İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

SİSTEM TANIMADA BULANIK MODEL YAPISINI VE PARAMETRELERİNİ BELİRLEYEN BİR YAZILIM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Müh. Ünal FİLİBELİ
(504021110)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 6 Mayıs 2005
Tezin Savunulduğu Tarih : 1 Haziran 2005

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

HAZİRAN 2005

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması boyunca katkılarını hiçbir zaman esirgemeyen ve beni her zaman destekleyip, çalışmalarımı yönlendiren hocam Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA'ya ve hocam Prof. Dr. İbrahim EKSİN'e, bilgilerini her zaman benimle paylaşan Araştırma Görevlisi Engin YEŞİL'e ve tüm hayatım boyunca bana verdikleri destek ve bana karşı duydukları güvenden ötürü aileme teşekkürü bir borç bilirim.

Mayıs 2005 Ünal FİLİBELİ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR v
TABLO LİSTESİ vi
ŞEKİL LİSTESİ vii
SEMBOL LİSTESİ ix
ÖZET x
SUMMARY xi

1. GİRİŞ 1
1.1. Sistem Tanıma 1
1.2. Sistem Tanıma Aşamaları 2
1.3. Çalışmanın Bölümleri 4

2. EN KÜÇÜK KARELER YÖNTEMİ 5

3. BULANIK SİSTEM TANIMA 9
3.1. Bulanık Mantık 9
3.2. Bulanık Mantık İle İlgili Temel Kavramlar 9
3.3. Bulanık Sistemler 11
3.3.1. Takagi-Sugeno(T-S) Tip bulanık model Genel Yapısı 12
3.3.1.1. Birinci Dereceden T-S Tip Bulanık Model 14
3.3.1.2. ARX Yapılı T-S Tip Bulanık Model 15
3.4. T-S Tip Bulanık Model Parametrelerinin Kestirimi 16

4. MODELBUL PROGRAMI 18
4.1. Statik Sistemlerin Modelbul Programı İle Modellenmesi 19
4.2. Dinamik Sistemlerin Modelbul Programı İle Modellenmesi 20
4.2.1. Manuel Seçeneği İle Model Oluşturma 20
4.2.2. Otomatik Seçeneği İle Model Oluşturma 21
4.3. Doğrusal Dinamik Sistemler İçin Basamak Yanıtı Testi 21

5. UYGULAMALAR 23
5.1. Uygulama 1 23
5.1.1. Giriş-Çıkış Verilerinin Toplanması 24
5.1.2. Bulanık Modelin Modelbul Programı İle Oluşturulması 24
5.1.3. Sonuç 29
5.2. Uygulama 2 29
5.2.1. Giriş-Çıkış Verilerinin Toplanması 30
5.2.2. Bulanık Modelin Modelbul Programı İle Belirlenmesi 31

5.2.3. Sistemin Klasik ARX Modelinin Oluşturulması 34
5.2.4. Sonuç 35
5.3. Uygulama 3 35
5.3.1. Giriş-Çıkış Verilerinin Toplanması 35
5.3.2. Bulanık Modelin Modelbul Programı İle Belirlenmesi 36
5.3.3. Sistemin Klasik ARX Modelinin Oluşturulması 41
5.3.4. Sonuç 42
5.4. Uygulama 4 43
5.4.1. Giriş-Çıkış Verilerinin Toplanması 43
5.4.2. Bulanık Modelin Modelbul Programı İle Belirlenmesi 44
5.4.3. Sistemin Klasik ARX Modelinin Oluşturulması 49
5.4.4. Sonuç 50
5.5. Uygulama 5 51
5.5.1. Giriş-Çıkış Verilerinin Toplanması 51
5.5.2. Bulanık Modelin Modelbul Programı İle Belirlenmesi 53
5.5.3. Sistemin Klasik ARX Modelinin Oluşturulması 57
5.5.4. Klasik ARX Modelin Modelbul Verilerine Göre Oluşturulması 60
5.5.5. Sonuç 63

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 64

KAYNAKLAR 65

EK A 67

EK B 68

EK C - Program kodlarını içeren disket

ÖZGEÇMİŞ 69

KISALTMALAR

ARX : Autoregressive with exogenous input
MSE : Mean Square Error
T-S : Takagi-Sugeno
RMSE : Root Mean Square Error

TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 5.1. Farklı kural sayıları için hesaplanan RMSE değerleri …… 29

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Giriş-çıkış verilerine göre doğru yaklaşımı..... 8
Şekil 3.1 : Gaussian(a) ve gbell(b) tip üyelik fonksiyonları..... 10
Şekil 3.2 : S-Tipi(c) ve üçgen(d) tip üyelik fonksiyonları..... 10
Şekil 3.3 : Bulanık bir sistemin genel yapısı..... 12
Şekil 3.4 : x-y girişlerinin üyelik derecelerinin grafiksel gösterimi..... 13
Şekil 3.5 : Doğrusal olmayan bir fonksiyonun T-S tip bulanık bir model ile ifadesi..... 15
Şekil 4.1 : Modelbul programı için temel akış diyagramı..... 18
Şekil 4.2 : Sistemin giriş-çıkış verileri ile sistemin basamak cevabının alınması..... 22
Şekil 4.3 : Seçilen en iyi modelin basamak yanıtının alınması..... 22
Şekil 5.1 : Sisteme ait giriş(u) ve çıkış(y) verileri..... 24
Şekil 5.2 : Bulanık model giriş değişkeni u için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 25
Şekil 5.3 : Eğitim verileri için sistem ve model yanıtları..... 26
Şekil 5.4 : Bulanık model giriş değişkeni u için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 27
Şekil 5.5 : Eğitim verileri için sistem ve model yanıtları..... 28
Şekil 5.6 : Sisteme ait giriş-çıkış verilerinin SİMULİNK ortamında toplanması..... 30
Şekil 5.7 : Giriş-u(k) ve çıkış-y(k) verileri..... 31
Şekil 5.8 : Bulanık model giriş değişkeni u(k-3) için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 32
Şekil 5.9 : Bulanık model giriş değişkeni y(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 32
Şekil 5.10 : Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları..... 33
Şekil 5.11 : Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları 34
Şekil 5.12 : Sisteme ait giriş-çıkış verilerinin SİMULİNK ortamında toplanması..... 36
Şekil 5.13 : Giriş-u(k) ve çıkış-y(k) verileri..... 36
Şekil 5.14 : Bulanık model giriş değişkeni u(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 37
Şekil 5.15 : Bulanık model giriş değişkeni u(k-2) için tanımlanan üyelik fonksiyonu 37
Şekil 5.16 : Bulanık model giriş değişkeni y(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 38
Şekil 5.17 : Bulanık model giriş değişkeni y(k-2) için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 38
Şekil 5.18 : Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları..... 41
Şekil 5.19 : Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları..... 42

Şekil 5.20 **:** Sisteme ait giriş-çıkış verilerinin toplanması..... 43
Şekil 5.21 **:** Giriş-u(k) ve çıkış-y(k) verileri..... 44
Şekil 5.22 **:** Bulanık model giriş değişkeni u(k-2) için tanımlanan üyelik fonksiyonu 45
Şekil 5.23 **:** Bulanık model giriş değişkeni u(k-3) için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 45
Şekil 5.24 **:** Bulanık model giriş değişkeni y(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 46
Şekil 5.25 **:** Bulanık model giriş değişkeni y(k-2) için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 46
Şekil 5.26 **:** Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları 49
Şekil 5.27 **:** Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları..... 50
Şekil 5.28 **:** Tek tank sıvı seviye sistemi..... 51
Şekil 5.29 **:** Sisteme ait giriş-çıkış verilerinin SİMULİNK ortamında toplanması..... 52
Şekil 5.30 **:** Giriş-u(k) ve çıkış-y(k) verileri 53
Şekil 5.31 **:** Bulanık model giriş değişkeni u(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 54
Şekil 5.32 **:** Bulanık model giriş değişkeni y(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu..... 54
Şekil 5.33 **:** Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları 55
Şekil 5.34 **:** Sistem ve model çıkış verilerinin SİMULİNK ortamında karşılaştırılması 56
Şekil 5.35 **:** Eğitim verilerine sistem ve bulanık modelin cevabı..... 56
Şekil 5.36 **:** Farklı giriş verileri için sistem ve bulanık modelin cevabı 57
Şekil 5.37 **:** Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları..... 58
Şekil 5.38 **:** Eğitim verilerine sistem ve klasik ARX modelin cevabı..... 59
Şekil 5.39 **:** Farklı giriş verileri için sistem ve klasik ARX modelin cevabı 60
Şekil 5.40 **:** Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları..... 61
Şekil 5.41 **:** Eğitim verilerine sistem ve klasik ARX modelin cevabı..... 62
Şekil 5.42 **:** Farklı giriş verileri için sistem ve klasik ARX modelin cevabı..... 63

SEMBOL LİSTESİ

θ	: Parametre vektörü
$\mathbf{k}$	: Zaman değişkeni
$X_1, X_2,\ldots,X_n$	: Regresörler
$\mathbf{y}$	: Sistem çıkışı
$\mathbf{X}$	: Regresyon matrisi
$\mathbf{y(k-n)}$	: n zaman birimi önceki model çıkışı
$\mathbf{u(k-m)}$	: m zaman birimi önceki model girişi
$\mathbf{n, m}$	: Modelin mertebesini belirten tamsayılar
$\mathbf{f}$	: Doğrusal, vektörel bir durum geçiş fonksiyonu
$\Phi\mathbf{(M)}$	: M tane regresyon matrisinden oluşan MxN boyutunda bir matris
$\mathbf{Y(M)}$	: M tane çıkış verisinden oluşan Mx1 boyutundaki çıkış matrisi
$\mathbf{M}$	: Sistemden toplanan veri sayısı
ϵ_i	: i. giriş verisi için hata ifadesi
$\mathbf{E(M)}$	: M tane hata değerinden oluşan Mx1 boyutundaki hata matrisi
$\mathbf{V(\theta)}$	: Parametrelere bağlı olarak tanımlanan hata ifadesi
$A_{i1}, A_{i2}\ldots,A_{in}$	: Öncül ifadelerdeki bulanık kümeler
$\mathbf{R}$	: Kural sayısı
μ_{Aij}	: $\Re\rightarrow[0,1]$ olmak üzere, A_{ij} üyelik fonksiyonu
$\mu_{Aij}(x_j)$	: j. giriş değerinin üyelik derecesi
$\mathbf{n}$	: Model giriş değişkeni sayısı
$\mu_i(x)$	: i. kuralın ateşleme derecesi
$B_{i1}, B_{i2}\ldots,B_{im}$	: Öncül ifadelerdeki bulanık kümeler
$\xi_i(x)$	: Kural ateşleme derecesinin tüm ateşleme dereceleri toplamına oranı
c^{-ij}	: Gaussian fonksiyonunun merkezi
σ^{-ij}	: Gaussian fonksiyonunun yayılım oranı
K_i	: i. kural
y_m	: Model çıkışı

SİSTEM TANIMADA BULANIK MODEL YAPISINI VE PARAMETRELERİNİ BELİRLEYEN BİR YAZILIM

ÖZET

Bulanık mantık öncelikle yapısı bilinmeyen sistemlerin dilsel önermeler yardımıyla kontrolü için önerilmiş olmakla birlikte, ilerleyen senelerde bu gibi sistemlerin tanımlanması ve modellenmesi amacıyla da kullanılmıştır. 1985 yılında Takagi ve Sugeno, bulanık kontrolör için bir arama algoritması önermiş, bu çalışmalarını bulanık modellemeye genelleştirmişlerdir.

Doğrusal dinamik sistemlerin modellenmesinde kullanılan ve model çıkış değerinin sistemin önceki giriş ve çıkış değerlerine bağlı olarak belirlendiği ARX model yapısı, belirli çalışma aralıkları için doğrusal olmayan sistemlere yaklaşım için de kullanılabilir. Fakat gerçek hayattaki gibi çoğunluğu doğrusal olmayan özellikteki dinamik sistemlerin modellenmesinde yeterli olmaz.

Bulanık mantık, bu şekilde klasik olarak modellenemeyen veya modellenmesinde güçlükler bulunan sistemlerin tanımlanması için kullanışlı ve etkin bir yöntemdir. Doğrusal olmayan sistemler parça parça doğrusal olarak kabul edilebildiğinden, doğrusal olmayan bir fonksiyon doğrusal fonksiyonlar ve bulanık önermeler yardımıyla ifade edilebilmektedir. Benzer şekilde bulanık önermelerin çıkış fonksiyonlarının ARX yapısında seçilmesiyle, uygun bulanık model yapısı kullanılarak doğrusal olmayan dinamik sistemlerin de yaklaşık olarak ifade edilmesi mümkündür.

Bulanık modelleme çalışmalarında karşılaşılan temel güçlüklerden biri, bulanık sistem yapılarının karmaşıklığı nedeniyle klasik tanıma yöntemleriyle parametre kestirim işleminin matematiksel olarak oldukça fazla işlem yükü getirmesidir. Diğer yandan, sistem dinamiklerini ifade edebilecek doğru model yapısının da tüm diğer parametrik yöntemlerde olduğu gibi önceden belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çalışmada, doğrusal ya da doğrusal olmayan, statik ya da dinamik sistemlerin sadece giriş-çıkış verilerine dayanarak, en uygun yapıdaki bulanık modelinin oluşturulmasını sağlayan MATLAB tabanlı “Modelbul” programı geliştirilmiştir.

A SOFTWARE FOR DETERMINATION OF STRUCTURE AND PARAMETERS OF FUZZY MODELS IN SYSTEM IDENTIFICATION

ABSTRACT

Fuzzy logic is firstly developed for controlling of complex and poorly understood systems and later on it is also used for identification and modelling of such systems. In 1985, Takagi and Sugeno were depeloped a search algorithm for fuzzy controllers and then they have expanded their study to fuzzy modelling.

ARX model structure that is used for modelling of linear dynamic systems by using past input and output values of the system, may also be used for approximating nonlinear systems in their normal range of operation. However, in many cases systems are required to operate in regions in the state space where linear models such as ARX do not give satisfactory results.

Fuzzy logic is an effective way of modelling when such difficulties are encountered in conventional modelling methods. Since, the nonlinear systems may be investigated as partially linear in small ranges of operation; it is possible to approximate the nonlinear functions by using linear functions in fuzzy rule-based model structures. Similarly, after the structure of the model is determined, approximating the nonlinear dynamic systems by using ARX type of output functions in a proper fuzzy rule-based model also gives satisfactory results.

Model structure selection and parameter identification are two main items with regard to fuzzy and also other parametric models. The structure determines the flexibility of the model in approximation mappings. The parameters are then estimated to fit the data at hand. Fuzzy rule-based systems have some complexities because of the underlying mechanisms such as fuzzification, fuzzy inference and defuzzification processes in their structure. This complexity causes extra effort of calculations for obtaining the accurate values of the parameters by using conventional identification methods. On the other hand, it is not always clear which variables should be used as inputs to the model for complex systems.

In this study, a MATLAB based program “Modelbul” is developed for easy constructing of fuzzy models of the systems with respect to the input-output data on the hand. “Modelbul” program allows modelling of linear or nonlinear static systems with the required number of fuzzy rules. For the linear or nonlinear dynamic systems, “Modelbul” program determines the most suitable model structure to fit the data first and then, it tunes the model parameters with respect to Least Squares Method.

1. GİRİŞ

1.1. Sistem Tanıma

Sistem teorisinin temel konularından biri olan sistem tanıma, sistemden deneysel olarak elde edilen giriş ve çıkış verilerine dayanarak sistemin matematiksel modelinin elde edilmesidir.

Gerçek sistemlerin matematiksel modelinin geliştirilmesi, pek çok mühendislik ve bilim dalının temel konularından birisidir. Modeller, sistem davranışının analizi için, sistemin iç yapısındaki mekanizmanın daha iyi anlaşılabilmesi için, simülasyon amacı ile, yeni yöntemlerin geliştirilmesi için ya da kontrolör tasarımı için kullanılırlar.

Geleneksel olarak modelleme, sistemin doğasını ve davranışını anlamak ve bunu matematiksel olarak ifade etmek olarak görülür. Bu yaklaşım genelde "beyaz kutu" (fiziksel ya da mekanik) modelleme olarak isimlendirilir. Ne var ki, gerçek sistemlerin iç yapısının kabul edilebilir derecede anlaşılabilmesi oldukça zordur. Eğer sistem karmaşık, anlaşılması zor ve iç yapısı bilinmeyen bir sistemse fiziksel modelleme neredeyse imkansız hale gelmektedir. Model yapısı belirlense dahi parametreler için uygun değerlerin saptanması gerekmektedir. Tanıma yöntemlerinin çoğunluğu doğrusal sistemler için geliştirilmiştir. Gerçek hayattaki gibi çoğu doğrusal olmayan yapıdaki sistemlere doğrusal modeller vasıtasıyla sadece lokal olarak yaklaşılabilir.

Modelleme için kullanılan bir başka yaklaşım ise incelenen sisteme ait genel fonksiyon yaklaşımcı olarak kullanılabilecek bir "kara kutu" yapısı oluşturmaktır. Eğer sistem verileri mevcut ise, sisteme has çok fazla bilgiye sahip olmadan kara kutu modeller geliştirilebilir. Fakat, elde edilen modellerin yapıları ve parametreleri fiziksel olarak bir anlam taşımaz. Bu tip modeller sistem davranışını anlamak, daha

büyük ya da daha küçük ölçekteki sistemleri modellemek için kullanılamaz; yalnızca sayısal benzetim için kullanılırlar.

Bazı modelleme teknikleri de beyaz kutu ve kara kutu yaklaşımlarının üstünlüklerinin birleştirilmesini esas alır. Sistemin bilinen kısımlarının fiziksel bilgiler kullanılarak modellendiği, belirsiz ya da az bilinen kısımlarının ise sistem verilerine göre kara kutu yaklaşımı ile ifade edildiği bu tip metodlar melez, yarı mekanik ya da "gri kutu" modelleme olarak isimlendirilir.

Modelleme yöntemlerinin çoğunun dezavantajı mühendislerin veya sistem operatörlerinin, kesin olmayan ve nitel yapıya sahip bilgilerinin modelleme esnasında etkin kulanılamamasıdır. İnsan, belirsizlikler altında dahi karmaşık işlerle başa çıkabilir. İnsana ait bu özellikler akıllı modelleme ve kontrol yöntemleri geliştirmek için kullanılabilir. Bulanık modelleme ve kontrol insan bilgisini kullanan tekniklere tipik bir örnektir.

1.2. Sistem Tanıma Aşamaları

Sistem tanıma, aşağıda sıralanmış 4 temel aşamadan oluşur:

1. Sistemin Giriş-Çıkış Verilerinin Toplanması
2. Model yapısının seçimi
3. Model parametrelerinin kestirimi
4. Model yapısının ve parametrelerin uygunluğunun testi

Tanınacak sisteme uygulanacak işaretler, sistem tanımada çok büyük öneme sahiptir. Giriş işareti, sistemin tüm modlarını uyarabilecek şekilde seçilip, uygun örnekleme zamanı ile uygulanmalıdır.

Sisteme ait fiziksel bilgilerden yararlanarak ya da tahminler yapılarak bir model yapısı seçilir. Bu fiziksel bilgiler ve tahminler, sistemin derecesi, ya da sistemin doğrusal olup olmadığı bilgilerinden oluşmaktadır.

Doğrusal regresyon, en temel parametrik model tipidir [1]. Model yapısı aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$y(k) = \theta^T X(k) = [\theta_1 X_1 + \theta_2 X_2 + \ldots + \theta_n X_n] \qquad (1.1)$$

Bu eşitlikte,

X(k)	Bilinen fonksiyonlar veya değer dizileri(regresyon matrisi),
$X_1, X_2,\ldots,X_n$	Regresörler,
θ	Bilinmeyen parametre vektörü,
y(k)	Sistem çıkışı,
k	Zaman değişkenidir.

Regresyon matrisi, sisteme ait önceki giriş ve çıkış değerleri ile oluşturulduğunda ortaya çıkan ve doğrusal dinamik sistemlerin modellenmesinde kullanılan model yapısı, ARX(AutoRegressive with eXogenous input) model olarak isimlendirilir. ARX model genel gösterimi aşağıdaki şekilde ifade edilir:

$$y(k) = f(y(k-1), y(k-2),\ldots,y(k-n), u(k-1), u(k-2),\ldots,u(k-m)) \quad (1.2)$$

Bu eşitlikte,

y(k-1), y(k-2),…,y(k-n)	Modele ait önceki çıkışlar,
u(k-1), u(k-2),…,u(k-m)	Modele ait önceki girişler,
n, m	Modelin mertebesini belirten tamsayılar,
f(.)	Doğrusal, vektörel bir durum geçiş fonksiyonudur.

Uygun giriş-çıkış verileri toplanıp, model seçimi yapıldıktan sonra model parametreleri, seçilen bir tanıma yöntemine göre kestirilir. Sistemi en düşük hata ile ifade edecek model parametrelerinin hesabına dayanan En Küçük Kareler Yöntemi, sık kullanılan bir tanıma metodudur.

Elde edilen modelin, sistemin uygun bir modeli olup olmadığını anlamak için sistem ve modelin basamak yanıtlarının karşılaştırılması, farklı giriş değerleri için sistem ve model çıkışların karşılaştırılması şeklinde testler yapılır. Eğer model sistemi istenilen doğrulukta ifade edemiyorsa, farklı bir model yapısı seçilerek, uygun model bulunana kadar işleme devam edilir.

1.3. Çalışmanın Bölümleri

Bu tez çalışması kapsamında sistemlerin bulanık olarak modellenmesi ele alınmıştır.

2. Bölümde, klasik sistemde model parametrelerinin kestirimi için kullanılan bir tanıma yöntemi olan En Küçük Kareler Yöntemi anlatılmıştır.

3. Bölümde, bulanık sistemler incelenerek, Takagi-Sugeno tip bulanık sistemlerin matematiksel olarak ifade edilmesi ve çıkış parametrelerinin En Küçük Kareler Yöntemiyle hesaplanması üzerinde durulmuştur.

4. Bölümde ise statik sistemler için istenen kural sayısında, dinamik sistemler için ise istenen giriş değişkeni sayısındaki en iyi modeli oluşturan 'Modelbul' programı anlatılmıştır.

5. Bölümde, seçilen farklı yapıdaki sistemlerin 'Modelbul' programı vasıtasıyla elde edilen bulanık modelleri test edilerek, aynı sistemlerin MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla elde edilen klasik ARX modellerinin karşılaştırması yapılmıştır.

2. EN KÜÇÜK KARELER YÖNTEMİ

En genel tanıma yöntemlerinden biri olan En Küçük Kareler Yöntemi gerçek sistemi en düşük hata payı ile ifade edebilecek model parametrelerinin kestirimi için kullanılmaktadır.

Eşitlik 2.1'deki temel doğrusal regresyon modeli üzerinden yöntem elde edilip [3], ilerleyen bölümlerde bulanık model parametrelerinin kestirimine temel teşkil edecektir.

$$y = x_1\theta_1 + x_2\theta_2 + \ldots + x_N\theta_N \tag{2.1}$$

Bu eşitlikte,

$\theta_1, \theta_2, \ldots, \theta_N$ Model parametreleri,

$x_1, x_2, \ldots, x_N$ Model girişleridir.

Eşitlik 2.1'deki parametreler ile girişler ayrı ayrı yazıldığında sistem modeli aşağıdaki formu alır:

$$f(x|\theta) = \theta^T x \tag{2.2}$$

Burada,

$$\theta = [\theta_1, \theta_2, \theta_3, \ldots, \theta_N]^T \tag{2.3}$$

$$x = [x_1, x_2, x_3, \ldots, x_N]^T \tag{2.4}$$

şeklinde Nx1 boyutunda matrisler olup, x matrisi genelde "regresyon matrisi" olarak da isimlendirilir.

Sistemden $i=1,2,\ldots,M$ tane giriş-çıkış (x^i(Nx1), y^i(1x1)) verisi toplanmış olsun. Φ(M), M tane regresyon matrisinden oluşan MxN boyutunda bir matris; Y(M) ise M tane çıkış verisinden oluşan Mx1 boyutunda bir matris olarak Eşitlik 2.5 ve Eşitlik 2.6'daki gibi tanımlansın.

$$\Phi[M] = \begin{bmatrix} (x^1)^T \\ (x^2)^T \\ \vdots \\ (x^M)^T \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

$$Y[M] = [\, y^1, y^2, \ldots, y^M \,]^T \tag{2.6}$$

Her i=1,2,…,M verisi için gerçek sistem çıkışı ve model çıkışı arasındaki fark(hata) değeri Eşitlik 2.7'deki gibi tanımlansın:

$$\epsilon_i = y^i - (x^i)^T\theta \tag{2.7}$$

$$E(M) = [\epsilon_1, \epsilon_2, \ldots, \epsilon_M,]^T \tag{2.8}$$

olmak üzere,

$$E = Y - \Phi\theta \tag{2.9}$$

Model parametrelerine(θ) göre sisteme yaklaşımın ne kadar başarılı olduğunun ölçütü olarak V(θ), Eşitlik 2.10'daki gibi tanımlansın:

$$V(\theta) = \frac{1}{2} E^T E \tag{2.10}$$

Eşitlik 2.9'daki E değeri, hata ifadesi V(θ)'da yerine konulduğunda aşağıdaki denklem elde edilir:

$$2V = E^T E = Y^T Y - Y^T\Phi\theta - \theta^T\Phi^T Y + \theta^T\Phi^T\Phi\theta \tag{2.11}$$

Bu eşitliğin sağ tarafına " $Y^T\Phi(\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^T Y$ " ifadesi Eşitlik 2.12'deki gibi eklenip-çıkarılsın.

$$\begin{aligned} 2V = {} & Y^T Y - Y^T\Phi\theta - \theta^T\Phi^T Y + \theta^T\Phi^T\Phi\theta \\ & + Y^T\Phi(\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^T Y - Y^T\Phi(\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^T Y \end{aligned} \tag{2.12}$$

Bu eşitlik parametre vektörü(θ)'ne göre düzenlenirse aşağıdaki denklem elde edilir:

$$2V = Y^T(1 - \Phi(\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^T)Y + (\theta - (\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^TY)^T\Phi^T\Phi(\theta - (\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^TY) \quad (2.13)$$

Eşitlik 2.13'ün minimum değeri alması yani sistem çıkışı ve model çıkışı arasındaki hatanın en küçük olması için Eşitlik 2.14'ün sağlanması gerekir.

$$\theta - (\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^TY = 0 \quad (2.14)$$

Sonuç olarak, En Küçük Kareler Yöntemi ile parametre kestirim işlemi aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir:

$$\theta = (\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^TY \quad (2.15)$$

Örnek 2.1

$$\left\{\left(\begin{bmatrix}1\\1\end{bmatrix},1\right),\left(\begin{bmatrix}2\\1\end{bmatrix},1\right),\left(\begin{bmatrix}3\\1\end{bmatrix},3\right)\right\} \quad (2.16)$$

Yukarıdaki giriş(x_1,x_2) ve çıkış(y) verileri toplanmış sistemi, $y = x_1\theta_1 + x_2\theta_2$ yapısındaki parametrik model ile ifade edebilmek için en uygun parametreler(θ_1,θ_2) En Küçük Kareler yöntemi ile belirlenebilir.

