

**DEMİR ÇELİK ALANINDA DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN MODEL
YAPILARI TABANLI MODEL ÖNGÖRÜMLÜ DENETLEYİCİ UYGULAMALARI**

Özgür ASLAN

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında

Yüksek Lisans Tezi

Olarak Hazırlanmıştır

**ZONGULDAK
Haziran 2009**

KABUL:

Özgür ASLAN tarafından hazırlanan “DEMİR ÇELİK ALANINDA DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN MODEL YAPILARI TABANLI MODEL ÖNGÖRÜMLÜ DENETLEYİCİ UYGULAMALARI” başlıklı bu çalışma jürimiz tarafından değerlendirilerek, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak oybirliğiyle kabul edilmiştir. 24/06/2009

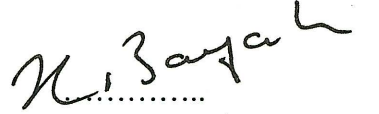
Başkan: Yrd. Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU (ZKÜ)



Üye : Doç. Dr. Mahmut ÖZER (ZKÜ)



Üye : Yrd. Doç. Dr. Handan BAYCIK (ZKÜ)



ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim üyelerine ait olduğunu onaylım. 21/7/2009



Prof. Dr. Kemal BÜYÜKGÜZEL
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

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


Özgür ASLAN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

DEMİR ÇELİK ALANINDA DOĞRUSAL VE DOĞRUSAL OLMAYAN MODEL YAPILARI TABANLI MODEL ÖNGÖRÜMLÜ DENETLEYİCİ UYGULAMALARI

Özgür ASLAN

Zonguldak Karaelmas Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Rifat HACIOĞLU

Haziran 2009, 75 sayfa

Sanayide birçok uygulamada kullanılan model öngörümlü denetleyiciler, sistem tanımlama teknikleriyle elde edilmiş, doğrusal ve doğrusal olmayan modelleri kullanırlar. Bu sayede model öngörümlü denetleyici, sisteme verdiği kontrol işaretine, sistemin nasıl bir tepki vereceğini hesaplayabilir. Model öngörümlü denetleyiciler, bu özelliği ile modellenen sistem dinamiklerine göre gelecekteki kontrol edilen değişkenlerine ulaşabilmek için en doğru kontrol işaretlerini oluşturarak başarılı bir kontrol sağlamaktadırlar.

Bu çalışmada, yüksek fırınlarda konik elemanların pozisyon değişimi ile tepe basınç kontrolü, doğrusal (ARX) ve doğrusal olmayan Hammerstein (statik doğrusal olmayan blok ve takip eden dinamik doğrusal blok) yaklaşımlarıyla modellenmiştir. Tanımlanan bu modellerin performansları karşılaştırılarak, yüksek fırın tepe basınç kontrolü için model yapılarının uygunluğu incelenmiştir. Aynı zamanda model öngörümlü denetleyici ile kontrol edilmiş ve performansları kıyaslanmıştır. Model öngörümlü denetleyicilerin üstün özellikleri elde edilen sonuçlarda gözlemlenmiştir.

ÖZET (devam ediyor)

Anahtar Sözcükler : sistem tanımlama yöntemleri, model öngörümlü denetleyiciler

Bilim Kodu : 609.03.03

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

MODEL PREDICTIVE CONTROLLER APPLICATIONS BASED ON LINEAR AND NONLINEAR MODEL STRUCTURES IN IRON STEEL INDUSTRY

Özgür ASLAN

**Zonguldak Karaelmas University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electrical and Electronics Engineering**

Thesis Advisor: Asst. Prof. Rifat HACIOĞLU

June 2009, 75 pages

Model predictive controllers, being used in many industrial applications, use linear and nonlinear system models determined by system identification techniques. Thus, a model predictive controller can determine how the system behaves against the control signal from the controller. Model predictive controllers with this property make a successful control by calculating correct control signals in order to reach future controlled variables based on modelled system dynamics

In this thesis, blast furnace top gas pressure control via the position changes of ring-gap system was modelled with linear (ARX) and nonlinear Hammerstein (static nonlinear block and followed by dynamic linear block) approaches. Performance of the identified model were compared and it is decided that which model is suitable for the blast furnace top gas pressure control system. At the same time model was controlled by model predictive controller and performance comparison has been done. Based on the results one can observe preferable properties of the model predictive controller.

ABSTRACT (continued)

Key Words : System identification method, model predictive control

Science Code : 609.03.03

TEŞEKKÜR

Çalıőmam boyunca yönlendirici ve yol gösterici olan, öneri ve deneyimlerini benden esirgemeyen danışman hocam Sayın Yrd. Doç. Dr. Rıfat HACIOĞLU'na (ZKÜ), ilgi ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim aileme teőekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET	iii
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xiii
BÖLÜM 1 GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2 DEMİR-ÇELİK ÜRETİMİ	5
2.1 DEMİR-ÇELİK TARİHÇESİ	5
2.2 ÇELİK ÜRETİMİ	6
2.3 YÜKSEK FIRINLAR	6
2.3.1 Genel.....	6
2.3.2 Yüksek Fırın Prosesinde Kullanılan Malzemeler	7
2.3.3 Sıcak Maden Oluşumu	9
2.3.4 Yüksek Fırın Tesisi	11
2.3.5 Yüksek Fırınların Verimli Çalışması	13
2.3.6 Yüksek Fırın Tepe Basınç Kontrolü.....	14
BÖLÜM 3 SİSTEM TANIMLAMA VE MODEL ÖNGÖRÜMLÜ DENETLEYİCİLER ...	17
3.1 SİSTEMLER	17
3.1.1 Sistem Modelleri	17
3.1.2 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Sistemler	18
3.2 SİSTEM TANIMLAMA.....	19

İÇİNDEKİLER (devam ediyor)

	<u>Sayfa</u>
3.2.1 Sistem Tanımlama Problemi.....	20
3.2.1.1 Veri Toplama	20
3.2.1.2 Model Yapısını Belirleme	21
3.2.1.3 Kayıtlı Verilere Göre En Uygun Modelin Bulunması	21
3.3 EN KÜÇÜK KARELER YAKALAŞIMI İLE SİSTEM TANIMLAMA	23
3.3.1 Doğrusal ARX Model Yaklaşımı.....	23
3.3.2 Doğrusal Olmayan Hammerstein Model Yaklaşımı	26
3.4 MODEL ÖNGÖRÜMLÜ DENETLEYİCİLER	31
3.4.1 Model Öngörümlü Denetleyici Tasarımı.....	31
3.4.2 MPC Özelliklerinin İncelenmesi; MPC İle DC Servo Motor Pozisyon Kontrolü...	34
3.4.3 ARX Yaklaşımı İle Tanımlanan DC Servo Motor Modelinin MPC İle Kontrolü...	39
3.4.4 Hammerstein Yaklaşımı İle Tanımlanan Modelin MPC İle Kontrolü.....	43
BÖLÜM 4 MPC YAKLAŞIMIYLA KONİK ELEMANLAR POZİSYONU İLE TEPE	
BASINCI KONTROLÜ	53
4.1 YÜKSEK FIRIN TEPE BASINCI MODELİ.....	53
4.1.1 Yüksek Fırın Tepe Basıncı Kontrol Sisteminin Doğrusal ARX Modeli Yaklaşımı	
İle Modellenmesi.....	55
4.1.2 Doğrusal Olmayan Hammerstein Model Yaklaşım	59
4.2 YÜKSEK FIRINDA MPC İLE TEPE BASINCI KONTROLÜ	61
4.2.1 ARX Modele Dayalı MPC İle Tepe Basıncı Kontrolü.....	63
4.2.2 Hammerstein Modele Dayalı MPC İle Tepe Basıncı Kontrolü	64
BÖLÜM 5 SONUÇLAR VE ÖNERİLER	69
KAYNAKLAR	71
ÖZGEÇMİŞ	75

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
1.1 Yüksek fırın tepe basınç kontrol sisteminin modellenmesi ve kontrolü.....	2
2.1 Yüksek fırın.....	6
2.2 Yüksek fırın yapısı ve gaz temizleme sistemi.....	12
2.3 Yıkayıcı ve konik elemanlar.....	14
2.4 Konik elemanlar pozisyonuna göre yüksek fırın tepe basıncı değişimi.....	16
3.1 Dinamik sistem modeli.....	19
3.2 Sistem tanımlama döngüsü.....	22
3.3 Doğrusal sistemin ARX modeli.....	23
3.4 Hammerstein blok yapısı.....	27
3.5 MPC blok şeması.....	33
3.6 MPC giriş-çıkışları.....	34
3.7 Servo motor MPC ile kontrolü.....	35
3.8 Kontrol ufku = 5 için, öngörü ufku değerinin MPC ile kontrole etkisi.....	36
3.9 Öngörü ufku=25 örnek için, kontrol ufku değerinin MPC ile kontrole etkisi.....	37
3.10 MPC ve kutup yerleştirme yöntemi ile servo motor kontrolü.....	38
3.11 DC servo motor sıfır kutup yerleşimi.....	40
3.12 DC servo motor ARX modeli sıfır kutup yerleşimi.....	41
3.13 DC servo motorun ARX model çıkışı ve gerçek sistem çıkışı.....	42
3.14 Servo motor sisteminin ve ARX modelin MPC ile kontrolü.....	42
3.15 Ayrık zamanlı, doğrusal olmayan sistem modeli.....	43
3.16 $H(z)$, nin sıfır kutup yerleşimi.....	44
3.17 Doğrusal olmayan sistem verileri.....	44
3.18 $\hat{H}(z)$ 'in sıfır kutup yerleşimi.....	46
3.19 $\hat{H}_A(z)$, in sıfır kutup gösterimi.....	47
3.20 Doğrusal olmayan sistemin, doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlarla tanımlanan modellerinin sonuçları.....	48
3.21 Doğrusal olmayan sistemin, doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlarla tanımlanan modellerinin sınırlı aralıktaki sonuçları.....	49
3.22 Doğrusal olmayan Hammerstein model yapısı MPC ile kontrolü.....	49

ŞEKİLLER DİZİNİ (devam ediyor)

<u>No</u>	<u>Sayfa</u>
3.23 Doğrusal olmayan sistem MPC ile kontrolü (Öngörü Ufku = 10, Kontrol Ufku = 5). ...	50
4.1 Yüksek fırın tepe basıncı ve konik elemanların pozisyonu.	54
4.2 Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin çalışması.	55
4.3 Dar veri aralığında tanımlanan 20. dereceden ARX modelinin sıfır kutup yerleşimi.	56
4.4 Dar veri aralığında tanımlanan 20. dereceden ARX modeli sonuçlarının gerçek sistem ile karşılaştırılması.	56
4.5 Geniş veri aralığında tanımlanan 20. dereceden ARX modelin sıfır kutup yerleşimi.	57
4.6 Geniş veri aralığında tanımlanan 20. dereceden ARX modeli sonuçlarının gerçek sistem ile karşılaştırılması.	58
4.7 Yüksek fırın tepe basınç kontrol sisteminin dar veri aralığı için doğrusalsızlığı ve Hammerstein doğrusal olmayan blok yaklaşımı ile tanımlanan doğrusal bloğunun sıfır kutup yerleşimi.	59
4.8 Dar veri aralığında Hammerstein doğrusal olmayan blok yaklaşımıyla tanımlanan model sonuçlarının gerçek sistem ile karşılaştırılması.	60
4.9 Yüksek fırın tepe basınç kontrol sisteminin geniş veri aralığı için doğrusalsızlığı ve Hammerstein doğrusal olmayan blok yaklaşımı ile tanımlanan doğrusal bloğunun sıfır kutup yerleşimi.	62
4.10 Geniş veri aralığında Hammerstein doğrusal olmayan blok yaklaşımıyla tanımlanan model sonuçlarının gerçek sistem ile karşılaştırılması.	62
4.11 Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi ARX modelinin MPC ile kontrolü (öngörü ufku = 60, kontrol ufku = 2).	64
4.12 Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin Hammerstein doğrusal olmayan blok yapısına dayalı modelinin MPC ile kontrolü (öngörü ufku = 60, kontrol ufku = 2).	65
4.13 Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin ARX ve Hammerstein modellerinin MPC ile kontrolü (öngörü ufku = 60, kontrol ufku = 2).	66
4.14 Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin Hammerstein doğrusal olmayan blok yapısı tabanlı MPC ile kontrolünün gerçek sistem ile karşılaştırılması (öngörü ufku = 60, kontrol ufku = 2).	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

$u(n)$: sistemin giriş işareti
$y(n)$: sistemin çıkış işareti
$\varphi(n)$: regresör vektör
θ	: parametre vektörü
$H(z)$: sistem transfer fonksiyonu
z_i	: doğrusal sistem transfer fonksiyonu sıfırları
p_i	: doğrusal sistem transfer fonksiyonu kutupları
M	: doğrusal blok transfer fonksiyonu pay polinom derecesi
N	: doğrusal blok transfer fonksiyonu payda polinom derecesi
a_i	: doğrusal blok payda polinom katsayıları
b_i	: doğrusal blok pay polinom katsayıları
$\hat{\theta}$: elemanları tahmin edilen parametre vektörü
$\hat{H}(z)$: parametreleri tahmin edilen sistem transfer fonksiyonu
$\hat{y}_A(n)$: ARX modelin çıkış işareti
$NL[.]$: doğrusal olmayan blok
$x(n)$: doğrusal olmayan sistem çıkışı
α_i	: doğrusal olmayan blok polinom katsayıları
R	: doğrusal olmayan blok polinom derecesi
$\hat{y}_H(n)$: Hammerstein modelin çıkış işareti
w_i	: model öngörümlü denetleyici, çıkış ağırlık katsayısı
λ_i	: model öngörümlü denetleyici, giriş ağırlık katsayısı
p	: öngörü ufku değeri
m	: kontrol ufku değeri
y^r	: model öngörümlü denetleyici referans girişi

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ (devam ediyor)

y_{maks}	: sistem çıkış işareti maksimum değeri
y_{min}	: sistem çıkış işareti minimum değeri
u_{maks}	: model öngörümlü denetleyici çıkış işareti maksimum değeri
u_{min}	: model öngörümlü denetleyici çıkış işareti minimum değeri

KISALTMALAR

FIR	: Finite Impulse Response (Sonlu darbe cevabı)
ARX	: AutoRegressive with eXogenous input (En Küçük Kareler)
NL	: Nonlinear-Linear
NMSE	: Normalised Mean-Square Error (Normalize Edilmiş Ortalama Karesel Hata)
LS	: Least Squares (En Küçük Kareler)
MPC	: Model Predictive Control (Model Öngörümlü Denetleyici)
SVD	: Singular Value Decomposition (Tekil Bileşen Ayrışımı)
PID	: Proportional Integral Derivative (Oransal Integral Türevsel)
PLC	: Programmable Logic Controller (Programlanabilir Mantıksal Kontrolör)
DCS	: Distributed Control System (Ayrık Kontrol Sistemi)

BÖLÜM 1

GİRİŞ

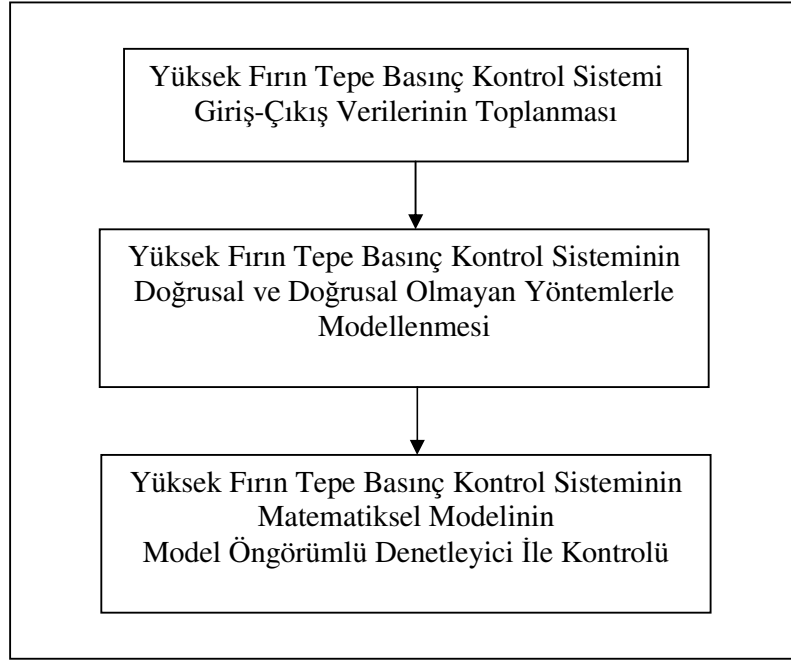
Demir-Çelik tesislerinin en önemli ünitelerinden biri olan yüksek fırınlar, demir madeninin eritildiği, yüksek basınç ve sıcaklığı bulunan proseslerin gerçekleştiği fabrikalardır. Yüksek fırının uygun şartlarda ve verimli çalışabilmesi için iç basıncının, fırın işletme şartlarına göre belirlenen değerde sabit tutulması gerekmektedir (Strassburger 1969). Tepe basıncındaki dalgalanma demir üretim prosesinde birçok olumsuzluk yaratacaktır (Strassburger 1969). Bu sebeple otomasyon sistemlerinin fırın tepe basıncını çok iyi kontrol etmesi gerekir. Konik elemanlar (ring-gap) yüksek fırınlarda tepe basıncını sabit tutmak için kullanılırlar. Bu sistem, yüksek fırından çıkan gazın yolunu açıp kapatarak basınç kontrolü yapmaktadır. Bu çalışmada konik elemanların açıklık pozisyonu ile yüksek fırın tepe basıncının kontrolü üzerinde durulacaktır.

Günümüzde kullanılan otomasyon sistemlerinde (PLC, DCS gibi) oransal kontrol PID algoritmaları ile yapılmaktadır (Yücelen vd. 2006). Kullanılan kontrolör sistemine, hangi kontrol değişkenlerinin seçileceği, yapılan kontrol sonrası geri beslemenin hangi yoldan alınacağı ve istenilen set değerinin ne olduğu tanımlanır. Bundan sonra sistemle ilgili elde edilmiş olan deneyimlerden faydalanarak bu PID algoritmasında kullanılacak olan P, I ve D katsayıları belirlenir. Pratikte bu ayarlama işlemi yapılırken, üst üste yapılan denemelerden yararlanılır. Öncelikle rasgele belirlenen PID katsayıları ile bir deneme yapılır ve elde edilen sonuçlara göre değişiklikler yapılır ve ideale yakın kabul edilen değerler elde edildiğinde ayarlama işlemi tamamlanmış olur (Franklin et al. 2002).

Kontrol parametrelerinin deneme yanılma yöntemiyle yapılması zaman kaybına yol açmaktadır. Deneme amaçlı belirlenen parametrelerin tahmin edilenden çok daha kötü sonuç vermesi de yüksek maliyetli ekipmanlara zarar verebilmektedir. Bu gibi olumsuzlukların önüne geçmek için model öngörümlü denetleyiciler kullanılabilir. Model öngörümlü denetleyiciler, kontrol ettikleri sistemin dinamik denklemini kullanırlar (Fruzzetti et al. 1996). Denetleyici bu denklem sayesinde sistemin şimdiki ve gelecekteki

giriş işaretlerine vereceği tepkileri bilerek, optimizasyonlar sonucunda da en uygun kontrol sinyallerini üretir (Rossiter 2003).

Model öngörümlü denetleyicilerin sanayideki uygulamalarında, sistemlerin dinamik denklemleri sistem tanımlama yöntemleriyle elde edilir (Allgöwer and Zheng 2000). Bir sistemin tanımlanabilmesi için o sistemin çalışmasına dair verilere ihtiyaç vardır. Bu verileri elde etmek için önceden hazırlanmış deney düzeneklerinden ya da sistemin kendisinden yararlanılır (Allgöwer and Zheng 2000).



Şekil 1.1 Yüksek fırın tepe basınç kontrol sisteminin modellenmesi ve kontrolü.

Bu çalışmada yüksek fırınlarda tepe basıncını düzenleyen konik elemanların açılıp kapanması ile yüksek fırın tepe basıncı ilişkisi, doğrusal ve doğrusal olmayan sistem tanımlama teknikleri kullanılarak modellenecektir. Tanımlanan bu modele göre tasarlanan model öngörümlü denetleyici ile konik elemanlar pozisyon değişimi ile tepe basıncı kontrol edilerek, kontrol sonrası elde edilen veriler, gerçek sistem ile karşılaştırılacaktır. Konik elemanlar sistemi ile ilgili bir deney düzeneği olmadığından bu çalışmada kullanılan veriler, gerçek sistem üzerinden alınmış olan giriş-çıkış değerleridir. Giriş işaretleri, 3 tane konik elemanın yüzde olarak pozisyonu, çıkış işareti de kg/cm^2 cinsinden yüksek fırın tepe basıncıdır. Bu veriler kullanılarak Şekil 1.1'deki akış şemasında yer alan yüksek fırın tepe basınç kontrol sisteminin modellenmesi ve kontrolü incelenmiştir.

Bu amaçla Bölüm 2’de, yüksek fırınlar hakkında genel bilgiler verilmiştir. Yüksek fırınların çalışma prensipleri, proseste kullanılan malzemeler ve ekipmanlar açıklanmış ve yüksek fırın tepe gazı basıncının önemi vurgulanmıştır. Bölüm 3’te öncelikle, doğrusal sistem tanımlama yöntemleri olan doğrusal ARX model yaklaşımı (Ljung 1996) ile doğrusal olmayan Hammerstein blok yapısı yaklaşımı (Fruzzetti el al. 1996) açıklanmıştır. Bu yaklaşımlar kullanılarak doğrusal ve doğrusal olmayan örnek sistemler modellenmiş ve Hammerstein model yapısının doğrusal olmayan sistemlerdeki doğrusal ARX modeline göre üstünlüğü gözlemlenmiştir. Bölüm 3’te daha sonra model öngörümlü denetleyiciler (Milankumar 2004) üzerinde durularak, doğrusal ve doğrusal olmayan örnek sistemlerin kontrol edilmesinde kullanılmıştır. Bölüm 4’te, 3. bölümde yapılan teorik çalışmaların yüksek fırınlarda kullanılan bir sistem olan konik elemanlar ile tepe basıncı kontrolü uygulaması incelenmiştir. Öncelikle, yüksek fırın tepe basınç kontrolünü sağlayan konik elemanlar pozisyon değişimi ve tepe basınç değişimi ilişkisi doğrusal (ARX) ve doğrusal olmayan (Hammerstein blok yapısı) yaklaşımlar ile modellenmiştir. Tanımlanan matematiksel ifadelerin doğruluğu, sistemden alınan gerçek veriler ile kıyaslanarak tespit edilmiş ve doğrusal olmayan Hammerstein blok yapısının yüksek fırın tepe basınç kontrol sistemini doğrusal ARX model yaklaşımına göre daha iyi modellediği gözlemlenmiştir. Sonra, tanımlanan doğrusal olmayan matematiksel model kullanılarak, yüksek fırın tepe basınç kontrol sistemi için bir model öngörümlü denetleyici tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyici ile konik elemanların açıklık pozisyon değişimi ile yüksek fırın tepe basıncı kontrol edilmiş ve yapılan bu kontrol ile gerçek sistemde yapılan kontrolden alınan veriler karşılaştırılarak model öngörümlü denetleyicilerin yüksek fırın sisteminin kontrolü için uygunluğu gösterilmiştir.

BÖLÜM 2

DEMİR-ÇELİK ÜRETİMİ

Demir-çelik endüstrisinin yarı ve son ürünleri, geçmişte ve günümüzde çeşitli endüstriyel sektörlerin temel hammaddelelerini oluşturmuştur. Çelik ürünler gerek miktar, gerekse cins ve kalitelerinin gelişimi ile endüstriyel gelişmenin de en önemli unsurlarından bazılarıdır. Dolayısıyla demir-çelik endüstrisi, insanlık tarihinde uygarlıkların gelişmesinde ve toplum yapılarının değişiminde rol oynamış ve en önemli sektörlerden birisi olmuştur.

Bu bölümde, demir-çelik üretimi kısaca özetlenecektir. Daha sonra, tez çalışmasında matematiksel modeli oluşturularak model öngörümü denetleyici ile kontrol edilecek olan konik elemanlar sistemi açıklanacaktır.

2.1 DEMİR-ÇELİK TARİHÇESİ

Demir-çelik ürünler M.Ö. 2000 yıllarından beri kullanılıyor olsa da, çeliklerin kitlesel mühendislik malzemesi olarak kullanıma başlanması 19. yüzyılın sonlarına rastlamaktadır. 1800 yılında, günümüzden çok farklı tekniklerle üretilmiş olan 1 milyon ton civarında demir-çelik malzemenin kullanıldığı tahmin edilmektedir. 1850 yılından sonra kitlesel çelik üretim yöntemlerinin devreye sokulması ile dünya çelik üretimi 1870'de 10 milyon ton iken yılda %4.5 gibi bir artışla 1900 yılında 37 milyon tona yükselmiştir. Bu dönem içerisinde kitlesel çelik üretim yöntemi olarak yüksek fırınlarda üretilen sıvı ham demirin ve hurdanın kullanıldığı konvertörler ve sadece hurdanın kullanıldığı elektrikli ark fırınlarının kullanıldığı bilinmektedir.

Teknolojinin hızla geliştiği 20. yüzyılın başlarında, yeni alaşım metotları ve haddeleme yöntemleri ile özel amaçlı çelikler üretilmeye başlanmıştır. Bu dönemden sonra da, 1. ve 2. dünya savaşlarının ve gelişen teknolojinin de etkisiyle demir çelik üretimi 2008 yılında 1329,7 milyon tona çıkmıştır.

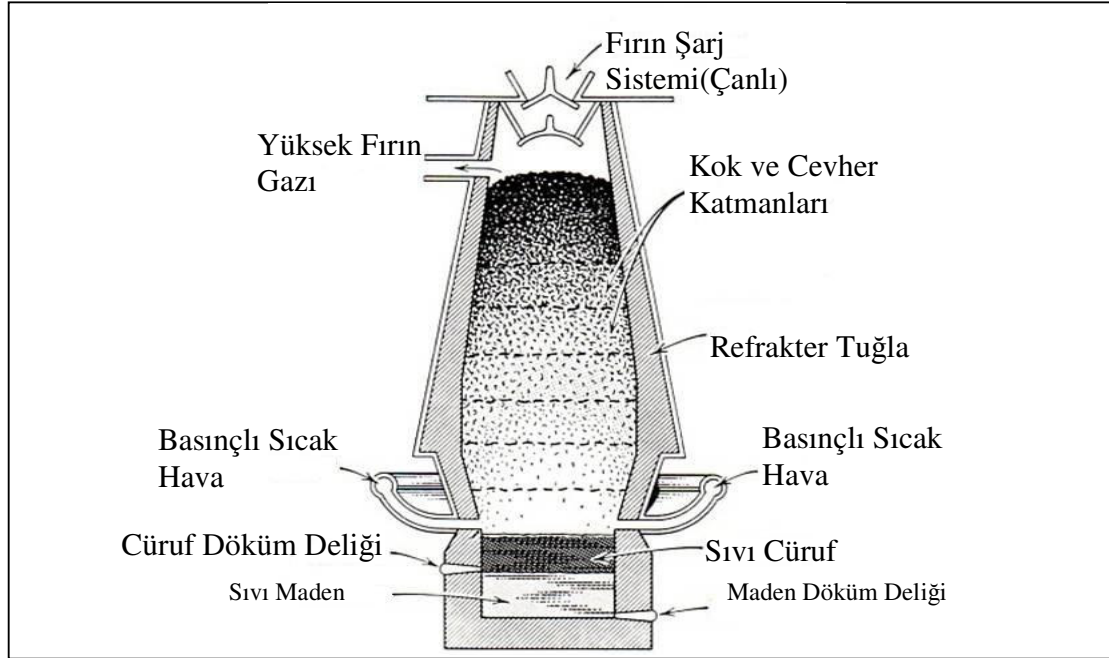
2.2 ÇELİK ÜRETİMİ

Çelik üretimi sıvı demirin arıtılması ve soğutulup kalıplarda şekil almasıyla açıklanır. Sıvı demirin üretilmesinde ana iki yöntem vardır. Birincisi kömür esaslıdır. Kömür esaslı üretimin can damarları kok fabrikası, yüksek fırın ve bazik oksijen fırını gibi tesislerdir. Çelik elde etmenin bir diğer yolu da hurda malzemenin elektrik ark fırınlarında elektrik akımı ile ergitilmesi sonucu yapılan işlemdir.

