrol işleminin avantajı ise; örneğin referans yörüngesinin üzerinde hareket eden bir çıkış değerimiz

olduğunda onu tekrar referans değerine düşürmek yerine, onu ayar değerine yaklaştırmayı hedeflemiş oluruz.

Honeywell RMPCT ürününde ise referans yörüngesi Şekil 2.5’ te görüldüğü üzere düz bir çizgi gibi modellenmiş ve huni teriminin sınırlarını daraltarak kontrol işlemini gerçekleştirmeyi hedeflemiştir.



Şekil 2.7 : Doğrusal Referans Yörüngesi ve Huni Terimi [7].

2.10 Birinci Dereceden Sistemler İçin Birim Basamak Cevabı

Bir kontrol sistemini oluşturan sistemlerin en basit biçimi birinci dereceden sistemlerdir. İnceleyeceğimiz sistemin giriş işareti $u(t)$, çıkış işareti $y(t)$ olmak üzere $a, b, x, y, u \in R$ için

$$\begin{aligned} \dot{x} &= -ax + bu \\ y &= x \end{aligned} \quad (2.69)$$

Denklem (2.69) ile verilen diferansiyel denklemde başlangıç $x(0)=0$ varsayılarak Laplace dönüşümü alındığında

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{b}{s + a} \quad (2.70)$$

Denklem (2.70) ile verilen transfer fonksiyonu elde edilir. Yukarıdaki ifadelerle betimlenen sistemler birinci dereceden sistemlerdir.

$u(t)=1(t)$ ise $U(s) = \frac{1}{s}$ olacaktır. O halde $Y(s) = \frac{b}{s(s+a)}$ elde edilecektir. Çıkış ifadesi aşağıdaki gibi tekrar yazılabilir.

$$Y(s) = \frac{b}{a} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s+a} \right) \quad (2.71)$$

İfadenin ters Laplace dönüşümü alınır

$$y(t) = \frac{b}{a} (1 - e^{-at})1(t) \quad (2.72)$$

elde edilecektir.

Eşitlik (2.72) ile verilen cevabın zaman sabiti $\tau := \frac{1}{a}$ olarak tanımlanabilir. O halde cevabın zaman sabiti cinsinden son değere yaklaşmasını Çizelge 2.1 'deki gibi açıklayabiliriz [8].

Çizelge 2.1 : Sistem cevabının $t = n\tau$ anlarındaki yüzde değerleri .

Oran	$t = 0$	$t = \tau$	$t = 2\tau$	$t = 3\tau$	$t = 4\tau$	$t = 5\tau$
$\% \frac{y(t)}{y(\infty)}$	%0	%63.21	%86.47	%95.02	%98.17	%99.33

2.11 İkinci Dereceden Sistemler İçin Birim Basamak Cevabı

İkinci dereceden bir sisteme ait transfer fonksiyonu denklem (2.73) de verilmektedir.

$$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \left(\frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \right) \quad (2.73)$$

Bu gösterimde w_n değişkeni doğal salınım frekansını, ζ değişkeni ise sönüm oranını temsil eden pozitif değerli değişkenlerdir. Bu değişkenlerin farklı değerleri nitelik olarak farklı cevap türlerinin ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir.

$H(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \left(\frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \right)$ ile verilen transfer fonksiyonuna birim basamak girişin uygulanması ile (2.74) 'deki çıkış elde edilir.

$$Y(s) = \left(\frac{w_n^2}{s(s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2)} \right) \quad (2.74)$$

Bu ifadenin ters laplace dönüşümü sönüm oranını belirleyen ζ değişkenin üç farklı durumu için incelenecektir. Bu inceleme sırasında sönümlü doğal salınım frekansını $w_d = w_n \sqrt{1 - \zeta^2}$ olarak tanımlanacaktır.

$0 < \zeta < 1$ durumu için eksik sönümlü durum denir ve bu şartlar için çıkış değişkeni şöyle düzenlenebilir.

$$Y(s) = \frac{1}{s} - \frac{s + \zeta w_n}{(s + \zeta w_n)^2 + w_d^2} - \frac{\zeta w_n}{(s + \zeta w_n)^2 + w_d^2} \quad (2.75)$$

Yukarıdaki ifadenin ters Laplace dönüşümü alınarak

$$y(t) = 1 - \frac{e^{-\zeta w_n t}}{\sqrt{1 - \zeta^2}} \sin \left(w_d t + \arctan \left(\frac{\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta} \right) \right) 1(t) \quad (2.76)$$

elde edilir. İfadeye göre $0 < \zeta < 1$ koşulu sağlanıyorsa ikinci dereceden bir sistemin birim basamak cevabı yakınsak salınımlar içerir ve bu salınımların frekansı sönümlü doğal salınım frekansı olan w_d rad/s değerine eşittir.

$\zeta = 1$ durumu için kritik sönümlü durum denir ve kritik sönümlü bir sisteme birim basamak girdisi uygulandığında sistemin cevabı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$Y(s) = \frac{w_n^2}{s(s + w_n)^2} = \frac{1}{s} - \frac{1}{s + w_n} - \frac{w_n}{(s + w_n)^2} \quad (2.77)$$

Bu açılımdaki her bir terim için ters Laplace dönüşüm alınırsa

$$y(t) = 1(t) - e^{w_n t} (1 + w_n t) 1(t) \quad (2.78)$$

elde edilecektir.

$\zeta > 1$ durumu sağlayan sistemlere aşırı sönümlü sistemler denir. Bu hal için

$$H(s) = \frac{w_n^2}{s^2 + 2\zeta w_n s + w_n^2} \text{ transfer fonksiyonunun payda polinomunun diskriminantı}$$

pozitif olduğu için bu sistemin birbirinden farklı iki adet gerçel kutbu vardır ve birim basamak cevabı (2.79)'daki gibidir.

$$Y(s) = \frac{1}{s} + \frac{w_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left(\frac{\frac{1}{s_2}}{s - s_2} - \frac{\frac{1}{s_1}}{s - s_1} \right) \quad (2.79)$$

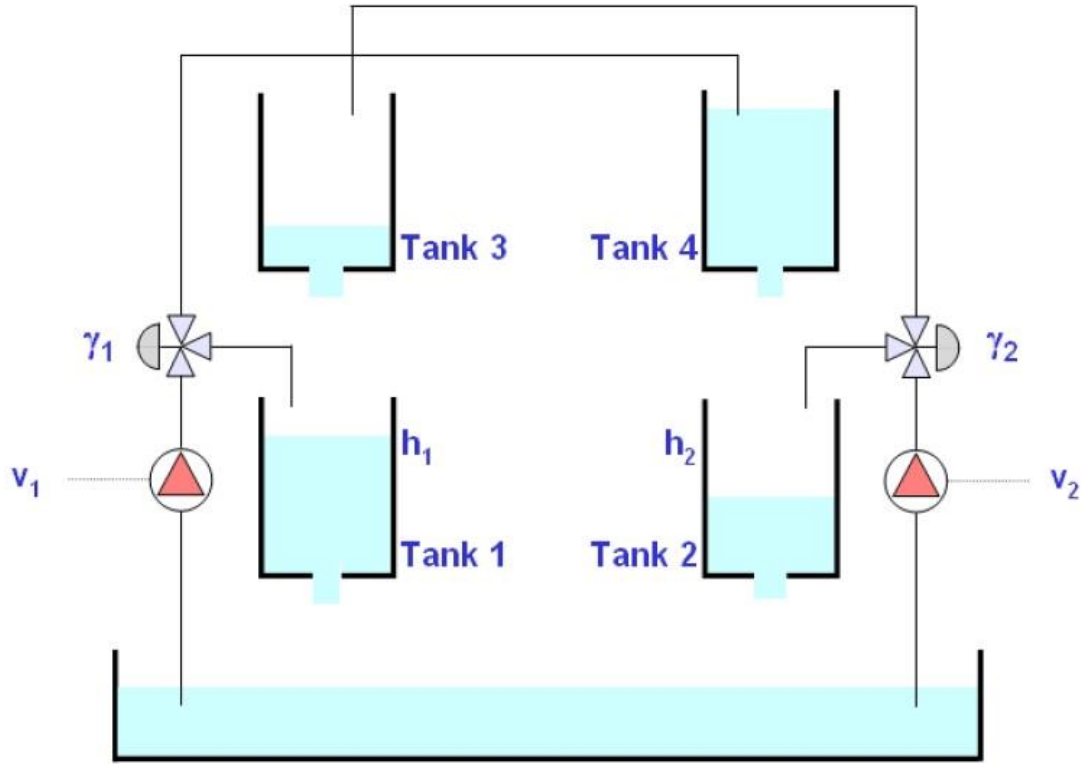
Bu ifadenin ters Laplace dönüşümü alınarak aşağıdaki cevap elde edilmiş olur [8].

$$y(t) = 1(t) + \frac{w_n}{2\sqrt{\zeta^2 - 1}} \left(\frac{e^{s_2 t}}{s_2} - \frac{e^{s_1 t}}{s_1} \right) 1(t) \quad (2.80)$$

2.12 Dörtlü Tank Sistemi ve Modellenmesi

Dörtlü tank sistemi bir çok proses kontrol laboratuvarında yer alan çift tank kontrol proses düzeneğinden iki tanesinin basitçe bağlanmasıyla oluşturulmuş bir deney setidir. Kurulumunun oldukça basit olmasına karşın oldukça ilgi çekici bir şekilde çok değişkenli sistem kavramını resmetmektedir [5].

Şekli 2.8' de görüldüğü gibi sistem dört adet tank, iki adet üç yönlü vana ve iki adet pompadan oluşmaktadır. Kontrol edilmek istenilen alt tanklara ait seviye bilgileri h_1 ve h_2 ifadeleri ile tanımlanmıştır. V_1 , V_2 ifadeleri pompaların gerilim bilgilerini ve γ_1 , γ_2 ifadeleri vanaların açıklık oranlarını göstermektedir. Alt tanka giren ve çıkan akış bilgileri ise sisteme ait bozuculardır.



Şekil 2.8 : Dörtlü Tank Sistemi [5].

Kütle korunumu ve Bernoulli yasasından yararlanarak sisteme ait denklemler aşağıdaki şekilde elde edilir [9].

$$\begin{aligned}
 \frac{dh_1}{dt} &= -\frac{a_1}{A_1} \sqrt{2gh_1} + \frac{a_3}{A_1} \sqrt{2gh_3} + \frac{\gamma_1 k_1}{A_1} V_1 \\
 \frac{dh_2}{dt} &= -\frac{a_2}{A_2} \sqrt{2gh_2} + \frac{a_4}{A_2} \sqrt{2gh_4} + \frac{\gamma_2 k_2}{A_2} V_2 \\
 \frac{dh_3}{dt} &= -\frac{a_3}{A_3} \sqrt{2gh_3} + \frac{(1 - \gamma_2) k_2}{A_3} V_2 \\
 \frac{dh_4}{dt} &= -\frac{a_4}{A_4} \sqrt{2gh_4} + \frac{(1 - \gamma_1) k_1}{A_4} V_1
 \end{aligned} \tag{2.81}$$

Burada;

A_i , i inci tankın kesit alanını;

a_i , i inci tankın çıkış deliği kesit alanını;

h_i , i inci tankın yüksekliğini;

g , yer çekim ivmesini;

γ_i , Vana açıklık oranını (Tank 1 ve 2 ye γ_1, γ_2 şeklinde ve Tank 3 ve 4 için $(1 - \gamma_1)$, $(1 - \gamma_2)$ şeklinde tanımlanır;

V_i , Motora gönderilen gerilim bilgisi;

şeklinde tanımlanmıştır.

Bu proses her iki pompanın birbirilerinin çıkışlarını etkilediği için çok değişkenli bir yapıya sahiptir. Dört tanklı prosesin lineerleştirilmiş modeli çok değişkenli sıfırlara sahiptir ve bu sıfırlar vanaların pozisyonuna göre sağ ve ya sol yarı düzlemde olabilmektedir. $0 > \gamma_1 + \gamma_2 > 1$ olması durumunda sistem non-minimum fazlı, $1 > \gamma_1 + \gamma_2 > 2$ olduğu durumda ise minimum fazlı özelliği göstermektedir. Vanaların durumları çok değişkenli kontrol bakışı açısından sisteme tamamen farklı davranışlar katmaktadır. Üst tanklardan alt tanka giren girişler ve alt tanktan çıkan çıkışlar sisteme ölçülemeyen bozucular eklemektedir [5].

Alttaki tanklara olan akış, üstteki tanklara olan akıştan daha büyükse, $\gamma_1 + \gamma_2 > 1$ olursa, sistem minimum fazlıdır. Eğer sistem non-minimum fazlı ise, alttaki tanklara olan akış, üstteki tanklara olan akıştan daha küçüktür. Eğer akış direk olarak alttaki tanklara gider ise, öngörüselsel olarak V_1 ile h_1 'i ve V_2 ile de h_2 'i kontrol etmek daha kolaydır.

Sol tanklara (Tank 1 ve 3) giden toplam akış eğer sağ tanklara (Tank 2 ve 4) giden akışa eşit olur ise kontrol problemi daha da zorlaşır çünkü bu durum da $\gamma_1 + \gamma_2 = 1$ e karşılık gelir. Burada modelin sıfır noktası ve dörtlü tank sistemi kontrolünün fiziksel sezgisi arasında böylece doğrudan bir bağlantı vardır [10].

3. ENDÜSTRİDE KULLANILAN BAZI MODEL ÖNGÖRÜLÜ KONTROL TEKNOLOJİLERİ

Kontrol teknolojilerindeki hızlı gelişmeler tüm kontrol disiplin alanlarında geniş çaplı bir etkiye sahiptir. Yeni teoriler, yeni kontrolcüler, aktüatörler, sensörler, yeni endüstri alanları, yeni bilgisayar metodları, yeni uygulamalar, yeni filozofiler gibi. Bu gibi gelişmeler araştırmacılara endüstriyel kontrol alanında daha geniş, hızla yayılan ve daha gelişmiş yeni araştırma konuları sunmaktadır.

Günümüz kontrol yazılımı ve teknolojileri daha gelişmiş kontrol algoritmalarını sunabilmektedir ancak endüstri mühendisleri basit kontrolcüler ile yapılabilen dayanıklı ve şeffaf proses yapılarını tercih etmektedirler. Bu yüzdendir ki kontrol teorisinde çok geniş ve gelişmiş yapılar olmasına rağmen PID kontrol yapısı endüstri alanında en çok kullanılan kontrol tekniği olmaya devam etmektedir. Ancak bu yaklaşım iyi proses performansları üzerinde limitlere sahiptir. Model öngörülü kontrol metodu ise proses kontrol yapısına farklı seviyelerde müdahale edebilir ve proses kontrolüne ait kısıtlamalara geniş bir yelpazede ele alabilir. Bu sebeplerden dolayı MPC endüstriyel proses uygulamalarında gelişmiş kontrol teknolojilerinden en popüler olanıdır.

MPC gerileyen ufuk yapısı ile birlikte 1960lı yılların sonlarına doğru endüstride kullanılmak için öngörülü fonksiyon kontrol tekniği olarak geliştirilmiştir. Gerileyen ufuk yapısının durum uzay modeli ile birlikte literatürde yer alması ise 1970li yıllarda meydana gelmiştir. Daha sonra 1980lerde dinamik matris kontrolü (DMC) ve ilerleyen yıllarda ise genelleştirilmiş öngörülü kontrol (GPC) tekniği geliştirilmiştir [11].

Model öngörülü kontrol teknolojisini kullanıp geliştiren bir çok şirket bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şirket isimleri ve teknolojileri ile aşağıda yer almaktadır.

- DMC Corp. : Dynamic Matrix Control (DMC)
- Adersa : Identification and Command (IDCOM), Hierarchical Constraint Control (HEICON) and Predictive Function Control (PFC)
- Honeywell Profimatics : Robust Model Predictive Control Technology (RMPCT) and Predictive Control Technology (PCT)

- Setpoint Inc. : Setpoint Multivariable Control Architecture (SMCA) and IDCOM-M (multivariable)
- Treiber Controls : Optimum Predictive Control (OPC)
- SCAP Europa : Adaptive Predictive Control System (APCS)

Bu ürünler model öngörülü kontrole farklı açılardan yaklaşmış ve model öngörülü kontrole ek paketler ekleyerek, model öngörülü kontrolü farklı amaç ve farklı sahalarda kullanıma uygun hale getirmişlerdir.

Qin ve Badgwell'in 1997 yılında yapmış oldukları anket sonuçlarına göre o güne kadar 2200'ü aşkın sayıda model öngörülü kontrol uygulaması yapılmış ve sayılarının hızla arttığı tespit edilmiştir. Rapor göstermektedir ki bu uygulamaların %67 si arıtma ve damıtma uygulamalarıydı. Petrokimya ve kimya sektöründe model öngörülü kontrolün bir çok uygulaması bulunmaktadır. Önemli gelişme gösteren uygulama sahaları ise kağıt hamuru ve kağıt, yiyecek sektörü, uçak ve otomotiv endüstrileridir.