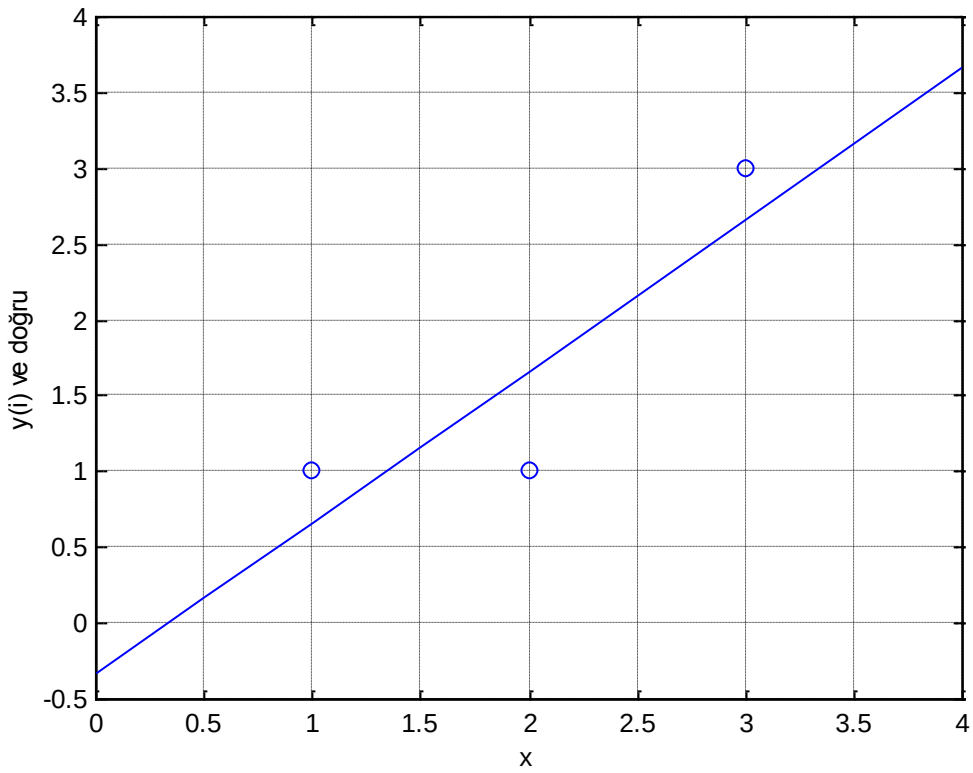
$$\Phi = \begin{bmatrix}1 & 1\\ 2 & 1\\ 3 & 1\end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$Y = \begin{bmatrix}1\\ 1\\ 3\end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$\theta = (\Phi^T\Phi)^{-1}\Phi^TY = \left(\begin{bmatrix}14 & 6\\ 6 & 3\end{bmatrix}\right)^{-1}\begin{bmatrix}12\\ 5\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}1\\ -\frac{1}{3}\end{bmatrix} \quad (2.19)$$

$$y = x_1 - \frac{1}{3} x_2 \tag{2.20}$$

İncelenen giriş-çıkış verilerine göre En Küçük Kareler Yöntemi ile yapılan doğru yaklaşımı Şekil 2.1'deki gibi elde edilir.



Şekil 2.1: Giriş-çıkış verilerine göre doğru yaklaşımı

3. BULANIK SİSTEM TANIMA

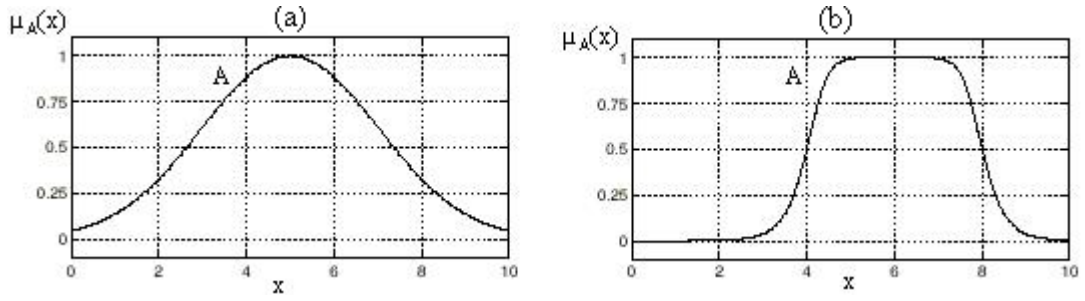
3.1. Bulanık Mantık

Bulanık mantık, klasik Boole mantığının bir üst uygulamasıdır. Bulanık mantık, "tamamen doğru" ve "tamamen yanlış" doğruluk değerleri arasında "kısmi doğruluk" yaklaşımını getirmiştir. Bulanık mantık ile ilgili ilk çalışma, 1965 yılında Lotfi A. Zadeh'in "Bulanık Kümeler" isimli makalesidir [4]. Zadeh klasik kontrol teorisinin kesinliğe çok önem verdiğini, bu nedenle karmaşık sistemlerin ele alınmasında güçlükler yaşandığını savunmakta idi. Zadeh, 1965 yılındaki bu çalışmasından sonra, bulanık algoritmalar, ve bulanık kontrol kavramını açıklayan makaleler yayınlamıştır [5, 6]. 1970'ler gerçek sistemler için bulanık kontrolörlerin yapıldığı senelerdir. 1974'te Mamdani ve Assilian bulanık kontrolörler için temel çerçeveyi oluşturmuşlar [7] ve bir buhar makinesini kontrol etmişlerdir. 1980 yılında Sugeno, Japonya'daki ilk bulanık kontrol uygulamasını gerçekleştirmiştir.

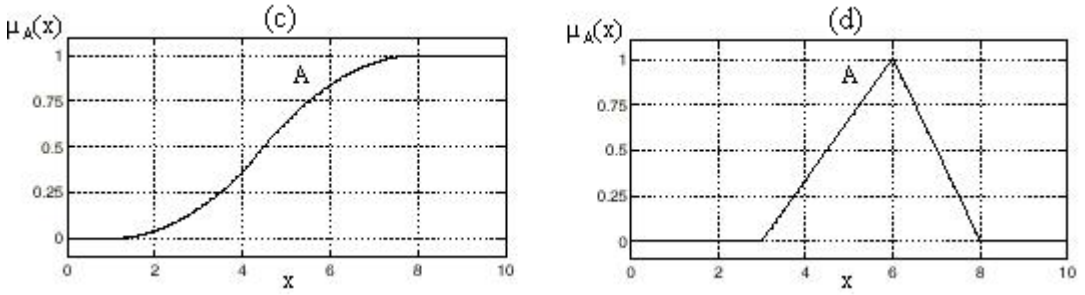
3.2. Bulanık Mantık İle İlgili Temel Kavramlar

Bulanık mantığın getirdiği kısmi doğruluk, "doğru" olarak adlandırılan bulanık alt kümeye, kısmi yanlışlık ise "yanlış" olarak adlandırılan alt kümeye ait olmanın bir derecesidir. Örnek olarak Boole mantığında "su 50 derecedir" önermesi, suyun 50 dereceden farklı her sıcaklık değeri için 0 ("yanlış"), sadece 50 derecede 1 ("doğru") değerini alır. Bulanık mantıkta, suyun "sıcak" olması ile "50 derecede" olması belirtildiğinde, 30 derecedeki bir su ne tam "sıcak" (doğru), ne de tam "sıcak değildir" (yanlıştır).

Bir "x" değişkeninin, bulanık bir "A" kümesine ait olmasının derecesini belirleyen fonksiyona "üyelik fonksiyonu", bu fonksiyonun tanımladığı değere de "üyelik derecesi" denir ve $\mu_A(x)$ ile gösterilir. Şekil 3.1 ve 3.2'de farklı tipteki üyelik fonksiyonu örnekleri verilmiştir.



Şekil 3.1: Gauss(a) ve gbell(b) tip üyelik fonksiyonları



Şekil 3.2: S-Tipi(c) ve üçgen(d) tip üyelik fonksiyonları

Belirgin düşüncede eşitlik veya eşitsizlik, bulanık mantıkta [0,1] aralığında bir üyelik derecesi ile temsil edilir. Bu değerlendirme şekli bulanık mantığın başarısındaki önemli bir etkendir. Çünkü bulanık mantık, "doğru" ile "yanlış" arasında sonsuz sayıda "kısmi doğru veya yanlış" değerini de içerir ve değerlendirmeye alır.

"x sıcaktır" biçiminde tanımlanan cümlelere "önerme" adı verilir. Önermeler tek bir değişkene bağlı olabileceği gibi birden fazla sayıda değişkene ve kümeye sahip olabilir. Örnek olarak "su sıcaklığı yüksek VE hava sıcaklığı yüksek" ifadesi iki bulanık değişken ve bir bulanık kümeyi içermektedir. Önermelerdeki değişkenleri birleştiren VE operatörü yerine çarpım(Π) veya min kullanılır. Bir önceki ifade genelleştirilerek elde edilen, "x_1 A_1'dir VE x_2 A_2'dir" önermesinin $\mu_A(x)$ doğruluk derecesi, VE operatörü olarak min seçildiğinde, önermeyi oluşturan her bir hipotezin üyelik derecelerinin en küçüğüdür ve aşağıdaki şekilde gösterilir:

$$\mu_A(x) = |\ x_1,\ A_1\text{'dir VE } x_2,\ A_2\text{'dir}\ | = \mu_{A1}(x_1) \wedge \mu_{A2}(x_2) \qquad (3.1)$$

Öncül önermelerdeki değişkenler Eşitlik 3.1'deki gibi VE operatörüyle birleştirilebildiği gibi VEYA operatörüyle de birleştirilebilmektedir.

3.3. Bulanık Sistemler

Bulanık sistemlerde, sisteme ait uzman bilgileri EĞER - O HALDE kuralları ile ifade edilir. Genel format olarak,

$$\text{EĞER } <\text{öncül önerme}> \text{ O HALDE } <\text{sonuç önerme}> \tag{3.2}$$

şeklinde ifade edilen kurallardaki öncül önerme,

$$x_1, A_{i1} \text{ ve } x_2, A_{i2} \text{ ve,…,ve } x_n, A_{in} \tag{3.3}$$

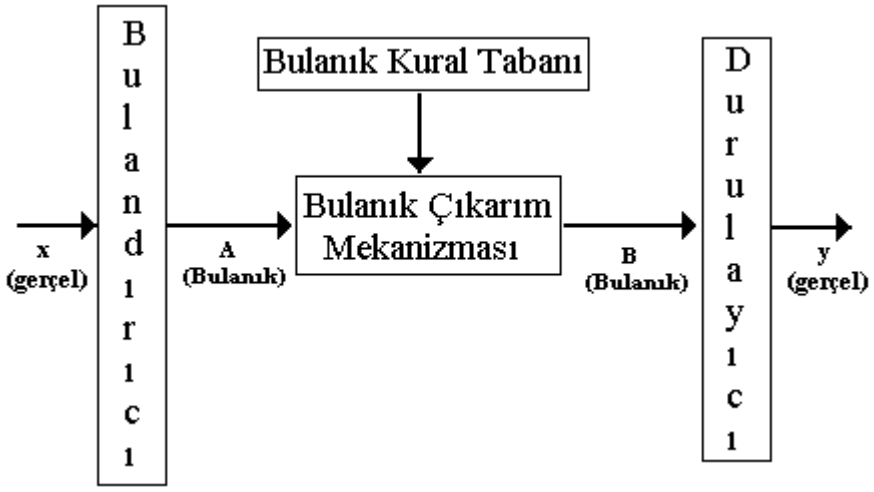
yapısındadır [12]. Burada x 'ler ($x_1, x_2,\ldots,x_n$) giriş değişkenlerini, A'lar ($A_{i1},\ldots,A_{in}$) ise bu değişkenler için tanımlanmış olan bulanık kümeleri ifade eden dilsel değişkenleri göstermektedir.

Bulanık mantıkta öncül önerme bulanık olurken, sonuç önermesinin yapısına bağlı olarak 2 ana tip bulanık model yapısı mevcuttur [8]:

1. Mamdani (dilsel) Tip bulanık model : Öncül ve sonuç önermelerinin ikisi de bulanık önermelerdir. Örnek olarak "EĞER araç hızı ÇOK ise O HALDE frenleme ÇOK" verilebilir.

2. Takagi-Sugeno Tip bulanık model : Öncül önerme bulanık, sonuç önermesi ise bir fonksiyondur. Bu fonksiyon genellikle doğrusaldır ve değişkenleri öncül ifadedeki değişkenlerdir. Örnek olarak "EĞER araç hızı ÇOK ise O HALDE frenleme=0.2x" verilebilir.

Bulanık bir sisteme ait genel yapı Şekil 3.3'teki gibi ifade edilebilir. Burada giriş değerlerini bulanık bir küme haline getiren bulandırıcı, kuralların yer aldığı kural tabanı, bu kurallardan nasıl bir çıkarım yapılacağını belirleyen çıkarım mekanizması ve sonuçta elde edilen bulanık kümeyi gerçel bir değere çeviren durulayıcı görülmektedir.



Şekil 3.3: Bulanık bir sistemin genel yapısı

Bulanık sistem tanıma için birçok parametre vardır. Bu kadar çok değişken parametrenin varlığı bulanık sistem tanımayı esnek hale getirirken, aynı zamanda da karmaşıklaştırmaktadır. Bu sebepten bazı değişkenlerin başlangıçta belirlenmesi gerekir. Bu çalışma kapsamında Takagi-Sugeno tip bulanık modelleme ele alınmıştır. Ayrıca kuralların öncül kısımlarında yer alan değişkenler VE operatörü ile birleştirilmiştir. VE operatörü olarak kullanılan çarpım, min işlemine göre daha yumuşak bir geçiş sağladığından bu çalışmada tercih edilmiştir. Giriş değişkenleri için Gauss tip üyelik fonksiyonları kullanılmış ve durulama yöntemi olarak da Ağırlık Merkezi metodu seçilmiştir.

Takagi-Sugeno tip modelleme ilk olarak fonksiyon tanımlamada kullanılmıştır [2]. Takagi-Sugeno tip model ile doğrusal olmayan bir fonksiyonun, doğrusal fonksiyonlar ve bulanık önermeler yardımıyla yaklaşık olarak ifade edilmesi mümkündür.

3.3.1. Takagi-Sugeno(T-S) Tip Bulanık Model Genel Yapısı

T-S tip bulanık model kural tabanı genel olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir [2]:

$\mathbf{K_i}$: EĞER x_1, A_{i1} ve x_2, A_{i2} ve,…,ve x_n, A_{in} ise, O HALDE (3.4)

$$y_i=g_i(x)=a_{i,0}+a_{i,1}\,x_1+\cdots+a_{i,n}\,x_n \qquad i=1,2,\ldots,R$$

R tane kuraldan oluşan bu yapıda x 'ler (x_1, x_2,…,x_n) giriş değişkenleri, A'lar (A_{i1}, A_{i2}…,A_{in}) öncül ifadelerdeki bulanık kümeler, y_i 'ler de kural çıkışlarıdır.

Durulama yöntemi olarak "Ağırlık Merkezi" alındığında model çıkışı,

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{R} g_i(x)\mu_i(x)}{\sum_{i=1}^{R} \mu_i(x)} \tag{3.5}$$

olarak hesaplanır. Burada, kuralı ateşleme derecesi olan $\mu_i(x)$ değeri, VE operatörü olarak çarpım işlemi seçildiğinde, i. kural için Eşitlik 3.6'daki gibi hesaplanır:

$$\mu_i(x) = \prod_{j=1}^{n} \mu_{Aij}(x_j) \tag{3.6}$$

Bu eşitlikte,

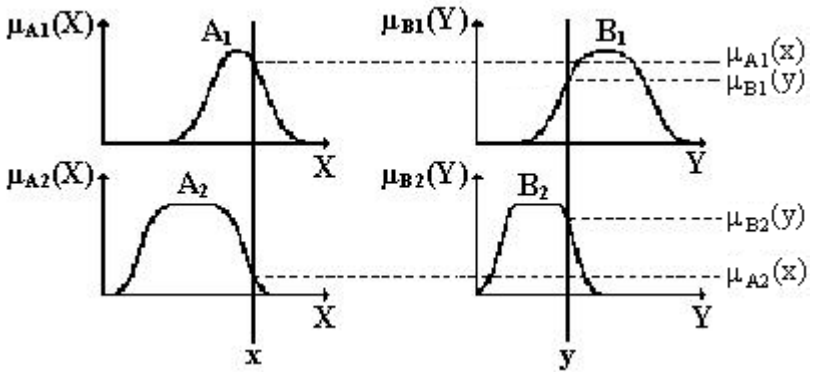
i=1,2,…,R	Kural sayısı,
j=1,2,…,n	Model giriş değişkeni sayısı,
$\mu_{Aij}(x_j)$	$\Re \rightarrow [0,1]$ olmak üzere, j. giriş değerinin üyelik derecesidir.

Örnek 3.1

K_1 : EĞER x, A_1 ve y, B_1 ise, O HALDE $g_1 = p_1x + q_1y + r_1$ (3.7)

K_2 : EĞER x, A_2 ve y, B_2 ise, O HALDE $g_2 = p_2x + q_2y + r_2$ (3.8)

Yukarıdaki 2 kural ile tanıtılan T-S tip bulanık sisteme x ve y girişleri uygulandığında, öncelikle giriş değişkenlerinin üyelik dereceleri her iki kural için de Şekil 3.4'teki gibi belirlenir.



Şekil 3.4: x-y girişlerinin üyelik derecelerinin grafiksel gösterimi

Herbir kuralın ateşleme derecesi aşağıdaki gibi hesaplanır:

$$\mu_1 = \mu_{A1}(x).\ \mu_{B1}(y) \tag{3.9}$$

$$\mu_2 = \mu_{A2}(x).\ \mu_{B2}(y) \tag{3.10}$$

Bulanık sistem çıkışı Ağırlık Merkezi metodu ile aşağıdaki şekilde bulunur:

$$y = \frac{\mu_1.g_1 + \mu_2.g_2}{\mu_1 + \mu_2} \tag{3.11}$$

En sık kullanılan T-S tip bulanık model yapıları, kural tabanında kullanılan giriş değişkenlerine göre isimlendirilmiş olan birinci dereceden ve ARX yapılı T-S tip bulanık model yapılarıdır.

3.3.1.1. Birinci Dereceden T-S Tip Bulanık Model

Genel gösterimi Eşitlik 3.4 ile ifade edilen T-S tip bulanık model yapısında n=1 seçildiğinde elde edilen model yapısı doğrusal ya da birinci dereceden T-S tip bulanık model olarak isimlendirilir.

Kural yapısı:

K_i : EĞER x, A_i ise, O HALDE $y_i = g_i(x) = a_{i,0} + a_{i,1}\ x$ $\quad i=1,2,\ldots,R$ (3.12)

şeklindeki bu model yapısı ile doğrusal olmayan bir fonksiyonun ya da statik sistemin ifade edilmesi mümkün olabilmektedir.

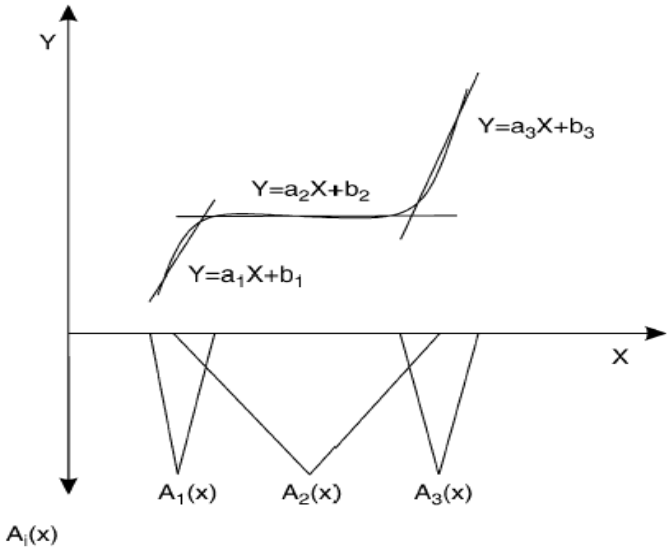
Örnek 3.2

K_1 : EĞER x, $A_1(x)$ ise, O HALDE $Y=a_1X+b_1$ (3.13)

K_2 : EĞER x, $A_2(x)$ ise, O HALDE $Y=a_2X+b_2$ (3.14)

K_3 : EĞER x, $A_3(x)$ ise, O HALDE $Y=a_3X+b_3$ (3.15)

Şekil 3.5'teki doğrusal olmayan bir fonksiyon, Eşitlik 3.13-3.15 ile verilen 3 kural kullanılarak oluşturulmuş birinci dereceden T-S tip bulanık bir model ile doğrusal 3 parçaya bölünerek ifade edilebilmektedir.



Şekil 3.5: Doğrusal olmayan bir fonksiyonun T-S tip bulanık bir model ile ifadesi

3.3.1.2. ARX Yapılı T-S Tip Bulanık Model

Eşitlik 3.4 ile ifade edilen genel T-S tip bulanık modelin giriş değişkenleri sisteme ait önceki giriş ve çıkış değerleri ile oluşturulduğunda ortaya çıkan model yapısı ARX yapılı T-S tip bulanık model olarak isimlendirilir.

Kural yapısı:

EĞER $y(k-1)$, A_{i1} ve,…,ve $y(k-n)$, A_{in} ve $u(k-1)$, B_{i1} ve,…,ve $u(k-m)$, B_{im} ise, (3.16)

O HALDE $y_i=g_i(x)=a_{i,0}+a_{i,1}\, y(k-1) + \cdots + a_{i,n}\, y(k-n) + b_{i,1}\, u(k-1) + \cdots + b_{i,m}\, u(k-m)$

$i=1,2,\ldots,R$

Burada,

$y(k-1), y(k-2),\ldots,y(k-n)$: Modele ait önceki çıkışlar,

$u(k-1), u(k-2),\ldots,u(k-m)$: Modele ait önceki girişler,

n, m: Modelin mertebesini belirten tamsayılardır.

Genel olarak Eşitlik 1.2'de verilmiş olan ve doğrusal dinamik sistemlerin modellenmesinde kullanılan ARX model yapısı, Eşitlik 3.16'daki gibi T-S tip

bulanık modellere adapte edildiğinde doğrusal olmayan dinamik sistemlerin de yaklaşık olarak ifade edilmesi mümkün olabilmektedir.

3.4. T-S Tip Bulanık Model Parametrelerinin Kestirimi

Genel kural yapısı Eşitlik 3.4 ile verilmiş olan T-S tip bulanık modele ait bulanık sonuç çıkarım algoritması matematiksel olarak elde edilip, Eşitlik 2.2'deki gibi bilinen giriş değerleri(regresyonlar) ve bilinmeyen parametreler(θ) temel formatına getirilerek Bölüm 2'de ele alınmış olan En Küçük Kareler tanıma yöntemi ile bulanık model parametrelerinin kestirimi yapılabilir [3].

Eşitlik 3.4'teki model kural çıkışları($g_i(x)$) Eşitlik 3.5'te yerine konulduğunda aşağıdaki sonuç çıkarım ifadesi elde edilir:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^{R} a_{i0}\,\mu_i(x)}{\sum_{i=1}^{R} \mu_i(x)} + \frac{\sum_{i=1}^{R} a_{i1}\,x_1\,\mu_i(x)}{\sum_{i=1}^{R} \mu_i(x)} + \cdots + \frac{\sum_{i=1}^{R} a_{in}\,x_n\,\mu_i(x)}{\sum_{i=1}^{R} \mu_i(x)} \tag{3.17}$$

Bu eşitlikteki parametreler θ vektörü altında toplanırsa,

$$\theta = [a_{10}, a_{20},\ldots,a_{R0}, a_{11}, a_{21},\ldots,a_{R1},\ldots\ldots,a_{1n}, a_{2n},\ldots,a_{Rn}] \tag{3.18}$$

elde edilir.

$$\xi_i(x) = \frac{\mu_i(x)}{\sum_{i=1}^{R} \mu_i(x)} \tag{3.19}$$

olarak tanımlanırsa,

$$\xi(x) = [\xi_1(x), \xi_2(x),\ldots,\xi_R(x), x_1\xi_1(x), x_1\xi_2(x),\ldots,x_1\xi_R(x),\ldots, x_n\xi_1(x), x_n\xi_2(x),\ldots, x_n\xi_R(x)]^T \tag{3.20}$$

ifadesi ile Eşitlik 2.4' te verilmiş olan regresyon matrisinin T-S tip bulanık model formatı elde edilmis olur.

Eşitlik 2.5' te tanımlanan Φ ifadesindeki x^i değerleri yeni regresyon matrisine göre $\xi(x^i)$ olarak düzenlenerek,

$$f(x|\theta) = \theta^T \xi(x) \tag{3.21}$$

eşitliği ile ifade edilebilecek olan T-S tip bulanık model çıkarımındaki parametre vektörü(θ), En Küçük Kareler tanıma yöntemi vasıtasıyla hesaplanabilir.