2.3 YÜKSEK FIRINLAR

2.3.1 Genel

Yüksek fırınlar, demirli malzemelerin içeriğinde bulunan demir oksidin indirgenmesi sonucunda oluşan, fiziksel olarak sıvı madene dönüştürülmesinin sağlandığı tesislerdir. Yüksek fırınlar çok büyük tesisler olup, entegre tesislerin ana ünitesi pozisyonundadır. Bir yüksek fırın görünüm olarak Şekil 2.1'de olduğu gibi çelik bir bacaya benzer ve iç tarafı özel refrakter malzemelerle örülüdür (İnel 1997).



Şekil 2.1 Yüksek fırın (Jastrebski 1959).

Demirli malzemeler, metalürjik kok ve cüruf yapıcı malzemeler fırına yukarıdan şarj edilir. Fırının alt kısmından da ısıtılmış hava üflenir. Şarj edilen malzemeler fırının fiziksel özelliklerine göre 6 ila 8 saat sonra fırının alt kısmına iner. Bu malzemeler, fırın haznesinde sıvı maden ve cüruf olarak ayrışır. Sıvı maden ağır olduğundan haznede alt tarafta, sıvı cüruf ise hafif olduğundan dolayı üst tarafta birikir. Haznede biriken sıvı maden ve cüruf, fırının kapasitesine ve işletme şartlarına göre düzenli olarak fırından boşaltılır. Boşaltma işlemi, fırının gövdesinden hazneye doğru açılan bir delikten doğru yapılır (Danforth 1917).

2.3.2 Yüksek Fırın Prosesinde Kullanılan Malzemeler

Demirli malzemeler fırına parça cevher, sinter ve pelet olarak şarj edilirler. Demir cevheri madenden çıkarıldıktan sonra bazı işlemlere tabi tutularak (kırma, eleme ve zenginleştirme) stok sahalarında ebatlandırılır. Ebatlandırma genellikle 12.7-38mm arasındadır. Entegre tesislerde kullanılan demir cevherleri hematit (Fe_2O_3) ve manyetit (Fe_3O_4) fazında olup demir içeriği yaklaşık %50-70 arasındadır. Bu cevherler direkt olarak şarj edilebildiği gibi başka proseslere tabi tutularak da şarj edilebilirler. Eğer demir cevheri demir tenörü bakımından zengin değilse, zenginleştirme proseslerinden geçirilerek yüksek fırınlara şarj edilebilirler. Sinter ve pelet üretimi bu zenginleştirme proseslerine en bariz örneklerdendir. Pelet üretiminde, demir cevheri kırılır ve yabancı maddelerden arındırılarak toz haline getirilir. Ayrıştırılan malzemenin içeriği artık demirdir ve bazı katkı malzemeleri kullanılarak pelet elde edilir (Sadrnezhad et al. 2008).

Sinter üretiminde, demir cevheri, kok tozu, kireçtaşı ve çok sayıda demir içerikli atık (toz) harmanlanır. Bu karışım sinter makinesinde ateşlenir. Karışımda bulunan kok tozları yanar ve açığa çıkan ısı demirli malzemeleri eritir. Bu esnada karışımdaki istenmeyen malzemeler toz olarak atılır. Sonuç olarak 12.7 ile 50mm arasında değişen ebatlara sahip sinter parçaları elde edilir (Kotrovskii et al. 1963).

Yüksek fırınlarda ana ısı kaynağı olarak kok kömürü kullanılır. Kokun %98 gibi büyük bir oranda karbon içermesi, yandıktan sonra çok az miktarda cüruf oluşturmasını sağlar ve bünyesinde uçucular, yağlar ve yabancı maddeler bulunmadığı için yüksek fırın içerisine istenmeyen maddeler girmez. Kok fiziksel olarak gözenekli bir yapıya sahip olduğundan yüksek fırın içerisinde gaz geçirgenliğini sağlar. Bu sayede fırının altından üflenerek sıcak

havanın, fırın tepesine doğru hareket etmesi sağlanır. Yüksek fırınlarda kok kömürünün kullanılmasının bir diğer sebebi de kokun mekanik dayanımıdır. Fırın içerisindeki malzeme katmanları zamanla fırın tabanına inerken, bir miktar kok fırının merkezine doğru yönelir. Tüyerlerden fırına üflenen hava, haznede fırının merkezine ulaşmadığı için burada bulunan koklar yanmazlar ve fırının tabanına kadar inerler. Tabanda bulunan bu kok katmanı, katı malzeme ile fırın tabanında bir köprü vazifesi görür ve yüksek fırın içerisindeki malzemenin havada asılı kalmasına yardımcı olur (Özden ve Gencer 1983).

Yüksek fırınlar için hayati öneme sahip olan kok, kömür karışımından elde edilir. Kömür kırılarak toz haline getirilir ve kok fabrikası kamarasına şarj edilir. Fırında ısınan kömür, bünyesinden uçucu ve bazı yabancı maddeleri bırakarak kok haline dönüşür. Bu ısıl işlem sonrası kömür, kok haline gelir ve bu işlem 18 ile 24 saat arasında gerçekleşir. Bu süre bitiminde kok, kamaradan boşaltılır ve su veya soy gazlar kullanılarak soğutulur (Akbulut 2001).

Yüksek fırınlarda kullanılan bir diğer ısı kaynağı da fırına tabandan enjekte edilen pulvarize kömür veya doğal gazdır. Bazı fırınlarda, tüyerlerden katran, pulvarize plastik veya diğer petrol ürünlerinin de enjeksiyonları yapılmaktadır. Tüyerlerden fırın içerisine gönderilen bu yanıcı malzemeler, tüyerlerin hemen ucunda sıcak hava ile tepkimeye girer ve buradaki sıcaklığın artmasını sağlarlar. Bu sayede fırın tabanından tepeye doğru hareket eden havanın sıcaklığı artmış olur; bu da fırınlarda temel ısı kaynağı olarak kullanılan ve çok maliyetli olan kok kullanımını azaltarak fırın işletme maliyetlerini düşürür (Sanzol 2001).

Demir üretim prosesinde kullanılan diğer malzemeler de cüruf yapıcı malzemelerdir.

Bunlar;

- Kireçtaşı,
- Dolomit,
- Çakmaktaşı,
- Manganezdır.

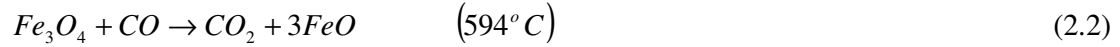
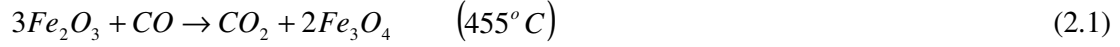
Yüksek fırın prosesinde, üretilmek istenen cürufun kimyasal özelliklerine göre değişik cüruf yapıcı malzemeler kullanılabilir.

Yüksek fırınlarda cüruf, yüksek sıcaklık altında demir cevherindeki yabancı malzemeler ve kokun külünün birleşerek erimesi neticesinde meydana gelir. Cürufu oluşturan oksitler; SiO₂, CaO, MgO, FeO, MnO ve sülfürlü bileşiklerdir (Turan 2001).

2.3.3 Sıcak Maden Oluşumu

Tüm malzemeler yüksek fırına şarj edilmeden önce harmanlama sahasına transfer edilir ve stoklanırlar. Bu malzemeler konveyörlerle yüksek fırın malzeme silolarına doldurulur. Silolardaki malzemeler işletme şartlarının gerektirdiği miktarlarda fırına şarj edilirler. Şarj edilen malzemeler, proses boyunca birçok reaksiyona girerek yüksek fırın haznesine sıcak maden ve cüruf olarak inerler.

Demir cevheri, pelet ve sinter, fırın içerisinde seri reaksiyonlara girerler ve bünyelerinde bulunan oksijen ayrıştırılır. Bu reaksiyonlar ve başladıkları sıcaklıklar;



veya



ile verilir. Buradaki reaksiyonların yanı sıra demir oksit, saflaşma reaksiyonlarından da geçer. Önce malzemelerin bünyesinde bulunan rutubet giderilir. Bu işlem malzemeler fırına şarj edildikten sonra fırının üst bölgelerinde fırını terk etmekte olan gazın sıcaklığı ile olur. Bu prodesten sonra, fırının orta bölgelerinde malzemelerde yumuşama başlar. Fırının daha da alt bölgelerinde sıvı maden ve cüruf oluşur (Strassburger 1969).

Eşitlik (2.1), (2.2), (2.3)'teki reaksiyonlarda demirli malzemeleri indirgemek için CO kullanıldığı görülmektedir. Prodeste önemli yeri olan bu gazın elde edilmesi iki aşamadan

meydana gelmektedir. Tüyerlerden fırın içerisine üflenen sıcak yakma havasının, fırına şarj edilen kok kömürü ile reaksiyona girerek yanması sonucunda ara mamul olarak CO₂ oluşur.



Bu reaksiyon sonrasında yüksek ısı almış olan karbon ile CO₂ tepkimeye girerek CO gazını oluştururlar.



Bu reaksiyonda oluşan CO gazı (2.1), (2.2) ve (2.3) reaksiyonlarında demirli malzemelerle tepkimeye girer ve demir ile oksijenin ayrışmasını sağlar.

Demirde bulunan kükürdün de uzaklaştırılması gerekir. Bunun için CaO'ya ihtiyaç vardır.



Bu ısı alan reaksiyon 870°C'de başlar ve sonucunda kireçtaşından CaO elde edilir.

Kimyasal tepkimeler sonucunda oluşan sıcak maden hazneye inmeden CaO ile reaksiyona girer ve madendeki kükürt ayrışır.



Bu reaksiyonda ayrışan CaS cüruf olarak kok yatakları arasından süzülerek hazneye iner.

Demir üretim prosesinde oluşan diğer bir ürün de kirli yüksek fırın gazıdır. Yüksek fırında reaksiyona girmeyen gazlar yukarı doğru hareket ederken, reaksiyona girmeyen parçacıkları da bünyesine katar. Gazın bileşiminde CO, CO₂, H₂, N₂, vb. bulunur.

Gaz fırını terk edince tozundan arındırılır ve soğutularak ihtiyacı olan tesislere yakıt olarak dağıtılır. Yüksek fırın gazı, fırına sıcak hava sağlayan sobalarda, kok fabrikasında ve kuvvet santralinde kullanılır. Kuvvet santralinde bu gaz yakılarak buhar ve elektrik enerjisi

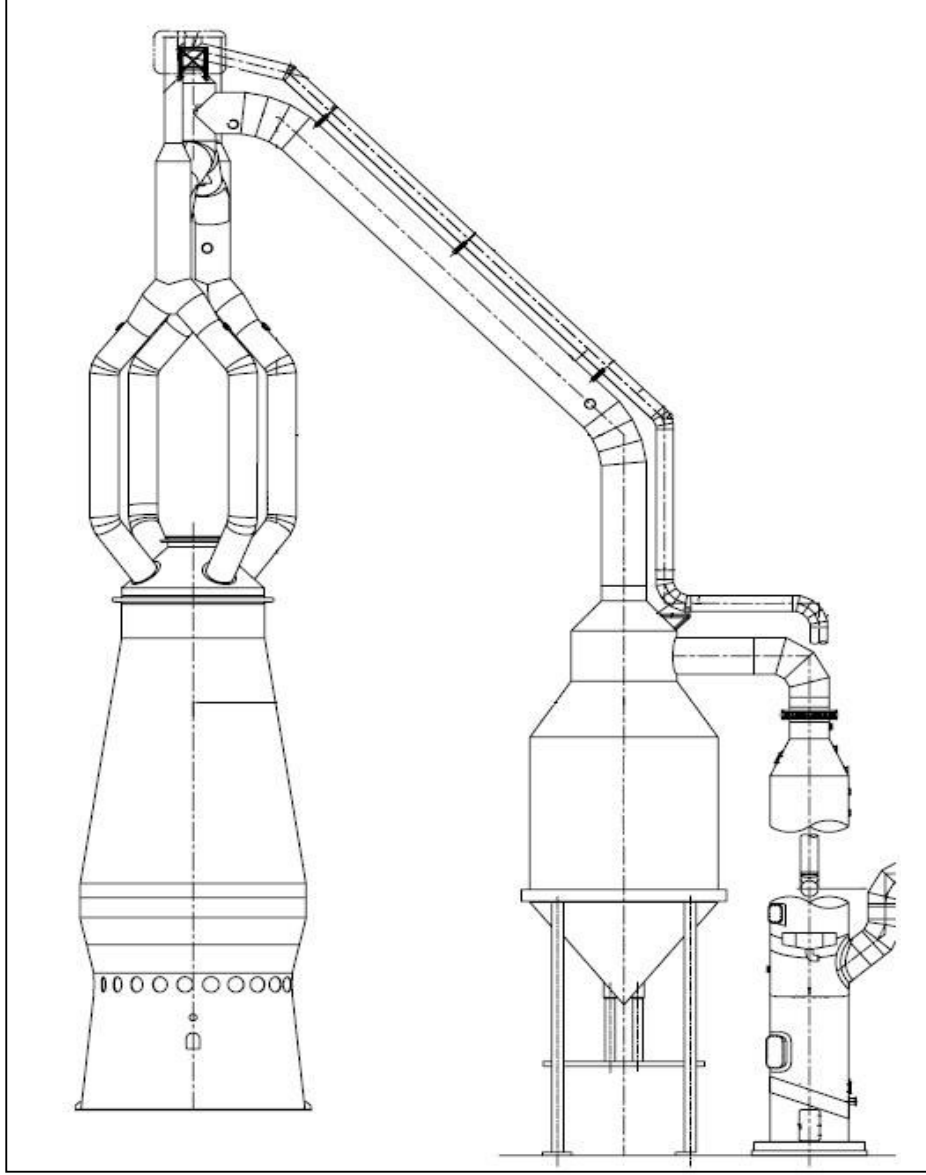
elde edilir. Yüksek fırın gazı, kok fabrikasında kok gazı ile karıştırılarak yakıt olarak kullanılır. Yüksek fırın sobalarında ise yüksek fırın gazı ile sobaların ısıtılması suretiyle enerji tasarrufu sağlanır. Sobalar fırına üflenen sıcak havayı sağlarlar. Kuvvet santralindeki turbo fanlardan gelen basınçlı soğuk hava (100-150°C) yüksek fırın gazı ve kok gazı kullanılarak ısıtılmış olan sobaların içinden geçerek sobanın tuğlalarındaki ısıyı üzerine alır ve 1100°C sıcaklığa kadar ısınarak basınçlı sıcak hava formunu alır. Sıcak hava tüyerlerden fırın içerisine verilerek, demiri indirgeyen reaksiyonların oluşmasını sağlar (Strassburger 1969).

2.3.4 Yüksek Fırın Tesisi

Yukarıda yüksek fırın tanımlanırken çelik bir baca görünümünde olduğu belirtilmişti. Aslında yüksek fırın tesisi sadece içi özel refrakterle örülü çelik bir bacadan ibaret değildir. Bu bölümde yüksek fırınların fiziksel ekipmanları hakkında bilgi verilecektir.

Stok sahalarında temizleme, kırılma veya ebatlandırma gibi ön işlemlerden geçen malzemeler konveyörle yüksek fırın silolarına gönderilir. Her malzeme için ayrı depolama silosu mevcuttur. Silolara alınan malzemeler üretilecek maden ve cürufun kimyasal özelliklerine göre belirli oranlarda tartılarak raylı kova (skip arabası) veya konveyörle fırın tepesindeki silolara boşaltılır. Silolara alınan malzemelerin fırına boşaltılması iki aşamada gerçekleşir. Bu aşamalardan ilkinde silonun iç basıncı fırın tepe basıncına eşitlenir ve ikinci aşamada malzeme fırın içerisine boşaltılır. Bu işlemin amacı, yakıt olarak kullanılan yüksek fırın gazının atmosfere kaçmasını engelleyerek, enerji tasarrufu sağlamak ve fırının verimli çalışmasını sağlayan tepe basıncını korumaktır. Malzeme fırın içerisine üst üste halkalar şeklinde boşaltılmalıdır. Bu halkalar ne kadar düzgün yapıda olursa fırının çalışması da o kadar düzgün olmaktadır (Strassburger 1969).

Yüksek Fırın tepesinde Şekil 2.2'de görüldüğü gibi 4 adet gaz çıkış borusu (up-take) mevcuttur. Bunlardan sıcak kirli gaz geçiş yapar. Bu gaz çıkış boruları yüksek fırın tepesinde birleşir ve kirli gaz ana borusu ile fırının yanında bulunan toz tutucuya doğru ilerler. Gaz çıkış borularının birleştikleri yerde güvenlik vanaları bulunmaktadır. Bu vanaların görevi, fırın iç basıncının aniden yükselmesi halinde açılarak, fazla basıncın atmosfere tahliyesini sağlamaktır.



Şekil 2.2 Yüksek fırın yapısı ve gaz temizleme sistemi.

Sıcak kirli gaz, kirli gaz ana borusundan inerek toz tutucuya gelir. Gaz içindeki kaba parçacıklar burada tutulur ve birikir. Gaz, toz tutucudan sonra, ikinci temizlemenin ve soğutmanın yapılacağı yıkayıcı sistemine gelir. Yıkayıcılarda kapalı bir düzenekten geçen basınçlı gazın üzerine su püskürtülür. Bu sayede gaz, bünyesindeki küçük parçacıklardan arınır. Kapalı bir düzenek olarak bahsedilen yıkayıcılarda gaz basınç kontrolü de yapılmaktadır. Temizlenmiş olan yüksek fırın gazı daha sonra kurutma işleminden geçirilir ve gazometre denilen depolarda enerji kaynağı olarak kullanılmak üzere toplanır. Yüksek fırın gazı kok fabrikalarında, haddehanelerdeki fırınlarda, kuvvet santrallerinde enerji kaynağı olarak kullanılabilir.

2.3.5 Yüksek Fırınlarda Verimli Çalışması

Yüksek fırınlarda kok ve demir cevheri belirli bir sıra ile fırına tepeden doldurulmaktadır. Sıcak hava ise fırının alt kısmında bulunan tüyerlerden doğru fırına üflenmektedir. Bu sıcak hava fırın tabanında kok ile tepkimeye girerek CO gazını üretir. Bu reaksiyon sonucunda oluşan ısı ve CO demir cevherini indirgemek ve ergitmek için kullanılır. Bu sayede pik demir ve cüruf belirli aralıklarla fırının en alt kısmındaki hazne bölümünden alınabilir.

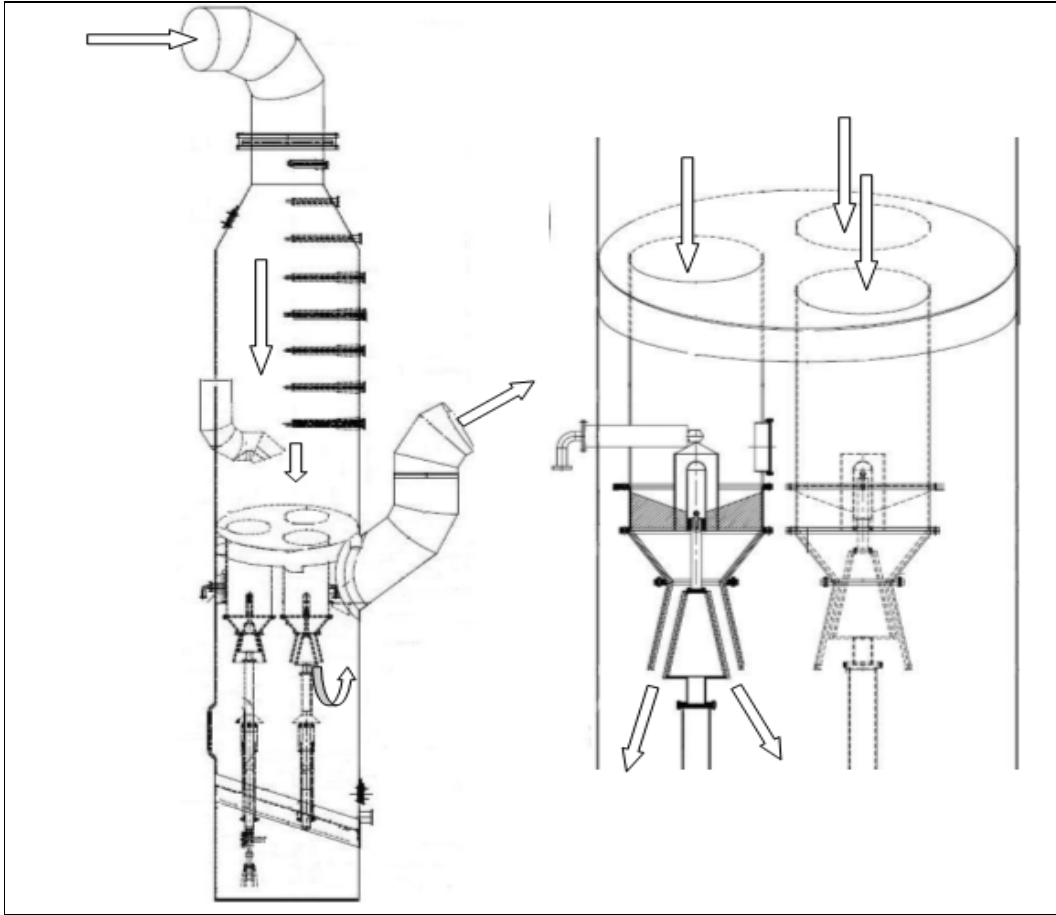
Gelişen teknolojiyle birlikte, yüksek fırınlarda tüyerlerden tozlaştırılmış kömür veya doğalgaz enjekte edilmeye başlanmıştır. Böylece tüyer çıkışında sıcak hava ile tepkimeye giren yakıt CO gazı ve ısı oluşturacaktır. Bu sayede de yüksek fırın prosesinde kullanılan kok miktarı aşağıya çekilmektedir. Prosesin en pahalı hammaddesi olan koktan tasarruf etmek de hammadde maliyetlerini oldukça aşağılara çekmektedir.

Yüksek fırınlarda verimin yüksek olmasını sağlayan bir diğer parametre de yüksek fırın tepe gaz basıncıdır. Yüksek fırın tesisinde atmosfere kapalı bir proses gerçekleşmektedir. Fırının tabanından üflenmiş basınçlı hava, cevher ve kok katmanları arasından geçer. Fırın içerisindeki hammaddelerle tepkimeye girerek, fırının tepesine ulaşan gaz yüksek fırın gazı olarak adlandırılır ve bu gaz daha sonra temizlenerek depolanır. Yukarıda da bahsedildiği gibi, yıkayıcıda su ile temizlenen gazın basıncı da kontrol edilmektedir. Bunun sebebi fırın tepe basıncını istenilen değerde sabit tutma gerekliliğidir. Eğer fırın tepesi atmosfere açık olsaydı, fırın tabanında bulunan ve fırındaki katı malzemeyi kaldıracak kadar kuvvetli olan sıcak hava basıncı, fırındaki bütün malzemeleri dışarı doğru fırlatırdı. Bunu engellemek amacıyla fırın tepesi kapatılmış ve basıncı sabitlenmiştir. Görüldüğü gibi tepe basıncı fırının çalışması için gereklidir.

Tepe basıncının yüksek olması ayrıca fırının verimli çalışmasını da sağlamaktadır. Çünkü basınç yükselirse, birim zamanda fırın içerisine üflenecek olan hava miktarı artacak ve bu da fırın çıktısı olan demir üretimini arttıracaktır. Sabit tepe basıncı gaz hızını da düzenleyecektir ve bu da fırının sağlıklı bir şekilde çalışmasını sağlayarak kaymaların engellenmesini sağlayacaktır (Strassburger 1969).

2.3.6 Yüksek Fırın Tepe Basınç Kontrolü

Klasik yüksek fırınlarda fırın tepesi atmosfere açıktır. Geliştirilen yeni tekniklerle fırın tepesi atmosfere kapatılmış ve tepedeki gaz akışı bir vana ile kontrol edilmeye başlanmıştır. Ereğli Demir Çelik Fabrikalarında 2008'den beri hizmet veren 1. Yüksek Fırın Ayşe'de tepe gazını kontrol eden ekipmanlar yıkayıcıların içerisinde bulunan konik elemanlardır (3 paralel çalışan ring-gap). 1. Yüksek Fırın Ayşe'de yıkayıcı sisteminde 3 adet konik eleman vardır. Yıkayıcı, içi yarisına kadar boş bir silindire benzemektedir. Bu boşluğun sonunda, Şekil 2.2 ve Şekil 2.3'te görüldüğü gibi üzerinde 3 adet delik bulunan bir platform bulunmaktadır. Platformdaki 3 deliğin her birinin altında, merkezinde konik elemanların sabitlemesini sağlayan bir yatak olan konik parçalar bulunmaktadır. Bu sabit konilerin altında da dikey hareketli hidrolik pistonlar yer almaktadır. Pistonların ucunda, sabit konilerle iç içe girdiklerinde sızdırmazlık sağlayan koniler vardır. Yıkayıcının tabanında da eğik olarak montajı yapılmış sızdırmaz bir platform vardır.

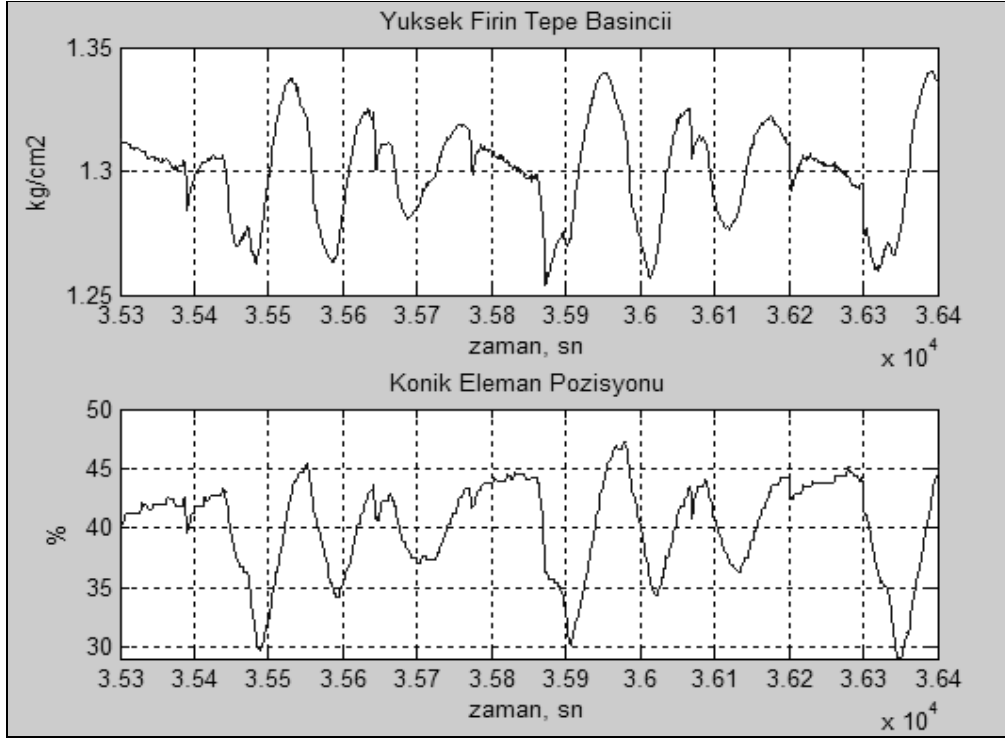


Şekil 2.3 Yıkayıcı ve konik elemanlar.

Yüksek fırından gelen basınçlı gaz, yıkayıcıya üst tarafta bulunan boru hattından girer. Yıkayıcının merkezindeki platforma gelene kadar gazın içine fiskiyelelerden su püskürtülür. Bu işlem gazdaki parçacıkların ayrışmasını sağlar. Merkezdeki platforma gelen gaz burada bulunan deliklerden ve sabit konilerin içinden geçer. Hareketli koniler, sabit konilerin içine girip çıkarak gazın geçtiği yolu kapatıp açar. Fırın işletme şartlarına göre belirlenen tepe basınç değeri, konik elemanların bu hareketi ile elde edilmeye çalışılır.

