

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANLIK DOĞRUSALLAŞTIRILMIŞ SİSTEMLERDE BULANIK MODEL
TABANLI ÖNGÖRÜLÜ KONTROL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Alparslan ESMERDAĞ**

Anabilim Dalı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

Programı : Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği

HAZİRAN 2010

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ANLIK DOĞRUSALLAŞTIRILMIŞ SİSTEMLERDE BULANIK MODEL
TABANLI ÖNGÖRÜLÜ KONTROL**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Alparslan ESMERDAĞ
504071102**

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 07 Mayıs 2010

Tezin Savunulduğu Tarih : 10 Haziran 2010

**Tez Danışmanı : Prof. Dr. İbrahim EKSİN (İTÜ)
Diğer Jüri Üyeleri : Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA (İTÜ)
Yrd. Doç. Dr. Osman Kaan EROL (İTÜ)**

HAZİRAN 2010

ÖNSÖZ

Tüm yüksek lisans öğretimim boyunca gerek aldığım derslerde gerekse tez çalışmam sırasında çok değerli fikirlerini ve yardımlarını esirgemeyen danışman hocam sayın Prof Dr. İbrahim Eksin'e ve sayın Prof Dr. Müjde Güzelkaya'ya; özellikle tez çalışmalarım sırasında yorulmadan; sıkılmadan bana yardım eden değerli dostum Ar. Gör. Tufan Kumbasar'a; hayatımda elde ettiğim tüm başarıları borçlu olduğum sevgili aileme ve abim Eyüp Esmerdağ'a ve çok kıymetli Esra Yatar'a sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Mayıs 2010

Alparslan Esmerdağ
Elektrik-Elektronik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	ix
ŞEKİL LİSTESİ	xi
ÖZET	xiii
SUMMARY	xv
1. GİRİŞ	1
1.1 Sistem Tanımlama Ve Modelleme	1
1.2 Bulanık Mantıkla Modelleme.....	2
1.2.1 Bulanık sistemin iç yapısı.....	3
1.3 Kural Tabanlı Bulanık Modeller.....	4
1.3.1 Dilsel bulanık model	5
1.3.2 Takagi –Sugeno tipi bulanık model.....	5
1.4 Üyelik Fonksiyonlarından Doğrusal Model Çıkarım Mekanizması.....	6
1.5 Modelin Doğrusallaştırılması	9
2. MODEL TABANLI ÖNGÖRÜLÜ KONTROL	13
2.1 İçsel Model Yapısı Ve Kullanımı	15
2.2 Gerileyen Ufuk Uygulaması.....	15
2.3 En İyi Girişlerin Hesaplanması.....	19
2.4 Sabit Çıkış Bozucusu.....	22
3. SİMÜLASYON VE UYGULAMALAR	25
3.1 Amaç.....	25
3.2 Doğrusal Olmayan Sistemin Anlık Doğrusal Modellerinin Çıkarılması.....	25
3.3 Model Öngörülü Kontrolör Tasarımı	32
3.4 Bozucunun Sisteme Etkisi	37
3.5 Belirli Giriş Aralığında Elde Edilen Model İçin MPC Tasarımı.....	39
4. SONUÇ VE ÖNERİLER	43
KAYNAKLAR	45
EKLER	47

KISALTMALAR

ARX	: Kendinden Ayarlanabilen Model
FMPC	: Bulanık Model Öngörülü Kontrol
IMC	: İçsel Model Kontrolü
MBPC	: Model Tabanlı Öngörülü Kontrol
MISO	: Çok Giriş Tek Çıkışlı
MPC	: Model Öngörülü Kontrol
NARX	: Doğrusal Olmayan Kendinden Ayarlanabilen Model
SISO	: Tek Giriş Tek Çıkışlı
TS	: Takagi Sugeno

ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 1.1 : Tank sistem parametreleri	26

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Farklı giriş türleri için fonksiyon türleri	3
Şekil 1.2 : Bulanık mantıkla modelleme algoritması	4
Şekil 1.3 : Üyelik fonksiyonları	5
Şekil 1.4 : Bulanık model için kullanılan üyelik fonksiyonu	7
Şekil 1.5 : Üyelik fonksiyonunda simetri	8
Şekil 1.6 : İki girişli bir sistem için çıkış düzlemi	9
Şekil 1.7 : Anlık doğrusallaştırılmış sisteme uygulanacak kontrol yapısı	10
Şekil 2.1 : Öngörülü kontrol algoritması	14
Şekil 2.2 : İçsel modellenli öngörülü kontrol yapısı	15
Şekil 2.3 : Giriş, çıkış ve referans işaretleri	17
Şekil 2.4 : Sisteme etkileyen çıkış bozucusu ve gürültü	23
Şekil 3.1 : Küresel tank sistemi	25
Şekil 3.2 : Tank sisteminin Simulink'te kurulumu	26
Şekil 3.3 : Blok haline getirilmiş sisteme basamak giriş uygulanması	27
Şekil 3.4 : Sistemin açık çevrim basamak cevabı	27
Şekil 3.5 : MATLAB'da bulanık modeli elde etmeyi sağlayan "anfis editor"	28
Şekil 3.6 : Üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi	29
Şekil 3.7 : Sistemin bulanık modelinin detayları	30
Şekil 3.8 : Anlık doğrusallaştırma mekanizması	31
Şekil 3.9 : MPC ile kontrol edilen anlık olarak doğrusallaştırılmış sistem	32
Şekil 3.10 : Referansı ve sistem cevabını aynı anda gösteren yapı	34
Şekil 3.11 : Giriş sinyali (referans) ile sistem çıkışının karşılaştırılması	35
Şekil 3.12 : Kontrol işareti	35
Şekil 3.13 : Referans ile sistem çıkışının davranışı	35
Şekil 3.14 : Sisteme uygulanan zamanla değişen giriş sinyali	35
Şekil 3.15 : Bozucunun sisteme uygulanması	36
Şekil 3.16 : 0.1 metre seviyesindeki bozucunun sisteme etkisi	37
Şekil 3.17 : 0.2 metre seviyesindeki bozucunun sisteme etkisi	37
Şekil 3.18 : Giriş sinyali 4 iken açık çevrim cevabı	38
Şekil 3.19 : Deneme yanılma yöntemi ile sistem modelleme	39
Şekil 3.20 : Sistemin ve modelinin açık çevrim cevabı	39
Şekil 3.21 : Sistem ve modelinin MPC ile kontrol edilmesi	40
Şekil 3.22 : MPC ile kontrol edilen sistemin cevabı	40
Şekil 3.23 : MPC ile kontrol edilen modelin cevabı	41

ANLIK DOĞRUSALLAŞTIRILMIŞ SİSTEMLERDE BULANIK MODEL TABANLI ÖNGÖRÜLÜ KONTROL

ÖZET

Model Öngörülü Kontrol, 1980lerden itibaren özellikle kimya endüstrisinde ve petrol rafinerilerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Özellikle süreç denetimlerinde bilgisayar kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte Model Öngörülü Kontrol yöntemi en yaygın olarak kullanılan gelişmiş kontrol yöntemi olmuştur.

Birçok teknik buluşta oluşan genel eğilimin aksine Model Öngörülü Kontrol yapısı ilk olarak endüstriyel ortamda gerçekleşmiştir. Birçok farklı isimle ve farklı şekillerde; teorik özellikleri henüz tam olarak ortaya koyulmadan çok önce uygulaması yapılmıştır. 1980'lerin ortasından itibaren de akademik dünyanın ilgisini çekmeye başlamıştır. Model yapısı seçimi, öngörü ufku ve eniyileme kriteri seçimindeki esneklik nedeniyle de kullanıcılar model tabanlı öngörülü kontrol yapısını kendi sistemlerine kolayca uygulayabilmişlerdir.

Doğrusal sistemler için sayısız seçenek sunan gelişmiş kontrol teorileri, doğrusal olmayan sistemlerde aynı performansı gösterememektedir. Geleneksel modellerin aksine, bulanık modeller doğrusal olmayan süreçleri de iyi bir şekilde ifade edebilmektedir. Model Öngörülü Kontrol uygulanan bulanık modeller ise en karmaşık doğrusal olmayan sistemleri bile yaklaşık olarak gerçekleyebilen Takagi-Sugeno (TS) tip bulanık modellerdir. Doğrusal olarak modellenemeyen sistemler bulanık olarak modellenerek ortaya çıkan model kolaylıkla kontrol edilebilmektedir.

Bu çalışmada da bir sistem için anlık doğrusallama yöntemiyle her çalışma noktasında farklı bir doğrusal model çıkarılması ve bu doğrusal modellerin MPC yöntemiyle kontrol edilmesi sağlanmıştır. Çıkarılan anlık modeller, önceden belirlenmiş örnekleme zamanına göre sistemin bulanık yapısı kullanılarak elde edilmektedir. Buna ek olarak ikinci bir kontrol yöntemiyle olarak da; sistemin açık çevrim cevabından elde edilen bir doğrusal model de Model öngörülü kontrol ile kontrol edilmiş ve kontrol edilen sistemlerin kapalı çevrim davranışları karşılaştırılmıştır.

Çalışmada doğrusal olmayan bir sistem olarak; bir taraftan dolan; bir muslukla boşalan bir tank sisteminin davranışı benzetim ortamında ele alınmıştır.

FUZZY MODEL BASED PREDICTIVE CONTROL OF INSTANT LINEARIZED SYSTEMS

SUMMARY

Model-based Predictive Control (also known as Model Predictive Control) has been widely in use till 1980s especially in chemical processes or oil industry. After the rapid growth of usage of computers in process control, Model Predictive Control is currently the most commonly implemented process control methodology for plants with its advanced technology and easy-adaptability.

Unlike many inventions in science and engineering history, MPC structure and technology was first used in industry and process plants. With various names and applications; it has been implemented in different processes before the total understanding its theoretical properties. However, eventually in 1980s, it attracted the attention of academic world and therefore many studies and workshops have done. The flexibility in the choice of model structures, prediction and control horizon and optimisation criteria, allowed the engineers easily apply and design MPC to their processes.

For linear systems, there are unlimited number of methods developed in both advanced or classical control; however for nonlinear systems, most of these methods are either not applicable or having a bad performance. Contrary to classical models and system identifiers, fuzzy models represent the actual system quite well and realistic. Takagi-Sugeno type fuzzy models are chosen when Model-based Predictive Controllers are used since they are proved to show the best performance in approximating complex nonlinear systems. Therefore, systems can be controlled easily after they are linearly represented.

In this study, a model-based predictive controller is designed based on the instantaneously linearized models that are extracted from fuzzy process model of nonlinear system for each operating point. Instant linear models are obtained at each operating time based on the predefined sampling time and Takagi-Sugeno model of nonlinear system. Addition to this, a second method is used to control the system: a model obtained from the open loop step response of system and that model is controlled again with MPC. At the end of the study, the performance of these two methods is compared.

During simulations a nonlinear tank with a continuous input and output is used as nonlinear model with the aim of the control of the water level inside.

1. GİRİŞ

Model tabanlı öngörülü kontrol (MBPC) ya da bilinen diğer adıyla model öngörülü kontrol (MPC) metodunda kontrol olayı, her örnekleme anında takip etme hatasını sıfırlamaya çalışan bir eniyileme problemini çözerek elde edilir. Kontrol edilmek istenen doğrusal model ise, sistemin TS bulanık modelinden elde edilmiş bir yöntem kullanılarak anlık olarak elde edilir. Böylece her örnekleme anı için kontrol edilmesi gereken bir model çıkartılmış olur. Bu model için model öngörülü kontrolör, o anki değerleri ilk değer olarak alıp; önceden belirlenen öngörü ufku boyunca hatayı sıfırlayan eniyileme problemini çözer. Öngörü ufku boyunca uygulanan girişlerden en iyi sonucu vereni ise sisteme uygulayıp; gerçek sistemde de en iyi sonucu elde etmeye çalışır [1].

1.1 Sistem Tanımlama Ve Modelleme

Bir sistemin davranışlarını ve değişik girişlere olan tepkisini matematiksel olarak ifade etmeye modelleme denmektedir. Gerçek dünyadaki birçok sistemde sistemin genel yapısı ve doğası belirlenebilir olsa da içsel parametrelerinin düzgün bir biçimde belirlenme süreci ciddi problemler oluşturmaktadır. Bu yüzden kontrol teorisi içinde birçok sistem tanımlama metodu geliştirilmiştir. Sistem tanımlamanın amacı, belirli bir sisteme veri giriş-çıkışı ilişkisinden, daha sonra sistem üzerinde tekrar yapılacak çalışmalarda kullanılacak güvenilir bir matematiksel model kurmaktır. Bu model;

- Sistemin davranışının öngörülebilmesi
- Sistem davranışının istenilen yönde kontrol edilmesi ve yönlendirilebilmesini hedef edinir.

Fiziksel sistemlerin birçoğu doğrusal olmayan sistemler olduğundan klasik kontrol teorisinde kullanılan sistem tanımlama metodları ancak yaklaşık modeller verebilmektedir. Dolayısıyla sistemin matematiksel davranışını ifade edebilmek için sistemin giriş ve çıkışları kullanılarak “kara-kutu modeli” denilen bir yöntem kullanılmaktadır. Sistemin kara kutu modeli yalnızca sayısal davranışını ortaya

koymak için kullanılabilir. Kara kutu modeliyle elde edilen parametreler, sistemin içsel dinamiklerinde herhangi bir ifadeye karşılık gelmemektedir. Bu yüzden sistemin gerçek doğasını anlamaktan ziyade sayısal modellemesini yapma olanağı sunar ki bu pek çok endüstriyel sistem için yetersiz olmaktadır.

Bu dezavantajların sonucunda da akıllı kontrol ve modelleme algoritmaları geliştirilmiştir. Bulanık mantıkla modelleme yöntemi de bunlardan biridir. Bu akıllı algoritmalar ise doğrusal olmayan sistemler için çok daha başarılı modeller verebilmektedirler.

1.2 Bulanık Mantıkla Modelleme

Bulanık mantıkla modelleme hem doğrusal hem de doğrusal olmayan sistemlerde kullanılabilir; alternatif bir tasarım metodolojisidir. Bulanık mantık kullanılan kontrol sistemlerinde dilsel ifadeler ve bunlar arasındaki ilişkiler temel alınmıştır. Bu dilsel ifadelerin oluşturduğu kümeler de bulanık kümeler adı verilmektedir. Bulanık küme veya bulanık mantık kullanılan statik veya dinamik bir sisteme ise bulanık sistem denmektedir. Bulanık kümeler bir sistem içinde bir çok değişik şekilde yer alabilirler:

- Sistemin tanımında: Bir sistem doğrudan eğer-o halde kuralları kullanılarak bulanık mantık ilişkileriyle tanımlanabilir. Örneğin:
 - EĞER ısıtma sistemi kuvvetliyse, O HALDE sıcaklık hızla yükselecektir.
- Sistem parametrelerinin sınırlarının belirlenmesinde: Diferansiyel veya cebirsel fonksiyonlarla tanımlanan sistemlerde gerçek sayılar yerine bulanık sayılar kullanılıyor olabilir:

$$○ y = \tilde{3}x + \tilde{5}z$$

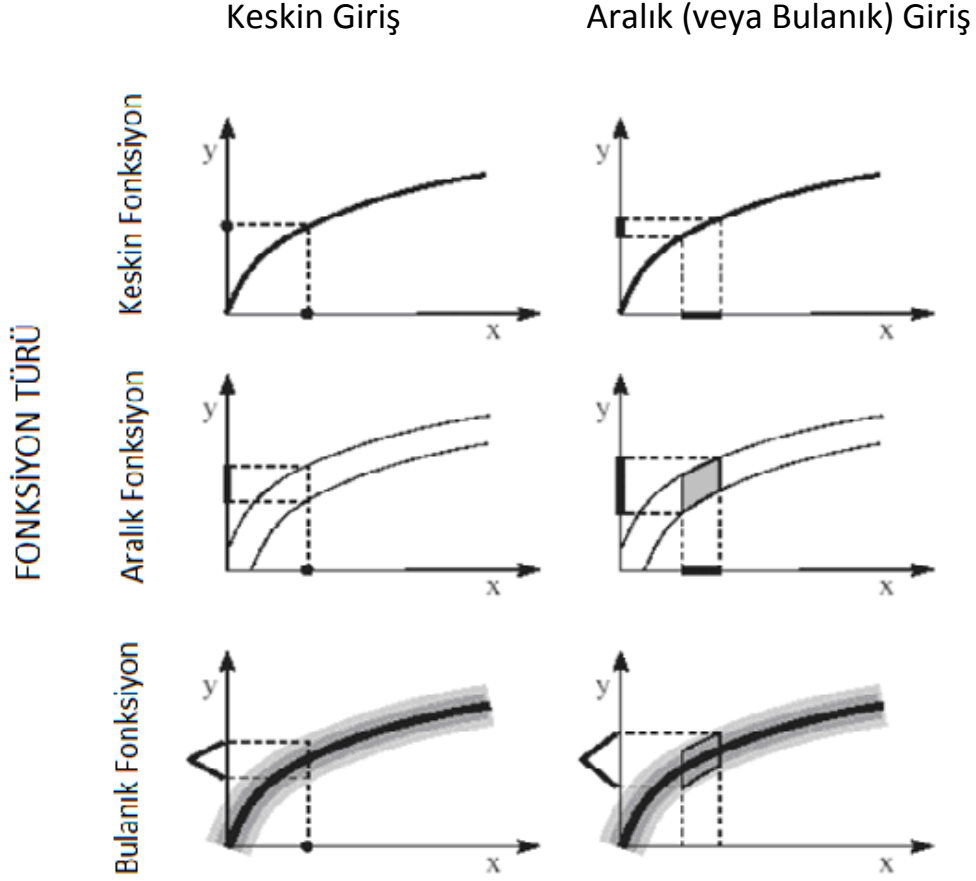
Bu ifadedeki $\tilde{3}$ ve $\tilde{5}$ ifadeleri yaklaşık 3 ve yaklaşık 5 olmak üzere kesinlik belirtmeyen ifadelerdir.

- Giriş, çıkış durumlarında: Sistem girişleri gürültülü veriler veya öznel ifadeler (yüksek, güzel) içeriyor olabilir. Bulanık sistemler böyle giriş çıkış durumları içerebilir.

Bulanık sistemler yukarıdaki özelliklerden aynı anda bir veya birkaçını içeriyor olabilir. Bunun yanı sıra, bulanık sistemler, belirgin değerli sistemlerin genişletilmiş

bir ifadesi olan aralık değerli sistemlerin genelleştirilmiş hali olarak görülebilir. Bu durum Şekil 1.1’de ayrıntılı olarak gösterilmiştir.