Burada, En Küçük Kareler yöntemi ile bulanık model parametre kestirimi yapabilmek için ξ(x) değerinin sistemden toplanan tüm giriş-çıkış verileri için hesaplanması gerektiği görülmektedir. Daha açık bir ifadeyle herbir giriş verisinin, her kuraldaki üyelik derecelerinin ayrı ayrı hesaplanması; hesaplanan üyelik derecelerinden kuralların ateşleme derecelerinin tespit edilmesi ve sonrasında da kuralların ξ(x) değerlerinin hesaplanması gerekmektedir. Tüm bu işlemler sonucunda En Küçük Kareler tanıma yöntemi vasıtasıyla seçilen model yapısı için parametrelerin kestirimi yapılır.

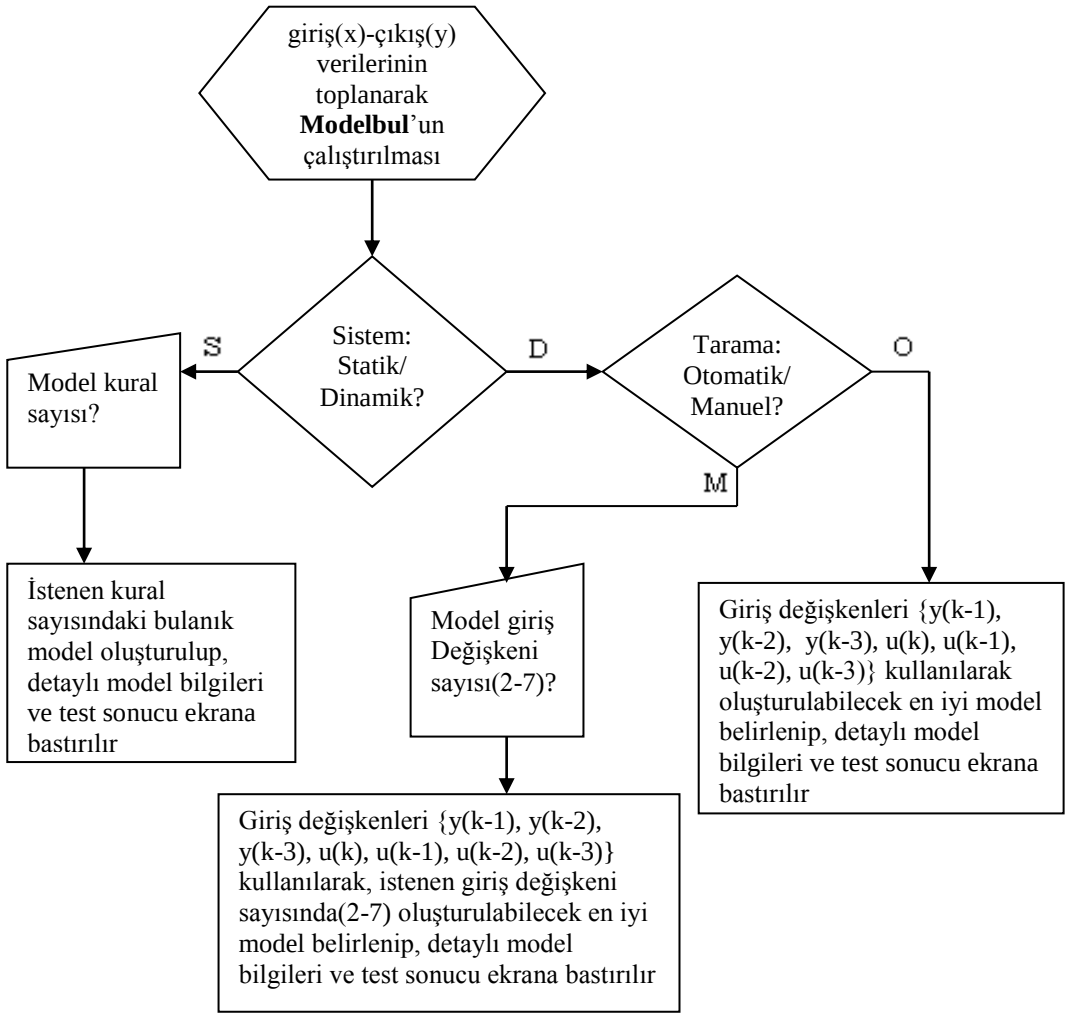
Yapılan testler sonucunda seçilen model yapısının uygunluğu yeterli görülmezse, yukarıdaki işlemlerin uygun bulanık model elde edilene kadar farklı model yapıları için tekrarlanması gerekebilir.

Bu çalışmada, yukarıda bahsedilen bulanık sistem tanıma işlemini, sistemden toplanan giriş-çıkış verilerine göre gerçekleştiren ve incelenen sistem için en uygun bulanık model bilgilerini saptayan "Modelbul" programı yazılmıştır.

4. MODELBUL PROGRAMI

Statik ve dinamik sistemler için sadece giriş-çıkış verilerine göre doğrusal ya da ARX yapılı T-S tip bulanık model oluşturmak üzere MATLAB 5.3 altında hazırlanmış Statik ve Dinamik olmak üzere iki alt kısımdan oluşan bir programdır.

MATLAB ortamında bir fonksiyon yapısı olarak hazırlanmış olan ve komut satırından "Modelbul" tuşlanarak çalıştırılan programa ait genel akış şeması Şekil 4.1'de verilmiştir.



Şekil 4.1: Modelbul programı için temel akış diyagramı

Modellenecek sisteme ait giriş ve çıkış verilerinin "/MATLAB/work" dizini altına sırasıyla "u.mat" ve "y.mat" isimlerinde kaydedilmesinin ardından, Modelbul programı çalıştırılarak sistemin statik(fonksiyon) ya da dinamik olmasına göre 3. Bölümde açıklanan doğrusal ya da en iyi ARX yapılı bulanık modeli, giriş değişkenleri için ikişer Gauss tip üyelik fonksiyonu seçilerek oluşturulur.

Gauss tip üyelik fonksiyonunun üyelik derecesi hesabı için kullanılan matematiksel ifadesi aşağıdaki gibidir:

$$\mu_{Aij}(x) = \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{x - c^{-ij}}{\sigma^{-ij}}\right)^2\right) \tag{4.1}$$

Bu eşitlikte,

c^{-ij} Gauss fonksiyonunun merkezi
σ^{-ij} Gauss fonksiyonunun yayılım oranıdır.

4.1. Statik Sistemlerin Modelbul Programı İle Modellenmesi

Modelbul programının Statik seçeneği, en sık kullanılan T-S tip bulanık model yapılarından olan ve doğrusal olmayan fonksiyonların da bulanık olarak ifade edilmesine olanak sağlayan, Eşitlik 4.2'deki kural yapısında doğrusal T-S Tip bulanık model oluşturmaktadır.

K_i : EĞER x, A_i ise, O HALDE $y_i = g_i(x) = a_{i,0} + a_{i,1}\, x$ $\quad i=1,2,\ldots,R$ (4.2)

Kullanıcı tarafından girilen kural sayısındaki(R) bulanık modelin parametreleri, EK A'da ifade edilen kod taslağındaki aşamalar ile En Küçük Kareler tanıma yöntemi vasıtasıyla hesaplanır. Oluşturulan modele, sistemi eğitmek için kullanılan giriş verileri uygulanarak elde edilen model çıkışları(y_m) ile sistem çıkışları(y) karşılaştırılarak Eşitlik 4.3'teki RMSE(Root Mean Square Error) değeri hesaplanır.

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{M}\sum_{i=1}^{M}\left(y_m(i) - y(i)\right)^2} \tag{4.3}$$

Modelbul program cevabı olarak,

1. Modelin kural çıkış formatı ve hesaplanan parametreler,

2. Hesaplanan RMSE değeri ekrana bastırılır.

3. Model için kullanılan üyelik fonksiyonları,

4. Model ve sistem çıkışları çizdirilir.

Modelbul programı statik kısmında kullanıcı tarafından girilen kural sayısı farklı değerlerde seçilerek, gerek RMSE değeri, gerekse model-sistem çıkış grafiğindeki değişimler gözlenebilir. Bu şekilde, doğrusal olmayan statik bir sistemin yeterli sayıda doğrusal parçaya ayrılıp, bulanık modelinin oluşturulması mümkündür.

4.2. Dinamik Sistemlerin Modelbul Programı İle Modellenmesi

Modelbul programının Dinamik seçeneği, endüstriyel ortamlarda en sık karşılaşılan dinamik sistem yapıları için Eşitlik 4.4'te verilen kural formatındaki en uygun ARX yapılı T-S tip bulanık modeli Manuel ya da Otomatik olarak oluşturmaktadır.

$\mathbf{K_i}$: EĞER y(k-1), A_{i1} ve,…,ve y(k-3), A_{i3} ve u(k), B_{i0} ve u(k-1), B_{i1} ve,…, u(k-3), B_{i3} ise, O HALDE $y_i=a_{i,0}+a_{i,1}\,y(k-1)+\cdots+a_{i,3}\,y(k-3)+b_{i,0}\,u(k)+\cdots+b_{i,3}\,u(k-3)$ (4.4)

$i=1,2,\ldots,R$

4.2.1. Manuel Seçeneği İle Model Oluşturma

Giriş-çıkış verileri toplanan sistem için en uygun dinamik modeli tarama metodu Manuel girildiğinde kullanıcıya 2 ile 7 arasındaki model giriş değişkeni sayısı sorulur. Giriş değişken sayısının girilmesinin ardından Modelbul programı {y(k-1), y(k-2), y(k-3), u(k), u(k-1), u(k-2), u(k-3)} değişkenleri içerisinden tercih edilen giriş değişkeni sayısındaki tüm modellerin parametre kestirimlerini EK A'da ifade edilen kod taslağındaki aşamalar ile yapar. Elde edilen modeller, EK B'de verilmiş olan bulanık çıkarım başarısına göre kıyaslanarak, istenen giriş değişkeni sayısındaki en uygun model seçilir.

Modelbul program cevabı olarak,

1. Model kural sayısı,
2. Seçilen modelin giriş değişkenleri,
3. Model bulanık çıkarım başarısı,
4. Modelin kural çıkış formatı ve hesaplanan parametreler ekrana bastırılır.
5. Seçilen Model için kullanılan üyelik fonksiyonları ekrana çizdirilir.

4.2.2. Otomatik Seçeneği İle Model Oluşturma

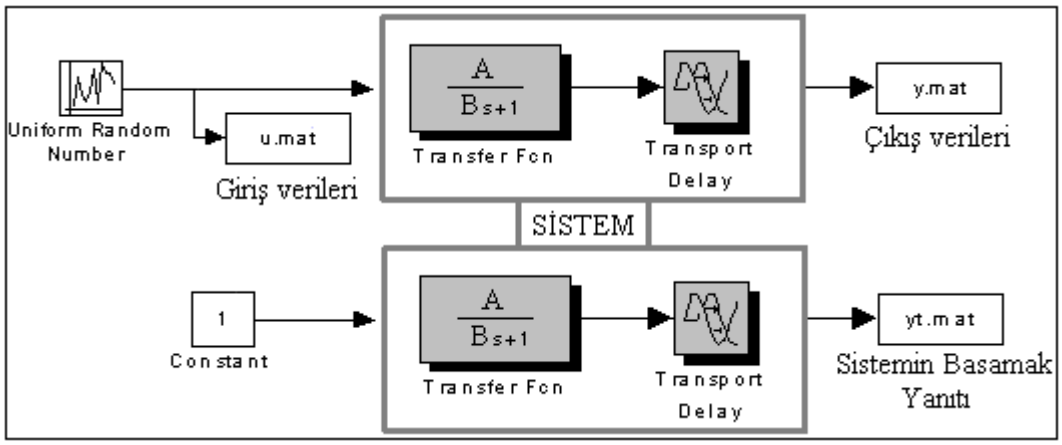
En uygun dinamik modeli tarama metodu Otomatik girildiğinde {y(k-1), y(k-2), y(k-3), u(k), u(k-1), u(k-2), u(k-3)} giriş değişkenleri ile oluşturulabilecek tüm modellerin parametre kestirimleri EK A'da ifade edilen kod taslağındaki aşamalara göre yapılır. Elde edilen modeller, EK B'de verilmiş olan bulanık çıkarım başarısına göre kıyaslanarak; toplanan giriş-çıkış verilerine göre sistem dinamiklerini en iyi ifade eden model otomatik olarak seçilerek Manuel kısımda listelenen model detayları kullanıcıya sunulur.

4.3. Doğrusal Dinamik Sistemler İçin Basamak Yanıtı Testi

Transfer fonksiyonu bilinen dinamik sitemlerin giriş-çıkış verilerinin toplanması için içeriği Şekil 4.2'de verilmiş olan ve Modelbul programı ile paralel çalışan "veri_topla.mdl" SİMULİNK dosyası kullanılırsa, Modelbul program cevabı olarak model verilerine ilaveten sistemin ve oluşturulan bulanık modelin basamak yanıtları ve RMSE değeri de elde edilebilir.

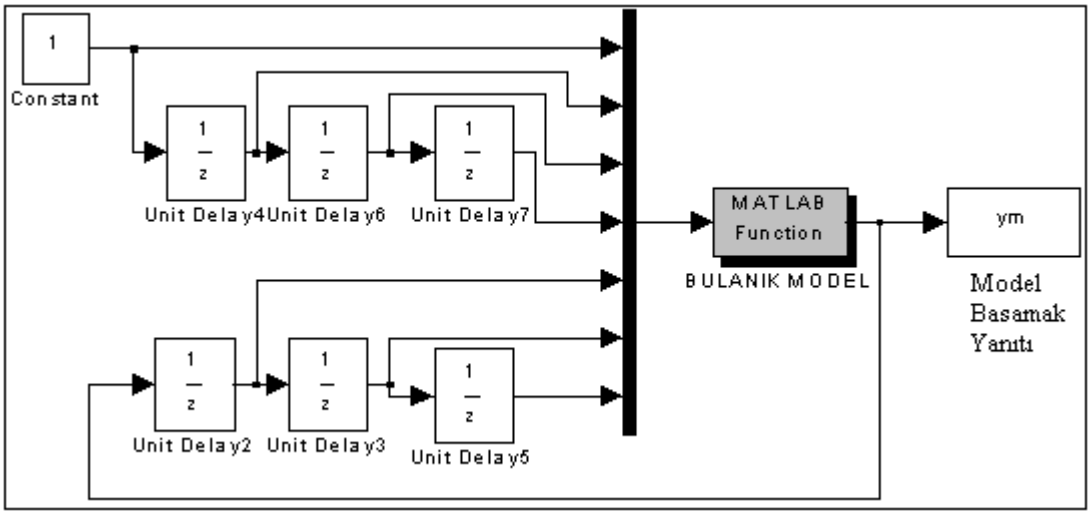
Basamak yanıtı testinin Modelbul programı sonucunda gözlenebilmesi için Modelbul ile paralel çalışan "veri_topla.mdl", "step_uyg.mdl" ve "mtest.m" ek programların da "modelbul.m" gibi "/MATLAB/work" dizini altına kopyalanması gerekmektedir.

Şekil 4.2'deki SİMULİNK devresinde Transfer Fcn blokları ile Transport delay(gecikme) blokları modellenecek doğrusal sisteme göre girilerek simulasyon çalıştırıldığında, sisteme ait giriş-çıkış verileri ile sistemin basamak cevabı "/MATLAB/work" dizini altına otamatik olarak kaydedilir.



Şekil 4.2: Sistemin giriş-çıkış verileri ile sistemin basamak cevabının alınması(veri_topla.mdl)

Verilerin toplanmasını takiben, modelleme işlemi için Modelbul programı çalıştırıldığında, Modelbul programı en iyi modeli saptayarak modele ait basamak yanıtını Şekil 4.3'teki SİMULİNK devresi vasıtasıyla saptar.



Şekil 4.3: Seçilen en iyi modelin basamak yanıtının alınması(step_uyg.mdl)
MATLAB function içeriği: Saptanan modele ait bulanık çıkarım kodu(mtest.m)

Sonuç olarak, oluşturulan model bilgilerine ilaveten sistem ve modelin basamak yanıtları da aynı grafikte ekrana görüntülenir.

5. UYGULAMALAR

Bu bölümde, Modelbul programı kullanılarak çeşitli sistemler için Takagi-Sugeno (T-S) tip bulanık modelleme uygulamalarına yer verilmiştir.

İlk uygulamada Modelbul programı vasıtasıyla statik bir sistem için birinci dereceden T-S tip bulanık model oluşturulması incelenmiştir. 2., 3., 4. ve 5. uygulamalarda ise doğrusal/doğrusal olmayan, birinci dereceden/ikinci dereceden, gecikmeli/gecikmesiz çeşitli dinamik sistemler için Modelbul programı vasıtasıyla en uygun ARX yapılı T-S tip bulanık model oluşturulması incelenmiştir.

İncelenen dinamik sistemler için MATLAB sistem tanıma programları(struc, arxstruc, selstruc ve arx) vasıtasıyla en uygun ARX model yapıları Eşitlik 5.1'deki MSE(Mean Square Error) ifadesini en küçük yapacak şekilde saptanarak, sistemlerin klasik ARX modelleri de oluşturulmuştur.

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{\mathrm{M}} \sum_{i=1}^{M} (y_m(i) - y(i))^2 \qquad (5.1)$$

Modelbul programı vasıtasıyla elde edilen bulanık modeller ile MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla elde edilen klasik ARX modeller test edilerek doğrulukları karşılaştırılmıştır.

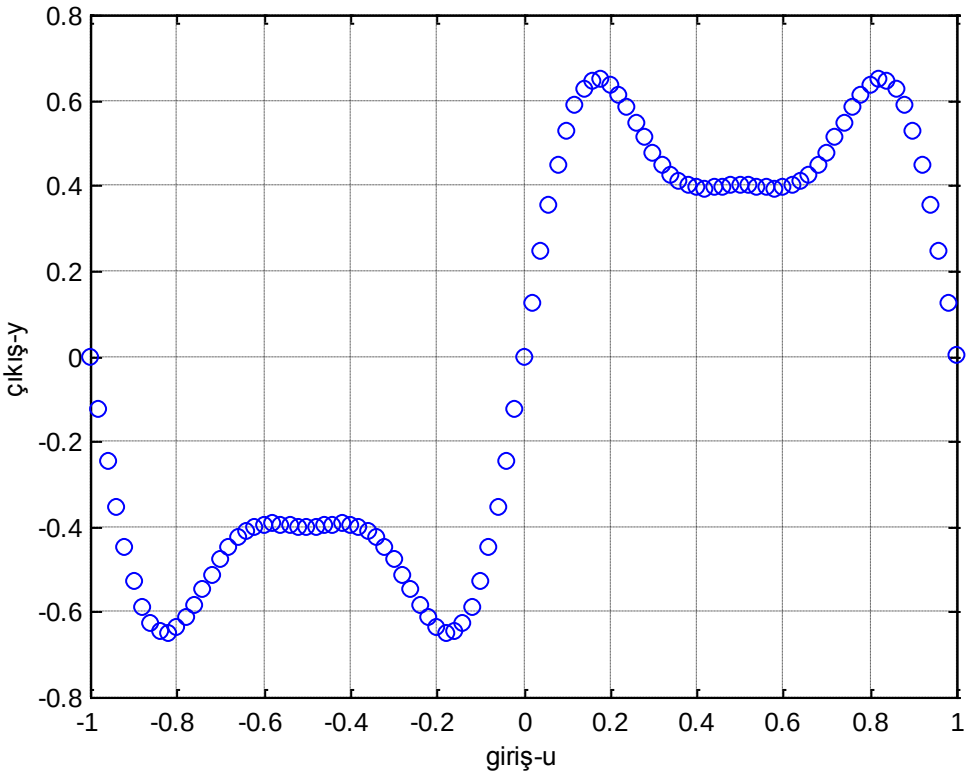
5.1. Uygulama 1

Bu çalışmada, Eşitlik 5.2 ile ifade edilen doğrusal olmayan statik bir sistemin T-S Tip Bulanık Modeli, Modelbul programı kullanılarak oluşturuldu.

$$y = 0.6\sin(\Pi x) + 0.3\sin(3\Pi x) + 0.1\sin(5\Pi x) \qquad (5.2)$$

5.1.1. Giriş-Çıkış Verilerinin Toplanması

"x" giriş işareti [-1, 1] aralığında ve örnekleme periyodu(T) 0.02 olarak seçildi ve sisteme ait Şekil 5.1'deki giriş-çıkış verileri toplandı.

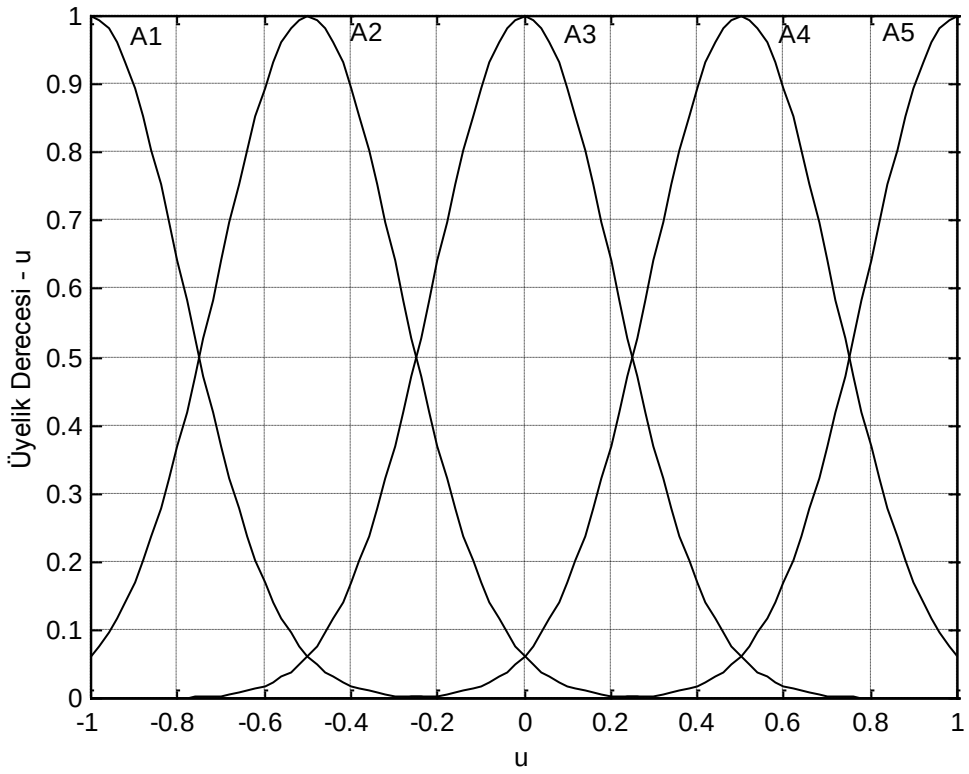


Şekil 5.1: Sisteme ait giriş(u) ve çıkış(y) verileri

5.1.2. Bulanık Modelin Modelbul Programı İle Oluşturulması

İlk aşamada, kural sayısı 5 seçilerek sistemin birinci dereceden T-S tip bulanık modeli elde edildi.

Modelbul programının statik kısmı ile oluşturulan bulanık modelin giriş değişkeni(u) için saptanan üyelik fonksiyonu Şekil 5.2'de verilmiştir.



Şekil 5.2: Bulanık model giriş değişkeni u için tanımlanan üyelik fonksiyonu

Modelbul programı vasıtasıyla belirlenen kural çıkış formatı ve hesaplanan parametreler ile oluşturulan birinci dereceden T-S tip bulanık modelin kural tabanı aşağıda verilmiştir:

K1 : EĞER x, A1 ise O HALDE y = -3.917156360 + -3.808943352 x (5.3)

K2 : EĞER x, A2 ise O HALDE y = 0.177785505 + 0.466264284 x (5.4)

K3 : EĞER x, A3 ise O HALDE y = 5.347880667 x (5.5)

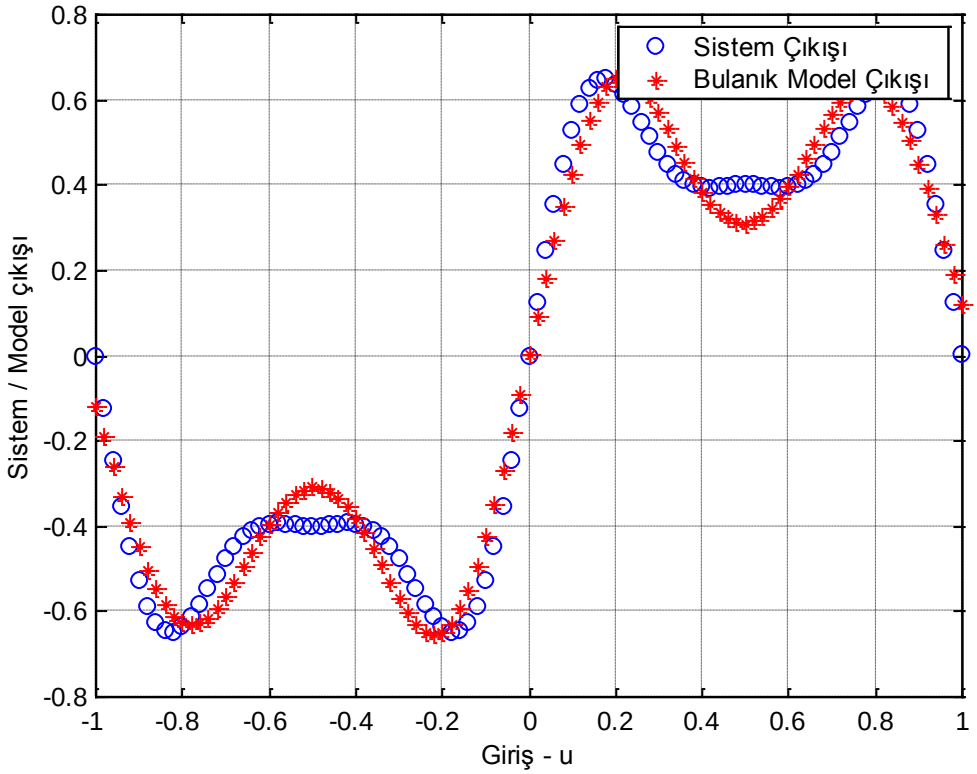
K4 : EĞER x, A4 ise O HALDE y = -0.177785505 + 0.466264284 x (5.6)

K5 : EĞER x, A5 ise O HALDE y = 3.917156360 + -3.808943352 x (5.7)

Modelbul program cevabı olarak, eğitim verileri için sistem ve model yanıtları karşılaştırılarak RMSE değeri hesaplandı.

