

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GRANÜLER TİP-2 BULANIK YAPILAR KULLANILARAK SİSTEMLERİN
MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

Cenk ULU

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

MAYIS 2013

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GRANÜLER TİP-2 BULANIK YAPILAR KULLANILARAK SİSTEMLERİN
MODELLENMESİ VE KONTROLÜ**

DOKTORA TEZİ

**Cenk ULU
(504062106)**

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Anabilim Dalı

Kontrol ve Otomasyon Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA

MAYIS 2013

İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 504062106 numaralı Doktora Öğrencisi **Cenk ULU**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **“GRANÜLER TİP-2 BULANIK YAPILAR KULLANILARAK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ VE KONTROLÜ”** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. İbrahim EKSİN**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Serhat ŞEKER
İstanbul Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. İlker ÜSTOĞLU
Yıldız Teknik Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Taner ARSAN
Kadir Has Üniversitesi

Teslim Tarihi : **16 Nisan 2013**
Savunma Tarihi : **14 Mayıs 2013**

Kayalıklara..,

*İkimizdik, iki kiři deęildik
Bakıyorsak birlikte bakıyorduk gözlerimin içine
Birlikte gözlerinin içine bakıyorduk senin*

Edip Cansever

ÖNSÖZ

Bu zorlu süreç boyunca yardımlarını, engin tecrübelerini ve en önemlisi güvenlerini esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Müjde GÜZELKAYA ve Prof. Dr. İbrahim EKSİN' e, her zaman yanımda olan aileme, kardeşim olan Kerem TOKER' e, desteklerinden dolayı sevgili arkadaşım Halil MUTLU' ya ve son olarak O' na (kim ki beni bütün bütün bırakmayana) sonsuz teşekkürler ederim.

Mayıs 2013

Cenk Ulu
(Elektrik Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xix
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	4
1.2 Literatür Araştırması	6
2. TİP-2 BULANIK KÜMELER VE SİSTEMLER	9
2.1 Giriş.....	9
2.2 Tip-2 Bulanık Kümeler	9
2.3 Tip-2 Bulanık Sistemler	13
2.4 Bulanık Çıkarım Yöntemleri	15
2.4.1 Mamdani tipi çıkarım yöntemi.....	15
2.4.2 Takagi-Sugeno-Kang tipi çıkarım yöntemi.....	16
2.4.3 TSK bulanık modellerin yapıları.....	20
2.5 Tip İndirgeme İşlemi ve Aralık Tip-2 Bulanık Kümelerin Ağırlık Merkezi ...	21
3. TİP-2 BULANIK KÜMELERDE BELİRSİZLİK TABAN ALANININ OLUŞTURULMASI İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM: GRANÜLER TİP-2 ÜYELİK FONKSİYONLARI.....	27
3.1 Giriş.....	27
3.2 Granül Kavramı ve Dikdörtgen Yapıdaki Tip-2 Bulanık Granüller	29
3.2.1 Granül kavramı	29
3.2.2 Dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüller.....	30
3.3 Granüler Tip-2 Üyelik Fonksiyonları.....	32
3.3.1 Granüler tip-2 üyelik fonksiyonları ile ilgili tanımlamalar ve gösterimler32	
3.3.2 Granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının belirsizlik taban alanının oluşturulması	34
3.3.3 Granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının özellikleri ve üstünlükleri	35
3.3.3.1 Modelleme ve tasarım özellikleri.....	35
3.3.3.2 Hesaplama özellikleri.....	37
3.4 Benzetim Sonuçları	40
3.4.1 Mackey-Glass zaman serisi tahmini	40
3.4.2 Girişinde ölü bölge bulunan belirsiz parametrelili doğrusal olmayan sistemin modellenmesi.....	48
4. PARÇALI DOĞRUSAL ARALIK TİP-2 BULANIK KÜMELER İÇİN KAPALI YAPIDA TİP İNDİRGEME YÖNTEMİ	59
4.1 Giriş.....	59
4.2 Granüler Tip İndirgeme Yöntemi.....	62

4.3 Granüler Tip İndirgeme Yönteminin Parçalı Doğrusal Aralık Tip-2 Bulanık Kümelere Uygulanması	72
4.3.1 Hesaplama kesinliği karşılaştırması	74
4.3.2 Hesaplama süresi karşılaştırması	76
4.3.3 Granüler tip indirgeme yöntemin kesinlik hassasiyetini etkileyen etkenler	77
5. ARALIK TİP-2 BULANIK MANTIK KONTROLÖRLER İÇİN PD TİPİ AĞIRLIKLANDIRMALI DİNAMİK DURULAMA YÖNTEMİ	81
5.1 Giriş	81
5.2 Klasik Durulama Yöntemi	82
5.3 PD Tipi Ağırlıklandırılmalı Dinamik Durulama Yöntemi	82
5.4 Benzetim Çalışmaları	85
5.4.1 Ölü zamanlı doğrusal sistem üzerinde yapılan benzetim çalışmaları	87
5.4.2 Doğrusal olmayan sistem üzerinde yapılan benzetim çalışmaları	92
6. GERÇEK ZAMANLI KONTROL UYGULAMALARI.....	99
6.1 Giriş	99
6.2 Test Düzenegi	99
6.3 PD Tipi Ağırlıklandırılmalı Dinamik Durulama Yönteminin Uygulanması	100
6.3.1 PI tip-2 bulanık kontrolör tasarımı	100
6.3.1.1 Sistemin modellenmesi	100
6.3.1.2 Bulanık kontrolörün ölçekleme çarpanlarının seçimi	102
6.3.1.3 PD Tipi ağırlıklandırılmalı dinamik durulama yöntemi parametrelerinin seçimi	102
6.3.1.4 Tasarlanan bulanık kontrolörlerin kontrol yüzeyleri.....	102
6.3.2 Dinamik durulama yöntemi için gerçek zamanlı uygulama sonuçları	104
6.3.2.1 Nominal sistem için uygulama sonuçları	104
6.3.2.2 Bozuculara karşı kontrolör başarımlarının incelenmesi	106
6.3.2.3 Parametre belirsizliklerine karşı kontrolör başarımlarının incelenmesi	108
6.4 Granüler Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolörün Gerçek Zamanlı Uygulaması..	110
6.4.1 Granüler ve klasik tip-2 bulanık kontrolörlerin tasarımı.....	110
6.4.1.1 Sistemin modellenmesi	111
6.4.1.2 Kontrolör yapısının seçimi	113
6.4.2 Granüler tip-2 bulanık kontrolör için gerçek zamanlı uygulama sonuçları	118
6.4.2.1 Nominal sistem için uygulama sonuçları	118
6.4.2.2 Kontrolörlerin dayanıklılık başarımlarının değerlendirilmesi.....	119
6.4.2.3 Gürültüye karşı dayanıklılık başarımları	119
6.4.2.4 Bozuculara karşı dayanıklılık başarımları	121
6.4.2.5 Sistem parametre değişimlerine karşı kontrolör başarımlarının değerlendirilmesi	122
7. SONUÇLAR	126
7.1 Granüler Tip-2 Üyelik Fonksiyonları İle İlgili Sonuçlar.....	126
7.2 Granüler Tip İndirgeme Yöntemi İle İlgili Sonuçlar.....	127
7.3 PD Tipi Ağırlıklandırılmalı Dinamik Durulama Yöntemi İle İlgili Sonuçlar ..	128
7.4 Gerçek Zamanlı Kontrol Uygulamaları İle İlgili Sonuçlar.....	129
KAYNAKLAR.....	132
ÖZGEÇMİŞ.....	142

KISALTMALAR

ADDY	: PD Tipi Ağırlıklandırılmalı Dinamik Durulama Yöntemi
AT2-BK	: Aralık Tip-2 Bulanık Küme
AT2-BMK	: Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolör
AT2-ÜF	: Aralık Tip-2 Üyelik Fonksiyonu
AÜF	: Alt Üyelik Fonksiyonu
BTA	: Belirsizlik Taban Alanı
DAT2-BG	: Dikdörtgen Yapıdaki Aralık Tip-2 Bulanık Granül
DDY	: Dinamik Durulama Yöntemi
DT2-BG	: Dikdörtgen Yapıdaki Tip-2 Bulanık Granül
GA	: Genetik Algoritma
GAT2-BK	: Granüler Aralık Tip-2 Bulanık Küme
GAT2-BMK	: Granüler Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolör
GAT2-BS	: Granüler Aralık Tip-2 Bulanık Sistem
GAT2-BS-GA	: Genetik Algoritma İle En İyilenmiş Granüler Aralık Tip-2 Bulanık Sistem
GAT2-BS-SD	: En Dik Çökertme Yöntemi İle En İyilenmiş Granüler Aralık Tip-2 Bulanık Sistem
GAT2-ÜF	: Granüler Aralık Tip-2 Üyelik Fonksiyonu
GTİY	: Granüler Tip İndirgeme Yöntemi
GTİY-İO	: İyileştirme Adımının Olmadığı Granüler Tip İndirgeme Yöntemi
GT2-ÜF	: Granüler Tip-2 Üyelik Fonksiyonu
GT2-BK	: Granüler Tip-2 Bulanık Küme
G3-AT2BS	: Granüler Çözünürlüğü 3 Olan Granüler Aralık Tip-2 Bulanık Sistem
G4-AT2BS	: Granüler Çözünürlüğü 4 Olan Granüler Aralık Tip-2 Bulanık Sistem
G6-AT2BS	: Granüler Çözünürlüğü 6 Olan Granüler Aralık Tip-2 Bulanık Sistem
HKOK	: Hataların karesinin ortalamasının karekökü
HKZİ	: Hataların karesinin zaman ile çarpımının integrali
İKMY	: İyileştirilmiş Karnik-Mendel Yöntemi
KAT2-BMK	: Klasik Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolör
KAT2-BS	: Klasik Aralık Tip-2 Bulanık Sistem
KDY	: Klasik Durulama Yöntemi
KMY	: Karnik-Mendel Yöntemi
NB	: Negatif Büyük
Ö1-S1	: Öncül ve Sonuç Önermede Tip-1 Bulanık Küme Bulunan TSK Bulanık Model Yapısı
Ö2-S0	: Öncül Önermede Tip-2, Sonuç Önermede Tip-0 Bulanık Küme Bulunan TSK Bulanık Model Yapısı
Ö2-S1	: Öncül Önermede Tip-2, Sonuç Önermede Tip-1 Bulanık Küme Bulunan TSK Bulanık Model Yapısı
PB	: Pozitif Büyük
PD	: Oransal-Türev
PDAT2-BK	: Parçalı Doğrusal Aralık Tip-2 Bulanık Küme
PI	: Oransal-Integral

S	: Sıfır
SD	: En Dik Çökertme En İyileme Yöntemi (Steepest Descent)
SNR	: İşaret / Gürültü Oranı
TSK	: Takagi-Sugeno-Kang
T1-BMK	: Tip-1 Bulanık Mantık Kontrolör
T2-BK	: Tip-2 Bulanık Küme
T2-BMK	: Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolör
T2-ÜF	: Tip-2 Üyelik Fonksiyonu
ÜÜF	: Üst Üyelik Fonksiyonu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Karnik-Mendel Yöntemi.....	23
Çizelge 2.2 : İyileştirilmiş Karnik-Mendel Yöntemi	24
Çizelge 3.1 : KAT2-BS ve GAT2-BS için elde edilen HKOK sonuçları.....	46
Çizelge 3.2 : Bulanık sistemlerin HKOK sonuçlarının karşılaştırılması.....	47
Çizelge 3.3 : Genetik algoritma parametreleri.....	51
Çizelge 3.4 : Nominal sistem için KAT2-BS ve GAT2-BS' in HKOK sonuçları	54
Çizelge 3.5 : Sistem parametre belirsizlikleri durumunda KAT2-BS ve GAT2-BS' in HKOK karşılaştırma sonuçları	57
Çizelge 3.6 : SD ve GA ile en iyilenmiş bulanık sistemlerin HKOK sonuçlarının karşılaştırılması	57
Çizelge 4.1 : Granüler tip indirgeme yöntemi	71
Çizelge 4.2 : Karşılaştırmada kullanılan PDAT2-BK örnekleri.....	73
Çizelge 4.3 : Hesaplama kesinliği karşılaştırması	75
Çizelge 4.4 : Hesaplama sürelerinin karşılaştırılması.....	76
Çizelge 4.5 : $ \bar{a} - \underline{a} $ ve $ L - x_L $ değerlerinin GTİY hesaplama kesinliğine etkisi	77
Çizelge 4.6 : Seçilen köşe noktasının GTİY hesaplama kesinliği üzerindeki etkisi .	79
Çizelge 5.1 : Bulanık kontrolörde kullanılan kural tablosu.....	86
Çizelge 5.2 : Doğrusal sistem için başarımlar karşılaştırma sonuçları	91
Çizelge 5.3 : Doğrusal olmayan sistem için başarımlar karşılaştırma sonuçları	97
Çizelge 6.1 : Nominal durum için elde edilen başarımlar değerleri	106
Çizelge 6.2 : Sistem parametre belirsizlikleri durumunda kontrolör başarımları....	110
Çizelge 6.3 : Nominal durum için elde edilen başarımlar değerleri	119
Çizelge 6.4 : Sistem parametre belirsizliklerine karşı kontrolör başarımlarının karşılaştırılması	124