GİRİŞLER



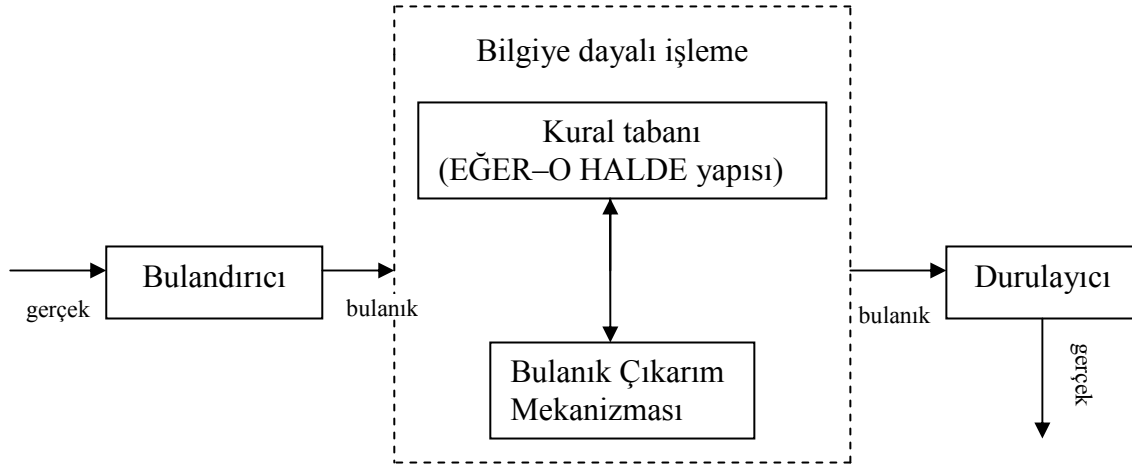
Şekil 1.1 : Farklı giriş türleri için fonksiyon türleri

Şekilde görüldüğü gibi bulanık fonksiyon hem sistem fonksiyonlarından hem de sistem girişinden bağımsızdır. Bulanık mantıkla modellemenin sistem modellemesinin kolaylaştırmasının önemli nedenlerinden ilki bulanık fonksiyonla ifade etmenin getirdiği esnekliktir [2].

1.2.1 Bulanık sistemin içyapısı

Bulanık tabanlı sistemler öncelikle gerçek sistemin bulandırıcı, kural tabanlı bir çıkarım mekanizması ve sonra da çıkan verilerin durulayıcı yapıdan geçmesi akışına dayanır. Şekil 1.2’de görüldüğü gibi bulandırıcının girişinde ve durulayıcının çıkışında gerçek değişkenler varken, bulandırıcıdan girip durulayıcının önüne kadar olan süreç dilsel ve bulanık ifadeler yer almaktadır.

Şekil 1.2’de genel olarak bir bulanık sistemin içyapısı görülebilmektedir. Gerçek sistemin girişi genellikle bir ölçekleme çarpanıyla çarpıldıktan sonra bulanık sisteme girer ve içeride gerekli işlemler tamamlandıktan sonra önce durulayıcı ile gerçek sayılara daha sonra da bir çıkış ölçekleme çarpanıyla gerçek sistem çıkışına çevrilir [3].



Şekil 1.2 : Bulanık mantıkla modelleme algoritması

1.3 Kural Tabanlı Bulanık Modeller

Kural tabanlı bulanık sistemlerde değişkenler arasındaki ilişkiler;

- EĞER “önerme” doğruysa O HALDE “sonuç”

şeklindeki genel bir eğer-o halde formuyla gösterilmektedir. Önermedeki ifade her zaman \tilde{x} - A ise benzeri bir bulanıklık içerir. Bu ifade de \tilde{x} dilsel bir değişken iken; A dilsel bir sabiti göstermektedir. Önermenin doğruluk değeri ise ifadedeki \tilde{x} ve A terimlerinin benzerlik değerine bağlıdır. Eğer-o halde kural yapısının sonuç kısmına göre temel olarak 2 tip kural tabanlı bulanık model vardır:

- Dilsel bulanık modeller: hem önerme hem sonuç kısmı bulanık ifadelerden oluşur
- Takagi-Sugeno tipi bulanık modeller: öncül kısmı bir bulanık önerme içerirken sonuç kısmı belirgin (kesin) bir fonksiyon içerir.

1.3.1 Dilsel bulanık modeller

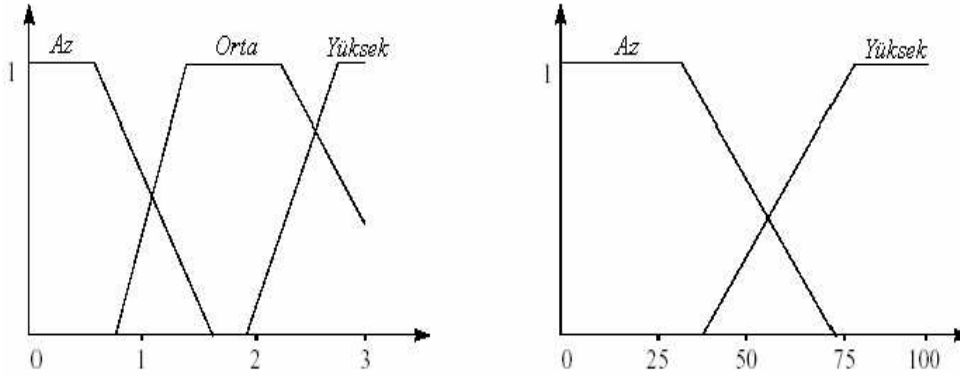
Hem önerme kısmı hem de sonuç kısmı bulanık terimler içeren kural tabanlı modellere dilsel bulanık model denir. Bunlar Mamdani tipi kurallar olarak da adlandırılır.

- K_i : EĞER \tilde{x} A_i ise O HALDE \tilde{y} B_i 'dir.

Bu ifadede \tilde{x} girişteki dilsel değişken; A_i ise giriş dilsel terimi iken \tilde{y} çıkış dilsel değişkeni B_i ise çıkış dilsel terimleridir. Örnek olarak basit bir ısıtma sistem ele alırsak; giriş ve çıkış arasındaki ilişki aşağıdaki kurallarla ifade edilebilir:

- K_1 : EĞER gaz akışı AZ ise O HALDE sıcaklık artışı AZ olur.
- K_2 : EĞER gaz akışı ORTA ise O HALDE sıcaklık artışı YÜKSEK olur.
- K_3 : EĞER gaz akışı YÜKSEK ise O HALDE sıcaklık artışı AZ olur.

Bu dilsel değişkenlerin üyelik fonksiyonları olarak karşılıkları da aşağıdaki gibi gösterilmektedir [2]:



Şekil 1.3 : Üyelik fonksiyonları

1.3.2 Takagi-Sugeno tipi bulanık model

Bu çalışma boyunca, Mamdani tipi bulanık modellerin özel bir formu olarak görülebilecek sıfırıncı derece Takagi-Sugeno model yani diğer bir ifadeyle çarpım-toplam tekil çıkışlı (product-sum crisp type) model ele alınmaktadır. Bu tipteki bulanık modeller aşağıdaki gibi bir kural setiyle ifade edilirler:

- $K_{i1}; \dots; K_{iN}$: EĞER $e_1 = A_i$ VE \dots VE $e_2 = B_j$ ise O HALDE $u = u_{ij}$ olur.

Bu ifade de K_i bulanık kural setini, $e = [e_1; \dots; e_N]^T$ ise bulanık kontrolörün tüm girişlerini kapsayan N elemanlı vektörü ifade eder.

u_{i_1, \dots, i_N} ifadesi bulanık model çıkışına tekabül eden nümerik değeri ifade eder; bulanık bir küme değildir. Bu tip, yani her kurala karşılık tek bir nümerik çıkışa sahip kurallara sahip olan kontrolörlere tekil çıkışlı bulanık model ismi verilir.

Örneğin iki girişe bir çıkışa sahip bir sistem için $e_1 = e$ ve $e_2 = e$ olarak düşünersek; e ve e 'ne ait dilsel terimler A_1 ve B_1 sabitleri olmaktadır [4].

1.4 Bulanık Model Üzerinden Anlık Doğrusal Modelin Çıkarım Yöntemi

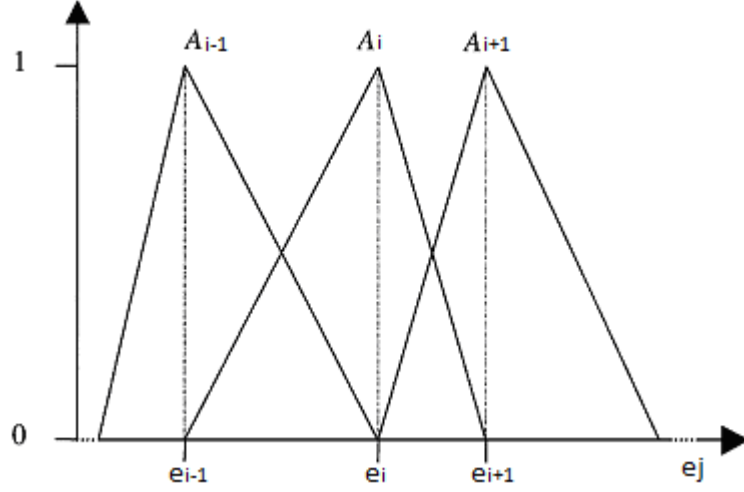
Sistemin modeli Takagi-Sugeno tipi bulanık kurallarla tanımlandıktan sonra bulanık modellemeyi tamamlamak ve çıkış değerini bulmak için durulayıcı yöntemlerinden ağırlık merkezi yöntemi kullanılmaktadır. Herhangi bir e girişi için çarpımların toplamına dayanan ağırlık merkezi yöntemi (product-sum gravity method) kullanılır ve u_{ij} 'lerin ağırlıklı ortalaması alınır; bulanık modelin yani u 'nun gerçek çıkış değeri denklem (1.1)'deki gibi olur:

$$u = \frac{\sum_{i,j} f_{ij} u_{ij}}{\sum_{i,j} f_{ij}} \quad (1.1)$$

u değeri bulanık modelin çıkışı olduğundan gerçek bir değerdir ve Şekil 1.2'de de görüldüğü gibi durulayıcının çıkışı olmaktadır. Denklem (1.1)'deki f_{ij} ifadesi ise önermenin öncül kısmının gerçek değeridir ve çarpım-toplam çıkarım metoduyla hesaplanmaktadır.

$$f_{ij} = A_i(e)B_j(e) \quad (i \in I, j \in J) \quad (1.2)$$

Bu çalışmada her bulanık dilsel terimi ifade etmek için Şekil 1.4'de görüldüğü gibi bir üçgen üyelik fonksiyonu kullanılmaktadır.



Şekil 1.4 : Bulanık model için kullanılan üyelik fonksiyonu [4]

Şekil 1.4'deki gösterime göre e 'nin alacağı herhangi bir değer için iki üyelik fonksiyonu ateşlenmiş olacaktır. Yani z 'nin e_j eksenindeki her bir değeri iki üçgeni kestiğinden; iki A değerine sahip olmuş olacak. Bu değerler de üçgenler üzerinden geometrik olarak şu şekilde elde edilmektedir:

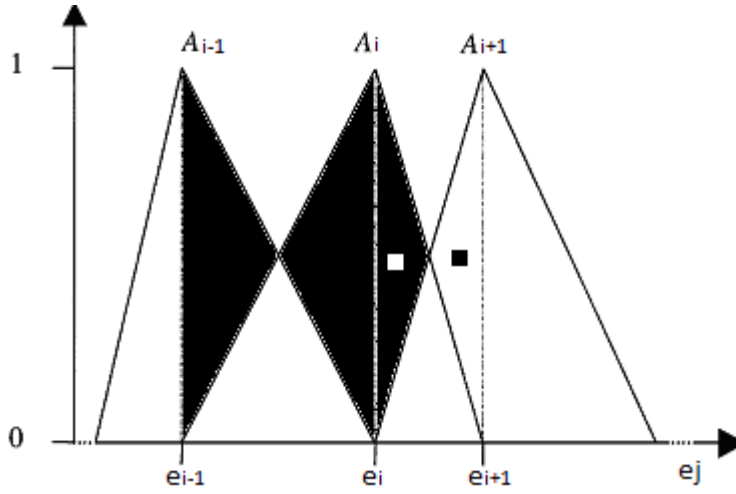
$$A_i(e) = \frac{e_{i+1} - e}{e_{i+1} - e_i}, \quad e \in [e_i, e_{i+1}]$$

$$A_{i+1}(e) = \frac{e - e_i}{e_{i+1} - e_i}$$
(1.3)

Çıkış denkleminin sıfırdan farklı olabilmesi için aynı anda hem A_1 değerinin hem de A_2 değerinin sıfırdan farklı olması gerekmektedir. İkisinden birinin sıfıra eşit olduğu noktada denklemin sonraki değerleri sıfır olacaktır. Şekil 1.4'deki üyelik fonksiyonu grafiği incelendiğinde $(e_i - e_{i+1})$ aralığındaki herhangi bir e değerine karşılık aynı anda sadece 2 komşu üyelik fonksiyonunun tetiklendiği yani sıfırdan farklı bir değer verdiği görülmektedir. Diğer tüm üçgen üyelik fonksiyonlarında sıfıra karşılık gelmektedir. Bu yüzden sadece i ve $i+1$ 'ci üyelik fonksiyonları kalmaktadır. Sonuç olarak iki dilsel değişken için aynı anda 4 kural ateşlenmiş olmaktadır. Buna göre denklem (1.1)'deki çıkış eşitliği de aşağıdaki gibi tekrar düzenlenebilir [5].

$$u = \frac{\sum_{t=(j,j+1)}^{k=(i,i+1)} (A_k(e_1)B_t(e_2))u_{kt}}{\sum_{t=(j,j+1)}^{k=(i,i+1)} (A_k(e_1)B_t(e_2))}$$
(1.4)

Ayrıca tasarım gereği belirlediğimiz üyelik fonksiyonlarının tanımı gereği $A_i(e_1) + A_{i+1}(e_1) = 1$ ($e_1 \in [e_{1,i}, e_{1,i+1}]$) ve diğer değişken için benzer şekilde $B_j(e_2) + B_{j+1}(e_2) = 1$ ($e_2 \in [e_{2,j}, e_{2,j+1}]$) olmaktadır. Bunun için üyelik fonksiyonlarının birbirini tamamlayan yani yüzde 50 oranında çakışan üçgenler şeklinde seçilmelidir. Diğer bir ifadeyle önde giden üçgenin başlangıç noktası ile tepe noktası arasındaki bölüm ile takip eden üçgenin tepe noktası ile bitiş noktası arasındaki bölge birbirine eşit olmalıdır. Böylece herhangi bir nokta için birbirini takip eden iki üyelik fonksiyonunda karşılık geldiği değerlerin toplamı bire eşit olur.



Şekil 1.5 : Üyelik fonksiyonunda simetri

Bunun sonucu olarak da yukarıdaki denklemin paydası bire eşit olmaktadır.

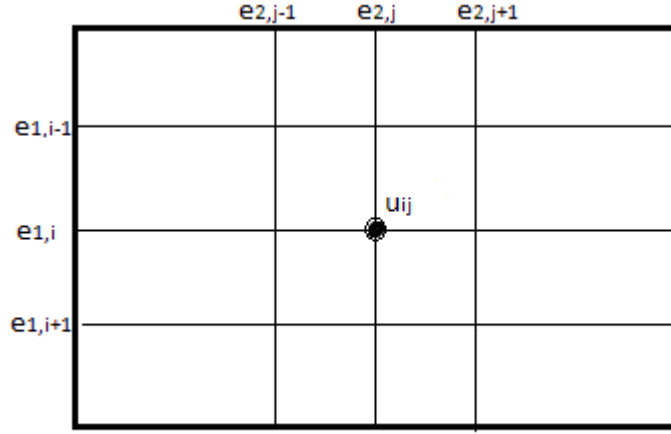
$$\begin{aligned}
 \sum_{\substack{k=(i,i+1) \\ t=(j,j+1)}} A_k(e_1)B_t(e_2) &= A_i(e_1)B_j(e_2) + A_{i+1}(e_1)B_j(e_2) + A_i(e_1)B_{j+1}(e_2) \\
 &+ A_{i+1}(e_1)B_{j+1}(e_2) \\
 &= (A_i(e_1) + A_{i+1}(e_1))(B_j(e_2) + B_{j+1}(e_2)) \\
 &= 1.
 \end{aligned} \tag{1.5}$$

Böylece iki dilsel değişkenli bulanık bir sistemin çıkışı da üyelik fonksiyonları üzerindeki değerler cinsinden ifade edilebilmektedir.

$$\begin{aligned}
u = & \left(\frac{e_{1_{i+1}} - e_1}{e_{1_{i+1}} - e_{1_i}} \right) \left(\frac{e_{2_{j+1}} - e_2}{e_{2_{j+1}} - e_{2_j}} \right) u_{ij} + \left(\frac{e_1 - e_{1_i}}{e_{1_{i+1}} - e_{1_i}} \right) \left(\frac{e_{2_{j+1}} - e_2}{e_{2_{j+1}} - e_{2_j}} \right) u_{(i+1)j} \\
& + \left(\frac{e_{1_{i+1}} - e_1}{e_{1_{i+1}} - e_{1_i}} \right) \left(\frac{e_2 - e_{2_j}}{e_{2_{j+1}} - e_{2_j}} \right) u_{i(j+1)} + \left(\frac{e_1 - e_{1_i}}{e_{1_{i+1}} - e_{1_i}} \right) \left(\frac{e_2 - e_{2_j}}{e_{2_{j+1}} - e_{2_j}} \right) u_{(i+1)(j+1)}
\end{aligned} \tag{1.6}$$

$e_1 \in [e_{1_i}, e_{1_{i+1}}]$ ve $e_2 \in [e_{2_j}, e_{2_{j+1}}]$ için

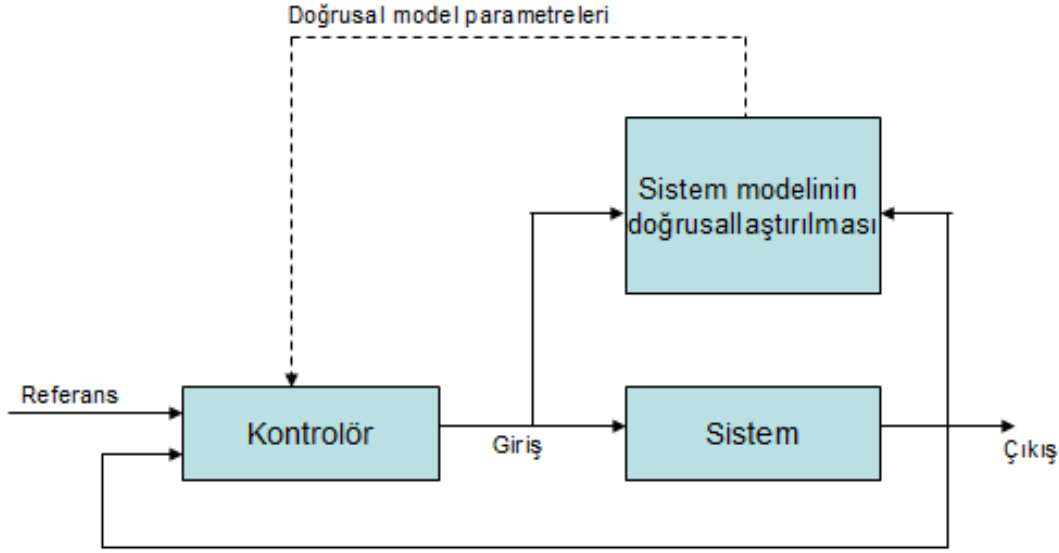
Ayrıca iki girişli bir sistem için $e_{1,i}$ ve $e_{2,j}$ çıkış düzlemi de aşağıdaki gibi görünmektedir. Burada $e_{1,i}$ ve $e_{2,j}$ dilsel parametreler olup her kesişim noktaları için sistemin bir çıkışı olduğunu ifade eden u değeri mevcuttur [5].