RMSE = 6.625959e-002 (5.8)

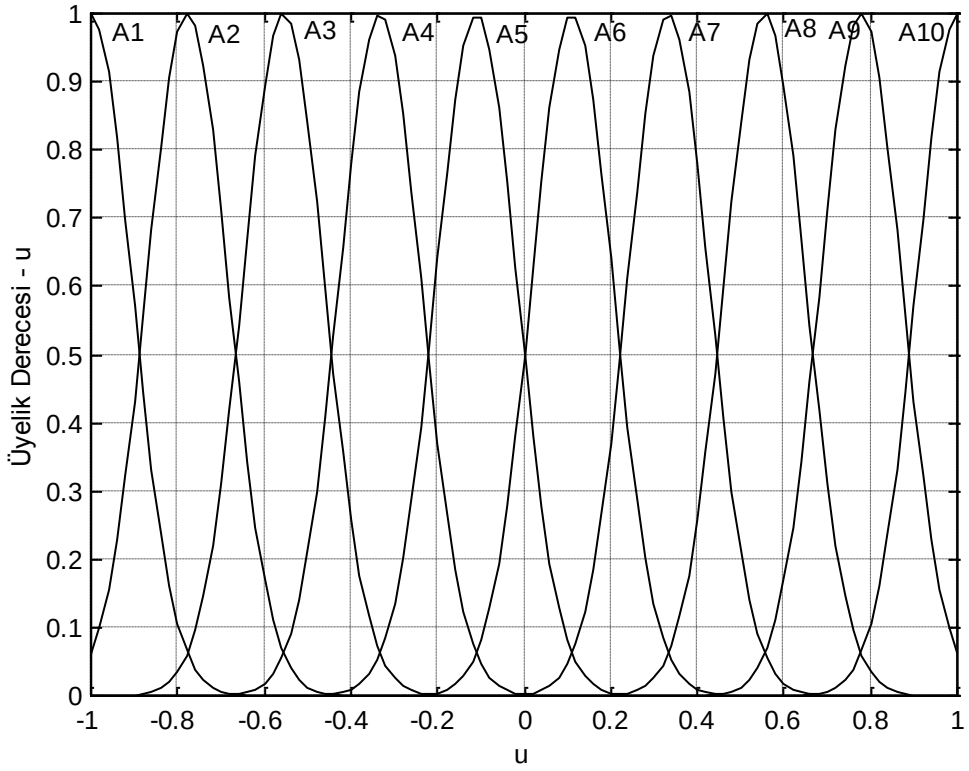
Modelbul programı test sonucu olarak, eğitim verileri için sistem ve model yanıtları Şekil 5.3'deki gibi çizdirildi.



Şekil 5.3: Eğitim verileri için sistem ve model yanıtları

Modelbul programı ile elde edilen T-S tip bulanık model test sonuçları incelendiğinde doğrusal olmayan bu statik sistem için seçilen kural sayısının sistemi doğrusal parçalara ayırmada yeterli olmadığı gözlenmektedir.

Aynı statik sistemin giriş-çıkış verileri ile Modelbul programı tekrar çalıştırılarak kural sayısı 10 seçildi. Program tarafından model parametreleri hesaplandı ve modelin giriş değişkeni(u) için kullanılan üyelik fonksiyonu Şekil 5.4'deki gibi verildi.



Şekil 5.4: Bulanık model giriş değişkeni u için tanımlanan üyelik fonksiyonu

Modelbul programı vasıtasıyla belirlenen kural çıkış formatı ve hesaplanan parametreler ile oluşturulan birinci dereceden T-S tip bulanık modelin kural tabanı aşağıda verilmiştir:

K1 : EĞER x, A1 ise O HALDE y = -4.476621616 -4.509733104x (5.9)

K2 : EĞER x, A2 ise O HALDE y = -0.008690980 + 0.756487045x (5.10)

K3 : EĞER x, A3 ise O HALDE y = -0.595972554 -0.359732981x (5.11)

K4 : EĞER x, A4 ise O HALDE y = -0.495675375 -0.317275932x (5.12)

K5 : EĞER x, A5 ise O HALDE y = -0.388929922 + 1.932951867x (5.13)

K6 : EĞER x, A6 ise O HALDE y = 0.388929922 + 1.932951867x (5.14)

K7 : EĞER x, A7 ise O HALDE y = 0.495675375 -0.317275932x (5.15)

K8 : EĞER x, A8 ise O HALDE y = 0.595972554 -0.359732981x (5.16)

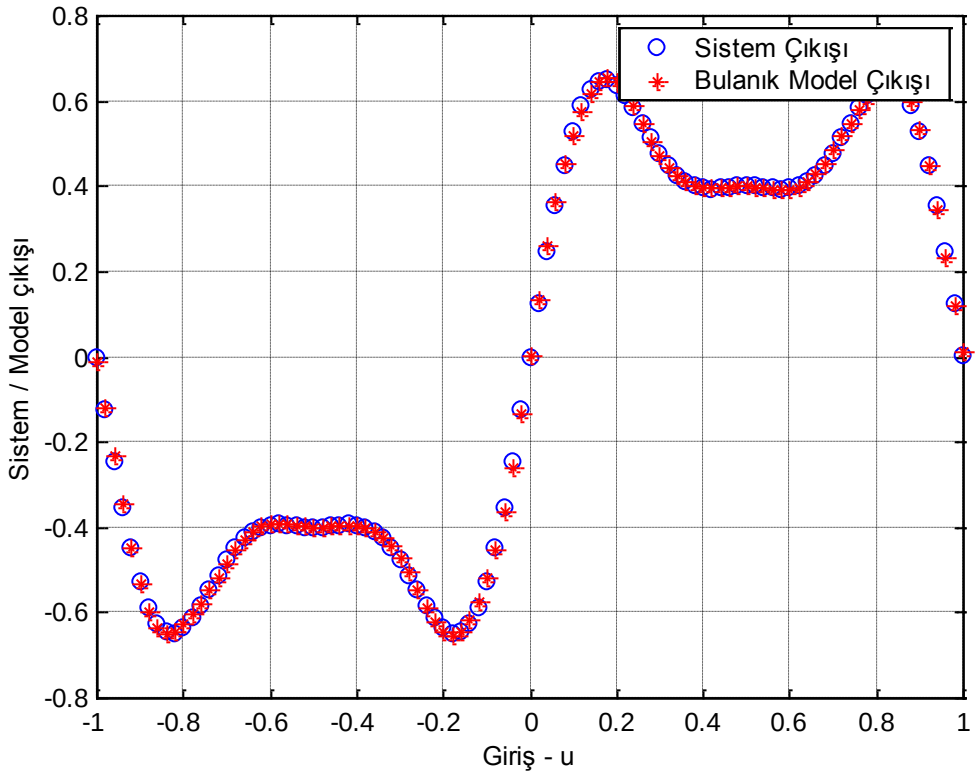
K9 : EĞER x, A9 ise O HALDE y = 0.008690980 + 0.756487045 x (5.17)

K10 : EĞER x, A10 ise O HALDE y = 4.476621616 -4.509733104x (5.18)

Modelbul program cevabı olarak, eğitim verileri için sistem ve model yanıtları karşılaştırılarak RMSE değeri aşağıdaki gibi hesaplandı:

RMSE = 6.586129e-003 (5.19)

Modelbul programı test sonucu olarak, eğitim verileri için sistem ve model yanıtları Şekil 5.5'deki gibi çizdirildi.



Şekil 5.5: Eğitim verileri için sistem ve model yanıtları

Modelbul programı ile elde edilen T-S tip bulanık model test sonuçları incelendiğinde doğrusal olmayan bu statik sistem için 10 kural ile oluşturulan 2. modelinin, 5 kurallı modele oranla daha başarılı olduğu görülmüştür.

Aynı statik sistem farklı kural sayıları seçilerek modellenmiş ve RMSE değerleri Tablo 5.1'deki gibi elde edilmiştir.

Tablo 5.1: Farklı kural sayıları için hesaplanan RMSE değerleri

Kural Sayısı	RMSE
5	6.625959e-002
12	6.586129e-003
20	3.349331e-003
40	1.972547e-003
45	1.048794e-003
50	1.265222e-015
60	5.214098e-016

5.1.3. Sonuç

Modelbul programının statik seçeneği vasıtasıyla, bu uygulamadaki gibi doğrusal olmayan statik sistemler de kural sayısının sistemi yeterli sayıda doğrusal parçaya ayıracak şekilde seçilmesi ile istenilen doğrulukta modellenebilmektedir.

5.2. Uygulama 2

Bu çalışmada, transfer fonksiyonu Eşitlik 5.20 ile ifade edilen 1. dereceden, gecikmeli ve doğrusal bir dinamik sistem için en uygun ARX yapılı T-S tip bulanık model, Modelbul programı vasıtasıyla oluşturuldu.

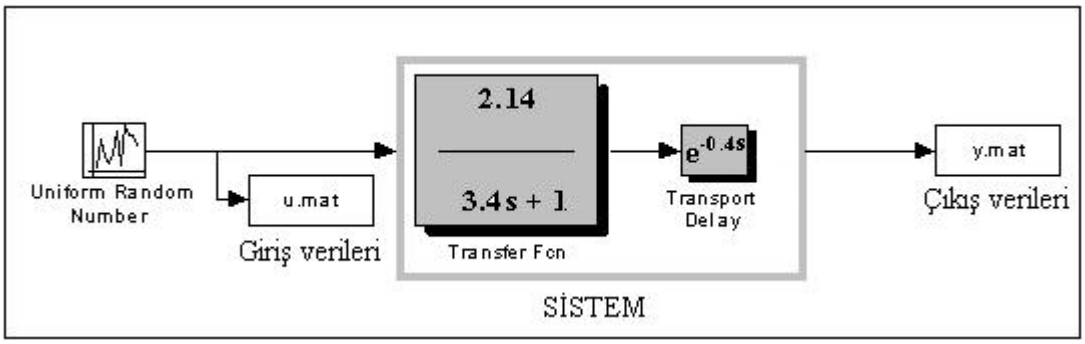
$$G(s) = \frac{2.14}{3.4s + 1} e^{-0.4s} \qquad (5.20)$$

Aynı sistemin MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla en uygun klasik ARX modeli de oluşturularak, Modelbul programı vasıtasıyla elde edilen bulanık model ile klasik ARX modelin doğrulukları karşılaştırıldı.

5.2.1. Giriş-Çıkış Verilerinin Toplanması

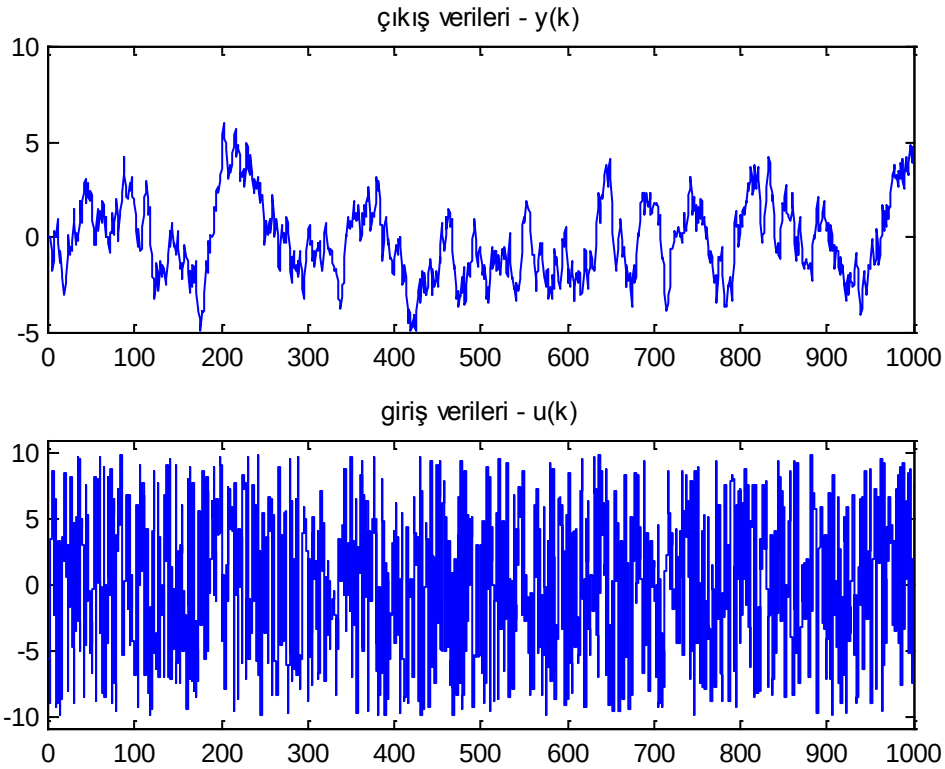
Bulanık modelin eğitilmesi için sistem SİMULİNK ortamında aşağıdaki simulasyon parametreleri seçilerek Şekil 5.6'daki gibi gerçeklendi.

- u(t) kotrol işareti: [-10,10] aralığında seçilerek 'Uniform Random Number' bloğu tarafından rastgele üretildi.
- Solver olarak ODE4(Runge-Kutta) seçildi.
- Örnekleme zamanı 0.2 s seçildi.
- Simülasyon 200 s için yapılarak sisteme ait 1001 giriş-çıkış verisi toplandı.



Şekil 5.6: Sisteme ait giriş-çıkış verilerinin SİMULİNK ortamında toplanması

Sistemden toplanan veriler Şekil 5.7'de verilmiştir.

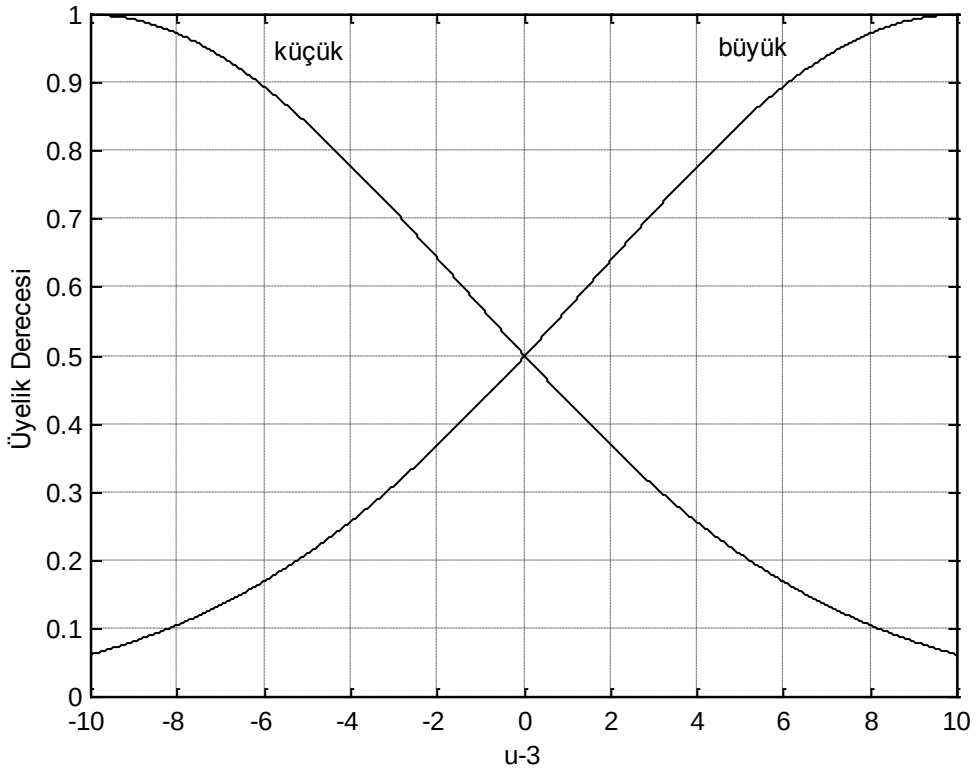


Şekil 5.7: Giriş-u(k) ve çıkış-y(k) verileri

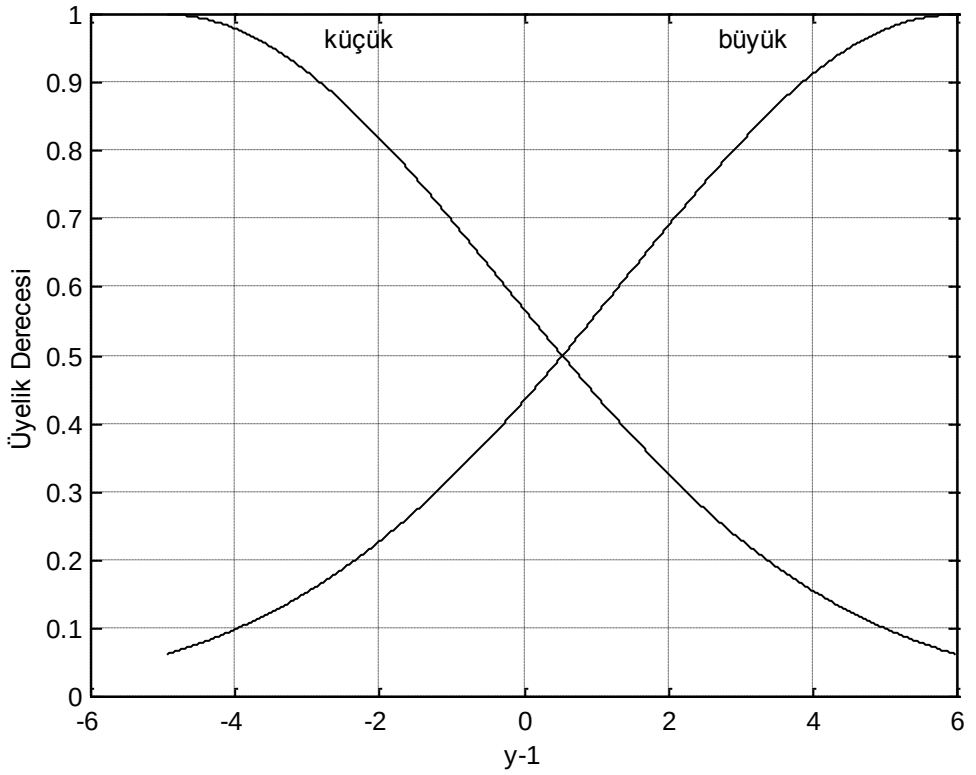
5.2.2. Bulanık Modelin Modelbul Programı İle Belirlenmesi

Sisteme ait giriş-çıkış verilerine göre bulanık modelin oluşturulması için Modelbul programı çalıştırılarak sistemin bulanık bir modeli elde edildi.

Modelbul programi kullanilarak sistemi en iyi ifade edecek bulanık modelin giriş değişkenleri u(k-3) ve y(k-1) olarak belirlendi. Giriş değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 5.8 ve Şekil 5.9'deki gibi belirlendi.



Şekil 5.8: Bulanık model giriş değişkeni u(k-3) için tanımlanan üyelik fonksiyonu



Şekil 5.9: Bulanık model giriş değişkeni y(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu

Modelbul programı vasıtasıyla belirlenen kural çıkış formatı ve hesaplanan parametreler ile oluşturulan ARX yapılı T-S Tip bulanık modelin kural tabanı aşağıda verilmiştir:

K1 : EĞER u(k-3) 'Küçük' ve y(k-1) 'Küçük' ise O HALDE (5.21)

$y(k) = -2*10^{-14} + 0.12225145971273* u(k-3) + 0.94287314966694*y(k-1)$

K2 : EĞER u(k-3) 'Küçük' ve y(k-1) 'Büyük' ise O HALDE (5.22)

$y(k) = 3*10^{-14} + 0.12225145971272* u(k-3) + 0.94287314966694*y(k-1)$

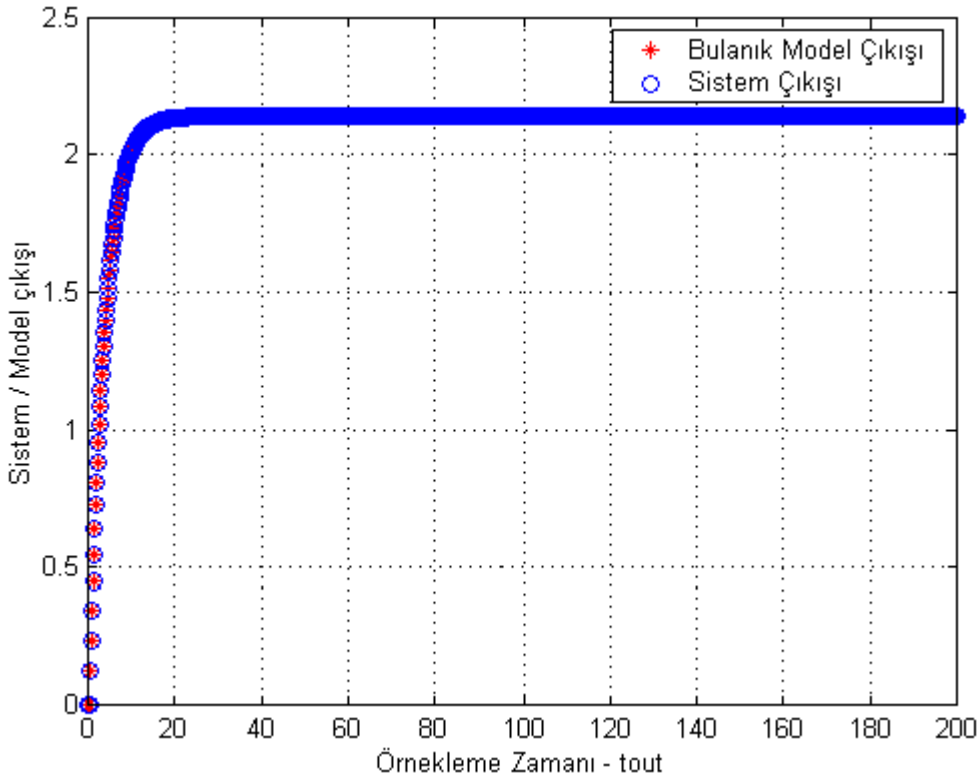
K3 : EĞER u(k-3) 'Büyük' ve y(k-1) 'Küçük' ise O HALDE (5.23)

$y(k) = 7*10^{-14} + 0.12225145971273* u(k-3) + 0.94287314966698*y(k-1)$

K4 : EĞER u(k-3) 'Büyük' ve y(k-1) 'Büyük' ise O HALDE (5.24)

$y(k) = -9*10^{-14} + 0.12225145971272* u(k-3) + 0.94287314966697*y(k-1)$

Modelbul aracılığıyla sistem ve modelin basamak yanıtları Şekil 5.10'daki gibi çizdirildi.



Şekil 5.10: Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları

Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları, uygulanan birim basamak işareti süresince karşılaştırıldığında RMSE değeri aşağıdaki gibi verildi.

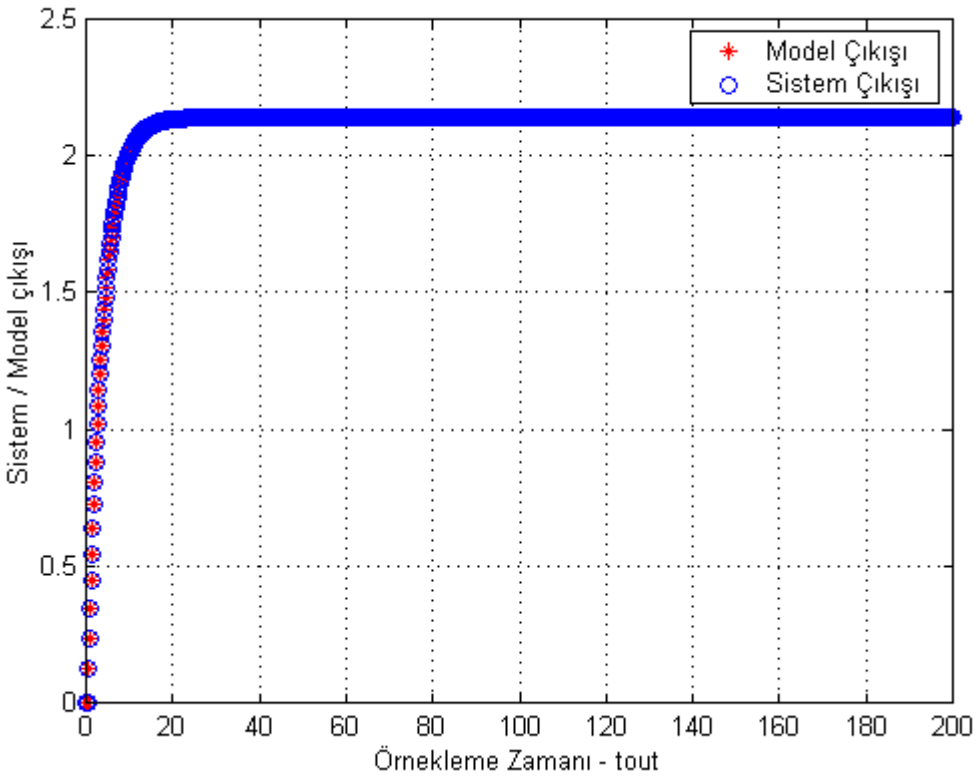
RMSE = 3.546e-014 (5.25)

5.2.3. Sistemin Klasik ARX Modelinin Oluşturulması

MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla sistem için en uygun klasik ARX model yapısı ve parametreleri belirlendi.

y(k) - 0.94287314966695*y(k-1) = 0.12225145971272*u(k-3) (5.26)

Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları Şekil 5.11'deki gibi gözlendi.



Şekil 5.11: Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları

Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları, uygulanan birim basamak işareti süresince karşılaştırıldığında RMSE değeri Eşitlik 5.27'deki gibi verildi.