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Bir bulanık kümenin a) tip-1 ve b) tip-2 üyelik fonksiyonu ile ifade edilmesi	11
Şekil 2.2 : Tip-2 bulanık kümenin üç boyutlu gösterimi	11
Şekil 2.3 : Örnek bir aralık tip-2 bulanık kümenin a) iki boyutlu b) üç boyutlu görünüşü	12
Şekil 2.4 : Tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanı, alt ve üst üyelik fonksiyonları	12
Şekil 2.5 : Tip-2 bulanık sistemlerin temel yapısı	14
Şekil 2.6 : Mamdani tipi çıkarım yöntemi	16
Şekil 2.7 : TSK tipi çıkarım yöntemi	17
Şekil 2.8 : $\tilde{A}$ Aralık tip-2 bulanık kümenin a) en küçük ağırlık merkezi c_l b) en büyük ağırlık merkezi c_r c) indirgenmiş tip-1 aralık kümesi $C_{\tilde{A}}$	25
Şekil 3.1 : ‘Ağırlık’ teriminin keskin ve bulanık granülleştirilmesi	30
Şekil 3.2 : Dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granül	31
Şekil 3.3 : a) GT2-ÜF’ nun belirsizlik taban alanı b) GT2-ÜF’ nun üç boyutlu gösterimi c) daha yüksek çözünürlüğe sahip GT2-ÜF’ nun üç boyutlu gösterimi	32
Şekil 3.4 : GAT2-ÜF için örnek bir gösterim a) GAT2-ÜF’ nun belirsizlik taban alanı b) GAT2-ÜF’ nun üç boyutlu gösterimi	32
Şekil 3.5 : GT2-ÜF’ nun parametrelerinin a) belirsizlik taban alanı üzerinde b) üç boyutlu görünüm üzerinde gösterimi	33
Şekil 3.6 : Parametreleri $i=5$ ve $N_1=2$, $N_2=1$, $N_3=2$, $N_4=3$, $N_5=2$ olan GT2-ÜF gösterimi a) belirsizlik taban alanı b) üç boyutlu gösterim	34
Şekil 3.7 : DT2-BG’ lerin biraraya getirilmesinde kullanılan yapılar a) temel yapı b) dikey olarak kaydırılmış yapı c) yatay olarak kaydırılmış yapı	34
Şekil 3.8 : Yatay olarak kaydırılmış yapının dikey olarak kaydırılmış yapı cinsinden gösterimi	35
Şekil 3.9 : a) Üyelik değerlerinin belirsizlik dağılımı b) yamuk T2-ÜF ile belirsizliğin ifade edilmesi c) GT2-ÜF ile belirsizliğin ifade edilmesi	36
Şekil 3.10 : a) Yamuk b) üçgen ve c) Gauss şeklinde geleneksel yapıda oluşturulmuş granüler tip-2 üyelik fonksiyonları	36
Şekil 3.11 : a) Doğrusal olmayan b) hibrit ve c) süreksiz yapıda tanımlanmış granüler tip-2 üyelik fonksiyonları	36
Şekil 3.12 : Granüler sınır değerlerin doğrusal fonksiyon şeklinde tanımlanması	39
Şekil 3.13 : Gürültü etkimemiş ve 0 dB SNR gürültü etkimiş Mackey-Glass zaman serisi işareti	41
Şekil 3.14 : a) Ortalaması belirsizlik içeren Gauss AT2-ÜF b) granüler çözünürlüğü üç olan GAT2-ÜF	42
Şekil 3.15 : KAT2-BS’ in ayarlanan Gauss AT2-ÜF’ ları	44
Şekil 3.16 : GAT2-BS’ in ayarlanan granüler AT2-ÜF’ ları	45

Şekil 3.17 : KAT2-BS ve GAT2-BS' in a) sistem çıkışlarının ve b) modelleme hatalarının karşılaştırılması	45
Şekil 3.18 : G4-AT2BS için ayarlama sonucu elde edilen granüler üyelik fonksiyonları.....	47
Şekil 3.19 : G6-AT2B için ayarlama sonucu elde edilen granüler üyelik fonksiyonları.....	47
Şekil 3.20 : a) Doğrusal olmayan sistemin blok şeması b) sistemin ölü bölge karakteristiği	48
Şekil 3.21 : Sisteme uygulanan giriş işareti ve elde edilen sistem yanıtı	49
Şekil 3.22 : Giriş tanım uzayındaki aktif ve ölü bölgeler	50
Şekil 3.23 : a) Üçgen AT2-ÜF b) 4 granül ile oluşturulmuş GAT2-ÜF.....	50
Şekil 3.24 : Ayarlanmış üçgen AT2-ÜF' ları	52
Şekil 3.25 : Ayarlanmış granüler AT2-ÜF' ları.....	52
Şekil 3.26 : a) KAT2-BS ve b) GAT2-BS için genetik algoritma arama sonuçları ..	53
Şekil 3.27 : KAT2-BS ve GAT2-BS' in a) çıkış işaretleri b) modelleme hataları	54
Şekil 3.28 : $a=110$ için a) sistem yanıtları ve b) modelleme hata değerleri	55
Şekil 3.29 : $a=90$ için a) sistem yanıtları ve b) modelleme hata değerleri	55
Şekil 3.30 : $b=110$ için a) sistem yanıtları ve b) modelleme hata değerleri	56
Şekil 3.31 : $b=90$ için a) sistem yanıtları ve b) modelleme hata değerleri	56
Şekil 4.1 : a) Parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümesi “ $\tilde{A}$ ” b) seçilen x_L ve x_R köşe değerleri ile ortaya çıkan T1-BK' leri “ A_{T1_L} ” ve “ A_{T1_R} ”	63
Şekil 4.2 : a) “ A_{T1_L} ” ve b) “ A_{T1_R} ” bulanık kümelerinin poligon olarak gösterimi.....	64
Şekil 4.3 : BTA' nın sabit genişlikte olarak gösterimi ve ortaya çıkan alan ve ağırlık merkezlerinin aday a) L minimum ve b) R maksimum ağırlık merkezi için gösterimi.....	65
Şekil 4.4 : Sabit genişlikte olmayan belirsizlik taban alanı durumunda fazla ve az hesaplanan alanlar için ortaya çıkan olası durumların gösterimi	68
Şekil 5.1 : a) Sistem basamak cevabı b) minimum (u_l), maksimum (u_r) ve durulanmış kontrol işareti (u)	83
Şekil 5.2 : PI tipi aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörün yapısı	85
Şekil 5.3 : PI tip-2 TSK bulanık kontrolörde kullanılan üyelik fonksiyonları	86
Şekil 5.4 : a) Nominal sistem için birim basamak yanıtları b) kontrol işaretleri c) α parametresinin değişimi	88
Şekil 5.5 : a) KDY b) DDY ve c) ADDY için tip indirgeme işleminden sonra elde edilen kontrol işareti aralıkları ve durulanmış çıkış işaretleri	89
Şekil 5.6 : $K=2.5$, $\tau=2$, $L=1$ için elde edilen birim basamak yanıtları	90
Şekil 5.7 : $K=1.5$, $\tau=0.9$, $L=1$ için elde edilen birim basamak yanıtları	90
Şekil 5.8 : $K=1.5$, $\tau=2$, $L=1.7$ için elde edilen birim basamak yanıtları	91
Şekil 5.9 : a) Nominal sistem için birim basamak yanıtları b) kontrol işaretleri c) α parametresinin değişimi	93
Şekil 5.10 : a) KDY b) DDY ve c) ADDY için tip indirgeme işleminden sonra elde edilen kontrol işareti aralıkları ve durulanmış çıkış işaretleri	94
Şekil 5.11 : $a=0.9$, $b=0.6$ için elde edilen sistem birim basamak yanıtları	95
Şekil 5.12 : $a=0.9$, $b=0.4$ için elde edilen sistem birim basamak yanıtları	95
Şekil 5.13 : $a=0.8$, $b=0.5$ için elde edilen sistem birim basamak yanıtları	96
Şekil 5.14 : $a=1$, $b=0.5$ için elde edilen sistem birim basamak yanıtları	96
Şekil 6.1 : Test düzeneği.....	99
Şekil 6.2 : 2VDC referans giriş gerilimine karşı elde edilen sistem yanıtı.....	101
Şekil 6.3 : Sistem ve model yanıtlarının karşılaştırılması	102

Şekil 6.4 : a) KDY b) DDY ve c) ADDY kullanılan bulanık kontrolörün kontrol yüzeyleri.....	103
Şekil 6.5 : Nominal sistem için a) basamak yanıtları b) uygulanan kontrol işaretleri c) α değerinin değişimi.....	104
Şekil 6.6 : a) KDY b) DDY ve c) ADDY için tip indirgeme işleminden sonra elde edilen kontrol işareti aralıkları ve durulanmış kontrolör çıkışları.....	105
Şekil 6.7 : Bozucu durumunda elde edilen a) basamak yanıtları b) uygulanan kontrol işaretleri c) α değerinin değişimi.....	107
Şekil 6.8 : Kazanç değerinin 2.5 katına çıkması durumunda elde edilen a) basamak yanıtları b) uygulanan kontrol işaretleri c) α değerinin değişimi.....	108
Şekil 6.9 : $L=0.5s$ olması durumunda elde edilen a) basamak yanıtları b) uygulanan kontrol işaretleri c) α değerinin değişimi	109
Şekil 6.10 : a) Sinüsoidal giriş işareti b) elde edilen motor devir sayısını	111
Şekil 6.11 : Sistem model blok şeması	112
Şekil 6.12 : 2VDC referans giriş gerilimine karşı elde edilen sistem yanıtı	112
Şekil 6.13 : Sistem ve model yanıtlarının karşılaştırılması	113
Şekil 6.14 : a) Ortalaması belirsizlik içeren Gauss tipi aralık üyelik fonksiyonu b) 5 granülden oluşan granüler üyelik fonksiyonu	114
Şekil 6.15 : a) KAT2-BMK ve b) GAT2-BMK için elde edilen genetik algoritma arama sonuçları	115
Şekil 6.16 : KAT2-BMK ayarlanmış Gauss üyelik fonksiyonları.....	116
Şekil 6.17 : GAT2-BMK ayarlanmış granüler üyelik fonksiyonları	116
Şekil 6.18 : Tasarlanan kontrolörler ile elde edilmiş sistem model yanıtlarının karşılaştırılması	117
Şekil 6.19 : a) KAT2-BMK ve b) GAT2-BMK' ün kontrol yüzeyi.....	117
Şekil 6.20 : Nominal çalışma durumunda a) elde edilen sistem yanıtları b) uygulanan kontrol işaretleri	118
Şekil 6.21 : Sisteme $t=5s$ anında gürültü etkimesi durumunda a) sistem yanıtları b) kontrol işaretleri	120
Şekil 6.22 : Sisteme tüm ölçüm süresince gürültü etkimesi durumunda a) sistem yanıtları b) kontrol işaretleri.....	120
Şekil 6.23 : Sisteme bozucu etkimesi durumunda a) sistem yanıtları b) kontrol işaretleri.....	121
Şekil 6.24 : a) $K=0.9K$ ve b) $K=1.1K$ olması durumunda elde edilen sistem yanıtları	122
Şekil 6.25 : Ölü zaman değerinin $L=0.3s$ olması durumunda elde edilen sistem yanıtları.....	123
Şekil 6.26 : a) $D=0.2V$ b) $D=0.4V$ olması durumunda elde edilen sistem yanıtları	123

GRANÜLER TİP-2 BULANIK YAPILAR KULLANILARAK SİSTEMLERİN MODELLENMESİ VE KONTROLÜ

ÖZET

Belirsizlik gerçek sistemlerin doğal bir karakteristiğidir. Tasarım aşamasında belirsizliğin doğrudan modellenmesi ve etkisinin azaltılması için fazladan serbestlik derecesine sahip olmalarından dolayı tip-2 bulanık sistemler belirsizliklerle baş edebilme yeteneğine sahiptirler. Bu tez çalışmasında modelleme ve kontrol uygulamaları için tip-2 bulanık sistemlerin tasarımında daha fazla esneklik ve serbestlik sağlamak ve bulanık sistemin başarımını arttırmak amacıyla üç yeni yöntem önerilmiştir.

İlk olarak tip-2 bulanık sistemlerin tasarımında belirsizlikleri daha iyi modelleyebilmek ve tip-2 bulanık kümeleri daha iyi tanımlayabilmek için granüler bir yaklaşımla yeni bir tip-2 üyelik fonksiyonu önerilmiştir. Bu üyelik fonksiyonlarında belirsizlik taban alanı dikdörtgen tip-2 bulanık granüller kullanılarak oluşturulmuştur ve ortaya çıkan bu yeni üyelik fonksiyonu Granüler Tip-2 Üyelik Fonksiyonu olarak adlandırılmıştır. Bu yeni yaklaşım tip-2 bulanık sistemlerin tasarımında fazladan serbestlik ve esneklik sağlamaktadır. Bu üyelik fonksiyonları ile üyelik dereceleri üzerindeki belirsizlikler herhangi bir fonksiyona bağlı kalmadan ve tanım uzayındaki herhangi bir bölge için diğer bölgelerden bağımsız olarak tanımlanabilmektedir. Böylece granüler yapıda doğrusal olmayan, süreksiz ya da hibrit üyelik fonksiyonları oluşturularak tanım uzayında ya da giriş-çıkış atama yüzeyinde istenilen doğrusal olmayan ve süreksiz alanlar modellenebilmektedir. Önerilen granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının etkinliği gürültüye maruz kalmış Mackey-Glass zaman serisi tahmini örneği üzerinde, sağladığı esnek tasarım kabiliyetleri ise ölü bölgeye sahip ve parametrelerinde belirsizlik olan doğrusal olmayan bir sistem için yapılan modelleme çalışmalarında gösterilmiştir. Benzetim çalışmaları sonucu granüler tip-2 üyelik fonksiyonu kullanılarak tasarlanmış granüler tip-2 bulanık sistemin klasik tip-2 bulanık sisteme göre daha iyi bir modelleme yeteneğine sahip olduğu gösterilmiştir. Modelleme uygulamalarında etkinliği gösterilen granüler üyelik fonksiyonlarının kontrolör tasarımında kullanımını ve kontrolör başarımı üzerindeki iyileştirici etkisini göstermek için gerçek zamanlı kontrol uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Uygulama sonucu granüler üyelik fonksiyonları kullanılarak tasarlanmış granüler tip-2 bulanık mantık kontrolörün klasik tip-2 bulanık mantık kontrolöre göre daha üstün bir başarıma sahip olduğu ve gürültü, bozucu ya da sistem parametre belirsizlikleri etkisine karşı daha dayanıklı olduğu gösterilmiştir.