Muske ve Rawlings'in belirttiği gibi mevcut endüstriyel MPC teknolojisi bazı limitlere sahiptir. Bunlardan en seçkin olanları;

- Fazla Parametrelili Modeller : Bir çok ticari ürün model tanımlama yapabilmek için çok parametrelili proseslere darbe ve basamak fonksiyonlarının cevaplarını kullanmaktadır. Örneğin birinci dereceden bir prosesin transfer fonksiyonunu tanımlamak için 3 parametre (katsayı, zaman sabiti ve ölü zaman) yeterli olur iken, basamak fonksiyonu ile model tanımlama yaparken 30'dan fazla parametreye ihtiyaç duyulur. Ayrıca basamak fonksiyonu ile tanımlanan model kararsız prosesler için uygun olmayacaktır.
- Ayarlama : Proseslerin kapalı çevrim davranışlarını kestirmek tam olarak mümkün değildir. Bir de ayar parametreleri sınırlı olması işleri daha da zorlaştırmaktadır ve ayar parametreleri ile kapalı çevrim kararlılığını garanti etmek hiçte kolay olmaz.
- Dinamik Alt Eniyilemeler : Bazı endüstriyel çözümler alt eniyilemeler yaparak çözüm sürecini hızlandırır. Yüksek hızlı uygulamalarda problemin çözümü her örnekleme süresi için uygulanamayabilir. Bundan dolayı alt eniyilemeler yapılır ve alt eniyileme çözümleri her zaman eniyileme çözümlerine yakındır.

- Model Belirsizliği : Model tanımlama paketleri model belirsizliğini tahmin etmelerine karşın sadece RMPCT teknolojisi kontrol dizaynında bu bilgiyi kullanır. Performans ve dayanıklılık arasındaki ilişki tam olarak anlaşılamamasına rağmen diğer kontrolcülerin dayanıklılığı arttırıldığında ayarları bozulmaktadır.
- Sabit Bozucu Varsayımı : Elbette en makul varsayım bozucu sinyalin ilerki zamanlarda da devam edeceğini kabul etmektir. Ancak daha iyi geri besleme bilgileri ile bozucu sinyal dağılımları karakterize edilebilir.
- Analiz : MPC'nin sonlu ufuk formülündeki durum ve dayanıklılığı düzenli ve sistematik analizi mümkün değildir. Zaman içinde değişen kontrol kuralı ile standart kapalı çevrim formu temsil edilemez, özellikle de sınırlamalar mevcut ise.

Teknoloji gelişmeye devam etmekte ve gelecek nesillerde model tanımlama, belirsiz bozucu sinyal tahmini, model hatasının sistematik iyileştirmesi, lineer olmayan model öngörülü kontrolcü tasarımı gibi sorunlarla yüzleşmeye devam edecektir [6].

3.1 Dayanıklı Çok Değişkenli Model Öngörülü Kontrol (RMPCT)

RMPCT: Dayanıklı Çok Değişkenli Öngörülü Kontrol Teknolojisi adıyla Honeywell tarafından geliştirilen bir kontrol sistemidir.

RMPCT'nin ayırt edici özelliği özel ayar noktalarının yerine tanımlanmış bölgeler dahilindeki sistem çıkışlarını kontrol etme amacıyla 2.7'inci bölümde anlatılan 'bölge' ve 'huni' konseptini kullanmasıdır. Her sistem çıkışını alt ve üst limitler ile belirlenmiş olan bölgede ve aralıkta tutmayı hedefler. Çıktının değeri bu aralıkta olduğu sürece, hiçbir şekilde cezalandırılmaz. Bir çıktı doğrusal olarak belirlenmiş referans yörüngesinin dışına çıkarsa ,çıkış değeri değişerek izin verilen bölgeye ait en yakın kenara ulaşılmaya çalışılır.Çıkış değişkeninin hedef bölgeye bu yörüngeyi takip ederek gitmesi beklenir. Öngörülü çıkışlar uygulanarak bu yörüngede alınan zaman sıfır ile açık döngü oturma süresinin iki katı arasındadır. Öngörülen çıkış ne zaman hedef bölgesi ve bu yörünge tarafından oluşturulan 'huni'nin dışına çıkarsa, huni kenarından uzaklığı bir hata olarak tanımlanır. Bir kuadratik (karesel) değer fonksiyonu, bu hataların ağırlıklı kareler toplamı alınarak oluşturulur. Gelecek girdiler, giriş seviyeleri ve hamleler üzerinde kısıtlamalara tabi olan bu değer

fonksiyonunu en aza indirecek şekilde seçilir. Çözülmesi gereken optimizasyon (iyileştirme) problemi bir kuadratik programlama problemidir ve aktif set çözüm stratejisi kullanılır.

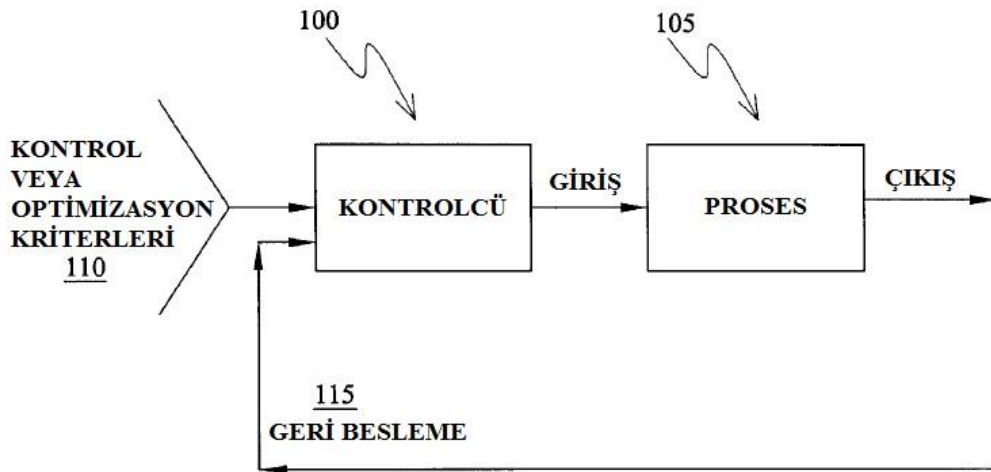
‘Agresiflik’; ürünün izin verilen aralığın içine getirmek için inşa edilen ‘huni’ kenarının eğimi tarafından belirlenen hedef bölgeye geri döndürülmesi olarak görülebilir. Böylece bu kenar huni konsepti ile bu kavramı birleştirerek, doğrusal referans yörüngesi olarak hizmet verir. Bir değişkenin konvansiyonel ayar noktası kontrolü o değişken için düşük ve yüksek limitleri aynı yaparak elde edilir.

Ölçülen bozuklukların etkileri ile mücadele için ileri besleme benzer şekilde ele alınır. Sistem çıkışları üzerinde öngörülen bozucular izin verilen aralığın dışına çıktığında, yine bir 'huni' referansı ile geri sürülürler. Genellikle ileri beslemeli sistemlerde geri besleme olmaması sebebiyle, sistemler kararsız olma riski olmadan daha agresif olabilirler.

RMPCT denetleyicisi biri optimizasyon, diğeri de kontrol olmak üzere iki aşamalı olarak organize edilmiştir [7].

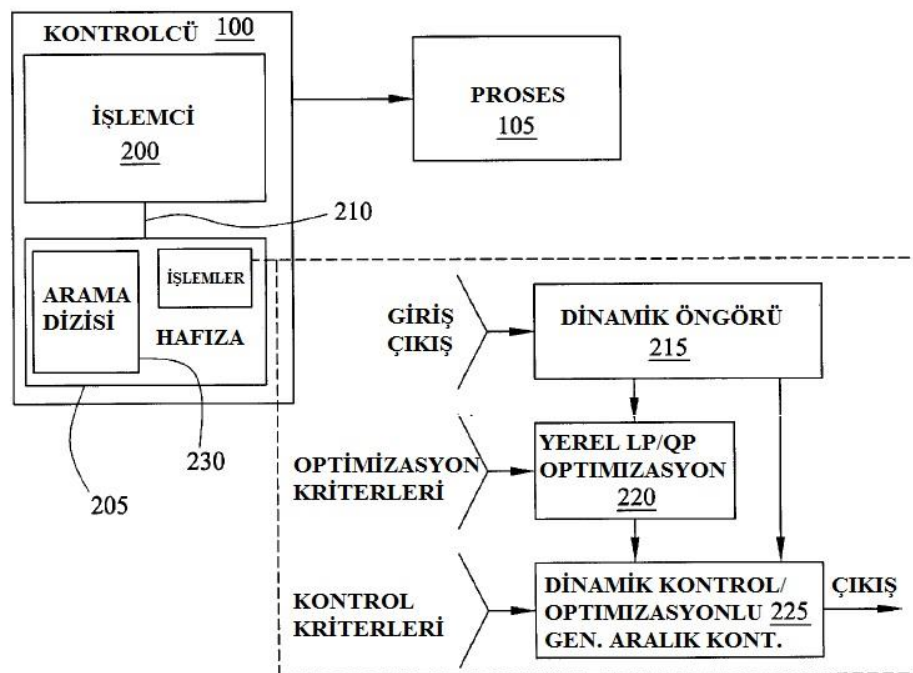
3.2 RMPCT Çalışma Adımları

Şekil 3.1 de Honeywell ‘e ait kontrol sisteminin genel yapısı görünmektedir. 100 numara ile gösterilen kontrolcü tek döngülü çok değişkenli öngörülü kontrolcü (SL-MPC) olarak tanımlanmaktadır. SL-MPC yapısı; etkili matris öngörü formunu ve analitik kontrol çözüm haritasını kullanıp geleneksel MPC teknolojisiyle birlikte proses kaynakları kullanımını azaltmaktadır.



Şekil 3.1 : Honeywell kontrol sistemi genel yapısı [12].

Şekil 3.2' ye bakacak olursak ilgili sistemi ve yerel kontrolcünün iç yapısını daha detaylı görebiliriz. Buradan görüldüğü gibi kontrolcü iç yapısında bir işlemci (200) , bir hafıza elemanı (205) ve haberleşme hattına (210) sahiptir. Görüldü üzere hafıza elemanı dinamik öngörü sistemine (215), Lineer programlama / kuadratik programlama optimizasyon sistemine (220), dinamik kontrol/optimizasyonlu genişletilmiş aralık kontrol algoritmasına (225), örneğin ilgili proses hakkında çeşitli ölçülebilir değerleri barındıran arama dizisine (230) sahiptir.



Mevcut işleminin kontrol çıkışı üretme adımları şu şekilde gerçekleşmektedir. İlk olarak dinamik öngörü sistemi çalıştırılır. Bu adım için prosese ait geri besleme bilgileri alınır ve ilgili sistem için çoklu tahminler ve ya dinamik sistemin

zorlanmamış tahminleri oluşturulur. Ardından dinamik öngörü sistemi ilgili geri besleme bilgisi için arama dizisine erişir ve buradan bir ve ya daha fazla bilgi toplar. Ardından optimizasyon kriterlerine göre yerel LP/QP optimizasyon işlemi gerçekleştirilir. Ardından dinamik kontrol/optimizasyonlu genelleştirilmiş aralık kontrol işlemi için dinamik öngörü değerleri, yerel optimizasyon değerleri ve kontrol kriterleri alınır ve bunlara göre bir çıkış değeri üretilir.

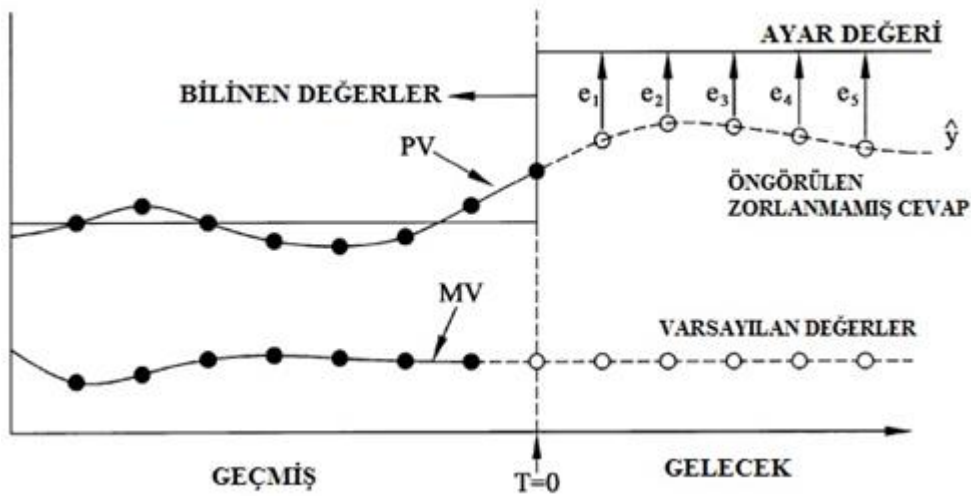
Proses modeli $G(s) = \frac{1.5}{40s+1}$ olan bir sistem için basamak cevabı matrisi ve Qmap matrisi aşağıdaki gibidir.

400 BASAMAK CEVABI MATRİSİ

.9179	.9093	.9020	.8892	.8680	.8347	.7769	.6587	.4084	0
.9276	.9199	.9137	.9022	.8835	.8541	.8031	.6988	.4780	0
.9361	.9293	.9238	.9137	.8972	.8713	.8262	.7342	.5393	.0247
1.6005		.0490							
1.4591		.0487							
1.3434		.0484							
1.1301		.0479							
.7829		.0470							
.2374		.0457							
-.7100		.0434							
-2.6457		.0387							
-6.7453		.0287							
-1.4996		.0011							

405
Qmap

Şekil 3.3 : Basamak ve Qmap matrisleri [12].



Şekil 3.4 : Öngörülü zorlanmamış cevap [12].

Ayrıca Şekil 3.4 arama dizininden faydalanan kapsamlı MPC yi uygun olduğunu göstermektedir. Basamak cevabı ve Qmap matrisine geri döndüğümüzde arama dizininde sahip olduğu değerler sayesinde gelecek öngörüler oluşturulabilecek olduğu bulunur. PV-blocking matrisi [120 125 130] şeklinde verilmiş olsun ve MV-blocking matrisi de [1 5 8 13 20 29 41 58 80 110] olsun. Buna göre her bir p_i gelecek nokta değerleri aşağıdaki gibi bulunabilir.

$$\hat{Y}(k + pv - blocking)|k = \begin{bmatrix} \hat{y}(k + p_1)|k \\ \vdots \\ \hat{y}(k + p_m)|k \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

i PV-blocking e ait indekslerdir. Önceki hesaplamadan yola çıkarak EPF ve Z_k değerlerini elde etmek uygun olacaktır.

$$\hat{y}(k + pv - blocking)|k = [EPF]Z_k \quad (3.2)$$

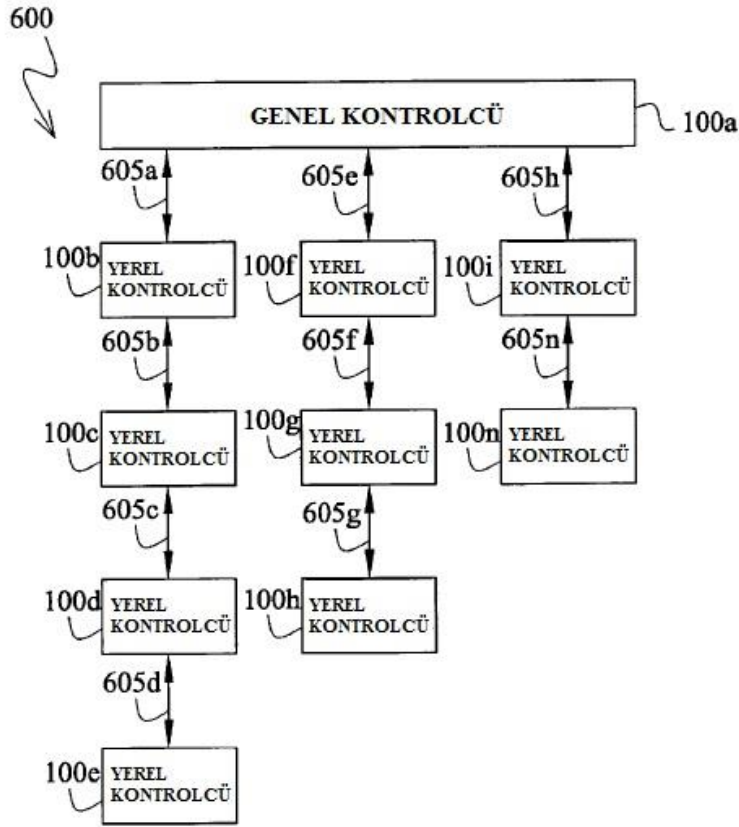
Burada EPF aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$[EPF] = \begin{bmatrix} epf_1 \\ \vdots \\ epf_m \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Burada epf_i Z vektörünün sahip olduğu geri besleme bilgisinden bağımsızdır ve aşağıdaki şekilde formüle edilebilir.

$$epf_i = [C \ D] \begin{bmatrix} A & B \\ 0 & I \end{bmatrix}^{p_i} \quad (3.4)$$

Yukarıda ki örneğin çözümüne aynı PV-blocking [120 125 130] matrisiyle devam edildiğinde $epf_1 = [0.9753 \ 0.0247]$ ve $epf_2 = \begin{bmatrix} 0.0801 & 0.9199 \\ 0.0707 & 0.9293 \\ 0.0623 & 0.9377 \end{bmatrix}$ şeklinde elde edilebilir.