Şekil 2.2’de görüldüğü gibi yıkayıcı, fırından bağımsız gibi gözüke de aslında yıkayıcının iç kısmı fırının tepesine direkt olarak bağlıdır. Yüksek fırın gaz çıkış borularından fırının tepesine doğru gelen yüksek fırın gazı buradan kirli gaz ana borusu ile toz tutucunun içerisine girer. Toz tutucunun giriş ve çıkışı arasındaki basınç farkı sıfırdır. Bu sayede toz tutucunun çıkışından bir boru hattı ile yıkayıcının içerisine giren yüksek fırın gazının basıncı fırın tepe basıncına eşit olacaktır. Yüksek fırın otomasyon sisteminde de bu eşitlikten faydalanılarak, yıkayıcıdaki konik elemanlar ile basınç kontrolü yapılmaktadır. Kontrol algoritmasındaki tepe gazının basınç geribesleme değeri, fırın tepesinde bulunan 4 adet gaz çıkış borusundan ayrı ayrı alınmaktadır. Konik elemanların kontrol algoritması, basınç geribeslemesini ve istenilen basınç set değerini kullanarak, silindirlere pozisyon değişim değeri gönderir. Bu sinyal, DCS sisteminden çıkarak konik elemanların bağlı bulunduğu hidrolik sisteme gider ve buradaki oransal vanalar yardımıyla, konik elemanlara hareket verilir. Konik elemanlar, PID kontrolörü ve buna ek bir algoritma ile kontrol edilmektedir. Bu algoritma, konik elemanlara giden pozisyon seti değerlerini belirli sınırlamalar içerisinde tutmayı sağlar. Böyle bir sınırlama istenmesinin sebebi, tepe basıncında yaşanabilecek ani dalgalanmaların neticesinde PID algoritmasının çok hızlı ve büyük genlikli tepkiler vermesini engellemektir.

Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin çalışması, Şekil 2.4’teki grafik ile açıklanabilir. Grafikte, 3 ayrı konik elemanın yüzde olarak açıklığının ortalaması ve bunun neticesinde oluşan yüksek fırın tepe basıncının zamanla değişimi görülmektedir. Şekildeki 1100 sn’lik veriler, basıncın arttığı bölgelerde konik elemanların da yüzde açıklığının arttığı, yani silindirlerin deliklerden çıkarak gazın geçiş yolunu açtığı ve basınç değerini düşürmeye çalıştığını göstermektedir. Şekle göre, basıncın düşme eğiliminde olduğu bölgelerde de



Şekil 2.4 Konik elemanlar pozisyonuna göre yüksek fırın tepe basıncı değışimi.

konik elemanların yüzde açıklığının azalması ile, yani silindirlerin deliklere girmesiyle ve gazın geçiş yolunu kapatmasıyla, tepe basıncını yükseltmeye çalıştığı görülmektedir.

BÖLÜM 3

SİSTEM TANIMLAMA VE MODEL ÖNGÖRÜMLÜ DENETLEYİCİLER

Bu bölümde öncelikle dinamik sistem özellikleri ile ilgili bilgi verilecek ve sistem tanımlama problemi ifade edilecektir. Sonra, denetlenecek sistemin matematiksel modeline dayalı tasarlanan model öngörümlü denetleyiciler anlatılacaktır. Denetlenecek sistem modelinin elde edilmesi için doğrusal ve doğrusal olmayan model yapıları kullanılacak ve model öngörümlü denetleyici tasarımı örnekleri üzerinde durulacaktır.

3.1 SİSTEMLER

Mekanik, elektriksel, ısı, ekonomik, biyolojik, vb. birçok dinamik sistem matematiksel denklemlerle ifade edilebilir. Bu matematiksel denklemler, sürekli zamanlı sistemler için diferansiyel denklemler, ayrık zamanlı sistemler için de fark denklemleri olmaktadır. Bir dinamik sistemin giriş işaretine karşı göstereceği tepki, diferansiyel denklem veya fark denklemin çözümünden elde edilebilir. Bu denklemler, ele alınan sistem ile ilgili fiziksel kanunlardan yararlanılarak elde edilir (Franklin et al. 2002) .

3.1.1 Sistem Modelleri

Bir sistemin, dinamik karakteristiğinin matematiksel tanımına, matematiksel model denir. Dinamik sistemin çözümlenmesinde ilk adım, onun modelini çıkartmaktır. Sisteme ait uygun bir matematiksel modelin elde edilmesi tüm çözümleme işleminin en önemli kısmıdır. Modellemede genellikle çok karmaşık bir mühendislik sisteminin uygun kabullerle ve pek çok durumda ideal olarak varsayılan elemanlardan oluşmuş olarak tasarlanan bir fiziksel modeli elde edilir. Fiziksel model tasarlandıktan sonra da temel fiziksel yasalar kullanılarak elemanların davranışlarını tanımlayan ve genellikle doğrusal diferansiyel denklemler (veya fark denklemleri) şeklinde bir matematiksel model elde edilir. Matematiksel model bulunduktan sonra uygun yöntemler kullanılarak sistemin

çözümü bulunur. Elde edilen çözüm, gerçek sistemi ne kadar iyi temsil ediyorsa tasarlanan model gerçek sisteme o kadar uygun demektir. Aksi takdirde başlangıçta yapılan kabulleri tekrar gözden geçirerek gerçeğe daha yakın bir model tasarlamak gerekir (Franklin et al. 2002).

Bir modelin elde edilmesinde, modelin basitliği ile çözümleme sonuçlarının doğruluğu arasında bir uyum sağlanmalıdır. Sistem çözümlemesinde elde edilen sonuçlar, yalnızca tasarlanan modelin verilen fiziksel sisteme yaklaşımı oranında geçerlidir. Gerek görüldüğünde çok basit model yerine tüm sistemi tanımlayan yüzlerce denklemden oluşmuş bir model tasarlanabilir. Böyle bir modelin çözümünü elde etmek için çok hızlı aritmetik işlemler yapabilen bilgisayarlardan yararlanılır. Eğer çok yüksek dereceden bir doğruluğa ihtiyaç varsa uygun bir şekilde basitleştirilmiş bir model kurulması tercih edilir (Yüksel 2001). Basitleştirilmiş bir modelin elde edilmesinde ise genellikle sistemin belli fiziksel özelliklerinin ihmal edilmesi gerekir. Özellikle, eğer doğrusal yığılmış parametrelili matematiksel model elde edilmek isteniyorsa, fiziksel sistemin yapısında mevcut belli doğrusalsızlıkların ve dağılımlı parametrelerin ihmal edilmesi gerekir. İhmal edilen özelliklerin sistem cevabı üzerindeki etkileri küçük ise, matematiksel modelin çözümlenmesinden elde edilen sonuçlar ile fiziksel sistemin deneysel sonuçları arasında iyi bir uyum sağlanır. Genelde, yeni bir problemin çözümünde, çözüm hakkında genel bir görüş elde etmek üzere başlangıçta sistemin basitleştirilmiş bir modelini tasarlamak daha uygun olabilir. Bunun sonrasında da daha karmaşık bir çözümleme için gerekli olan daha ayrıntılı bir matematiksel model kurulabilir (Yüksel 2001).

3.1.2 Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Sistemler

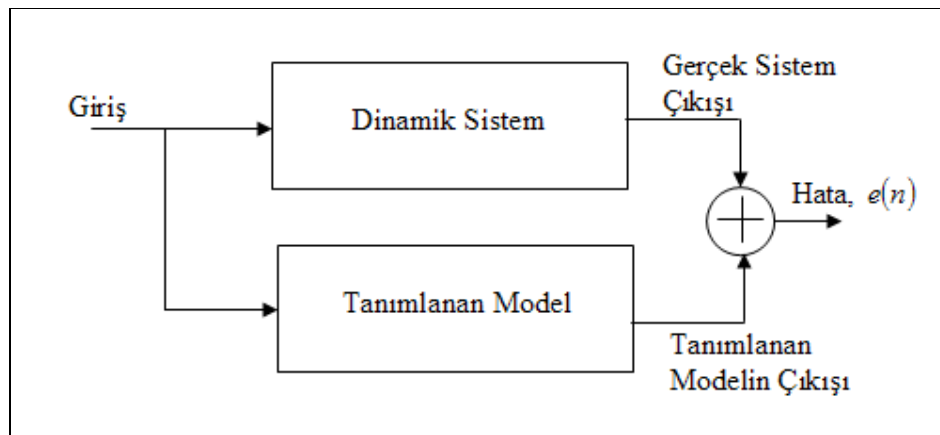
Gerçekte tüm mühendislik sistemleri doğrusal olmayan karakterdedirler. Doğrusal olarak ele alınan sistemler de aslında tam olarak doğrusal olmayıp sistem elemanlarının belli bir çalışma bölgesi için doğrusal kabul edildiği sistemlerdir. Doğrusal olmayan sistemlere ait matematiksel bağıntıları ve çözümleri elde etmek çok güçtür ve bazen analitik çözümler mümkün değildir. Dolayısıyla doğrusal olmayan sistemlerin doğrusal olarak ele alınması yalnızca bir yaklaşımdır. Bu yaklaşımın gerçek duruma uyması oranında tasarlanan model mükemmel olur.

Bu çalışmada doğrusal sistem kavramı herhangi bir sistemin giriş-çıkış ilişkisi incelendiğinde homojenlik ve toplanabilirlik özelliğini taşıması ile ilgilidir. Buna göre herhangi iki farklı giriş için elde edilen sistem tepkileri aynı girişlerin ağırlıklı toplamı için de aynı ağırlıklar ile tepkilerin toplamı şeklinde ise sistem doğrusallık özelliği göstermektedir. Bu ilişkiyi gösteren matematiksel model de doğrusal bir model olacaktır. Aksi takdirde sistem doğrusal değildir ve matematiksel modeli de aynı şekilde doğrusal olmayan özellik gösterecektir. Bu çalışmada ayrık zaman sistem modelleri üzerinde durulacak olup, kullanılacak matematiksel modellerde sabit katsayılı denklemler zamanla değişmez sistem özelliğini gösterecektir.

3.2 SİSTEM TANIMLAMA

Doğal veya insan yapımı sistemlerin matematiksel modelleri bugünün bilim ve teknolojisinde çok önemli bir role sahiptir (Nicolao 1997). Bu modellerin uygulamaları, mühendisliğin bütün dallarında, ekonomide, tıpta, fizyolojide ve bunlar gibi daha birçok alanda simülasyon, kontrol kestirimleri ve çeşitli teşhislerde kullanılır (Nicolao 1997). Matematiksel modelin bilimde bu kadar önemli olması, bu modellerin nasıl oluşturulduğu sorusunu ortaya çıkarır.

Dinamik sistem modeli Şekil 3.1’de gösterilen sistem, giriş-çıkışları ve matematiksel kurallar içeren bir kutuya benzetilebilir. Modeldeki matematiksel kurallar, bilinen bazı eşitliklerden yararlanılarak oluşturulabilir.



Şekil 3.1 Dinamik sistem modeli.

Sistemin matematiksel modelini oluşturmak için fiziksel önbilgi yoksa sistemle ilgili giriş-çıkış verileri kullanılarak, o sistemin matematiksel modeli elde edilebilir ki bu sistem tanımlama problemi olarak bilinir (Ljung 1996). Sistem tanımlama probleminin çözümü, hatayı minimize edecek şekilde, Şekil 3.1'deki dinamik sistemin matematiksel modelinin bulunmasını sağlar. Tanımlanan model, ideal durumda hata değerini sıfır yapmaktadır.

Sistem tanımlama, giriş-çıkış verilerine dayanarak dinamik sistemlerin matematiksel modellerini oluşturma yöntemidir (Taghavi and Sadr 2008). Sistem tanımlamada amaç doğrusal sistemler için bilinmeyen bir transfer fonksiyonunun belirlenmesidir. Bir çok durumda, modellemenin başlıca amacı, tasarıma yardımcı olabilmektir. Aynı zamanda sistem kazancı ve sistemin dinamik davranışlarının belirlenmesi gerektiği durumlarda da modelleme önemli olmaktadır (Ljung 1996). Çok kapsamlı bir konu olan sistem tanımlamada, incelenen sistem için oluşturulan modelin karakteristik özelliklerine göre birçok değişik yöntem bulunmaktadır. Doğrusal olmayan sistemler için ise giriş-çıkış ilişkisini veren bir matematiksel modelin elde edilmesi daha karmaşık bir problemdir.

3.2.1 Sistem Tanımlama Problemi

Sistem tanımlama problemi, deneysel verilerden yararlanarak, o sistemin matematik modelini oluşturma işlemidir (Ljung 1996). Ljung'a göre, toplanan veriler kullanılarak dinamik sistemin modelinin belirlenmesi için aşağıdaki maddelerin var olması gerekmektedir:

1. Veri toplama
2. Model yapısı
3. Uygun modeli belirleme kriteri

Ljung'un sistem tanımlama probleminde gerekli gördüğü bu 3 madde aşağıda açıklanmaktadır.

3.2.1.1 Veri Toplama

Sistemle ilgili giriş-çıkış verileri tanımlama için tasarlanmış özel deney düzenekleriyle yapılır. Tasarımcı, kaydedilecek veriler ve bu verilerin kaydedilme zamanları veya kaydedilme sıklıkları gibi parametreleri belirleyerek tanımlama prosedüründe kullanılacak

olan deney düzeneğini tasarlar. Bu deney düzeneği, sistem ile ilgili gerekli olan en fazla bilgiyi verebilecek şekilde tasarlanmalıdır. İstanbul Teknik Üniversitesi Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesinde deneysel çalışmalarda, Ata Nutku Gemi Model Deney Laboratuvarındaki büyük model çekme havuzu kullanılmaktadır. Model gemiler havuz üzerinde yer alan bir araba vasıtasıyla çekilmektedir. Dalgalı deniz ortamını modelleyebilmek için havuzun sonundaki dalga cihazı kullanılarak, değişik boylarda dalgalar model gemiye doğru gönderilmekte ve bu esnada geminin hareketi ile ilgili veriler kaydedilmektedir.

Eğer sistemden veri toplamak için bir deney düzeneği kurulamıyorsa, sistemin normal çalışması sırasındaki veriler toplanarak analizlerde ve modelleme prosedüründe kullanılmalıdır. Bu çalışmada, bir yüksek fırının tepe gaz basıncı kontrol sisteminin matematiksel modelinin oluşturulması için deney düzeneği yerine gerçek fırın verileri kullanılmıştır. Yüksek fırın tepe basıncını kontrol eden hidrolik silindirlerin pozisyonları ve buna karşılık yüksek fırın tepe basıncının aldığı değer birer saniyelik aralıklarla 65535 saniye boyunca kaydedilmiştir. Bölüm 4'te bu veriler kullanılarak yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi modellenmektedir.

3.2.1.2 Model Yapısını Belirleme

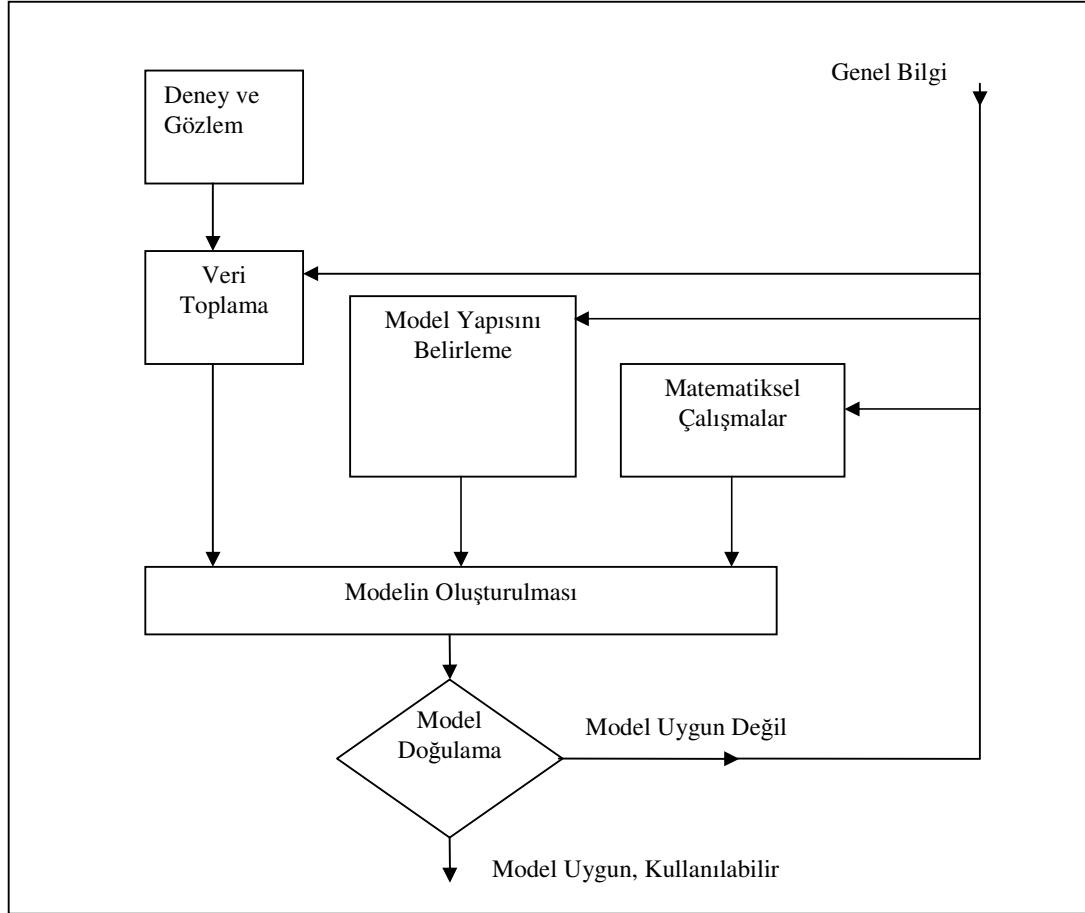
Sistem tanımlama işleminin en zor ve en önemli aşaması, incelenen sisteme en uygun model yapısını belirlemektir. Model yapısı belirlenirken sistem ile ilgili matematiksel bilgiler, mühendislik beceri ve sezileri kullanılmalıdır. Bu şekilde, tanımlamada kullanılacak olan model ile ilgili giriş-çıkış parametreleri, bozucular gibi değerlerin belirlenmesi, parametrelerin matematiksel olarak önceden hesaplanması, doğrusallığı ile ilgili kararlar verilmesi sağlanabilir. Bu çalışmada, birçok farklı model yapısı üzerinde çalışmalar mümkün olsa da doğrusal ARX model yapısı ve doğrusal olmayan Hammerstein blok model yapısı üzerinde durulacaktır.

3.2.1.3 Kayıtlı Verilere Göre En Uygun Modelin Bulunması

Sistem ile ilgili kaydedilmiş veriler kullanılarak sisteme en uygun modeli belirleme işlemi sistem tanımlama metodudur. Tanımlanan modelin kalitesi, ölçülen giriş parametrelerinin bu modele uygulanmasının ardından elde edilen çıkışın ölçülen çıkışa olan benzerliği ile

değerlendirilir. Bu hata direkt olarak kullanılan model yapısına ve ölçülen değerlerin kalitesine bağlıdır.

Yukarıda verilen bilgiler ışığında sistem tanımlama prosedürü Şekil 3.2'deki akış diyagramı ile ifade edilebilir. Akış diyagramına göre, sistemi tanımlamak için öncelikle sistem hakkında temel bilgiler edinilmelidir.



Şekil 3.2 Sistem tanımlama döngüsü.

Sistem üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen veriler, uygun bir model yapısı ve matematiksel bilgiler kullanılarak sistemin modeli tanımlanabilir. Tanımlanan bu model daha sonra çeşitli testlerden geçirilir. Test sonuçlarına göre, modelin kullanılacağı uygulama için uygun olup olmadığına karar verilir. Unutulmamalıdır ki, tanımlanan hiçbir model sistemin tam anlamıyla gerçek ifadesi olmayacaktır (Ljung 1996).

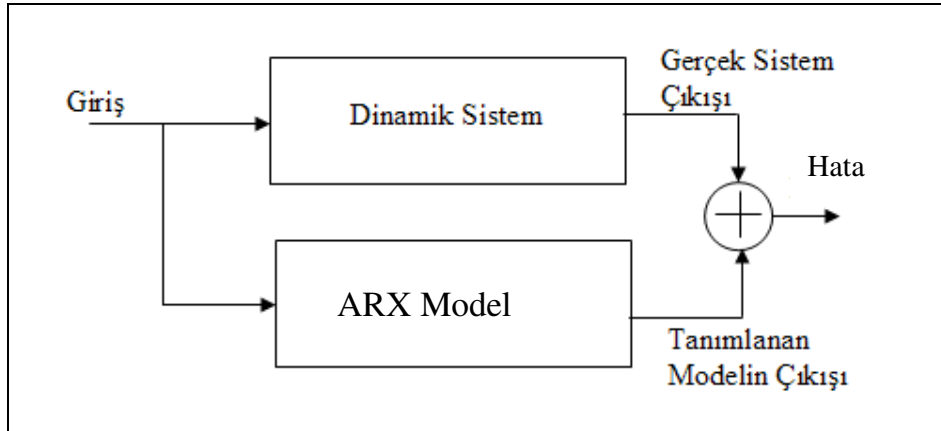
3.3 EN KÜÇÜK KARELER YAKALAŞIMI İLE SİSTEM TANIMLAMA

Giriş-çıkış verileri bilinen bütün sistemlerin matematiksel modelleri, sistem tanımlama yöntemleri ile elde edilebilir. Fakat bütün dinamik sistemler için aynı sistem tanımlama yönteminin kullanılması doğru sonuç vermemektedir. Sistem tanımlama yapılırken, o sisteme uygun yöntemin belirlenmesi gerekmektedir (Ljung 1996).

Bu bölümde, sistem tanımlama probleminin çözümünde kullanılan doğrusal ARX model yapısı ile doğrusal olmayan Hammerstein blok yapısı hakkında bilgi verilecektir. Doğrusal ve doğrusal olmayan sistemlerde bu tanımlama yöntemlerinin verdiği sonuçlar birbirleriyle karşılaştırılacaktır.

3.3.1 Doğrusal ARX Model Yaklaşımı

ARX model yapısı ile tanımlanan sistemler doğrusal özellik göstermektedir. Bu sebeple ARX model yapıları kullanılarak doğrusal sistemler tanımlanabilmektedir (Wise and Ricker 1990). Şekil 3.3'te tek giriş tek çıkış doğrusal bir sistem gösterilmektedir.



Şekil 3.3 Doğrusal sistemin ARX modeli.

Şekil 3.3'teki gibi bir doğrusal sistemde giriş-çıkış ilişkisini ARX modeli ile ifade eden transfer fonksiyonu;

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_N z^{-N}} \quad (3.1)$$

şeklinde tanımlanmaktadır. Eğer sistemin giriş işareti olan $U(z)$ bu transfer fonksiyonuna uygulanırsa sistemin çıkış işareti olan $Y(z)$ elde edilir (Adachi et al. 2002).

$$Y(z) = U(z)H(z) \quad (3.2)$$

(3.2) eşitliği daha açık halde yazılırsa,

$$Y(z) = U(z) \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}}{1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}} \quad (3.3)$$

$$Y(z)(1 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}) = U(z)(b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_n z^{-n}) \quad (3.4)$$

Çıkış işareti olan $Y(z)$ yalnız bırakılırsa,

$$Y(z) = -Y(z)(a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_n z^{-n}) = U(z)(b_0 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_M z^{-M}) \quad (3.5)$$

(3.5) eşitliğine ters z dönüşümü uygulandığında, $y(n)$ işaretinin zaman boyutundaki karşılığı elde edilir.

$$y(n) = -a_1 y(n-1) - a_2 y(n-2) \dots - a_n y(n-N) + b_0 u(n) + b_1 u(n-1) \dots + b_M u(n-M) \quad (3.6)$$

Görüldüğü gibi sistemin çıkış işareti, o anki ve daha önceki giriş işaretlerine, önceki çıkış işaretlerine ve sistem transfer fonksiyonu katsayıları olan a_i ve b_i değerlerine bağlıdır.

Şu anki çıkış olan $y(n)$ işaretinin karşılığı vektörel formda yazılırsa,

$$y(n) = \underbrace{[-y(n-1) \quad -y(n-2) \dots -y(n-N) \quad u(n) \quad u(n-1) \dots u(n-M)]}_{\varphi^T(n)} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_N \\ b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_M \end{bmatrix}}_{\theta} \quad (3.7)$$

$$y(n) = \varphi^T(n)\theta \quad (3.8)$$

Geçmiş zamandaki çıkış değerleri ile şu andaki ve geçmiş zamanlardaki giriş değerlerine bağlı olan $\varphi^T(n)$ ifadesi, regresör vektör olarak adlandırılır. Regresör vektörün bütün elemanları, sistem üzerinde yapılan denemeler sonrası ölçülerek kaydedilen giriş-çıkış değerleridir. (3.7) eşitliğindeki θ vektörü ise parametre vektörü olarak adlandırılır. Bu vektör (3.1)'de verilen transfer fonksiyonu $H(z)$ 'nin sonlu sayıdaki a_i ve b_i katsayılarını gösterir.

(3.8) eşitliğindeki tek bilinmeyen olan θ vektörünün hesaplanabilmesi için eşitliğin iki tarafı regresör vektör ile çarpılır

$$\varphi(n)y(n) = \varphi(n)\varphi^T(n)\theta \quad (3.9)$$

ve tüm $n = 0 \dots K-1$ için giriş-çıkış verileri ile birlikte en küçük kareler çözümü

$$\hat{\theta} = \left[\sum_{n=0}^{K-1} \varphi^T(n)\varphi(n) \right]^{-1} \left[\sum_{n=0}^{K-1} \varphi(n)y(n) \right] \quad (3.10)$$

$\hat{\theta}$ parametre vektörü hesaplanır. Bu vektör θ vektörünün en küçük kareler yöntemi ile bulunmuş olan yaklaşık eşitidir. θ vektörünün parametreleri sistemin gerçek durumunu

ifade eder. Parametreleri kestirilmiş olan $\hat{\theta}$ vektörü ile, θ vektörü ideal durumda birbirleriyle aynıdır. Ancak pratik sistemlerde bulunan birtakım hatalar (ölçüm hataları, vb.), tam anlamıyla doğru bir kestirim yapılmasını engeller.

(3.10) eşitliği ile hesaplanan parametre vektörünün elemanları kullanılarak sistemin transfer fonksiyonu $\hat{H}(z)$, eşitlik (3.1)'deki gibi oluşturulabilir. Parametreleri bir miktar hata ile kestirilmiş olan bu transfer fonksiyonuna $u(n)$ işareti uygulandığında $\hat{y}(n)$ elde edilir. $\hat{y}(n)$ ve $y(n)$ işaretinin birbirine olan benzerliği, tanımlanan sistemin başarısını göstermektedir. Bu iki sinyal arasındaki benzerliği bulmak için eşitlik(3.11)'deki normalize ortalama karesel hata (NMSE) değerinden yararlanır.

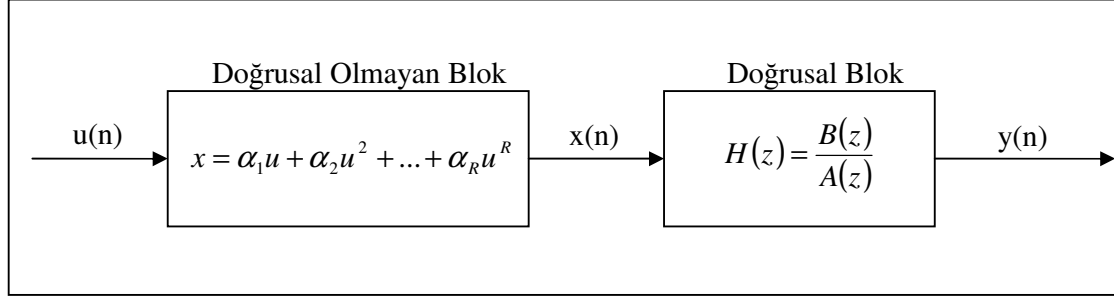
$$NMSE = \frac{\sum_{n=0}^{K-1} [y(n) - \hat{y}(n)]^2}{\sum_{n=0}^{K-1} y^2(n)} \quad (3.11)$$

İdeal bir tanımlama işleminin sonucunda bu hata değerinin 0 olması yani $y(n)$ ve $\hat{y}(n)$ işaretlerinin güçlerinin birbirine eşit olması gerekmektedir. Pratikte ise $y(n)$ ve $\hat{y}(n)$ işaretleri arasında, tanımlamanın başarısına göre bir miktar hata bulunmaktadır.

3.3.2 Doğrusal Olmayan Hammerstein Model Yaklaşımı

Gerçek hayatta karşılaşılan tüm mühendislik problemleri doğrusal olmayan özellik gösterirler. Bilinen bir çok doğrusal sistem de, belirli bölgelerde doğrusal özelliği bulunan sistemlerdir (Yüksel 2001).

Şekil 3.4 doğrusal olmayan Hammerstein model yapısına sahip bir sistemi ifade etmektedir.



Şekil 3.4 Hammerstein blok yapısı.