Tez çalışmasında önerilen ikinci yöntem ise yine granüler yaklaşımdan yararlanan yeni bir tip indirgeme yöntemidir. Burada geometrik bir yaklaşım kullanılarak parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümeleri için kapalı yapıda yeni bir ağırlık merkezi tip indirgeme yöntemi önerilmiştir ve bu yöntem Granüler Tip İndirgeme Yöntemi olarak adlandırılmıştır. Granüler tip-2 bulanık kümeleri de bir parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık küme olduğundan bu tip indirgeme yöntemi doğrudan granüler tip-2

bulanık kümeler için de kullanılabilir. Önerilen yöntemin ana fikri aralık tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanında ağırlık merkezi noktasının arandığı bölgenin sabit genişlikte olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu sabit genişlik varsayımı aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezinin iterasyona gerek kalmadan türeve dayalı bir en iyileme yöntemi kullanılarak kapalı bir formül ile bulunmasını sağlamaktadır. Belirsizlik taban alanının belirtilen bölgesi gerçekten sabit genişlikte ise önerilen yöntem ile aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezi kesin doğrulukta bulunmaktadır, aksi durumda ise hesaplanan değer ile gerçek ağırlık merkezi değeri arasındaki hatayı küçültmek için önerilen algoritmada bir iyileştirme gerçekleştirilebilir. Ayrıca önerilen yöntemde geometrik bir yaklaşımdan yararlanarak sadece analitik formüller kullanılmıştır. Böylece tip indirgeme işlemlerinde aralık tip-2 bulanık kümenin ayrıştırılma ihtiyacı ortadan kaldırılmakta ve dolayısıyla sonucun hesaplama kesinliği ve hesaplama süresi iyileştirilmektedir. Önerilen tip indirgeme yöntemi yedi adet test bulanık kümesi üzerinde hesaplama kesinliği ve hesaplama süresi kriterleri açısından İyileştirilmiş Karnik-Mendel Yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu önerilen granüler tip indirgeme yönteminin iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminden daha kısa hesaplama süresi ile hesaplama kesinliği daha yüksek sonuçlar sağladığı gösterilmiştir.

Son olarak ise aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörler için dinamik yapıda yeni bir durulama yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde klasik durulama yönteminde olduğu gibi ortalama almak yerine tip indirgenmiş kümenin sağ ve sol sınır değerlerinin doğrusal kombinasyonu kullanılmaktadır. Bu doğrusal kombinasyon PD tipi ağırlıklandırılmış sistem hata ve hatanın türevi değişkenleri kullanılarak oluşturulmuştur. Böylece önerilen yöntem ile klasik ortalama alma durulama yönteminde olduğu gibi aralık tip-1 bulanık kümeden keskin çıkış değerine sabit bir atama gerçekleştirmek yerine sistem dinamiklerine bağlı değişken bir atama gerçekleştirilerek aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörün başarımı iyileştirilebilir. Önerilen durulama yönteminin etkinliğini incelemek için benzetim çalışmaları ve gerçek zamanlı kontrol uygulamaları gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar sonucu önerilen dinamik durulama yönteminin klasik durulama yöntemine göre tip-2 bulanık mantık kontrolörün başarımını ve dayanıklılığını arttırdığı gösterilmiştir.

MODELING AND CONTROL OF SYSTEMS USING GRANULAR TYPE-2 FUZZY STRUCTURES

SUMMARY

Uncertainty is an inherent characteristic of real systems. Type-2 fuzzy logic systems are capable of handling uncertainty compared to type-1 fuzzy logic systems due to having additional degrees of freedom in design aspects to model the uncertainty and minimize its effect directly. In this study, three new methods are proposed for the design procedure of type-2 fuzzy logic systems that provide more flexibility and degrees of freedom, which in return, improve the performance of the overall system in modeling and control applications.

Firstly, a new approach for the formation of type-2 membership functions is introduced. The footprint of uncertainty is formed by using rectangular type-2 fuzzy granules and the resulting membership function is named as Granular Type-2 Membership Function. This new approach provides more degrees of freedom and design flexibility in type-2 fuzzy logic systems and has more potential to model and handle uncertainties. Uncertainties on the grades of membership functions can be represented independently for any region in the universe of discourse and free of any functional form. Thus, the designer could produce highly nonlinear, discontinuous or hybrid membership functions in granular formation and therefore could model any desired discontinuity and various kinds of nonlinearities on the universe of discourse or in the input-output mapping. Therefore, granular type-2 membership functions are useful and quite effective in modeling and control of nonlinear systems having high nonlinearities such as dead zone, backlash, etc., and also in hybrid or switched systems. Additionally, mathematical expressions of granular type-2 membership functions are very simple and this would naturally reduce the complexity and simplify the computational issues in type-2 fuzzy sets and systems. The derivative information related to granular type-2 membership functions arouses to be always constant; therefore, derivative based optimization algorithms such as Steepest Descent algorithm are easily used in determining the appropriate parameters of granular type-2 membership functions. The effectiveness of the proposed granular type-2 membership functions is firstly demonstrated by simulations done on noise corrupted Mackey-Glass time series prediction. Secondly, flexible design feature of granular type-2 membership functions is illustrated by modeling a nonlinear system having dead zone with uncertain system parameters. The simulation results show that type-2 fuzzy logic systems formed by granular type-2 membership functions have more modeling capabilities than the systems using conventional type-2 membership functions and they are more robust to system parameter changes and noisy inputs. After illustrating the effectiveness of the proposed granular type-2 membership functions in modeling applications, real time control applications have been implemented in order to show the effectiveness of granular type-2 membership functions on the performance of type-2 fuzzy logic controllers. The results show that the granular type-2 fuzzy logic controller formed by using granular type-2

membership functions outperforms the conventional type-2 fuzzy logic controller and it is more robust to system parameter changes, noisy inputs and disturbances than conventional type-2 fuzzy logic controller.

Secondly, a new centroid type reduction method having closed form representation is proposed for piecewise linear interval type-2 fuzzy sets. This new method is named as Granular Type Reduction Method. Since granular type-2 fuzzy sets can be considered as piecewise linear interval type-2 fuzzy sets, this type reduction method is also used for granular type-2 fuzzy sets. The method is based on type reduction properties of interval type-2 fuzzy sets possessing constant width footprint of uncertainty and the geometric properties of interval type-2 fuzzy sets. Here, piecewise linear interval type-2 fuzzy sets are considered as geometrical objects and therefore, the analytical formulas utilising basic geometrical knowledge are easily used in the calculations. This eliminates the need of using discretization in the calculations for the type reduction process and also provides accurate results. Moreover, the part of footprint of uncertainty of an interval type-2 fuzzy set is assumed to have constant width where the centroid is searched. This constant width assumption provides a way to calculate the centroid of an interval type-2 fuzzy set in closed form by using derivative based optimization without any need of iterations. The elimination of discretization and iteration naturally improves the accuracy and the computation time of the proposed method. The most important property of the proposed method is that it provides accurate centroid result if the assumed related part of footprint of uncertainty is originally constant width. Otherwise an enhancement is performed in the algorithm in order to minimize the error between the accurate and the calculated centroids. In the enhancement procedure, the over or the under calculated areas due to constant width footprint of uncertainty assumption are either subtracted from or added to the calculated areas. The proposed method is compared with Enhanced Karnik-Mendel Iterative Procedure in terms of the accuracy and the computation time on seven test fuzzy sets. The results show that the proposed method provides more accurate results with shorter computation time than Enhanced Karnik-Mendel Iterative Procedure. The precision of the result obtained without enhancement (even if footprint of uncertainty is not originally constant width) in the proposed method satisfies the accuracy requirements for most real time applications. Therefore, the proposed method can be used without any need of enhancement in many real time applications. On the other hand, the precision of these results may not be adequate for the applications requiring more accuracy such as the system modeling. Then, the enhancement procedure which provides more precision could be used. Moreover, the computation time for the proposed method with enhancement procedure is slightly worse than the procedure without enhancement. Therefore, the proposed method with enhancement procedure can easily be used even in real time applications. The footprint of uncertainty of the combined output fuzzy set to be type reduced in interval type-2 fuzzy logic systems has almost always constant width parts. As it is shown in the results, the proposed method is very effective for the type reduction of such interval type-2 fuzzy sets and has high potential to find the accurate centroid. Thus, the proposed method is very suitable for interval type-2 fuzzy logic systems. Additionally, since the proposed type reduction approach is expressed in closed form, it provides a way to perform theoretical analysis for interval type-2 fuzzy logic systems.

Finally, a new defuzzification method which determines the crisp output by making use of system dynamics is proposed for interval type-2 fuzzy logic controllers. In this

defuzzification method, a linear combination of the left and right end points of type reduced interval set is considered. This linear combination is formed using PD type weighted system error and change of error instead of taking the average of the left and right end points of type reduced set. In this manner, it has been possible to enhance the performance of the interval type-2 fuzzy logic controller since the mapping has been defined from the type reduced set representing uncertainties to crisp output by considering the information related to system dynamics. To demonstrate the effectiveness of the proposed dynamic defuzzification method, simulation studies and real time control applications have been performed on linear and nonlinear systems. The results have shown that the proposed dynamic defuzzification method outperforms the conventional defuzzification method and improves the performance and robustness to all kinds of system parameter changes.

1. GİRİŞ

Klasik küme teorisi iki değerli $\{0,1\}$ bir mantık üzerine kurulmuştur. Bir E evrensel kümesinde bir x elemanın bir A kümesine ait olup olmama durumu 0 ya da 1 değeri alabilen

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{eğer } x \in A \\ 0 & \text{eğer } x \notin A \end{cases} \quad (1.1)$$

karaktersistik fonksiyonu ile ifade edilir. Fakat bir elemanın hangi kümeye ait olduğu her zaman net olarak belirlenemeyebilir. Bu gibi durumlarda bulanık mantık yaklaşımı esnek çözümler sağlamaktadır. Zadeh [1] tarafından 1965 yılında önerilen bulanık küme teorisinde bir x elemanın bir A kümesine olan aitliği bu ikili mantık yerine çok değerli bir mantıkla $[0,1]$ aralığında değerlendirilmektedir. Böylece bulanık mantık elemanların bir kümeye ait olup olmama durumuna ek olarak, bir elemanın bir kümeye ne derecede ait olduğu bilgisini de ortaya koymaktadır.

Bir X evrensel kümesindeki A bulanık kümesi, klasik kümelerde karakteristik fonksiyon kavramının bir genişletilmesi ile oluşturulmuş $\mu_A(x)$ üyelik fonksiyonu ile tanımlanır. Üyelik fonksiyonu bulanık küme elemanı olan her bir x elemanı için

$$\mu_A(x) : x \rightarrow [0,1] \quad (1.2)$$

şeklinde bir atama yapar. $\mu_A(x)$ üyelik fonksiyonunun aldığı değer bir x elemanın A bulanık kümesine hangi derecede ait olduğunu belirtir ve x elemanın *üyelik derecesi* olarak adlandırılır.

Bulanık mantık notasyon ve operatörleri klasik mantık uygulamalarında kullanılan notasyon ve operatörlerin genişletilmesiyle oluşturulmuştur. Bu yüzden bulanık kümeler klasik kümeleri de kapsamakta ve dolayısıyla klasik kümelerin bir üst kümesi olmaktadır.

Bulanık mantık insana özgü yaklaşık akıl yürütmeyi temel alarak oluşturulan bir kuramdır. Bu yüzden bulanık mantık uygulamaları klasik yöntemlerin üstesinden gelemediği durumlara basit ve daha etkili çözümler getirebilmektedir. Bulanık mantığın ilk uygulaması Mamdani tarafından 1974 yılında bir buhar makinesinin bulanık denetiminin gerçekleştirilmesi olmuştur [2]. O günden günümüze bulanık mantık uygulamaları hızlı bir şekilde gelişmiş ve birçok modern uygulama alanında geniş yer edinmiştir [3-13].

1990' ların sonlarından [14, 15] itibaren tip-2 bulanık mantık çalışmalarının yaygınlaşmaya başlaması ile günümüze kadar gelen bulanık mantık uygulamalarında kullanılan bulanık mantık teorisi literatürde tip-1 bulanık mantık olarak ayrıca belirtilmeye başlanmıştır.

Tip-2 bulanık küme (T2-BK) kavramı ilk olarak Zadeh [16] tarafından 1975 yılında ortaya atılmış olmasına karşın 1990' lara kadar literatürde tip-2 bulanık mantıkla ilgili çok fazla çalışma yer almamıştır [17, 18-20]. 1998 yılında M. M. Karnik' in doktora çalışması [14] ile tip-2 bulanık mantık teorisi oldukça geliştirilmiş ve uygulanabilir hale gelmiştir. Böylece o yıldan itibaren tip-2 bulanık mantık üzerine yapılan çalışmalar büyük ivme kazanmış ve tip-2 bulanık mantık günümüzde bir çok çalışma alanında kendine yer bulmuştur [21-34].

Tip-2 bulanık mantık, tip-1 bulanık mantık teorisinin bir uzantısıdır. Bilindiği gibi tip-1 bulanık kümelerde o kümeye ait olan elemanların üyelik dereceleri $[0,1]$ aralığında keskin değerler almaktadır. Tip-2 bulanık kümeler ise o kümeye ait her bir elemanın üyelik derecelerinin de bir bulanık küme belirttiği üyelik fonksiyonları ile ifade edilirler. Böylece mevcut olan belirsizliğin modellenmesi tip-2 bulanık kümelerde yalnız dilsel değişkenlerle sınırlı olmayıp üyelik fonksiyonlarının tanımlanmasında da yer almaktadır. Nasıl ki bir elemanın bir kümeye üyeliği 0 ya da 1 şeklinde tam olarak belirlenemediği durumlarda tip-1 bulanık kümeleri kullanılıyorsa, benzer şekilde bir tip-1 bulanık kümenin üyelik fonksiyonunu tanımlarken belirsizliklere bağlı olarak o kümeye ait elemanların üyelik dereceleri tam olarak belirlenemediği zaman tip-2 bulanık kümeler kullanılır. Bu yüzden tip-1 bulanık kümeler gerçek dünyadaki belirsizliklere karşı birinci dereceden bir yaklaşım olarak düşünülürse, tip-2 bulanık kümeler de belirsizliğe karşı ikinci dereceden bir yaklaşım olarak görülebilirler [35].