RMSE = 6.893e-014 (5.27)

5.2.4. Sonuç

Bu uygulamada, 1. dereceden, gecikmeli ve doğrusal bir dinamik sistemin Modelbul programı vasıtasıyla bulanık modeli; MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla da klasik ARX modeli oluşturulmuştur. Yapılan testler sonucunda incelenen sistemin her iki yöntemle de modellenebildiği, fakat bulanık modelin klasik ARX modele oranla sistemi daha iyi ifade ettiği gözlenmiştir.

5.3. Uygulama 3

Bu çalışmada, transfer fonksiyonu Eşitlik 5.28 ile ifade edilen 2. dereceden, gecikmesiz ve doğrusal bir dinamik sistem için en uygun ARX yapılı T-S Tip Bulanık Model, Modelbul programı vasıtasıyla oluşturuldu.

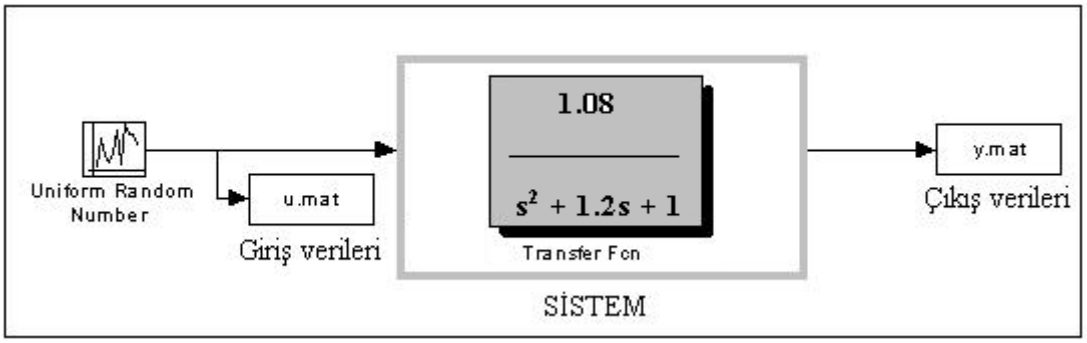
$$G(s) = \frac{1.08}{s^2 + 1.2s + 1} \tag{5.28}$$

Aynı sistemin MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla en uygun klasik ARX modeli de oluşturularak, Modelbul programı vasıtasıyla elde edilen bulanık model ile klasik ARX modelin doğrulukları karşılaştırıldı.

5.3.1. Giriş-Çıkış Verilerinin Toplanması

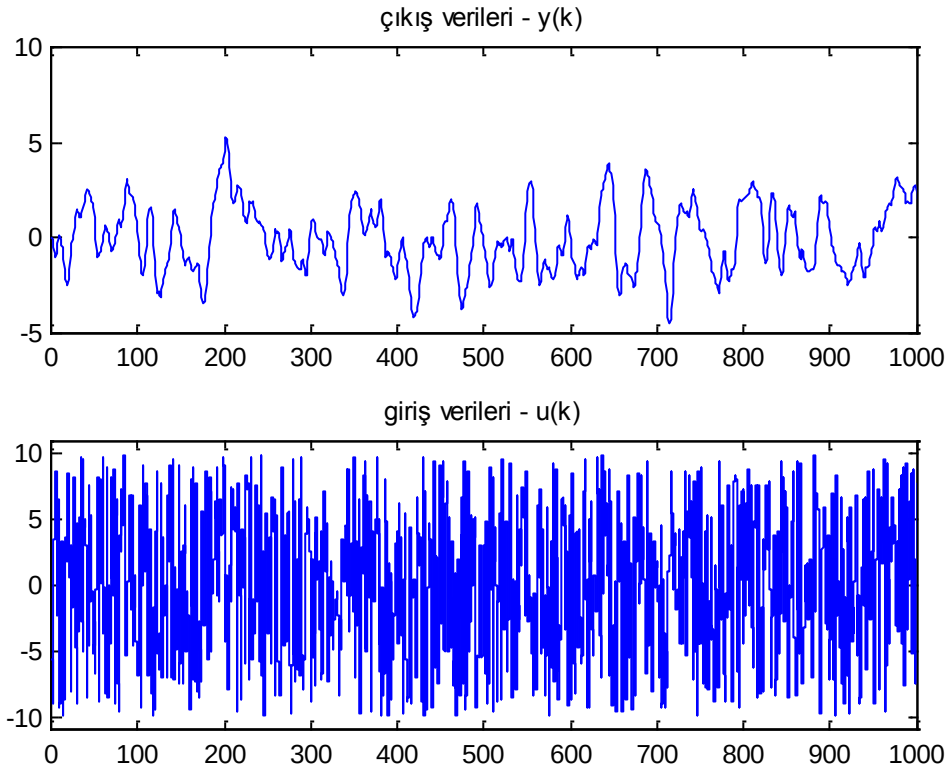
Bulanık modelin eğitilmesi için sistem SİMULİNK ortamında aşağıdaki simulasyon parametreleri seçilerek Şekil 5.2'deki gibi gerçeklendi.

- u(t) kotrol işareti: [-10,10] aralığında seçilerek 'Uniform Random Number' bloğu tarafından rastgele üretildi.
- Solver olarak ODE4(Runge-Kutta) seçildi.
- Örnekleme zamanı 0.2 s seçildi.
- Simülasyon 200 s için yapılarak sisteme ait 1001 giriş-çıkış verisi toplandı.



Şekil 5.12: Sisteme ait giriş-çıkış verilerinin SİMULİNK ortamında toplanması

Sistemden toplanan veriler Şekil 5.13'de verilmiştir.

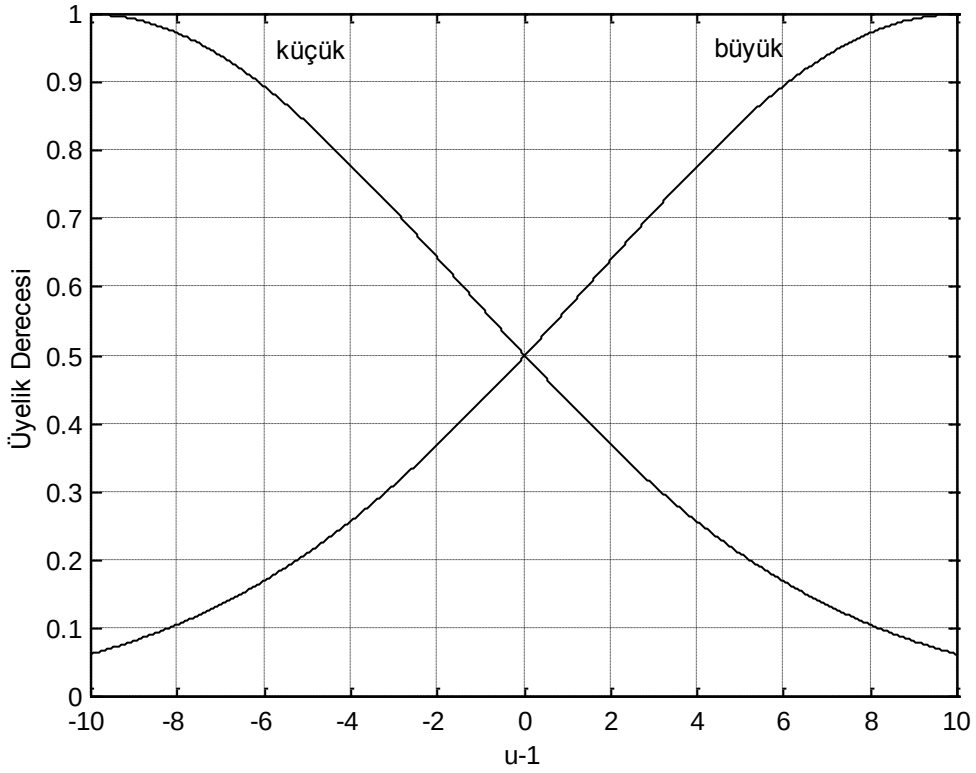


Şekil 5.13: Giriş-u(k) ve çıkış-y(k) verileri

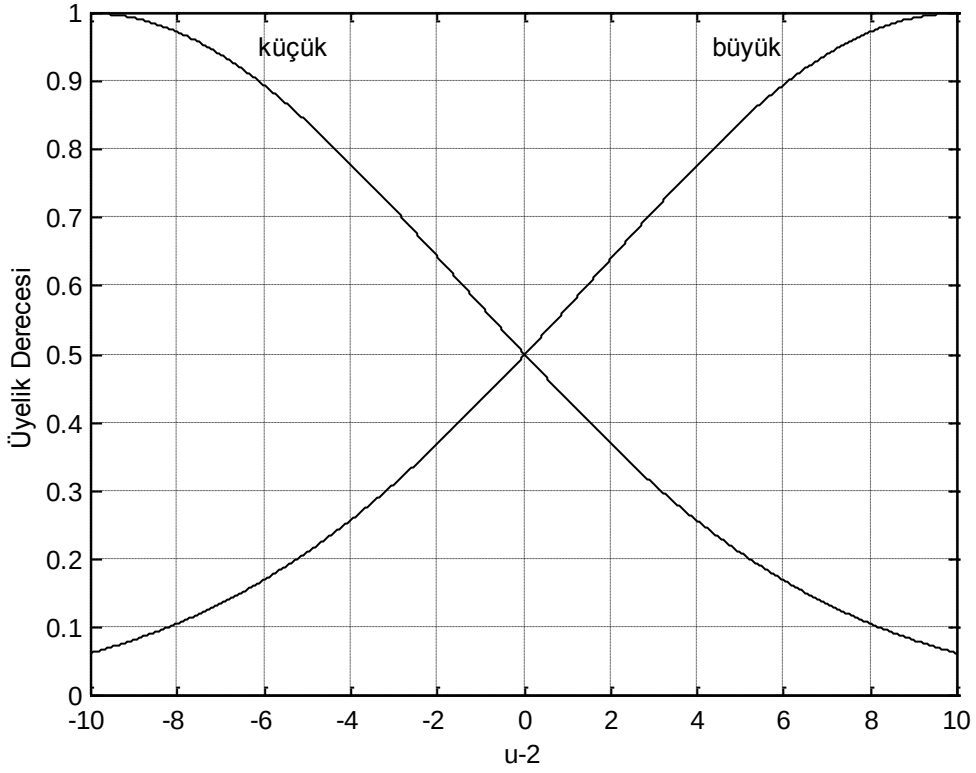
5.3.2. Bulanık Modelin Modelbul Programı İle Belirlenmesi

Sisteme ait giriş-çıkış verilerine göre bulanık modelin oluşturulması için Modelbul programı çalıştırılarak sistemin bulanık bir modeli elde edildi.

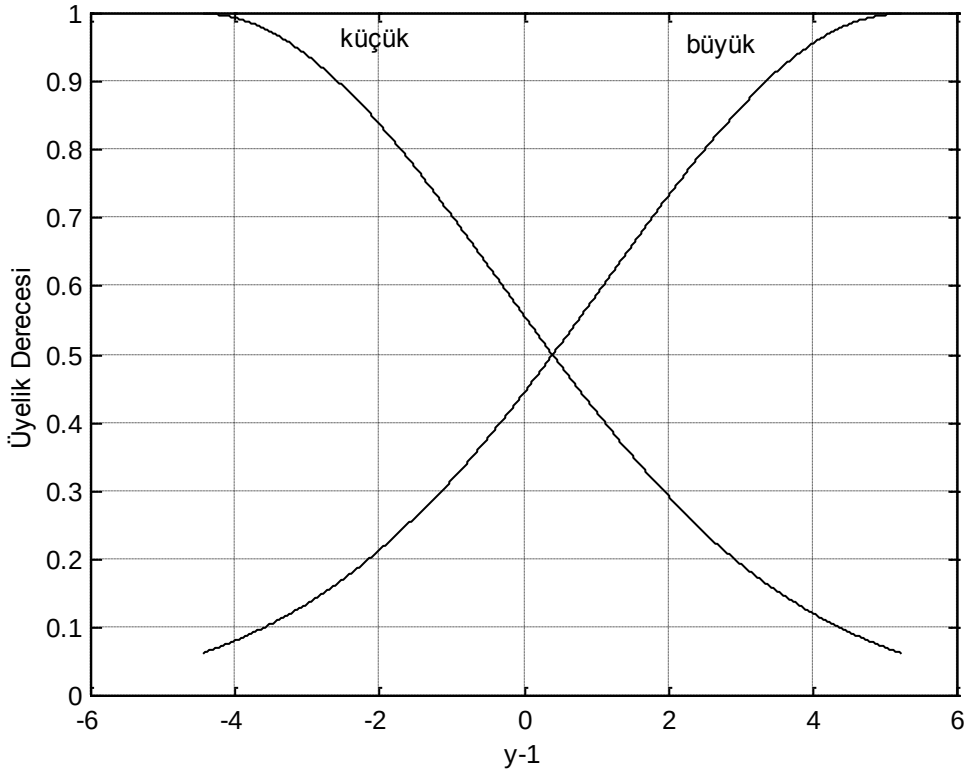
Modelbul programi kullanilarak sistemi en iyi ifade edecek bulanık modelin giriş değişkenleri u(k-1), u(k-2), y(k-1) ve y(k-2) olarak belirlendi. Giriş değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 5.14-5.17'deki gibi belirlendi.



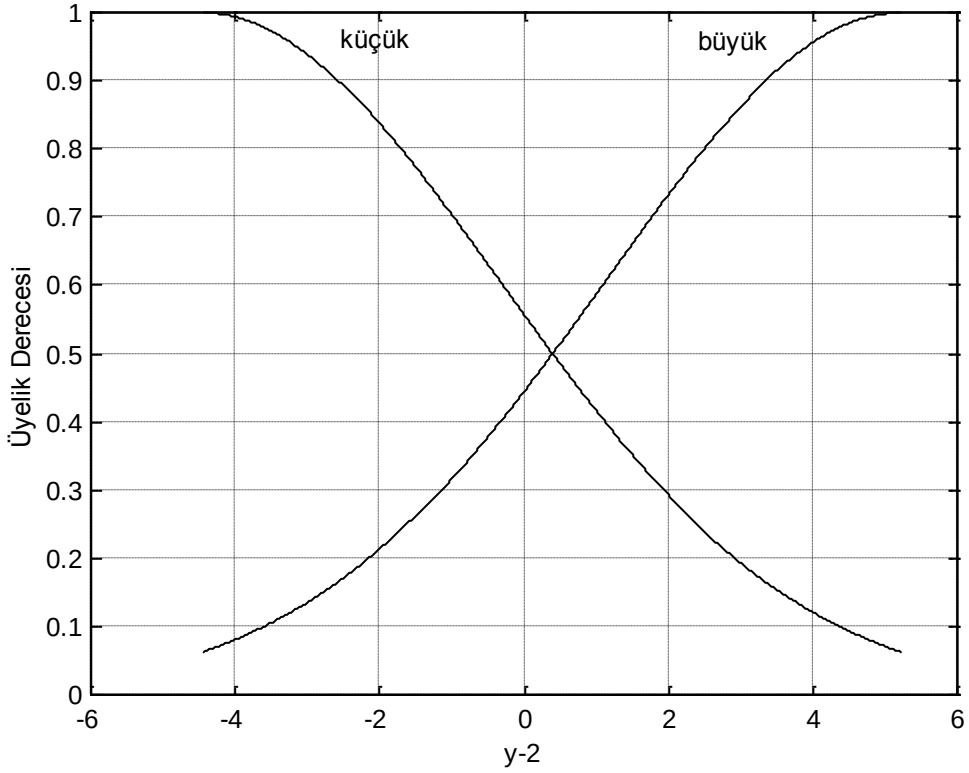
Şekil 5.14: Bulanık model giriş değişkeni u(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu



Şekil 5.15: Bulanık model giriş değişkeni u(k-2) için tanımlanan üyelik fonksiyonu



Şekil 5.16: Bulanık model giriş değişkeni y(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu



Şekil 5.17: Bulanık model giriş değişkeni y(k-2) için tanımlanan üyelik fonksiyonu

Modelbul programı vasıtasıyla belirlenen kural çıkış formatı ve hesaplanan parametreler ile oluşturulan ARX yapılı T-S Tip bulanık modelin kural tabanı aşağıda verilmiştir:

K1 : EĞER u(k-1) ‘Küçük’ ve u(k-2) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Küçük’

O HALDE $y(k) = 9*10^{-14} + 0.01990368000000* u(k-1) + 0.01837644000000*u(k-2) + 1.75118357333333* y(k-1) - 0.78662812888887*y(k-2)$

K2 : EĞER u(k-1) ‘Küçük’ ve u(k-2) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Büyük’

O HALDE $y(k) =-169*10^{-12}+0.01990368000001* u(k-1)+0.01837643999999*u(k-2) +1.75118357333293* y(k-1)-0.78662812888841*y(k-2)$

K3 : EĞER u(k-1) ‘Küçük’ ve u(k-2) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Küçük’

O HALDE $y(k) =164*10^{-12}+0.01990367999999* u(k-1)+0.01837644000001*u(k-2) +1.75118357333282* y(k-1) - 0.78662812888838*y(k-2)$

K4 : EĞER u(k-1) ‘Küçük’ ve u(k-2) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Büyük’

O HALDE $y(k) =-10*10^{-13}+0.01990368000000* u(k-1)+0.01837644000000*u(k-2) + 1.75118357333336* y(k-1) - 0.78662812888889*y(k-2)$

K5 : EĞER u(k-1) ‘Küçük’ ve u(k-2) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Küçük’

O HALDE $y(k) = 1*10^{-14} + 0.01990368000000* u(k-1) + 0.01837644000000*u(k-2) + 1.75118357333334* y(k-1) - 0.78662812888889*y(k-2)$

K6 : EĞER u(k-1) ‘Küçük’ ve u(k-2) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Büyük’

O HALDE $y(k) =-81*10^{-12}+0.01990368000000* u(k-1)+0.01837644000000*u(k-2) + 1.75118357333307* y(k-1) - 0.78662812888861*y(k-2)$

K7 : EĞER u(k-1) ‘Küçük’ ve u(k-2) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Küçük’

O HALDE $y(k) = 82*10^{-14}+0.01990368000000* u(k-1)+0.01837644000000*u(k-2) + 1.75118357333312* y(k-1) - 0.78662812888869*y(k-2)$

K8 : EĞER u(k-1) ‘Küçük’ ve u(k-2) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Büyük’

O HALDE $y(k) = -1*10^{-14}+0.01990368000000* u(k-1)+0.01837644000000*u(k-2)$

$+ 1.75118357333335* y(k-1) - 0.78662812888890*y(k-2)$

K9 : EĞER u(k-1) ‘Büyük’ ve u(k-2) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Küçük’

O HALDE $y(k) = -8*10^{-14}+0.01990368000000* u(k-1)+0.01837644000000*u(k-2)$

$+ 1.75118357333331* y(k-1) - 0.78662812888888*y(k-2)$

K10 : EĞER u(k-1) ‘Büyük’ ve u(k-2) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Büyük’

O HALDE $y(k) = 21*10^{-12}+0.01990368000001* u(k-1) + 0.01837644000001*u(k-2)$

$+ 1.75118357333337* y(k-1) - 0.78662812888894*y(k-2)$

K11 : EĞER u(k-1) ‘Büyük’ ve u(k-2) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Küçük’

O HALDE $y(k) = -16*10^{-12}+0.01990367999999* u(k-1)+0.01837643999999*u(k-2)$

$+ 1.75118357333340* y(k-1) - 0.78662812888900*y(k-2)$

K12 : EĞER u(k-1) ‘Büyük’ ve u(k-2) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Büyük’

O HALDE $y(k) = 9*10^{-14} + 0.01990368000000* u(k-1) + 0.01837644000000*u(k-2)$

$+ 1.75118357333333* y(k-1) - 0.78662812888890*y(k-2)$

K13 : EĞER u(k-1) ‘Büyük’ ve u(k-2) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Küçük’

O HALDE $y(k) = 1*10^{-14}+0.01990368000000* u(k-1)+0.01837644000000*u(k-2)$

$+ 1.75118357333333* y(k-1) - 0.78662812888889*y(k-2)$

K14 : EĞER u(k-1) ‘Büyük’ ve u(k-2) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Büyük’

O HALDE $y(k) = 93*10^{-12}+0.01990367999999* u(k-1)+0.01837644000001*u(k-2)$

$+ 1.75118357333364* y(k-1) - 0.78662812888917*y(k-2)$

K15 : EĞER u(k-1) ‘Büyük’ ve u(k-2) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Küçük’

O HALDE $y(k) = -94*10^{-12}+0.01990368000001* u(k-1)+0.01837644000000*u(k-2)$

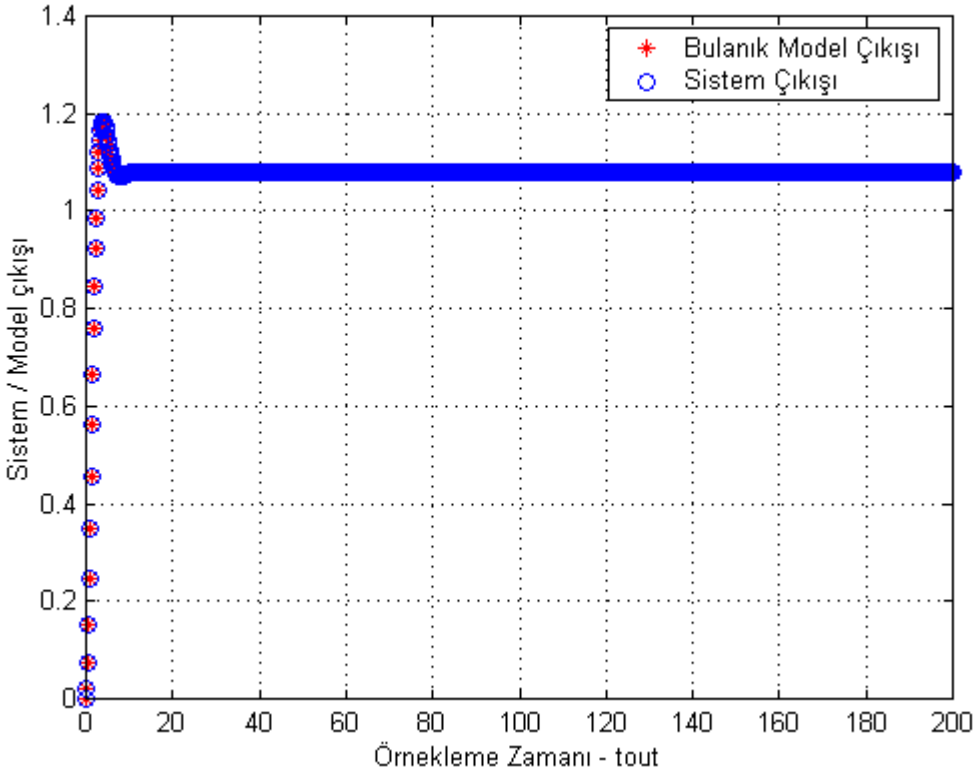
$+ 1.75118357333357* y(k-1) - 0.78662812888914*y(k-2)$

K16 : EĞER u(k-1) ‘Büyük’ ve u(k-2) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Büyük’

O HALDE y(k) = $-2*10^{-14}$+0.01990368000000* u(k-1)+0.01837644000000*u(k-2)

+ 1.75118357333334* y(k-1) - 0.78662812888890*y(k-2)

Modelbul aracılığıyla sistem ve modelin basamak yanıtları Şekil 5.18’teki gibi çizdirildi.



Şekil 5.18: Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları

Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları, uygulanan birim basamak işareti süresince karşılaştırıldığında RMSE değeri aşağıdaki gibi verildi.

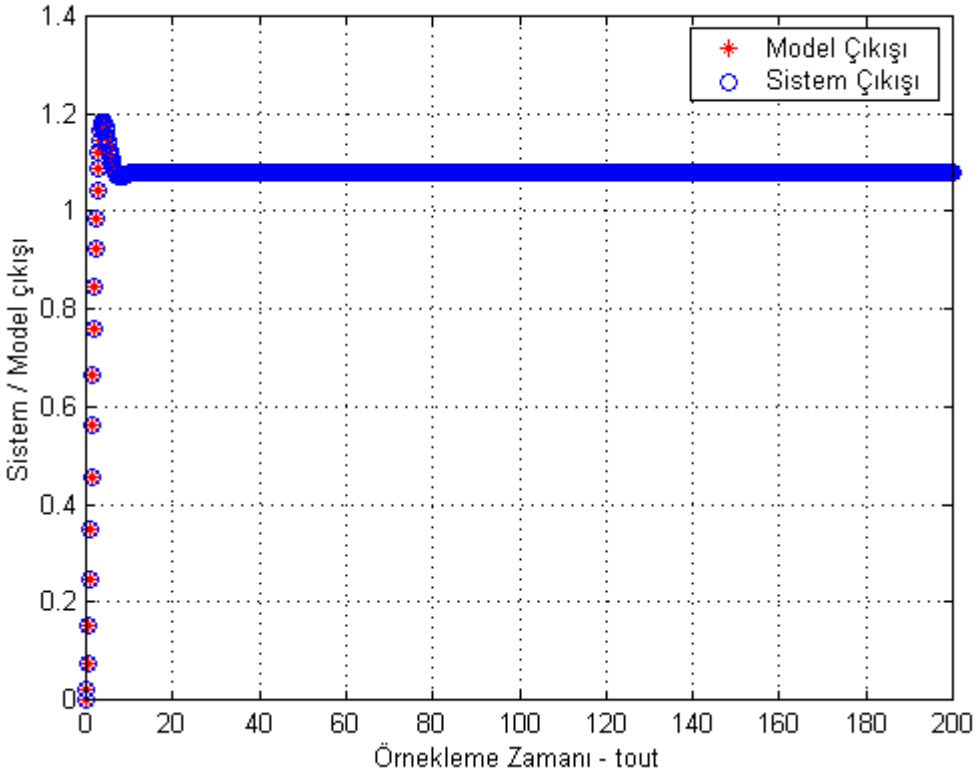
RMSE = 2.030e-014 (5.29)

5.3.3. Sistemin Klasik ARX Modelinin Oluşturulması

MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla sistem için en uygun klasik ARX model yapısı ve parametreleri belirlendi.

$$y(k) - 1.75118357333333*y(k-1) + 0.78662812888889*y(k-2) = 0.01990368000000*u(k-1) + 0.01837644000000*u(k-2) \quad (5.30)$$

Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları Şekil 5.19'teki gibi gözlendi.