Şekil 3.5 : Genel ve yerel kontrolcüler [12].

Şekil 3.5'teki yapıya baktığımızda ise 1 genel kontrolcü (100a) ve 100b den 100n e kadar bulunan yerel kontrolcüler mevcuttur. Buradaki yerel kontrolcülerin her biri birbirine çeşitli şekillerde bağlanmaktadır. Her bir yerel kontrol almış olduğu geri besleme ve diğer bilgiler eşliğinde kendine ait dinamik öngörü sistemini çalıştırmaktadır. Ayrıca her bir yerel kontrolcü kendine ait bir arama dizinine sahiptir. Üretilen dinamik öngörü işleminden sonra her bir yerel kontrol kendi içerisinde LP/QP optimizasyon işlemini gerçekleştirir.

Ardından genel kontrolcü devreye girerek yerel kontrolcülerin oluşturmuş olduğu LP/QP katsayılarını kullanarak ortak bir amaç fonksiyonu J 'yi oluşturur.

$$J = LP/QP_1 + LP/QP_2 + \dots + LP/QP_n \quad (3.5)$$

Ardından yerel kontrolcüler oluşturmuş olan ortak amaç fonksiyonuna erişirler ve bu datayı kullanarak dinamik kontrol/optimizasyonlu genelleştirilmiş aralık kontrol algoritmasını her bir yerel kontrolcü kendi içerisinde tanımlı prosese uygularlar [12].

3.3 Dinamik Kontrol/Optimizasyonlu Genelleştirilmiş Aralık Kontrol

Günümüzde bir çok proses kontrol sistemi, sistemleri önceden belirlenmiş ayar noktalarına ulaştırmak için model öngörülü kontrolü kullanmaktadır. Kontrol edilmek istenilen sistem bir ayar noktası ile kontrol edilirken, özellikle de proses/model uyumsuzluğu olan kontrol işlemlerinde kontrolcü en iyi kontrol performansını sergileyemeyebilir. Bu amaçla kontrolcü performansını arttırmak için; sıcaklık, basınç gibi kontrol edilen proses değişkenlerine ve akış, besleme gibi kontrolcünün kontrol ettiği proses giriş değişkenlerine üst ve alt sınırlar atanır ve kontrolcünün Frobenius modeli ile her bir kontrol işlemi için en aza indirgenerek, prosesi istenilen tolerans değerleri içerisinde tutulur. Böylelikle daha dayanıklı bir kontrol işlemi gerçekleştirilmiş olur.

Giriş değişkenleri;

$$u = \begin{bmatrix} u_1 \\ \vdots \\ u_m \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Çıkış değişkenleri;

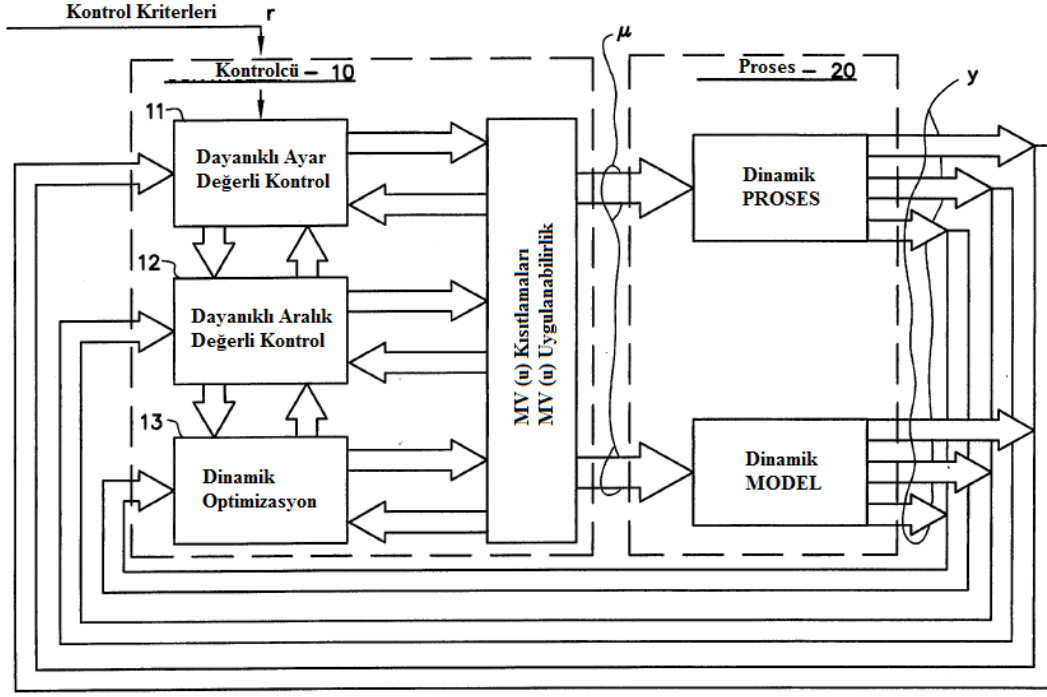
$$cv = \begin{bmatrix} cv_1 \\ \vdots \\ cv_n \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Buna göre dinamik proses m adet giriş değişkenine ve n adet çıkış değişkenine sahiptir ve çıkış değeri n_1 ayar noktası kontrol çıkışını, n_2 aralık kontrol çıkışını ve , n_3 , n_2 'e ait çözümlerden en iyi çıkış değerini içerir. Genel olarak $n \geq m \geq n_1$ dir.

Ayar yörüngesi r ise;

$$r = \begin{bmatrix} r_1 \in (\underline{r_1}, \overline{r_1}) \\ \vdots \\ r_n \in (\underline{r_n}, \overline{r_n}) \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

n_1 ayar noktası kontrol çıkışı için $\underline{r_1} = \overline{r_1}$ şeklindedir. n_2 aralık kontrol çıkışı için ise $\underline{r_1} < \overline{r_1}$ dir. Yukarıda tanımlanmış olan 3 aşamalı kontrol işlemi şekil 3.6 'da verilmiştir.



Şekil 3.6 : Dinamik kontrol/optimizasyonlu genelleştirilmiş aralık kontrolcü iç yapısı [13].

Kontrolcü 10 a ait aralık kontrol denklemi denklem (3.9)'deki gibidir.

$$\min_{x,y} 1/2 || W(Ax - y) ||^2 \quad (3.9)$$

$$\underline{MV} \leq x \leq \overline{MV} \quad (3.10)$$

$$\underline{PV} \leq y \leq \overline{PV} \quad (3.11)$$

W kullanıcı ağırlık matrisi, A proses dinamiklerini içeren katsayılar matrisi, y proses çıkış değişkenini, x kontrol edilen giriş değerlerini (u veya Δu ($\Delta u = u_{şimdiki} - u_{son}$)) göstermektedir.

Kontrolcüye ait denklem 3 şekilde çözümlenebilir.

Durum 1) $Ax^* \neq y^*$ için tek bir çözüm vardır.

Durum 2) $Ax^* = y^*$ için sonsuz sayıda çözüm vardır.

Durum 3) $Ax^* \neq y^*$ için sonsuz sayıda çözüm vardır.

Burada birinci durum kontrol edilebilir olmadığı için ikinci ve üçüncü durum incelenecektir.

Şekil 3.7’de görüldüğü üzere PV , $\overline{PV}$ sırasıyla alt ve üst sınırlardır. Sistem dayanıklılığını arttırmak için kontrol edilen sisteme uygulanacak giriş değerlerinin olabildiğince az değişmesi hedeflenir. $y_1^*, y_2^*, y_3^*, y_4^*, y_5^*$ her biri aralık kontrol formülasyonunun çözümleridir. Her bir çözümün kendine ait sınırları mevcuttur. Bu şekilde kendine ait sınırları olması huni “funnel” yapısı olarak isimlendirilir ve bu şekilde öngörü yörüngesinin sınırları içerisinde değer alabilmesi, çözüm sayısını çok arttırmaktadır ve bu sebepten dolayı bir en iyileme yöntemiyle en iyi girişin seçilmesine ihtiyaç vardır.

41

$N \geq M$ 'dir. Bu sebepten CPU nun bu kuadratik problemi çözmesi iki, üç kat daha fazla zaman alır.

Elde edilen kontrol işlemi lineer olmayan veya en azından parçalı lineer olan bir hal alır ve bu da çevrimdışı kontrol dizaynına ciddi bir zorluk katar.

Bunun yanında matematiksel anlamda aralık değerli öngörülü kontrolün geleneksel öngörülü kontrole göre avantajları da mevcuttur.

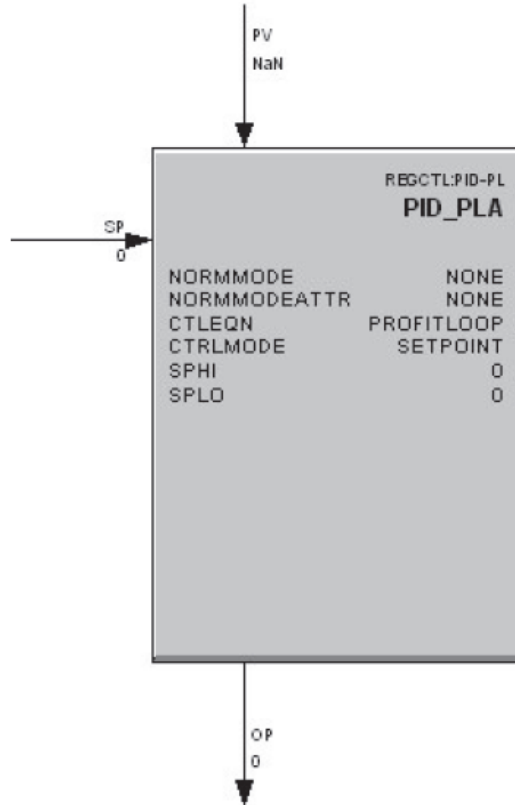
Denklem (3.9) da bahsedilen sınırlar oldukça basit ve anlaşılırdır. Bu özellik bazı nümerik metodların kullanımını kolaylaştırır. Ayrıca bu denklemde ki bazı kısımlar çözüm sırasında sadeleşmektedir ve nümerik hesaplamalara hiç dahil olmadan ortadan kalkabilir [13].

4. PROFIT LOOP PKS

Profit Loop PKS dayanıklı ve çevre şartlarından fazla etkilenmeyen, dayanıklı (robust), model tabanlı, öngörülü, giriş ve çıkış değerlerini en iyi kullanılabilecek hale getiren Honeywell şirketinin geliştirmiş olduğu bir kontrol teknolojisidir. Bir çok durumda Profit Loop PKS standart PID algoritmasının yerine kullanılabilir, hatta kullanılmalıdır [14].

4.1 PID_PLA Bloğu

Honeywell sisteminde Profit Loop PKS gösterim şekli Şekil 4.1'deki gibidir ve modül ismi PID_PLA'dır. Burada PV (Process Value) sistemin çıkış değeri ve kontrolcünün giriş değeri $y(k)$ 'yı, OP (Operating Point) sistemin giriş değerini ve kontrolcünün çıkış değeri $u(k)$ ' yı, SP ise sistemde ulaşmak istenilen ayar değerini göstermektedir.



Şekil 4.1 : PID_PLA Modül Görünümü [14].

PID_PLA kontrol modülü içerisinde PID kontrol bloğunu da içeren ve arzu edildiğinde PID kontrolcü olarak çalışabilen, genel olarak ise dayanıklı (robust), model öngörülü kontrol işlemini gerçekleştiren bir kontrol bloğudur.

PID_PLA üstün kontrol sağlaması nedeniyle standart PID algoritmasının kullanıldığı yerlerde kolaylıkla kullanılır, hatta kullanılmalıdır. Kullanılmasını zorunlu kılan yerler aşağıdaki gibidir.

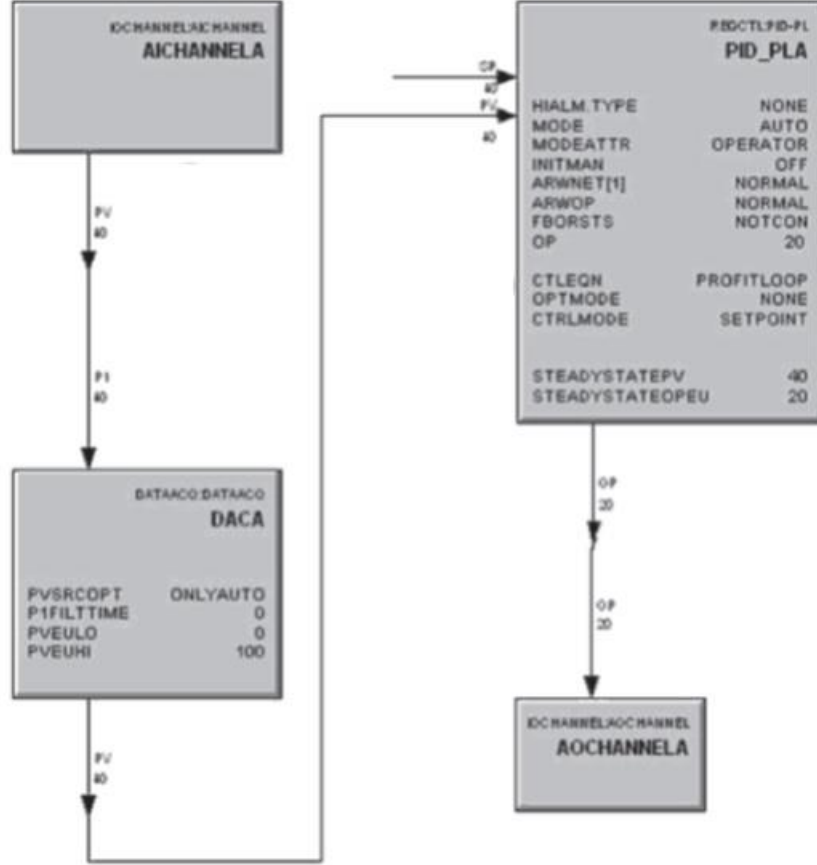
1. Sistem cevabında önemli bir gecikme varsa
2. Seyrek ölçüm alabilen sistemlerin kontrol işlemlerinde (Gaz Kromatograf gibi.)
3. Valf probleminden kaynaklanan gürültülü proseslerde
4. Dinamik değişikliğe sahip proseslerde
5. Range kontrol gerektiğinde. Dalgalanmalı tank kontrolü gibi proseslerde kullanımı yararlı olacaktır. Bu sayede istenilen proses değeri ayar değeri gibi sabit bir değerde kalmaya değil, belirlenen bir ayar değeri aralığında kalmaya çalışır.