Sisteme $u(n)$ işareti uygulandığında, bu işaret önce sistemin doğrusal olmayan Hammerstein bloğu ile etkileşecek ve elde edilen $x(n)$ işareti sistemin doğrusal bloğuna giriş olacaktır. Sistemin doğrusal bloğunun çıkışı da sistem çıkışı $y(n)$ olarak elde edilecektir (Fruzzetti et al. 1996, Yu et al. 2008).

Sistemin doğrusal ve doğrusal olmayan kısımları matematiksel olarak eşitlik (3.12) ve (3.13)'teki gibi ifade edilebilir (Fruzzetti et al. 1996, Yu et al. 2008, Özding 2008).

$$x(n) = NL(u) = \alpha_1 u(n) + \alpha_2 u^2(n) + \dots + \alpha_R u^R(n) \quad (3.12)$$

$$y(n) = -a_1 y(n-1) - a_2 y(n-2) - \dots - a_N y(n-N) + b_0 x(n) + b_1 x(n-1) + \dots + b_M x(n-M) \quad (3.13)$$

(3.13)'deki ifadede $x(n)$ işaretinin (3.12)'deki eşiti koyulduğunda aşağıdaki yapı elde edilir.

$$\begin{aligned} y(n) = & -a_1 y(n-1) - a_2 y(n-2) - \dots - a_N y(n-N) \\ & + b_0 [\alpha_1 u(n) + \alpha_2 u^2(n) + \dots + \alpha_R u^R(n)] + b_1 [\alpha_1 u(n-1) + \alpha_2 u^2(n-1) + \dots + \alpha_R u^R(n-1)] + \dots \\ & + b_M [\alpha_1 u(n-M) + \alpha_2 u^2(n-M) + \dots + \alpha_R u^R(n-M)] \end{aligned} \quad (3.14)$$

(3.14) eşitliği, parametre ve regresör vektörler ile (3.15)'deki gibi gösterilir.

$$y(n) = \underbrace{\begin{bmatrix} -y(n-1) & \dots & y(n-N) & u(n) & u(n-1) & \dots & u(n-M) & \dots & u^R(n) & \dots & u^R(n-M) \end{bmatrix}}_{\varphi^T(n)} \cdot \underbrace{\begin{bmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_N \\ b_0\alpha_1 \\ \dots \\ b_0\alpha_R \\ b_1\alpha_1 \\ b_1\alpha_2 \\ \dots \\ b_M\alpha_R \end{bmatrix}}_{\theta} \quad (3.15)$$

(3.15) eşitliğinde regresör vektörü $\varphi^T(n)$, sistem üzerinde yapılan deneyler sonucunda elde edilen giriş-çıkış değerlerini içermektedir. Sistemin dinamikleri hakkında bilgiler veren $y(n)$ ve $u(n)$ işaretleri kullanılarak, θ parametre vektöründeki a_i , b_i ve α_i değerleri hesaplanabilir. Bunun için öncelikle parametre vektörü yalnız bırakılmalıdır.

$$y(n) = \varphi^T(n)\theta \quad (3.16)$$

ve tüm $n = 0 \dots K-1$ için giriş-çıkış verileri ile birlikte en küçük kareler çözümü

$$\varphi(n)y(n) = \varphi(n)\varphi^T(n)\theta \quad (3.17)$$

$$\hat{\theta} = \left[\sum_{n=0}^{K-1} \varphi^T(n)\varphi(n) \right]^{-1} \left[\sum_{n=0}^{K-1} \varphi(n)y(n) \right] \quad (3.18)$$

$\hat{\theta}$ parametre kestirimi vektörü hesaplanabilir. Burada elde edilen çözüm daha önce belirtilen ARX model yapısında elde edilen en küçük kareler çözümüne benzerdir. Ancak kestirilen parametre vektörü ile kestirimi yapılan değerler a_i ve $b_i\alpha_i$ değerleridir. b_i ve α_i 'yi ayrı ayrı elde etmek için $\hat{\theta}$ parametre vektörünün b_i ve α_i katsayılarını içeren kısmı düzenlemek gerekir.

$$B = \begin{bmatrix} b_0\alpha_1 & b_0\alpha_2 & b_0\alpha_R \\ b_1\alpha_1 & b_1\alpha_2 & b_1\alpha_R \\ \dots & \dots & \dots \\ b_M\alpha_1 & b_M\alpha_2 & b_M\alpha_R \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

olarak düzenlenen matrisin elemanları, tekil bileşen ayrışımı yöntemi (SVD) ile hesaplanabilir. SVD yöntemi ile B matrisi için U, S ve V matrisleri hesaplanır. Bu matrisler arasındaki ilişki (3.20)'deki gibidir (Hacioglu and Williamson 2003).

$$B = USV^T \quad (3.20)$$

Eğer B matrisi (3.19)'daki gibi sabit katsayılı sütunlara sahipse rankı 1'dir ve S matrisinin birinci satırının, birinci sütunundaki eleman 1, diğer bütün elemanları ise 0 olacaktır. Bu özellikten yararlanılarak, b_i ve α_i değerleri hesaplanır.

Örnek olarak rankı 1 olan A matrisi (3.21)'deki gibi verilsin.

$$A = \begin{bmatrix} 3 & 10 & 20 & 5 \\ 15 & 50 & 100 & 25 \\ 21 & 70 & 140 & 35 \\ 24 & 80 & 160 & 40 \end{bmatrix} \quad (3.21)$$

A matrisi SVD yöntemi ile ayrıştırılırsa, U, S, V matrisleri (3.22), (3.23), (3.24)'deki gibi olur.

$$U = \begin{bmatrix} -0.0848 & 0.9896 & -0.1 & -0.06 \\ -0.4241 & 0.0535 & 0.9037 & -0.0234 \\ -0.5937 & -0.1251 & -0.2904 & -0.7399 \\ -0.6786 & -0.0477 & -0.2982 & 0.6696 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

$$S = \begin{bmatrix} 272.4445 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

$$V = \begin{bmatrix} 0.1298 & -0.9915 & 0 & 0 \\ -0.4327 & 0.0567 & 0.8997 & 0 \\ -0.8655 & 0.1133 & -0.4234 & -0.2425 \\ -0.2164 & 0.0283 & -0.1059 & 0.9701 \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

U matrisinin ilk sütunu ile S matrisinin ilk sütun, ilk satırındaki eleman çarpılsın,

$$A_1 = \begin{bmatrix} -0.08484 \\ -0.4241 \\ -0.5937 \\ -0.6786 \end{bmatrix} \cdot [272.4445] \quad (3.25)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} -23.1084 \\ -155.5422 \\ -161.7591 \\ -184.8675 \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

V matrisinin 1.satır, 1.sütunundaki eleman ile A_1 'in çarpımı b_i katsayılarını verir.

$$b_i = \begin{bmatrix} -23.1084 \\ -155.5422 \\ -161.7591 \\ -184.8675 \end{bmatrix} \cdot 0.1289 \quad (3.27)$$

$$b_i = \begin{bmatrix} 3 \\ 15 \\ 21 \\ 24 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

V matrisinin ilk sütunundaki elemanlar, V matrisinin 1. satır, 1.sütunundaki elemana bölüldüğünde de α_i katsayıları elde edilmektedir.

$$\alpha_i = \begin{bmatrix} -0.1298 \\ -0.4327 \\ -0.8655 \\ -0.2164 \end{bmatrix} / -0.1298 = \begin{bmatrix} 1 \\ 3 \\ 7 \\ 8 \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Hammerstein model yapılarında statik doğrusal olmayan blok parametreleri ve dinamik doğrusal blok parametrelerinin elde edilmesinde SVD yöntemi kullanılacaktır (Hacioglu and Williamson 2003).

3.4 MODEL ÖNGÖRÜMLÜ DENETLEYİCİLER

Günümüzün yüksek teknolojili dünyasında, sistemlerin kusursuz kontrolü çok önemlidir. Bir otomasyon sisteminin kurulabilmesi için kontrol edilecek sistemin özelliklerinin iyice analiz edilmesi ve tasarlanan kontrol sisteminin verdiği sonuçların istenilen değerleri vermesi sağlanmalıdır. Model öngörümlü denetleyici (MPC), sistemle ilgili verileri önceden tahmin eden kontrol yöntemidir (Bhensdadia 2004).

3.4.1 Model Öngörümlü Denetleyici Tasarımı

Model öngörümlü denetleyiciler, sanayide 1980 yılından beri kullanılan ileri seviye bir kontrol yaklaşımıdır. Model öngörümlü denetleyiciler, sistem modellerini kullanarak, sistemin ileriki zamandaki girişlere olan yanıtlarını inceleyen optimizasyon algoritmalarıdır (Qin and Badgwell 2002). MPC, kontrol edilecek olan sistemin dinamik denklemine bağlıdır. Sanayide bu denklem genellikle sistem tanımlama yöntemi ile oluşturulmuş olan doğrusal bir modeldir. Modeller, sistemlerin dinamik davranışlarını gösterirler. Bu nedenle modeller, modellenen dinamik sistemin girişlerine göre çıkış işaretlerini elde edilmesini sağlarlar.

MPC algoritması her kontrol aralığında, sistemin gelecek zamandaki davranışlarını optimize eder. MPC, sistem modelini ve sistemden alınan anlık ölçümleri kullanarak prosesle ilgili gelecek zamandaki giriş-çıkışları hesaplar. Bu hesaplama, istenilen kriterlere

göre oluşturulmuş bir optimizasyon probleminin çözülmesi ile gerçekleşir. Tek giriş tek çıkış (SISO) bir sistem için MPC optimizasyonu matematiksel olarak

$$\min_{u[n|n], \dots, u[n+p-1|n]} \sum_{i=1}^p w_i (y[n+i|n] - y^r)^2 + \sum_{i=1}^m \lambda_i \Delta u[n+i-1|n]^2 \quad (3.30)$$

$$u_{maks} \geq u[n+i-1|n] \geq u_{min}, i = 1, \dots, m \quad (3.31)$$

$$\Delta u_{maks} \geq \Delta u[n+i-1|n] \geq -\Delta u_{maks} \quad (3.32)$$

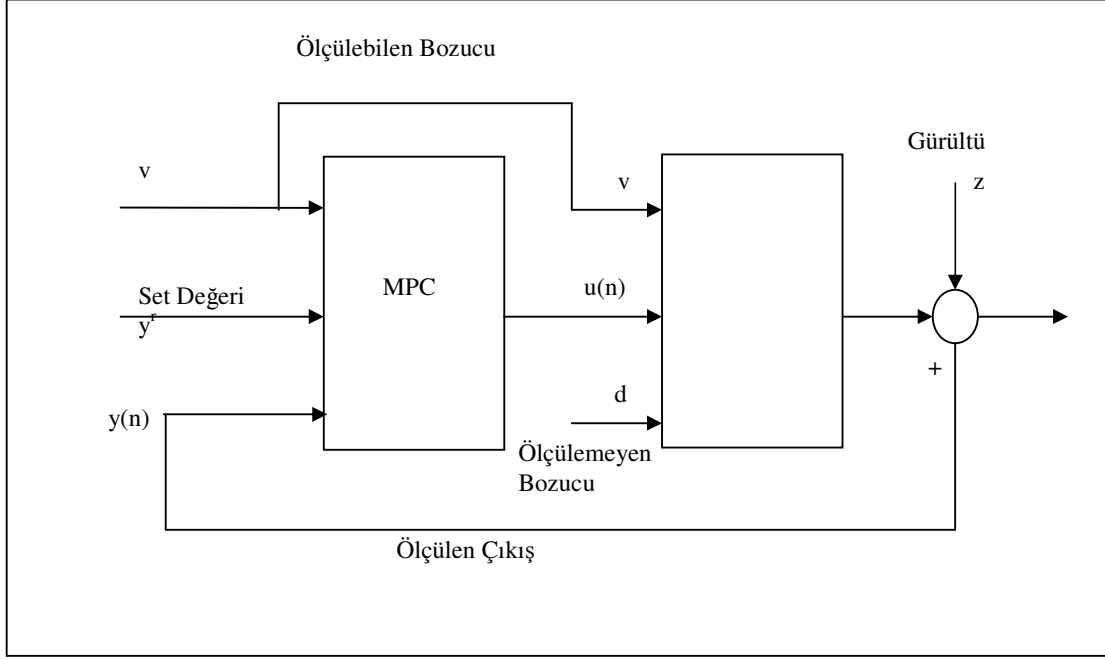
$$y_{maks} \geq y[n+i|n] \geq y_{min}, i = 1, \dots, p \quad (3.33)$$

ifade edilebilir ki burada p öngörü ufku (Prediction Horizon) ve m kontrol ufku (control horizon) ($m < p$); $u[n+i-1|n], i = 1, \dots, p$, denetleyiciden kontrol edilecek olan sisteme gelecekte gönderilecek olan giriş işaretleri kümesi; y^r , sistemin referans değeri; Δu şimdiki giriş işareti ile bir önceki giriş işaretinin farkı,

$$\Delta u[n+i|n] = u[n+i|n] - u[n+i-1|n] \quad (3.34)$$

w_i , sistem çıkışının ağırlık katsayısı; λ_i , Δu 'nun etkisini belirleyen ağırlık katsayısı; y_{maks} , y_{min} , sistem çıkışının sınır koşulları; u_{maks} , u_{min} , sistem girişinin sınır koşullarını ifade etmektedir.

MPC algoritması iki kısımdan oluşur. Bunlardan birincisi sistem modeli, ikinci de optimizasyon yöntemidir (Camacho and Bordons 2007). Optimizasyon yöntemi, sistem modelini kullanarak (3.30) eşitliğini minimize eden değerleri hesaplar ve denetlenecek olan prosesin kontrol sinyali olan MPC'nin çıkış işaretini üretir.

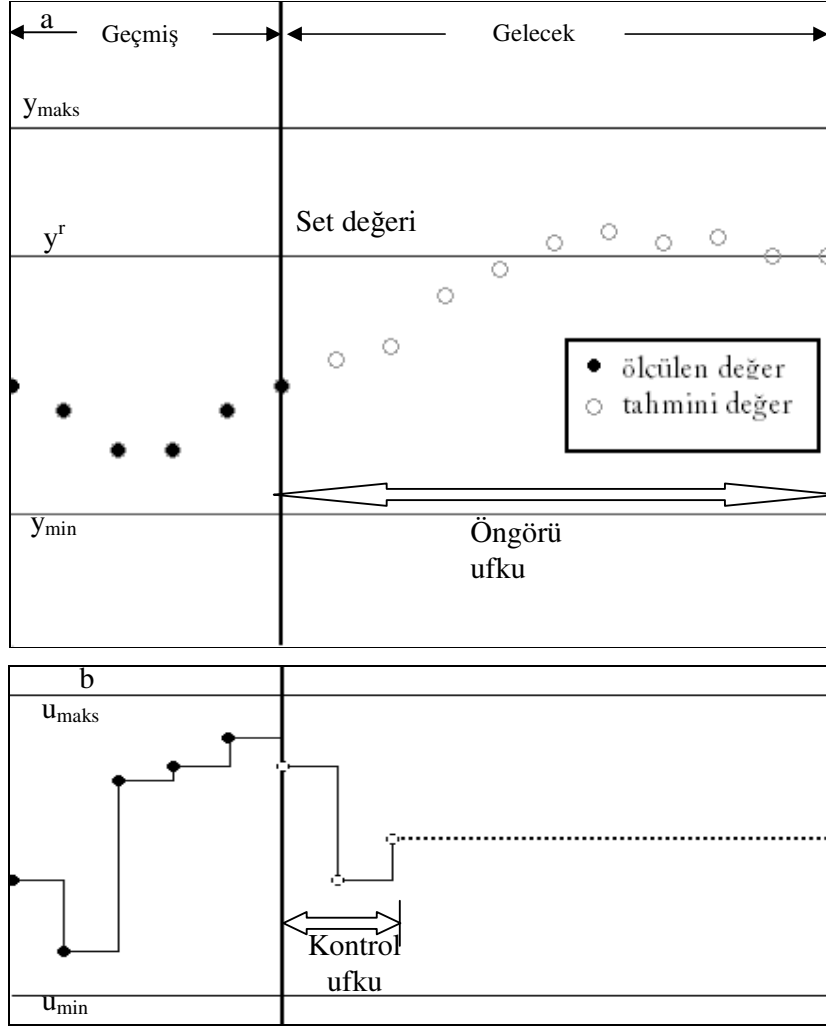


Şekil 3.5 MPC blok şeması.

MPC ile kontrolü yapılan bir sistemin blok diyagramı Şekil 3.5'te verilmiştir. İstenilen set değeri y^r ve sistem çıkış işareti olan $y(n)$ işaretleri MPC bloğuna girer. Burada eşitlik (3.30) kullanılarak sistemin gelecekteki giriş-çıkışları uygun bir şekilde hesaplanır ve kontrol işareti sisteme gönderilir.

MPC sistemi ideal durumlar haricinde yukarıda anlatıldığı gibidir. Ancak gerçek sistemlerde ideal sistemlerden farklı olarak hatalar bulunmaktadır. Bu yüzden gerçek sistemlerde MPC, ölçülebilir ya da ölçülemeyen hatalardan ötürü zorlamaktadır.

Şekil 3.6 a, sistemle ilgili olarak istenilen set değerini, çıkışın alabileceği en düşük ve en yüksek değerleri, ölçülmüş çıkış verilerini ve öngörü ufku süresince olması beklenen çıkış işaretlerini göstermektedir. Şekil 3.6 b, sistem girişi $u(n)$ 'nin en küçük ve en yüksek değerlerini, ölçülmüş $u(n)$ değerlerini ve kontrol ufku süresince olması gereken $u(n)$ değerlerini göstermektedir.



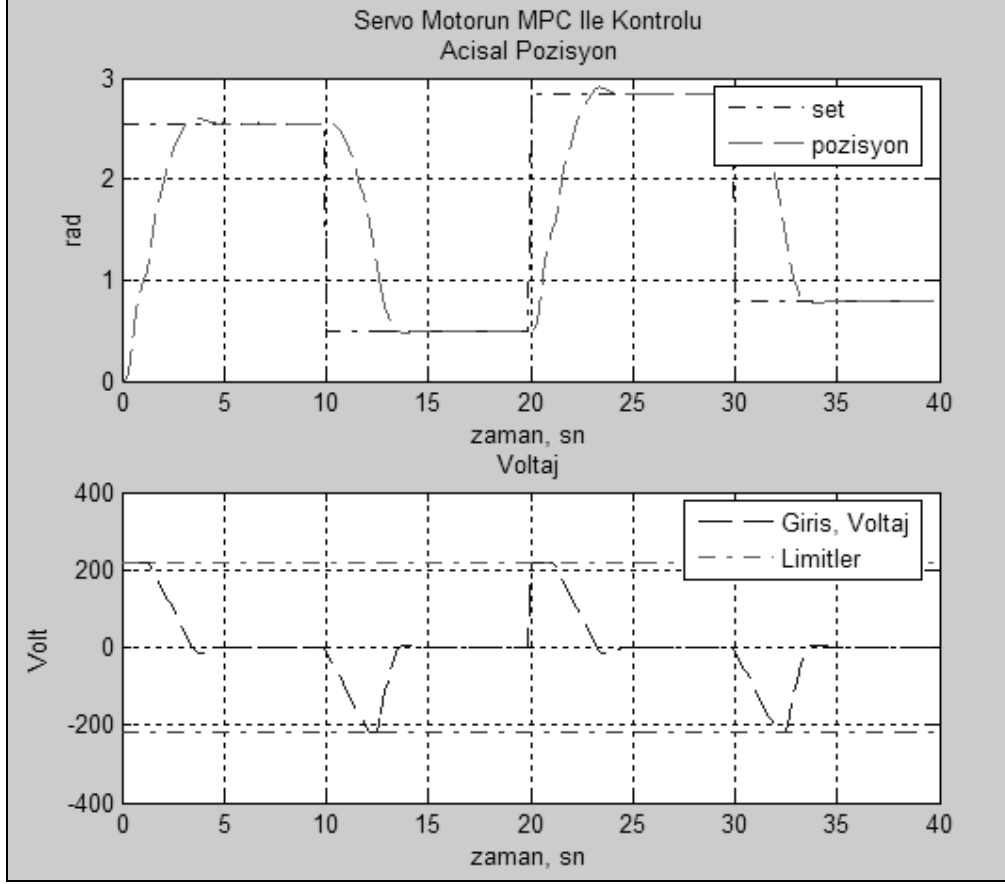
Şekil 3.6 MPC giriş-çıkışları.

3.4.2 MPC Özelliklerinin İncelenmesi; MPC İle DC Servo Motor Pozisyon Kontrolü

A. Bemporad'ın DC servo motor sistemi için oluşturduğu matematiksel model kullanılarak, bu sistem için bir MPC tasarlanmıştır. DC servo motor sistemin giriş işareti $\pm 220V$ 'luk gerilim, çıkış işareti $\pm \pi$ raydan aralığında açısız pozisyondur. MPC tasarlanırken sistemin fiziksel özelliklerinden kaynaklanan bu sınırlamalar da göz önünde bulundurulmuştur. DC servo motorun fiziksel önbilgiye dayanılarak ifade edilen giriş voltajı değişimine ile açısız pozisyon arası ilişkiyi gösteren transfer fonksiyonu

$$H(z) = \frac{B(z)}{A(z)} = \frac{(z + 0.7203)(z - 0.948)}{(z - 0.6935 \pm 0.6225i)(z - 0.3757)} \quad (3.35)$$

olarak kullanılacaktır. Burada örnekleme periyodu 1 sn alınmıştır.

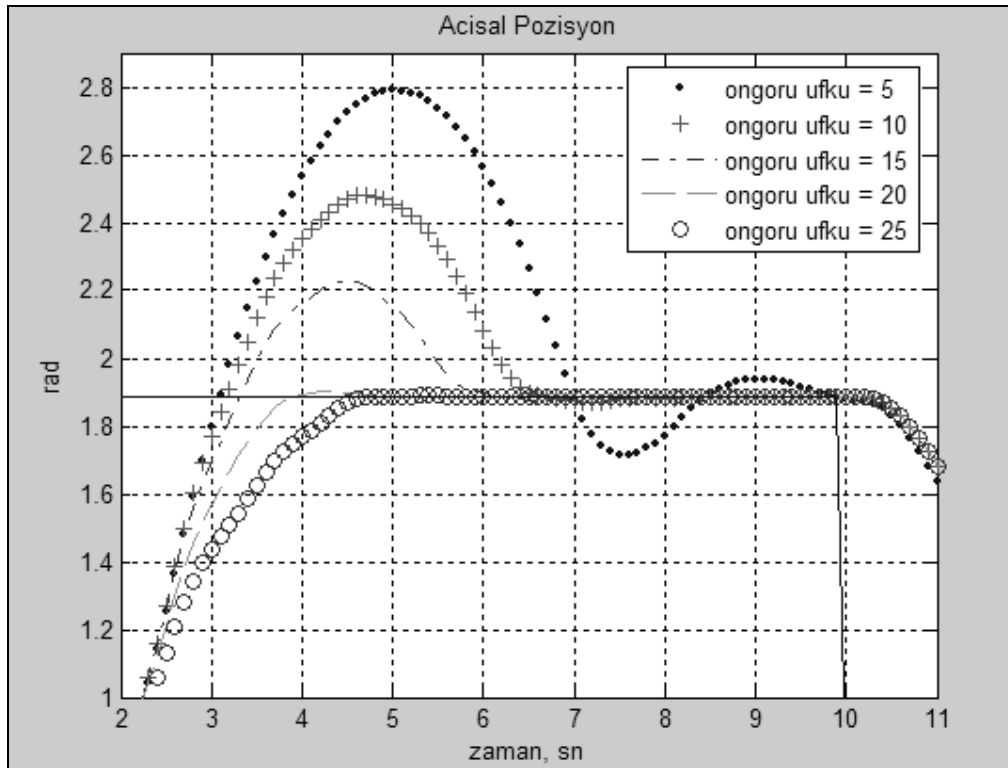


Şekil 3.7 Servo motor MPC ile kontrolü.

Şekil 3.7 transfer fonksiyonu (3.35)'teki gibi tanımlanan DC servo motor sisteminin MPC ile kontrolü sırasındaki giriş-çıkış değerlerini göstermektedir. MPC optimizasyonu sonucunda hesaplanan giriş işaretlerinin ± 220 Volt aralığında olduğuna dikkat edilmelidir. Simülasyondaki 20. saniyede set değeri ani olarak 0.5 rad değerinden 2.85 rad değerine çıkmaktadır. Buna tepki olarak model öngörümlü denetleyici çıkışı, giriş gerilimini olabilecek en yüksek değere yükseltmiştir. Oysa ki gerilimin 220'den yüksek olması halinde yerleşme zamanı çok daha az olabilirdi. Ancak MPC optimizasyonu giriş geriliminin alabileceği değer aralığını göz önünde bulundurarak sonuç verdiği için giriş gerilimi 220 Voltu aşamaz. Yani MPC algoritması, gerçekleşmesi mümkün olmayan değerlerle zorlamadan, sistemi kontrol edebilmektedir.

MPC ile kontrolün başarısı, öngörü ufku ve kontrol ufkunun değerleri ile artırılıp azaltılabilir. Servo motor sisteminin MPC algoritması ile kontrol edildiği örnekte, kontrol ufkü değeri sabit tutularak öngörü ufku değeri artırıldığında sistem çıkışında en yüksek

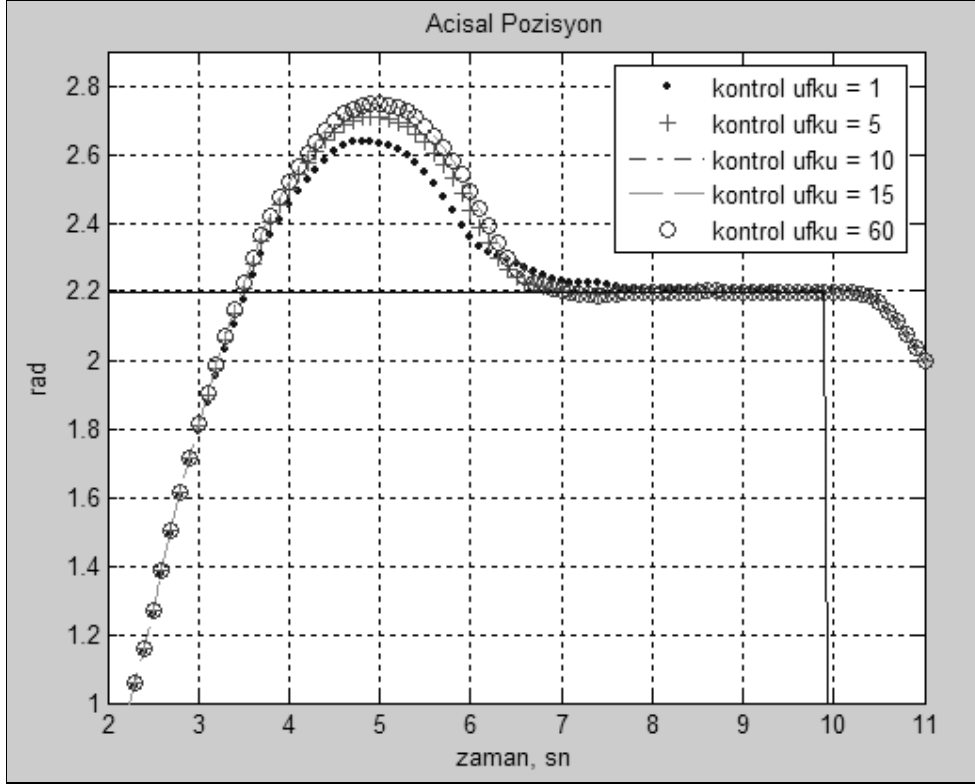
aşım ve yerleşme zamanı değerleri düşmektedir. Yapılan çalışmada DC servo motoru değişik öngörü ufku değerlerine sahip MPC ile kontrol edilmektedir. Kontrol ufku değeri sabit (5 örnek) tutularak, öngörü ufku değerleri 5, 10, 15, 20 ve 25 örnekler olarak değiştirildiğinde sistem çıkışı Şekil 3.8’de görüldüğü gibi oluşmaktadır. Bu durumda en yüksek aşımın azaldığı ve yerleşme zamanının da düştüğü görülmektedir. Öngörü ufku değeri 5 seçildiğinde en yüksek aşım değeri 2.79 rad olmaktadır. Buna karşılık, öngörü ufku değerinin 25 seçildiği örnekte en yüksek aşım değeri ihmal edilebilecek kadar küçük olmaktadır. Yükselme zamanı, öngörü ufkunun 20 seçildiği örnekte çok düşüktür ancak yerleşme zamanı öngörü ufkunun 25 olduğu örneğe göre daha yüksektir ve bu değerde salınım da çok olmaktadır. Öngörü ufkunun 5 seçildiği denemede ise yük daha istenilen set değerine gelemeden, sistem yeni bir set değeri almıştır.