Belirsizlik tip-1 bulanık sistemlere genel olarak (en az) 4 ayrı şekilde etki edebilir [36]:

1. Kuralların öncül ve sonuç önermelerinde kullanılan dilsel ifadelerin belirsiz olması (farklı insanlar tarafından farklı şekilde yorumlanabilir olması)
2. Uzmanlar tarafından oluşturulan sonuç önermelerindeki üyelik fonksiyonlarının üzerinde tam anlaşmaya varılamadığında üyelik fonksiyonlarının histogram değerler içermesi
3. Bulanık sisteme etki eden girişlerin gürültü ve dolayısıyla belirsizlik içermesi
4. Tip-1 bulanık sistemin parametrelerini ayarlamak için kullanılan verilerin gürültü içermesi

Bu tip belirsizlikler doğrudan bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarına etki etmektedir. Tip-1 bulanık sistemlerde kullanılan bulanık kümelerdeki üyelik değerleri birer keskin değer olduğundan tip-1 bulanık sistemler bu tip belirsizliklerin mevcut olması durumunda yeteri kadar etkili olamamaktadırlar. Fakat tip-2 bulanık sistemlerde üyelik dereceleri de bir bulanık küme belirttiğinden tip-2 bulanık sistemler bu tip belirsizliklerin etkisini azaltabilmektedir [37]. Bu yüzden tip-2 bulanık sistemler gürültülü girişlerin olması durumunda ve anlamları uzmandan uzmana değişebilen dilsel veriler üzerinde belirsizlik olması durumunda iyi bir başarıyı sergileme yeteneğine sahiptir.

Bilindiği gibi genellikle uzman bilgisinden gelen dilsel bilgiler üyelik fonksiyonlarının şekli hakkında bir bilgi vermez. Yukarıda bahsedilen yöntemler ile üyelik fonksiyonlarının nümerik veriler ile ayarlanması ya da belirlenmesi durumunda ise nümerik verilerdeki belirsizlik doğrudan üyelik fonksiyonları üzerinde bir belirsizliğe dönüşür. Bu gibi durumlarda ortaya çıkan dilsel ya da nümerik belirsizliklerin etkisi tip-1 bulanık sistemlerin aksine tip-2 bulanık sistemlerle azaltılabilmektedir.

Teorik olarak bulanık kümelerin tip derecesi yükseldikçe belirsizliklerle başedebilme yetenekleri artmasına karşın tip derecesinin yükselmesi bulanık sistemin karmaşıklığını hızlı bir şekilde arttırmaktadır. Bu yüzden tip derecesi ikiden daha büyük olan bulanık kümelerle oluşturulacak bulanık sistemlerin gerçekleşmesi oldukça zordur [37].

Aralık tip-2 bulanık kümeleri (AT2-BK) genel tip-2 bulanık kümelerin özel bir halidir. Aralık tip-2 bulanık kümelerin tüm ikincil üyelik fonksiyonları bir fonksiyon yerine 1 şeklinde keskin bir değer almaktadır. Böylece ikincil üyelik fonksiyonları aralık tip-2 bulanık kümelerde ayırt edici bir bilgi taşımamakta ve tip-2 bulanık mantık işlemlerinde sadece birincil üyelik fonksiyonlarının sınır değerlerinin kullanılması yeterli olmaktadır. Bu nedenle aralık tip-2 bulanık kümeleri sağladıkları hesaplama kolaylıkları nedeniyle tip-2 bulanık sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır [38-45].

1.1 Tezin Amacı

Bu tez çalışmasında modelleme ve kontrol uygulamaları için tip-2 bulanık sistemlerin tasarımında daha fazla esneklik ve serbestlik sağlamak ve bulanık sistemin başarımını arttırmak amacıyla üç yeni yöntem önerilmiştir.

İlk olarak tip-2 bulanık sistemlerin tasarımında belirsizlikleri daha iyi modelleyebilmek ve tip-2 bulanık kümeleri daha iyi tanımlayabilmek için granüler bir yaklaşımla yeni bir tip-2 üyelik fonksiyonu önerilmiştir. Bu üyelik fonksiyonlarında belirsizlik taban alanı dikdörtgen tip-2 bulanık granüller kullanılarak oluşturulmuştur ve ortaya çıkan bu yeni üyelik fonksiyonu Granüler Tip-2 Üyelik Fonksiyonu olarak adlandırılmıştır. Bu yeni yaklaşım tip-2 bulanık sistemlerin tasarımında fazladan serbestlik ve esneklik sağlamaktadır. Bu üyelik fonksiyonları ile üyelik dereceleri üzerindeki belirsizlikler herhangi bir fonksiyona bağlı kalmadan ve tanım uzayındaki herhangi bir bölge için diğer bölgelerden bağımsız olarak tanımlanabilmektedir. Böylece granüler yapıda doğrusal olmayan, süreksiz ya da hibrit üyelik fonksiyonları oluşturularak tanım uzayında ya da giriş-çıkış atama yüzeyinde istenilen doğrusal olmayan ve süreksiz alanlar modellenebilmektedir. Önerilen granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının etkinliği gürültüye maruz kalmış Mackey-Glass zaman serisi tahmini örneği üzerinde, sağladığı esnek tasarım kabiliyetleri ise ölü bölgeye sahip ve parametrelerinde belirsizlik olan doğrusal olmayan bir sistem için yapılan modelleme çalışmasında gösterilmiştir. Modelleme uygulamalarında etkinliği gösterilen granüler üyelik fonksiyonlarının kontrolör tasarımında kullanımı ve kontrolör başarımı üzerindeki iyileştirici etkisi gerçek zamanlı kontrol uygulamaları ile gösterilmiştir.

Tez çalışmasında önerilen ikinci yöntem ise yine granüler yaklaşımdan yararlanan yeni bir tip indirgeme yöntemidir. Burada geometrik bir yaklaşım kullanılarak parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümeleri için kapalı yapıda yeni bir ağırlık merkezi tip indirgeme yöntemi önerilmiş ve bu yöntem Granüler Tip İndirgeme Yöntemi olarak adlandırılmıştır. Granüler tip-2 bulanık kümeleri de bir parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık küme olduğundan bu tip indirgeme yöntemi doğrudan granüler tip-2 bulanık kümeler için de kullanılabilir. Önerilen yöntemin ana fikri aralık tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanında ağırlık merkezi noktasının arandığı bölgenin sabit genişlikte olduğu varsayımına dayanmaktadır. Bu sabit genişlik varsayımı aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezinin iterasyona gerek kalmadan türeve dayalı bir en iyileme yöntemi kullanılarak kapalı bir formül ile bulunmasını sağlamaktadır. Belirsizlik taban alanının belirtilen bölgesi gerçekten sabit genişlikte ise önerilen yöntem ile aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezi kesin doğrulukta bulunmaktadır, aksi durumda ise hesaplanan değer ile gerçek ağırlık merkezi değeri arasındaki hatayı küçültmek için önerilen algoritmada bir iyileştirme gerçekleştirilebilmektedir. Ayrıca önerilen yöntemde geometrik bir yaklaşımdan yararlanarak sadece analitik formüller kullanılmıştır. Böylece tip indirgeme işlemlerinde aralık tip-2 bulanık kümenin ayrıklaştırılma ihtiyacı ortadan kaldırılmakta ve dolayısıyla sonucun hesaplama kesinliği ve hesaplama süresi iyileştirilmektedir. Yedi adet test bulanık kümesi üzerinde önerilen granüler tip indirgeme yöntemi hesaplama kesinliği ve hesaplama zamanı kriterleri açısından İyileştirilmiş Karnik-Mendel Yöntemi ile karşılaştırılmıştır.

Son olarak ise aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörler için dinamik yapıda yeni bir durulama yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde ortalama almak yerine tip indirgenmiş kümenin sağ ve sol sınır değerlerinin doğrusal kombinasyonu kullanılmaktadır. Bu doğrusal kombinasyon PD tipi ağırlıklandırılmış sistem hata ve hatanın türevi değişkenleri kullanılarak oluşturulmuştur. Böylece önerilen yöntem ile klasik ortalama alma durulama yönteminde olduğu gibi aralık tip-1 bulanık kümeden keskin çıkış değerine sabit bir atama gerçekleştirmek yerine sistem dinamiklerine bağlı değişken bir atama gerçekleştirilerek aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörün başarımı iyileştirilebilmektedir. Önerilen PD tipi ağırlıklandırılmalı dinamik durulama yönteminin etkinliği benzetim çalışmaları ve gerçek zamanlı kontrol uygulamaları ile gösterilmiştir.

Tez çalışmasının genel yapısı şu şekildedir: 2. Bölümde tip-2 bulanık kümeler ve sistemler ile ilgili temel tanımlar gösterilmiştir. 3. Bölümde önerilen granüler tip-2 üyelik fonksiyonları gösterilmiştir. 4. Bölümde önerilen granüler tip indirgeme yöntemi anlatılmaktadır. 5. Bölümde önerilen PD tipi ağırlıklandırılmalı dinamik durulama yöntemi anlatılmaktadır. Önerilen dinamik durulama yönteminin ve granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının kontrolör tasarımı kullanılması kontrolör başarımı üzerindeki iyileştirici etkisi ise 6. Bölümde gerçek zamanlı kontrol uygulamaları ile gösterilmiştir.

1.2 Literatür Araştırması

Bu bölümde tez konusuyla ilgili genel literatür araştırması verilmiştir. Tez çalışmasının her bölümünde o konuyla ilgili daha detaylı literatür araştırması ayrıca yer almaktadır.

Belirsizlik gerçek sistemlerin doğal bir karakteristiğidir. Özellikle doğrusal olmayan sistemlerde belirsizliğin etkisi daha çok önem kazanmaktadır. Bulanık kontrolör tasarımı tip-2 bulanık kümelerin kullanılması ile kontrol edilen sistemdeki parametre değişimleri ya da kontrolör giriş-çıkış işaretlerine gürültü etkimesi gibi belirsizlikleri modellemek için fazladan tasarım parametreleri kullanabilme imkanı ortaya çıkmaktadır. Böylece tip-2 bulanık mantık kontrolörler tasarım aşamasında daha çok serbestlik derecesine sahip olduklarından tip-1 bulanık mantık kontrolörlere göre belirsizliklerle daha iyi baş edebilme yeteneğine sahiptir [37,46-48]. Sahip oldukları hesaplama kolaylıklarına bağlı olarak gerçek zamanlı uygulamalarda çoğunlukla aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörler kullanılmaktadır [25,32,41,44,49-52].

Tip-2 bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları belirsizlik taban alanı BTA (footprint of uncertainty) ile tanımlanırlar. Belirsizlik taban alanı tip-2 bulanık kümenin birincil üyelik değerlerindeki belirsizliğin sınırladığı alan olarak tanımlanabilir ve bu alan tüm birincil üyelik değerlerinin birleşimini ifade etmektedir [36]. Tip-2 bulanık kümelerin belirsizlik taban alanının iyi tanımlanması belirsizliklerin modellenmesi ve etkisinin azaltılması için oldukça önemlidir. Literatürde tip-2 bulanık kümelerin belirsizlik taban alanı çeşitli yollarla tanımlanabilmektedir. En temel yaklaşım tip-1 temel üyelik fonksiyonu ile başlayıp bunu bulanıklaştırmak ya da kaydırmak [34,53] şeklindedir. Bunun yanında tip-1 üyelik fonksiyonu dağılımını kullanma [54], aralık

tip-2 bulanık kümenin alt ve üst üyelik fonksiyonlarını Gauss, üçgen, yamuk gibi klasik tip-1 üyelik fonksiyonu seçme [55-57], geometrik yaklaşım kullanma [58-60], zSlice yaklaşımını kullanma [61], dilsel biçimlendiricileri kullanmak [62,63], baklava biçimli üyelik fonksiyonlarını kullanma [64], sinüs-kare gömülü yapısını kullanma [65] gibi yöntemler de mevcuttur.

Tip-2 bulanık sistemlerin tip-1 bulanık sistemlerden en temel farkı yapısında fazladan bir tip indirgeme mekanizmasına sahip olmasıdır. Tip-2 bulanık sistemlerde çıkarım mekanizmasının sonucu tip-2 bulanık kümedir. Çıkarım mekanizmasının sonucu olarak gelen bu tip-2 bulanık kümesinin durulama işlemi gerçekleştirilerek keskin sonuç değerinin elde edilebilmesi için öncelikle tip indirgenerek tip-1 bulanık kümeye çevrilmesi gerekmektedir. Literatürde tip-1 durulama yöntemlerine benzer şekilde ağırlık merkezi, kümeler merkezi, yükseklik gibi çeşitli tip indirgeme yöntemleri mevcuttur [15,37,66]. Tip indirgeme işlemi tip-2 bulanık sistemlerde en çok zaman alan işlemdir. Çünkü bazı özel durumlar dışında [67,68] bu işlem için kapalı bir formül mevcut değildir. Aralık tip-2 bulanık kümelerin tip indirgeme işlemi ise genel tip-2 bulanık kümelerin tip indirgeme işlemine göre daha az işlem karmaşıklığı içerir. Kapalı bir formül söz konusu olmadığından aralık tip-2 bulanık kümelerin tip indirgeme işlemi iteratif yöntemlerle ya da yaklaşık çözümü veren kapalı formüllerle gerçekleştirilmektedir.

İteratif tip indirgeme yöntemlerin en önemlisi ve en popüler olanı Karnik-Mendel yöntemi (KMY) [37, 66]. Bu yöntemde aralık tip-2 bulanık kümenin sadece alt ve üst sınır bilgisi kullanılır. Karnik-Mendel yönteminin hesaplama yoğunluğunu düşürmek için İyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi (İKMY) önerilmiştir [69]. Karnik-Mendel yöntemine alternatif olarak hızlı yinelemeli tip indirgeme yöntemi [70] önerilmiştir. [71]' de aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezi tip indirgeme işleminin kök bulma problemi olarak ele alınabileceği gösterilmiştir ve bu yolla ağırlık merkezi değeri tam olarak bulunabilmektedir. Fakat bu yöntem yine hesaplamasal olarak karmaşıktır ve hesaplama süresi çok uzundur. [56] ve [72]' de sırasıyla Karnik-Mendel ve iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminin sürekli yapıda ifade edilmiş halleri önerilmiştir. [73]' de ön hesaplamalar ve belirsizlik sınırları tabanlı başlangıç koşulu kullanan yeni bir iteratif yöntem önerilmiştir.