PID_PLA modülü 3 farklı şekilde çalışabilmektedir. Bunlar;

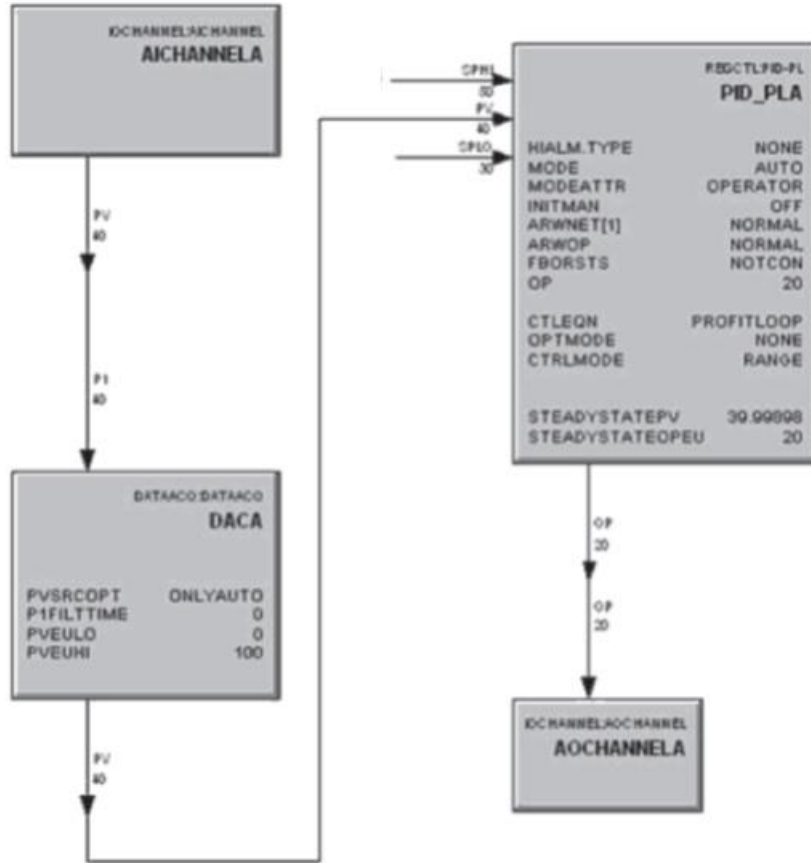
1. CTLEQN seçeneğinden PID eşitliklerinden (EQA, EQB gibi) biri seçilirse, PID_PLA model öngörülü kontrol olarak değil, standart PID gibi çalışır.
2. CTLEQN seçeneklerinden PROFITLOOP ve CTRLMODE seçeneklerinden AYAR DEĞERİ seçilirse, PID_PLA modülü kontrol çıkışını (OP) değiştirirerek proses değerini (PV), ayar değerine (SP) ulaştırmaya çalışır. Şekil 4.2' de kontrol şeması gösterilmiştir.
3. CTLEQN seçeneklerinden PROFITLOOP ve CTRLMODE seçeneklerinden RANGE seçilirse, PID_PLA modülü kontrol çıkışını (OP) değiştirirerek proses değerini (PV), belirlenen ayar değeri üst limiti (SPHI) ile ayar değeri alt limiti (SPLI) arasında tutmaya çalışır. Burada proses değeri belirli bir aralıkta tutulmaya çalışılır. Şekil 4.3' de kontrol şeması gösterilmiştir.

PID_PLA' ya ait tam kontrol şeması Şekil 4.2' de ve Şekil 4.3' te gösterilmiştir. Buradaki AICHANNELA procesten gelen ölçüm değerini $y(k)$ 'yı , DACA gelen değer ölçeklendirdiği modülü ve AOCHANNELA prosese giden giriş değerini

$u(k)$ ' yi göstermektedir. İstenildiği takdirde PID kontrol bloğu kolaylıkla PID_PLA kontrol modülüne veya aynı şekilde PID_PLA kontrol modülü PID kontrol modülüne çevirilebilir [14].



Şekil 4.2 : PID_PLA ile AYAR DEĞERİ kontrol şeması.



Şekil 4.3 : PID_PLA ile RANGE kontrol şeması.

4.2 Profit Loop PKS Assistant

Profit Loop PKS Assistant (PL PKS Assistant) PID_PLA modülünün yapılandırma işlemlerini en kolaya indirgemeyi hedefleyen bir yapılandırma arayüzüdür. Özellikle Profit Loop Assistant sistem modelini oluşturmada yardımcı olabilmek için geliştirilmiştir.

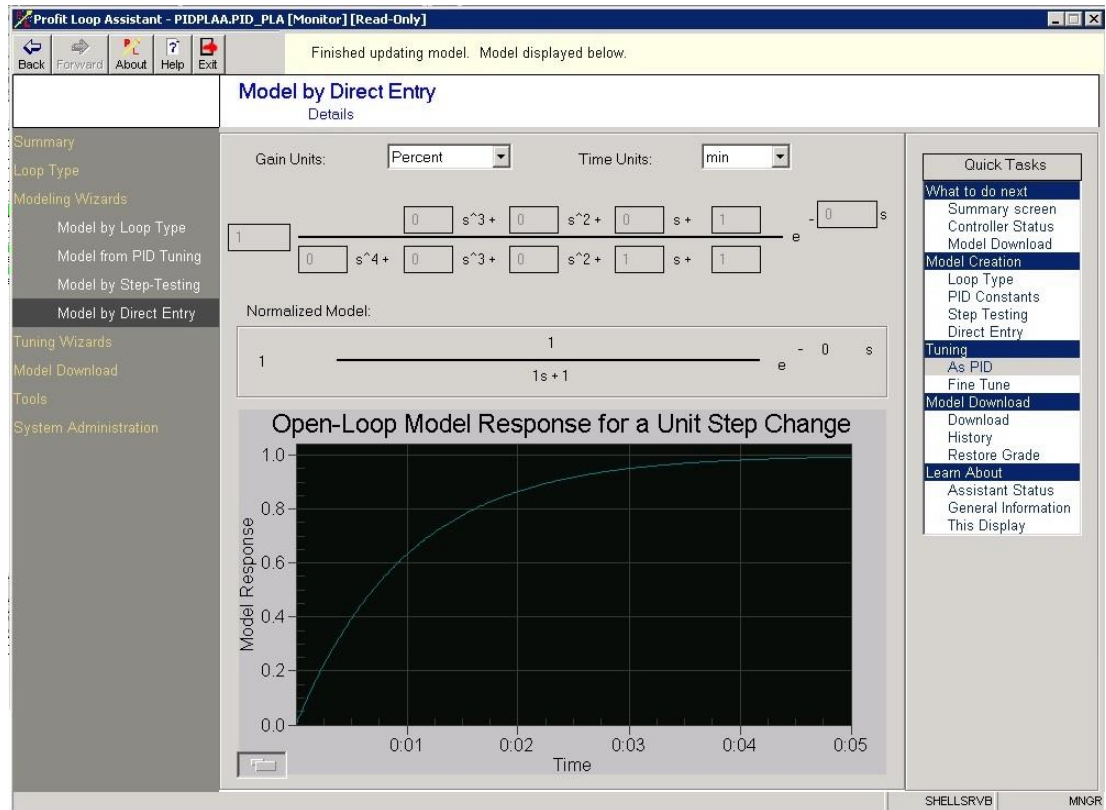
Profit Loop PKS model tabanlı öngörülü kontrollör olması sebebi ile çalışabilmesi için bir sistem modeline ihtiyaç duyar. Profit Loop PKS Assistant arayüzü kullanılarak sisteme ait model 4 farklı şekilde elde edilebilir. Bunlar;

1. Sisteme ait bilinen Laplace modeli kullanılarak model tanımlama
2. PID Ayar Parametreleri kullanılarak model tanımlama
3. Döngü çeşidine göre model tanımlama
4. Basamak fonksiyonu kullanılarak model tanımlama

Ayrıca PL PKS Assistant tanı araçları kullanılarak kontrol döngü performansına ait sorunları giderilebilir ve performans artırılabilir. Bunlar PL PKS Assistant yapısına ait Valve Doctor ve Loop Analysis özellikleri kullanılarak yapılabilir. Valve Doctor; özellikle basınç ve akış döngülerinde vana davranışını, boşluk ve sürtünmelerini analiz eder. Bu analiz işlemini otomatik olarak yapar. Bir sıkıntı meydana geldiğinde çözebiliyorsa çözmeye çalışır, çözilemiyor ise kullanıcıya bilgi verir. Loop Analysis; kontrol döngüsünün sağlıklı çalışıp çalışmadığını, proseste osilasyon meydana gelip gelmediğini, vana şartlarını, PV/OP standart sapmalarını analiz eder [15].

4.2.1 Sisteme ait bilinen Laplace modeli kullanılarak model tanımlama

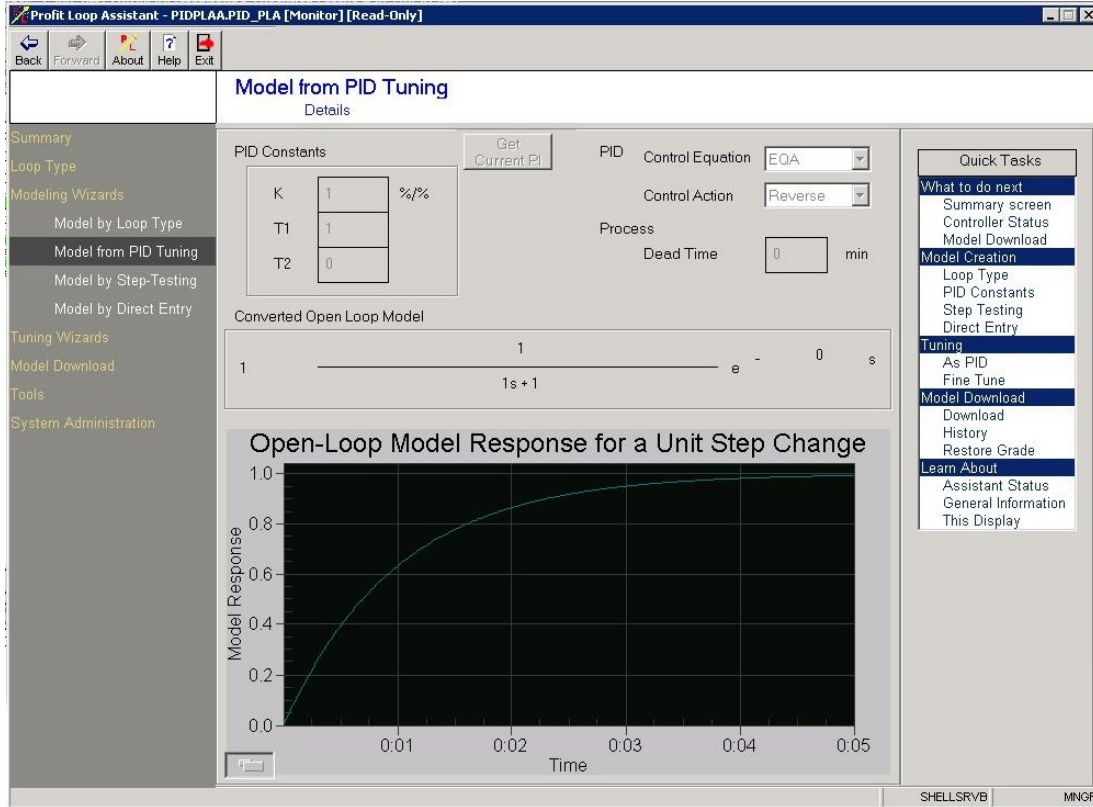
Eğer proses ve ya sisteme ait bir Laplace modeli var ise Şekil 4.4' te gösterilen PL PKS Assistant uygulamasına ait arayüz kullanılarak sisteme ait model tanımlanabilir.



Şekil 4.4 : Sisteme ait Laplace modeli ile model tanımlama.

4.2.2 PID ayar parametreleri kullanılarak model tanımlama

Bu yaklaşım daha çok PID modülünü PID_PLA modülüne çevirdiğimizde kullanılır. Çevrim sonrası PID (Oran, İntegral, Türev) parametreleri kayıtlı olarak saklanmaktadır. Ayrıca eğer PID parametreleri biliniyorsa PID_PLA içerisinde tanımlanabilir. Bu parametreler aracılığı ile Şekil 4.5’ te gösterilen PL PKS Assistant arayüzü kullanılarak sisteme ait model tanımlanabilir.



Şekil 4.5 : PID parametreleri ile model tanımlama.

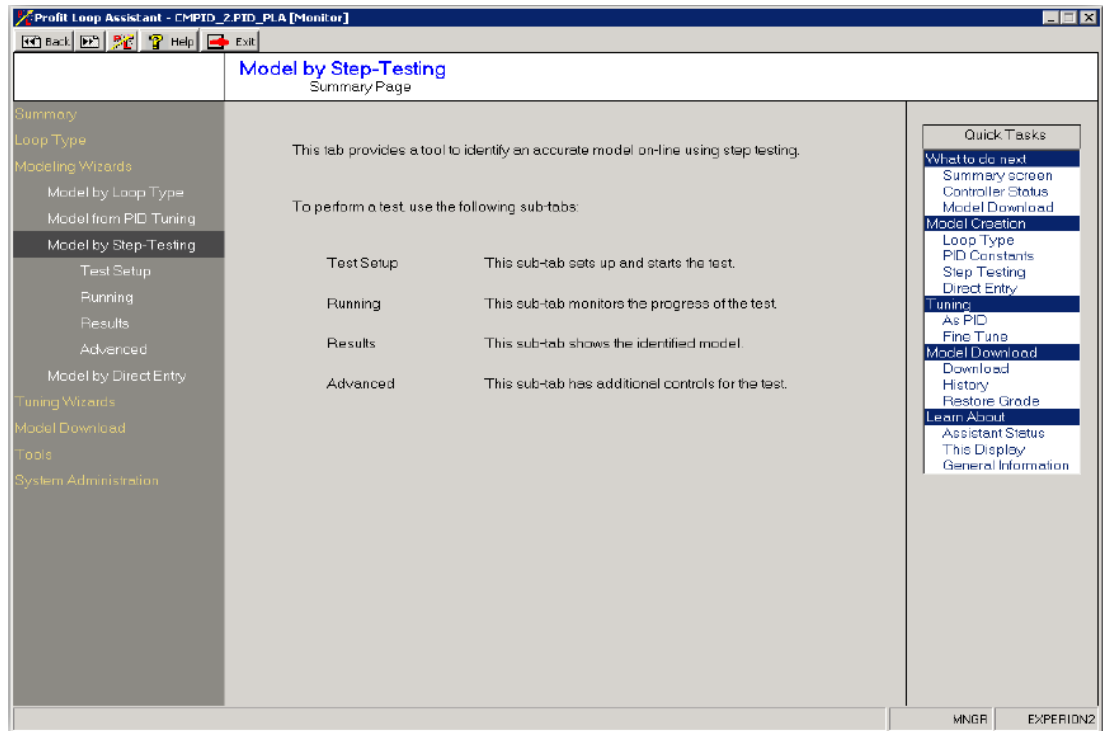
4.2.3 Döngü çeşidine göre model tanımlama

Eğer döngülere ait dinamik denklemleri biliyor ve bunları bulundukları bir gruba, sahaya ve yaptıkları işe göre ayırmak ve tanımlamak istiyorsanız bu model tanımlama işlemi uygun bir çözüm sunmaktadır. Öncelikle her bir döngüdeki ekipmanın kontrol ettiği değerler tanımlanır. Bunlar akış, seviye, basınç, sıcaklık, analizör, pH ve bilinmeyen olabilmektedir. Sonra bu ekipmanın ait olduğu saha tanımlanır. Ardından döngüye ait dinamik denklem bilgileri eklenir ve son olarak isteğe bağlı olarak ekipmanlara isim atanabilmektedir.

4.2.4 Basamak fonksiyonu kullanarak model tanımlama

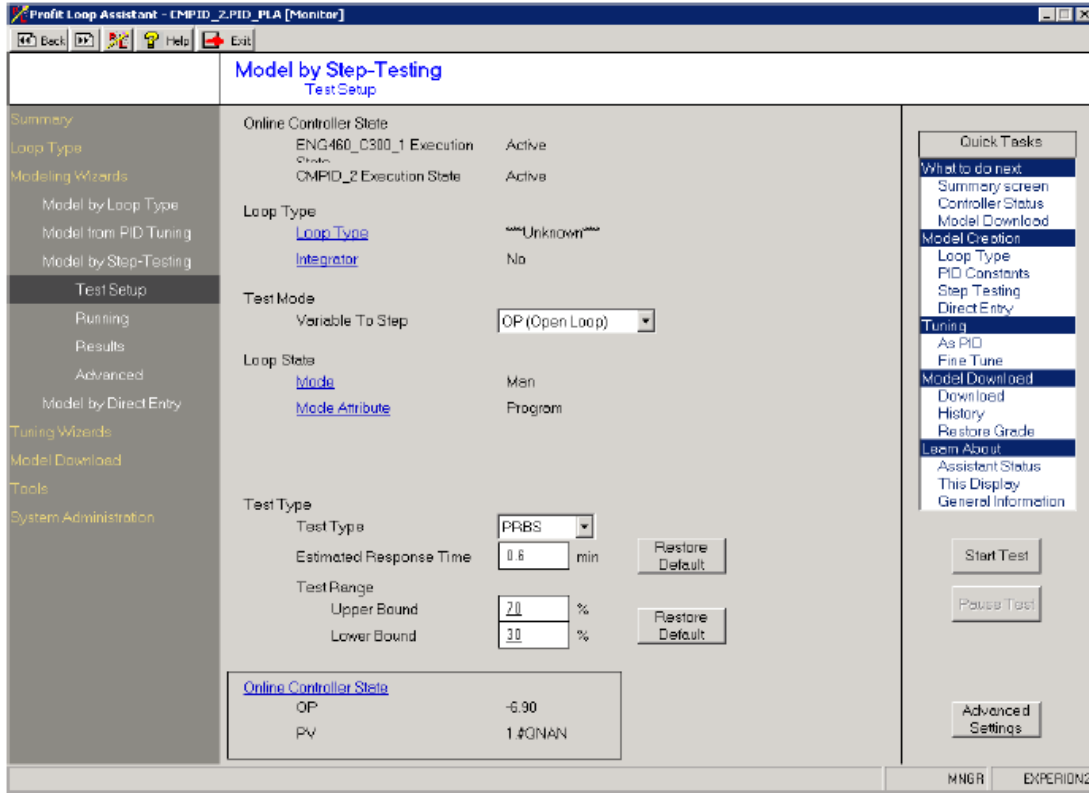
PL PKS Assistant eldeki proses modelleme problemine uygun bir çözüm sunmaktadır. PL PKS Assistant ile bir çok şekilde uygun proses modeli oluşturulabilir. Bunlardan biri de basamak fonksiyonu kullanılarak model oluşturmaktır. Bu method ile PL PKS Assistant aracılığı ile proses girişine alt ve üst limitlerde basamak fonksiyonu uygulanır ve bu şekilde proses model formülü elde edilir.