Şekil 3.8 Kontrol ufku = 5 için, öngörü ufku değerinin MPC ile kontrole etkisi.

Öngörü ufku gibi kontrol ufku da MPC ile kontrol edilmektedir. DC servo motoru değişik kontrol ufku değerlerine sahip MPC ile kontrol edildiğinde, öngörü ufku değeri sabit (25 örnek) tutularak kontrol ufku 1, 5, 10, 15 ve 60 olarak değiştirildiğinde sistem çıkışı Şekil 3.9’deki gibi olmaktadır. Şekil 3.9’da kontrol ufkunun en yüksek aşım değerine ve yerleşme zamanına olan etkisi görülmektedir. Kontrol ufkunun değeri 1 seçildiğinde en

yüksek aşım değeri 2.64, yerleşme zamanı da 6 saniye olmaktadır. Kontrol ufku değeri 5 olduğu zaman en yüksek aşım değeri 2.71, yerleşme zamanı da 5 saniye olmaktadır. Kontrol ufkunun değeri 10, 15 ve 60 olarak belirlendiğinde en yüksek aşım 2.75, yerleşme zamanı da 5 saniye olmaktadır.



Şekil 3.9 Öngörü ufkü=25 örnek için, kontrol ufkü değerinin MPC ile kontrole etkisi.

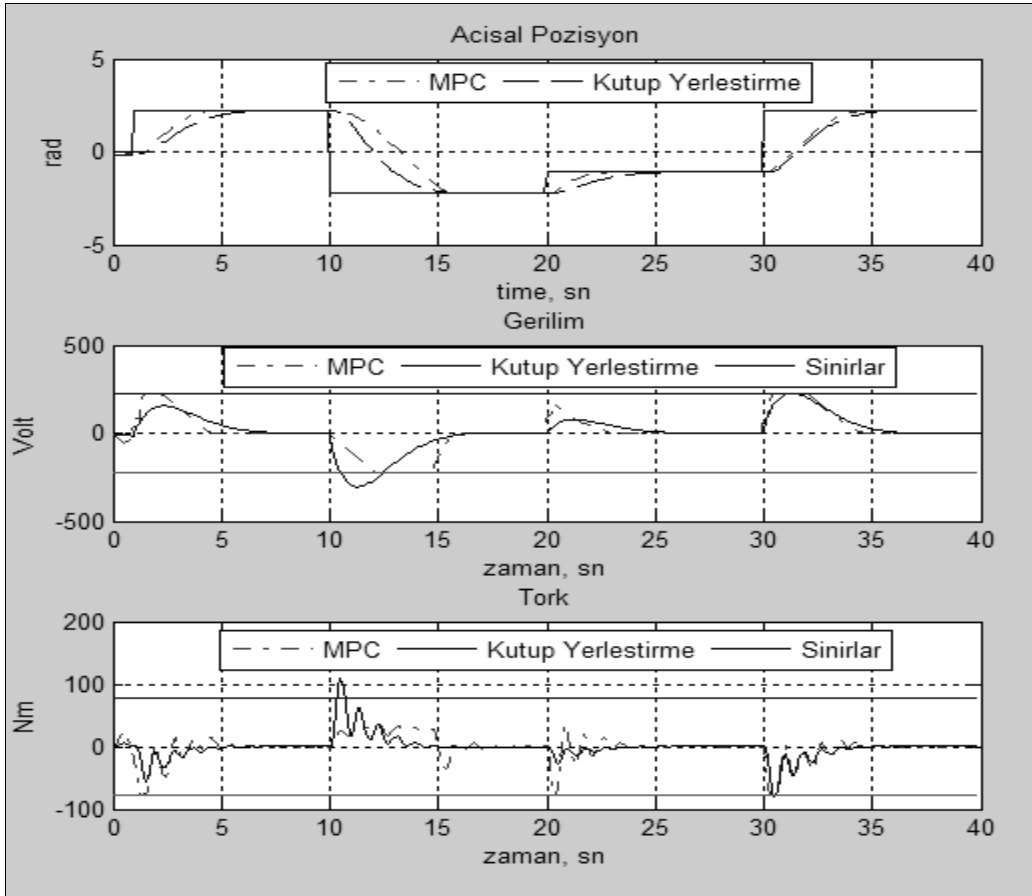
Model öngörümlü denetleyiciler, kontrol sinyalinin ve sistemin çıkış değerinin gelecek zamandaki değerlerini hesaplayarak kontrol sağlarlar. Kontrol işareti belirlenirken belirli sınırlamalar da hesaba katılır. Servo motor örneğinde sistemin giriş işareti gerilimdir. Gerçek sistemin özellikleri göz önünde bulundurulduğunda sisteme uygulanabilecek en yüksek ve en düşük giriş değeri sırasıyla 220 ve -220 Volttur. Sınırlamalar sadece giriş işaretleri için geçerli değildir. Servo motor örneğindeki çıkış işaretlerinden biri olan tork da ± 78.54 Nm değerleri arasında olmalıdır. MPC algoritması bu sınırlamaları göz önünde bulundurur ve kontrol işaretini buna göre belirler. Eğer servo motor başka bir yöntem ile kontrol edilecek olursa, sistemin set değerindeki yüksek değişimlerde kontrol sistemi, motorun açısız pozisyonu ile set değeri arasındaki büyük farktan dolayı sisteme ± 220 Volt

veya ± 78.54 Nm sınırları dışında bir giriş uygulamaya çalışacaktır. Bu sınırların dışına çıkılması sistemi tehlikeye atabilir.

(Bemporad 1998), kutup yerleştirme yöntemi ile DC servo motor sistemi için tasarladığı denetleyici

$$C(z) = 1000 \frac{9.7929 - 2.1860z^{-1} - 7.2663z^{-2} + 2.5556z^{-4}}{10 - 2.7282z^{-1} - 3.5585z^{-2} - 1.3029z^{-4} - 0.0853z^{-5}} \quad (3.36)$$

ile verilmiştir. Şekil 3.10, DC servo motor sisteminin MPC ve A. Bemporad'ın kutup yerleştirme ile kontrolünün sonuçlarını göstermektedir. Bu iki kontrol yaklaşımı sırası ile servo motor sistemine uygulanmıştır.



Şekil 3.10 MPC ve kutup yerleştirme yöntemi ile servo motor kontrolü.

Şekil 3.10 incelendiğinde iki kontrol yönteminin de yükü istenilen konuma getirme süresinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Gerilim ve tork değerleri incelendiğinde, kutup yerleştirme yöntemi ile yapılan kontrol sonucu elde edilen değerlerin kısıtlamaları aştığı görülmektedir. Simülasyonunda kısıtlamaların dışına çıkılsa bile kontrol işlemi düzgün bir şekilde tamamlanmaktadır. Ancak gerçek sistem için bu kısıtlamaların aşılması olası değildir. Servo motor sistemi için giriş gerilimi, donanımdan ötürü ± 220 Volt'u geçemez. Bunun gibi, tork değerinde de ± 78.54 Nm değerleri arasında bir sınırlama vardır. Bu sınırlamalar DC servo motorun fiziksel özelliklerinden kaynaklanmaktadır ve bu sınırların aşılması risklidir. Bu örnekte de vurgulanmak istendiği gibi MPC yöntemi, kontrol edilecek sistemin dinamik davranışlarına göre bir optimizasyon yapmaktadır. Bu da MPC'nin çok daha başarılı bir kontrol yöntemi olduğunu göstermektedir.

3.4.3 ARX Yaklaşımı İle Tanımlanan DC Servo Motor Modelinin MPC İle Kontrolü

DC servo motor sistemi tek giriş, tek çıkış sistem olarak ifade edilmektedir. Buna göre DC servo motorun, gerilim girişine göre açılmal pozisyon ifadesini veren ayrık zamanlı transfer fonksiyonu eşitlik (3.37)'de verilmiştir.

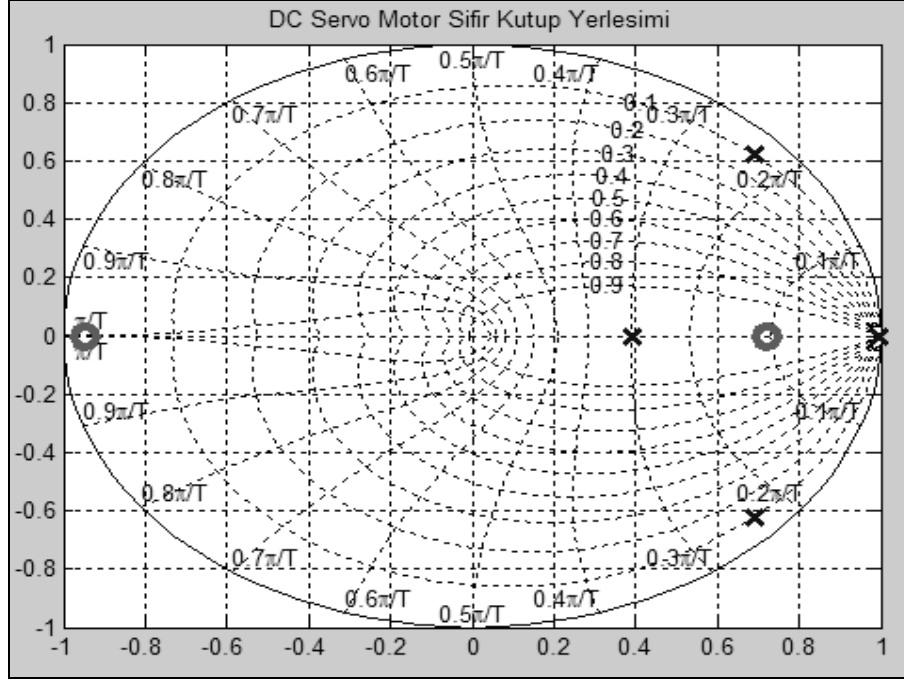
$$H(z) = \frac{z^2 - 1.625z + 0.6517}{z^3 - 1.763z^2 + 1.39z - 0.3263} \quad (3.37)$$

Bu transfer fonksiyonuna göre DC servo motor sisteminin sıfır ve kutupları (3.34)'de sıfır ve kutupların yerleşimi de Şekil 3.11'de yer almaktadır.

$$z = \begin{bmatrix} 0.7203 \\ 0.9048 \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$p = \begin{bmatrix} 0.6935 \pm 0.6225i \\ 0.3757 \end{bmatrix}$$

DC servo motor ile ilgi olarak verilen transfer fonksiyonuna $u(n)$ giriş işareti uygulanarak $y(n)$ çıkış işareti elde edilmiştir. Sistemi, ARX model yaklaşımı ile tanımak için bu giriş-çıkış verileri kullanılacaktır. Veri uzunluğu $K = 20000$ örnek olarak alınmıştır.



Şekil 3.11 DC servo motor sıfır kutup yerleşimi.

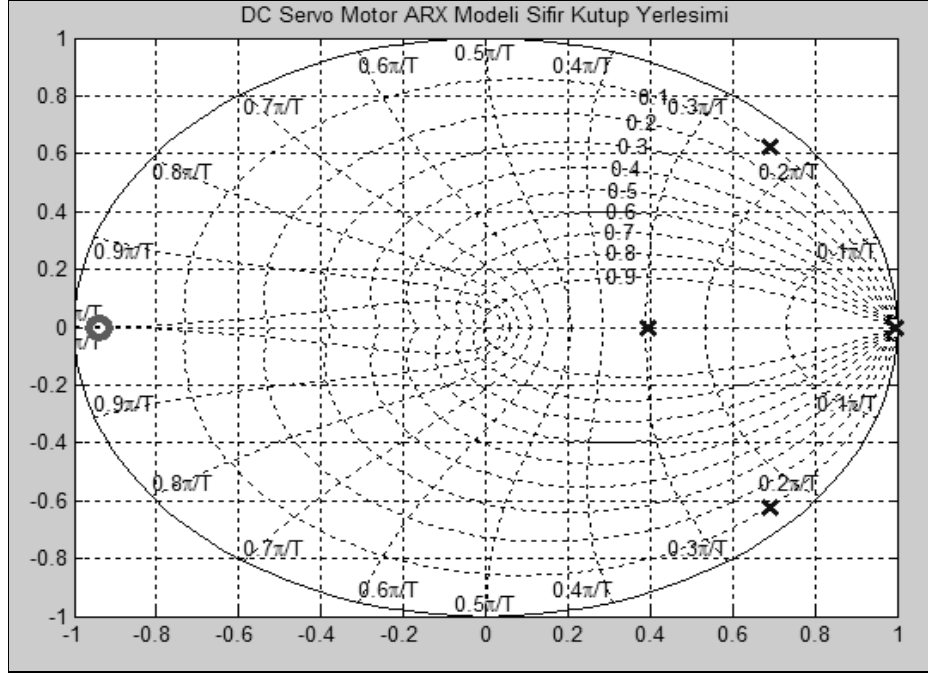
DC servo motorun sisteminin, $u(n)$ $y(n)$ işaretleri kullanılarak 4. dereceden ARX modeli parametreleri en küçük kareler yaklaşımı ile toplam karesel hatayı minimize edecek şekilde elde edilmiştir Buna göre elde edilen transfer fonksiyonu

$$\hat{H}(z) = \frac{-3.1016 \times 10^{-7} + 9.5245 \times 10^{-6} z^{-1} + 7.2128 \times 10^{-5} z^{-2} + 5.9082 \times 10^{-5} z^{-3}}{1 - 2.7852 z^{-1} + 3.2047 z^{-2} - 1.7637 z^{-3} + 0.34426 z^{-4}} \quad (3.39)$$

ile verilmiştir. $\hat{H}(z)$ 'in sıfır ve kutupları eşitlik (3.40)'ta ve sıfır (z) ve kutup (p) yerleşimi de Şekil 3.12'de yer almaktadır.

$$z = \begin{bmatrix} 37.1125 \\ -5.4652 \\ -0.9392 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

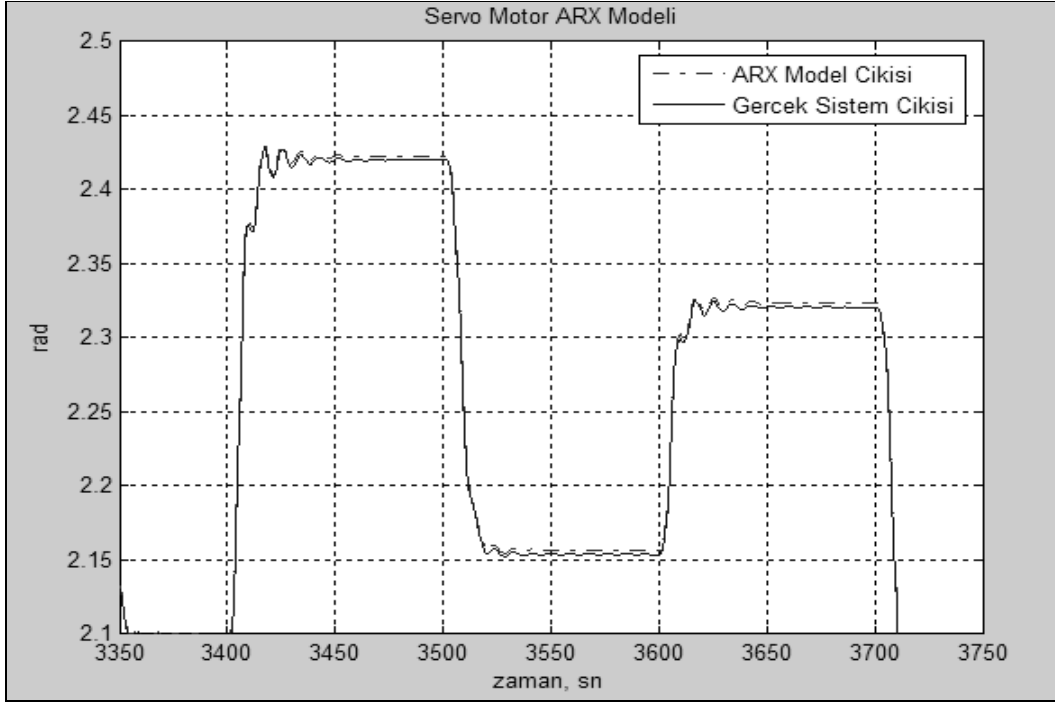
$$p = \begin{bmatrix} 1 \\ 0.6946 \pm 1.6219i \\ 0.3961 \end{bmatrix}$$



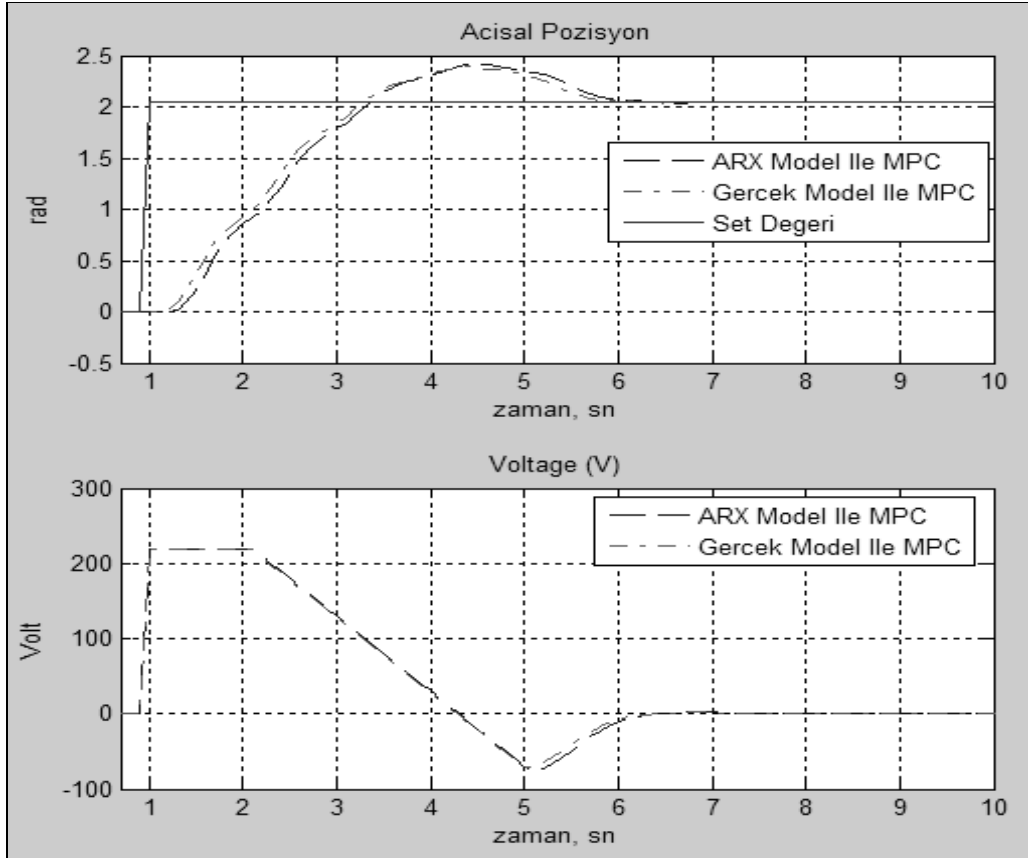
Şekil 3.12 DC servo motor ARX modeli sıfır kutup yerleşimi.

Eşitlik (3.39)'da, DC servo motor ile ilgili olarak ARX model yaklaşımı ile tanımlanan, transfer fonksiyonuna giriş işareti olarak $u(n)$ uygulandığında çıkışta elde edilen değer $\hat{y}_A(n)$ olmaktadır. Bu iki değer arasındaki NMSE değeri 3.6×10^{-5} olarak hesaplanmıştır. Gerçek sistem çıkışı $y(n)$ ve $\hat{y}_A(n)$ 'yi gösteren grafik Şekil 3.13'te verilmiştir.

Oluşturulan DC servo motor sisteminin ARX modeli ile MPC yaklaşımı ile servo motor pozisyon kontrolü mümkün olmaktadır. Tasarlanan denetleyicide öngörü ufku 15, kontrol ufku 5 olarak seçilmiştir. Gerçek sistem modeli ile elde edilen sonuçlara ek olarak, ARX modeli ile elde edilen pozisyon kontrol sonuçları Şekil 3.14'da görülmektedir. Şekil 3.14'da gerçek sistem ve tanımlanan modele uygulanan giriş sinyallerinin ve sonrasında oluşan çıkış sinyallerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Giriş-çıkış sinyallerinde oluşan bu farklar fiziksel olarak ihmal edilebilecek durumda ise tanımlanan model gerçek sistem yerine kullanılabilir.



Şekil 3.13 DC servo motorun ARX model çıkışı ve gerçek sistem çıkışı.

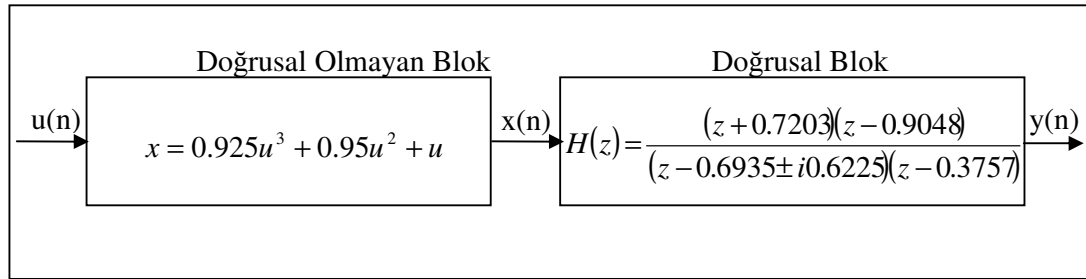


Şekil 3.14 Servo motor sisteminin ve ARX modelin ile MPC ile kontrolü.

Burada hedef her ne kadar gerçek sistemin model yapısı ve derecesi bilinse de buradan benzetimle elde edilen önceki giriş voltajı verileri ile pozisyon verilerini kullanarak elde edilen ARX modelinin performansını değerlendirmektir. Şekil 3.14'deki simülasyon verileri, tanımlanan modelin, gerçek sistemi ifade edebileceğini ve kontrolünün de gerçek sistem gibi olabileceğini göstermektedir. Buna göre doğrusal bir sistem, ARX modeli ile tanımlandığında MPC ile kontrolü mümkün olabilmektedir.

3.4.4 Hammerstein Yaklaşımı İle Tanımlanan Modelin MPC İle Kontrolü

Bu bölümde, doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi ve MPC ile kontrolü üzerinde durulacaktır. Uygulamalarda Şekil 3.15'da gösterilen ayrık zamanlı, doğrusal olmayan sistem kullanılacaktır. Şekil 3.15'teki sistem, doğrusal olmayan kısmı 3. dereceden ve doğrusal kısmı DC servo motorun transfer fonksiyonu olan bir yapıya sahiptir. Sisteme $u(n)$ giriş işareti uygulanarak, $y(n)$ çıkış değeri elde edilecektir.



Şekil 3.15 Ayrık zamanlı, doğrusal olmayan sistem modeli.

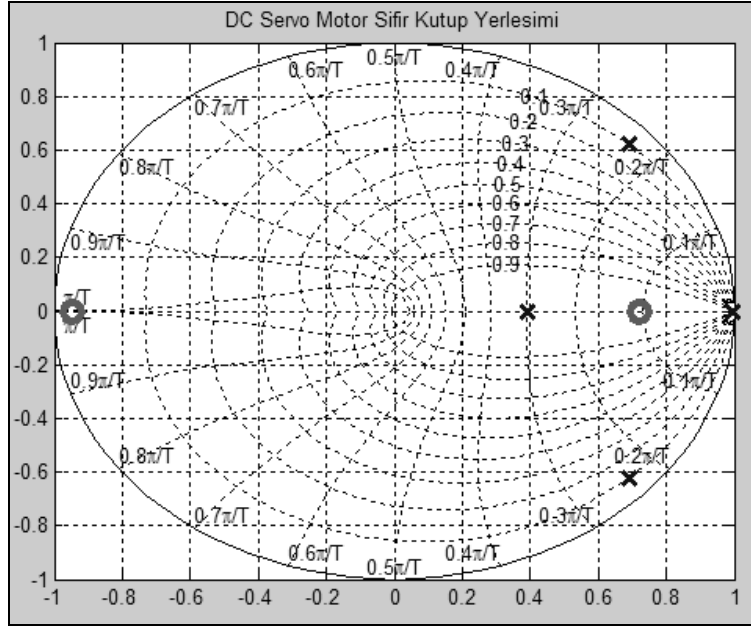
Sistemin doğrusal olmayan bloğu $NL[.]$, ve doğrusal bloğu $H(z)$,

$$x(n) = NL[u(n)] \quad (3.41)$$

$$x(n) = 0.925u^3(n) + 0.95u^2(n) + u(n) \quad (3.42)$$

$$H(z) = \frac{z^2 - 1.625z + 0.6517}{z^3 - 1.763z^2 + 1.39z - 0.3263} \quad (3.43)$$

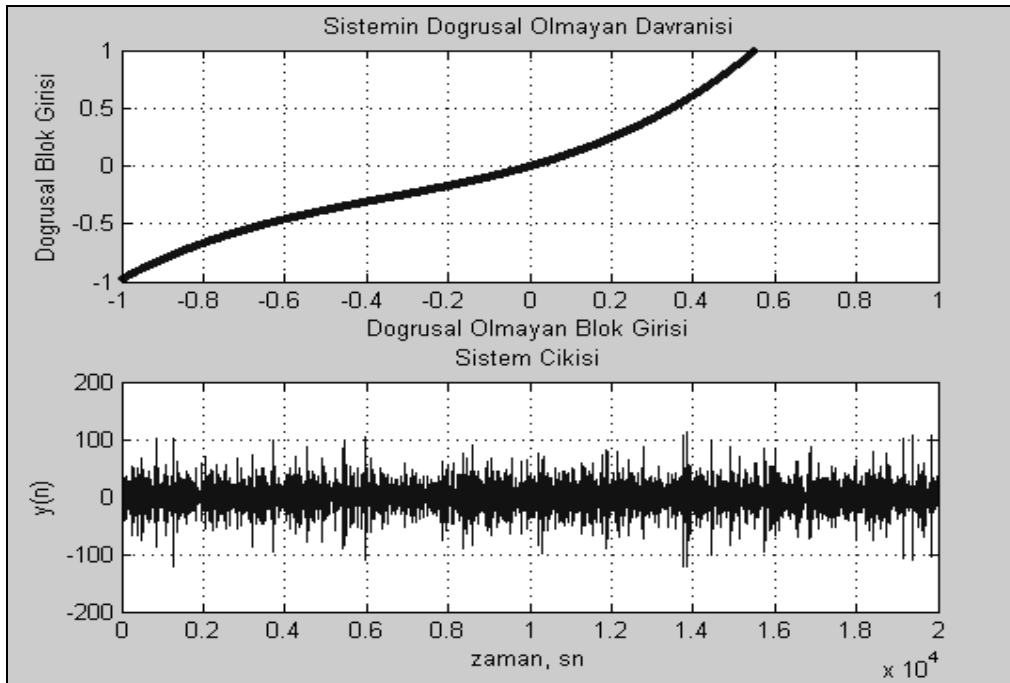
Sistemin doğrusal bloğu $H(z)$ 'nin sıfır kutup yerleşimi, Şekil 3.16'te verilmiştir. Buna göre $H(z)$ 'nin sıfır ve kutupları (3.44)'deki gibidir.



Şekil 3.16 $H(z)$ 'nin sıfır kutup yerleşimi.

$$z = \begin{bmatrix} -0.7203 \\ 0.9048 \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$p = \begin{bmatrix} 0.6935 \pm i0.6225 \\ 0.3757 \end{bmatrix}$$



Şekil 3.17 Doğrusal olmayan sistem verileri.

Sistemin doğrusalsızlığını ifade edebilmek için, $u(n)$ giriş işareti, sistemi doğrusal olmayan bölgede zorlayabilecek şekilde seçilmektedir. Buna göre, Şekil 3.15'deki sistem ile yapılacak olan tanımlama uygulamalarında Şekil 3.17'daki giriş-çıkış verileri kullanılacaktır.