Şekil 5.19: Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları

Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları, uygulanan birim basamak işareti süresince karşılaştırıldığında RMSE değeri aşağıdaki gibi verildi.

$$RMSE = 6.444e\text{-}014 \quad (5.31)$$

5.3.4. Sonuç

Bu uygulamada, 2. dereceden, gecikmesiz ve doğrusal bir dinamik sistemin Modelbul programı vasıtasıyla bulanık modeli; MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla da klasik ARX modeli oluşturulmuştur. Yapılan testler sonucunda incelenen sistemin her iki yöntemle de modellenebildiği, fakat bulanık modelin klasik ARX modele oranla sistemi daha iyi ifade ettiği gözlenmiştir.

5.4. Uygulama 4

Bu çalışmada, transfer fonksiyonu Eşitlik 5.32 ile ifade edilen 2. dereceden, gecikmeli ve doğrusal bir dinamik sistem için en uygun ARX yapılı T-S Tip Bulanık Model, Modelbul programı vasıtasıyla oluşturuldu.

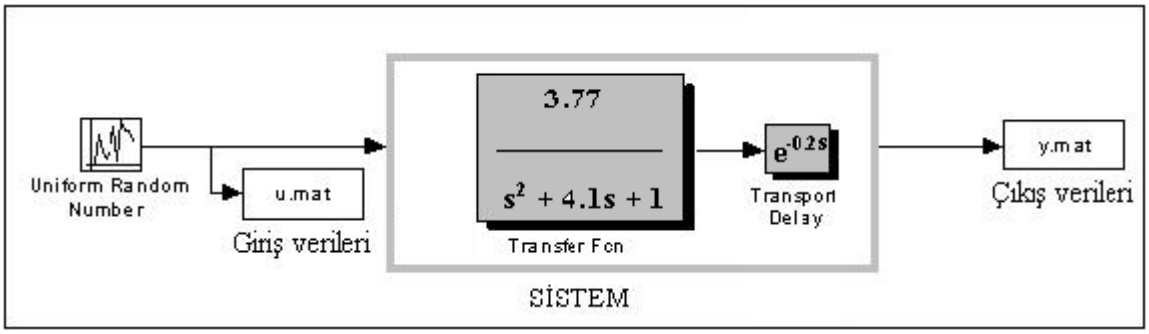
$$G(s) = \frac{3.77}{s^2 + 4.1s + 1} e^{-0.2s} \qquad (5.32)$$

Aynı sistemin MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla en uygun klasik ARX modeli de oluşturularak, Modelbul programı vasıtasıyla elde edilen bulanık model ile klasik ARX modelin doğrulukları karşılaştırıldı.

5.4.1. Giriş-Çıkış Verilerinin Toplanması

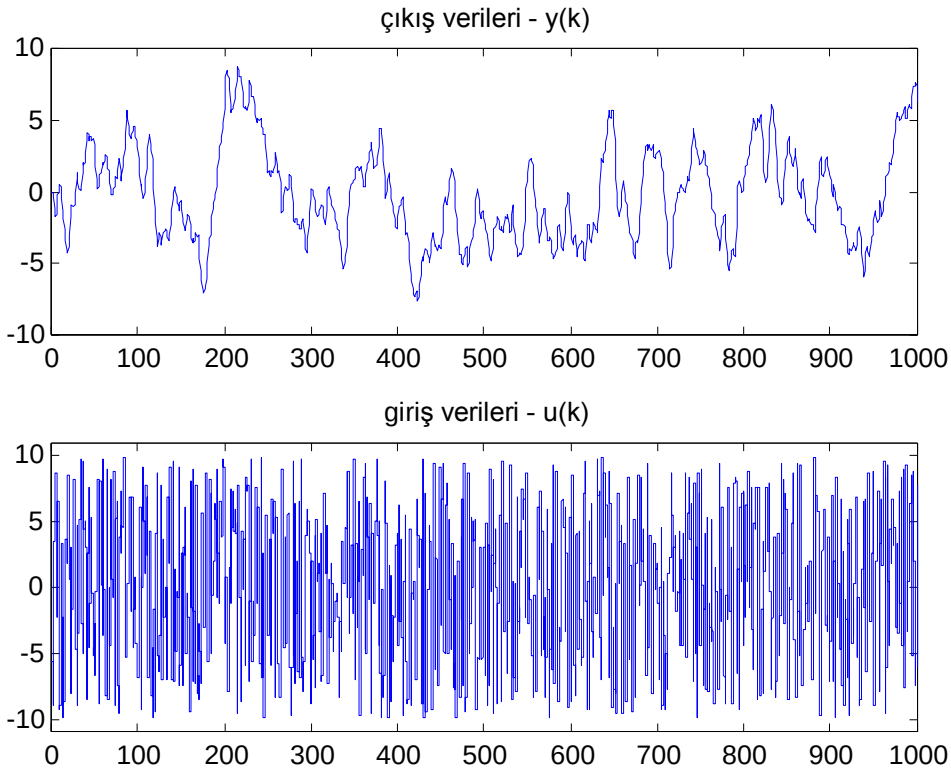
Bulanık modelin eğitilmesi için sistem SİMULİNK ortamında aşağıdaki simulasyon parametreleri seçilerek Şekil 5.20'deki gibi gerçeklendi.

- u(t) kotrol işareti: [-10,10] aralığında seçilerek 'Uniform Random Number' bloğu tarafından rastgele üretildi.
- Solver olarak ODE4(Runge-Kutta) seçildi.
- Örnekleme zamanı 0.2 s seçildi.
- Simülasyon 200 s için yapılarak sisteme ait 1001 giriş-çıkış verisi toplandı.



Şekil 5.20: Sisteme ait giriş-çıkış verilerinin toplanması

Sistemden toplanan veriler Şekil 5.21'de verilmiştir.

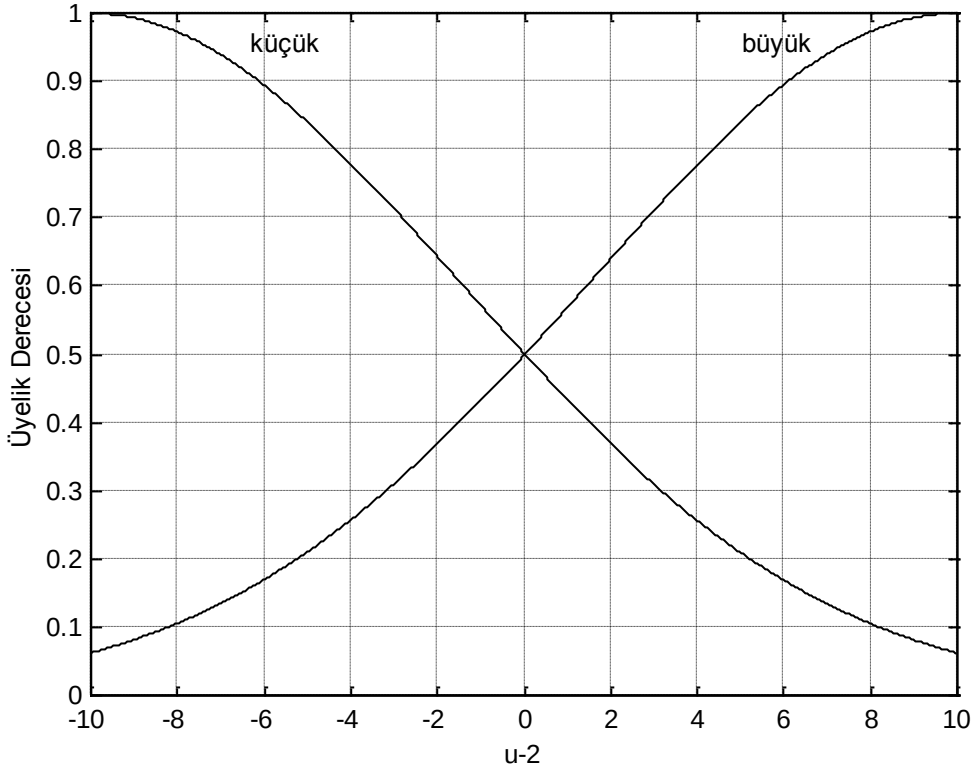


Şekil 5.21: Giriş-u(k) ve çıkış-y(k) verileri

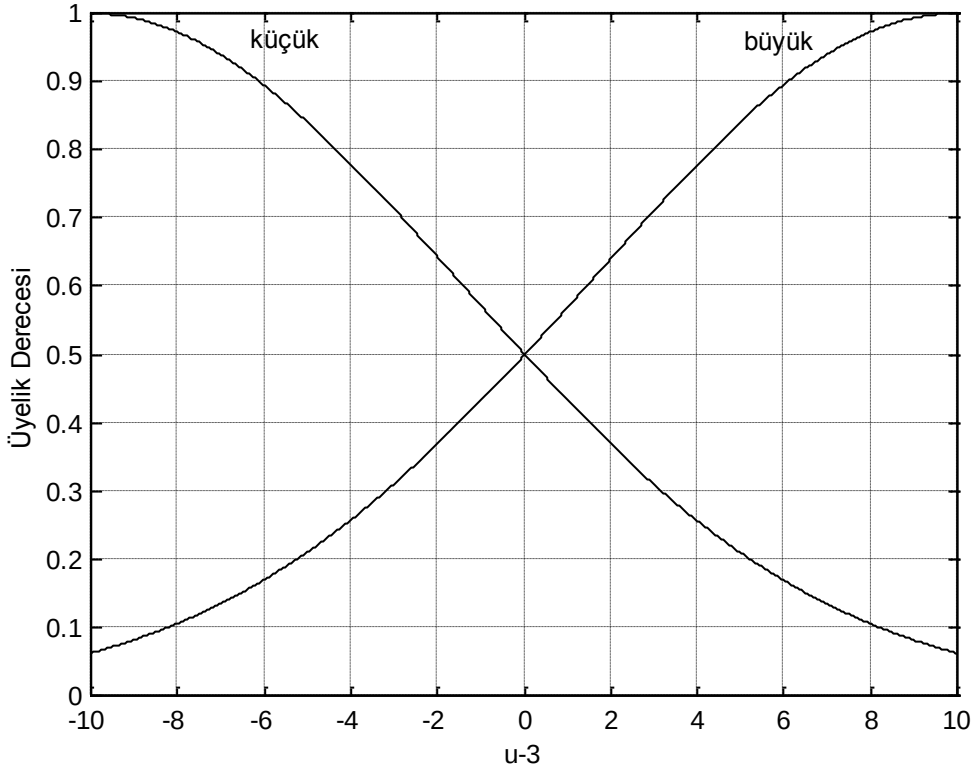
5.4.2. Bulanık Modelin Modelbul Programı İle Belirlenmesi

Sisteme ait giriş-çıkış verilerine göre bulanık modelin oluşturulması için Modelbul programı çalıştırılarak sistemin bulanık bir modeli elde edildi.

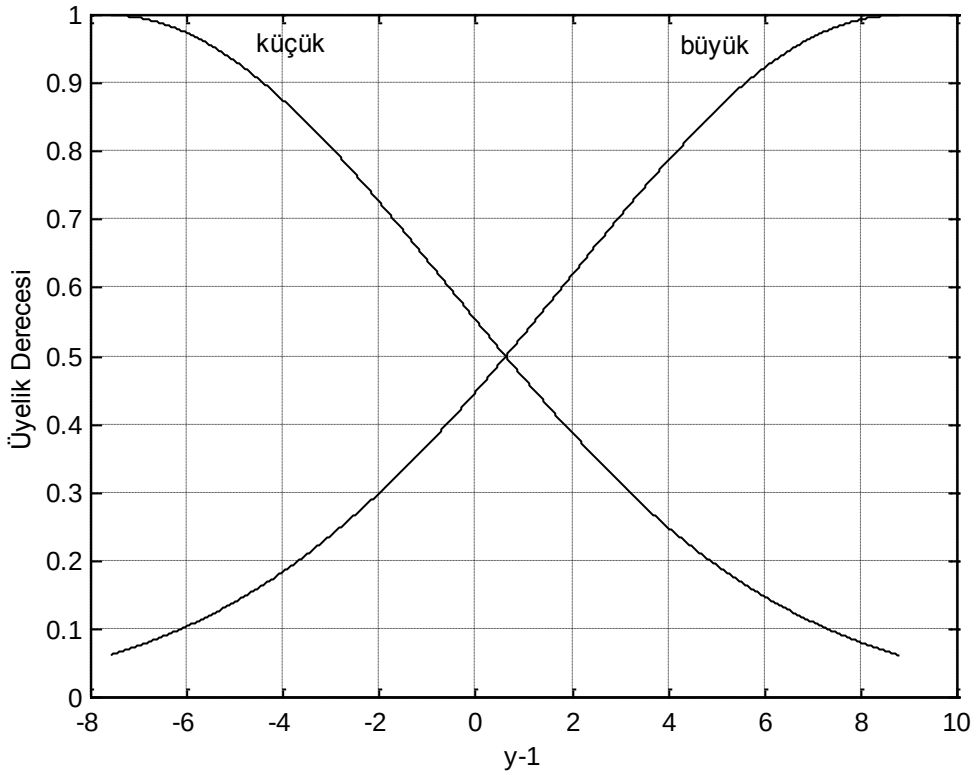
Modelbul programı tarafından sistemi en iyi ifade edecek bulanık modelin giriş değişkenleri u(k-2), u(k-3), y(k-1) ve y(k-2) olarak belirlendi. Giriş değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 5.22-5.25'teki gibi belirlendi.



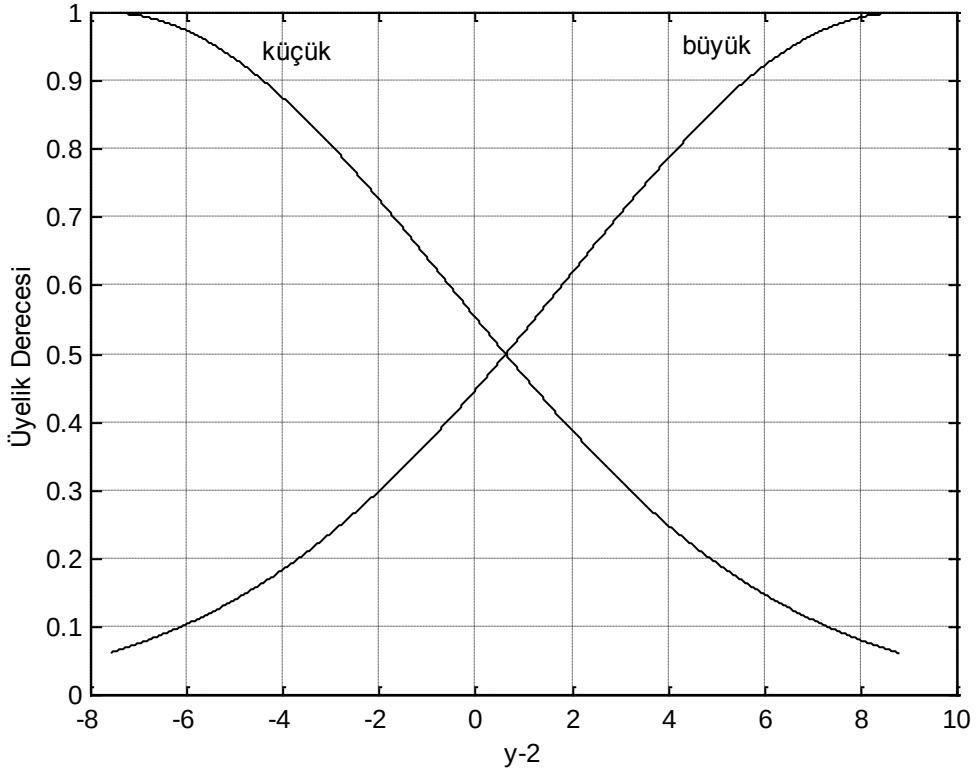
Şekil 5.22: Bulanık model giriş değişkeni u(k-2) için tanımlanan üyelik fonksiyonu



Şekil 5.23: Bulanık model giriş değişkeni u(k-3) için tanımlanan üyelik fonksiyonu



Şekil 5.24: Bulanık model giriş değişkeni y(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu



Şekil 5.25: Bulanık model giriş değişkeni y(k-2) için tanımlanan üyelik fonksiyonu

Modelbul programı vasıtasıyla belirlenen kural çıkış formatı ve hesaplanan parametreler ile oluşturulan ARX yapılı T-S Tip bulanık modelin kural tabanı aşağıda verilmiştir:

K1 : EĞER u(k-2) ‘Küçük’ ve u(k-3) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Küçük’
O HALDE y(k) = 0.00000000000385+ 0.05876424666674* u(k-2) +
0.04342619435558*u(k-3)+ 1.41519440666647* y(k-1) - 0.44230062444395*y(k-2)

K2 : EĞER u(k-2) ‘Küçük’ ve u(k-3) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Büyük’
O HALDE y(k) = -0.00000000009861+ 0.05876424666624* u(k-2)+
0.04342619435550*u(k-3)+ 1.41519440665129* y(k-1) - 0.44230062442745*y(k-2)

K3 : EĞER u(k-2) ‘Küçük’ ve u(k-3) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Küçük’
O HALDE y(k) = 0.00000000009461+ 0.05876424666681* u(k-2) +
0.04342619435561*u(k-3)+ 1.41519440665147* y(k-1) - 0.44230062442940*y(k-2)

K4 : EĞER u(k-2) ‘Küçük’ ve u(k-3) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Büyük’
O HALDE y(k) = -0.00000000000197+ 0.05876424666679* u(k-2) +
0.04342619435551*u(k-3)+ 1.41519440666710* y(k-1) - 0.44230062444515*y(k-2)

K5 : EĞER u(k-2) ‘Küçük’ ve u(k-3) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Küçük’
O HALDE y(k) = -0.00000000000352 + 0.05876424666659* u(k-2) +
0.04342619435557*u(k-3)+ 1.41519440666704* y(k-1) - 0.44230062444460*y(k-2)

K6 : EĞER u(k-2) ‘Küçük’ ve u(k-3) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Büyük’
O HALDE y(k) = 0.00000000011267+ 0.05876424666700* u(k-2) +
0.04342619435552*u(k-3) +1.41519440668550* y(k-1) - 0.44230062446541*y(k-2)

K7 : EĞER u(k-2) ‘Küçük’ ve u(k-3) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Küçük’
O HALDE y(k) = -0.00000000010821+ 0.05876424666659* u(k-2) +
0.04342619435560*u(k-3) +1.41519440668345* y(k-1) - 0.44230062446020*y(k-2)

K8 : EĞER u(k-2) ‘Küçük’ ve u(k-3) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Büyük’
O HALDE y(k) = 0.00000000000098+ 0.05876424666658* u(k-2) +
0.04342619435552*u(k-3) +1.41519440666612* y(k-1) - 0.44230062444398*y(k-2)

K9 : EĞER u(k-2) ‘Büyük’ ve u(k-3) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Küçük’ O HALDE y(k) = -0.00000000000396+ 0.05876424666674* u(k-2) + 0.04342619435555*u(k-3) +1.41519440666684* y(k-1) - 0.44230062444494*y(k-2)

K10 : EĞER u(k-2) ‘Büyük’ ve u(k-3) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Büyük’ O HALDE y(k) = 0.00000000011865+ 0.05876424666636* u(k-2) + 0.04342619435556*u(k-3) +1.41519440668442* y(k-1) - 0.44230062446374*y(k-2)

K11 : EĞER u(k-2) ‘Büyük’ ve u(k-3) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Küçük’ O HALDE y(k) = -0.00000000011505+ 0.05876424666674* u(k-2) + 0.04342619435556*u(k-3) +1.41519440668675* y(k-1) - 0.44230062446469*y(k-2)

K12 : EĞER u(k-2) ‘Büyük’ ve u(k-3) ‘Küçük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Büyük’ O HALDE y(k) = 0.00000000000237+ 0.05876424666676* u(k-2) + 0.04342619435555*u(k-3) +1.41519440666639* y(k-1) - 0.44230062444446*y(k-2)

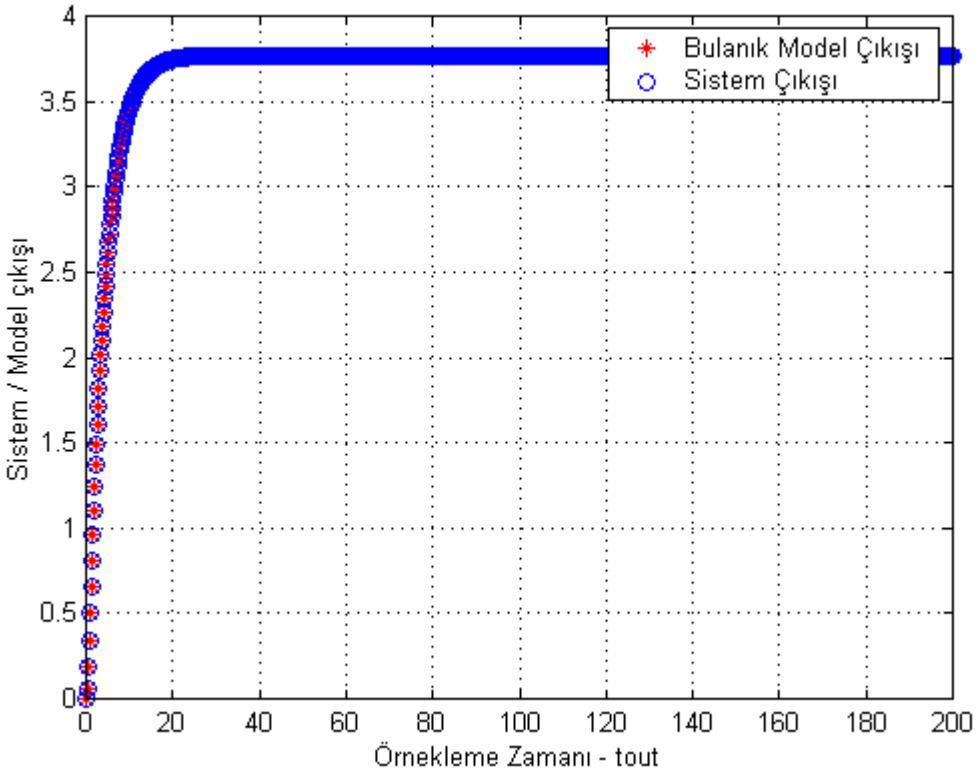
K13 : EĞER u(k-2) ‘Büyük’ ve u(k-3) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Küçük’ O HALDE y(k) = 0.00000000000340+ 0.05876424666660* u(k-2) + 0.04342619435556*u(k-3) +1.41519440666625* y(k-1) - 0.44230062444376*y(k-2)

K14 : EĞER u(k-2) ‘Büyük’ ve u(k-3) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Küçük’ ve y(k-2) ‘Büyük’ O HALDE y(k) = -0.00000000003498+ 0.05876424666699* u(k-2) + 0.04342619435515*u(k-3) +1.41519440666296* y(k-1) - 0.44230062443865*y(k-2)

K15 : EĞER u(k-2) ‘Büyük’ ve u(k-3) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Küçük’ O HALDE y(k) = 0.00000000003120+ 0.05876424666656* u(k-2) + 0.04342619435595*u(k-3) +1.41519440666027* y(k-1) - 0.44230062443885*y(k-2)

K16 : EĞER u(k-2) ‘Büyük’ ve u(k-3) ‘Büyük’ ve y(k-1) ‘Büyük’ ve y(k-2) ‘Büyük’ O HALDE y(k) = -0.00000000000131+ 0.05876424666660* u(k-2) + 0.04342619435556*u(k-3) +1.41519440666712* y(k-1) - 0.44230062444474*y(k-2)

Modelbul aracılığıyla sistem ve modelin basamak yanıtları Şekil 5.26’daki gibi çizdirildi.



Şekil 5.26: Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları

Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları, uygulanan birim basamak işareti süresince karşılaştırıldığında RMSE değeri aşağıdaki gibi verildi.

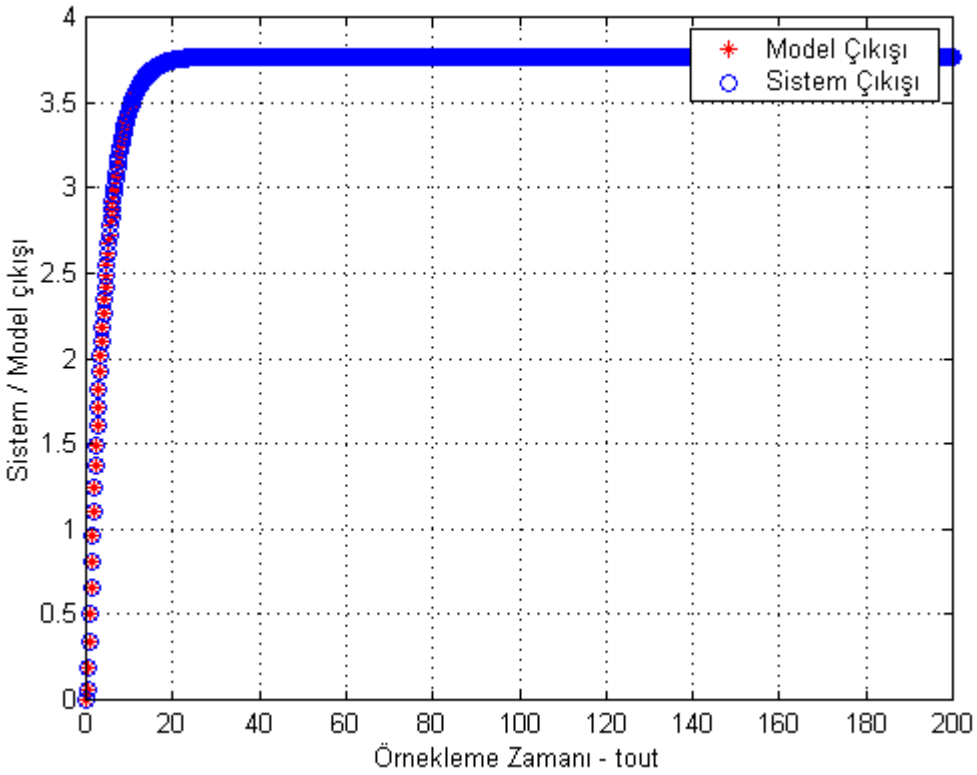
RMSE = 1.307e-013 (5.33)

5.4.3. Sistemin Klasik ARX Modelinin Oluşturulması

MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla sistem için en uygun klasik ARX model yapısı ve parametreleri belirlendi.

$$y(k) - 1.41519440666666\ *y(k-1) + 0.44230062444444\ *y(k-2) = 0.05876424666667\ *u(k-2) + 0.04342619435556\ *u(k-3) \quad (5.34)$$

Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları Şekil 5.27'teki gibi gözlendi.