PK PKS Assistant programı açıldıktan sonra, basamak fonksiyonu kullanılarak model tanımlama işlemi 4 adımda gerçekleştirilir. Şekil 4.6 PL PKS Assistant programına ait ekran çıktısını göstermektedir.



Şekil 4.6 : PL PKS Assistant Ekran Çıktısı [13].

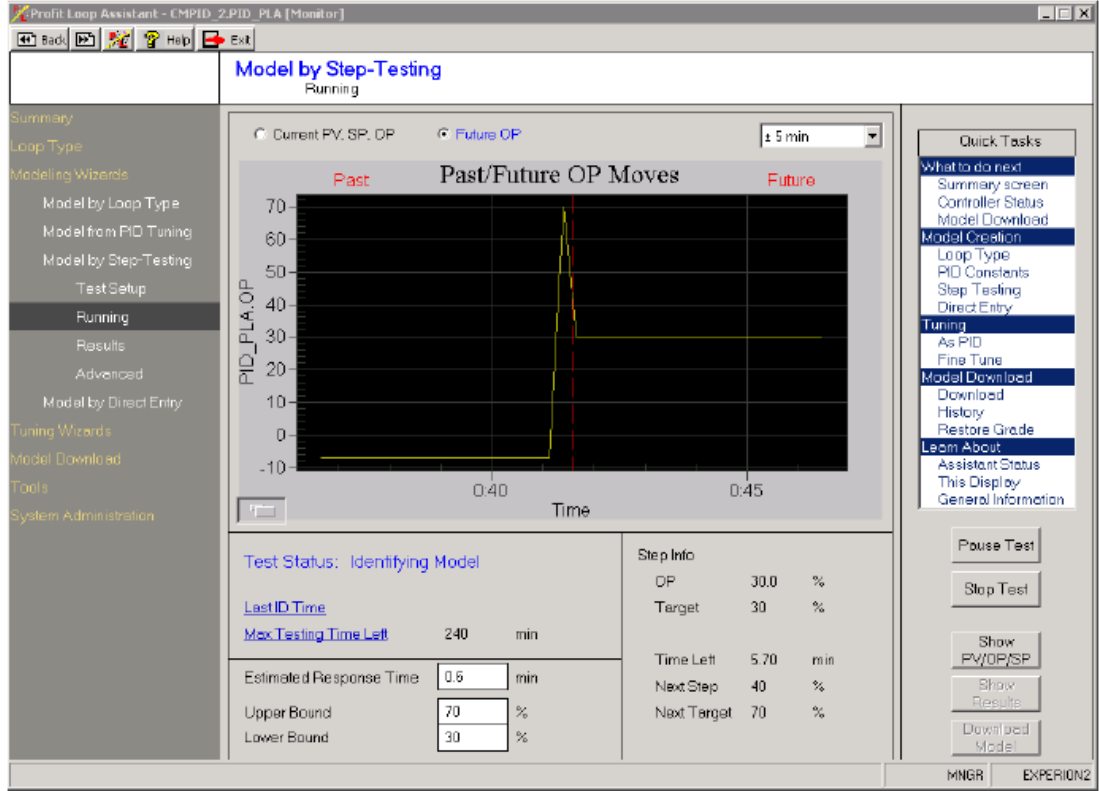
İlk adım basamak fonksiyonu uygulanmak için gerekli olan hazırlık işlemlerini kapsamaktadır. Bu adımda basamak fonksiyonu için önemli olan bazı parametreler tanımlanır. Bu parametrelerden en önemlileri tahmini sistem cevap süresi, uygulanacak basamak fonksiyonunun alt limiti ve üst limitidir. Şekil 4.7 hazırlık adımına ait PL PKS Assistant ekranını göstermektedir.



Şekil 4.7 : Basamak fonksiyonu ile model tanımlama hazırlık adımı.

Ayrıca test işlemine başlamadan önce gelişmiş ayarlar (Advanced Settings) seçeneğinden basamak fonksiyonu ile model tanımlama işlemi için daha fazla seçenek bulunabilir. Bu seçeneklerden en önemlilerinden biri test işleminin süreceği maksimum süreyi belirlemektir.

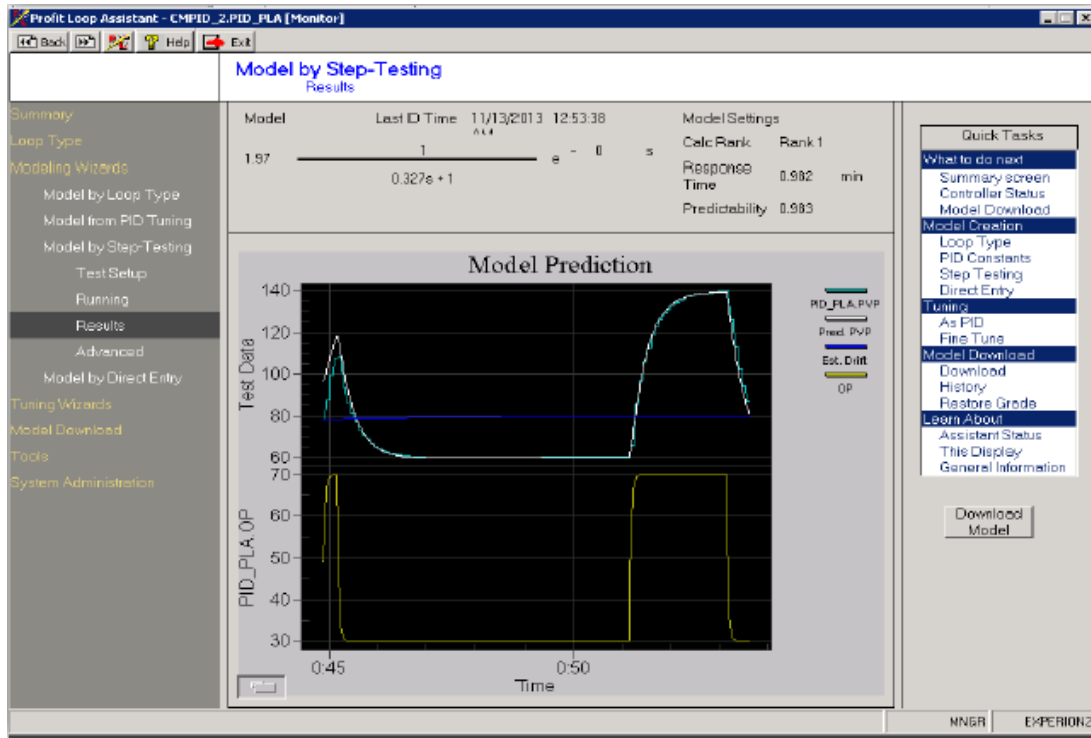
Hazırlık evresinin tamamlanmasının ardından Start Test butonuna basılarak teste başlanır. Testin başlamasının ardından PL PKS Assistant çalışma penceresini açar ve gelecek giriş değerleri ekranda çizilmeye başlanır. Şekil 4.9’ da bu adıma ait ekran çıktısı yer almaktadır.



Şekil 4.8 : Basamak fonksiyonu ile model tanımlama test adımı.

Test adımının tamamlanmasının ardından Show Results butonuna basılarak prosese ait yeterli bir model oluşturulur. Eğer oluşturulmuş olan transfer fonksiyonu Şekil 4.10’ da olduğu gibi yeterli seviyelerde ise oluşturulmuş olan öngörü modeli kontrolcüye yüklenebilir. Şekilde görüleceği üzere Predictability yani öngörebilirlik %98.9 çıkmıştır ve bu öngörü modeli için çok iyi bir sonuçtur.

Oluşturulan model ve gerçek sistem modeli karşılaştırabilmek için excel programında bir simülasyon programı oluşturulmuş ve basamak fonksiyonu kullanılarak model tanımlama işleminden yararlanılmıştır. Simülasyona ait sistem modelinde katsayı çarpanı (Gain) 2 ve sistem zaman sabiti 0.3 olarak belirlenmiştir. Şekil 4.9’ da görüleceği üzere PL PKS Assistant programının oluşturmuş olduğu modele ait katsayı çarpanıda 1.97 ve zaman sabiti de 0.327’ dir. Yani simülasyondaki katsayılarla çok yakın değerler bulunmuştur. Bu nedenle söylenebilir ki PL PKS kontrollör iyi bir model tahmini sağlayabilmektedir. Aynı zamanda kontrolcü çıkışının az salınlı ve düzgün olduğu gözlenmiştir [16].



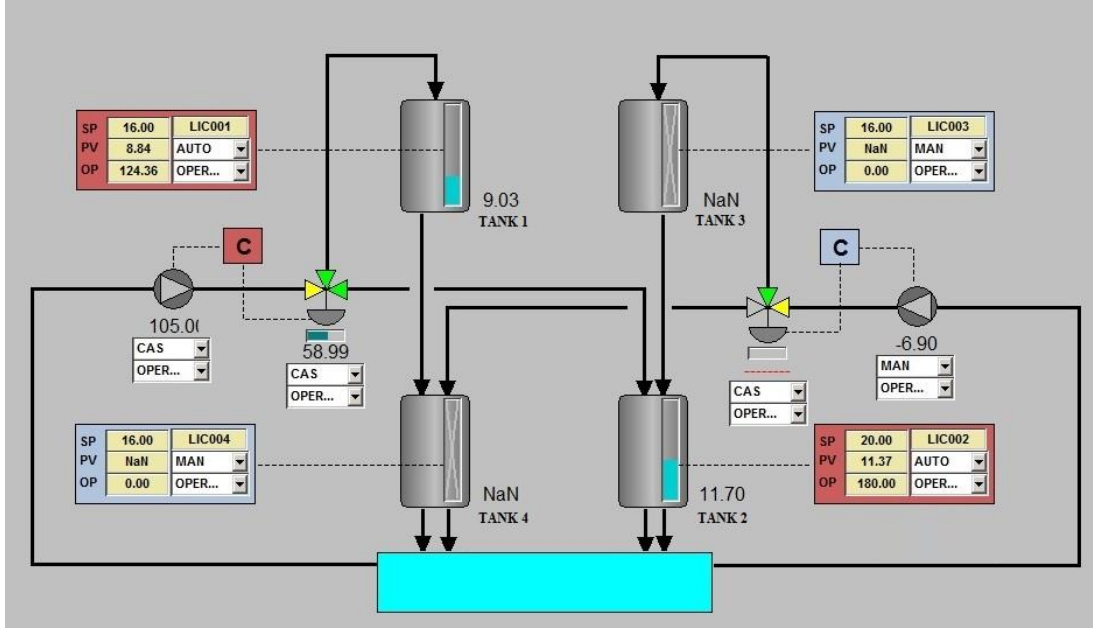
Şekil 4.9 : Basamak fonksiyonu ile model tanımlama sonuç adımı.

5. DENEYSEL ÇALIŞMA

Şekil 5.1‘ de görülmekte olan 4 sıvı seviye kontrol deney düzeneği üzerinde model öngörülü kontrol denemeleri ve PI kontrol denemeleri yapılmıştır. Burada 1 vana ve 1 pompa ile iki farklı seviyenin ayar değerlerine erişmesi incelenmiştir. Sisteme ait seviye bilgilerine 2 adet PSE550 fark basınç transmitteri kalibre edilerek ulaşılmıştır. Kalibrasyon değerleri 0 ve 25 cm olarak girilmiştir. Kontrol işlemi için Honeywell Experion LX C300 kullanılmıştır.



Şekil 5.1 : 4 Tank sıvı seviye kontrol düzeneği.



Şekil 5.2 : 4 Tank sıvı seviye kontrol HMI sayfası.

Sisteme ait HMI(İnsan Makine Arayüz) görüntüsü Şekil 5.2’ deki gibidir. Yapılmak istenen bordo renge sahip olan kontrolcülerin PID kontrol ve model öngörülü kontrol algoritmaları ile tank 1 ve tank 2 seviyelerini sol tarafa bulunan pompa ve 3 yollu vana kontrolü ile istenilen seviye değerlerine ulaştırmaktır.

Bu işlem için ilk olarak matematiksel ve basamak fonksiyonu yardımıyla sisteme ait transfer fonksiyonları elde edilmiştir. Ardından elde edilen bu modeller yardımıyla sisteme önce PI kontrol algoritması ve sonra model öngörülü kontrol algoritması uygulanmıştır.

5.1 Sistem Modeli

Öncelikle sadece bir tanka ait sistemin modeli aşağıdaki denklem (5.1), denklem (5.2), denklem (5.3) ve denklem (5.4)’ ten yararlanılarak denklem (5.5)’ teki gibi çıkarılabilir [17].

$$Q_{in} - Q_{out} = A \cdot \frac{dh}{dt} \quad (5.1)$$

$$Q_{out} = C_0 \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g \cdot h} \quad (5.2)$$

$$H = \sqrt{h} \text{ ve } H^2 = h \quad (5.3)$$

$$Q_{in} = 2 \cdot A \cdot \frac{dH}{dt} + C_0 \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot H \quad (5.4)$$

$$\frac{H}{Q_{in}} = \frac{1}{2 \cdot A \cdot s + C_0 \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot g}} \quad (5.5)$$

A (Tank taban kesit alanı) = 188,69 cm^2 ;

C_0 (Delik çıkış katsayısı) = 0,8 ;

$$S = \frac{\pi \cdot D^2}{4} ;$$

D (Tank çıkışı kesit çapı) = 0,6 cm ;

S (Tank çıkış kesit alanı) = 10,017 cm^2 ;

$$g \text{ (Yer çekim ivmesi)} = 980,66 \frac{cm^2}{s} ;$$

H (Tank yüksekliğinin karekökü) ;

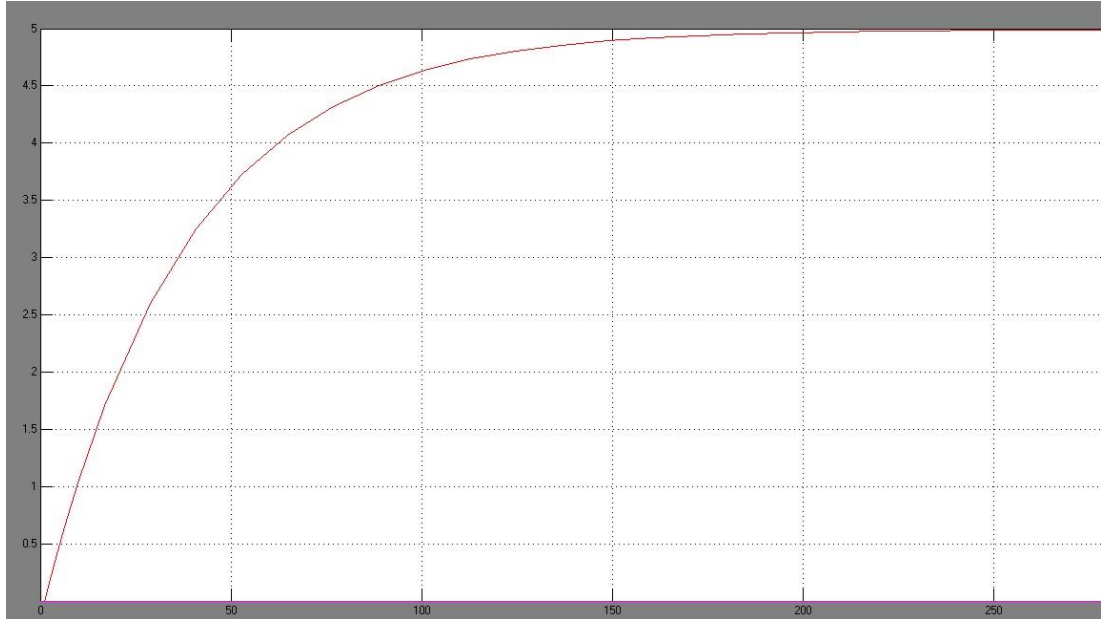
Q_{in} (Tankta saniyede giren sıvı miktarı) ;

Buradan üst ve alt tank için sistem modelleri sırasıyla denklem (5.6) ve (5.7) deki gibi bulunur. Alttaki tankta 2 vana açık olduğu için denklem (5.5)te S yerine 2S gelir.