Belirsizlik sınırları yöntemi [74] aralık tip-2 bulanık kümenin tip indirgeme işlemi için yaklaşık sonuçlar veren kapalı yapıda bir tip indirgeme yöntemidir. [75]' de

gerçek zamanlı uygulamalara yönelik eşdeğer tip-1 bulanık küme kavramına dayalı hesaplama kolaylığına sahip tip indirgeme yöntemleri önerilmiştir. Doğrudan durulama yöntemi [58,76,77] parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümeleri bir geometrik obje olarak ele alır ve hesaplamasal geometriden yararlanarak tip indirgeme işlemi için yaklaşık değerler veren kapalı bir formül sağlar. Nie-Tan yöntemi [78] kapalı yapıda ifade edilen hesaplamasal olarak basit bir tip indirgeme yöntemidir. Benzer bir şekilde aralık tip-2 Takagi-Sugeno-Kang (TSK) bulanık kontrolörler için alternatif bir kapalı yapıda tip indirgeme yöntemi önerilmiştir [79]. Bu yöntem Nie-Tan tip indirgeme yönteminin ağırlıklandırma parametreleri kullanılarak iyileştirilmiş bir hali olarak düşünülebilir. Literatürde ilk kez Karnik-Mendel yöntemi ve durulama işleminin bir arada olduğu durum için kapalı yapıda yaklaşık bir çözüm önerilmiştir [80]. Bu yöntemde Nie-Tan kapalı yapıda tip indirgeme yönteminin sürekli yapıda ifade edilmiş hali Taylor serisi açılımı kullanılarak iyileştirilmiştir. [81]' da ayrıklaştırılmış aralık tip-2 bulanık kümeler için çöküntü durulama yöntemi (collapsing method) önerilmiştir. Bu yöntemde aralık tip-2 bulanık kümesi ters bulanıklaştırma yaklaşımı kullanılarak orjinal bulanık küme ile yaklaşık olarak aynı durulanmış değere sahip tip-1 temsili gömülü bulanık kümeye çevrilir. Bahsedilen bu tip indirgeme yöntemleri ile ilgili karşılaştırma çalışmaları [82-84]' de mevcuttur.

Tip indirgeme işleminden sonra elde edilen tip-1 bulanık kümesi durulama mekanizmasında durulama işlemine tabi tutularak tip-0 yani uygulamada kullanılacak keskin çıkış değerine dönüştürülür. Burada durulama işlemi tip-1 bulanık küme üzerinde gerçekleştirildiğinden tip-1 bulanık sistemlerde tanımlı durulama yöntemlerinin hepsi doğrudan tip-2 bulanık sistemlerde de kullanılabilir. Genel tip-2 bulanık kümelerden farklı olarak aralık tip-2 bulanık kümelerin tip indirgeme işlemi sonucunda sağ ve sol sınır değerleri ile tanımlanan aralık tip-1 bulanık kümesi elde edilir. Bu kümenin durulama işlemi sağ ve sol sınır değerlerinin ortalaması alınarak gerçekleştirilir [39,85-88].

2. TİP-2 BULANIK KÜMELER VE SİSTEMLER

2.1 Giriş

Tip-2 bulanık küme kavramı Zadeh [16] tarafından 1975 yılında ortaya atılmıştır. Tip-2 bulanık kümeler tip-1 bulanık kümelerin bir uzantısıdır. Bilindiği gibi tip-1 bulanık kümelerde o kümeye ait olan elemanların üyelik dereceleri $[0,1]$ aralığında keskin değerler almaktadır. Tip-2 bulanık kümeler ise o kümeye ait her bir elemanın üyelik derecelerinin de bir bulanık küme belirttiği üyelik fonksiyonları ile ifade edilirler. Böylece sahip oldukları bu fazladan tasarım serbestlik derecesine bağlı olarak tip-2 bulanık kümeler ile belirsizlikler daha iyi şekilde ifade edilebilmektedir. Tip-2 bulanık kümeler bir kümeye ait üyelik fonksiyonunu tanımlarken kümeye ait elemanların üyelik derecelerinde bir belirsizlik mevcutsa, yani bir kümenin üyelik fonksiyonu net olarak belirlenemiyorsa sıklıkla kullanılırlar.

Tip-1 ve tip-2 bulanık kümeler arasındaki temel fark, tip-1 bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları iki boyutlu iken tip-2 bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları üç boyutlu olmasıdır. Diğer bir önemli nokta ise tip-2 bulanık kümelerin tip-1 bulanık kümeleri içermesidir. Çünkü tip-2 bulanık küme üzerindeki tüm belirsizlikler ortadan kalktığında tip-2 bulanık küme tip-1 bulanık kümeye dönüşür. Bu durum rasgeleliklerin ortadan kalkması durumunda olası kuramının deterministik kurama dönüşmesine benzetilebilir.

2.2 Tip-2 Bulanık Kümeler

Genel notasyonda tip-2 bulanık kümeleri $\tilde{A}$ şeklinde üzeri şapkalı olarak gösterilir. Aşağıda [37] ve [17] referanslarından yararlanılarak tip-2 bulanık kümeleri ile ilgili tanımlamalar yapılmıştır.

Bir $\tilde{A}$ tip-2 bulanık kümesi $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$ olmak üzere bir tip-2 üyelik fonksiyonu (T2-ÜF) ile aşağıdaki gibi

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x, u) / (x, u) \quad J_x \subseteq [0, 1] \quad (2.1)$$

tanımlanır. Burada x X domenindeki birincil değişkeni ve u her bir $x \in X$ için J_x domenindeki ikincil değişkeni göstermektedir. J_x x değişkeninin birincil üyeligi olarak adlandırılır ve $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ da $\tilde{A}$ kümesinin ikincil üyelik değerlerini gösterir.

$\iint$ ifadesi ise tüm mümkün x ve u elemanlarının birleşimini ifade etmektedir.

(2.1) ifadesinden de görüleceği gibi eğer tip-2 bulanık kümesindeki her bir x değeri için u domeninde sadece bir üyelik derecesi karşılık gelirse, tip-2 bulanık kümesi tip-1 bulanık kümeye indirgenmiş olur.

Bilindiği gibi tip-2 bulanık kümeler o kümeye ait her bir elemanın üyelik derecelerinin bir bulanık küme belirttiği üyelik fonksiyonları ile ifade edilirler. Üyelik derecelerini belirten bu tip-1 üyelik fonksiyonuna *ikincil üyelik fonksiyonu* denir.

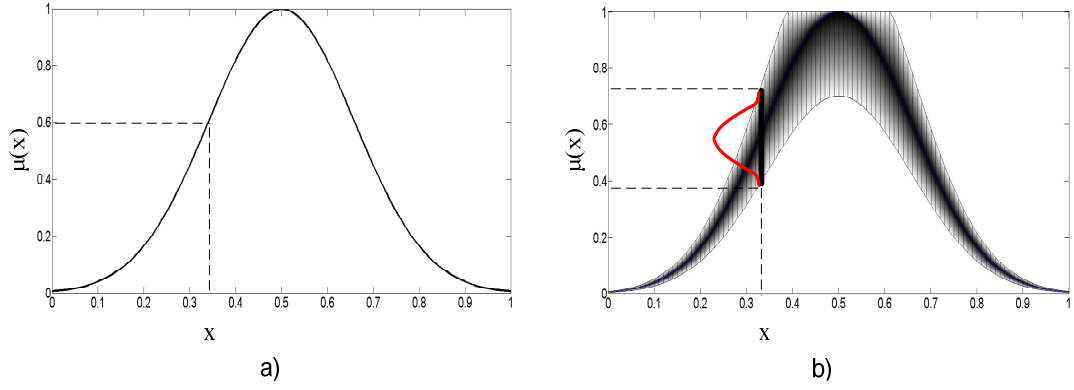
Herhangi bir $x = x'$ değeri için üç boyutlu $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ tip-2 üyelik fonksiyonu dikey olarak kesildiğinde elde edilen, eksenleri u ve $\mu_{\tilde{A}}(x', u)$ olan iki boyutlu her kesit dilimi bize ikincil üyelik fonksiyonunu verir ve $0 \leq f_{x'}(u) \leq 1$ olmak üzere

$$\mu_{\tilde{A}}(x = x', u) \equiv \mu_{\tilde{A}}(x') = \int_{u \in J_{x'}} f_{x'}(u) / u \quad J_{x'} \subseteq [0, 1] \quad (2.2)$$

şeklinde ifade edilebilir [37].

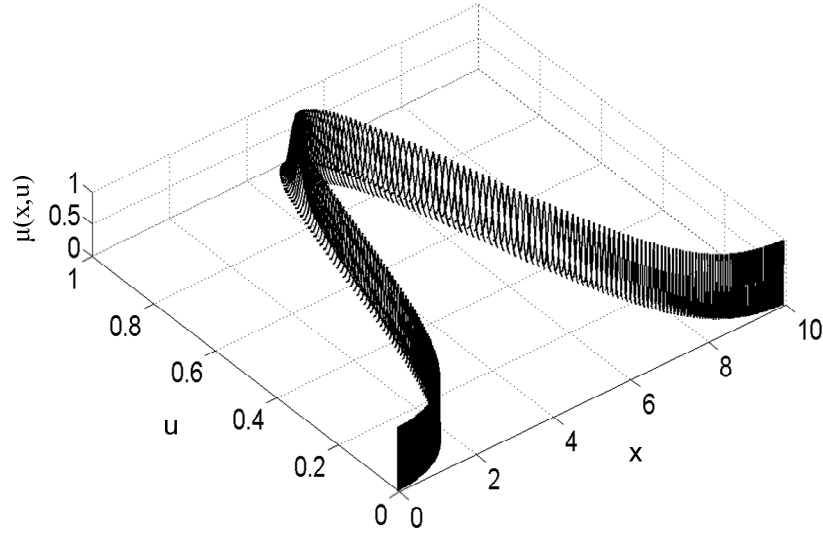
İkincil üyelik fonksiyonunun domeni olan $J_x \subseteq [0, 1]$ 'e ise tip-2 bulanık kümenin *birincil üyelik fonksiyonu* denir. Birincil üyelik fonksiyonu tip-2 bulanık kümesinin ikincil üyelik fonksiyonunu tanımlayan domeni oluşturan tip-1 üyelik fonksiyonu ailesidir [89].

Şekil 2.1' de bir bulanık kümenin tip-1 ve tip-2 üyelik fonksiyonları ile ifade edilmesi gösterilmiştir. Şekil 2.1b' de bir x noktası için tip-2 üyelik fonksiyonu üzerinde Gauss şeklindeki ikincil üyelik fonksiyonu kırmızı renk ile belirtilmiştir.



Şekil 2.1 : Bir bulanık kümenin a) tip-1 ve b) tip-2 üyelik fonksiyonu ile ifade edilmesi.

Şekil 2.2’ de Gauss şeklinde birincil ve ikincil üyelik fonksiyonlarına sahip bir tip-2 bulanık kümesi üç boyutlu olarak gösterilmiştir.



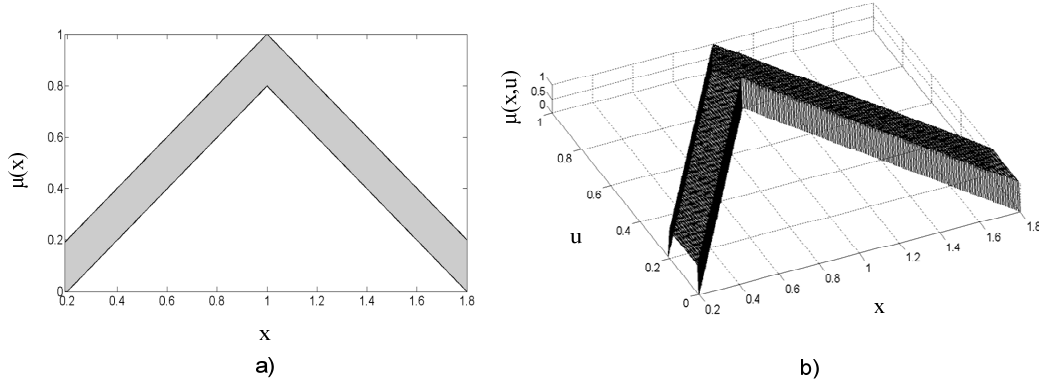
Şekil 2.2 : Tip-2 bulanık kümenin üç boyutlu gösterimi.

Tip-2 bulanık kümeleri genellikle aralık tip-2 bulanık kümeler ve genel tip-2 bulanık kümeler olmak üzere iki gruba ayrılabilirler [89]. Aralık tip-2 bulanık kümelerin ikincil üyelik fonksiyonları tüm u noktaları için $\mu_{\tilde{A}}(x, u) = 1$ şeklindedir. Genel tip-2 bulanık kümeler ise ikincil üyelik fonksiyonları üçgen, Gauss gibi aralık şeklinden farklı olan tip-2 bulanık kümelerdir. Aralık tip-2 bulanık kümeler genel tip-2 bulanık kümelerin özel bir halini oluşturmaktadırlar.

Aralık tip-2 bulanık kümesi üyelik fonksiyonu

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} 1/(x, u) \quad J_x \subseteq [0, 1] \quad (2.3)$$

şeklinde tanımlanan bir tip-2 bulanık kümedir. Şekil 2.3' de birincil üyelik fonksiyonu üçgen şeklinde olan örnek bir aralık tip-2 bulanık kümenin iki boyutlu ve üç boyutlu görüntüsü gösterilmiştir. Görüldüğü gibi her bir x için tüm ikincil üyelik değerleri 1'dir.