Şekil 3.15'deki ayrık zamanlı doğrusal olmayan sistem Hammerstein model yaklaşımı ile modellendiğinde elde edilen doğrusal ve doğrusal olmayan blokların matematiksel gösterimi (3.45) ve (3.46)'daki gibidir.

$$x(n) = \hat{NL}[u(n)] = 0.92536u^3(n) + 0.9476u^2(n) + u(n) \quad (3.45)$$

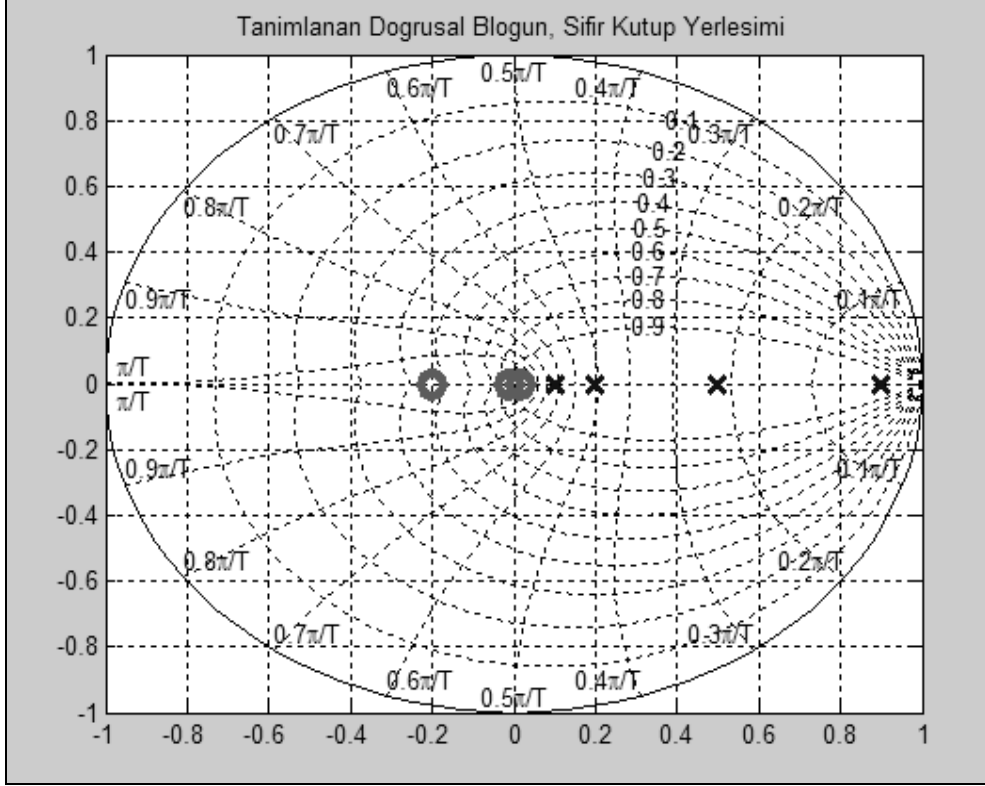
$$\hat{H}(z) = \frac{z^3 - 0.64z^2 - 0.8820z - 0.5988}{z^4 - 0.8938z^3 - 0.1440z^2 + 0.8948z - 0.2879} \quad (3.46)$$

Hammerstein yaklaşımı ile elde edilen (3.45)'deki doğrusal olmayan blok, (3.42)'deki doğrusal olmayan blok ile neredeyse aynıdır. Sistem için tanımlanan doğrusal $\hat{H}(z)$ transfer fonksiyonu da (3.43)'deki doğrusal blok $H(z)$ ile büyük benzerlikler göstermektedir. Tanımlanan doğrusal bloğun sıfır kutup yerleşimi Şekil 3.18'de gösterilmiştir. Şekil 3.18'e göre $\hat{H}(z)$ 'nin sıfır ve kutupları (3.47)'deki gibidir.

$$z = \begin{bmatrix} -0.1998 \\ 0.0164 \\ -0.0138 \end{bmatrix} \quad (3.47)$$

$$p = \begin{bmatrix} -0.8739 \\ 0.6964 \pm 0.6274 \\ 0.3750 \end{bmatrix}$$

Tanımlanan sistemin girişine $u(n)$ işareti uygulandığında elde edilen çıkış, $\hat{y}_H(n)$ ve gerçek sistem çıkışı $y(n)$ Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'de gösterilmiştir.

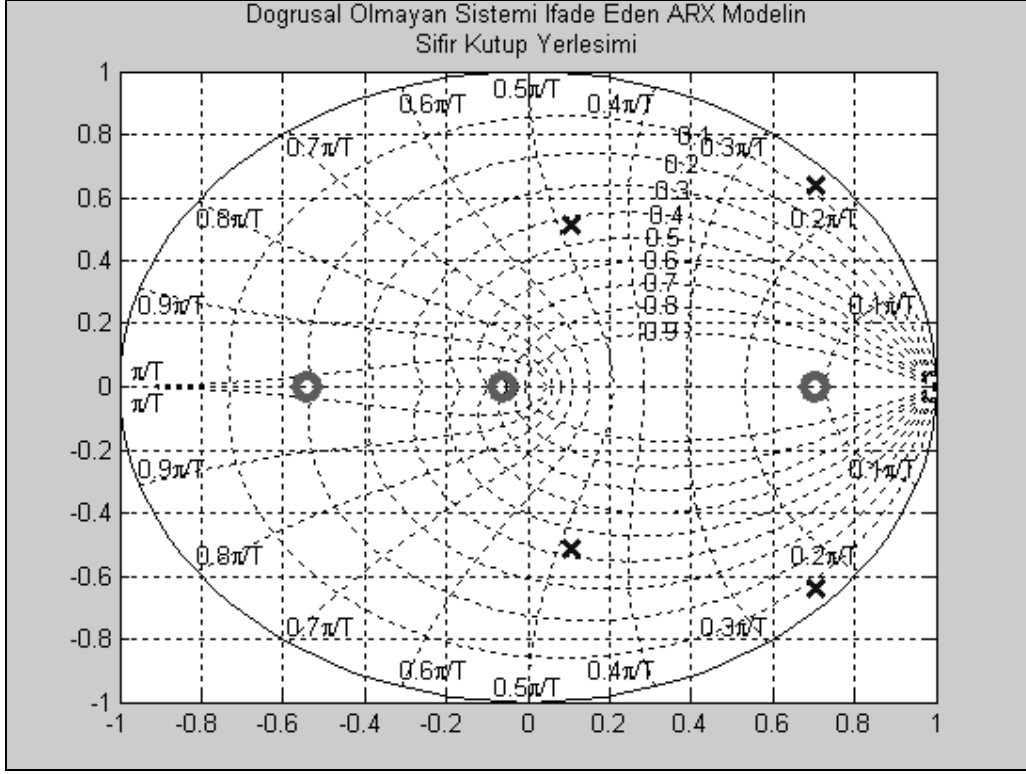


Şekil 3.18 $\hat{H}(z)$ 'in sıfır kutup yerleşimi.

Eşitlik (3.42) ve (3.43) ile açıklanan doğrusal olmayan sistem, ARX model yaklaşımı ile modellenerek, bu sistem tanımlama yaklaşımının doğrusal olmayan sistemlerdeki performansı incelenebilir. Buna göre doğrusal olmayan sistem ARX model yaklaşımı ile elde edilen transfer fonksiyonu $\hat{H}_A(z)$, (3.48)'de verilmiştir.

$$\hat{H}_A(z) = \frac{3.8222z^3 - 0.3773z^2 - 1.4908z - 0.0935}{z^4 - 1.6342z^3 + 1.4882z^2 - 0.5844z + 0.2481} \quad (3.48)$$

$\hat{H}_A(z)$ 'in sıfır kutup gösterimi Şekil 3.19'da gösterilmiştir.



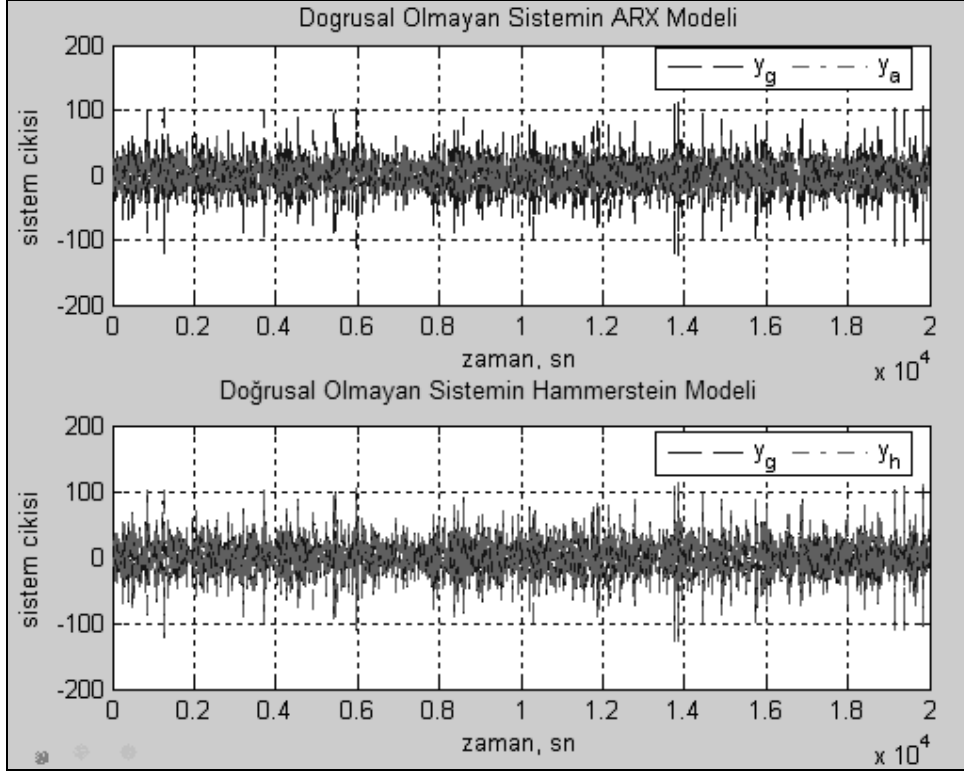
Şekil 3.19 $\hat{H}_A(z)$ 'in sıfır kutup gösterimi.

Şekil 3.18'e göre, $\hat{H}_A(z)$ 'in sıfır kutupları (3.47) ve (3.48)'daki gibidir.

$$s = \begin{bmatrix} 0.9030 \\ -0.5398 \\ -0.0645 \end{bmatrix} \quad (3.49)$$

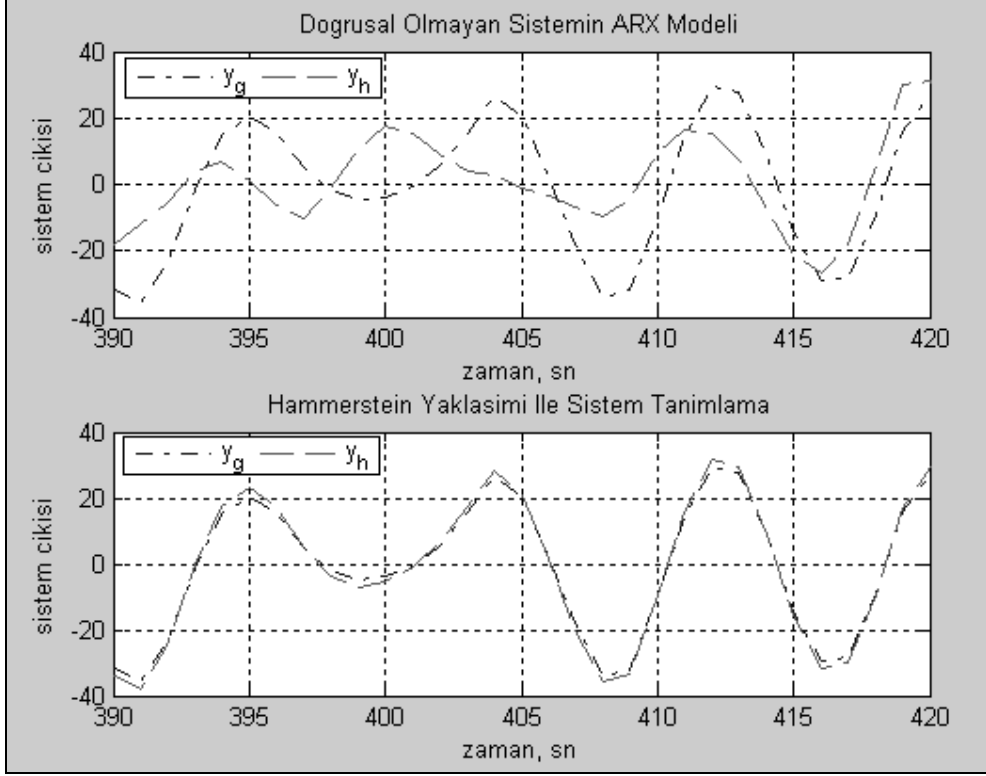
$$p = \begin{bmatrix} 0.7086 \pm i0.6365 \\ 0.1085 \pm i0.5115 \end{bmatrix}$$

Şekil 3.18'deki sıfır ve kutuplar incelendiğinde, $\hat{H}_A(z)$ 'in gerçek sistemden farklı bir dinamik yapıya sahip olduğu görülmektedir. Tanımlanan bu sistemin $u(n)$ işaretine verdiği tepki, $\hat{y}_A(n)$ Şekil 3.20 ve Şekil 3.21'deki gibi olmaktadır.



Şekil 3.20 Doğrusal olmayan sistemin, doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlarla tanımlanan modellerinin sonuçları.

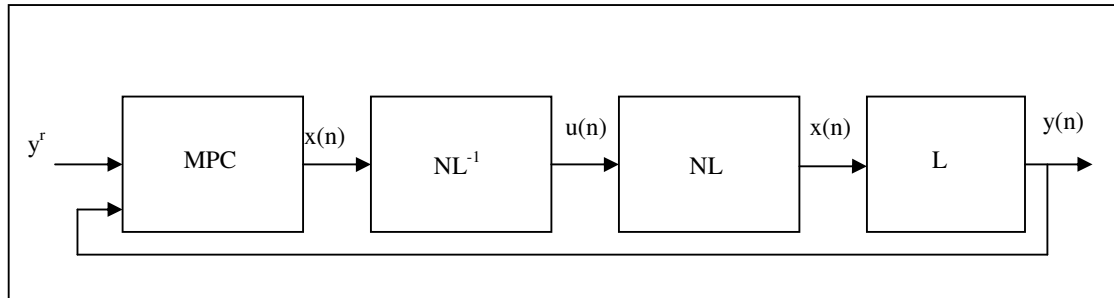
Şekil 3.20 ve 3.21’de, $y_g(n)$, $u(n)$ işaretinin gerçek sisteme uygulanması sonucu elde edilen $y(n)$ işaretidir. $y_H(n)$ $y_A(n)$ sırasıyla, $u(n)$ işaretinin Hammerstein ve ARX model yaklaşımları ile elde edilen modellere uygulanması sonucu oluşan $\hat{y}_H(n)$ ve $\hat{y}_A(n)$ sinyalleridir. Şekil 3.20 ve Şekil 3.21’deki sonuçlar, doğrusal olmayan sistemin, Hammerstein model yaklaşımı ile doğrusal sistem tanımlama tekniği olan ARX model yaklaşımına oranla çok daha iyi modellenebildiğini göstermektedir. Şekil 3.20’de tanımlanan modellerin geniş aralıktaki durumu gösterilmiştir. Şekil 3.21, sistem çıkışlarını, farkların daha net görülebilmesi için çok daha dar bir aralıkta göstermektedir. Hammerstein modeli ile oluşturulan ve 3. dereceden doğrusal olmayan blok ve 4. dereceden doğrusal bloğa sahip sistem çıkışı $\hat{y}_H(n)$ ile gerçek sistem çıkışı $y(n)$ arasındaki normalize edilmiş ortalama karesel hata 0.0039 olmaktadır. ARX yaklaşımı ile tanımlanan modelin çıkışı olan $\hat{y}_A(n)$ ile $y(n)$ arasındaki NMSE değeri de 0.3687 olmaktadır.



Şekil 3.21 Doğrusal olmayan sistemin, doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlarla tanımlanan modellerinin sınırlı aralıktaki sonuçları.

Hammerstein model yapısı ile tanımlanan model sonucunda oluşan NMSE değeri ARX model yaklaşımı ile oluşturulan model sonucunda elde edilen hataya oranla çok küçüktür.

Şekil 3.5'te MPC bloğunun çıkışının doğrusal sisteme girdiği görülmektedir. Eğer kontrol edilecek olan sistem doğrusal değilse MPC problemi Şekil 3.22'deki gibi değiştirilebilir (Allgöwer and Zehng 2000).



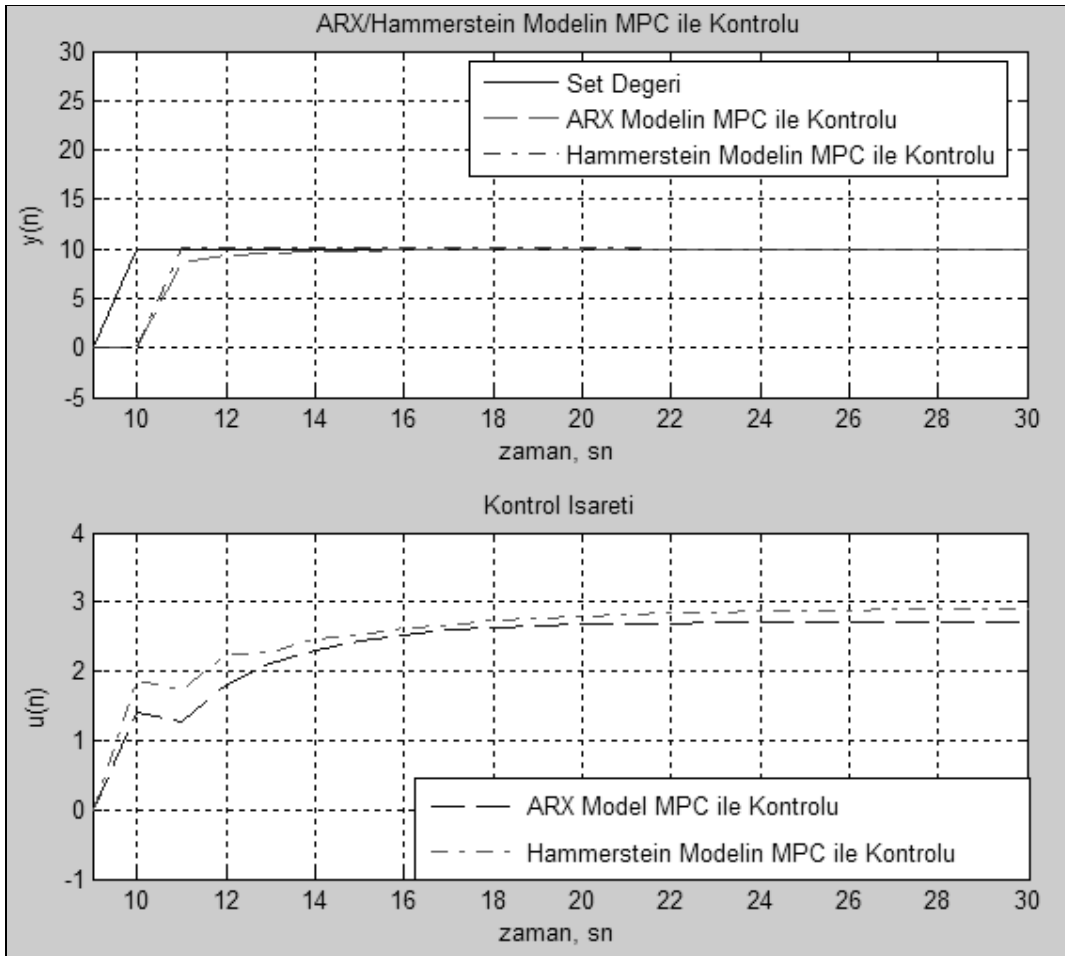
Şekil 3.22 Doğrusal olmayan Hammerstein model yapısı MPC ile kontrolü.

Sistemin doğrusal olmayan kısmı $NL[u(n)]$ ile ifade edilirse, $x(n)$ ve $u(n)$ arasındaki ilişki,

$$x(n) = NL[u(n)] \quad (3.50)$$

$$u(n) = NL^{-1}[x(n)] \quad (3.51)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik (3.50) ve (3.51)'den yararlanılarak doğrusal olmayan bir sistemin MPC ile kontrolü sağlanabilir. MPC optimizasyonu, sistem girişini $x(n)$ olarak hesaplar. $x(n)$ işareti, doğrusal olmayan fonksiyonun tersi ile işleme girdiğinde $u(n)$ işaretine dönüşür. $u(n)$ işareti de doğrusal olmayan fonksiyon ile işleme girdiğinde, tekrar $x(n)$ işareti elde edilmektedir.



Şekil 3.23 Doğrusal olmayan sistem MPC ile kontrolü (Öngörü Ufku = 10, Kontrol Ufku = 5).

Buna göre, (3.42) ve (3.43) ile ifade edilen doğrusal olmayan sistemden elde edilen giriş-çıkış verilerine göre öncelikle Hammerstein blok yaklaşımı ile model parametreleri tanımlanmış ve daha sonra da tanımlanan doğrusal olmayan sistemin MPC ile kontrolü gerçekleştirilmiştir. Burada aynı zamanda sistemin ARX yaklaşımı ile tanımlanan transfer fonksiyonunun da MPC ile kontrolü yapılmıştır. İki model için de tasarlanan MPC’de öngörü ufku 10, kontrol ufku 5 örnek alınmıştır. Yapılan kontrollerin sonuçları Şekil 3.23’de yer almaktadır. Şekilde set değerinin 10. saniyede 0’dan 10’a çıktığı ve bunu takiben her iki MPC’nin tepki vererek sistem çıkışlarını istenilen değere ulaştırdığı görülmektedir. Hammerstein doğrusal olmayan blok yapısı yaklaşımı ile tanımlanan modele dayalı model öngörümlü denetleyici sistem çıkışını 1 saniye içinde istenilen değere getirmiştir. Buna karşılık ARX model yapısı yaklaşımı ile tanımlanan modele dayalı model öngörümlü denetleyici sistem çıkışını 4 saniye sonra istenilen değere küçük bir hata payı ile getirebilmiştir. Bu örnek, doğrusal olmayan model yapıları tabanlı öngörümlü denetleyicilerin, doğrusal olmayan sistemlerde doğrusal model yapıları tabanlı model öngörümlü denetleyicilere göre daha başarılı olduklarını göstermektedir.

BÖLÜM 4

MPC YAKLAŞIMIYLA KONİK ELEMANLAR POZİSYONU İLE TEPE BASINCI KONTROLÜ

4.1 YÜKSEK FIRIN TEPE BASINCI MODELİ

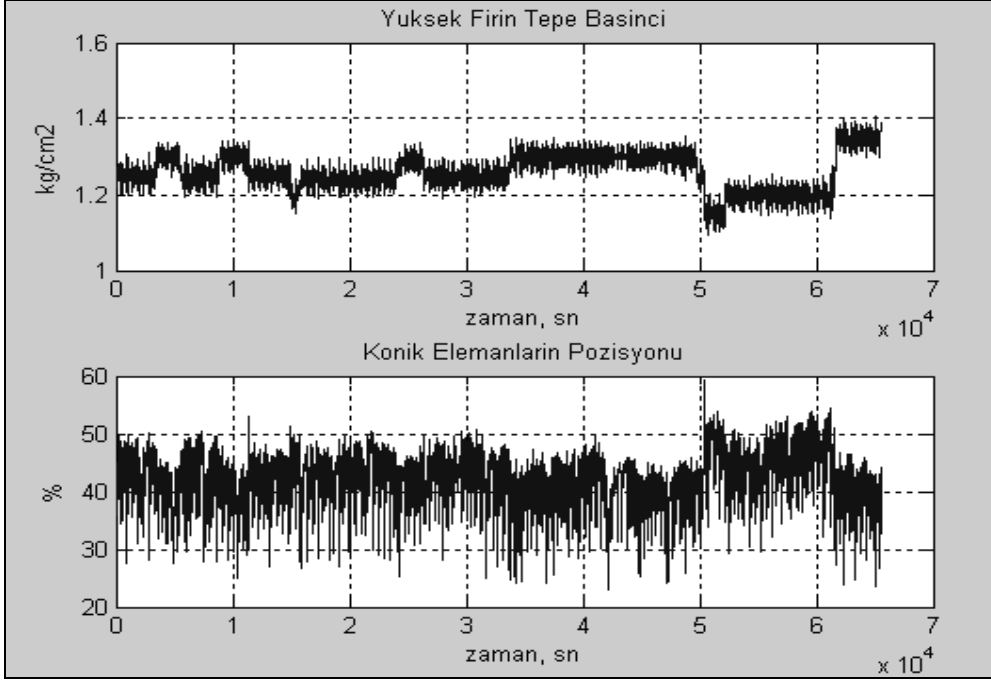
Demir-Çelik Tesislerinin en önemli kısımlarından birisi olan yüksek fırınlardaki cihazlar ve proses, ayrık kontrol sistemleri (DCS) ile kontrol edilir. Bu bölümde, yüksek fırınların tepe basınç kontrolünü yapan konik elemanların çalışması incelenecektir. Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi, doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemlerle modellenecektir ve elde edilen modeller kullanılarak yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi için MPC tasarlanacaktır. Modellenerek MPC ile kontrolü yapılan sistemin giriş-çıkışları, yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin çalışması ile ilgili ölçülen giriş-çıkış verileri ile karşılaştırılacaktır.

Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin modellenmesi için, DCS sisteminden 65535 saniye süresince ve birer saniyelik aralıklarla giriş-çıkış değerleri alınmıştır. Bu veriler, konik elemanların pozisyonlarını yüzde olarak gösteren 3 ayrı değer ve kg/cm^2 cinsinden fırın tepe basıncıdır.

Şekil 4.1'deki grafikte yüksek fırın tepe basıncının konik elemanların pozisyonuna göre değişimi yer almaktadır. Sistemdeki 3 silindir de senkron olarak hareket ettiği için, yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin girişi konik elemanların pozisyonlarının aritmetik ortalaması olarak kabul edilmektedir.

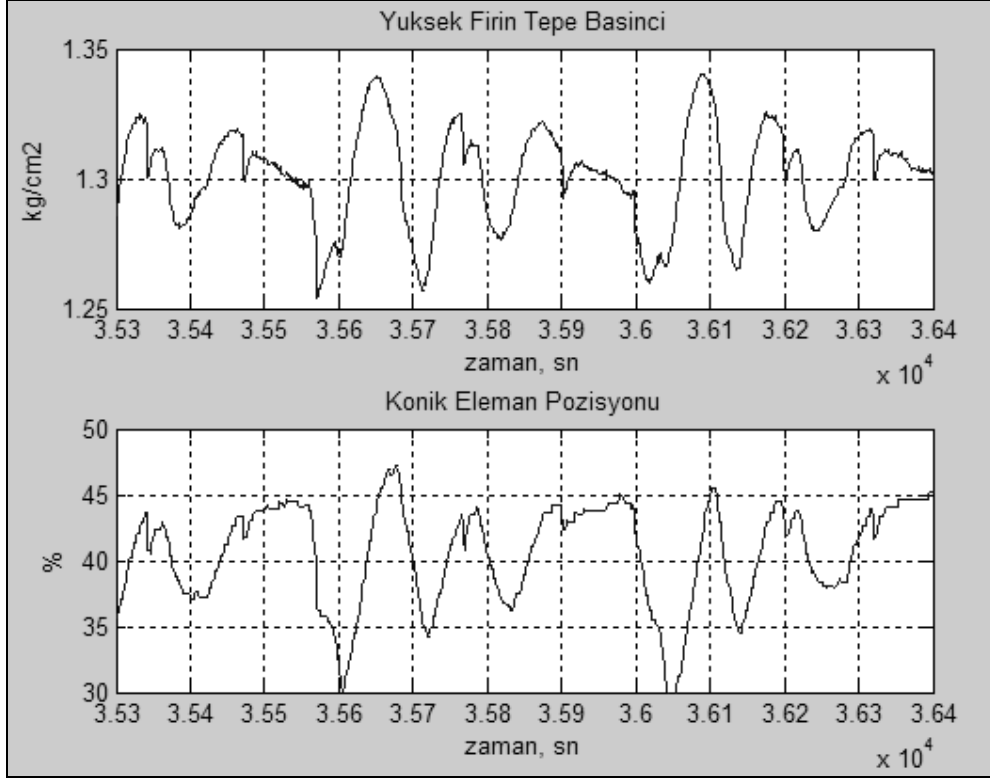
Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin giriş-çıkış değerleri arasındaki ilişki Şekil 4.2 ile daha iyi anlaşılabilir. Şekilde 35300. ve 36400. saniyeler arasındaki giriş-çıkış verileri görülmektedir. Şekilde 35300. saniyeden 35450. saniyeler arasında sistemin çıkış işareti olan tepe basıncı çok fazla salınım yapmamıştır. Buna göre sistemin giriş işareti olan konik elemanların pozisyonu da küçük değişimlerle basıncı dengelemeye çalışmıştır. 35400.

saniyeden sonra aniden düşüş gösteren basınca karşılık konik elemanların pozisyonu da tepki olarak küçülmüştür. 35500. saniyeden sonra da konik elemanların pozisyon yüzdesinin küçülmesi (gazın geçeceği boşlukları kapatması) basıncın artmasına sebep olmuş ve giriş-çıkış işaretlerinin etkileşimi bu şekilde devam etmiştir.