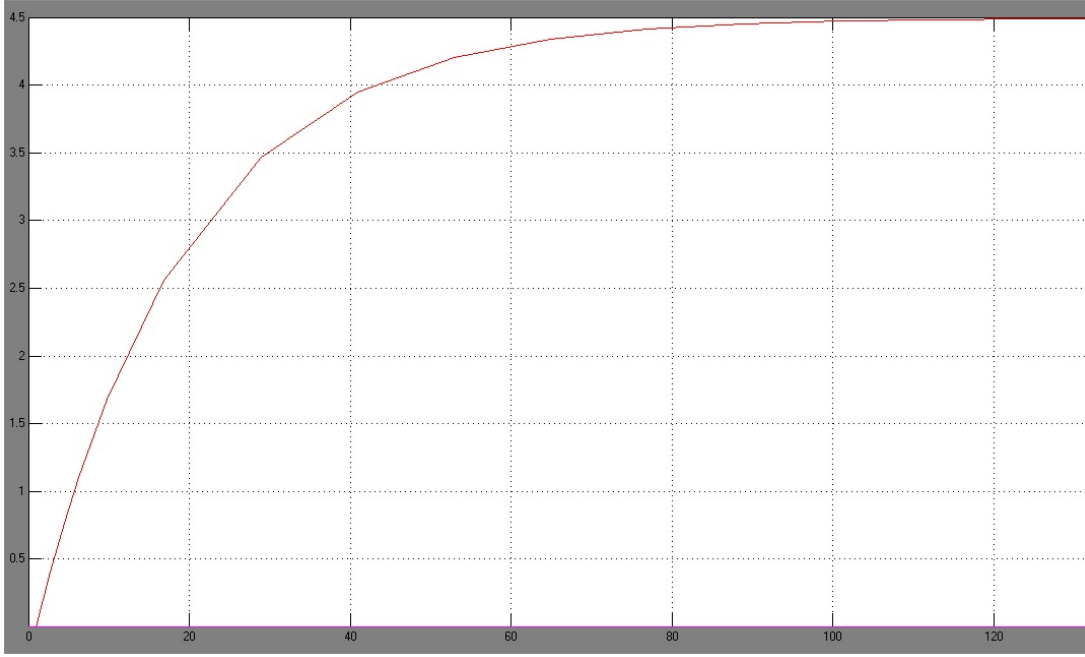
$$\frac{H}{Q_{in}} = \frac{1}{377,38 s + 10,017} \quad (5.6)$$

$$\frac{H}{Q_{in}} = \frac{1}{377,38 s + 20,034} \quad (5.7)$$

Burada dikkat edilmesi gereken gelen input değeri yazılımda karekök işlemine tabi tutularak kullanılmalıdır ($H = \sqrt{h}$ olması sebebi ile). Her iki denkleme Matlabta basamak cevabı uyguladığımda Şekil 5.3 ve Şekil 5.4' teki grafikler elde edilmiştir.



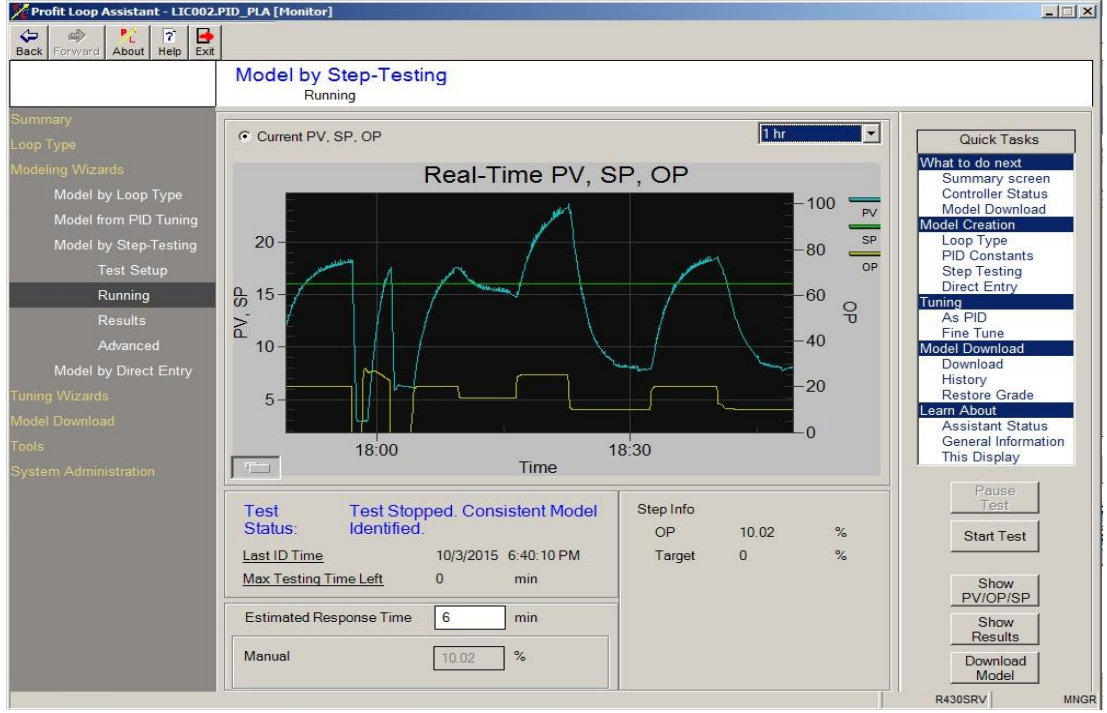
Şekil 5.3 : Matlab üst tank basamak cevabı.



Şekil 5.4 : Matlab alt tank basamak cevabı.

Buradan anlaşılıyor ki Üst tanka genliği 50 olan basamak cevabı uyguladığımızda 250 saniyede $H = 5$ cm yani $h = 25$ cm'ye oturan bir grafik elde ediyoruz. Alt tanka genliği 90 olan basamak cevabı uyguladığımızda ise 110 saniyede $H = 4.5$ yani $h = 20.25$ cm'ye oturan bir grafik elde ediyoruz.

Bu işlemin ardından sistemi daha iyi anlayabilmek için PL PKS Assistant programı yardımı ile sisteme çeşitli değerlerde basamak fonksiyonları uygulanarak sistem modeli elde edilmiştir. Bunun ile ilgili çıktılar Şekil 5.5 ve 5.6 da yer almaktadır.



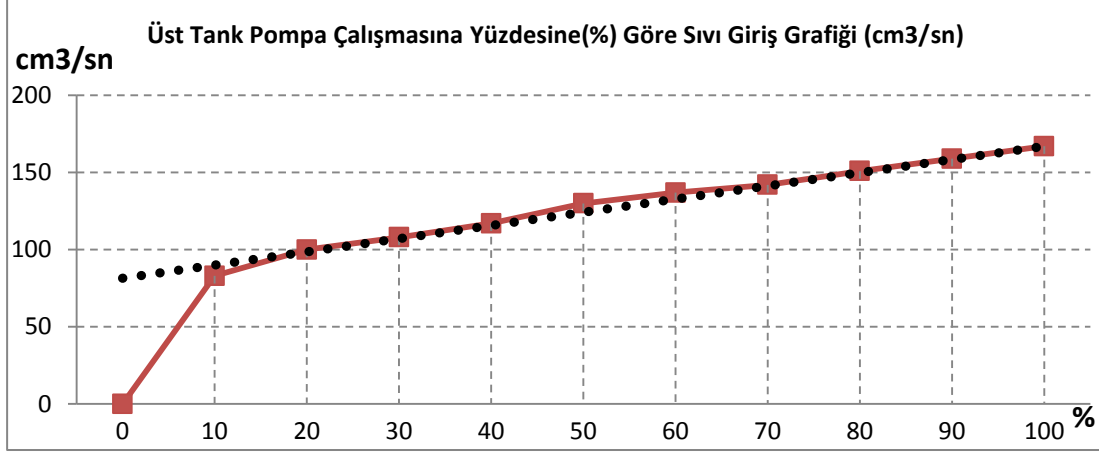
Şekil 5.5 : PL PKS basamak cevabı ile model oluşturma.



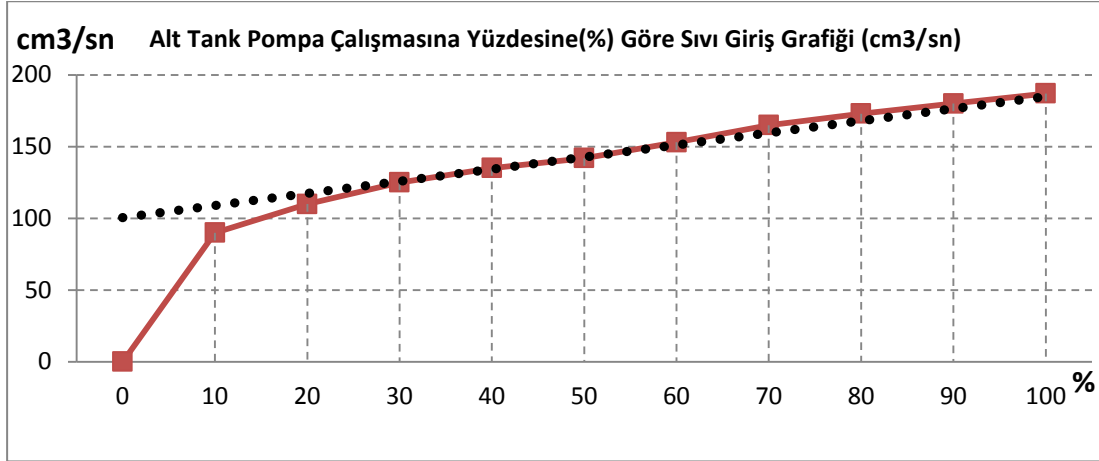
Şekil 5.6 : PL PKS basamak cevabı ile model çıktısı.

Ancak elde edilen sistem modeli $cm/(\frac{cm^3}{sn})$ cinsinden değil, %/% cinsindendir. Örneğin çıkış sinyali 20 cm için aslından yüzde değeri olan %80 olmakta, giriş değeri de ortalama 100 cm^3/sn için %20 olmaktadır. Bu modele göre elde edilen çıkış sinyali %20 için 100 cm^3/sn giriş üretmesi beklenirken, %40 için tam iki katı

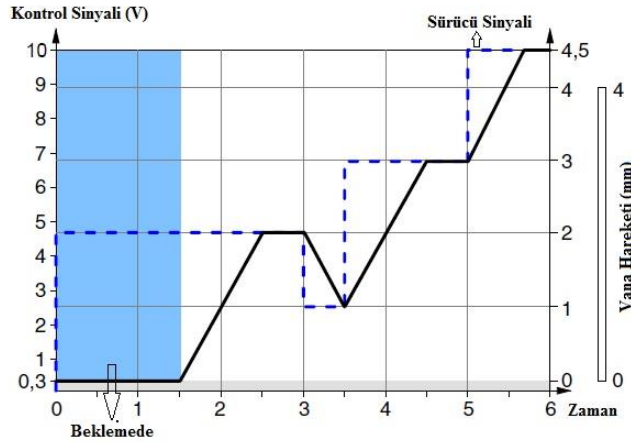
olan $200 \text{ cm}^3/\text{sn}$ giriş üretmesi beklenir, ancak pompa çıktı grafiği bunu sağlamamaktadır. Pompa lineer bir çıkış vermemektedir. Pompa % 40 giriş için $135 \text{ cm}^3/\text{sn}$ lik bir giriş üretebilmektedir. Pompa çalışma grafikleri Şekil 5.7 ve 5.8 de verilmiştir.



Şekil 5.7 : Üst tank için pompa çalışma eğrisi.



Şekil 5.8 : Alt tank için pompa çalışma eğrisi.



Şekil 5.9 : Vanaya ait çalışma eğrisi [18].

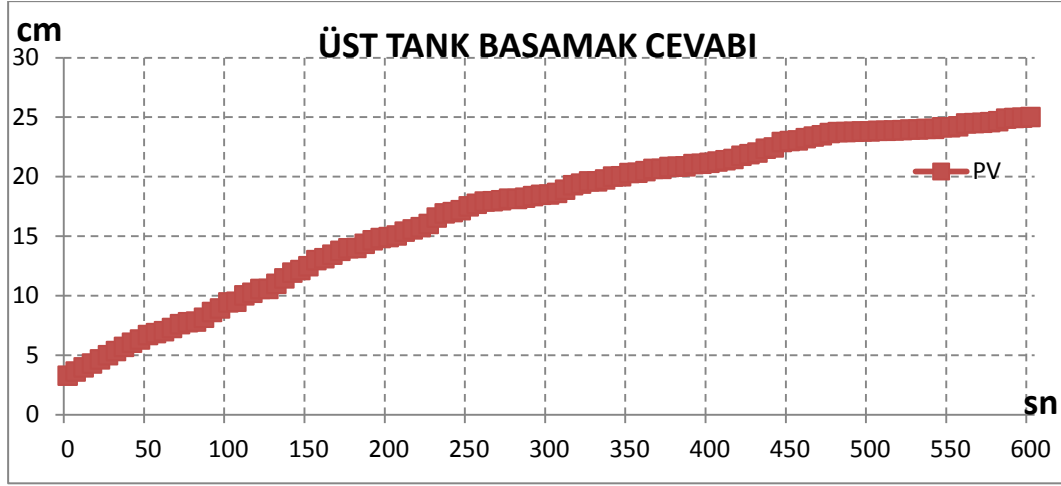
Bu değerleri elde ettikten sonra gerçek sisteme basamak cevabı uygulamadan önce sistemin Q_{in} ve Q_{out} ları hakkında bilgi edinmek için sistemde ait bazı ölçümler yapılmıştır.

Ölçümlerde tankların 10 cmlik seviyesinden 20 cmlik seviyesine kaç saniyede çıktığı araştırılmıştır. İlk olarak vana %0 yapılmış (yani st tank doldurulmuş), Q_{out} vanaları kapalı ve açık yapılmış ve pompa hızları değiştirilmiş; ardından vana % 100 yapılarak (yani alt tank doldurulmuş) lmler tekrarlanmıştır. Ölçümlerden görüldüğü üzere st tank için maksimum $Q_{in} = 170 \text{ cm}^3/\text{sn}$ ve ortalama $Q_{out} = 40 \text{ cm}^3/\text{sn}$, alt tank için maksimum $Q_{in} = 185 \text{ cm}^3/\text{sn}$ ve ortalama $Q_{out} = 107 \text{ cm}^3/\text{sn}$ (alt iki vanada açık) llmřtr.

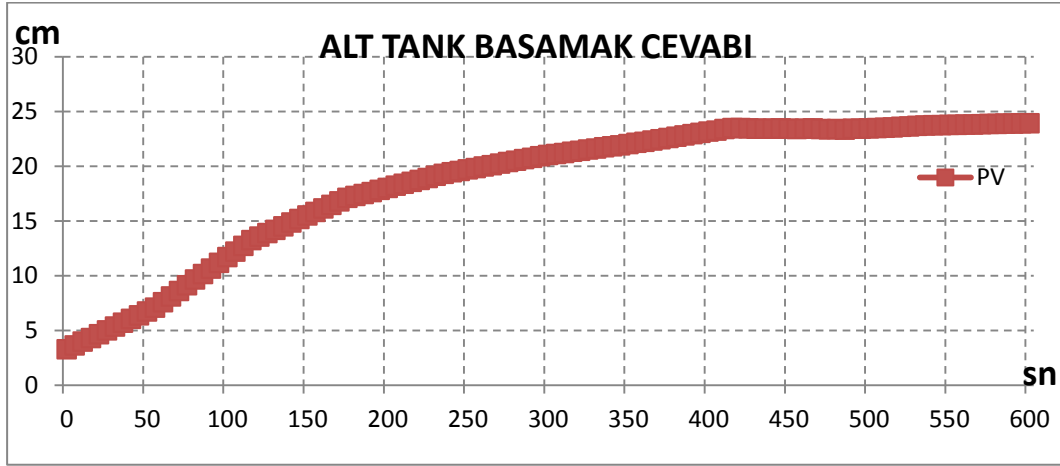
Çizelge 5.1 : Tank 1 ve tank 2 giriş/çıkış değerleri.