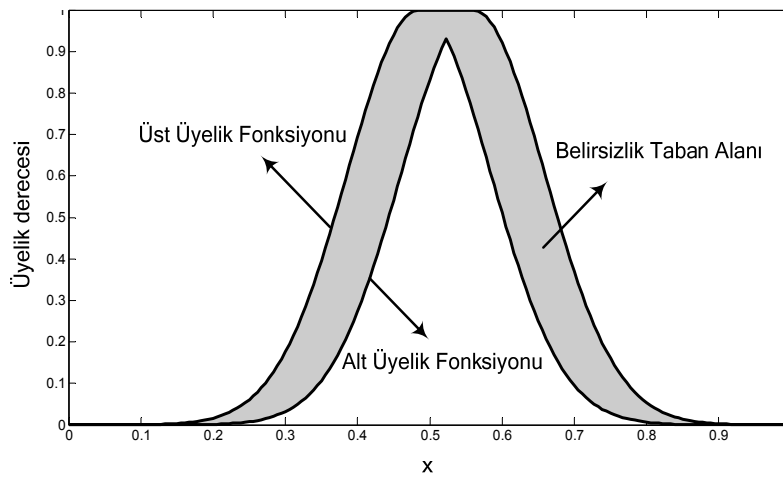


Şekil 2.3 : Örnek bir aralık tip-2 bulanık kümenin a) iki boyutlu b) üç boyutlu görünüşü.

Bir $\tilde{A}$ tip-2 bulanık kümenin birincil üyeliklerindeki belirsizlik sınırlı bir alan tanımlar ve bu alan belirsizlik taban alanı (BTA) olarak adlandırılır. Bu alan aşağıda belirtildiği gibi tüm birincil üyeliklerin birleşimini göstermektedir [90]

$$BTA(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in X} J_x \quad (2.4)$$

Şekil 2.4' de gösterildiği gibi $\tilde{A}$ bulanık kümesinin belirsizlik taban alanı iki adet tip-1 üyelik fonksiyonu ile sınırlandırılmış durumdadır. Belirsizlik taban alanı tip-2 bulanık kümenin üç boyutlu görüntüsünün iki boyuta izdüşürülmüş halidir.



Şekil 2.4 : Tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanı, alt ve üst üyelik fonksiyonları.

Bir $\tilde{A}$ tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanının alt ve üst sınırlarını tanımlayan tip-1 üyelik fonksiyonlarına sırasıyla *Alt Üyelik Fonksiyonu* (AÜF), $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, ve *Üst Üyelik Fonksiyonu* (ÜÜF), $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, adı verilir ve aşağıdaki gibi tanımlanır

$$\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x) \equiv \overline{BTA(\tilde{A})} \quad \forall x \in X \quad (2.5)$$

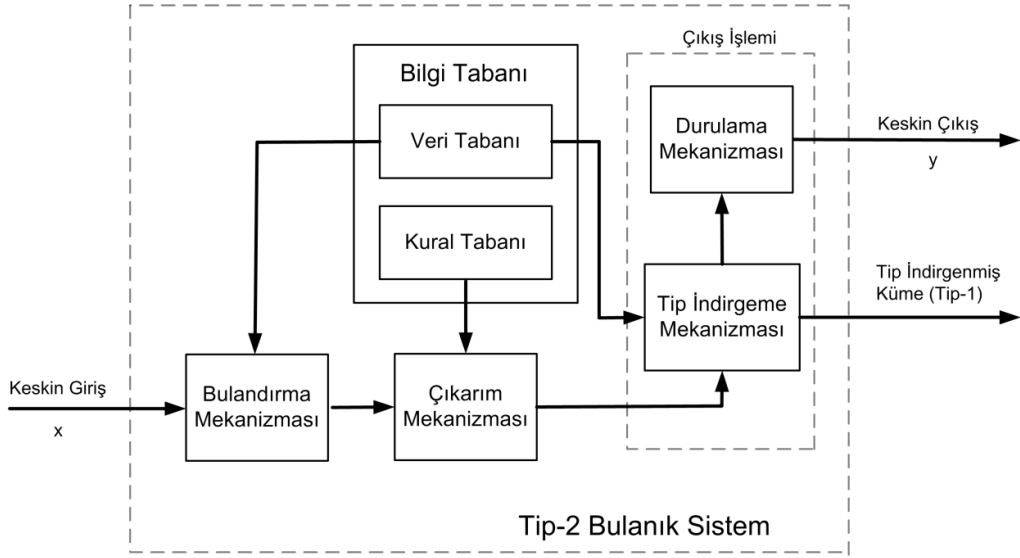
$$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) \equiv \underline{BTA(\tilde{A})} \quad \forall x \in X \quad (2.6)$$

Belirsizlik taban alanı aralık tip-2 bulanık kümelerin oldukça önemli ve faydalı bir karakteristiğidir. Çünkü bir aralık tip-2 bulanık küme kendisine ait belirsizlik taban alanı ile tam olarak tanımlanabilmektedir [90] ve belirsizlik taban alanının büyüklüğü ve şekli doğrudan modellenen belirsizliğin yapısıyla ilgilidir.

2.3 Tip-2 Bulanık Sistemler

Bulanık mantığın temel işleyişi bulanık kümenin tip derecesine bağlı değildir. Bulanık kümenin tip derecesi sadece üyelik fonksiyonu ile ilgilidir. Bu yüzden tip derecesi değiştiğinde üyelik fonksiyonlarına bağlı olan işlemler değişmesine rağmen üyelik fonksiyonlarından bağımsız olduğu için bulanık mantığın temel işleyişi değişmemektedir [35]. Bundan dolayı tip-2 bulanık sistemlerin genel yapısı tip-1 bulanık sistemlere oldukça benzerdir.

Tip-2 bulanık sistemler en az bir tane tip-2 bulanık kümenin kullanılmasıyla oluşturulmuş sistemlerdir. Tip-2 bulanık kümeler sistemdeki belirsizlik türüne göre bulanık sistemin bulandırma mekanizmasında, çıkış bloğunda ya da her ikisinde de kullanılabilir. Genellikle bulanık sistemin giriş işaretlerinde bir gürültü veya belirsizlik mevcutsa, belirsizliği daha iyi modellemek adına bulandırma mekanizmasında ve kuralların öncül önermelerinde tip-2 bulanık kümelerin kullanılması yararlı olmaktadır. Diğer taraftan, örneğin kontrol uygulamaları gözönüne alındığında, kontrol edilen sistemin parametrelerinin değişmesi nedeniyle bir belirsizlik ortaya çıkıyorsa bulanık sistemin çıkış bloğunda tip-2 bulanık kümelerin kullanılması belirsizliğin etkisini azaltmak adına daha faydalı olmaktadır. Genel tip-2 bulanık sistem yapısı Şekil 2.5’ de gösterilmiştir [15]. Buradan görüldüğü gibi tip-2 bulanık sistemlerin yapısında tip-1 bulanık sistemlerden farklı olarak tip indirgeme bloğu bulunmaktadır.



Şekil 2.5 : Tip-2 bulanık sistemlerin temel yapısı.

Tip-2 bulanık sistemlerde bulandırma mekanizması keskin giriş değerlerini çıkarım mekanizmasında işlenebilir hale getirmek için bulanık değerlere çevirir. Bu bulandırma işleminde tekil tip, tip-1 ya da tip-2 bulanık kümeler kullanılabilir.

Bilgi tabanı üyelik fonksiyonlarının tanımlandığı veri tabanı ve kuralların tanımlandığı kural tabanından oluşur. Veri tabanında giriş ya da çıkış bulanık kümeleri için en az bir adet tip-2 üyelik fonksiyonu tanımlı bulunmaktadır. Kural tabanında kullanılan kurallar

$$R^i : \text{EĞER } x_1 \tilde{F}_1^i \text{ ve ... ve } x_p \tilde{F}_p^i \text{ ise O HALDE } y \tilde{G}^i \text{ dir. } i = 1, \dots, M \quad (2.7)$$

şeklinde. Burada $\tilde{F}_j^i$ ve $\tilde{G}^i$ birer tip-2 bulanık kümeyi göstermektedir. Daha öncede belirtildiği gibi bulanık sistemin tip-2 bulanık sistem olması için tanımlanan bulanık kümelerin tümünün tip-2 bulanık küme olması gerekmez, en az birinin tip-2 bulanık küme olması yeterlidir.

Çıkarım mekanizması tip-1 bulanık sistemlerde olduğu gibi bulandırılmış ölçümleri kullanarak o an için hangi kuralın uygun olduğunu değerlendirir ve çıkışın ne olması gerektiğine karar verir. Buradaki tek fark çıkarım mekanizmasının sonucunun tip-1 bulanık küme yerine tip-2 bulanık küme olmasıdır.

Tip-2 bulanık sistemlerin tip-1 bulanık sistemlerden en temel farkı yapısında fazladan bir tip indirgeme mekanizmasına sahip olmasıdır. Çıkarım mekanizmasının sonucu olarak gelen tip-2 bulanık küme çıkış işlemine tabi tutulur. Burada tip-2

bulanık küme ilk olarak tip indirgeme mekanizmasında tip-1 bulanık kümeye indirgenir. Tip indirgeme mekanizmasının sonucu olan tip-1 bulanık küme de durulama mekanizmasında durulama işlemine tabi tutularak tip-0 yani uygulamada kullanılacak keskin çıkış değerine dönüştürülür.

Eğer tip-2 bulanık sistemler üyelik fonksiyonlarındaki belirsizlikten ötürü tip-1 bulanık sistemlerin belirsizlik içeren hali olarak düşünülürse, bu durumda tip indirgenmiş bulanık küme de keskin çıkış değerinin belirsizlik içeren hali olarak düşünülebilir [35]. Yani tip indirgenmiş bulanık kümenin tanımladığı değerler, belirsizlik yüzünden keskin çıkış değeri üzerinde oluşabilecek değişimler olarak düşünülebilir.

Tip-2 bulanık kümeler üzerindeki belirsizliklerin ortadan kalkması durumunda tip-2 bulanık kümelerin birincil üyelik fonksiyonları tek bir değer haline dönüşeceğinden, tip-2 bulanık kümeler tip-1 bulanık kümelere dönüşür ve dolayısıyla tip-2 bulanık sistem tip-1 bulanık sistem halini alır. Böylece tip indirgeme bloğuna gerek kalmaz. Bu yüzden tip-2 bulanık sistemler tip-1 bulanık sistemlerin genişletilmiş hali olarak görülebilir.

Gerek ikincil üyelik fonksiyonlarının seçimi ve işlemleri üzerinde gerekse tip indirgeme bloğundan ötürü tip-2 bulanık sistemlerin tasarım parametreleri tip-1 bulanık sistemlere göre daha fazladır. Bu yüzden tip-2 bulanık sistemler bu ekstra tasarım parametreleri ile tip-1 bulanık sistemlere göre daha iyi ve daha dayanıklı bir başarımla sergileyebilme potansiyeline sahiptir. Ayrıca tip-2 bulanık kümelerin ikincil üyelik fonksiyonlarının da bir bulanık küme ifade etmesinden dolayı tip-2 bulanık sistemler belirsizlikleri modelleme ve etkisini azaltma yeteneğine sahiptir.

2.4 Bulanık Çıkarım Yöntemleri

Bu bölümde bulanık sistemlerde en çok kullanılan bulanık çıkarım yöntemleri olan Mamdani ve Takagi-Sugeno-Kang çıkarım yöntemleri anlatılmaktadır. Tez çalışmasında aralık tip-2 bulanık kümeler kullanılacağından çıkarım yöntemleri bu kümeler üzerinden anlatılmıştır.

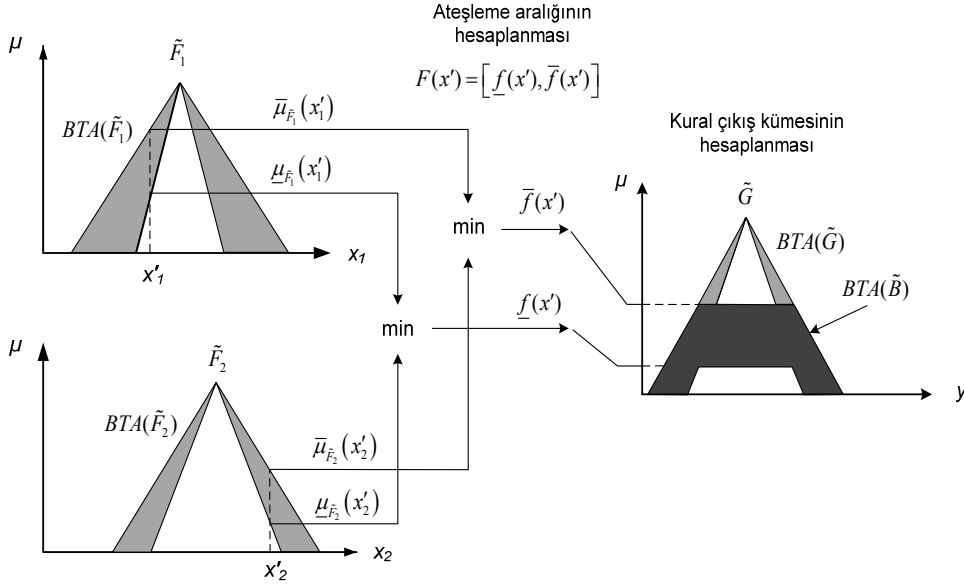
2.4.1 Mamdani tipi çıkarım yöntemi

Mamdani çıkarım yönteminde kullanılan kural yapısı

$$R^i : \text{EĞER } x_1 \tilde{F}_1^i \text{ ve ... ve } x_p \tilde{F}_p^i \text{ ise O HALDE } y \tilde{G}^i \text{ dir. } i = 1, \dots, M \quad (2.8)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $\tilde{F}_j^i$ ve $\tilde{G}^i$ birer tip-2 bulanık kümedir.

Şekil 2.6' da iki girişli bir bulanık sistem için mamdani çıkarım yöntemi ile elde edilen örnek bir sonuç gösterilmiştir. Burada t-norm ve t-conorm olarak sırasıyla minimum ve maksimum operatörleri kullanılmıştır.



Şekil 2.6 : Mamdani tipi çıkarım yöntemi.