Şekil 1.6 : İki girişli bir sistem için çıkış düzlemi

1.5 Bulanık Model Üzerinden Anlık Doğrusal Modelin Çıkarım Yöntemi

Doğrusal olmayan ve oldukça karmaşık sistemlerin model tabanlı öngörülü kontrol ile kontrol edilebilmesi için doğrusal bir model veya modellerinin çıkartılması gerekmektedir. Sistemin doğrusal modelinin elde edilmesi ve sonrasındaki kontrol süreci temel olarak Şekil 1.7'deki gibi ele alınmaktadır.



Şekil 1.7 : Anlık doğrusallaştırılmış sisteme uygulanacak kontrol yapısı

Örneğin bir SISO yani tek giriş tek çıkışlı bir sistemin doğrusal modeli ARX model yani kendiliğinden ayarlanabilen dışarıdan girişli model denklemiyle ifade edilebilir.

$$y_p(k+1) = a_1y(k) + \dots + a_ny(k-n+1) + b_1u(k) + \dots + b_mu(k-m+1) + bias \quad (1.7)$$

Bu denklemde a katsayıları sistemin model ifadesinin sistemin çıkışına göre anlık kısmi türevlerini gösterirken; b katsayıları ise doğrusal model denkleminin bu sefer sistemin giriş değerlerine göre anlık kısmi türevlerini göstermektedir.

$$p(k) = a_1y(k) + \dots + a_ny(k-n+1) + b_1u(k) + \dots + b_mu(k-m+1) + bias = y_p(k+1) \quad (1.8)$$

$$a_i = \frac{\partial p(k)}{\partial y(k-i-1)}, \quad b_i = \frac{\partial p(k)}{\partial u(k-i-1)} \quad (1.9)$$

Böylece herhangi bir çalışma noktasında sistemin modelini çıkartmak için gereken bias noktası ise; o çalışma noktasında sistem çıkışı ile model parametrelerinin çarpımlarının farkından bulunabilmektedir [4].

$$bias = y_p(k+1) - (a_1y(k) + \dots + a_ny(k-n+1) + b_1u(k) + \dots + b_mu(m-k+1)) \quad (1.10)$$

Örnek 1:

Herhangi bir tek giriş tek çıkışlı doğrusal olmayan bir sistemi ele alalım. Giriş değişkeni $u(k)$, çıkış değişkeni $y(k)$ ve sistemin çıkışını $y_p(k)$ olarak adlandırırsak;

$$y_p(k+1) = p(y(k); u(k)) \quad (1.11)$$

olmaktadır; ve sistemin NARX modelinin bulanık ifadesi ve kuralları;

$$r_{i1; i2} : \text{EĞER } y(k) \text{ } A_{1; i1} \text{ ve } u(k) \text{ } A_{2; i2} \text{ ise O HALDE } y_p(k+1) = d_{i1; i2} \quad (1.12)$$

şeklindedir. Burada $y_m(k) = y_p(k+1)$ yani sistem çıkışının bir önceki değerini ifade etmektedir. Buna göre sistemi herhangi bir $t = [y(k), u(k)]$ noktasında modellemek istersek; sistemin doğrusal modeli;

$$y_p(k+1) = a_1 y(k) + b_1 u(k) + bias \quad (1.13)$$

$$a_i = \frac{\partial p(t)}{\partial y(k)}, \quad b_i = \frac{\partial p(t)}{\partial u(k)} \quad (1.14)$$

Ele alınan çalışma noktasında yani $y(k) \in [a_{1, m_1}, a_{1, m_1+1}]$ ve $u(k) \in [a_{2, m_2}, a_{2, m_2+1}]$

bulanık modelin çıkışı [4];

$$\begin{aligned} yp(k+1) &= \left(\frac{a_{1, m_1+1} - y(k)}{a_{1, m_1+1} - a_{1, m_1}} \right) \left(\frac{a_{2, m_2+1} - u(k)}{a_{2, m_2+1} - a_{2, m_2}} \right) \cdot d_{m_1, m_2} \\ &+ \left(\frac{a_{1, m_1+1} - y(k)}{a_{1, m_1+1} - a_{1, m_1}} \right) \left(\frac{a_{2, m_2+1} - u(k)}{a_{2, m_2+1} - a_{2, m_2}} \right) \cdot d_{m_1, m_2} \\ &+ \left(\frac{a_{1, m_1+1} - y(k)}{a_{1, m_1+1} - a_{1, m_1}} \right) \left(\frac{a_{2, m_2+1} - u(k)}{a_{2, m_2+1} - a_{2, m_2}} \right) \cdot d_{m_1, m_2} \\ &+ \left(\frac{a_{1, m_1+1} - y(k)}{a_{1, m_1+1} - a_{1, m_1}} \right) \left(\frac{a_{2, m_2+1} - u(k)}{a_{2, m_2+1} - a_{2, m_2}} \right) \cdot d_{m_1, m_2} \end{aligned} \quad (1.15)$$

şeklinde ifade edilmekte ve a_1 ve a_2 noktaları bulunurken sırasıyla $y(k)$ ve $u(k)$ 'nin üyelik fonksiyonlarına bakılmaktadır. a_{1, m_1} ve a_{1, m_1+1} noktaları; tüm üyelik fonksiyonlarının başlangıç ve bitiş noktalarından $y(k)$ 'ya en yakın olan ikisidir.

Doğrusal modeli ifade etmek için gereken a_1 ve b_1 katsayıları ise $y_p(k+1)$ denkleminin sırasıyla $y(k)$ ve $u(k)$ 'ya göre kısmi türevlerinin alınmasıyla bulunmaktadır.

$$a_1 = \frac{\partial y_p(k+1)}{\partial y(k)} = \left(\frac{d_{m_1+1,m_2} - d_{m_1,m_2}}{a_{1,m_1+1} - a_{1,m_1}} \right) \left(\frac{a_{2,m_2+1} - u(k)}{a_{2,m_2+1} - a_{2,m_2}} \right) + \left(\frac{d_{m_1+1,m_2+1} - d_{m_1,m_2+1}}{a_{1,m_1+1} - a_{1,m_1}} \right) \left(\frac{u(k) - a_{2,m_2}}{a_{2,m_2+1} - a_{2,m_2}} \right) \quad (1.16)$$

Benzer şekilde b_1 katsayısı da çıkışın $u(k)$ 'ya göre kısmi türevi olmaktadır.

$$b_1 = \frac{\partial y_p(k+1)}{\partial u(k)} = \left(\frac{d_{m_1,m_2+1} - d_{m_1,m_2}}{a_{2,m_2+1} - a_{2,m_2}} \right) \left(\frac{a_{1,m_1+1} - y(k)}{a_{1,m_1+1} - a_{1,m_1}} \right) + \left(\frac{d_{m_1+1,m_2+1} - d_{m_1+1,m_2}}{a_{2,m_2+1} - a_{2,m_2}} \right) \left(\frac{y(k) - a_{1,m_1}}{a_{1,m_1+1} - a_{1,m_1}} \right) \quad (1.17)$$

ARX modelin bulunması için gereken bias terimi de;

$$bias = y_p(k+1) - (a_1 y(k) + b_1 u(k)) \quad (1.18)$$

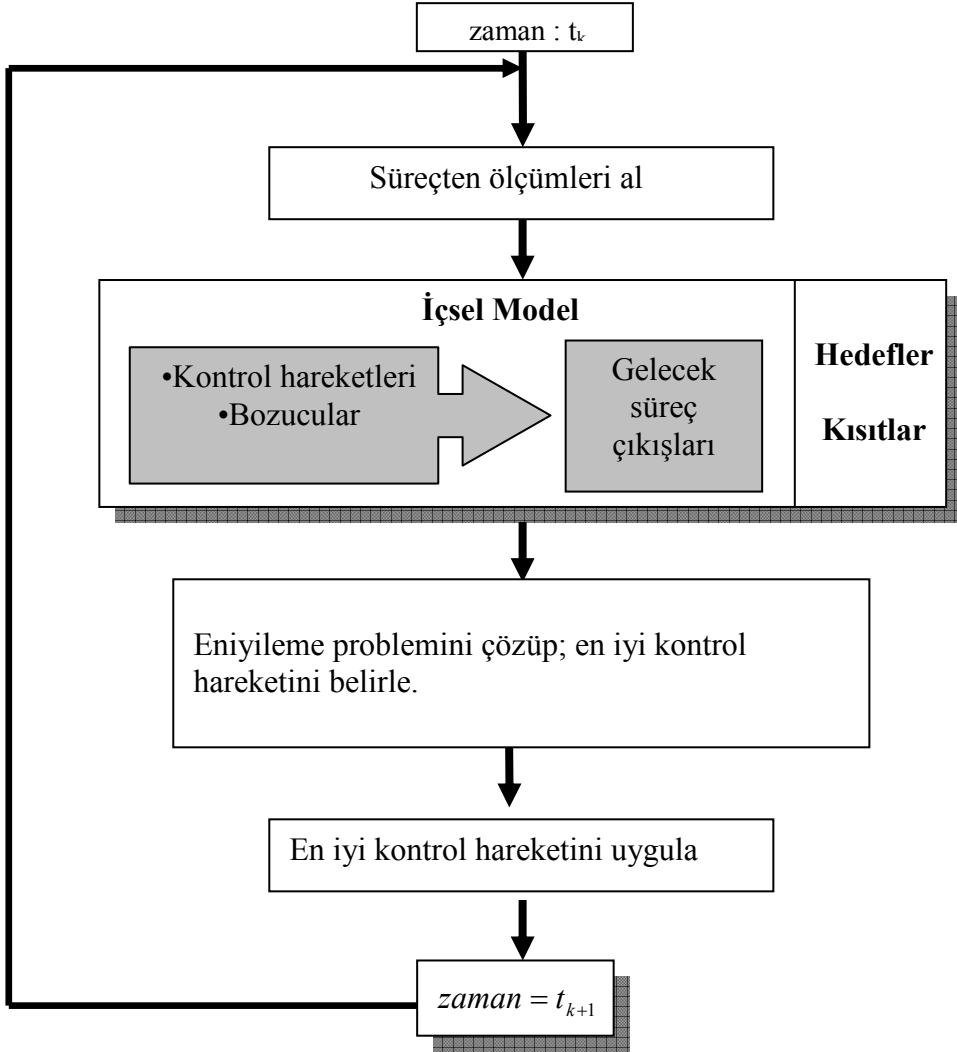
Böylece doğrusal model için gereken tüm parametreler elde edilmiştir. Bu işlemler daha önceden belirlenecek bir örnekleme zamanı dikkate alınarak; sistemin tüm çalışması süresince uygulanırsa sistemin anlık doğrusal modelleri elde edilebilmektedir. Yani doğrusal olmayan bir sistemden doğrusal modeller çıkarılmış olup, elde edilen modeller doğrusal modeller olduğu için sistemin modeline kontrolör tasarımı kolaylıkla yapılabilmektedir. Çıkarılan doğrusal modellere uygun olarak tasarlanan kontrolörler sisteme uygulanıp, sistem kontrol edilebilmektedir [4].

2. MODEL TABANLI ÖNGÖRÜLÜ KONTROL

Öngörülü kontrol ya da diğer bir adıyla modele dayalı öngörülü kontrol çoklu girişli sistemleri birçok kısıt altında dahi kontrol edebilme yeteneği ile son yıllarda hem akademik hem endüstriyel ortamda oldukça yaygınlaşmıştır. Bu başarısının temel nedenleri şunlar olarak gösterilebilir:

- Çok değişkenli kontrol problemlerini ele alabilmesi.
- Ateşleme ve tetikleme limitlerini de hesaba katabilmesi.
- Kısıt noktalarına daha yakın noktalarda bile çalışmaya olanak tanıyabilmesi (klasik kontrol teorisiyle karşılaştırıldığında) ve dolayısıyla daha karlı bir operasyon sağlayabilmesi.
- Endüstriyel uygulamalarda kontrol gerekliliklerinin ve değişikliklerinin çok sık olmaması sebebiyle; gerçek zamanlı hesaplamalar için gereken zamanın yeteri kadar sağlanabilmesi [1].

Doğrusal olmayan sistemlerin gerçek zamanlı kontrolündeki en büyük problem, eniyileme probleminin her örnekleme zamanında çözülmesi gerekliliğidir. Bu da tekrarlamalı eniyileme metodlarının düzgün bir biçimde uygulanamadığı hızlı sistemlerde uygulamayı zorlaştırmaktadır. Bu yüzden sistemin tek bir doğrusal olmayan veya doğrusal modelini kullanmaktansa; yerel doğrusal modellerinin kontrolü tercih edilmektedir [9]. Model öngörülü kontrol de anlık olayları; her örnekleme anında çevrimiçi elde etmesiyle bu tip problemlerde kullanılacak en uygun kontrol metodlarından biridir. MBPC o anki durum değerini başlangıç olarak ele alıp; öngörü ufku boyunca eniyileme kontrol problemini çözer. Bunun sonucunda bulunan tüm kısıtlamalara uyan en iyi kontrol işaretini ise sisteme uygulayıp; sonraki örnekleme zamanlarında da aynı prosedürü takip eder. Bahsedilen kontrol algoritması Şekil 2.1'deki gibi bir akış diyagramı ile gösterilebilir :

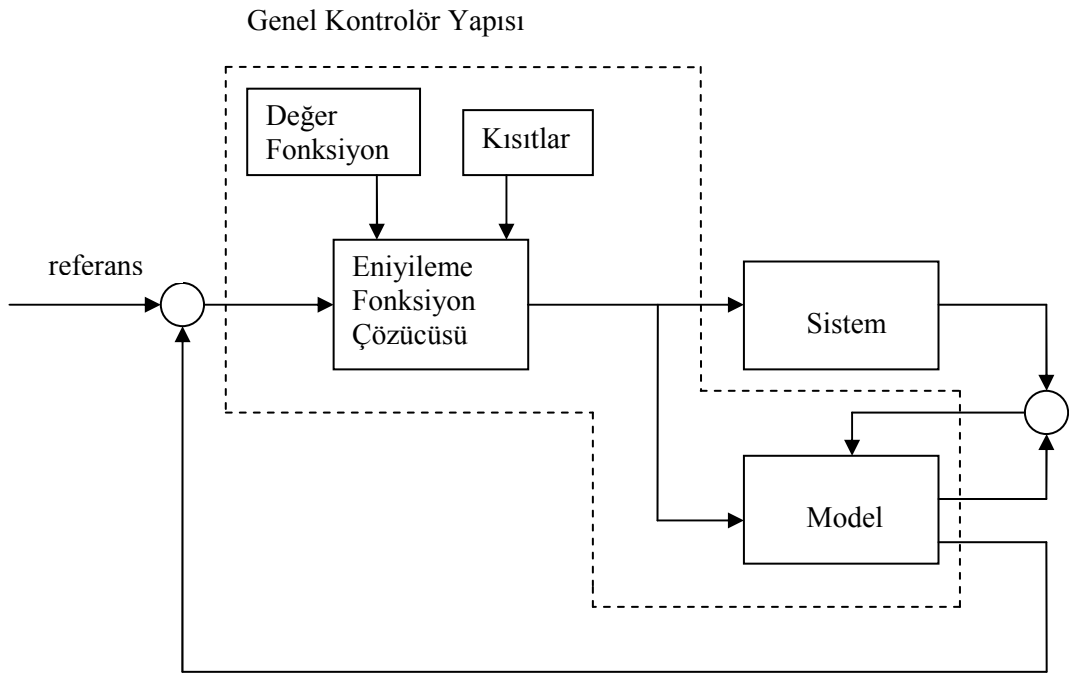


Şekil 2.1 : Öngörülü kontrol algoritması [6]

Öngörü ufku boyunca uygulanacak kontrol işaretinin uygulama anından itibaren nasıl davranacağını öngörebilmek için içsel bir modele ihtiyaç vardır. Böylece her seferinde sistem cevabı daha iyileştiği için geribeslemeli bir kontrol algoritması elde edilmiş olur. Bu aynı zamanda “gerileyen ufuk yapısı” olarak da bilinen bir uygulamadır.

2.1 İçsel Model Yapısı Ve Kullanımı

IMC olarak da adlandırılan içsel model yapısı; öngörülü kontrolörün kontrol dizisini uyguladığı ve en iyi kontrol işaretini belirlediği modeldir. Genellikle sistemin birebir aynısı değil yaklaşık bir modeldir. Sistem dinamiklerine bağlı olarak model aynı hızda değişime tepki veremeyeceği için ideal bir model elde edilememektedir. Bu tür problemleri çözmek adına IMC yapısı MPC yapısına eklenerek, kontrolörün sistem ile model arasındaki farklardan etkilenmesini ortadan kaldırmayı amaçlar [7].



Şekil 2.2 : İçsel modellenli öngörülü kontrol yapısı

2.2 Gerileyen Ufuk Uygulaması

Şekil 2.1 ve 2.2’de öngörülü kontrolün akış diyagramı şematik olarak gösterilmiştir. SISO yani tek giriş tek çıkışlı bir sistem için referans girişi uygulanmış; sistemin çıkışına göre güncellenen modelle de kontrolörün daha iyi sonuç vermesi sağlanmıştır.