Pompa alıřma %si		llen Saniyeler	$Q_{in} \text{ (cm}^3/\text{sn)}$	$Q_{out} \text{ (cm}^3/\text{sn)}$
st Tank (Vana = %0)				
Alt Vana Kapalı				
Pompa	100%	11,1	169,9927928	
Pompa	50%	13,7	137,7313869	
Alt Vana Açık				
Pompa	100%	14,8	127,4945946	42,4981982
Pompa	50%	19,3	97,76787565	39,96351121
Alt Tank (Vana = %100)				
Alt Vana Kapalı				
Pompa	100%	10,2	184,9921569	
Pompa	50%	12,2	154,6655738	
Alt Vana Açık (2side)				
Pompa	100%	24	78,62166667	106,3704902
Pompa	50%	40	47,173	107,4925738
Alt Vana Açık (1 Vana)				
Pompa	100%	13,9	135,7496403	49,24251657
Pompa	50%	19,1	98,79162304	55,87395073
20 cm de 10 cm düřüř süresi				
Pompa	0%	18		104,8288889
Doldurulan hacim cm3		1886,92		

Ardından sistem vana oranları ve pompa hızları ayarlanarak st tanka $50 \text{ cm}^3/\text{sn}$ lik basamak fonksiyonu ve alt tanka $115 \text{ cm}^3/\text{sn}$ lik basamak fonksiyonları uygulanarak sistem cevapları gözlenmiştir.



Şekil 5.10 : Gerçek sistem üst tank basamak cevabı.



Şekil 5.11 : Gerçek sistem alt tank basamak cevabı.

Bu şekilde elde edilen sistem cevapları ve modelleri ise yukarıda matematiksel yolla elde edilen sistem cevaplarından biraz daha farklı olmuştur. Üst tank 25 cm'ye 600 saniyelik bir süreyle oturmuş, alt tank ise 24 cm'lik seviyeye 480 saniyelik sürede oturmuştur. Aşağıdaki basamak fonksiyonu uygulanması sonucu elde edilen transfer fonksiyonundan yararlanılarak;

$$Y(s) = K \frac{b}{a} \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{s+a} \right) \quad (5.8)$$

Sistemin yeni modelleri üst tank için $0,0041/(s + 0,0083)$ ve alt tank için $0,00217/(s + 0,010416)$ bulunmuştur. Ancak bu bulunan değerler saniye bazındadır. Kullandığımız Honeywell kontrolör ise dakika bazında çalışmaktadır. Denklemleri dakika bazında tekrar oluşturduğumuzda üst tank için model $0,246/(s + 0,498)$ ve alt tank için model $0,1302/(s + 0,625)$ şeklini almaktadır.

Bilindiği gibi sistem gereği bir vana ve bir pompa yardımı ile çift tankın seviyesi kontrol edilmeye çalışılmıştır. Bu işlem için her bir tank için ayrı kontrolör (LIC001 ve LIC002) kullanıldı. Sistem gereği 2 ayrı seviye kontrolü tek bir pompa ve tek bir vana ile yapılacağından araya matematiksel bir tasarım yapıldı. Bu tasarımda vananın açıklığı $\frac{LIC001.OP}{LIC001.OP+LIC002.OP}$ denklemi ve pompanın hız ayarı $LIC001.OP + LIC002.OP$ denklemi ile sağlandı.

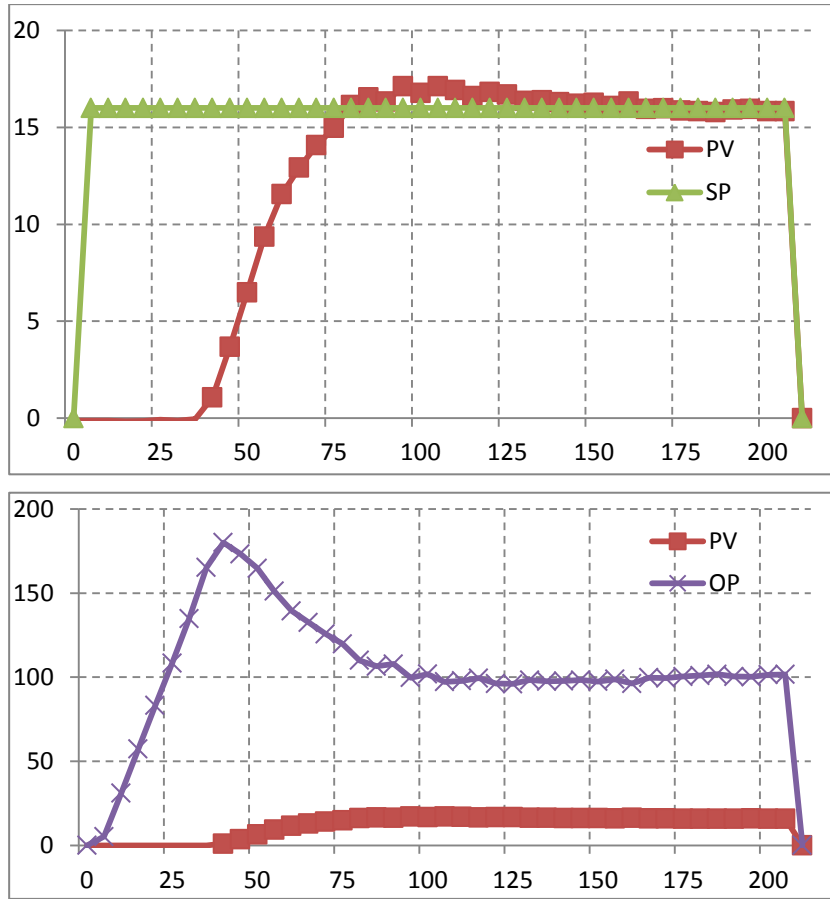
5.2 Alt Tank Kontrol İşlemi

Alt tank için çeşitli kontrol işlemleri yapılarak elde edilen PI parametreleri, kontrol çıktıları ve model ve model öngörülü kontrol çıktıları incelenmiş ve doğrulukları gözlenmiştir.

5.2.1 Alt tank PI ile kontrol işlemi

PI ile kontrol işlemi için gerekli olan PI parametreleri Matlab yardımıyla elde edilmiştir. Matlab PI tune özelliğinden yararlanarak üst tank sistem modeli için P , I değerleri sırasıyla 0,9579 ve 1,618 bulunmuştur. Aynı şekilde alt tank için de P, I değerleri 2,271 ve 4,814 bulunmuştur. Ancak matlab tune modeli $P+I(1/s)$ tir. Honeywell kontrolör EQA PI modeli ise $P (1+1/(I.s))$ şeklindedir. Honeywell sistemi için uygun I değerleri üst tank için 0,592 ve alt tank için 0,472 bulunmuştur.

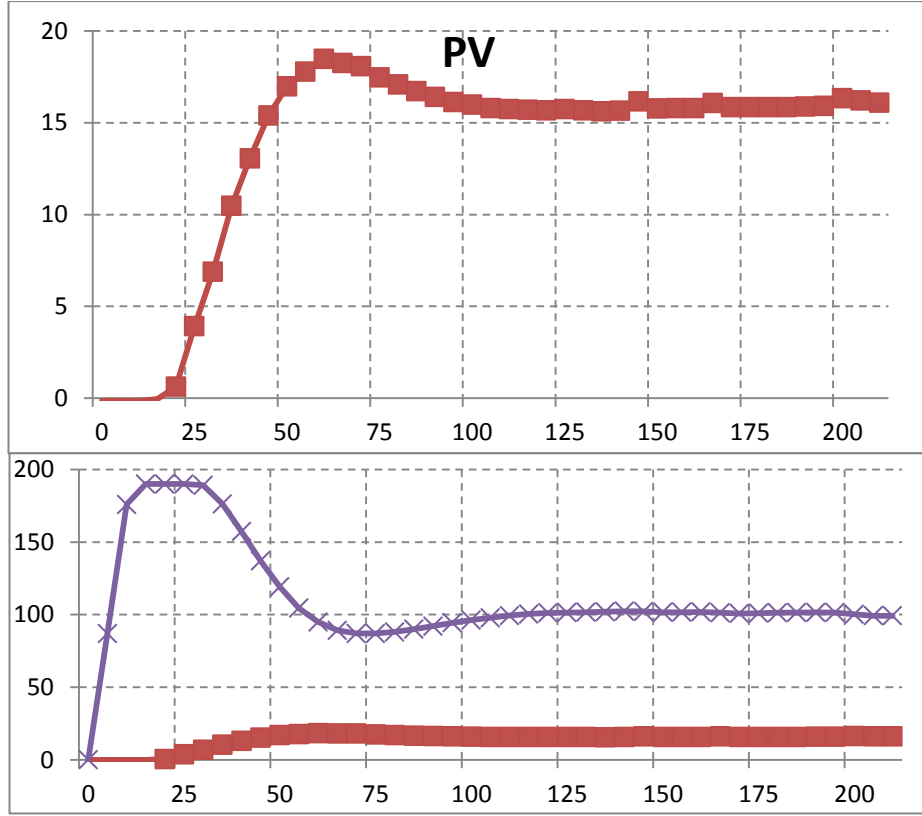
Alt tank için PI kontrolör ile elde edilen sonuç aşağıdaki gibidir.



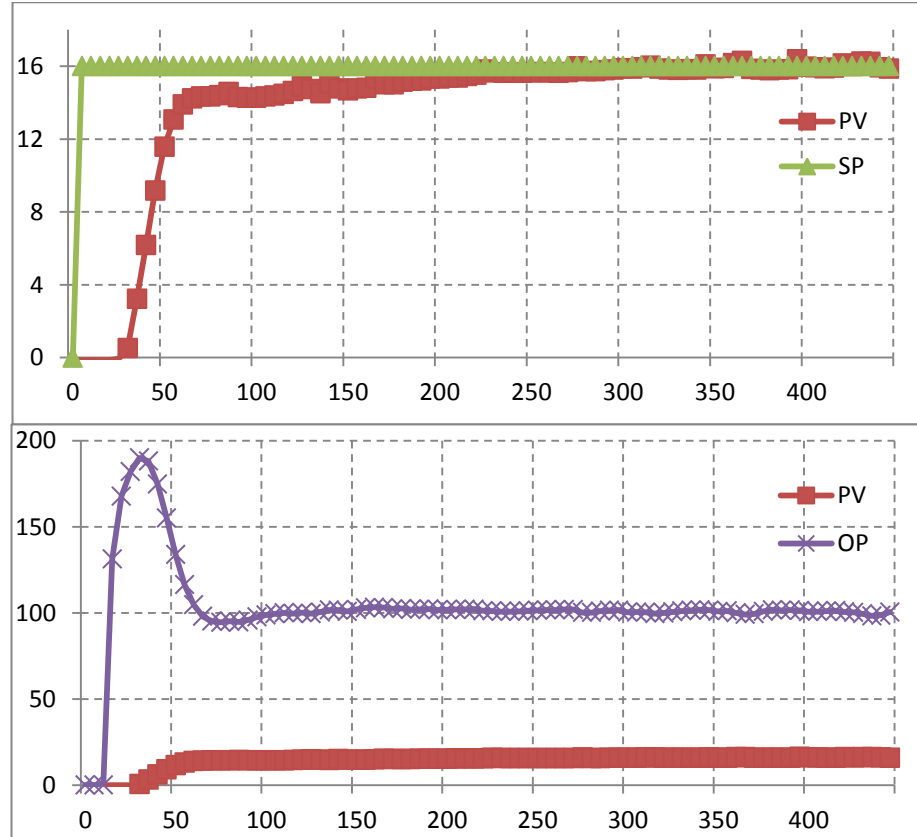
Şekil 5.12 : Alt tank için gerçekleştirilen PI kontrol çıktıları.

5.2.2 Alt tank MPC ile kontrol işlemi

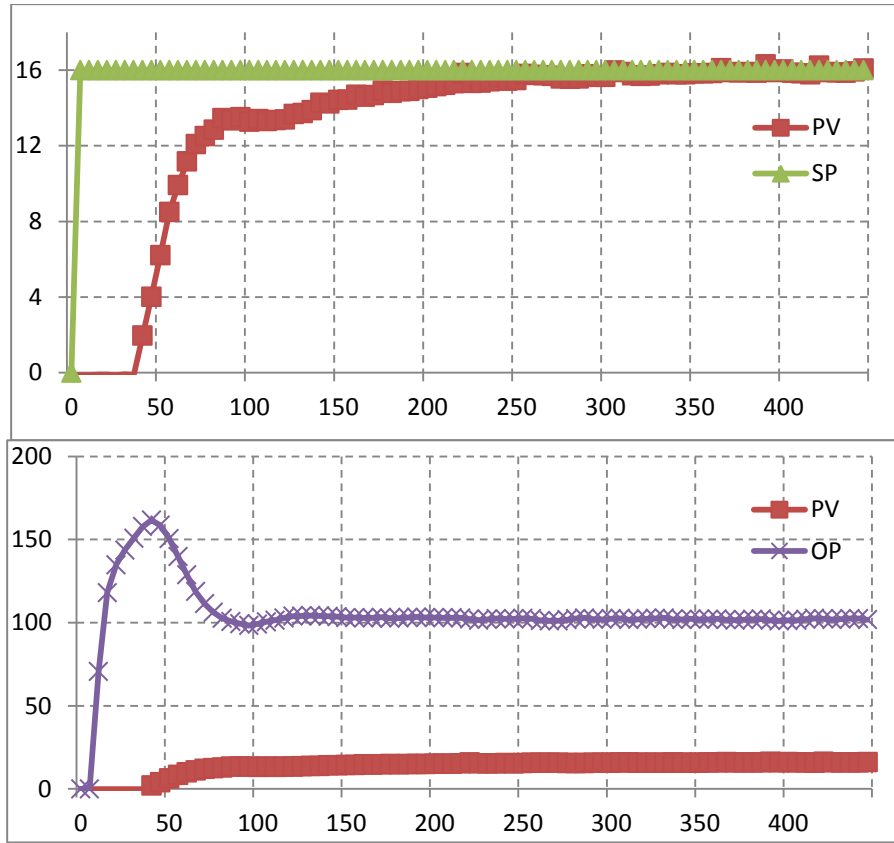
Ardından sistem modeli için farklı performans oranlarına göre model öngörülü kontrol işlemleri gerçekleştirilmiştir. Burada performans oranı ile sistem tek bir değişken ile rahatlıkla daha agresif veya daha dayanıklı bir hal alabilmektedir.



Şekil 5.13 : Performans oranı 0.5 için MPC çıktısı.



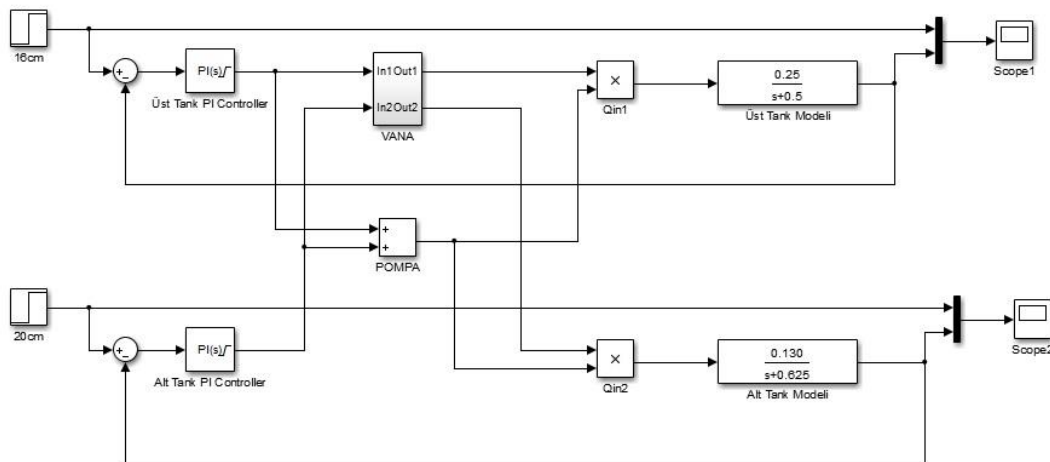
Şekil 5.14 : Performans oranı 1 için MPC çıktısı.



Şekil 5.15 : Performans oranı 1.2 için MPC çıktısı.