Şekil 5.27: Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları

Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları, uygulanan birim basamak işareti süresince karşılaştırıldığında RMSE değeri aşağıdaki gibi verildi.

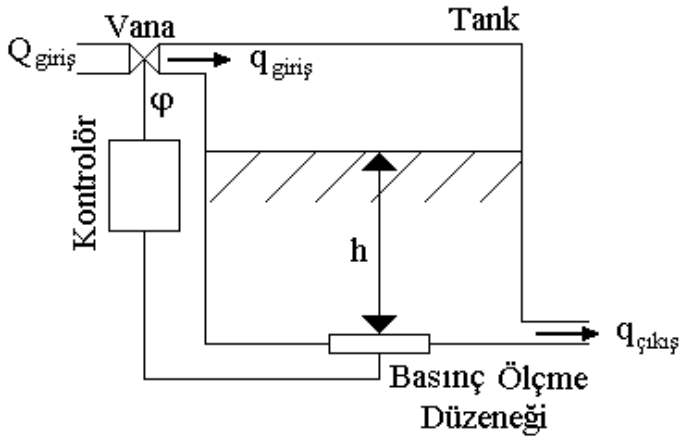
RMSE = 2.8766e-013 (5.35)

5.4.4. Sonuç

Bu uygulamada, 2. dereceden, gecikmeli ve doğrusal bir dinamik sistemin Modelbul programı vasıtasıyla bulanık modeli; MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla da klasik ARX modeli oluşturulmuştur. Yapılan testler sonucunda incelenen sistemin her iki yöntemle de modellenebildiği, fakat bulanık modelin klasik ARX modele oranla sistemi daha iyi ifade ettiği gözlenmiştir.

5.5. Uygulama 5

Bu çalışmada, Şekil 5.28'deki doğrusal olmayan bir tank sıvı seviye sistemi için en uygun ARX yapılı T-S tip bulanık model, Modelbul programı vasıtasıyla oluşturuldu.



Şekil 5.28: Tek tank sıvı seviye sistemi

Aynı sistemin MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla en uygun klasik ARX modeli de oluşturularak, Modelbul programı vasıtasıyla elde edilen bulanık model ile klasik ARX modelin doğrulukları karşılaştırıldı.

5.5.1. Giriş-Çıkış Verilerinin Toplanması

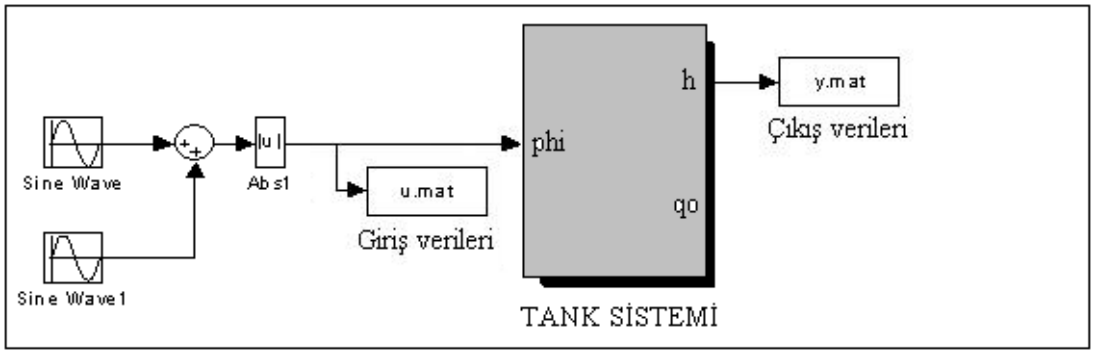
Eşitlik 5.36-5.38 denklemleri ile ifade edilen sistem SİMULİNK ortamında Şekil 5.29'daki gibi gerçeklenmiştir.

$$q_{giriş}(t) = Q_{giriş} * \sin(\varphi(t)), \quad \varphi(t) \in [0, \pi/2] \tag{5.36}$$

$$q_{çıkış}(t) = a_{çıkış} * \sqrt{2gh(t)}, \quad g = 9.81\ m\,s^{-2} \tag{5.37}$$

$$h(t) = h(0) + \frac{1}{A}\int_0^t (q_{giriş}(\tau) - q_{çıkış}(\tau))\,d\tau \tag{5.38}$$

Burada h(0) = 2 m, A = 1 m^2, $a_{çıkış}$ = 0.01 m^2, $Q_{giriş}$ = 0.12 m^3s^{-1} alınmıştır.

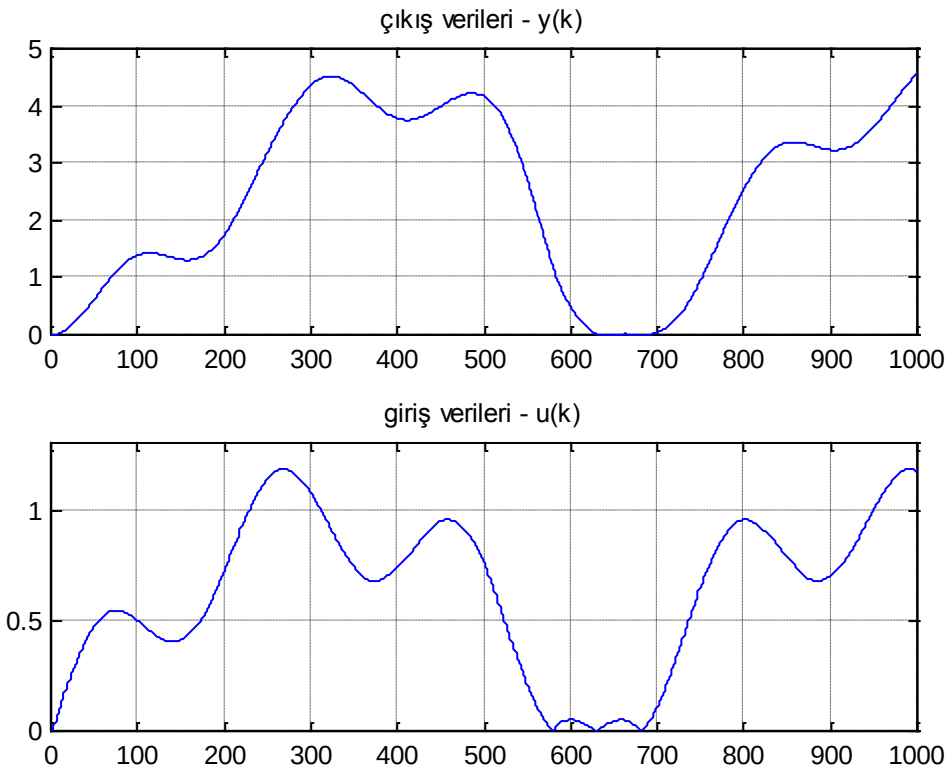


Şekil 5.29: Sisteme ait giriş-çıkış verilerinin SİMULİNK ortamında toplanması

Bulanık modelin eğitilmesi için SİMULİNK ortamında gerçeklenen Tank sisteminin giriş-çıkış verileri aşağıdaki simulasyon parametreleri seçilerek toplandı.

- u(t) kotrol işareti, genlik:0.97 Frekans:0.005 rad/sec ve genlik:0.25 Frekans:0.03 rad/sec olan iki sinusoidal fonksiyondan elde edildi.
- Solver olarak ODE4(Runge-Kutta) seçildi.
- Örnekleme zamanı 1 s seçildi.
- Simülasyon 1000 s için yapılarak sisteme ait 1000 giriş-çıkış verisi toplandı.

Sistemden toplanan veriler Şekil 5.30'da verilmiştir.

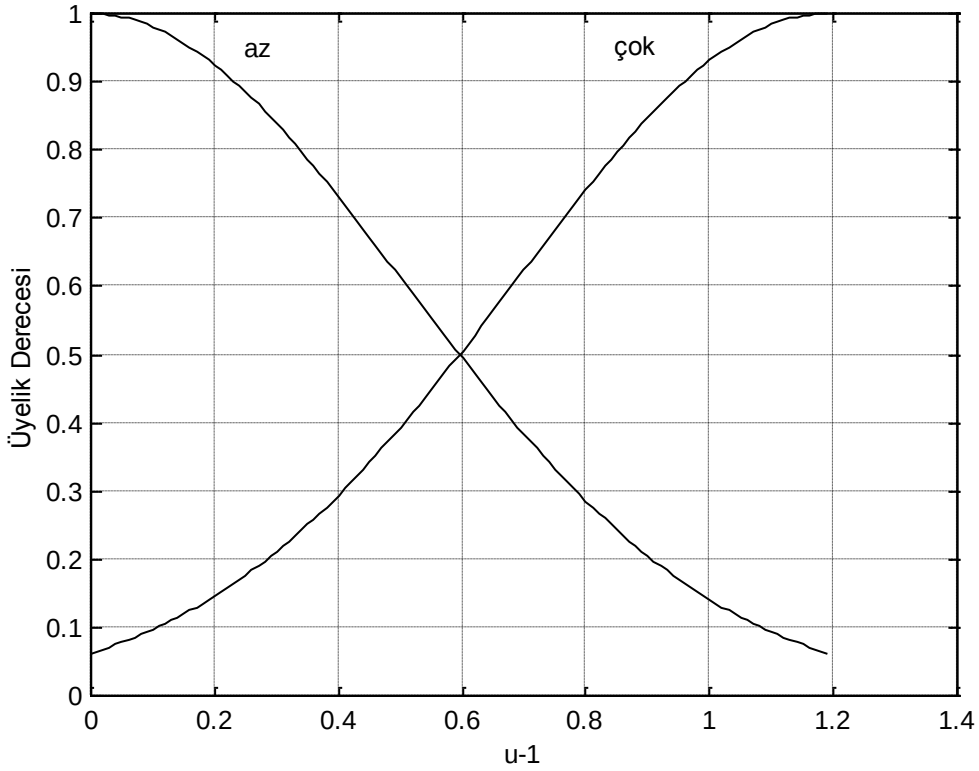


Şekil 5.30: Giriş-u(k) ve çıkış-y(k) verileri

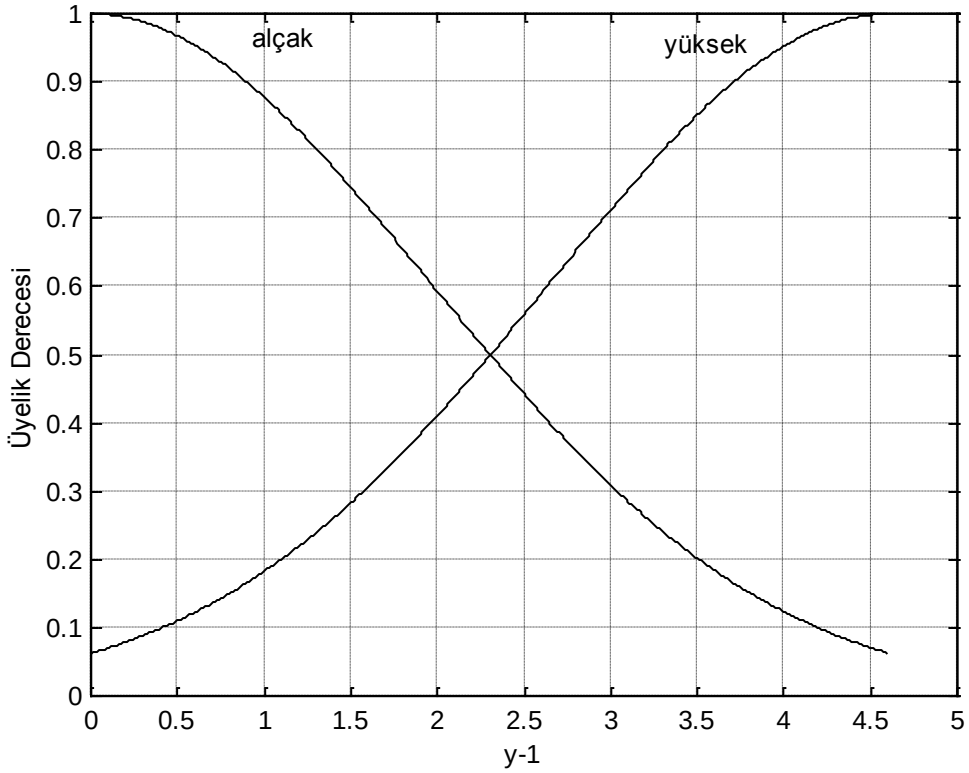
5.5.2. Bulanık Modelin Modelbul Programı İle Belirlenmesi

Sisteme ait giriş-çıkış verilerine göre bulanık modelin oluşturulması için Modelbul programı çalıştırılarak sistemin bulanık bir modeli elde edildi.

Modelbul programi kullanilarak sistemi en iyi ifade edecek bulanık modelin giriş değişkenleri u(k-1) ve y(k-1) olarak belirlendi. Giriş değişkenleri için kullanılan üyelik fonksiyonları Şekil 5.31-5.32'deki gibi belirlendi.



Şekil 5.31: Bulanık model giriş değişkeni u(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu



Şekil 5.32: Bulanık model giriş değişkeni y(k-1) için tanımlanan üyelik fonksiyonu

Modelbul programı vasıtasıyla belirlenen kural çıkış formatı ve hesaplanan parametreler ile oluşturulan ARX yapılı T-S Tip bulanık modelin kural tabanı aşağıda verilmiştir:

K1 : EĞER u(k-1) 'Az' ve y(k-1) 'Alçak' ise O HALDE (5.39)

y(k) = -0.01142828987483+0.10057888942882 * u(k-1)+0.94751974448603 *y(k-1)

K2 : EĞER u(k-1) 'Az' ve y(k-1) 'Yüksek' ise O HALDE (5.40)

y(k) = 0.07139145438195+0.06158794733403 * u(k-1)+0.96576518949115 *y(k-1)

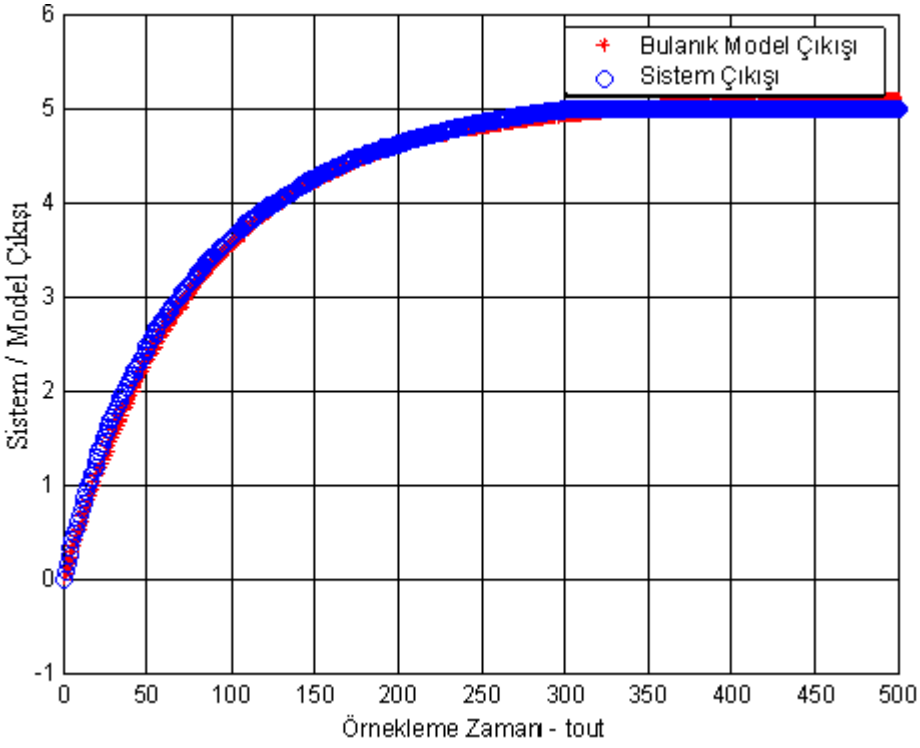
K3 : EĞER u(k-1) 'Çok' ve y(k-1) 'Alçak' ise O HALDE (5.41)

y(k) = 0.02387083661838+0.02819213076874 * u(k-1)+1.00407407833893 *y(k-1)

K4 : EĞER u(k-1) 'Çok' ve y(k-1) 'Yüksek' ise O HALDE (5.42)

y(k) = -0.02697752387722+0.04362598373502 * u(k-1)+0.99826265742086 *y(k-1)

Sistem ve bulanık modelin basamak yanıtları Şekil 5.33'deki gibi gözlendi.

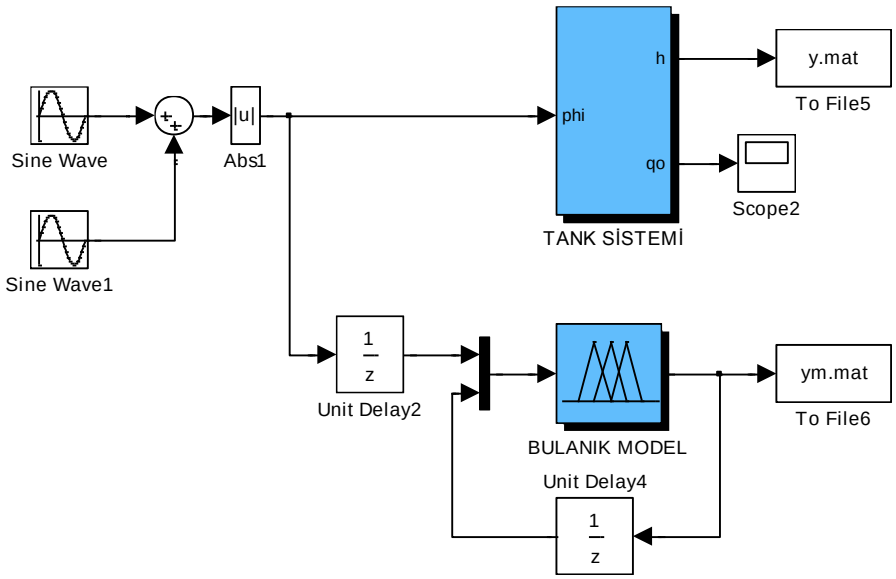


Şekil 5.33: Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları

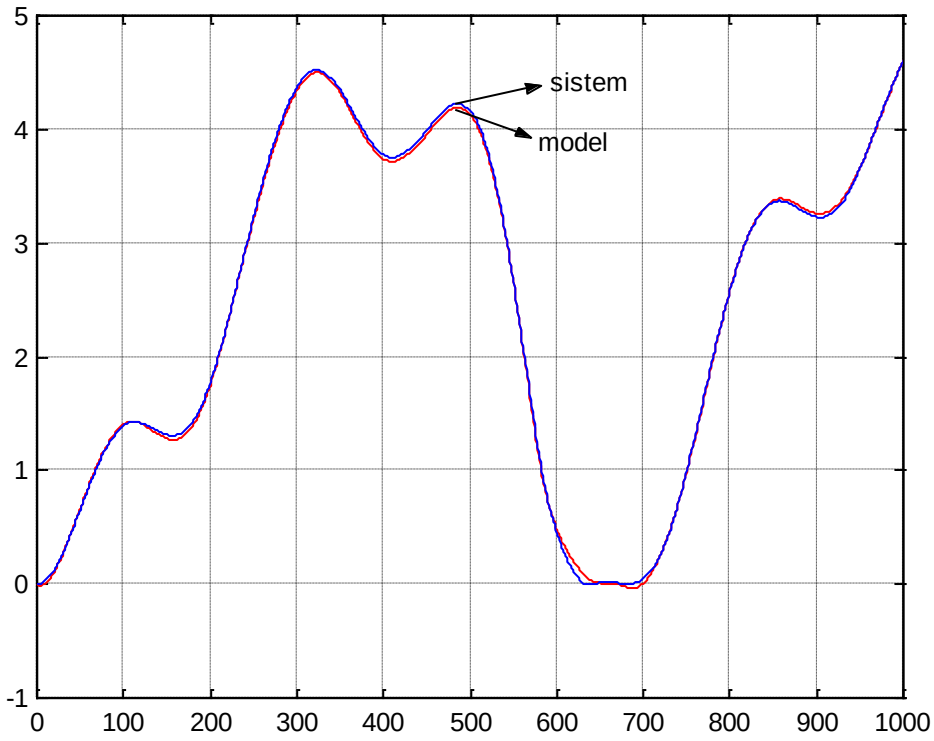
Sistem ve Bulanık modelin basamak yanıtları, uygulanan birim basamak işareti süresince karşılaştırıldığında RMSE değeri Eşitlik 5.43'deki gibi verildi.

RMSE = 0.08432048276022 (5.43)

Modeli eğitmek için kullanılan veriler, sistem ve bulanık modele Şekil 5.34'teki SİMULİK düzeneği vasıtasıyla uygulandığında Şekil 5.35'teki sonuç elde edildi.



Şekil 5.34: Sistem ve model çıkış verilerinin SİMULİNK ortamında karşılaştırılması

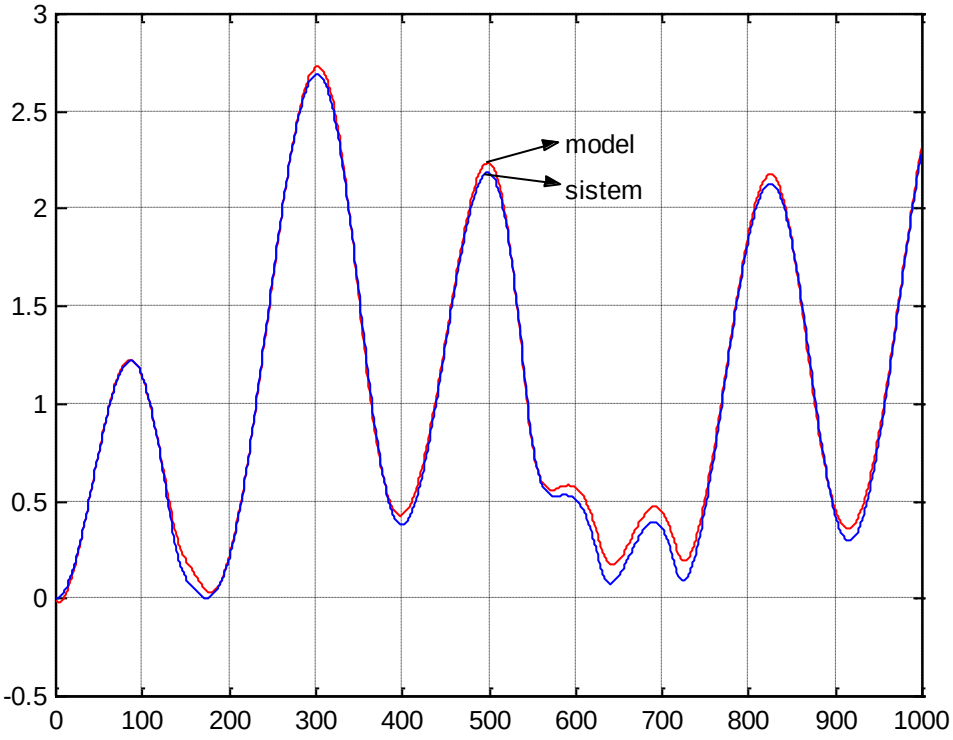


Şekil 5.35: Eğitim verilerine sistem ve bulanık modelin cevabı

Eğitim verilerine karşı düşen sistem ve model çıkışları için RMSE değeri hesaplandı:

RMSE = 0.02679865233994 (5.44)

Şekil 5.34'teki test, u(t) kotrol işareti, genlik:0.5 Frekans:0.005 rad/sec ve genlik:0.4 Frekans:0.03 rad/sec olan iki sinusoidal fonksiyondan elde edilmek suretiyle farklı giriş verileri ile tekrarlandığında Şekil 5.36'daki sonuçlar elde edildi.