Şekil 2.3 üzerinden ise öngörülü kontrol ve gerileyen ufuk uygulamaları ve algoritmaları açıklanmaya çalışılmıştır. Sistemin ulaşmaya çalıştığı ayar değeri $setp(t)$; hesaplamanın yapıldığı t anına kadar gösterilen sistemin çıkışı $y(t)$; k anından itibaren sistem çıkışının ayar değerine ulaşabilmek için izlemesi gereken yörünge ise $ref(t|k)$ olarak gösterilmektedir. $ref(t|k)$ sabit bir yörünge olmak zorunda değildir. Sistemin ayar değerine ne kadar hızlı gitmesinin istendiğine göre $ref(t|k)$ ayar değerine o kadar hızlı yaklaştırılabilir. Fakat genellikle bu referans yörüngesinin ayar yörüngesine üstel bir yörünge izleyerek yaklaşması tercih edilmektedir. Bu üstel fonksiyonun zaman sabiti; aynı zamanda sistem cevabının hızını da ifade eden T_{ref} olarak adlandırılır [1]. Yani, şimdiki hata

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

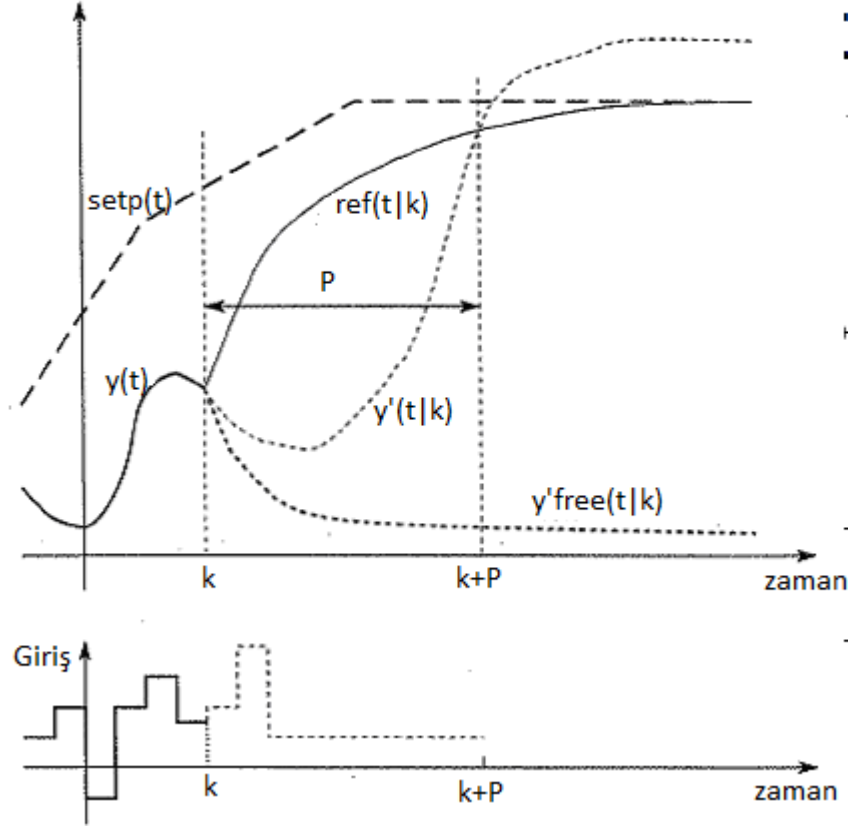
iken, sistem çıkışının referans yörüngesini takip edeceği takdirde i adım sonra ortaya çıkacak hata;

$$\begin{aligned} \varepsilon(k+i) &= e^{-iT_s/T_{ref}} \varepsilon(k) \\ \varepsilon(k+i) &= \lambda^i \varepsilon(k) \end{aligned} \quad (2.2)$$

olacaktır. i adım sonraki hata ifadesindeki T_s örnekleme zamanını ifade etmektedir. Hata ifadesi ideal çıkış yani ayar yörüngesi ile sistemin çıkışı yani referans yörüngesi arasındaki farkı ifade ettiğinden; referans yörüngesinin sayısal ifadesi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$\begin{aligned} r(k+i|k) &= s(k+i) - \varepsilon(k+i) \\ r(k+i|k) &= s(k+i) - e^{-iT_s/T_{ref}} \varepsilon(k) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Denklemdaki $ref(k+i|k)$ ifadesi; referans yörüngesinin k anından itibaren i basamak boyunca hesaplandığını göstermektedir.



Şekil 2.3 : Giriş, çıkış ve referans işaretleri

Şekildeki P öngörü ufkunu, girişin değiştiği ilk üç adım ise kontrol ufkunu ifade etmektedir. Öngörülü kontrolörde şimdiki çalışma zamanından başlayıp bir öngörü ufkı boyunca sistemin davranışını öngörebilmek için bir sistem modeli bulunması gerekmektedir. Öngörülü sistem davranışı, öngörü ufkı boyunca uygulanacak olan $\hat{u}(k+i|k)$ ($i = 0,1,\dots,P-1$) giriş yörüngesine bağlıdır.

Asıl amaç ise en iyi davranışı vereceği öngörülen girişi seçmektir. Burada önemli nokta ise öngörü ufku boyunca uygulanacak giriş yörüngesi uygulanacak olan sistem modelinin doğrusal olması varsayılmaktadır. Ayrıca gösterimde u yerine \hat{u} kullanılması, k anında sistemde u değişkeni var iken öngörü ufku boyunca uygulanacak olan algoritmanın sonucunun sistemin gerçek girişini değil öngörülen eniyi girişi olduğunu göstermektedir ve muhtemelen bu anlardaki sistemin gerçek girişi olan $u(k+i|k)$; öngörülen giriş olan $\hat{u}(k+i|k)$ 'dan farklı olacaktır. Bunun yanında sistem girişinin hangi değeri alacağı hesaplanırken; sistem çıkışı olan $y(k)$ 'nin bilindiği yani geri besleme yöntemiyle sisteme sağlandığı varsayılmaktadır. Dolayısıyla herhangi bir k anındaki çıkış değeri olan $y(k)$ sistemin o anki giriş değeri olan $u(k)$ 'ya değil; ARX modelde de gösterildiği gibi önceki giriş değerlerine $u(k-1)$, $u(k-2)$, $u(k-3)$... bağlı olmaktadır. Kontrol başlangıç anını k kabul edersek, amaç; Şekil 2.3'de görüldüğü gibi öngörü ufku olarak belirlenen zamanın sonunda sistem çıkışını önceden belirlenen referans değerine getirecek giriş yörüngesini bulmaktır. Böylece öngörü ufkunun sonunda sistem çıkışı ile erişilmesi gereken referans yörüngesi çakışmış olacak; ve öngörü ufku boyunca tek bir çakışma noktası bulunmuş olacaktır. Bu koşulu sağlayacak birçok giriş yörüngesi olmakla beraber en iyi yöntem en az hesaplamayı gerektirecek ve en az parametre ile bulunabilecek giriş yörüngesini seçebilmektir. Şekil 2.3'de görüldüğü üzere öngörü ufku boyunca giriş yörüngesinin, öngörü ufkunun ilk üç adımı boyunca değiştiği varsayılmaktadır. Bu adım sayısına kontrol ufku denir. Olabilecek en basit yapıda kontrol ufku 1 olarak varsayılarak; hesaplamalar yapılır. Giriş yörüngesi seçildikten sonra, yörüngenin ilk elemanı sisteme giriş sinyali olarak uygulanmalıdır. Böylece $u(k)$ 'nın gerçek giriş sinyalini gösterdiği düşünülürse $u(k) = \hat{u}(k|k)$ denklemi kurulmaktadır. Olası en basit yapı, kontrol ufkunun bir olarak seçildiği yani girişin öngörü ufku boyunca sabit kaldığı varsayılacak olursa, geriye seçilmesi gereken sadece bir parametre $\hat{u}(k|k)$ ve dolayısıyla sağlanması gereken tek bir eşitlik $\hat{y}(k+P|k) = r(k+P|k)$ kalmaktadır. Bu işlem tamamlandıktan sonra gerçek giriş sinyali olan $u(k)$, $u(k) = \hat{u}(k|k)$ eşitliği ile belirlenir ve sisteme uygulanır. Gerçek giriş sinyali sisteme uygulandıktan sonra tüm bu süreç döngüsü yani, çıkış ölçülmesi ve geri besleme, öngörü işlemleri, giriş yörünge belirlenmesi, bir sonraki örnekleme aralığı için tekrarlanır ve sistem çıkışı tekrar ölçülüp $y(k+1)$ elde edilir. Öngörü ufku P için tekrar yeni bir referans

yörüngesi $r(k+i|k+1)$ $i=2,3,\dots$ tanımlanır; $k+1+i$ ($i=2,3,\dots,P$) ufku boyunca öngörüler yapılır; yeni döngü için de yeni giriş yörüngesi $\hat{u}(k+1+i|k+1)$ ($i=2,3,\dots,P-1$) seçilir ve sonunda yeni giriş yörüngesinin ilk elemanı sonraki giriş değeri olarak sisteme uygulanır: $u(k+1)=\hat{u}(k+1|k+1)$. Bu döngüler içinde öngörü ufku en başta bir kontrol parametresi olarak belirlenmekte ve bir önceki döngüye göre değişmemektedir. Böylece sabit olan öngörü ufku örnekleme aralığı boyunca her adımda kaydırılmaktadır. Bir sistemin bu şekilde kontrolü gerileyen ufuk (receding horizon) stratejisi olarak adlandırılır [1].

2.3 En İyi Girişlerin Hesaplanması

Yukarıdaki basit durumda da görüldüğü üzere çıkış yörüngesi ile referans öngörü ufku boyunca sadece tek noktada kesişiyor ve seçilmesi gereken giriş yörüngesinde tek parametre $\hat{u}(k|k)$ varsa; sistemin tek ve yalnızca bir çözümü vardır. Daha genel bir ifadeyle, genellikle belirlenen öngörü ufkunda referans ile çıkış yörüngesinin birden fazla kesişim noktası görülür; dolayısıyla bu durumda çözülmesi gereken denklem sayısı değişken sayısından fazla olur ve bu durumda tek ve mutlak bir çözümden bahsetmek mümkün olmamaktadır. Diğer bir deyişle, tüm noktalarda çıkış yörüngesinin kesişmesini sağlayacak bir giriş yörüngesi bulmak genelde imkansızdır. Bu yüzden yaklaşık bir çözüm arayışına girilmektedir. Bu durumda da her nokta için hataların karelerinin toplamını en aza indirmeye çalışan en küçük kareler yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Hatayı referans ile çıkış arasındaki fark olarak ifade edilirse; bu yöntemde amaç hataların karelerinin toplamını $\sum_{i \in K_p} [r(k+i|k) - y'(k+1|k)]^2$ en aza indirmektir. Formüldeki K_p çakışma noktası sayısını ifade etmektedir. Eğer içsel model doğrusalsa, en küçük kareler çözümü kolayca bulunabilir ve sonuçta doğrusal bir kontrol kuralı oluşur.

Şekil 2.3'e geri dönerek kontrol mekanizmasının ifade edildiği temel durum olan öngörü ufku boyunca tek çakışma noktası ve seçilmesi gereken tek parametre $\hat{u}(k|k)$ olduğu varsayalım. Bu durumda algoritma şu şekilde olmaktadır: gerçek giriş içsel modele uygulanarak, sistemin serbest cevabı (*free response*) $y'_{free}(k+P|k)$ elde edilir. Serbest cevap, gelecek giriş yörüngesinin ilk giriş değeri olan $u(k-1)$ ' de

kalması durumunda öngörü ufku boyunca sistemin göstereceği davranış olarak da ifade edilebilir [6].

Sistemin kara kutu modelinin ele alındığı ve model olarak da elimizde sistemin basamak cevabının tüm geçmiş giriş çıkış değerleri ile birlikte veri olarak bulunduğu varsayalım. $S(P)$ ise sistemin kara kutu modelinin, giriş olarak birim basamak sinyali uygulandıktan P adım sonra verdiği cevap olduğu varsayılırsa öngörü ufku sonunda yani $k + P$ anında, öngörülen çıkış ifadesi aşağıdaki gibi olur:

$$y'(k + P|k) = y'_{free}(k + P|k) + S(P)\Delta\hat{u}(k|k) \quad (2.4)$$

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

Eşitlikte var olan $\Delta\hat{u}(k|k)$ ifadesi, öngörülen giriş $\hat{u}(k|k)$ değeri ile o anki gerçek giriş $u(k-1)$ 'e değeri arasındaki farkı göstermektedir. Amaç aşağıdaki eşitlikte de görüldüğü gibi çıkış değerini referansa ulaştırmak olduğundan;

$$y'(k + P|k) = ref(k + P|k) \quad (2.6)$$

Bu durumu sağlayacak en uygun giriş değişimi; (2.4)'teki eşitlikte çıkışın referansa ulaştığı ideal durumu sağlayacak giriş en uygun giriş olacaktır [1].

$$\Delta\hat{u}(k|k) = \frac{ref(k + P|k) - y'_{free}(k + P|k)}{S(P)} \quad (2.7)$$

Fakat öngörü ufku boyunca birden fazla çakışma noktası olması durumunda, gerçekleştirilmek istenen her çakışma noktası için çıkış değerinin referans noktasına eşit olması durumu yani $i = 1, 2, \dots, c$, için $y'(k + Kp_i|k) = r(k + Kp_i|k)$ $i = 1, 2, \dots, c$, dir. Burada c çakışma noktası sayısıdır. Buna göre tüm bu noktalar için ortaya çıkan denklemleri çözebilmek için öngörülen giriş işaretinin hesaplanması gerekmektedir.

$$\begin{aligned} ref'(k + Kp_1 | k) &= y'_{free}(k + Kp_1 | k) + S(Kp_1)\Delta\hat{u}(k | k) \\ ref'(k + Kp_2 | k) &= y'_{free}(k + Kp_2 | k) + S(Kp_2)\Delta\hat{u}(k | k) \\ &\vdots \\ ref'(k + Kp_c | k) &= y'_{free}(k + Kp_c | k) + S(Kp_c)\Delta\hat{u}(k | k) \end{aligned} \quad (2.8)$$

Bu eşitlikleri aynı anda birden fazla kısıtı sağlamak için endüstriyel uygulamalarında da sıklıkla kullanılan, en küçük kareler yöntemi kullanılmaktadır.

$$T = \begin{bmatrix} r'(k + Kp_1 | k) \\ r'(k + Kp_2 | k) \\ \vdots \\ r'(k + Kp_c | k) \end{bmatrix} \quad y_{free} = \begin{bmatrix} y'_{free}(k + Kp_1 | k) \\ y'_{free}(k + Kp_2 | k) \\ \vdots \\ y'_{free}(k + Kp_c | k) \end{bmatrix} \quad S = \begin{bmatrix} S(Kp_1) \\ S(Kp_2) \\ \vdots \\ S(Kp_c) \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

En küçük kareler yöntemi hesap yükü de getirebilen bir eniyileme yöntemi olmasına karşın simülasyon ortamında yapılan hesaplamalarda hazır komutlarla kolaylıkla uygulanabilmektedir. Örneğin bu tez çalışmasının simülasyon işlemlerinin yürütüldüğü MATLAB'da en küçük kareler yönteminin uygulaması 'BACKSLASH' operatörü kullanılarak yapılır. Buna göre en iyi giriş değişimi eşitlik (2.10)'daki gibi hesaplanır [1].

$$\Delta \hat{u}(k | k) = S \setminus (T - y_{free}) \quad (2.10)$$

Sistemi istenen duruma getirecek olan olası giriş yörüngesinin de daha karmaşık bir giriş yörüngesi olduğu varsayalım. Girişin sonraki K_h (kontrol ufku) adım boyunca değiştiği düşünülüğünde, çıkış sinyali ile referans yörüngesinin kesişmiş olduğu $k+K_p$ anında öngörülen çıkış değeri de (2.4)'ün karmaşık yörüngeyide hesaplamaların içine katacak şekilde genelleştirilmiş hale getirilmesiyle hesaplanabilir.

$$\begin{aligned} y'(k + K_p | k) = & y'_{free}(k + K_p | k) + H(K_p)\hat{u}(k | k) + H(K_p - 1)\hat{u}(k + 1 | k) + \dots \\ & + H(K_p - K_h + 2)\hat{u}(k + K_h - 2 | k) + \\ & + S(K_p - K_h + 1)\hat{u}(k + K_h - 1 | k) \end{aligned} \quad (2.11)$$

Yukarıdaki denklemde $H(i)=S(i)-S(i-1)$ ' dir ve dolayısıyla denklem (2.11) terimler tekrar gruplanarak hesaplama kolaylığı getirme amacıyla tekrar düzenlenmiştir.

$$\begin{aligned} y'(k + K_p | k) = & y'_{free}(k + K_p | k) + S(K_p)\Delta \hat{u}(k | k) + S(K_p - 1)\Delta \hat{u}(k + 1 | k) \\ & + \dots + S(K_p - K_h + 1)\Delta \hat{u}(k + K_h - 1 | k) \end{aligned} \quad (2.12)$$

Böylece, kesişim noktasında öngörülen çıkışlar için matris formunda bir denklem seti yazabiliriz;

$$y = y_{free} + \Theta \Delta u \quad (2.13)$$

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

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

Her anda sistem çıkışı birebir referansa eşdeğer hale getirilemeyeceği için önceki duruma benzer şekilde en küçük kareler yöntemi uygulanır.

$$\Delta U = \Theta \setminus [T - y_{free}] \quad (2.16)$$

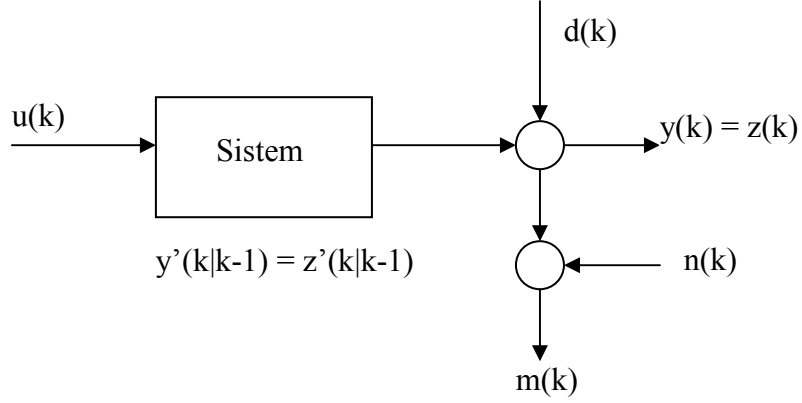
Hesaplanan ΔU vektörünün ilk elemanı alınır ve bir önceki giriş değeri ile toplanarak sisteme uygulanacak olan giriş belirlenmiş olur;

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

ve bir sonraki hesaplama anı için tüm hesaplama döngüsü, sonraki sistem çıkışı $y(k+1)$ 'in ölçülmesiyle tekrarlanır [1].

2.4 Sabit Çıkış Bozucusu

Bazı durumlarda sisteme etkiyen çeşitli gürültü veya bozucular olmaktadır. Yada sistemlerin modelleri elde edilirken; ARX modelinde olduğu gibi, sistemin giriş ve çıkış katsayıları yanısıra bir de sisteme etkiyen bir sabit bulunabilir. Bu sabitin veya bozucunun sistemsal parametrelere bir etkisi olmadığı için; öngörülü kontrolde bulunan içsel modele yapılacak küçük değişikliklerle kararlı hal hatasına etki edecek bu bozucuların etkisi oratadan kaldırılabilmektedir [1].



Şekil 2.4 : Sisteme etkiyen çıkış bozucusu ve gürültü

Şekil 2.4'deki ifadelerden $d(k)$ çıkış bozucusu olarak ifade edilirken; $y(k)$ sistem çıkışı; $n(k)$ gürültü; $m(k)$ ise ölçülen çıkış değeri olarak adlandırılır. Bu çalışma boyunca incelenen sistemlerde ve denenen uygulamalarda gürültünün olmadığı ya da ihmal edilebilir seviyede olduğu varsayılmıştır.