5.3 Çift Tank Kontrol İşlemi

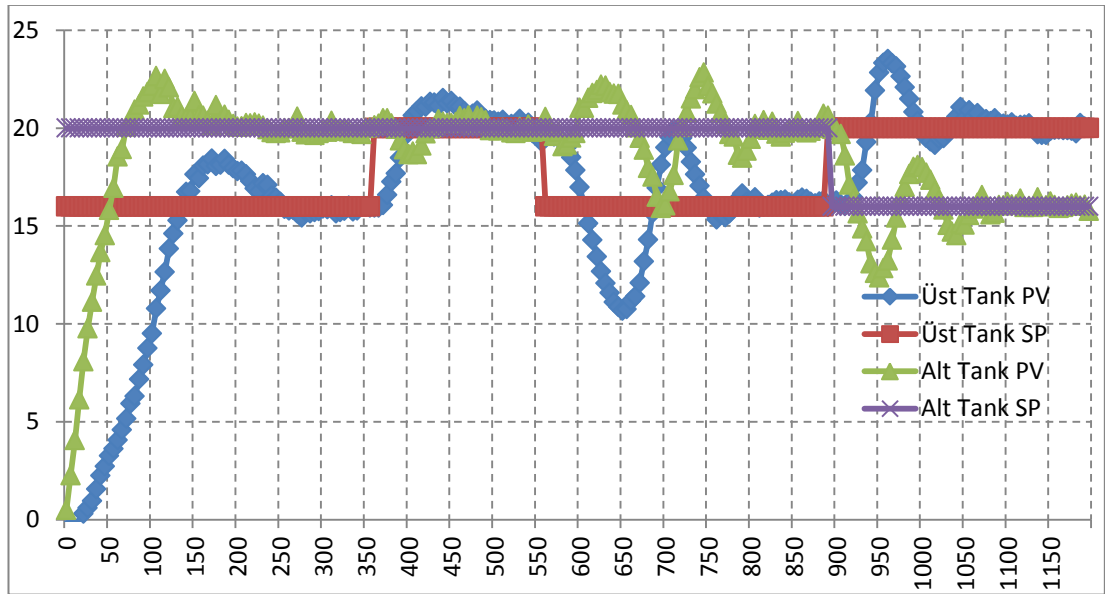
Şekil 5.16 daki kontrol diyagramına göre sırasıyla PI, MPC ayar değerli kontrol ve MPC aralık değerli kontrol işlemleri yapılmıştır. MPC kontroller için performans oranları 0.5 seçilmiştir.



Şekil 5.16 : Çift tank kontrol diyagramı.

5.3.1 Çift tank PI ile kontrol işlemi

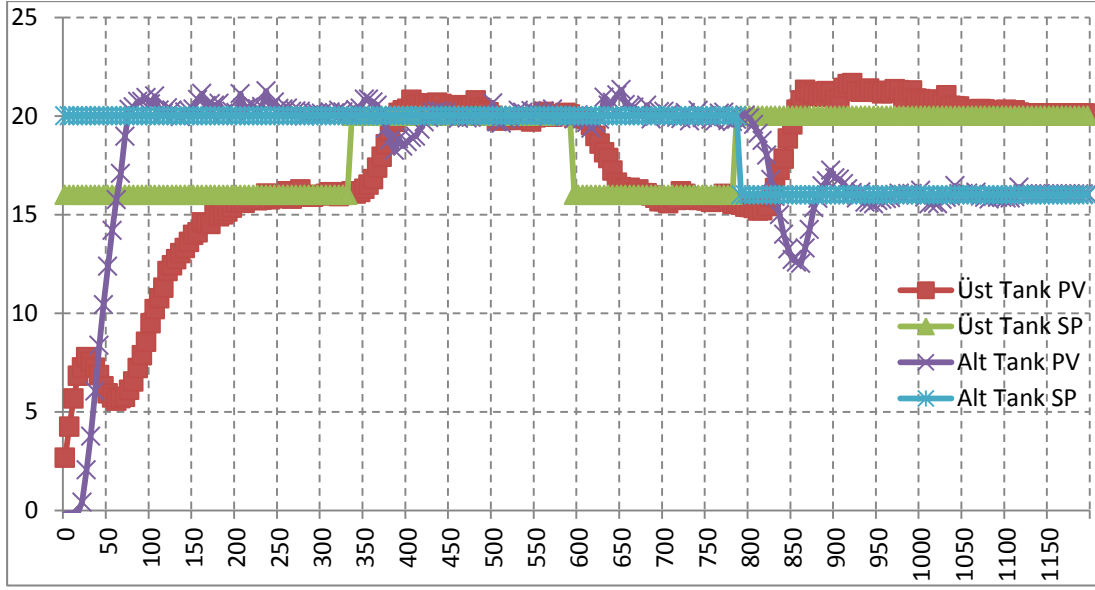
PI kontrolör ve yukarıdaki ayrıştırma denklemi kullanıldığında, 2 ayrı tank seviye kontrolü sonuçları aşağıdaki gibidir. Bölüm 5.2.1’de elde edilen PI parametreleri kullanılmıştır. Ayar değerleri ardı ardına değiştirilmiştir. Sırasıyla üst tank için 16 cm, alt tank için 20 cm ; üst tank için 20 cm, alt tank için 20 cm; üst tank için 16 cm, alt tank için 20 cm ve üst tank için 20 cm,alt tank için 16 cm ayar değerleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.17 deki gibidir.



Şekil 5.17 : Çift tank için gerçekleştirilen PI kontrol grafiği.

5.3.2 Çift tank ayar değerli MPC ile kontrol işlemi

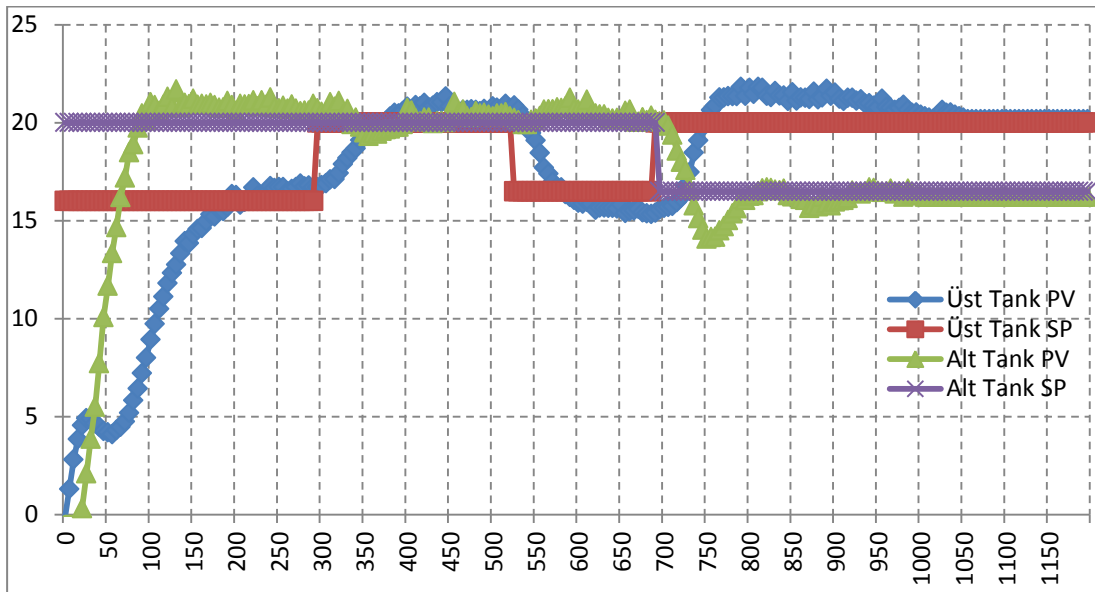
Model öngörülü kontrol için bölüm 5.1 de basamak fonksiyonları ile elde edilen tanklara ait modeller ayrı ayrı PID_PLA modülüne girilerek, ayrıştırma tasarımı yardımıyla kontrol işlemleri gerçekleştirilmiştir. Performans oranları 0.5 seçilmiştir. Ayar değerleri ardı ardına değiştirilmiştir. Sırasıyla üst tank için 16 cm, alt tank için 20 cm ; üst tank için 20 cm, alt tank için 20 cm; üst tank için 16 cm, alt tank için 20 cm ve üst tank için 20 cm,alt tank için 16 cm ayar değerleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.18 deki gibidir.



Şekil 5.18 : Çift tank için gerçekleştirilen ayar değerli MPC kontrol grafiği.

5.3.3 Çift tank aralık değerli MPC ile kontrol işlemi

Aralık değerli kontrol için ayar değerli kontrolde kullanılan parametreler aynı tutulmuştur. Tek fark ayar değeri olarak tek bir nokta değil bir aralık girilerek işlem gerçekleştirilmiştir. Ayar değerleri ardı ardına değiştirilmiştir. Sırasıyla üst tank için 16-16.5 cm, alt tank için 20-20.5 cm ; üst tank için 20-20.5 cm, alt tank için 20-20.5 cm; üst tank için 16-16.5 cm, alt tank için 20-20.5 cm ve üst tank için 20-20.5 cm, alt tank için 16-16.5 cm ayar değerleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar Şekil 5.19 deki gibidir.



Şekil 5.19 : Çift tank için gerçekleştirilen aralık değerli MPC kontrol grafiği.

5.4 Gerçek Sistem Kontrol İşlemi Sonuçları

Gerçekleştirilen sonuçlar göstermiştir ki model öngörülü kontrol iyi bir model elde edildiğinde PID kontrol yerine rahatlıkla kullanılabilmekte ve daha iyi sonuçlar elde etmektedir. Ayrıca Honeywell model öngörülü sistemin sahip olduğu performans oranı değişkeni ile sistem istenildiği şekilde daha agresif ve ya daha dayanıklı şekillerde çalıştırılabilmektedir.

Çizelge 5.2 : Alt tank kontrol işlemleri çıktıları.

	PI	MPC (PO=0.5)	MPC (PO=1)	MPC (PO=1.2)
Yükselme Zamanı	80 sn	45 sn	275 sn	305 sn
Tepe Zamanı	105 sn	60 sn	275 sn	305 sn
Yerleşme Zamanı (%2)	160 sn	90 sn	225 sn	255 sn
Aşım (%)	%6.5	13%	0%	0%

Çizelge 5.3 : Çift tank kontrol işlemleri çıktıları.

		Ayar Değeri = 16	Ayar Değeri = 20	Ayar Değeri = 16	Ayar Değeri = 20
ÜST TANK	PI	Yükselme Zamanı (sn)	140 sn	45 sn	50 sn
		Tepe Zamanı (sn)	175 sn	85 sn	95 sn
		Yerleşme Zamanı (%) (sn)	255 sn	135 sn	220 sn
		Aşım (%)	13,00%	7,00%	30,00%
	MPC Ayar Değeri	Yükselme Zamanı (sn)	220 sn	55 sn	75 sn
		Tepe Zamanı (sn)	220 sn	75 sn	75 sn
		Yerleşme Zamanı (%) (sn)	205 sn	100 sn	60 sn
		Aşım (%)	0,00%	3,50%	0,00%
	MPC Aralık Değeri	Yükselme Zamanı (sn)	200 sn	70 sn	55 sn
		Tepe Zamanı (sn)	200 sn	155 sn	100 sn
		Yerleşme Zamanı (%) (sn)	180 sn	165 sn	100 sn
		Aşım (%)	0,00%	3,90%	2,40%
	PI	Yükselme Zamanı (sn)	75 sn		40 sn
		Tepe Zamanı (sn)	110 sn		65 sn
		Yerleşme Zamanı (%) (sn)	195 sn	65 sn	250 sn
		Aşım (%)	11,00%	6,70%	20,00%
ALT TANK	MPC Ayar Değeri	Yükselme Zamanı (sn)	80 sn		50 sn
		Tepe Zamanı (sn)	110 sn		80 sn
		Yerleşme Zamanı (%) (sn)	125 sn	90 sn	70 sn
		Aşım (%)	5,00%	8,70%	6,00%
	MPC Aralık Değeri	Yükselme Zamanı (sn)	95 sn		45 sn
		Tepe Zamanı (sn)	135 sn		65 sn
		Yerleşme Zamanı (%) (sn)	120 sn	0 sn	75 sn
		Aşım (%)	0,00%	0,00%	3,60%
	PI	Yükselme Zamanı (sn)	75 sn		40 sn
		Tepe Zamanı (sn)	110 sn		65 sn
		Yerleşme Zamanı (%) (sn)	195 sn	65 sn	250 sn
		Aşım (%)	11,00%	6,70%	20,00%

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada endüstriyel proses kontrolünde kendine önemli ve geniş çaplı bir yer etmiş ve kullanımı hızla artan model öngörülü kontrol incelenmiştir.

Yapılan araştırmalar göstermiştir ki, model öngörülü kontrol gerçekten de sahip olduğu özellikler sayesinde bir çok kontrol probleminin altından başarıyla kalkabilmektedir. Model öngörülü kontrolün sahip olduğu içsel model kontrol edilen sistemin modeline ne kadar benzer ise model öngörülü kontrolün gerçekleştireceği kontrol işlemi de bir o kadar kusursuz olmaktadır. Ancak şu da belirtilmelidir ki hiç bir proses tam olarak modellenememektedir. Geliştirilen model öngörülü kontrolcüler her zaman bu model eksikliklerini de giderebilecek şekilde tasarlanmak zorundadır. Ayrıca kontrolcü tasarımı bir diğer önemli parameter ise, sahip oldukları en iyileme, optimizasyon yöntemleridir. Bu sisteme uygulanacak en iyi girişlerin seçiminde olabildiğince fazla işlem yükü olduğundan ve kontrol işleminin eş zamanlı olması gerektiğinden, kullanılacak metodun iyi seçilmesi ve minimum işlem yükü gerektirmesi gerekmektedir.

Çalışmanın devamında endüstride kullanılan bazı kontrol yapıları incelendi. Bunlardan Honeywell firmasına ait olan RMPCT (Robust Model Predictive Control Technology) detaylı olarak incelendi. Kullandığı bölge ve huni yapıları üzerinde duruldu. Ayrıca kontrolcünün çalışma adımları incelendi. Sahip olduğu en iyileme metodu ve LP/QP yapısını nasıl kullandığına göz atıldı.

Son olarak 4 sıvı seviye kontrol deney düzeneği üzerinde PI ve model öngörülü kontrol deneyleri yapılarak, elde edilen sonuçlar incelendi.

Günümüzde model öngörülü kontrol işlemi yapan bir çok endüstriyel kontrolcü vardır. Ancak prosese ait model oluşturma ve en iyi girişlerin seçimi kısmında istenilen düzeye gelinememiştir. Gelecekte sistem modellemesi ve en iyi girişlerin oluşturulmasındaki gereklilikler hakkında çalışmalar yapmak amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- [1] **Demir G. H.**, (2012). Kentiçi Otoyollarda Model Tabanlı Öngörüye Dayalı Değişken Hız Sınırlaması İle Akım Denetimi, Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [2] **Öz B.**, (2014). Pnömatik Bir Sistemin Nonlinear Modellenmesi Ve Model Öngörülü Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [3] **Camacho, E.F. ve Bordons, C.**, (1999). Model Predictive Control, Springer,Berlin
- [4] **Bequette W.**, (2007). Non-linear Model Predictive Control:A Personal Retrospective, The Canadian Journal of Chemical Engineering
- [5] **Dornido S. ve Esquembre F.**, (2003). The quadruple-tank process: An interactive tool for control education, National Distance Education University
- [6] **Ada C.**, (2011). Havadan karaya atılan bir tank-savar füzesi için otopilot tasarımları, karşılaştırılması ve terminal güdüm çalışması, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [7] **Maciejowski J. M.**, (2002). Predictive Control with Constraints, Prentice Hall, ISBN0-201-39823-0, United Kingdom
- [8] **EFE M. Ö.**, (2012). Otomatik Kontrol sistemleri, Seçkin Yayınevi, ISBN 978-975-02-1990-0
- [9] **Raff T., Huber S., Nagy Z. K. ve Allgower F.**, (2006). Nonlinear Model Predictive Control of a Four Tank System: An Experimental Stability Study,ISBN0-7803-9797-5, Germany
- [10] **Kor H. H.**, (2010). Dörtlü Tank Sisteminin Gerçeklenmesi Modellenmesi Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [11] **Wang P.**, (2010). Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB, Springer,ISBN 978-1-84996-836-2, London
- [12] **Lu Z.J.**, (2002). Process Facility Control Systems Using An Efficient Prediction Form And Methods Of Operating The Same, Honeywell INC, Patent No US 6,347,254 B1
- [13] **Lu Z. J. ve Macarthur J.W.**, (1994). Method Of Multivariable Predictive Control Utilizing Range Control, Honeywell INC, Patent No 5,351,184
- [14] **Honeywell** (2013). Experion Control Builder Components Theory, Document No: EPDOC-XX16-en-430A
- [15] **Honeywell** (2014). Experion PKS Control Building User's Guide, Document No: EPDOC-XX19-en-430B

- [16] **Cole G.R.**, (2013). Honeywell Experion System For Teaching Purposes, Murdoch University, Perth, Western Australia
- [17] **Streeter, V. L., Wylie E. G, Bedford K. W.**, (1985). Fluid Mechanics, McGraw-Hill
- [18] **Sauter Components**. AXS 111S: Continuous drive (with positioner) for unit valves, Switzerland

ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad: Serdar ÖZDEMİR

Doğum Yeri ve Tarihi: İzmit, 30.11.1988

Adres: Karamürsel / KOCAELİ

E-Posta: sdrzdmr41@gmail.com

Lisans: Uludağ Üniversitesi – Elektronik Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller: İzofarm Endüstriyel Otomasyon - Proje Mühendisi –
2 yıl