Şekil 4.1 Yüksek fırın tepe basıncı ve konik elemanların pozisyonu.

Şekil 4.1'deki yüksek fırın tepe basıncı değeri incelendiğinde, farklı zamanlarda, değişik set değerlerinin olduğu görülmektedir. Bu durum da sistemin değişik dinamik bölgelerde çalışabileceği anlamına gelmektedir. Bunu incelemek amacıyla, konik elemanlarla ilgili tanımlama işlemi, doğrusal ARX modeli ve doğrusal olmayan Hammerstein blok yaklaşımı ile, öncelikle yüksek fırın tepe basıncı değerinin ortalama olarak fazla değişmediği bölgede sonra da sistemden toplanan tüm verilerin bulunduğu bölgede yapılacaktır. Son olarak da tanımlanan modeller MPC ile kontrol edilerek elde edilen sonuçlar sistemden ölçülen giriş-çıkış verileri ile karşılaştırılacaktır.

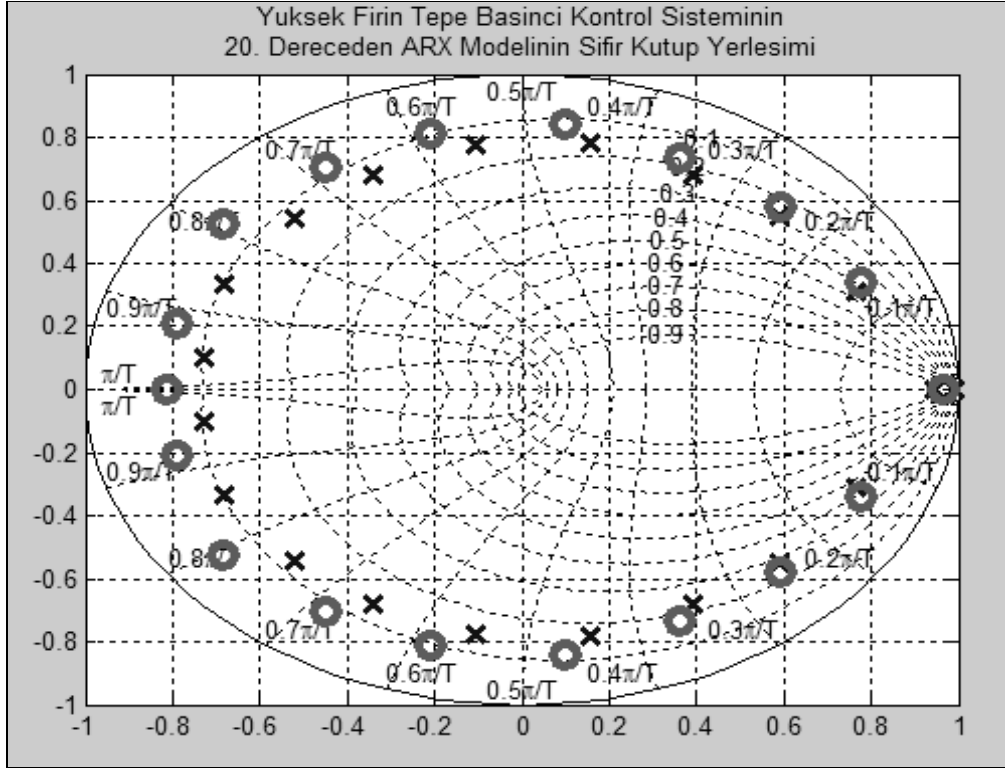


Şekil 4.2 Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin çalışması.

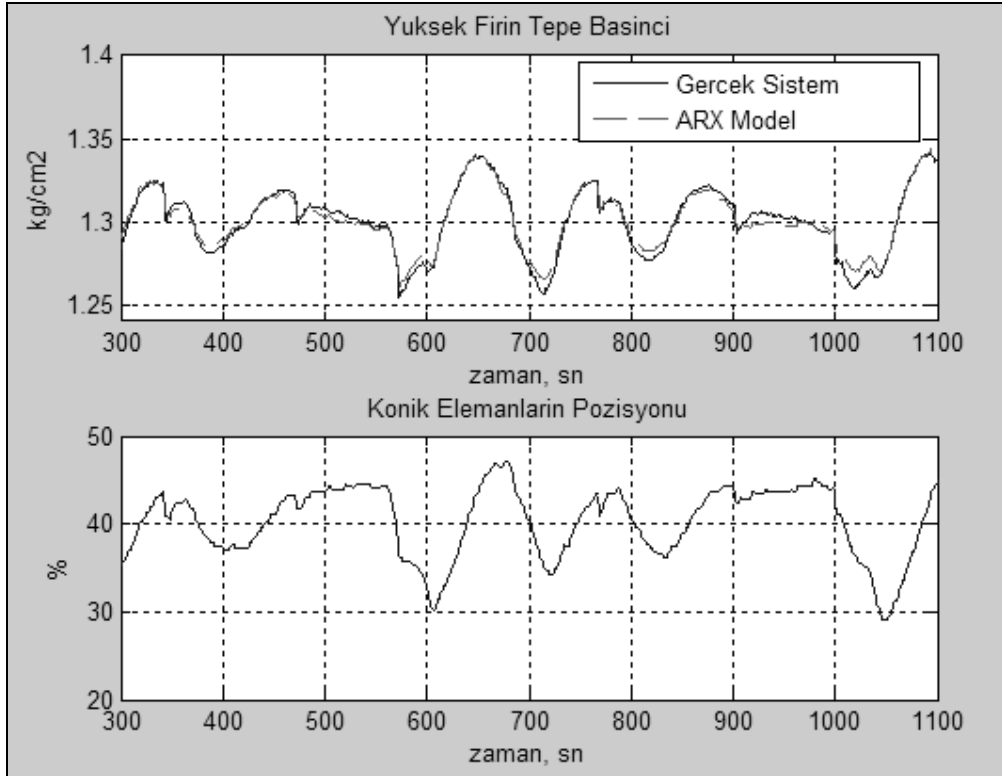
4.1.1 Yüksek Fırın Tepe Basıncı Kontrol Sisteminin Doğrusal ARX Modeli Yaklaşımı İle Modellenmesi

Bu bölümde öncelikle konik elemanların pozisyonları ve fırın tepe basıncı değerlerini kullanarak, yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi için en küçük kareler yöntemi ile ARX modeli oluşturulmuştur. Daha sonra tanımlanan modele sistemden alınan gerçek giriş değerleri uygulanması sonucunda elde edilen $\hat{y}_A(n)$ ile gerçek sistem çıkışı olan $y(n)$ işaretleri karşılaştırılmıştır.

Tanımlama işlemi öncelikle, yüksek fırın tepe basıncı değerinin ortalama olarak fazla değişmediği 35000 ve 42000. saniyeler arasında yapılmaktadır. Bu bölgede konik elemanlarla ilgili 20. dereceden ARX model oluşturulduğunda sıfır ve kutupların yerleşimi Şekil 4.3'deki gibi olmaktadır.



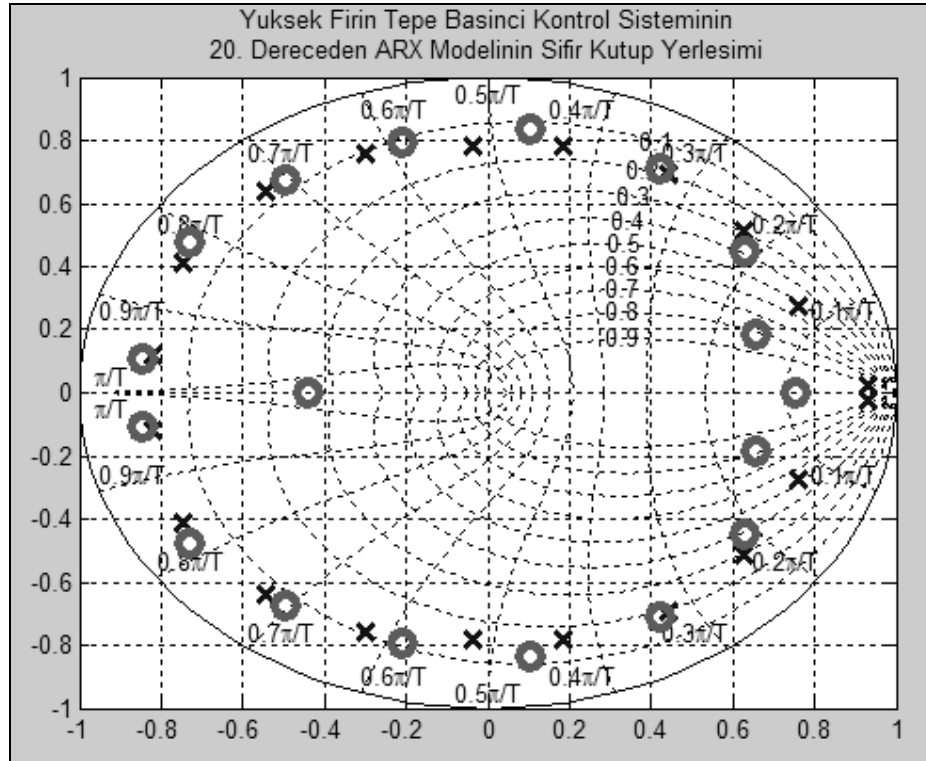
Şekil 4.3 Dar veri aralığında tanımlanan 20. dereceden ARX modelinin sıfır kutup yerleşimi.



Şekil 4.4 Dar veri aralığında tanımlanan 20. dereceden ARX modeli sonuçlarının gerçek sistem ile karşılaştırılması.

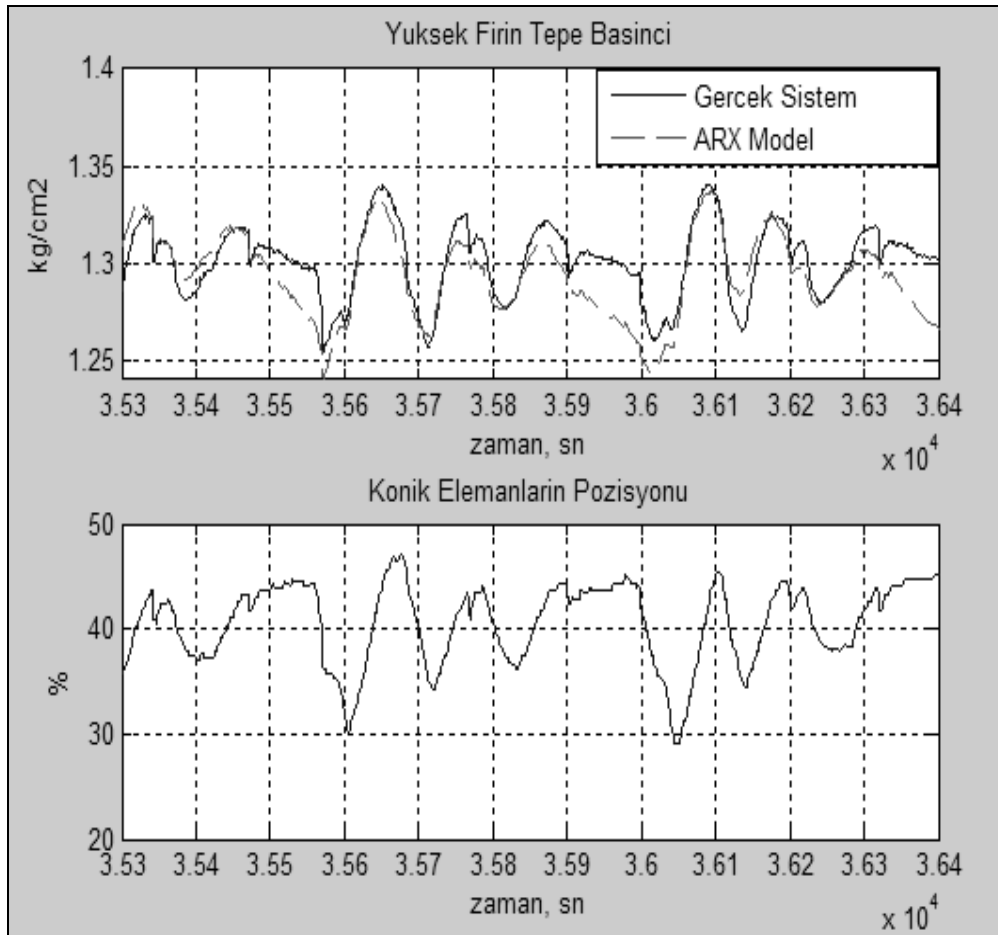
Tanımlanan bu modele, giriş olarak konik elemanların pozisyonları uygulandığında elde edilen fırın tepe basıncı, $y_A(n)$ ile sistemden ölçülen gerçek tepe basıncı, $y(n)$ 'in değerleri Şekil 4.4'teki grafikte karşılaştırılmaktadır. Grafik 35300. 36400. saniyeler arasındaki giriş-çıkış verilerini göstermektedir. Bu aralıkta $y_A(n)$ ve $y(n)$ arasındaki NMSE değeri 20. dereceden ARX model için 1.5012×10^{-5} 'dir. Şekil 4.4'teki iki işaretin benzerliği ve NMSE değerinin sıfıra çok yakın olması, konik elemanların bu bölgede doğrusal sistem tanımlama yöntemi olan ARX model yaklaşımı ile modellenebileceği anlamına gelmektedir. Bu da konik elemanların bu veri aralığında doğrusal davranış gösterdiğinin kabul edilebileceğini göstermektedir.

Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi, sistemden toplanan tüm veriler kullanılarak ARX model yaklaşımı ile tanımlandığında, elde edilen 20. dereceden ARX modelin sıfır kutup yerleşimi Şekil 4.5'te görülmektedir.



Şekil 4.5 Geniş veri aralığında tanımlanan 20. dereceden ARX modelin sıfır kutup yerleşimi.

Sıfır ve kutupları Şekil 4.5'te yer alan 20. dereceden ARX modele konik elemanların pozisyonları giriş olarak uygulandığında elde edilen $y_A^{\wedge}(n)$ ve sistemden ölçülen çıkış işareti $y(n)$ Şekil 4.6'da yer almaktadır. Bu model ile $y_A^{\wedge}(n)$ ve $y(n)$ arasındaki NMSE değeri 6.4698×10^{-4} olarak hesaplanmıştır. Şekil 4.6, geniş veri aralığında ARX modelin yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemini modellemedeki başarısının dar veri aralığına göre daha düşük olduğunu göstermektedir. Şekil 4.4 ve Şekil 4.6 incelendiğinde $y_A^{\wedge}(n)$ ve $y(n)$ arasındaki sapmaların Şekil 4.6'daki geniş veri aralığındaki modelleme sonuçlarında daha büyük olduğu görülmektedir. Bu da konik elemanlar sisteminin genel çalışmasının doğrusal olmayan özellik gösterdiğini ortaya çıkartmaktadır.

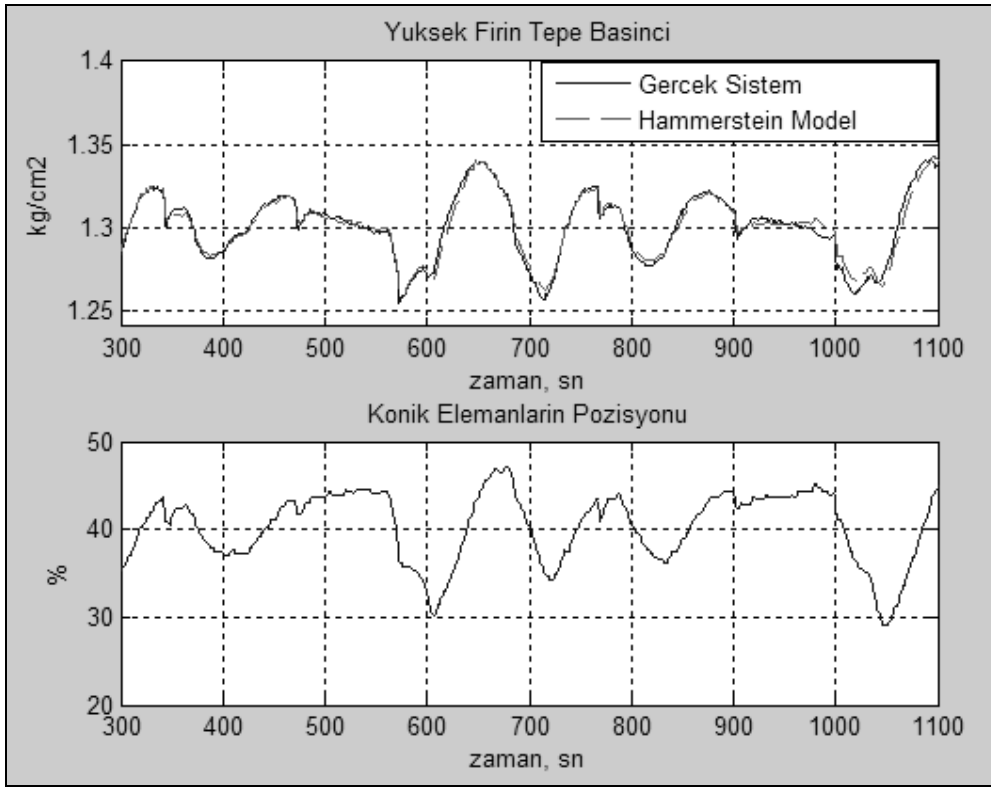


Şekil 4.6 Geniş veri aralığında tanımlanan 20. dereceden ARX modeli sonuçlarının gerçek sistem ile karşılaştırılması.

Tanımlanan matematiksel modelin doğrusal olmayan kısmı eşitlik (4.1)'de verilmiştir.

$$x(n) = -2.7559 \cdot 10^{-6} u^5(n) - 10^{-4} u^4(n) - 0.00125 u^3(n) + 0.003563 u^2(n) + u(n) \quad (4.1)$$

Eşitlik (4.1) ve Şekil 4.7'deki sıfır kutup gösterimi ile ifade edilen modele pozisyonu uygulandığında elde edilen çıkış $\hat{y}_H(n)$ ve gerçek sistemin çıkışı olan $y(n)$ arasındaki karesel hata değeri 1.2361×10^{-5} olmaktadır. $\hat{y}_H(n)$ ve $y(n)$ işaretleri Şekil 4.8'te yer almaktadır.



Şekil 4.8 Dar veri aralığında Hammerstein doğrusal olmayan blok yaklaşımıyla tanımlanan model sonuçlarının gerçek sistem ile karşılaştırılması.

35000. ve 42000. saniyeler arasındaki giriş-çıkış verileri kullanılarak, konik elemanlar sisteminin, ARX, ve Hammerstein model yaklaşımları ile modellenmesi sonucunda elde edilen NSME değerleri sırasıyla 1.5012×10^{-5} ve 1.2361×10^{-5} olarak hesaplanmıştır. Bu NMSE değerleri ve sırasıyla ARX ve Hammerstein yaklaşımları ile tanımlanan modellerin sonuçlarını içeren Şekil 4.4 ve Şekil 4.8'deki simülasyon sonucu hesaplanan çıkışlar ve gerçek sistem çıkışları arasında çok büyük benzerlikler bulunmaktadır. Aynı şekilde her iki

tanımlama yaklaşımı ile elde edilen NMSE değerlerinin benzerlikleri göze çarpmaktadır. Şekil 4.4, Şekil 4.8 ve NMSE değerleri incelendiğinde yüksek fırın tepe basınç kontrol sisteminin, 35300. ve 42000. saniyeler arasında doğrusal ARX model yaklaşımı veya doğrusal olmayan Hammerstein blok yaklaşımı ile modellenebileceğini göstermektedir.

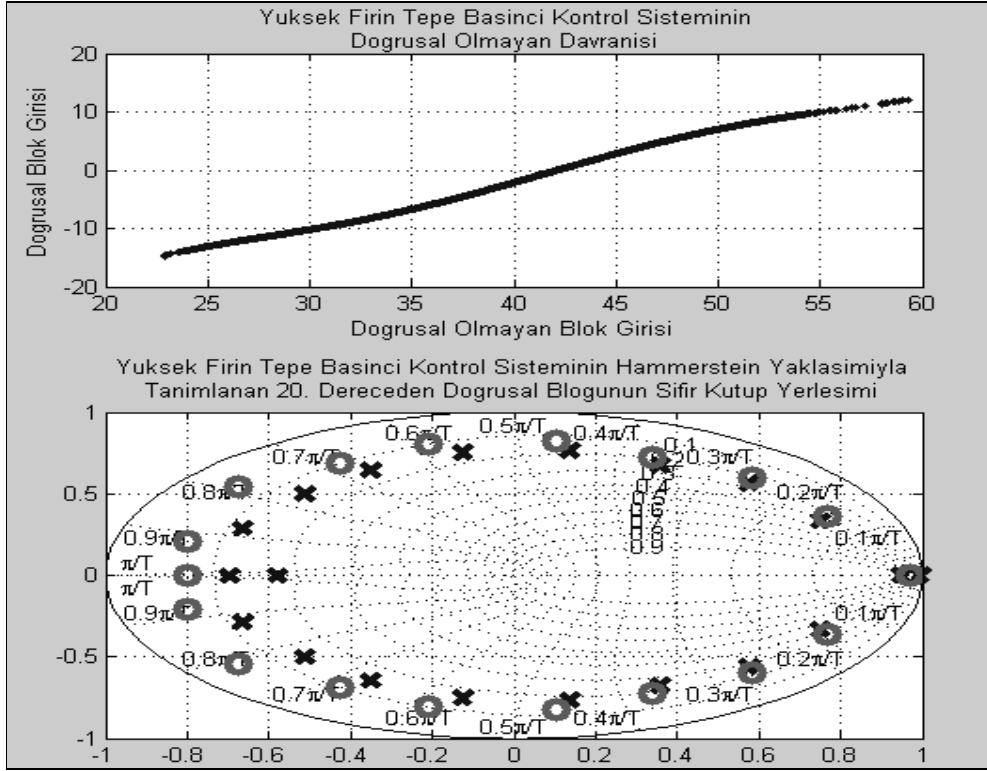
Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi, 0. ve 65535. saniyeler arasındaki veriler kullanılarak Hammerstein model yaklaşımı ile tanımlanmıştır. Oluşturulan modelin doğrusal bloğu 20. dereceden, doğrusal olmayan bloğu da 5. derecedendir. Parametreleri kestirilen doğrusal bloğu ifade eden sıfır kutup diyagramı Şekil 4.9'da, doğrusal olmayan bloğun matematiksel gösterimi de eşitlik (4.2)'de yer almaktadır. Şekil 4.9 ayrıca sistemin doğrusal olmayan davranışı ile ilgili de bilgi vermektedir.

$$x(n) = 2.3626 \cdot 10^{-6} u^5(n) + 1.5 \cdot 10^{-6} u^4(n) - 0.0016 u^3(n) - 0.0022 u^2(n) + u(n) \quad (4.2)$$

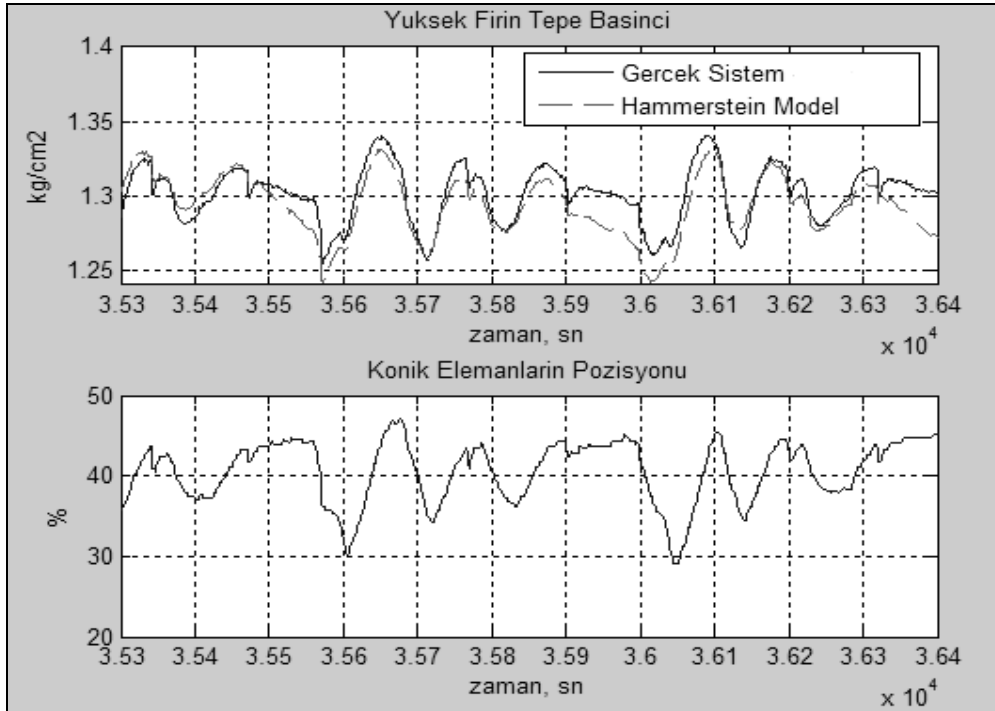
Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi ile ilgili olarak tanımlanan bu modele, giriş işareti olarak konik elemanların pozisyonları uygulandığında elde edilen çıkış $\hat{y}_H(n)$ ve gerçek sistemin çıkışı olan $y(n)$ arasındaki NMSE değeri 5.7107×10^{-4} olarak hesaplanmıştır. $\hat{y}_H(n)$ ve $y(n)$ işaretleri Şekil 4.10'da yer almaktadır. Şekil 4.10'da $\hat{y}_H(n)$ ve $y(n)$ işaretleri arasında bir miktar sapma olsa da bu sonuçlar Şekil 4.6'daki ARX model yaklaşımı ile tanımlanan sistem sonuçlarından çok daha başarılıdır. Doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler ile yapılan tanımlama işlemleri sonucunda hesaplanan NMSE değerleri arasındaki fark, geniş veri aralığında Hammerstein doğrusal olmayan blok yapısı yaklaşımının ARX model yaklaşımına göre daha başarılı olduğunu göstermektedir.

4.2 YÜKSEK FIRINDA MPC İLE TEPE BASINCI KONTROLÜ

Bölüm 3'te sistem tanımlama yöntemleri ve bu yöntemlerle oluşturulan modellerin MPC algoritması kullanılarak kontrol edilmesi hakkında uygulamalar yapılmıştı. Bu bölümde de yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin ARX model yaklaşımı ile tanımlanan doğrusal modeli ve Hammerstein blok yapısı yaklaşımı ile tanımlanan doğrusal olmayan modeli kullanılarak bu sisteme MPC ile kontrolü uygulanmaktadır.



Şekil 4.9 Yüksek fırın tepe basınç kontrol sisteminin geniş veri aralığı için doğrusalsızlığı ve Hammerstein doğrusal olmayan blok yaklaşımı ile tanımlanan doğrusal bloğunun sıfır kutup yerleşimi.



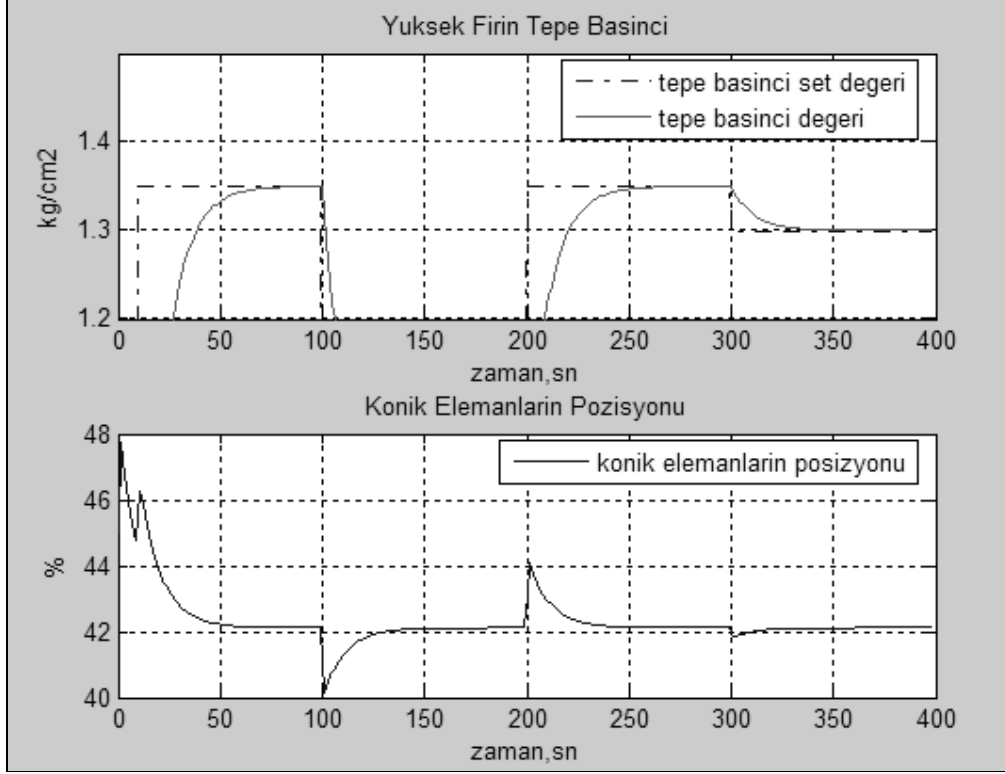
Şekil 4.10 Geniş veri aralığında Hammerstein doğrusal olmayan blok yaklaşımıyla tanımlanan model sonuçlarının gerçek sistem ile karşılaştırılması.

Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin giriş işareti konik elemanların yüzde olarak açıklığıdır. Giriş işaretinin biriminin % olması sisteme girilebilecek en küçük değerin 0, en büyük değerin de 100 olacağı anlamına gelmektedir. Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemine bu sınırların dışında başka bir işaret uygulanamaz. Sistemin çıkış işareti de kg/cm^2 cinsinden yüksek fırın tepe basıncıdır. Yüksek fırın tepe basıncı 0.900kg/cm^2 ile 1.65kg/cm^2 arasında olmalıdır. Tepe basıncı bu değerlerin altına düşerse, fırın içerisinde askıda kalan katı malzeme tutunamayarak hazneye düşecektir. Bu da tüyerlere sıvı maden dolmasına ve fırının duruşa geçmesine sebep olacaktır. Yüksek fırın tepe basıncının 1.7kg/cm^2 değerini aşması durumunda da fırın tepesinde bulunan 3 adet tahliye vanası Bölüm 2’de anlatıldığı sırası ile açılacak ve fazla basınç dışarı atılacaktır. Bunun sonucunda da yüksek fırın prosesinde düzensizlikler oluşacaktır.

Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin ve yüksek fırınların fiziksel özelliklerinden kaynaklanan giriş-çıkış değerlerindeki sınırlamalar, bu sistem için MPC tasarlanırken dikkate alınacaktır.

4.2.1 ARX Modele Dayalı MPC İle Tepe Basıncı Kontrolü

Bölüm 4.1.1’de yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi için ARX model yaklaşım ile 20. dereceden doğrusal bir transfer fonksiyonu oluşturulmuştu. Tanımlanan bu transfer fonksiyonu ve sistemle ilgili sınır koşulları kullanılarak bir MPC tasarlanmıştır. Tasarlanan denetleyici değişik değerlerdeki yüksek fırın tepe basıncı set değerleri için zorlanmıştır. Bu uygulamaya ait giriş-çıkış verileri Şekil 4.11’de yer almaktadır. Set değeri yükseldiğinde denetleyici, sistem çıkışı olan yüksek fırın tepe basıncı değeri ile set değeri arasındaki farkı algılayarak basıncın yükseltilmesi gerektiğine karar vermiş ve konik elemanlara kapama yönünde hareket vermiştir. Basınç istenilen değere yaklaştığında da konik elemanları normal seviyeye getirmiştir. Aynı şekilde set değeri düşürüldüğünde denetleyici, sistem çıkışı ile set değeri arasındaki farkı algılayarak basıncın düşürülmesi gerektiğine karar vermiş ve konik elemanlara açma yönünde hareket vermiştir. Bunun sonucunda yüksek fırın gazının yolunu açılmış ve basıncın düşmesini sağlamıştır.



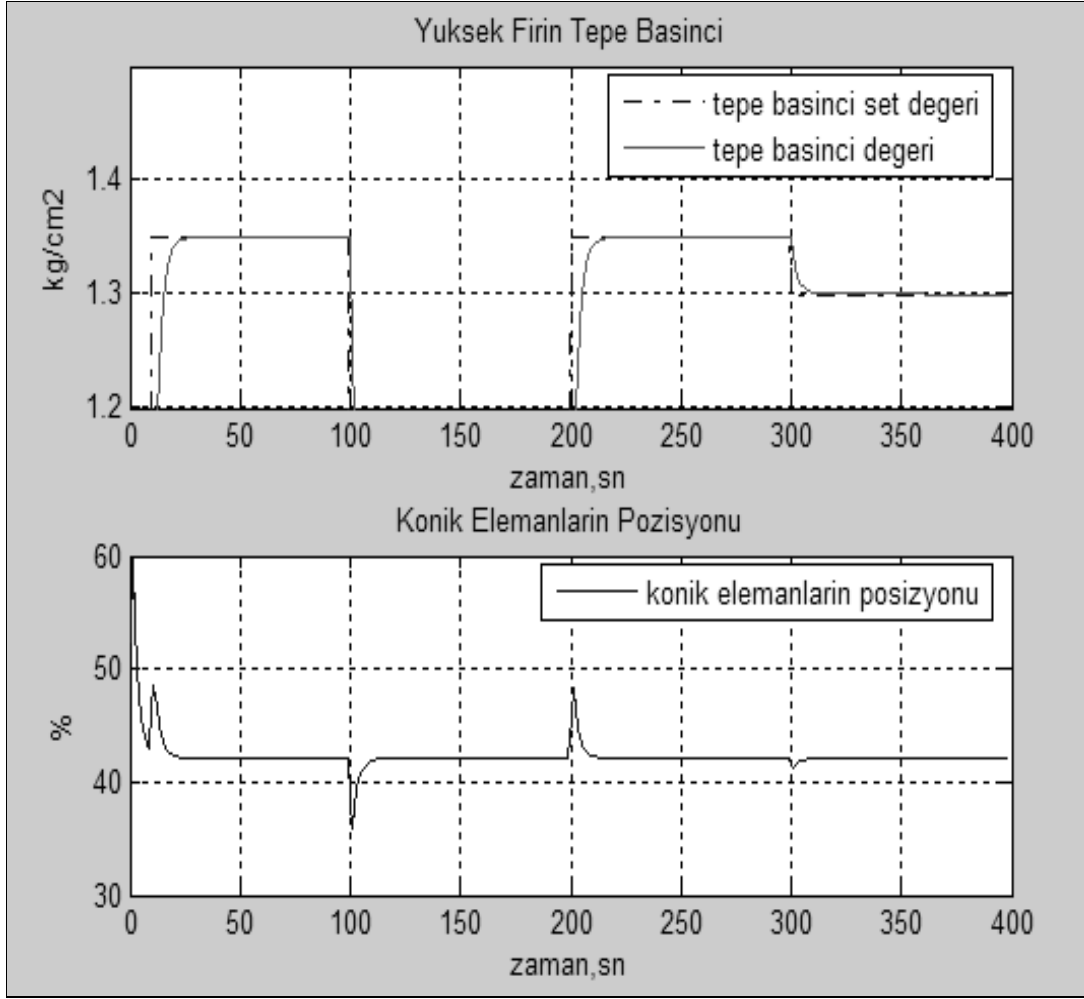
Şekil 4.11 Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi ARX modelinin MPC ile kontrolü (öngörü ufku = 60, kontrol ufku = 2).

4.2.2 Hammerstein Modele Dayalı MPC İle Tepe Basıncı Kontrolü

Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi doğrusal olmayan Hammerstein blok yapısı yaklaşımı ile doğrusal yaklaşım olan ARX model yapısına oranla daha doğru şekilde modellenebilmektedir. Bu da yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin doğrusal olmayan bir dinamik yapıya sahip olduğunu göstermektedir.

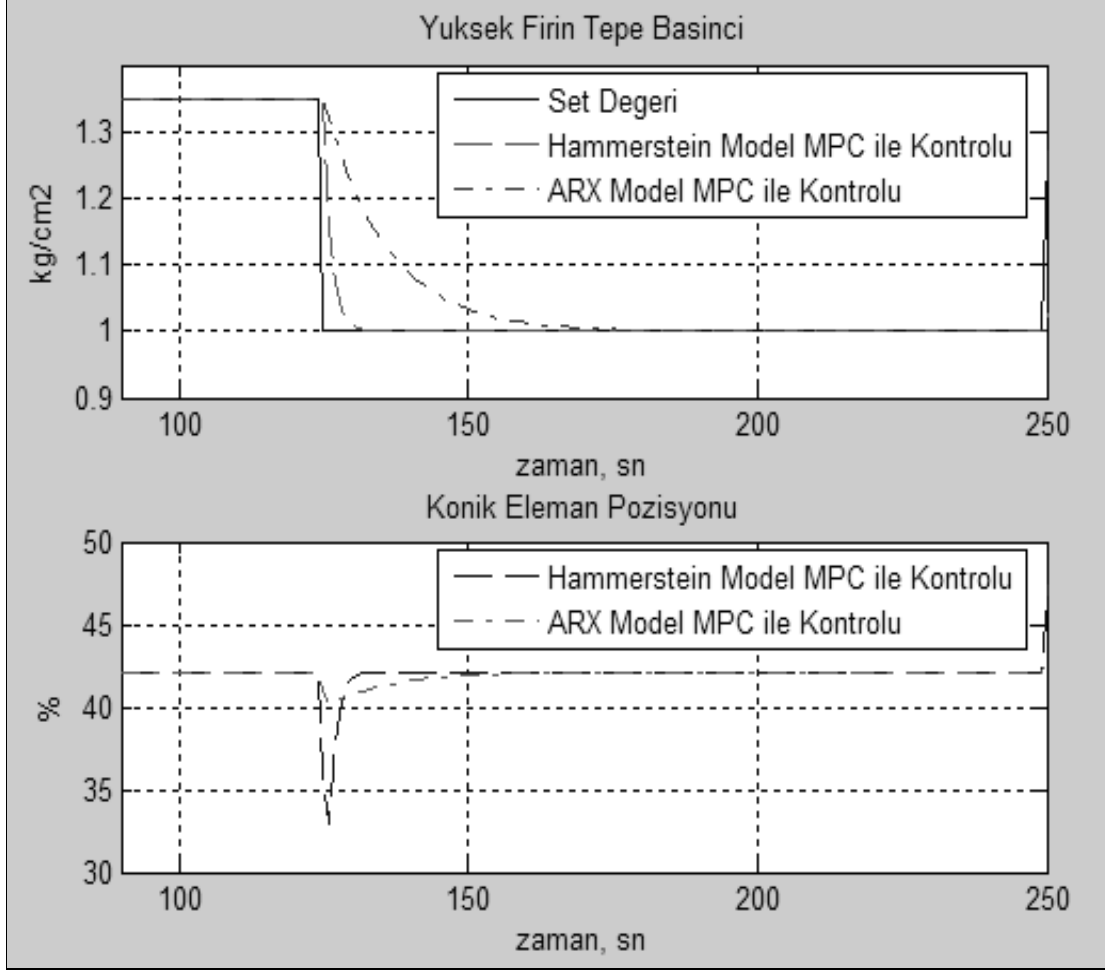
Bu uygulamada yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi için tanımlanmış olan ve doğrusal olmayan kısmı eşitlik (4.2)'de, doğrusal bloğu da Şekil 4.9'teki sıfır kutup diyagramı ile açıklanan modelin MPC ile kontrolü yapılmıştır.

Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin Hammerstein doğrusal olmayan blok yaklaşımı ile tanımlanan doğrusal olmayan modeli Bölüm 3'te anlatıldığı gibi MPC yöntemi ile kontrol edildiğinde elde edilen giriş-çıkış değerler Şekil 4.12'deki gibi olmaktadır. Denetleyici, set değerindeki değişikliklere, ARX modele dayalı denetleyicide olduğuna benzer şekilde tepkiler vermiştir.



Şekil 4.12 Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin Hammerstein doğrusal olmayan blok yapısına dayalı modelinin MPC ile kontrolü (öngörü ufku = 60, kontrol ufku = 2).

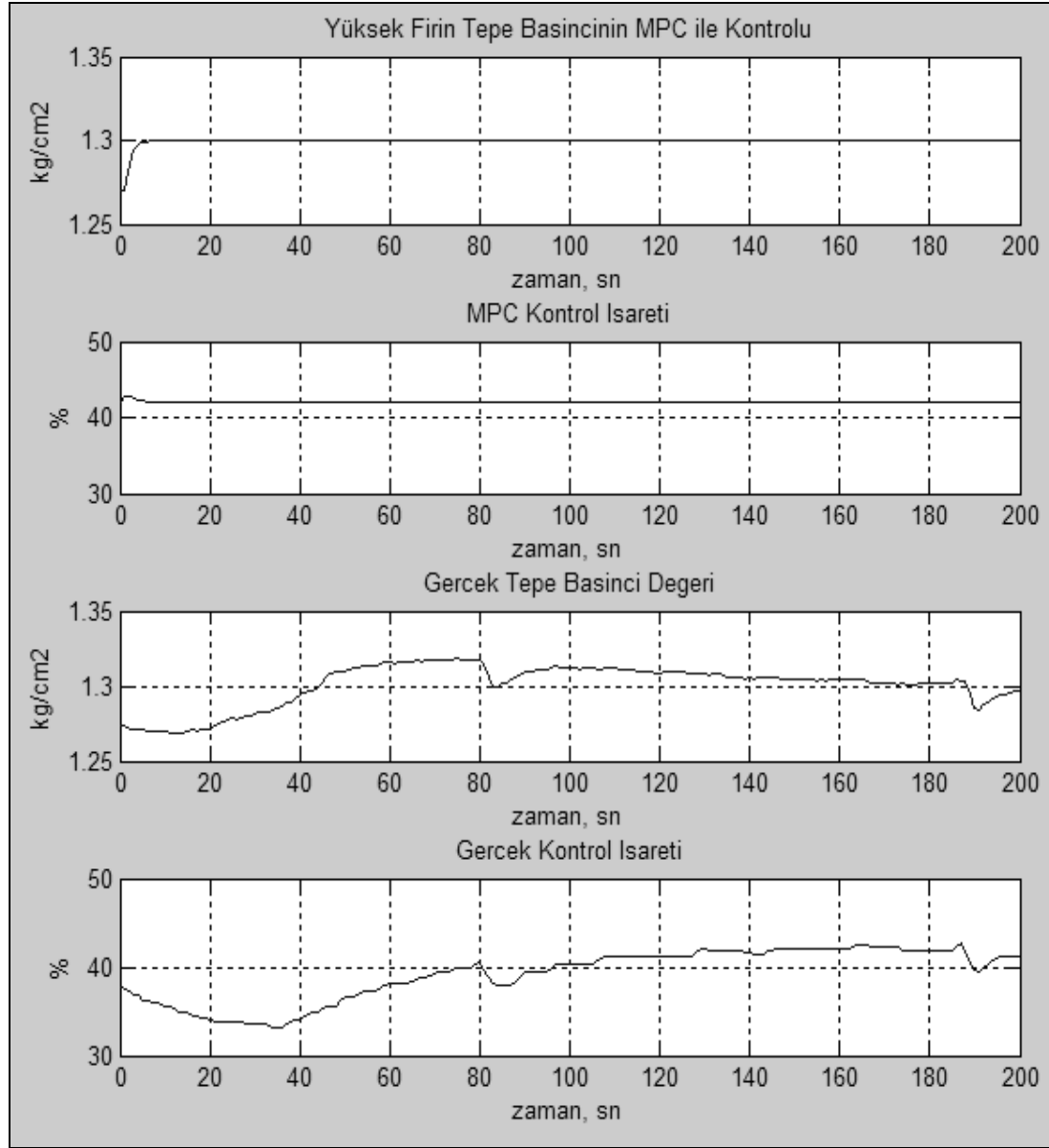
Şekil 4.13'te, ARX modele ve Hammerstein blok yapısına dayalı denetleyicilerin değişik set değerlerine karşı verdiği tepkiler karşılaştırılmaktadır. Şekle göre Hammerstein doğrusal olmayan blok yapısı yaklaşımı ile tanımlanan modele dayalı MPC, doğrusal ARX model yaklaşımı ile tanımlanan modele dayalı MPC'den daha başarılı bir kontrol sağlamaktadır. Her iki kontrol yaklaşımında da en yüksek aşım değerleri istenilen düzeydedir. Ancak yerleşme zamanları arasındaki fark doğrusal olmayan yaklaşıma göre tasarlanan model öngörümlü denetleyicinin üstünlüğünü göstermektedir.



Şekil 4.13 Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin ARX ve Hammerstein modellerinin MPC ile kontrolü (öngörü ufkü = 60, kontrol ufkü = 2).

Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi için tanımlanan Hammerstein modelinin MPC ile kontrolünü gerçek sistemdeki verilerle karşılaştırmak için sistemin giriş-çıkış verilerinin bir bölümünden yararlanılabilir. Bu amaçla yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminden alınan verilerden 34920. saniyeden 35060. saniyeler arasındaki giriş-çıkış değerleri incelenmiştir. Bu bölgede yüksek fırın tepe basıncı set değeri 1.3kg/cm^2 iken, ölçülen tepe basıncı değeri 1.27kg/cm^2 olmaktadır. Gerçek sistemde bulunan kontrolör, bu farkı değerlendirerek set değerini yakalamak amacıyla konik elemanların pozisyonlarını değiştirmiştir. Bu şekilde yaklaşık olarak 130 saniye sonra tepe basıncı istenilen değere ulaşmıştır. Aynı durum, yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemi Hammerstein modelini kontrol eden model öngörümlü denetleyici ile canlandırılmıştır. Bu amaçla, öncelikle basıncın set değeri 1.27kg/cm^2 yapılarak basıncın bu değere gelmesi sağlanmıştır. Basıncı 1.27kg/cm^2 değerinde sabitlendiğinde de basıncın set değeri 1.3kg/cm^2 'ye çıkartılmıştır. Set

değerindeki bu değişimin olduğu andan yaklaşık 29 saniye sonra basınç 1.3kg/cm^2 değerine ulaşmıştır. Buna göre Hammerstein doğrusal olmayan blok yapısı yaklaşımı ile tanımlanan modele dayalı model öngörümlü denetleyici, gerçek sistemde kullanılan kontrolöre göre daha başarılı bir kontrol sağlamıştır. Bu uygulamanın sonucunda elde edilen veriler Şekil 4.14’de yer almaktadır.



Şekil 4.14 Yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin Hammerstein doğrusal olmayan blok yapısı tabanlı MPC ile kontrolünün gerçek sistem ile karşılaştırılması (öngörü ufku = 60, kontrol ufku = 2).

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, doğrusal sistem tanımlama yöntemi olan ARX model yaklaşımı ile doğrusal olmayan sistem tanımlama yöntemi olan Hammerstein doğrusal olmayan blok yapısı yaklaşımı tabanlı model öngörümlü denetleyiciler. Teorik olarak tanımlanan bu yöntemler kullanılarak örnek olarak incelenen doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler modellenmiş ve yapılan modellemeler sonucunda elde edilen hata değerlerine göre hangi tanımlama yönteminin daha başarılı olduğu tespit edilmiştir. Bu örneklerin sonucunda doğrusal ARX model yaklaşımının, doğrusal sistemleri ihmal edilebilecek seviyedeki hatalarla modelleyebildiği sonucuna varılmıştır. ARX model yaklaşımı doğrusal olmayan sistemlerde de başarılı sonuçlar vermiştir. Ancak Hammerstein doğrusal olmayan blok yapısı yaklaşımı ile yapılan tanımlamalar doğrusal olmayan sistemlerde ARX model yapısı yaklaşımına göre daha başarılı olmuştur.

Doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemler kullanılarak matematiksel modelleri oluşturulan sistemler için model öngörümlü denetleyiciler tasarlanmıştır. Model öngörümlü denetleyicilerin doğrusal bir sistem olan DC servo motor kontrolündeki başarısı kutup ekleme yöntemi ile karşılaştırılmış ve model öngörümlü denetleyicinin bu sistem için daha uygun bir kontrol yöntemi olduğu gösterilmiştir. Buna ek olarak doğrusal olmayan örnek sistem için de doğrusal ve doğrusal olmayan model yapıları tabanlı model öngörümlü denetleyiciler tasarlanmıştır. Model öngörümlü denetleyicilerin doğrusal olmayan sistemleri de başarılı bir şekilde kontrol ettiği gözlemlenmiştir.

Literatürde çok az bulunan ve tanımlı bir matematiksel modeli bulunmayan yüksek fırın tepe gazı basıncının kontrol sistemi olan konik elemanlar pozisyon değişimine göre tepe basıncı değişimi, doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlar ile modellenmiştir. Yapılan modellemeler sonucundaki veriler, yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin en küçük

NMSE değeri ile doğrusal olmayan Hammerstein model yaklaşımı ile tanımlanabildiğini göstermiştir. Bu da sisteminin doğrusal olmayan bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

Tanımlama işlemlerinin sonunda yüksek fırın tepe basıncı kontrol sisteminin doğrusal ve doğrusal olmayan matematiksel modelleri kullanılarak, bu sistemi kontrol edebilecek model öngörümlü denetleyiciler tasarlanmıştır. Bu denetleyiciler ile yapılan simülasyonların sonucunda doğrusal olmayan model yapısı tabanlı model öngörümlü denetleyicinin, doğrusal model yapısı tabanlı model öngörümlü denetleyiciye göre yüksek fırın tepe basıncı kontrolünü daha başarılı bir şekilde yaptığı gösterilmiştir.

Çalışmada son olarak doğrusal olmayan model yapısı tabanlı model öngörümü denetleyicinin kontrol performansı, gerçek sistemden alınan veriler ile karşılaştırılmıştır. Alınan sonuçlar model öngörümlü denetleyicinin yüksek fırın tepe basıncı kontrol sistemini mevcut sistemden daha başarılı bir şekilde kontrol edebileceğini göstermektedir.

Yüksek fırın tepe basıncı kontrolü için bilgisayar simülasyonları kullanılarak ulaşılan sonuçların mevcut sistemde denenmesi gerekmektedir. Çünkü bilgisayar ortamında yapılan kontrol uygulamalarında, dış bozucu etkisi ihmal edilmiştir. Bu çalışmaya ek olarak yüksek tepe basıncı kontrol sisteminde dış bozucuların etkileri incelenebilir. Daha sonra tasarlanacak olan ve dış bozucu etkisini de göz önünde bulunduran model öngörümlü denetleyicilerin kontrol performansları, mevcut sistem verileri ile karşılaştırılabilir. Bu kıyaslama sonunda yüksek fırınlar tepe basıncı kontrol sistemi için model öngörümlü denetleyicilerin uygunluğu daha somut olarak gösterilebilir.

KAYNAKLAR

- Adachi S, Ogawa T and Konno R** (2002) A system identification method for linear regression model based on support vector machine, *Transactions of the Society of Instrument and Control Engineers*, 37: 1189-1191
- Akbulut H** (2001) Kok özelliklerinin yüksek fırın prosesine etkileri ve önemi. *1. Demir Çelik Sempozyumu Bildirileri*, 59: 532-540
- Allgöwer F and Zheng A** (2000) *Nonlinear model predictive control*. Birkhauser
- Bemporad A and Mosca E** (1998) Fulfilling hard constraints in uncertain linear systems by reference managing. *Automatica*, Vol. 34, No4 : 451-461
- Camacho E F and Bordons C** (2007) *Model Predictive Control*. 2nd ed., Springer
- Danforth G W** (1917) *An elementary outline of mechanical processes*. 2nd edition, The United States Naval Institute
- De Nicolao G** (1997) *System Identification: Problems and perspectives*. Dipartimento di Informatica e Sistemistica, Universiti di Pava, Pavia, Italy
- Eng B C, Kwee H M, Wern A T S and Yusof K M** (2006) *Formulation of model predictive control algorithm for nonlinear processes*. Project report, Universiti Teknologi Malaysia (Unpublished)
- Franklin G, Powell J D and Emami-Naeini A** (2002) *Feedback control of dynamic systems*. 4th edition, Prentice-Hall
- Fruzzetti K P, Palazoglu A and McDonald K A** (1996) Nonlinear model predictive control using Hammerstein models. *Journal of Process Control* Vol 7, No 1, pp 31-41
- Gomez J C and Enrique Baeyens** (2004) Identification of block-oriented nonlinear systems using orthonormal bases. *Journal of Process Control* 14: 685-697

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Hacioglu R and Williamson G A** (2003) Identification of Wiener systems using reduced complexity Volterra models. *IFAC-Symposium on System Identification 27-29 August 2003*, Rotterdam, Netherlands
- İnel İ** (1997) Teknoloji ve refrakter hammaddeler, 2. *Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, 16-17 Ekim 1997 İzmir
- Jastrebski J P** (1959) *Nature and Properties of Engineering Materials*. Wiley, New York
- Kotorovskii M M, Urumberglik N N and Chernikov V A** (1963) *Automation of the process of sintering agglomerate*. New York: Springer
- Ljung L** (1996) *System Identification: Theory For The User*. New Jersey: Prentice Hall
- Milankumar B** (2004) Nonlinear Model Predictive Control, M.Sc. Thesis (unpublished), Illinois Institute of Technology
- Özden Ü ve Gencer Z** (1982) Koklaşmayan Amasra ve Armutçuk kömürlerinin metalurjik kok üretiminde kullanılması imkanlarının pilot fabrika çapında araştırılması. *Maden Tetkik Arama Dergisi*, 99-100: 121-129
- Özdiñ T Ö** (2008) Akustik eko yok etme uygulamasında doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlar. Yüksek Lisans Tezi (yayımlanmamış), ZKU Fen Bilimleri Enstitüsü, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Zonguldak
- Qin S L and Badgwell T A** (2002) A survey of industrial model predictive control. *Control Engineering Practice*, 11: 733-764
- Rossiter J A** (2003) *Model based predictive control: a practical approach*. CRC Pres
- Sadrnezhaad S K, Ferdowsi A and Payab H** (2008) Mathematical model for a straight grate iron ore pellet induration process of industrial scale. *Computational Materials Science*, 44: 296-302
- Sanzol J A** (2001) Video feedback control of pulverized coal flow. M.Sc. Thesis (unpublished), Lulea University of Technology

KAYNAKLAR (devam ediyor)

- Strassburger J H** (1969) *Blast furnace-theory and practice*. Gordon and Breach Science Publishers
- Taghavi N and Sadr A** (2008) Piezoelectric Transducer Modeling With System Identification(SI) Method. *Proceedings of World Of Science, Engineering And Technology*, Volume 29 ISSN 1307-6884
- Turan A** (2001) Cüruf oranının yüksek fırın üretimine etkisi. 1. *Demir Çelik Sempozyumu Bildirileri*, 57: 520-524
- Wise B M and Ricker N L** (1990) The effect of biased regression on the identification of fir and arx models. (unpublished) *AICHE Annual Meeting*, November 12-16, 1990
- Yu L, Zhang J, Liao Y and Ding J** (2008) Parameter estimation error bounds for Hammerstein nonlinear finite impulsive response models. *Applied Mathematics and Computation*, 202: 472-480
- Yücelen T, Kaymakçı O ve Kurtulan S** (2006) Adaptive PI-D controller using Ziegler Nicholas based self-tuning method's parameters for programmable logic controllers. *Proceedings of 5th International Symposium on Intelligent Manufacturing Systems, Sakarya University, Department of Industrial Engineering*, May 29-31
- Yüksel İ** (2001) *Otomatik kontrol sistem dinamiği ve denetim sistemleri*. Uludağ Üniversitesi

ÖZGEÇMİŞ

Özgür ASLAN, 1984 yılında Zonguldak'ta doğdu. İlk ve orta öğrenimini Zonguldak'ta tamamladı. Zonguldak Atatürk Anadolu Listesi'nden mezun olduktan sonra 2002 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'ne girdi. 2006 yılında mezun olduktan sonra ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına girdi. 2006-2007 yılları arasında Kalekalıp firmasının insansız hava aracı üretiminde proje mühendisi olarak görev yaptı. 2007 yılından itibaren Ereğli Demir Çelik Fabrikalarında otomasyon mühendisi olarak görev yapmakta ve ZKÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda yüksek lisans programına devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres: Ereğli Demir Çelik Fabrikaları T.A.Ş.
Yüksek Fırımlar Müdürlüğü
Elektronik Otomasyon Başmühendisliği
Ereğli/ Zonguldak

Tel: (372) 329 50 76

E-posta: aslan.ozgur@gmail.com

Özgür ASLAN