Dolayısıyla burada tüm yapılması gereken, bozucu veya sabit ölçülebiliyorsa ölçülüp; ölçülemiyorsa en son sistem çıkışı ile en son model çıkışı arasındaki farkı alıp bu farklılığı kesişme noktalarında referans yörüngesinden çıkarmaktır. Yani bu bozucu;

$$d(k) = y(k) - y'(k | k - 1) \quad (2.18)$$

olarak tanımlanırsa; (2.16)'da uygulanacak olan sistem girişinin bulunduğu denklem de aşağıdaki hale gelmektedir:

$$\Delta U = \Theta \setminus [T - d(k) - y_{free}] \quad (2.19)$$

⊖ ifadesindeki basamak cevap katsayıları sisteme değil de modele ait oldukları için, gerçek sistemin basamak cevabı kontrolör tarafından bilinmemektedir. Bu yüzden bu bozucunun etkisi, kontrolör tasarımı yapılırken ihmal edilmemelidir. Doğrusal modellerde var olan ‘bias’ terimi; kontrolör tasarımında sistem bozucusu olarak Şekil 2.4’de de görüldüğü gibi hesaplamalara dahil edilmiştir.

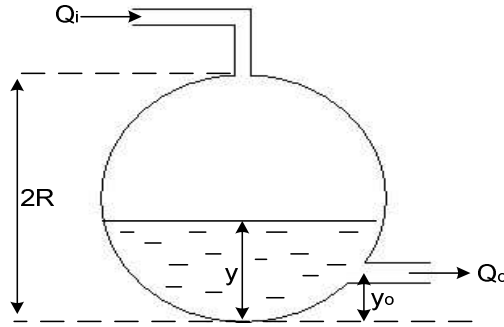
3. SİMÜLASYON VE UYGULAMALAR

3.1 Amaç

Anlık doğrusallaştırma ve bulanık model tabanlı öngörülü kontrol mekanizmalarını incelemek amacıyla doğrusal olmayan bir sistem ele alınmıştır. İlk etapta sistemin anlık olarak doğrusal modelleri çıkarılmış; sonrasında da gerçek zamanda bu anlık modellere uyabilecek öngörülü kontrolör tasarımı yapılmıştır. Kontrol edilmeye çalışılan sistem tek giriş tek çıkışlı bir su tankıdır. Bir besleme girişi ve bir çıkış rezervuarı olan tank sisteminde su seviyesi kontrolü amaçlanmaktadır.

3.2 Doğrusal Olmayan Sistemin Anlık Doğrusal Modellerinin Çıkarılması

Doğrusal olmayan sistemin öncelikle anlık doğrusal modelleri çıkarılmaya çalışılmıştır. Doğrusal olmayan sistem olarak Şekil 3.1’de görülen küre biçimindeki tank sisteminin seviye kontrolü ele alınmıştır.



Şekil 3.1 : Küresel Tank Sistemi

Sistemin davranışı aşağıdaki diferansiyel denklem ile tanımlanmaktadır:

$$Q_i(t-d) - Q_o = ((\pi - \pi(R-y)^2) \frac{dy}{dt} \quad (3.1)$$

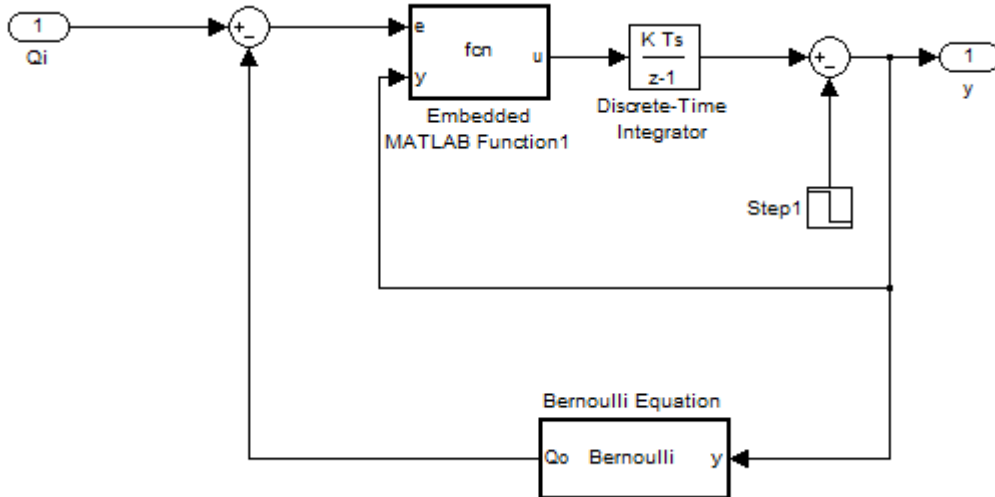
$$Q_o = \sqrt{2g(y-y_o)} \quad (3.2)$$

Sistem parametrelerini detaylı olarak açıklamak gerekirse; R tankın yarıçapı, Q_i içeri akış hızı (hacimsel), Q_o tanktan boşalma hızı (hacimsel), y herhangi bir andaki suyun seviyesi, y_o boşaltım rezervuarının yüksekliği ve d de Q_i ile akan sıvının y seviyesini artırana kadarki geçen süre yani gecikmedir. Simülasyon sırasında kullanılan değerler Çizelge 3.1’de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 : Tank Sistem Parametreleri

Tankın yarıçapı [m]	$R = 1$
Q_i 'dan y 'ye kadarki gecikme [s]	$d = 0$
Yerçekimi ivmesi [m/s^2]	$g = 9.81$
Çıkış musluğunun yerden yüksekliği [m]	$y_o = 0.1$
Girişteki hacimsel akış hızı [m^3/s]	$Q_i(t)$
Boşaltım hacimsel akış hızı [m^3/s]	$Q_o(t)$
Tanktaki su seviyesi [m]	y

Bu sistemin anlık doğrusal modelini çıkarabilmek için önce sistem Simulink ortamında Şekil 3.2’deki gibi oluşturulur. Su seviyesi y ile sistem boşaltım akış hızı arasındaki ilişkiyi (2.20) de Bernoulli denklemi ile verilmiştir.

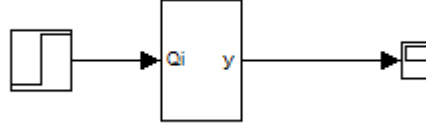


Şekil 3.2 : Tank sisteminin Simulink’te kuruluşu

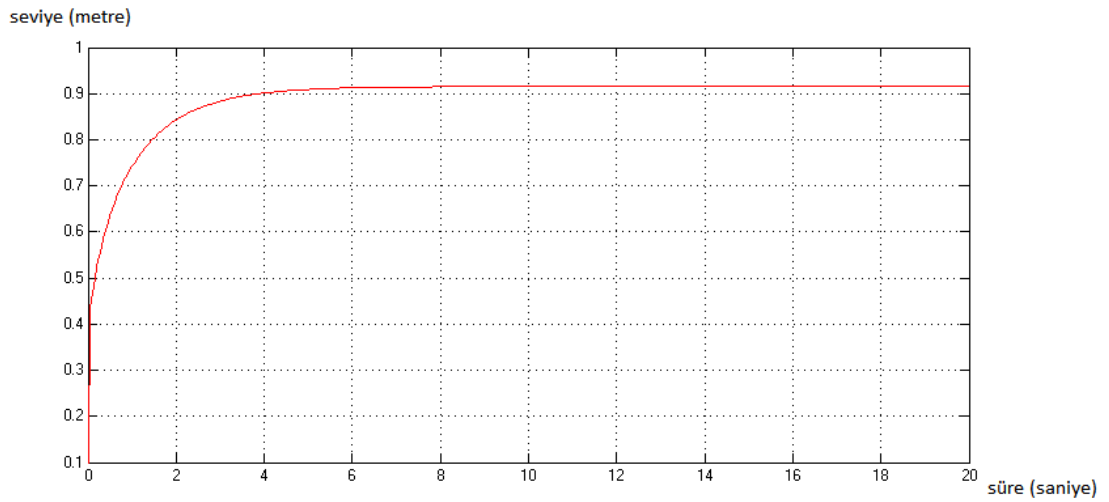
Bernoulli denkleminin ve sistemin davranışını ifade eden diferansiyel denklemin Simulink programında fonksiyon bloklarına dökülmüş hali Ek A.1’de bulunabilir.

Simulink'te bu yapı kurulduktan sonra sistem, açık çevrim değerinin gözlenebileceği tek bir fonksiyon bloğu haline getirilebilmektedir.

Yapı bu şekilde kurulduktan sonra Şekil 3.3'deki sisteme açık çevrim olarak giriş sinyali uygulandığında sistem cevabı aşağıdaki şekilde olmaktadır. Giriş işareti 20 saniye boyunca sabit ve 4 olarak uygulanmıştır.

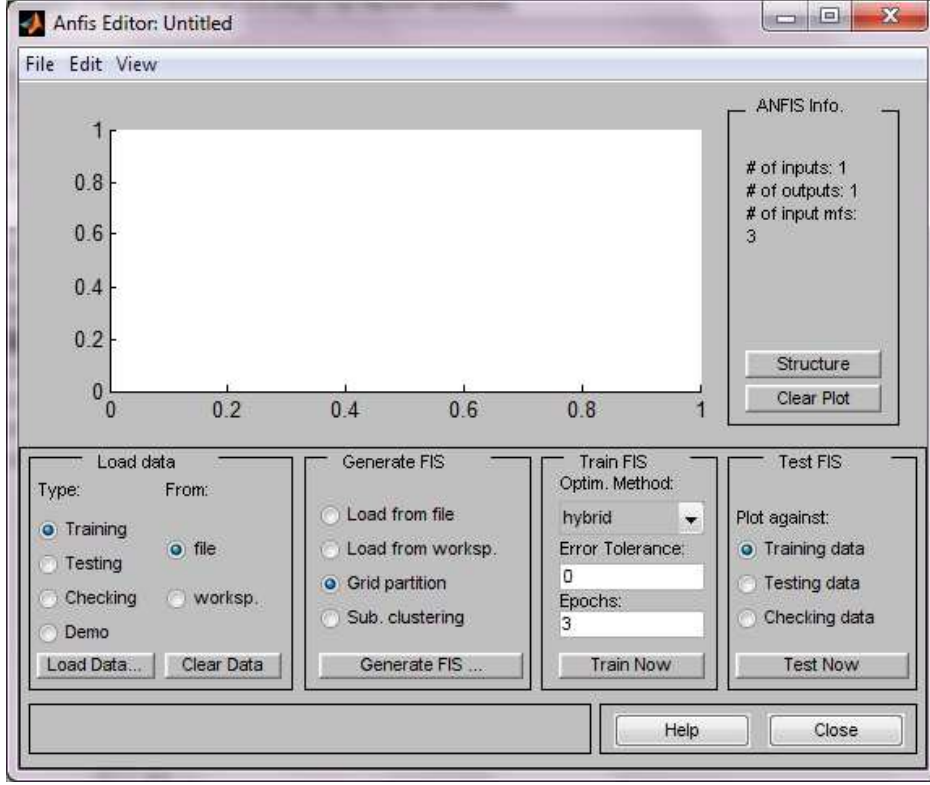


Şekil 3.3 : Blok haline getirilmiş sisteme basamak giriş uygulanması



Şekil 3.4 : Sistemin açık çevrim basamak cevabı

Sistemin anlık doğrusal modelini bulmak için ise Bölüm 1.5'de bahsedilen yöntem aynen kullanılacaktır. Bu yöntemi kullanmak için öncelikle sisteme ait üyelik fonksiyonlarına dolayısıyla sistemin bulanık modeline ihtiyaç duyulmaktadır. MATLAB 'da sistem giriş ve çıkışlarını kullanarak sistemin bulanık modeli elde edilebilmektedir. MATLAB içinde gömülü olan bulanık model kütüphanesindeki (Fuzzy Logic Toolbox) Şekil 3.5'de de görülebilen "anfis editor" adı verilen uygulama ile sistem verilerinin ilk olarak uygulamaya öğretilmesiyle; daha sonra da elde edilen bulanık modelin test edilmesiyle sistemin bulanık modeli elde edilmektedir.



Şekil 3.5 : MATLAB’da bulanık modeli elde etmeyi sağlayan “anfis editor”

Burada önemli nokta ise; Bölüm 1.5’de detaylı olarak anlatıldığı üzere; üyelik fonksiyonlarının tekil çıkışlı ve üçgen formunda olması gerekliliğidir.

Anlık doğrusal modellerin elde edilebilmesi için yapılması gereken hesaplamalarda denklem 1.16 da da görüldüğü üzere;

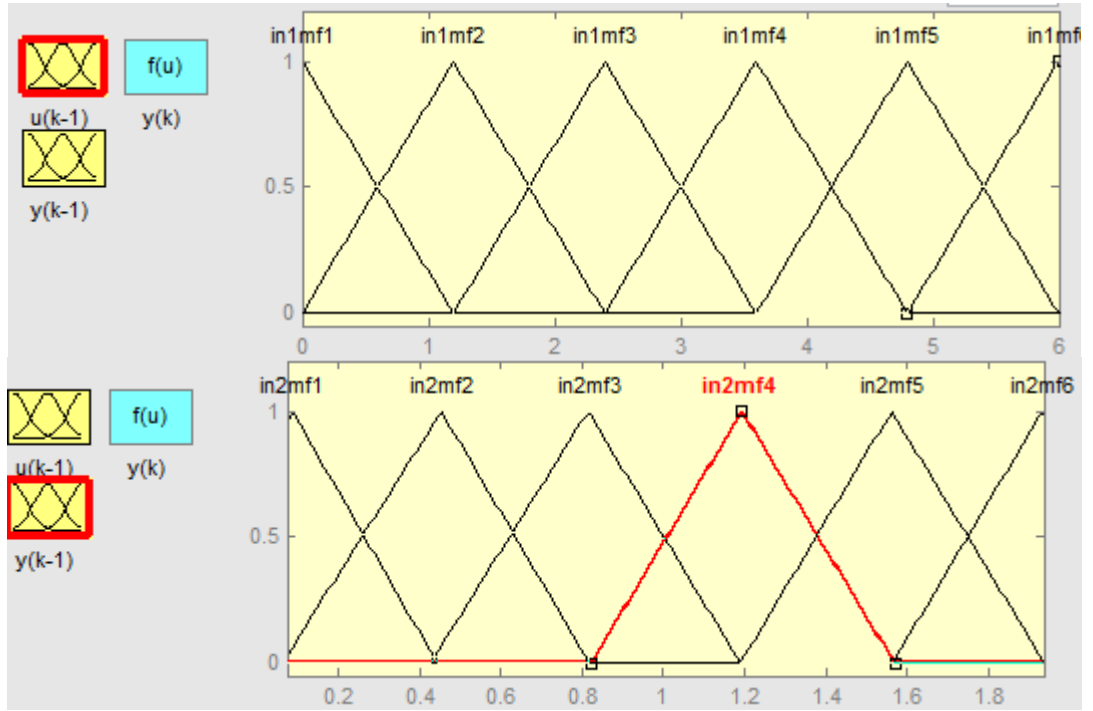
$$a_1 = \left(\frac{d_{m_1+1,m_2} - d_{m_1,m_2}}{a_{1,m_1+1} - a_{1,m_1}} \right) \left(\frac{a_{2,m_2+1} - u(k)}{a_{2,m_2+1} - a_{2,m_2}} \right) + \left(\frac{d_{m_1+1,m_2+1} - d_{m_1,m_2+1}}{a_{1,m_1+1} - a_{1,m_1}} \right) \left(\frac{u(k) - a_{2,m_2}}{a_{2,m_2+1} - a_{2,m_2}} \right)$$

üçgen üyelik fonksiyonlarının eksenleri kestiği a_{1,m_i} , a_{2,m_i} noktalara ve bu noktalara karşılık gelen tekil çıkış değerlerine ihtiyaç duyulmaktadır. Doğrusal olmayan tank sistemi için anfis editor yardımıyla oluşturulan sistemin bulanık modeli, MATLABdaki formuyla “fis” uzantılı dosya, bir dosya okuyucuyla açıldığında her üçgen üyelik fonksiyonunun ikisi eksenleri kestiği noktalar ve biri de tepe noktası olmak üzere 3 noktayla ifade edildiği görülmektedir.

Anlık doğrusallaştırma algoritması temel olarak şu adımlardan oluşur:

- Ele alınacak değişkenin ($u(k)$ veya $y(k)$) o andaki değeri kontrol edilir.
- Bu değer 0 'dan farklı sonuç verdiği üyelik fonksiyonları bulunur ve başlangıç ve bitiş noktaları (yatay eksenini kestiği nokta) bulunur.
- Bu noktalara karşılık gelen çıkış değerleri kontrol edilip; doğrusal model için gereken katsayı hesaplanır.

Tank sisteminin modelini çıkarmak için yararlandığımız giriş ve çıkışın önceki değerlerine ait üyelik fonksiyonları aşağıdaki gibidir:



Şekil 3.6 : Üyelik fonksiyonlarının grafiksel gösterimi

Bu üyelik fonksiyonlarına ait çıkış değerleri ve üyelik fonksiyonlarına ait başlangıç ve bitiş noktaları ve kısmen de olsa tekil çıkışlarının detaylarıyla Şekil 3.7'de görülebilir. Şekilde de görülebileceği gibi y çıkış değeri en fazla tankın çapı kadar yani $R=1$ için $2R$ yüksekliğine ulaşabiliyor.