Şekil 5.36: Farklı giriş verileri için sistem ve bulanık modelin cevabı

Uygulanan farklı verilere karşı düşen sistem ve model çıkışları için RMSE değeri hesaplandı:

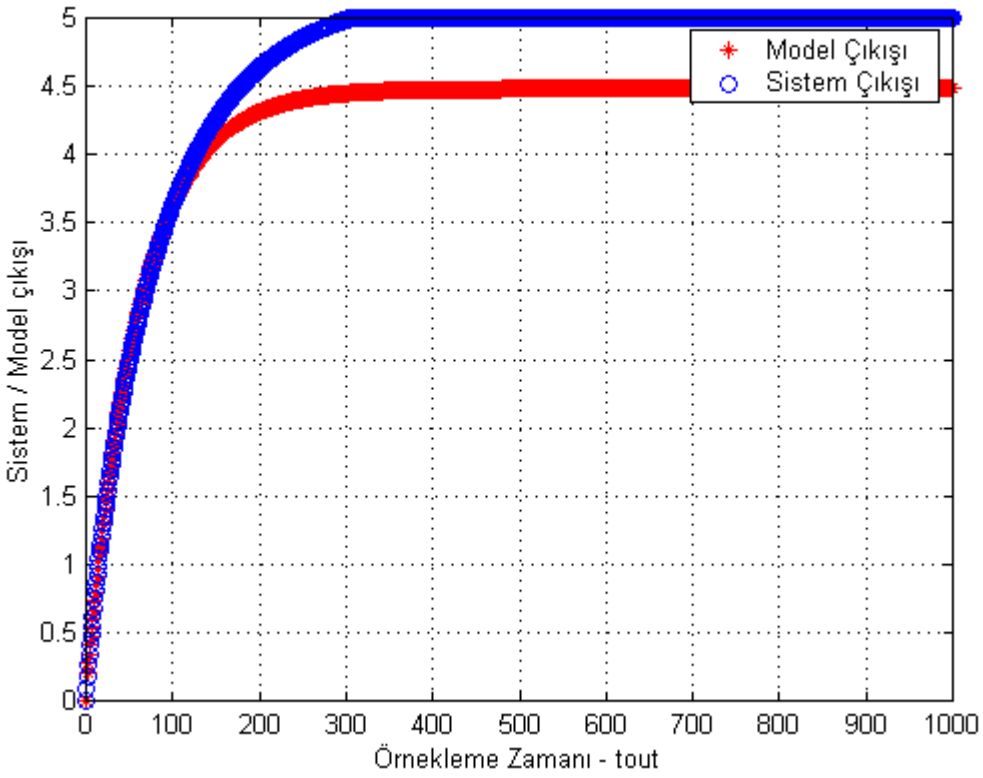
RMSE = 0.04567395923676 (5.45)

5.5.3. Sistemin Klasik ARX Modelinin Oluşturulması

MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla sistem için en uygun klasik ARX model yapısı ve parametreleri belirlendi.

y(k) - 0.98379797587941 *y(k-1) = -2.65671049820428*u(k-1) (5.46)
+5.47442456232231*u(k-2) - 2.74510926483627*u(k-3)

Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları Şekil 5.37'deki gibi gözlendi.

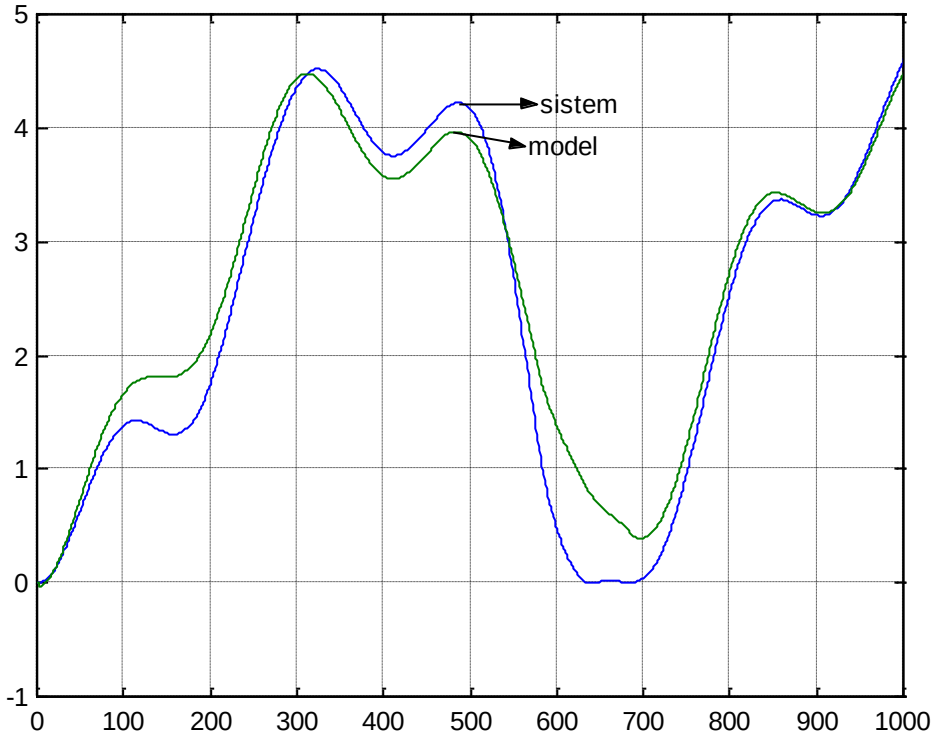


Şekil 5.37: Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları

Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları, uygulanan birim basamak işareti süresince karşılaştırıldığında RMSE değeri aşağıdaki gibi verildi.

RMSE = 0.47060893534687 (5.47)

Modeli eğitmek için kullanılan veriler, sistem ve klasik ARX uygulandığında Şekil 5.38'deki sonuç elde edildi.

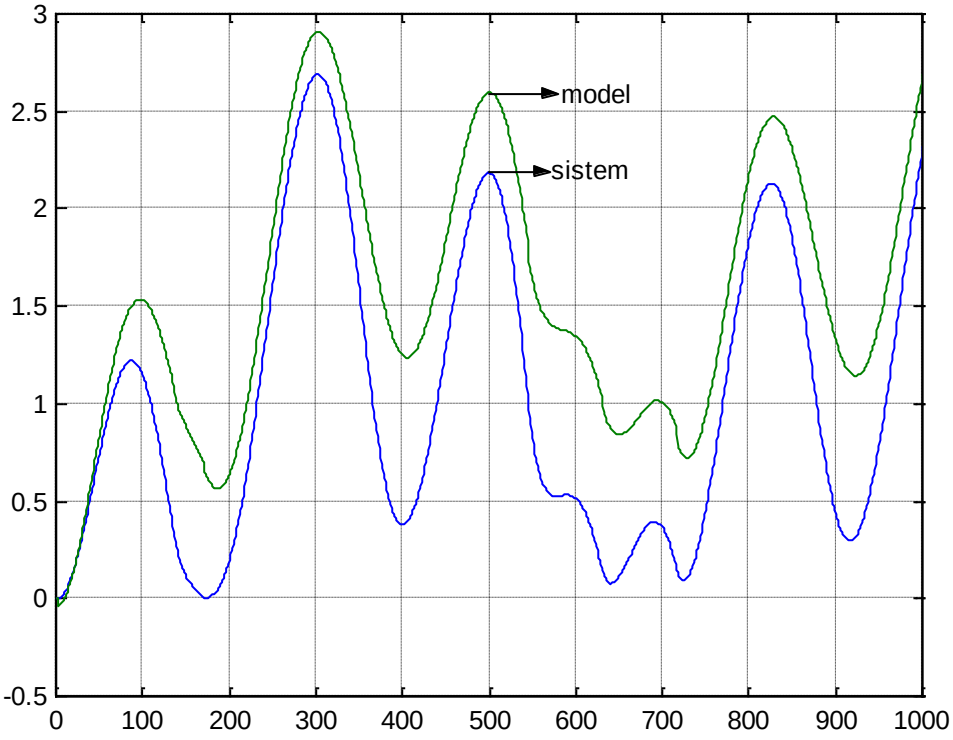


Şekil 5.38: Eğitim verilerine sistem ve klasik ARX modelin cevabı

Eğitim verilerine karşı düşen sistem ve model çıkışları için RMSE değeri hesaplandı:

RMSE = 0.34270526232527 (5.48)

Sistem ve klasik ARX modele, u(t) kotrol işareti, genlik:0.5 Frekans:0.005 rad/sec ve genlik:0.4 Frekans:0.03 rad/sec olan iki sinusoidal fonksiyondan elde edilmek suretiyle farklı giriş verileri uygulandığında Şekil 5.39'daki sonuç elde edildi.



Şekil 5.39: Farklı giriş verileri için sistem ve klasik ARX modelin cevabı

Uygulanan farklı verilere karşı düşen sistem ve model çıkışları için RMSE değeri hesaplandı:

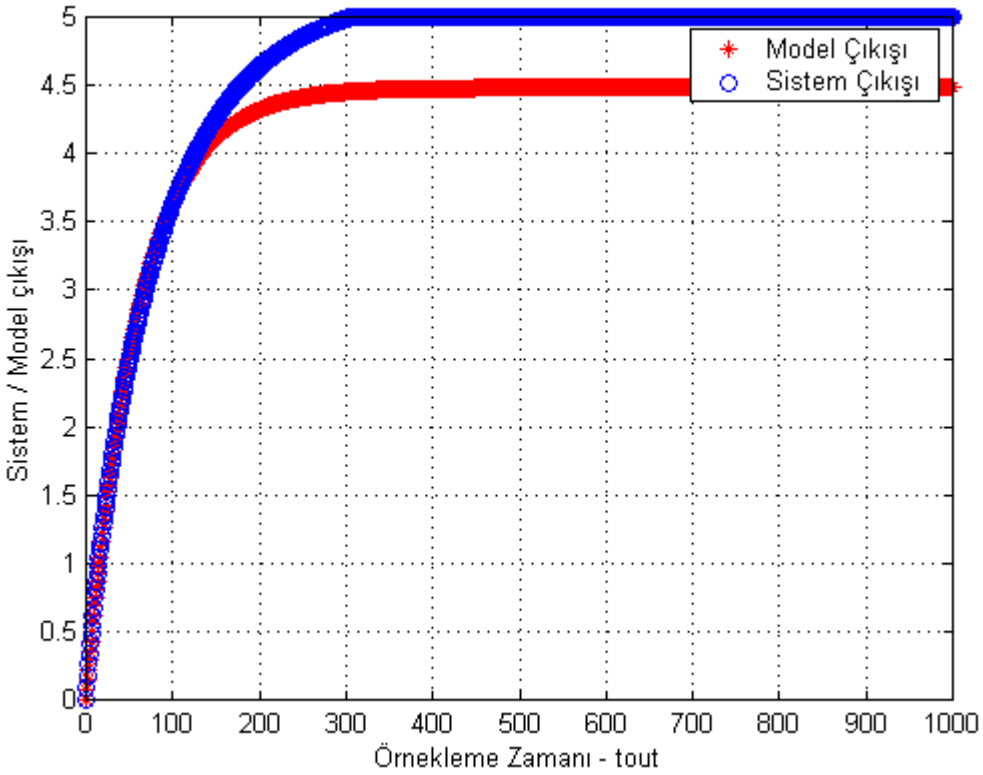
RMSE = 0.58306321205815 (5.49)

5.5.4. Klasik ARX Modelin Modelbul Verilerine Göre Oluşturulması

Modelbul programı vasıtasıyla saptanan bulanık model giriş değişkenleri (u(k-1) ve y(k-1)) kullanılarak aynı sistem için farklı bir klasik ARX modeli elde edildi:

y(k) - 0.98351372059267*y(k-1) = 0.07389362429463*u(k-1) (5.50)

Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları Şekil 5.40'taki gibi gözlendi

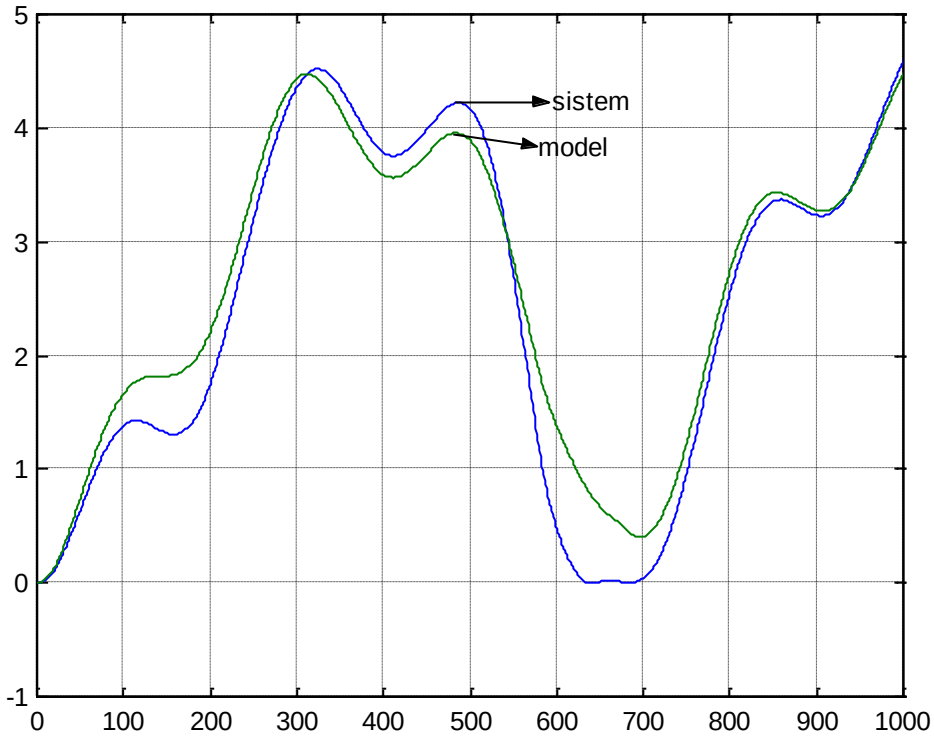


Şekil 5.40: Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları

Sistem ve klasik ARX modelin basamak yanıtları, uygulanan birim basamak işareti süresince karşılaştırıldığında RMSE değeri aşağıdaki gibi verildi.

RMSE = 0.46082995828936 (5.51)

Modeli eğitmek için kullanılan veriler, sistem ve klasik ARX uygulandığında Şekil 5.41'deki sonuç elde edildi.

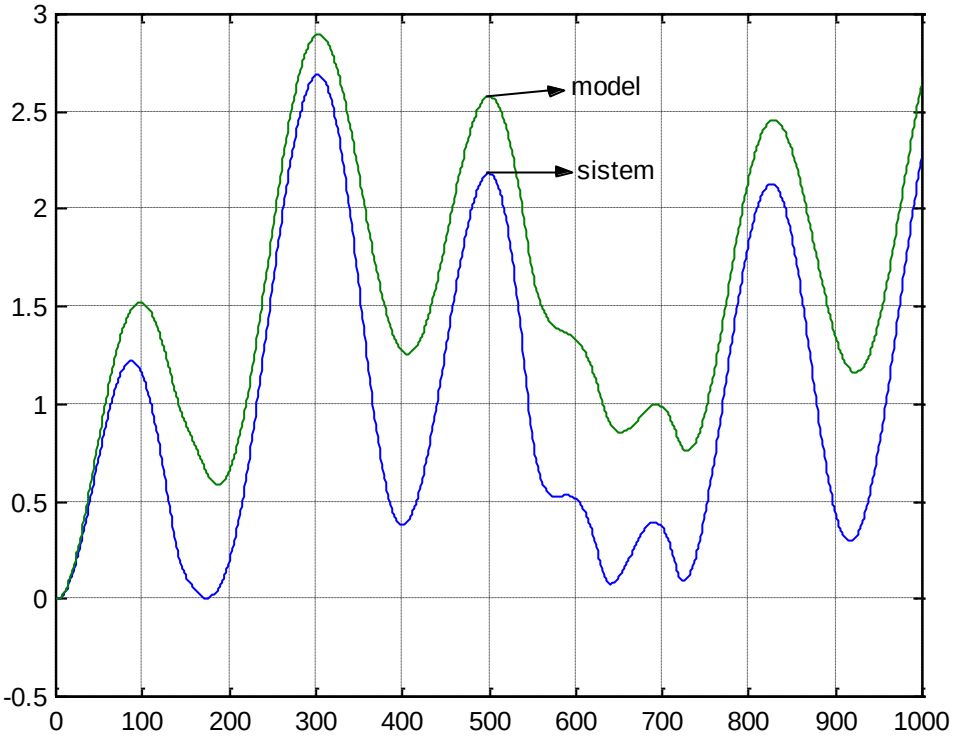


Şekil 5.41: Eğitim verilerine sistem ve klasik ARX modelin cevabı

Eğitim verilerine karşı düşen sistem ve model çıkışları için RMSE değeri hesaplandı.

RMSE = 0.34466281756232 (5.52)

Sistem ve klasik ARX modele, u(t) kotrol işareti, genlik:0.5 Frekans:0.005 rad/sec ve genlik:0.4 Frekans:0.03 rad/sec olan iki sinusoidal fonksiyondan elde edilmek suretiyle farklı giriş verileri farklı giriş uygulandığında Şekil 5.42'deki sonuç elde edildi.



Şekil 5.42: Farklı giriş verileri için sistem ve klasik ARX modelin cevabı

Uygulanan farklı verilere karşı düşen sistem ve model çıkışları için RMSE değeri hesaplandı.

RMSE = 0.58654522234608 (5.53)

5.5.5. Sonuç

Bu uygulamada, doğrusal olmayan dinamik bir sistemin Modelbul programı vasıtasıyla bulanık modeli; MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla da iki farklı klasik ARX modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan modeller, basamak yanıtlarının yanısıra modeli eğitmek için kullanılan giriş verileri ve farklı giriş verileri uygulanarak da test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda incelenen sistemin doğrusal olmayan karakteristiğinden dolayı klasik ARX yapısıyla modellenemediği, fakat Modelbul programı vasıtasıyla oluşturulan bulanık modelin sistemi ifade etmekte oldukça başarılı olduğu gözlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, en genel tanıma yöntemlerinden biri olan En Küçük Kareler Yöntemi bulanık sistemlere uyarlanarak, T-S tip bulanık model parametrelerinin kestirimindeki işlem yükünü en aza indiren ve sistem dinamiklerinin önceden bilinmesine gerek kalmadan sadece giriş-çıkış verilerine göre farklı yapılarda bulanık model oluşturmaya imkan sağlayan Modelbul programı yazılmıştır.

Yapılan testler sonucunda, Modelbul programı ile 1. dereceden ya da 2. dereceden, gecikmeli ya da gecikmesiz, doğrusal ya da doğrusal olmayan, statik ya da dinamik çeşitli sistemler sadece giriş-çıkış verilerine göre başarılı olarak modellenebilmiştir.

İlk uygulamada, Modelbul programı doğrusal olmayan fonksiyonların modellenmesinde kullanılmış ve kullanıcı tarafından girilen kural sayısının sistemi yeterli sayıda doğrusal parçaya ayıracak şekilde seçilmesi ile istenilen doğrulukta modelleme yapmanın mümkün olduğu gözlenmiştir.

1. dereceden ya da 2. dereceden, gecikmeli ya da gecikmesiz doğrusal sistemler ile yapılan uygulamalarda, MATLAB sistem tanıma programları vasıtasıyla oluşturulan klasik ARX model yapısının doğrusal sistemleri oldukça başarılı olarak ifade edebildiği görülmüştür. Aynı sistemlerin Modelbul programı vasıtasıyla oluşturulan bulanık modelleri, klasik ARX yapısına oranla daha başarılı olmuştur.

Son uygulamada, endüstriyel ortamlarda sık karşılaşılan, doğrusal olmayan yapıda bir dinamik sistem incelenmiştir. Yapılan testler sonucunda incelenen sistemin doğrusal olmayan karakteristiğinden dolayı klasik ARX yapısıyla modellenemediği, fakat Modelbul programı vasıtasıyla oluşturulan bulanık modelinin sistemi ifade etmekte oldukça başarılı olduğu gözlenmiştir.

Yapılan bu çalışmanın, bulanık sistem tanıma konusunda yapılacak diğer çalışmalara rehberlik edeceği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

[1] **T. Söderström, P. Stoica,** 1989. System Identification, Prentice Hall International Series In Systems And Control Engineering, 60-67.

[2] **T. Takagi, M. Sugeno,** 1985. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control, *IEEE Trans. On Man And Cybernetics*, **smc-15(1)**, 116-132.

[3] **K. M. Passino, S. Yurkovich,** 1998. Fuzzy Control, Addison-Wesley, 235-245.

[4] **L.A. Zadeh,** 1965. Fuzzy Sets, *Inform. Contr.*, **8**, 338-353.

[5] **L.A. Zadeh,** 1973. Outline of a new approach to the analysis complex systems and decision process, *IEEE Trans. On Man And Cybernetics*, **smc-3**, 28-44.

[6] **L.A. Zadeh,** 1975. The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-III, *Information Sciences*, **9**, 43-80.

[7] **E.H. Mamdani,** 1974. Applications of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant, *Proc. IEE*, **121(12)**, 1585-1588.

[8] **R. Babuska, H.B. Verbruggen, H. Hellendoorn,** 1999. Promising Fuzzy Modeling and Control Methodologies for Industrial Applications, *Delft University of Technology, Faculty of Information Technology and System Control Engineering Laboratory internal report*, Delft, Netherlands.

[9] **Y. W. Cho, C. W. Park, M. Park,** 2001. An indirect model reference adaptive fuzzy control for SISO Takagi –Sugeno model, *Fuzzy Sets and Systems*, **131 (2002)**, 197 –215.

[10] **W. J. Chang, C. C. Sun,** 2002. Constrained fuzzy controller design of discrete Takagi –Sugeno fuzzy models, *Fuzzy Sets and Systems*, **133 (2003)**, 37 –55.

[11] **D. Kukolj,** 2002. Design of adaptive Takagi–Sugeno–Kang fuzzy models, *Applied Soft Computing*, **2 (2002)**, 89–103.

[12] **J. Abonyi, R. Babuska, M. Setnes, H.B. Verbruggen, E. Szeifert,** 1999. Constrained Parameter Estimation in Fuzzy Modeling, *1999 IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings*, August 22-25, 1999, Seoul.

[13] **O. K. Erol,** 2001. Doğrusal olmayan sistemlerin bulanık modellenmesi ve en yeni bir genetik tarama algoritması ile eniyi kontrolör tasarımı, *Doktora Tezi,* İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[14] **C. T. Sun,** 1994. Rule-base structure identification in an adaptive-network based inference system, *IEEE Trans.On Systems*, vol.2 no.1, 64-73.

[15] **G. Chen, T. T. Pham, J. J. Weiss,** 1995. Modeling of control systems, *IEEE Trans.On Aerospace And Electronic Systems,* vol.31 no.1, 414-428.

[16] **G. C. Mouzouris, J. M. Mendel,** 1997. Dynamic non-singleton logic systems for nonlinear modeling, *IEEE Trans. On Systems*, vol.5 no.2, 199-208.

[17] **L. Wang, R. Langari,** 1995. Building Sugeno-type models using discretization and orthogonal parameter estimation techniques, *IEEE Trans. On Systems*, vol.3 no.4, 454-458.

[18] **H. Hellendoorn, D. Driankov,** 1997. Fuzzy Model Identification, Springer, 55-60.

[19] **J. Abonyi,** 2003. Fuzzy Model Identification for control, Birkhauser, 29-37.

[20] **L. X. Wang,** 1994. Adaptive Fuzzy Systems and Control, Englewood Cliffs, PTR Prentice Hall, New Jersey, 19-28.

[21] **J. H. Chou, S. H. Chen,** 1998. Stability analysis of the discrete Takagi-Sugeno fuzzy model with time-varying consequent uncertainties, *Fuzzy Sets and Systems,* **118 (2001)**, 271-279.

EKLER

EK A

Takagi-Sugeno tip bulanik model cikis parametrelerinin En Küçük Kareler Yontemi vasıtasıyla bulunmasi icin oluşturulan yazilima ait kod taslağı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir.

♦ Sistemden toplanan giris(u) ve cikis(y) verilerine göre(M tane) Gauss tip uyelik fonksiyon parametrelerini hesapla
(‘$c_{i1}, c_{i2},\ldots,c_{in}$’, ‘$\sigma_{i1}, \sigma_{i2},\ldots, \sigma_{in}$’)

♦ Üyelik fonksiyonlarındaki eleman sayısı(n) ve giriş değişkeni sayısına göre kural sayisini(R) hesapla

♦ FOR d=1:M %herbir giris verisi icin

FOR i=1:R %herbir kural icin

FOR j=1:n %herbir giris degiskeni icin

$\mu_{Aij}(x_j)$ hesapla

END

$\mu_i = \Pi\mu_{Aij}(x_j)$ hesapla

END

FOR i=1:R

$\xi_i = \mu i / \sum(\mu_1+\ldots+\mu_R)$

END

$\Phi = [\xi_1,\ldots, \xi_R, x_1\xi_1,\ldots,x_1\xi_R,\ldots\ldots, x_n\xi_1,\ldots,x_n\xi_R]$ hesapla

END

♦ En Küçük Kareler yöntemi ile model parameterini(θ) hesapla

EK B

Takagi-Sugeno tip modelin bulanik sonuç çıkarım başarısının tesbiti için oluşturulan yazilima ait kod taslağı asagidaki sekilde ifade edilebilir.

♦ Sistemden toplanan giris(u) ve cikis(y) verilerine göre Gauss tip uyelik fonksiyon parametrelerini hesapla
('$c_{i1}, c_{i2},\ldots,c_{in}$', '$\sigma_{i1}, \sigma_{i2},\ldots, \sigma_{in}$')

♦ Üyelik fonksiyonlarındaki eleman sayısı(n) ve giriş değişkeni sayısına göre kural sayisini(R) hesapla

♦ FOR d=1:M %herbir giris verisi icin

FOR i=1:R %herbir kural icin

FOR j=1:n %herbir giris degiskeni icin

$\mu_{Aij}(x_j)$ hesapla

END

$\mu_i = \prod\mu_{Aij}(x_j)$ hesapla

END

FOR i=1:R

$\xi_i = \mu i / \sum(\mu_1+\ldots+\mu_R)$

END

$\Phi test = [\xi_1,\ldots, \xi_R, x_1\xi_1,\ldots,x_1\xi_R,\ldots\ldots, x_n\xi_1,\ldots,x_n\xi_R]$ hesapla

END

FOR i=1:M,

Fts(i)=θ'*Φtest islemi ile EK1'de hesaplanan Model parametrelerini(θ) kullanarak her giris icin Bulanik model cikisini(Fts) hesapla.

MSE(i)=(Fts(i)-y(i))^2;
END

♦ MSE=(sum(MSE(1,:)))/M; model çıkışı ile sistem çıkışını karşılaştırarak,
RMSE=sqrt(MSE); modelin bulanık çıkarım başarısını hesapla

ÖZGEÇMİŞ

1977 yılında İstanbul'da doğan Ünal FİLİBELİ, 1994 yılında Şehremini Lisesinden mezun oldu. Aynı yıl Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine başlayıp, 1999 yılında mezun oldu. Nortel Networks Netaş'taki çalışma hayatına 1999 yılında başlayarak Yazılım Test Mühendisliği ve Yazılım Destek Mühendisliği departmanlarında çalıştı. 2002 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği programında yüksek lisans öğrenimine başlayan Ünal FİLİBELİ, halen Nortel Networks Netas'ta Yazılım Test Mühendisi olarak çalışmaktadır.