Görüldüğü gibi nasıl ki tip-1 bulanık sistemlerde Mamdani çıkarım yönteminin sonucu tip-1 bulanık küme ise tip-2 bulanık sistemlerde de Mamdani çıkarım yönteminin sonucu yine tip-2 bulanık kümedir. Keskin sonuç değerinin elde edilmesi için bu kümenin öncelikle tip indirgeme yöntemi ile aralık tip-1 bulanık kümesi haline getirilmesi ve ardından bir durulama yöntemi ile keskin sonuç değerinin elde edilmesi gerekmektedir.

2.4.2 Takagi-Sugeno-Kang tipi çıkarım yöntemi

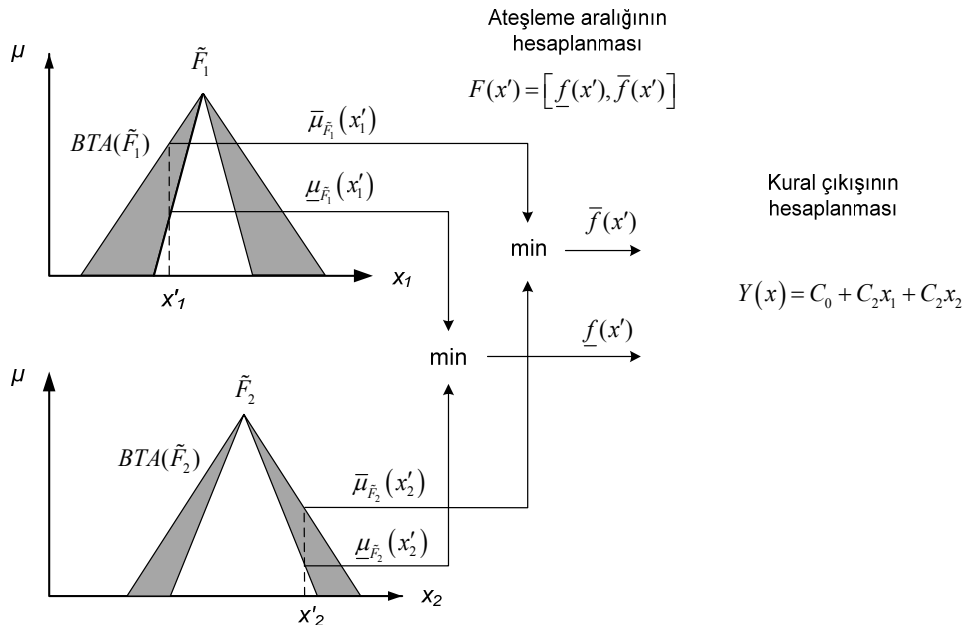
TSK çıkarım yöntemi için en genel kural yapısı aşağıda gösterilmiştir

$$R^i : \text{EĞER } x_1 \tilde{F}_1^i \text{ ve ... ve } x_p \tilde{F}_p^i \text{ ise} \\ \text{O HALDE } Y^i = C_0^i + C_1^i x_1 + \dots + C_p^i x_p \text{ dir. } i = 1, \dots, M \quad (2.9)$$

Burada $\tilde{F}_j^i$ tip-2 bulanık küme, C_j^i tip-1 bulanık küme (bulanık sayı) ve Y^i i numaralı kuralın sonucudur. Y^i kural sonucu C_j^i tip-1 bulanık kümelerinin lineer kombinasyonundan oluştuğu için yine tip-1 bulanık kümedir.

Y^i fonksiyonu birinci dereceden bir polinom olduğundan bu modele Birinci Dereceden TSK Bulanık Modeli denir. Özel bir durum olarak sonuç önermesinde Y^i bir polinom değil de $Y^i = C_0^i$ şeklinde tip-1 bulanık kümeden oluşursa, bu model Sıfırıncı Dereceden TSK Bulanık Modeli olarak adlandırılır. Genel tip-2 bulanık kümelerin kullanılması TSK bulanık sistemlerde hesaplama karmaşıklığını arttırmaktadır. Genel tip-2 bulanık kümelerinin yerine aralık tip-2 bulanık kümelerin kullanıldığı aralık tip-2 TSK bulanık sistemlerde ise hesaplamalar oldukça basitleşmektedir. Aralık tip-2 TSK bulanık sistemlerin öncül önermelerinde aralık tip-2 bulanık kümeler sonuç önermesinde ise aralık tip-1 bulanık kümeler kullanılmaktadır.

Şekil 2.7' de iki girişli bir bulanık sistem için TSK çıkarım yöntemi ile elde edilen örnek bir sonuç gösterilmiştir. Burada t-norm olarak minimum operatörü kullanılmıştır.



Şekil 2.7 : TSK tipi çıkarım yöntemi.

Görüldüğü gibi Mamdani tipi çıkarım yönteminin sonucu tip-2 bulanık küme iken, TSK tipi çıkarım yönteminin sonucu tip-1 bulanık kümedir. Bu yüzden tip-1 TSK bulanık sistemlerde durulama gerekmeden keskin çıkış elde edildiği gibi tip-2 TSK

bulanık sistemlerde de tip indirgemeye gerek kalmadan tip-1 bulanık çıkış elde edilir. Böylece sadece durulumla gerçekleştirilerek keskin çıkış (tip-0 değer) elde edilir.

Aşağıda sıfırıncı dereceden aralık tip-2 TSK bulanık sistemin işleyişi anlatılmıştır. Kuralların sonuç önermelerinde kullanılan C_j^i aralık tip-1 bulanık kümeleri aşağıdaki gibi tanımlanabilir

$$C_j^i = [c_j^i - s_j^i, c_j^i + s_j^i] \quad (2.10)$$

Burada c_j^i C_j^i 'nin merkezini, s_j^i ise C_j^i bulanık kümenin yayılım değerini göstermektedir.

Şekil 2.7' de görüldüğü gibi aralık tipi bulanık kümeler için herhangi bir giriş değerine karşı gelen üyelik değerleri yine aralık bir kümedir

$$\mu_{\tilde{F}_k^j}(x_k) = [\underline{\mu}_{\tilde{F}_k^j}(x_k), \bar{\mu}_{\tilde{F}_k^j}(x_k)] \quad k = 1, \dots, p \quad (2.11)$$

Buna bağlı olarak her bir kural için ateşleme değerleri de yine bir aralık kümedir

$$F^i(x) = [\underline{f}^i(x), \bar{f}^i(x)] \quad (2.12)$$

ve i kuralına ait ateşleme aralığı aşağıdaki gibi hesaplanır

$$\underline{f}^i(x) = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^i}(x_1) * \underline{\mu}_{\tilde{F}_2^i}(x_2) * \dots * \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^i}(x_p) \quad (2.13a)$$

$$\bar{f}^i(x) = \bar{\mu}_{\tilde{F}_1^i}(x_1) * \bar{\mu}_{\tilde{F}_2^i}(x_2) * \dots * \bar{\mu}_{\tilde{F}_p^i}(x_p) \quad (2.13b)$$

Burada $*$ ifadesi minimum ya da çarpım operatörü olarak t-normu belirtmektedir.

Kural R^i 'nin sonucu olan Y^i , tip-1 bulanık kümelerin doğrusal bir kombinasyonu olduğundan o da aralık bir küme belirtir

$$Y^i = [y_{sol}^i, y_{sağ}^i] \quad (2.14)$$

Burada y_{sol}^i ve $y_{sağ}^i$ değerleri Y^i sonuç aralık değerinin sol ve sağ sınır değerlerini belirtmektedir. Bu sınır değerler (2.10) denklemindeki bulanık kümeler ile aşağıdaki gibi hesaplanmaktadır

$$y_{sol}^i = \sum_{k=1}^p c_k^i x_k + c_0^i - \sum_{k=1}^p |x_k| s_k^i - s_0^i \quad (2.15a)$$

$$y_{sağ}^i = \sum_{k=1}^p c_k^i x_k + c_0^i + \sum_{k=1}^p |x_k| s_k^i + s_0^i \quad (2.15b)$$

Y^i değeri öncül ve sonuç önermelerindeki belirsizliklere bağlı olarak ilgili kuralın sonuç değerindeki belirsizliği ortaya koyar. Her bir kural için Y^i aralık kümeleri belirlendikten sonra sonuç aralık kümesi Ağırlıklı Ortalama yöntemi ile

$$Y_{TSK}(x) = [y_{sol}, y_{sağ}]$$

$$= \int_{y^1 \in [y_{sol}^1, y_{sağ}^1]} \cdots \int_{y^M \in [y_{sol}^M, y_{sağ}^M]} \int_{f^1 \in [\underline{f}^1(x), \bar{f}^1(x)]} \cdots \int_{f^M \in [\underline{f}^M(x), \bar{f}^M(x)]} 1 / \frac{\sum_{i=1}^M f^i y^i}{\sum_{i=1}^M f^i} \quad (2.16)$$

şeklinde elde edilir. Burada $\underline{f}^i, \bar{f}^i, y_{sol}^i$ ve $y_{sağ}^i$ değerleri her bir kural için (2.13) ve (2.15) denklemleri kullanılarak elde edilmektedir.

$Y_{TSK}(x) = [y_{sol}, y_{sağ}]$ aralık tip-1 bulanık küme olduğundan $Y_{TSK}(x)$ ' yı hesaplamak için onun sınır değerleri olan y_{sol} ve $y_{sağ}$ değerlerinin belirlenmesi yeterli olacaktır. $Y_{TSK}(x)$ sonucunu elde etmek için kapalı bir formül mevcut değildir. Bunun için y_{sol} ve $y_{sağ}$ değerleri, her bir kural için elde edilen $F^i(x) = [\underline{f}^i(x), \bar{f}^i(x)]$ ateşleme ve $Y^i = [y_{sol}^i, y_{sağ}^i]$ sonuç aralık değerlerindeki $\underline{f}^i, \bar{f}^i$ ve $y_{sol}^i, y_{sağ}^i$ sınır değerlerinin (2.16) denklemini minimum ve maksimum yapacak uygun $f^i y^i$ ikililerinin seçilmesiyle elde edilir. Bu değerlerin belirlenmesi için Karnik-Mendel yöntemi [66] gibi iteratif yöntemler kullanılmaktadır.

Son olarak TSK bulanık sistem çıkışı $Y_{TSK}(x) = [y_{sol}, y_{sağ}]$ aralık tip-1 bulanık küme olduğundan durulama mekanizmasında keskin çıkış değeri y_{sol} ve $y_{sağ}$ sınır değerlerinin ortalaması alınarak elde edilir

$$y_{TSK}(x) = \frac{y_{sol} + y_{sağ}}{2} \quad (2.17)$$

2.4.3 TSK bulanık modellerin yapıları

Tip-2 TSK bulanık modellerin yapısı öncül ve sonuç önermelerinde kullanılan üyelik fonksiyonlarının tipine göre üç değişik şekilde sınıflandırılabilir [37]. $\tilde{O}$ öncül önermeyi, S sonuç önermeyi, 0, 1 ve 2 sayıları sırasıyla tip-0, tip-1 ve tip-2 üyelik fonksiyonlarını belirtmek üzere bu sınıflandırma aşağıda gösterilmiştir.

Model I ($\tilde{O}2-S1$) en genel TSK bulanık model yapısıdır ve kural yapısı (2.9)' da gösterildiği gibidir. Yukarıda da bahsedildiği gibi burada öncül önerme tip-2 bulanık kümeleri ile oluşturulmaktadır. Sonuç önermesindeki fonksiyonda tip-1 bulanık kümeler kullanılmakta ve böylece o kurala ait çıkış yine tip-1 bulanık küme olmaktadır. Aralık tip-2 bulanık kümelerin ve aralık tip-1 bulanık kümelerin kullanılması ile oluşturulmuş aralık tip-2 TSK bulanık sistemlerinde ise her bir kurala ait çıkış aralık tip-1 bulanık küme olmaktadır.

Model II ($\tilde{O}2-S0$) TSK yapısı Model I ($\tilde{O}2-S1$) yapısının özel bir halidir ve aralarındaki fark sonuç önermesinde kullanılan fonksiyon parametrelerinin bulanık sayı yerine keskin değerler olmasıdır. Genel kural yapısı

$$\begin{aligned} R^i : & \text{EĞER } x_1 \tilde{F}_1^i \text{ ve ... ve } x_p \tilde{F}_p^i \text{ ise} \\ & \text{O HALDE } Y^i = c_0^i + c_1^i x_1 + \dots + c_p^i x_p \text{ dir.} \quad i = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (2.18)$$

şeklindedir. Burada sonuç önermesindeki c_j^i parametreleri keskin değerlerdir. Bu yüzden de Model II ($\tilde{O}2-S0$) TSK bulanık model yapısının kural çıkarımı sonucunda keskin bir değer (tip-0 kümesi) elde edilir.

Model III ($\tilde{O}1-S1$) TSK bulanık model yapısı yine Model I ($\tilde{O}2-S1$) bulanık model yapısının özel bir halini oluşturur. Genel kural yapısı aşağıdaki gibidir

$$\begin{aligned} R^i : & \text{EĞER } x_1 F_1^i \text{ ve ... ve } x_p F_p^i \text{ ise} \\ & \text{O HALDE } Y^i = C_0^i + C_1^i x_1 + \dots + C_p^i x_p \text{ dir.} \quad i = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (2.19)$$

Bu modelde öncül önermelerde kullanılan F_j^i bulanık kümeleri tip-1 bulanık kümeleridir. Sonuç önermesinde kullanılan parametreler yine birer bulanık kümedir ve dolayısıyla yine kural çıkarımı sonucu tip-1 bulanık küme elde edilir.

2.5 Tip İndirgeme İşlemi ve Aralık Tip-2 Bulanık Kümelerin Ağırlık Merkezi

Tip indirgeme işleminin amacı çıkarım mekanizması sonucu elde edilen tip-2 bulanık kümeyi tip-1 bulanık kümeye indirmektir. Bu tip-1 bulanık kümesi durulama işlemine tabi tutularak keskin çıkış değeri elde edilir. Literatürde ağırlık merkezi, kümeler merkezi, yükseklik gibi çeşitli tip indirgeme yöntemleri mevcuttur [15,37,66].