Anfis editor yardımıyla çıkarılan sistemin bulanık modelinde her iki giriş ($u(k)$ ve $y(k)$) için de 6şar tane üyelik fonksiyonu dolayısıyla da 36 tane tekil çıkış bulunmaktadır.

```

14 [Input1]
15 Name='u(k-1)'
16 Range=[0 6]
17 NumMFS=6
18 MF1='in1mf1':'trimf',[-1.2 7.70396556695549e-006 1.20001757968541]
19 MF2='in1mf2':'trimf',[-7.70507511497349e-006 1.19995096147469 2.39987761486573]
20 MF3='in1mf3':'trimf',[1.19996833829091 2.39995048678723 3.60006196384937]
21 MF4='in1mf4':'trimf',[2.40005146218122 3.60000813199865 4.80006667015387]
22 MF5='in1mf5':'trimf',[3.59997366623953 4.79996599465799 6.00003491012869]
23 MF6='in1mf6':'trimf',[4.79998930106114 5.99996508668768 7.1999999999998]
24
25 [Input2]
26 Name='y(k-1)'
27 Range=[0.0751704101135066 1.9348623853211]
28 NumMFS=6
29 MF1='in2mf1':'trimf',[-0.296764740893811 0.088964236076733 0.444789958000584]
30 MF2='in2mf2':'trimf',[0.0625977535238654 0.454976280377704 0.819196798023852]
31 MF3='in2mf3':'trimf',[0.42775511412001 0.815102136855523 1.18987550106979]
32 MF4='in2mf4':'trimf',[0.822489632612195 1.19329712012557 1.56850072140288]
33 MF5='in2mf5':'trimf',[1.18984937505817 1.56114244369422 1.93781758320514]
34 MF6='in2mf6':'trimf',[1.56351998480084 1.93152663931458 2.3068006277473]
35
36 [Output1]
37 Name='y(k)'
38 Range=[0.0751704101135066 1.9348623853211]
39 NumMFS=36
40 MF1='out1mf1':'constant',[0.0670887051772924]
41 MF2='out1mf2':'constant',[0.349779606217465]
42 MF3='out1mf3':'constant',[0.771092238831912]
43 MF4='out1mf4':'constant',[1.1058496776578]
44 MF5='out1mf5':'constant',[1.50184642240285]
45 MF6='out1mf6':'constant',[1.21681885797734]
46 MF7='out1mf7':'constant',[0.105197161092631]

```

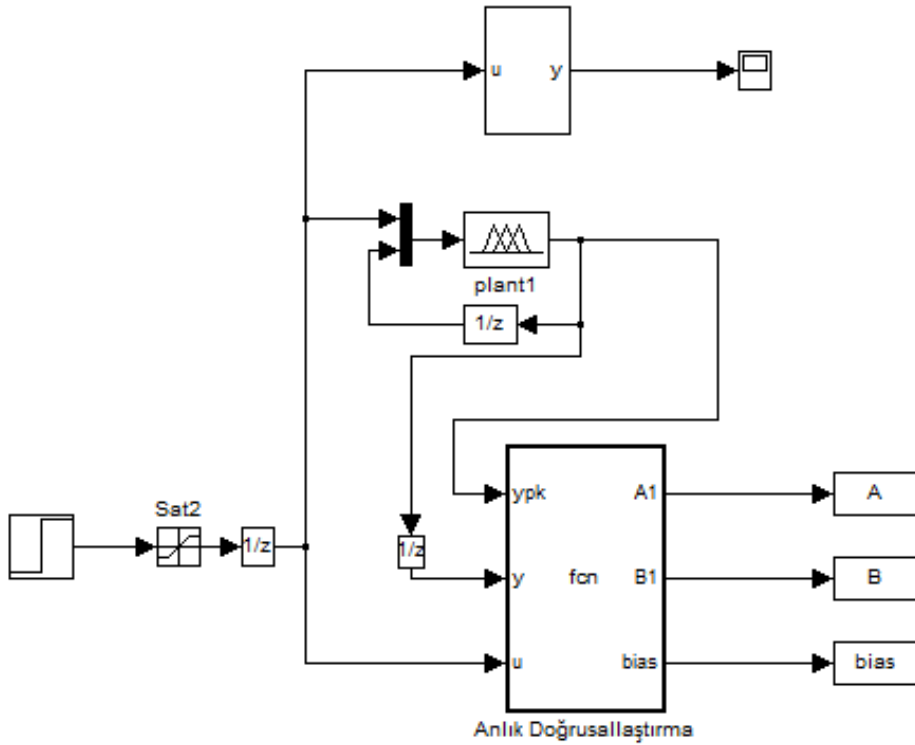
Şekil 3.7 : Sistemin bulanık modelinin detayları

Örneğin; $u^* = 2.8$ için $u(k-1)$ 'e ait üyelik fonksiyonlarından sadece in1mf3 ve in1mf4 üyelik fonksiyonları ateşlenmiş olacaktır. Diğer üyelik fonksiyonları için u^* değeri sıfıra karşılık gelmektedir. Doğrusal modeli hesaplamamız için de bu değer için anlamlı olan in1mf3 ve in1mf4 üyelik fonksiyonlarının yatay eksenini kestikleri noktaları ve bu noktalara karşılık gelen çıkış değerlerini denklemden yerine koyarak ARX modeldeki $u(k-1)$ 'in katsayısı olan b_1 terimi hesaplanmaktadır. Fakat üyelik fonksiyonları 0 ile 6 arasında tanımlı olduğundan $u(k-1)$ girişinin alabileceği en büyük değer de 6 olmaktadır. Bu yüzden kontrolörün çıkışını ayarlayan ve 6'dan büyük değerleri 6 olarak ayarlayabilen bir kısıtlayıcı koyulmalıdır. Fakat muhtemel problemleri önleme amacıyla Ek A.2'de görülebilecek anlık doğrusallaştırma yazılımında 6'dan büyük değerler sisteme uygulanırsa, en son iki üyelik fonksiyonu ateşlenmiş olduğundan; in1mf5 ve in1mf6'nın değerleriyle hesaplama yapılarak katsayı bulunur.

Benzer şekilde bir y^* değeri içinde ateşlediği üyelik fonksiyonları; bu üyelik fonksiyonlarının eksenini kestiği yani başlangıç ve bitiş noktaları ile karşılık geldikleri

çıkış değerleri bulunup denklemde yerine koyarak bu sefer a_1 değeri bulunur. Giriş işaretindeki benzer bir sınır şartı $y(k-1)$ için de geçerlidir. $y(k-1)$ suyun seviyesini gösterdiğinden ve bu da en fazla tankın toplam yüksekliği yani $2R$ kadar olabildiğinden üyelik fonksiyonları da bu değer aralığında tanımlıdır.

Doğrusal modelin tamamlanması için bulunması gereken sistem denklem sabiti; o anki gerçek sistem çıkışından; bulunan katsayılarla sistem giriş-çıkış değerlerinin çarpımının çıkarılmasıyla elde edilir. Bu hesaplamaları içeren yazılım Ek 2de verilmiştir. Kullanılan blok diagram yapısı da aşağıdaki gibi olmaktadır.

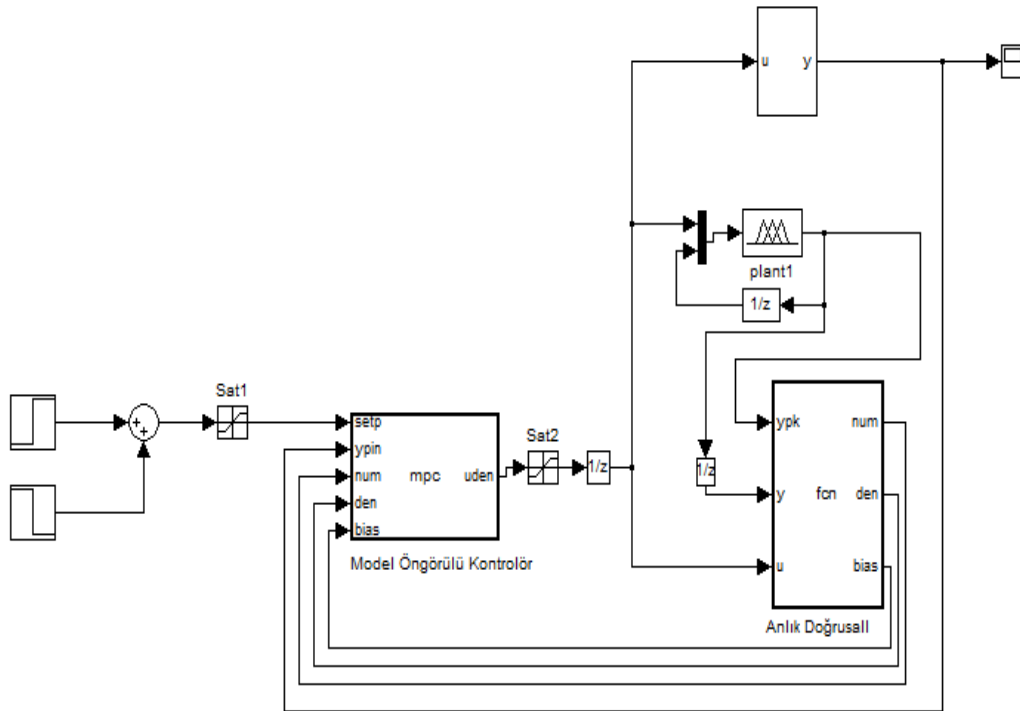


Şekil 3.8 : Anlık Doğrusallaştırma Mekanizması

3.3 Model Öngörülü Kontrolörün Tasarlanması

Anlık elde edilen her doğrusal modelin kontrol edilebilmesi için bir model tabanlı öngörülü kontrolör tasarlanmalıdır. Bu amaçla Bölüm 2.2’de anlatılan kontrolör yapısı birebir olarak uygulanmıştır. Kontrolör yazılımı tasarlanırken referans [1]’deki öngörülü kontrolör kodu temel alınmıştır. Bu yazılım üzerine sabit çıkış bozucusu uygulanmış ayrıca yazılım Simulink’te çalışabilecek gömülü fonksiyonlar haline getirilmiştir. MATLAB’da tasarlanan kodun Simulinkte doğrudan kullanılamamaktadır. Simulinkte çalışır hale getirilmesi için gömülü fonksiyonların harici olarak çalışmasını sağlayan komutlar eklenmiştir.

Tasarlanan kontrolör yazılımı ile bozucu bir doğrusal modelin kontrol edilmesi sağlanmıştır. Fakat kontrol etmek istediğimiz yöntemde her örnekleme zamanında farklı bir doğrusal model üretildiği için kontrol sürecini tekrarlı hale getirmek gereklidir. Bu yüzden Simulinkteki blok diagram yapısı kullanılmış ve doğrusal sistem parametreleri geri beslemeli bir yapı oluşturacak şekilde kontrolöre giriş olarak sağlanmıştır. Bunun yanısıra kontrolör yazılımı herhangi bir sisteme kolayca adapte olacak şekilde tasarlanmıştır. Kontrolör girişleri değişken olarak tutulurken; kontrolörün çalışmasını etkileyecek öngörü ufku, kontrol ufku, örnekleme zamanı gibi parametreler birer sabittir. Bu çalışma sırasında ele alınan tank örneği için çeşitli denemeler yapılmış ve en iyi değer olarak öngörü ufku $P = 5$; kontrol ufku 1 ve örnekleme zamanı $T_s = 0.05$ ve referans yörüngesine yaklaşırken gösterilen davranışın üstel fonksiyonun zaman sabiti de $T_{ref} = 0.5$ olarak seçilmiştir. Anlık doğrusallaştırılan sistemin model tabanlı öngörülü kontrolör ile kontrol mekanizması Şekil 3.9'daki gibi olmaktadır:



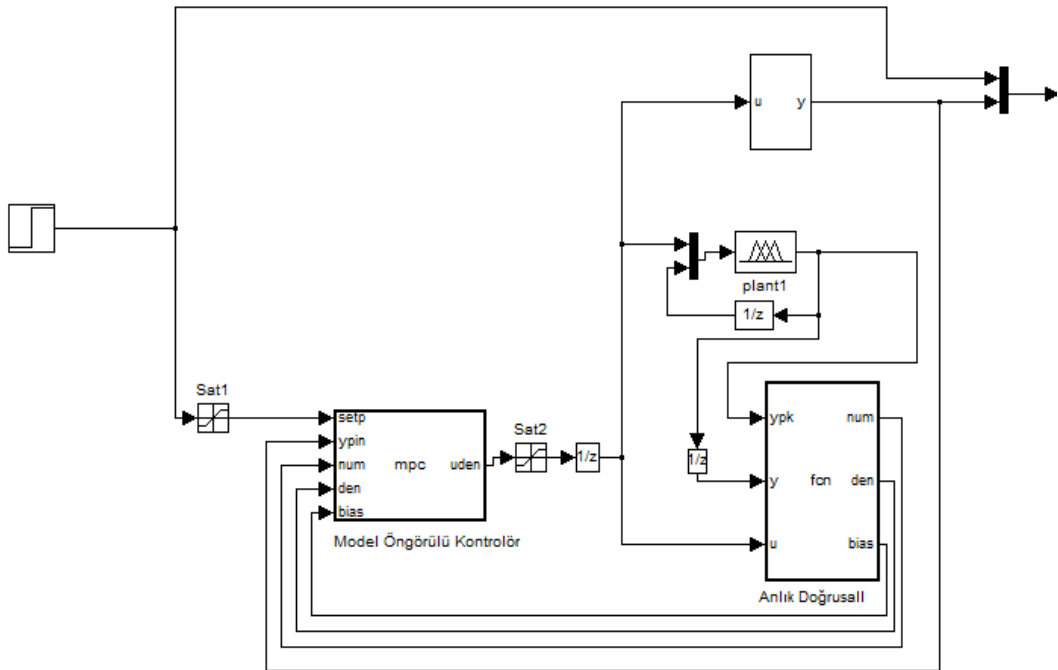
Şekil 3.9 : MPC ile kontrol edilen anlık olarak doğrusallaştırılmış sistem

Model öngörülü kontrol algoritmasında sistemin içsel modeli hali hazırda kontrolörün içinde de bulunduğundan sistemin çıkışından alınan 'ypin' sisteme giriş

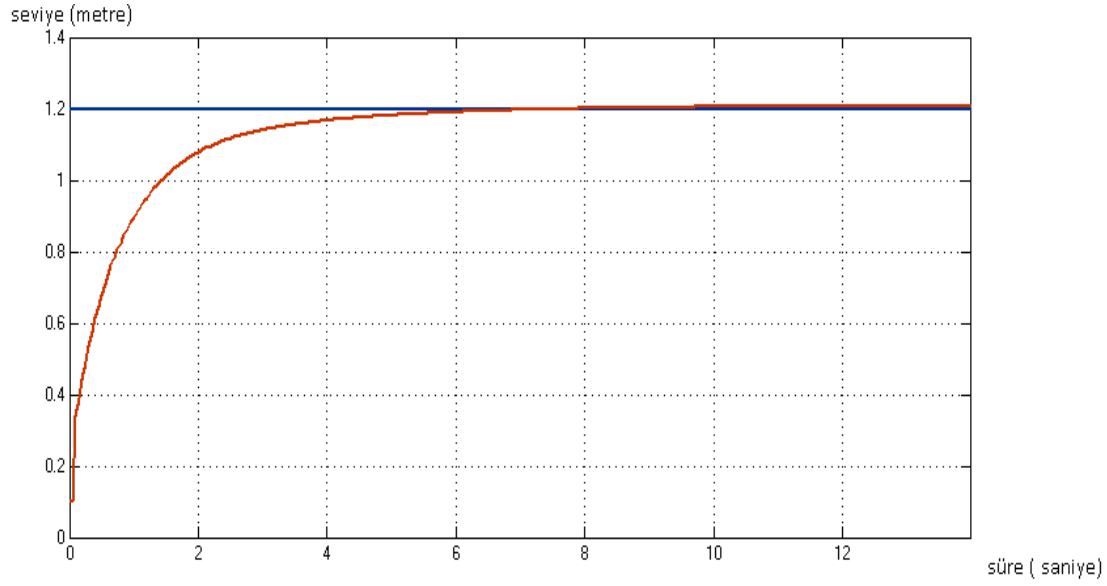
olarak verilerek bölüm 2.3’de anlatıldığı gibi sistem ile model arasındaki farka göre kontrol işlemi gerçekleştirilmektedir.

Kontrolör parametreleri sistemin davranışını etkilediği kadar hesap yükünde de ciddi değişikliklere sebep olmaktadır. Bu yüzden öngörü ufku, kontrol ufku veya örnekleme zamanı gibi parametrelerin seçiminde bu kazanç ve kayıplar göz önüne alınmaktadır. Örneğin kontrol ufkunun artması sistemi genellikle daha kararlı hale getirmesine rağmen; hesap yükünü ciddi şekilde artırmaktadır. Veya üstel fonksiyonun zaman sabitinin artması sistemin genellikle erişilmesi istenen referans değerine daha çabuk erişmesine yol açmaktadır. Fakat bu zaman sabiti arttıkça erişilmesi gereken hata payını de küçülteceği için hesap yükünü oldukça artıracaktır. Bu gibi kayıp-kazançlar göz önünde bulundurularak ve de sistem davranışı değişik değerler için gözlenerek konu başında bahsedilen değerler seçilmiştir.

Bu parametrelere göre giriş sinyali olarak 1.2 uygulanmış ve referans ile çıkış değeri ilişkisini gösterebilmek için Şekil 3.10’daki yapı kurulmuştur. Sonrasında bu değerler için simülasyon yapılmış ve kontrol edilmiş sistem cevabı Şekil 3.11’deki gibi elde edilmiştir:

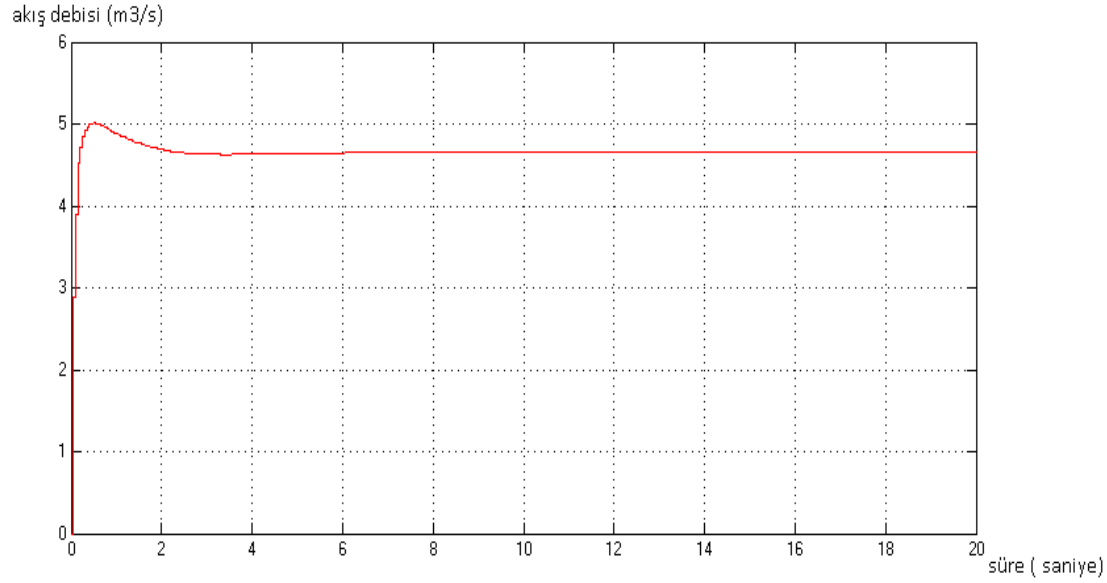


Şekil 3.10 : Referansı ve sistem cevabını aynı anda gösteren yapı



Şekil 3.11 : Giriş sinyali (referans) ile sistem çıkışının karşılaştırılması

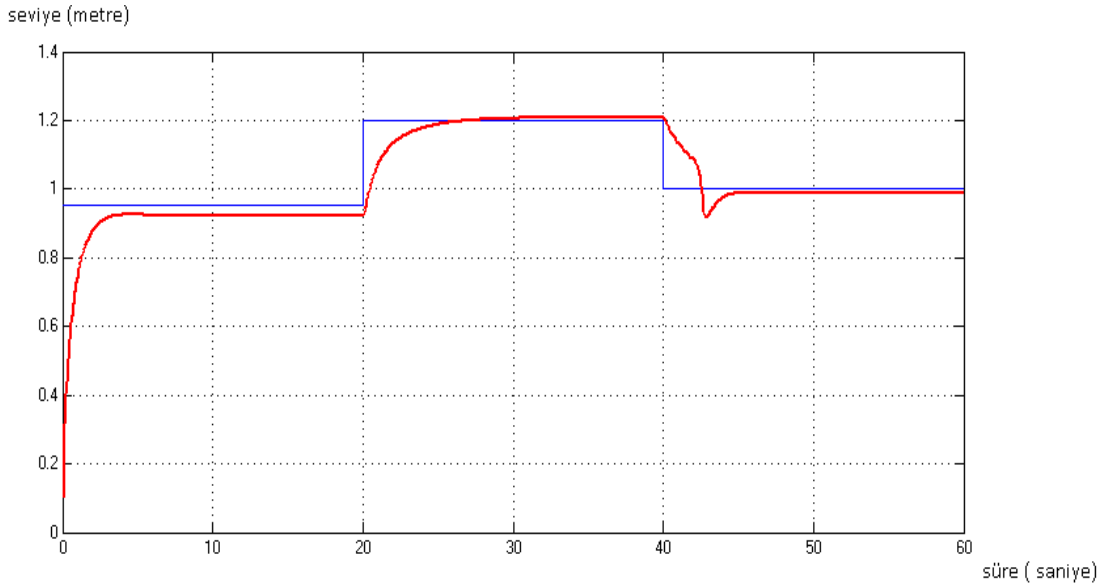
Girişe uygun bir şekilde çıkış kontrol edilirken çıkışı kontrol etmek için sisteme uygulanan kontrol işareti aşağıdaki gibi değişmektedir.



Şekil 3.12 : Kontrol işareti (Giriş akış debisi)

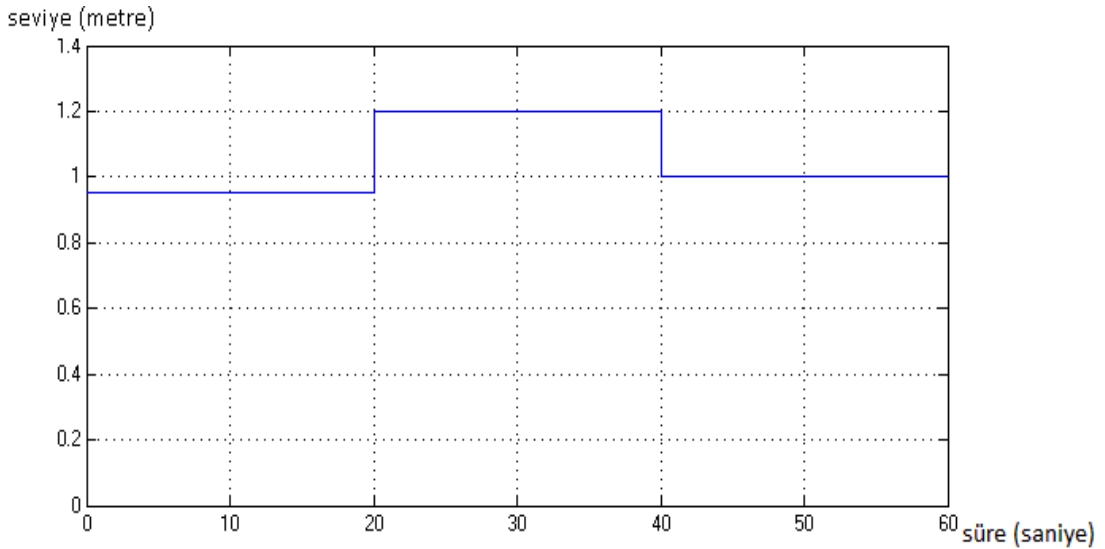
Sistemin u girişine ait üyelik fonksiyonları 0 ile 6 arasında tanımlı olduğundan kontrol işaretinin önüne bir kısıtlama elemanı koyularak, 6'dan büyük kontrol işaretlerinin 6da sınırlanması sağlanıyor. Fakat Şekil 3.12'de de görülebildiği üzere 1.2m seviyelerindeki giriş işaretleri için kontrol işareti üst sınırın uzağında

olduğundan bu giriş seviyeleri için bir limitleme devreye girmemektedir. Sistemin değişken giriş uygulandığı durumdaki davranışı ise aşağıdaki gibidir.



Şekil 3.13 : Referans ile sistem çıkışının davranışı

Şekil 3.13'de gösterilen değişken giriş parametreleri şu şekildedir: 0 ile 20. sn'ler arasında giriş = 0.93; 20 ile 40. sn'ler arasında giriş = 1.2 ve 40 ile 60.sn'ler arasında giriş = 1. Uygulanan girişin zamana göre değişimi aşağıda görülebilmektedir.

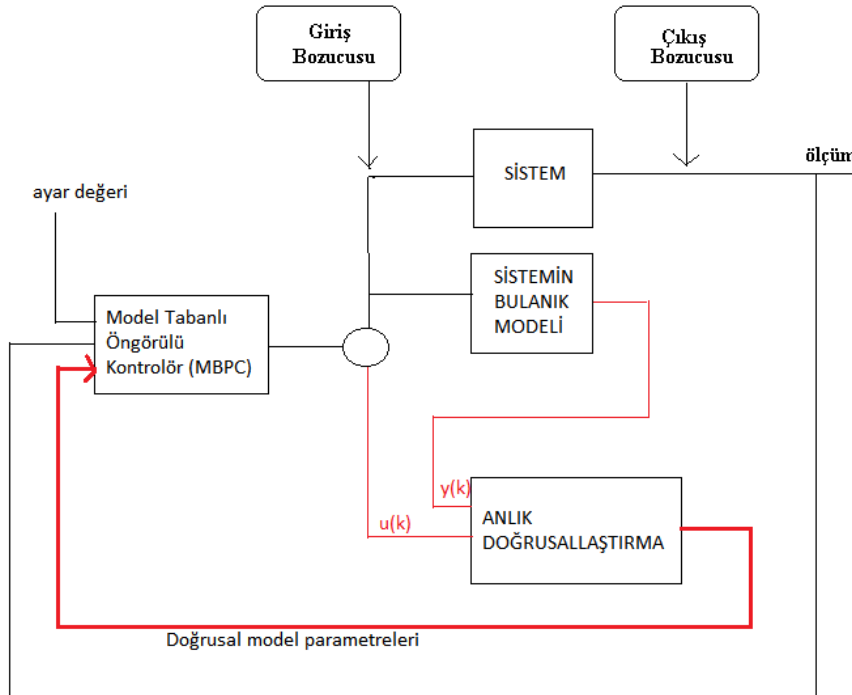


Şekil 3.14 : Sisteme uygulanan zamanla değişen giriş sinyali

Şekil 3.13’de de görüldüğü üzere kontrolör parametreleri sabit tutulduğunda farklı ama birbirine yakın girişler için sistem kontrol edilebilmektedir. Sistem girişindeki büyük değişiklikçe kontrolör parametrelerinde de ufak değişiklikler yapılarak sistem kontrolü tekrardan kolaylıkla sağlanabilir. Veya kontrolör yazılımında öngörü ufku veya kontrol ufku gibi parametreler giriş değerine bağlı olarak değişebilen dinamik parametrelerle tanımlanırsa; farklı girişlere daha yatkın bir kontrolör tasarımı yapılabilmektedir.

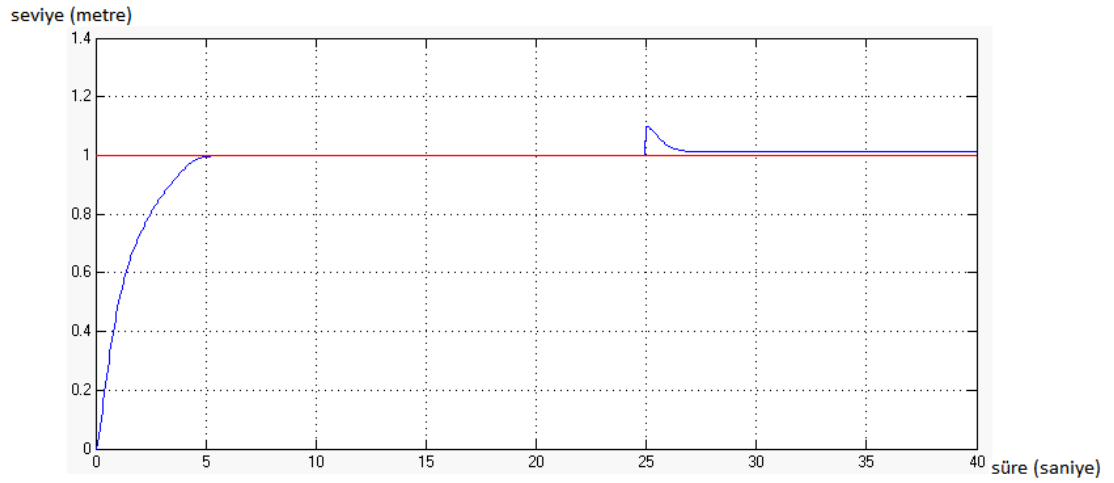
3.4 Bozucunun Sisteme Etkisi

Öngörülü kontrol yönteminin sistem üzerinde uygulamasının incelenmesinden sonra sistemin bozucu altındaki davranışının da incelenmesi gerekmektedir. Gerçek sistemlerde genellikle sistem girişinde veya çıkışında etkiyen çeşitli faktörler olduğu için sistem davranışlarının doğru bir şekilde benzetimlerinin yapılabilmesi için bozucuların da sistem modellerinde hesaba katılmasında fayda bulunmaktadır. Bozucular, sisteme farklı frekans, genlik veya formlarda etki edebilmektedirler. Şekil 3.15’te sisteme uygulanabilen giriş ve çıkış bozucuları şematik olarak gösterilmiştir.

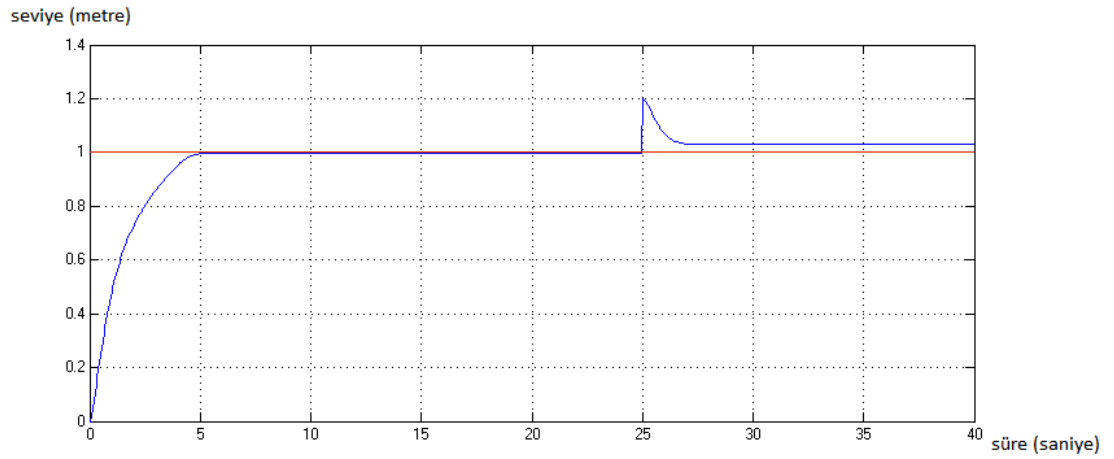


Şekil 3.15 : Bozucunun sisteme uygulanması

Bozucunun etkisini görebilmek için sisteme yaklaşık yüzde 10 oranında bir çıkış bozucusu uygulanmıştır. Bu durum, tank çıkışına katılan 0.1 metre yükseklikteki sabit bir sıvı akışı olarak düşünülebilir. Kontrolörün yüzde 10'lık bozucuları tolere edebilmesi; dolayısıyla sistemi bozucunun uygulandığı andan itibaren kontrol altına alabilmesi beklenmektedir. 25.sn'de sisteme önce 0.1 m seviyesinde daha sonrasında 0.2 m seviyesinde bozucu uygulanmakta ve Şekil 3.16 ve Şekil 3.17'de görüldüğü üzere kısa bir geçiş zamanı sonunda sistem kontrol altına alınabilmektedir.



Şekil 3.16 0.1 metre seviyesindeki bozucunun sisteme etkisi

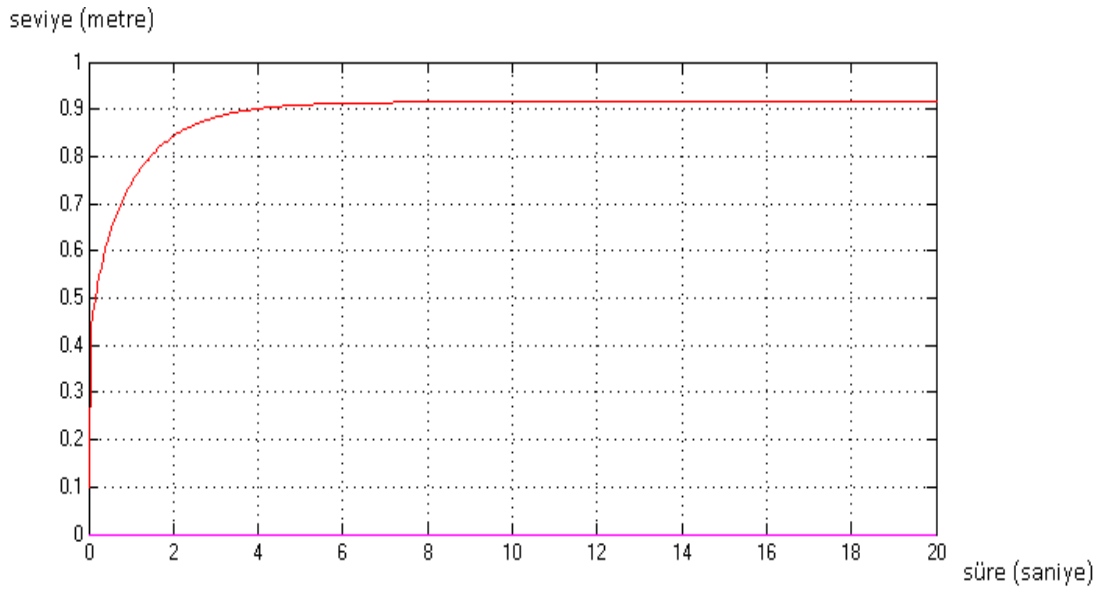


Şekil 3.17 Daha yüksek seviyeli bir bozucunun sisteme etkisi

Sistem çıkış ölçümlerinden de görülebildiği üzere; öngörülü kontrolörümüz çıkışa uygulanan bozucuyu tolere edebilmekte ve sistemi ayar değerine çok kısa bir gecikme sonrası erişirebilmektedir.

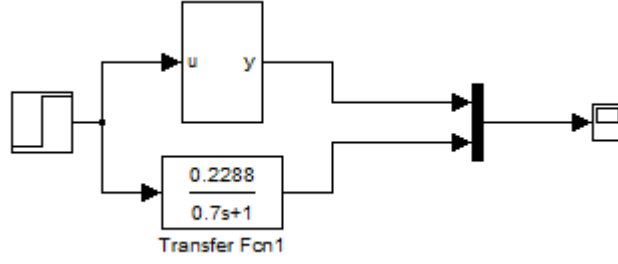
3.5 Belirli Giriş Aralığında Elde Edilen Model İçin MPC Tasarımı

Anlık doğrusallaştırılan sistemin MPC ile kontrol edilmesi performans açısından iyi sonuçlar verse de bazı yöntemlere kıyasla hesap yükü biraz ağır olmaktadır. Sistemin doğrusal modelini her örnekleme anında elde etmek yerine; belirli bir giriş için elde edilen sistem çıkışını doğrusal tek bir modele benzetip bu doğrusal modele uygun kontrolör tasarlamak çok daha kolay bir yöntem olmaktadır. Bu doğrusal sistemi kontrol ederken üretilen kontrol işaretlerini de gerçek sisteme uygulayarak gerçek sistemi kontrol performansı da gözlenebilmektedir. Sistemin çıkışına bakılarak birinci veya ikinci derece sistem tanımlamasını yapılması için çeşitli metodlar geliştirilmiştir. Fakat simülasyonda model parametreleriyle oynama şansı olduğundan, deneme yanılma yöntemiyle model parametreleri ayarlanmıştır. Örneğin giriş 4 iken sistemin açık çevrim davranışı Şekil 3.16'daki gibi olmaktadır:



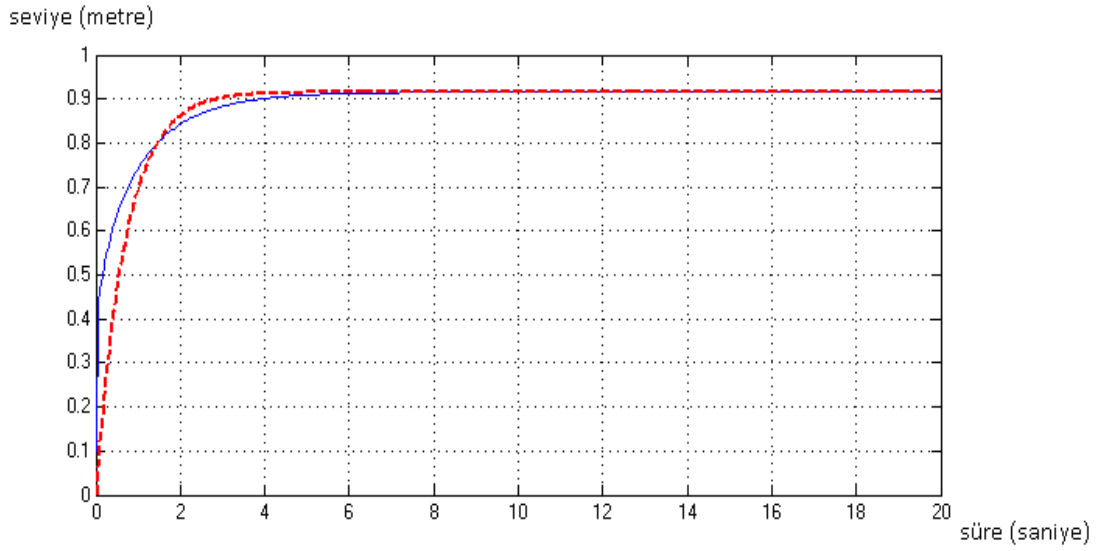
Şekil 3.18 : Giriş sinyali 4 iken açık çevrim cevabı

Sistemin birinci dereceden bir modelini çıkarmak için gereken zaman sabiti ve kazanç katsayısıyla oynayarak; deneme yanılma yöntemiyle aşağıdaki model elde edilmiştir:



Şekil 3.19 : Deneme yanılma yöntemi ile sistem modelleme

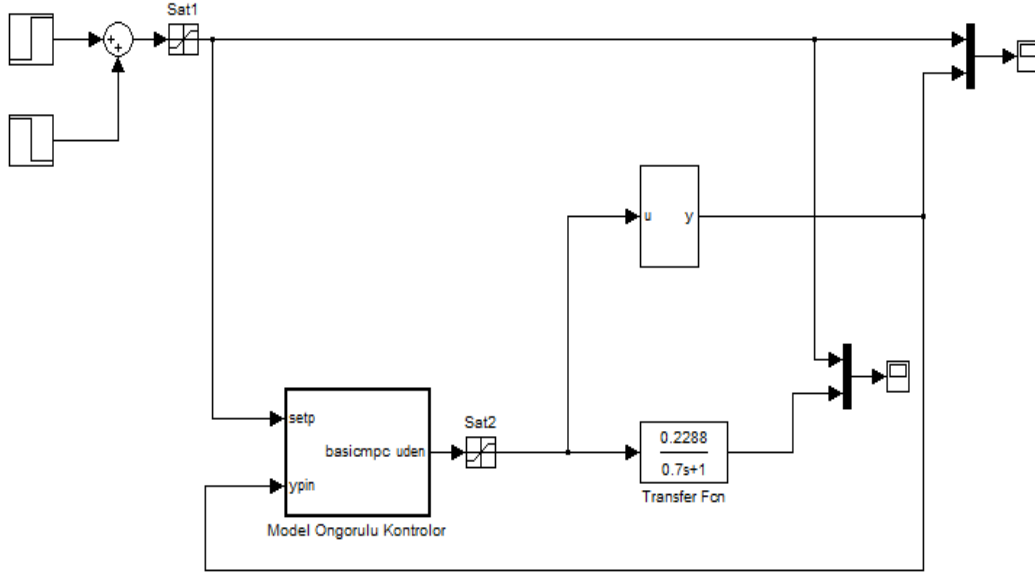
Bu model için sistem cevabı aşağıdaki gibi olmaktadır:



Şekil 3.20 : Sistemin ve modelinin açık çevrim cevabı

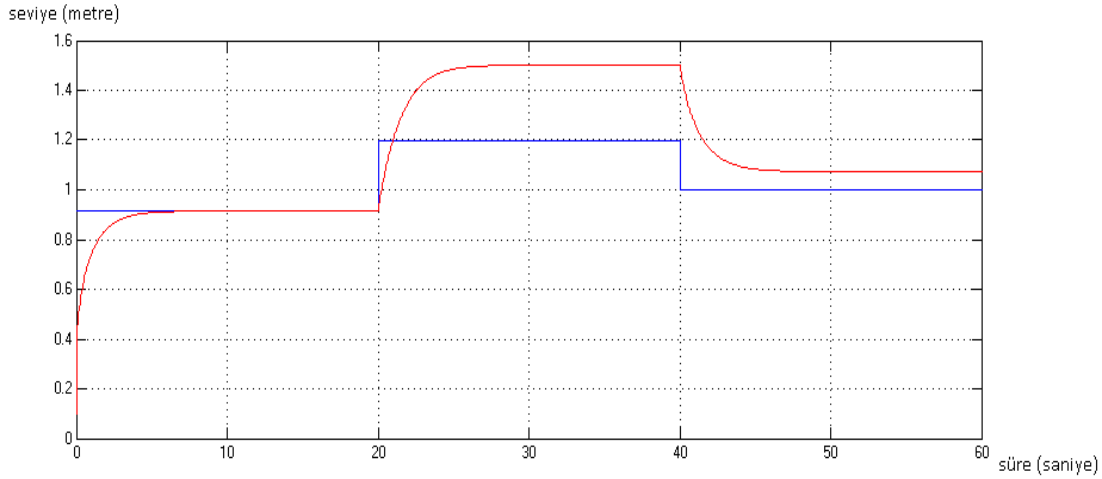
Kesikli çizgi ile gösterilen çıkış modelin çıkışı iken; düz çizgi sistemin açık çevrim girişini göstermektedir. Bunun yanısıra ele aldığımız tank sisteminde yarıçap 1'e eşit olduğu için sistemin gerçek davranışını simüle edebilme amacıyla çıkışı 1'e yakın değerlere getirebilecek bir giriş değeri uygulanmıştır. Giriş sinyali olarak uygulanan

4'e göre sistemin modeli ise $TF(s) = \left(\frac{0.2288}{0.7s + 1} \right)$ olarak bulunmuştur.



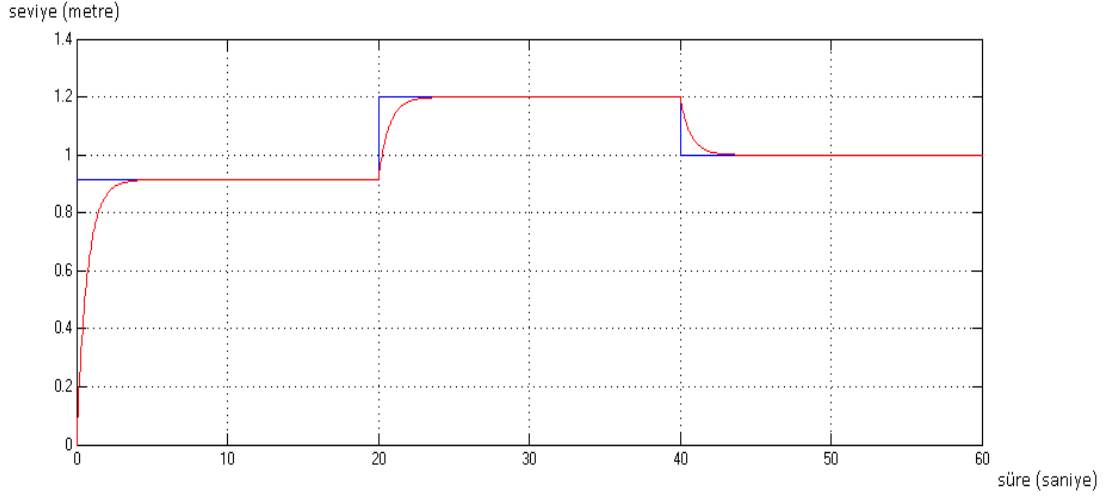
Şekil 3.21 : Sistem ve modelinin MPC ile kontrol edilmesi

Az önceki durumda anlık doğrusal modelleri bulunan sisteme uygulanan zamanla değişken giriş sinyali bu modele de uygulanmış ve Şekil 3.19'daki sonuç elde edilmiştir.



Şekil 3.22 : MPC ile kontrol edilen sistemin cevabı

Sistemin cevabına karşılık, aynı girişin uygulandığı model, öngörülü kontrolörün sağladığı kontrol işaretiyle girişin değişimine hızlı ve hatasız bir biçimde cevap verebilmekte ve öngörülü kontrolörün doğrusal sistemlerdeki başarılı performansı hakkında iyi bir kanıt sunmaktadır.



Şekil 3.23 : MPC ile kontrol edilen modelin cevabı

Burada dikkat edilmesi gereken önemli noktalardan biri sistemin modelinin çıkarıldığı girişin uygulandığı 0-20 sn'leri arasında sistem kontrolü hatasız bir şekilde yapılmışken; bu değerden uzaklaştığımız 20-40 sn'leri arasında sistem kontrolü kötüleşmiş; modelin elde edildiği giriş değerine nispeten yaklaşılana 40-60 sn'leri arasında ise bir önceki duruma kıyasla kontrol performansında bir iyileşme görülmektedir. Üzerinde çalışılan gerçek sistem doğrusal olmayan bir sistem olduğundan farklı girişler için farklı davranışlar göstermekte bunun sonucunda da farklı sistem modelleri elde edilmektedir. Fakat kolay hesaplanabilirliği nedeniyle tercih edilebilecek bu yöntemde sistemden elde edilen tek bir model kontrol edilmeye çalışıldığı için farklı modellerin devreye girdiği zaman aralıklarında öngörüldüğü üzere çok da iyi bir performans gösterememektedir. Buna karşın anlık doğrusal modelleri çıkarılan sistemin kontrolünde bu yöntemle kıyasla çok daha başarılı bir kontrol performansı elde edilmektedir.

4. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma boyunca, doğrusal olmayan sistemlerde uygulanabilirliği zor olan bulanık model tabanlı öngörülü kontrol yaklaşımı incelenmiştir. Doğrusal olmayan bir sistem ele alınmış ve anlık doğrusal modellerinin elde edilmesi ve sistemin doğrusal benzeri modelinin elde edilmesi sonrası öngörülü kontrol yaklaşımı uygulanmıştır. Ayrıca bulanık mantıkla sistem modelleme yöntemleri incelenmiş ve model öngörülü kontrol için uygun görülen Takagi Sugeno tipi bulanık model için detaylı hesaplamalar yapılmıştır.

Çalışmada esas alınan yöntemde öncelikle ele alınan doğrusal olmayan sistemin anlık doğrusal modelleri çıkarılmıştır. Sonrasında da elde edilen doğrusal modeller, öngörülü kontrolör ile gerçek zamanlı kontrol edilerek tasarlanan kontrolörün performansı gözlemlenmiştir. Daha sonra belli bir giriş sinyali için elde edilen sistem çıkışı kullanılarak, sistemin birinci mertebeden doğrusal modeli elde edilmiştir. Bu birinci mertebeden model benzer şekilde öngörülü kontrolör ile kontrol edilip sistem çıkışları bu iki yöntem için karşılaştırılmıştır.

Anlık doğrusallaşma sırasında karşılaşılan problemlerden biri, sistem gerçek zamanlı çalıştığından, giriş sinyalindeki ani bir değişim durumunda sistem cevabının kötü etkilenmesidir. Anlık doğrusal model tasarımında sistemin çıkışı değil de çıkışın ve kontrol işaretinin bir önceki değerinin (geçmiş değeri) kullanması sistem cevabının oturmasını biraz geciktirmektedir.

Model öngörülü kontrolör tasarımında önemli birer parametre olan kontrol ufku, öngörü ufku, hata belirlenmesi için tanımlanan üstel fonksiyonun zaman sabiti gibi değişkenlerin dikkatli bir biçimde seçilmesidir. Bu parametrelerden bazıları farklı giriş sinyalleri için özelleştirilerek veya dinamik hale getirilerek daha düzgün ve kararlı sistem cevapları elde edilebilir.

Ele alınan doğrusal olmayan sistem modeli ve tüm simülasyonlar MATLAB ve Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Sabit seviyedeki sinyallerle gerekli testler yapıldıktan sonra sistemlere ve denenilen iki kontrol mekanizmasına da değişken giriş uygulanmış; ve aynı giriş değerlerine karşılık performansları gözlenmiştir. Anlık olarak elde edilen doğrusal model yaklaşımında sistem kontrolünün daha iyi bir performans sağladığı ve referans değeri daha hızlı ve daha az aşımli bir yörüngede takip ettiği görülmüştür.

Gelecekte bu çalışmanın, yüksek derecede doğrusal olmayan ve hem giriş hem de çıkış bozucusu olan bir sisteme, örneğin birçok musluklu ve farklı kısıtlama ve kayıplara sahip tank sistemine uygulanması ve kontrolörün parametre değişikliklerine vereceği tepkilerin incelenmesi amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

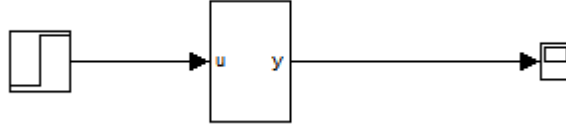
- [1] **Maciejowski, J. M.**, 2002. Predictive Control with Constraints. Prentice Hall, Edinburgh Gate, England, pp. 1-80.
- [2] **Eksin, İ., Yesil, E.**, 2008. Bulanık Modelleme Ders Notları Bölüm 2: KOM 504 Bulanık Modelleme ve Kontrol, Istanbul Teknik Üniversitesi, Istanbul.
- [3] **Babuska, R.**, 2001. Fuzzy Systems, Modeling and Identification, Technical report, pp. 1-16, Delft University of Technology.
- [4] **Abonyi, J., Nagy, L., Szeifert F.**, 2001. Fuzzy Model-Based Predictive Control by Instantaneous Linearization, Fuzzy Sets and Systems, vol. 120, pp. 109-122.
- [5] **Qiao, W. Z., Mizumoto, M.**, 1996. PID Type Fuzzy Controller and Parameters Adaptive Method, Fuzzy Sets and Systems, vol. 78, pp. 23-35.
- [6] **Komurcu, E.**, 2009. Bulanık Model Öngörülü Kontrol, MSc. Thesis, Istanbul Teknik Üniversitesi, Istanbul.
- [7] **Eng, B. C., Kwee, H. M., Wern, A. T. S., Yusof, K., M.**, 2006. Formulation Of Model Predictive Control Algorithm For Nonlinear Processes, MSc. Thesis, Universiti Teknologi Malaysia, Malaysia.
- [8] **Babuska, R., Verbruggen, H. B.**, 1995. An Overview of Fuzzy Modeling for Control, Control Engineering Practice, vol. 4, pp. 1593-1606.
- [9] **Mollov, S., Babuska, R., Abonyi, J., Verbruggen, H. B.**, 2004. Effective Optimization for Fuzzy Model Predictive Control, IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol:12, no:5, October.

EKLER

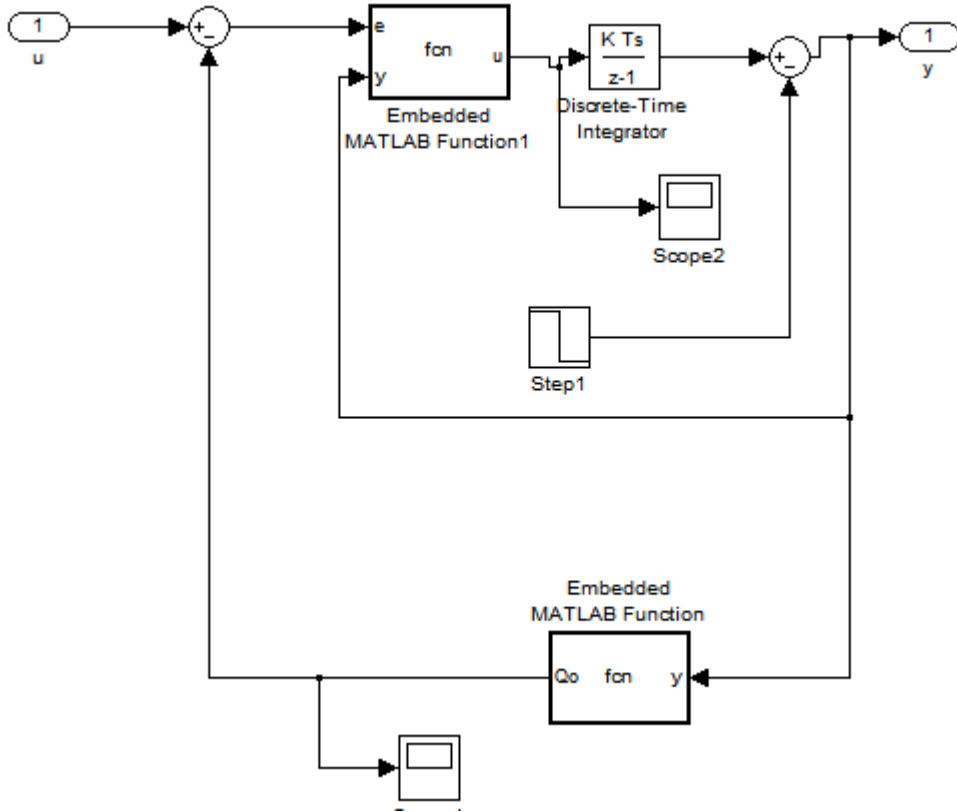
EK A.1 : Gerçek Sistemin Simulink'te Kurulması

EK A.2 : Anlık Doğrusallaştırma Yazılımı

EK A.1



Şekil A.1 : Sistemin tek blok gösterimi



Şekil A.2 : Sistemin detaylandırılması

Buna göre üstteki blokun içine sistemin davranışını gösteren aşağıdaki kod satırları girilmelidir.

```
function u = fcn(e,y)
R=1;
u=e/((pi)-(pi*(R-y)^2));
```

Ve ikinci blok yani sıvı yüksekliği ile çıkış akışının hızı ilişkisini gösterene Bernoulli denklemi içinse;

```
function Qo = fcn(y)
yo=0.1;
```

```
q=9.81;  
if (y-yo)>0  
    Qo=sqrt(2*q*(y-yo));  
else  
    Qo=0;  
end
```

komutları uygulanmalıdır.

EK A.2

Doğrusal olmayan bir sistemin anlık doğrusal modellerini çıkarmaya yarayan MATLAB kodu Simulink'te kullanılabilmesi amacıyla yapılan modifikasyonlarla aşağıdaki gibidir.

```
function [num,den,bias] = fcn(ypk,y,u)

eml.extrinsic('find');
eml.extrinsic('clc');
eml.extrinsic('min');
eml.extrinsic('max');

index_mp1 = 1;
index_m = 1;
index2_mp1 = 1;
index2_m = 1;

clc;

inp2= [-0.001, 1.2, 2.4, 3.6, 4.8, 6];
inp1= [-0.001, 0.44, 0.82, 1.19, 1.57, 1.94];
d= [0.067 0.35 0.77 1.11 1.5 1.22;
    0.11 0.38 0.79 1.13 1.5 1.35;
    0.15 0.43 0.8 1.15 1.5 1.47;
    0.43 0.45 0.82 1.17 1.54 1.65;
    0.49 0.47 0.84 1.19 1.56 1.85;
    0.57 0.49 0.86 1.21 1.58 1.94];

if (u>=inp2(end))
    b_mp1=inp2(end);
    b_m=inp2(end-1);

elseif (u<=inp2(1))
    b_mp1=inp2(2);
    b_m=inp2(1);

else
    % Index for b_m+1
    index2_mp1=min(find(inp2>=u));
    % Index for b_m
    index2_m=max(find(inp2<u));

    % Assign the values for b_m and b_m+1
    b_mp1=inp2(index2_mp1);
    b_m=inp2(index2_m);
end

b_m;
b_mp1;

if (y>=inp1(end))
```

```

a_mp1=inp1(end);
a_m=inp1(end-1);

elseif (y<=inp1(1))
a_mp1=inp1(2);
a_m=inp1(1);

else
% Index for a_m+1
index_mp1=min(find(inp1>=y));
% Index for a_m
index_m=max(find(inp1<y));

% Assign the values for a_m and a_m+1
a_mp1=inp1(index_mp1);
a_m=inp1(index_m);
end

a_m;
a_mp1;

dmm=d(index_m,index2_m);
dmm1=d(index_m,index2_mp1);
dmlm=d(index_mp1,index2_m);
dmlm1=d(index_mp1,index2_mp1);

A1 = ((dmlm-dmm) / (a_mp1 - a_m)) * ((b_mp1-u) / (b_mp1-b_m)) +
((dmlm1-dmm1) / (a_mp1 - a_m)) * ((u-b_m) / (b_mp1-b_m));
B1 = ((dmm1-dmm) / (b_mp1 - b_m)) * ((a_mp1-y) / (a_mp1-a_m)) +
((dmlm1-dmlm) / (b_mp1 - b_m)) * ((y-a_m) / (a_mp1-a_m));

bias=y*pk - (A1 * y + B1 * u);

% Sistem in z domainine transfer edilmesi gerekiyorsa;
% num = [0 B1 0];
% den = [1 -A1 0];

```


ÖZGEÇMİŞ



Ad Soyad : Alparslan ESMERDAĞ
Doğum Yeri ve Tarihi : İstanbul – 19.11.1985
Adres : Veliefendi Mah 74 Ara Sok No:9 D:3
Zeytinburnu/İstanbul
Lisans Üniversitesi : ODTÜ