Bir aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezi kümenin içerdiği tüm gömülü tip-1 bulanık kümelerin ağırlık merkezlerinin birleşiminden oluşmaktadır [37]. Aralık tip-2 bulanık kümelerin tüm ikincil üyelik değerleri 1 olduğundan tip indirgenmiş bulanık küme sol ve sağ sınır değerleri ile tanımlanan aralık tip-1 bulanık küme olmaktadır ve aralık tip-2 bulanık kümenin sahip olduğu belirsizliğin büyüklüğü bilgisini vermektedir [66]. Aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezinin hesaplanmasında sadece bu iki sınır noktasının bulunması yeterli olmaktadır.

Bir $\tilde{A}$ aralık tip-2 bulanık kümesinin $C_{\tilde{A}}$ ağırlık merkezi aşağıdaki gibi tanımlanır

$$C_{\tilde{A}} = 1/[c_l, c_r] \quad (2.20)$$

Burada c_l ve c_r $\tilde{A}$ kümesinin sırasıyla minimum ve maksimum ağırlık merkezidir ve bu değerler tip indirgenmiş aralık tip-1 bulanık küme $C_{\tilde{A}}$ 'nın sınır değerlerini oluşturmaktadır.

Bir bulanık kümenin ağırlık merkezi aşağıdaki genel formül ile hesaplanır

$$c_{\tilde{A}} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x\mu(x)dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu(x)dx} \quad (2.21)$$

Tip-1 bulanık kümeler belirsizlik içermediklerinden tek bir ağırlık merkezi değerine sahiptirler. Tip-2 bulanık kümeler ise üyelik fonksiyonlarındaki belirsizlikten ötürü içlerinde barındırdıkları olası tip-1 bulanık kümeler kadar ağırlık merkezi değerine sahiptirler. Bu yüzden yukarıda bahsedildiği gibi tip-2 bulanık kümenin olası tüm ağırlık merkezlerinin toplamı bize indirgenmiş tip-1 aralık kümesini vermektedir. Bu indirgenmiş tip-1 aralık kümenin c_l ve c_r sınır değerleri alt ve üst üyelik fonksiyonlarının kullanılması ile sürekli yapıda aşağıdaki gibi tanımlanır [91]

$$c_l = \min(C_{\tilde{A}}) = \frac{\int_{-\infty}^L x \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) dx + \int_L^{\infty} x \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) dx}{\int_{-\infty}^L \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) dx + \int_L^{\infty} \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) dx} \quad (2.22a)$$

$$c_r = \max(C_{\tilde{A}}) = \frac{\int_{-\infty}^R x \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) dx + \int_R^{\infty} x \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) dx}{\int_{-\infty}^R \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) dx + \int_R^{\infty} \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) dx} \quad (2.22b)$$

Burada L ve R sırasıyla $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ ' den $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ ' ya ve $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ ' den $\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ ' ya olan değişimleri gösteren anahtarlama noktalarıdır ve $c_l = L$ ve $c_r = R$ eşitliği mevcuttur.

Bu sürekli yapıdaki ifadenin kullanılması tip indirgeme işleminin hesaplama süresini uzattığı için tip indirgeme işleminde genellikle yukarıdaki ifadenin ayrık yapıda ifade edilmiş hali kullanılır [66]

$$c_l = \min(C_{\tilde{A}}) = \frac{\sum_{i=1}^{k_l} x_i \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k_l+1}^N x_i \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)}{\sum_{i=1}^{k_l} \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k_l+1}^N \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)} \quad (2.23a)$$

$$c_r = \max(C_{\tilde{A}}) = \frac{\sum_{i=1}^{k_r} x_i \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k_r+1}^N x_i \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)}{\sum_{i=1}^{k_r} \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k_r+1}^N \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)} \quad (2.23b)$$

Burada N ayırıklaştırma sayısını, k_l ve k_r sırasıyla L ve R anahtarlama noktalarına denk gelen ayırıklaştırma noktalarını ifade etmektedir.

(2.23a) ve (2.23b) denklemlerini hesaplayabilmek için L ve R anahtarlama noktalarının bilinmesi gereklidir. Bazı özel durumlar dışında [67,68] ağırlık merkezi hesabı için kapalı bir formül olmadığından genellikle bu noktalar iteratif yöntemler kullanılarak bulunmaktadır. İteratif tip indirgeme yöntemlerin en önemlisi ve en popüler olanı Çizelge 2.1' gösterilen Karnik-Mendel yöntemidir [37, 66]. Bu yöntemde aralık tip-2 bulanık kümenin sadece alt ve üst sınır bilgisi kullanılır. Fakat bu yöntem gerçek zamanlı uygulamalar göz önünde bulundurulduğunda fazla iterasyon sayısına ve uzun hesaplama süresine sahiptir. KMY' nin hesaplama yoğunluğunu düşürmek için Çizelge 2.2' de gösterilen İyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi önerilmiştir [69]. İKMY daha iyi bir başlangıç koşulu kullanma,

sonuçlandırma koşulunu değiştirme ve daha iyi bir hesaplama tekniği kullanma yoluyla KMY' nin hesaplama süresini hızlandırmaktadır.

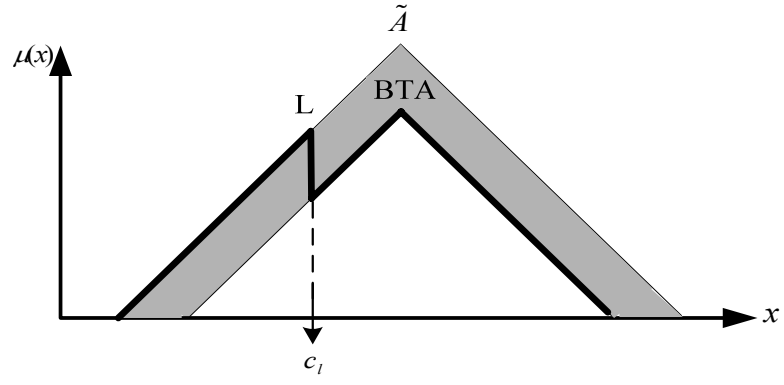
Çizelge 2.1: Karnik-Mendel Yöntemi [37, 66].

Adım	c_l' nin hesaplanması	c_r' nin hesaplanması
1	X uzayını N eşit parçaya böl. Tüm x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) değerlerini $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_N$ şeklinde küçükten büyüğe sırala. Herbirine karşılık gelen $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ ve $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ üyelik fonksiyonu değerlerini kaydet.	X uzayını N eşit parçaya böl. Tüm x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) değerleri $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_N$ şeklinde küçükten büyüğe sırala. Herbirine karşılık gelen $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ ve $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ üyelik fonksiyonu değerlerini kaydet.
2	Başlangıç üyelik fonksiyonunu $\theta_i = [\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)]/2$ $i = 1, 2, \dots, N$ şeklinde seçerek ağırlık merkezini $c' = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i}$ şeklinde hesapla.	Başlangıç üyelik fonksiyonunu $\theta_i = [\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)]/2$ $i = 1, 2, \dots, N$ şeklinde seçerek ağırlık merkezini $c' = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i}$ şeklinde hesapla.
3	$x_{k'} \leq c' \leq x_{k'+1}$ sağlayan k' ($1 \leq k' \leq N-1$) anahtarlama değerini bul.	$x_{k'} \leq c' \leq x_{k'+1}$ sağlayan k' ($1 \leq k' \leq N-1$) anahtarlama değerini bul.
4	Yeni üyelik fonksiyonu değerini $\theta_i = \begin{cases} \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) & i \leq k' \\ \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) & i \geq k'+1 \end{cases}$ şeklinde seç ve yeni ağırlık merkezi değerini $c_l(k') = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i}$ şeklinde tekrar hesapla.	Yeni üyelik fonksiyonu değerini $\theta_i = \begin{cases} \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) & i \leq k' \\ \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) & i \geq k'+1 \end{cases}$ şeklinde seç ve yeni ağırlık merkezi değerini $c_r(k') = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i}$ şeklinde tekrar hesapla.
5	Eğer $c_l(k') = c'$ ise algoritmayı durdur ve en küçük ağırlık merkezi değerini $c_l(k') = c_l$ ve anahtarlama değerini $k' = L$ şeklinde kaydet. Eğer $c_l(k') \neq c'$ ise adım 5' e git.	Eğer $c_r(k') = c'$ ise algoritmayı durdur ve en büyük ağırlık merkezi değerini $c_r(k') = c_r$ ve anahtarlama değerini $k' = R$ şeklinde kaydet. Eğer $c_r(k') \neq c'$ ise adım 5' e git.
6	$c' = c_l(k')$ olarak seç ve adım 3' e git.	$c' = c_r(k')$ olarak seç ve adım 3' e git.

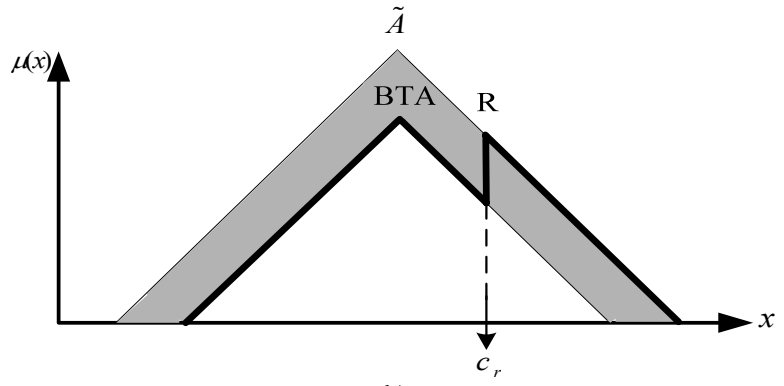
Çizelge 2.2: İyileştirilmiş Karnik-Mendel Yöntemi [69].

Adım	c_l 'nin hesaplanması	c_r 'nin hesaplanması
1	X uzayını N eşit parçaya böl. Tüm x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) değerlerini $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_N$ şeklinde küçükten büyüğe sırala. Herbirine karşılık gelen $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ ve $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ üyelik fonksiyonu değerlerini kaydet.	X uzayını N eşit parçaya böl. Tüm x_i ($i = 1, 2, \dots, N$) değerlerini $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_N$ şeklinde küçükten büyüğe sırala. Herbirine karşılık gelen $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ ve $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ üyelik fonksiyonu değerlerini kaydet.
2	$k = N/2.4$ ($N/2.4$ 'e en yakın tamsayı) için $\alpha = \sum_{i=1}^k x_i \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N x_i \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ $\beta = \sum_{i=1}^k \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ hesapla ve ağırlık merkezini $c' = \alpha/\beta$ şeklinde hesapla.	$k = N/1.7$ ($N/1.7$ 'e en yakın tamsayı) için $\alpha = \sum_{i=1}^k x_i \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N x_i \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ $\beta = \sum_{i=1}^k \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)$ hesapla ve ağırlık merkezini $c' = \alpha/\beta$ şeklinde hesapla.
3	$x_{k'} \leq c' \leq x_{k'+1}$ sağlayan k' ($1 \leq k' \leq N-1$) anahtarlama değerini bul.	$x_{k'} \leq c' \leq x_{k'+1}$ sağlayan k' ($1 \leq k' \leq N-1$) anahtarlama değerini bul.
4	Eğer $k' = k$ ise algoritmayı durdur ve en küçük ağırlık merkezi değerini $c' = c_l$ ve anahtarlama değerini $k = L$ şeklinde kaydet. Eğer $k' \neq k$ ise adım 5'e git.	Eğer $k' = k$ ise algoritmayı durdur ve en büyük ağırlık merkezi değerini $c' = c_r$ ve anahtarlama değerini $k = R$ şeklinde kaydet. Eğer $k' \neq k$ ise adım 5'e git.
5	$s = \text{sign}(k' - k)$ için $\alpha' = \alpha + s \sum_{i=\min(k, k')+1}^{\max(k, k')} x_i [\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) - \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)]$ $\beta' = \beta + s \sum_{i=\min(k, k')+1}^{\max(k, k')} [\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) - \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)]$ hesapla ve ağırlık merkezini $c''(k') = \alpha'/\beta'$ şeklinde hesapla.	$s = \text{sign}(k' - k)$ için $\alpha' = \alpha - s \sum_{i=\min(k, k')+1}^{\max(k, k')} x_i [\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) - \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)]$ $\beta' = \beta - s \sum_{i=\min(k, k')+1}^{\max(k, k')} [\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) - \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)]$ hesapla ve ağırlık merkezini $c''(k') = \alpha'/\beta'$ şeklinde hesapla.
6	$c' = c''(k')$, $\alpha = \alpha'$, $\beta = \beta'$ ve $k = k'$ olarak seç ve adım 3'e git.	$c' = c''(k')$, $\alpha = \alpha'$, $\beta = \beta'$ ve $k = k'$ olarak seç ve adım 3'e git.

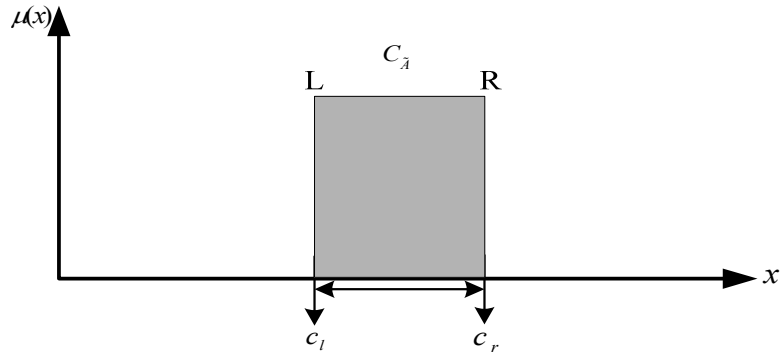
Şekil 2.8' de örnek bir $\tilde{A}$ aralık tip-2 bulanık kümesinin tip indirgeme işlemi gösterilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 2.8 : $\tilde{A}$ Aralık tip-2 bulanık kümenin a) en küçük ağırlık merkezi c_l b) en büyük ağırlık merkezi c_r c) indirgenmiş tip-1 aralık kümesi $C_{\tilde{A}}$.

3. TİP-2 BULANIK KÜMELERDE BELİRSİZLİK TABAN ALANININ OLUŞTURULMASI İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM: GRANÜLER TİP-2 ÜYELİK FONKSİYONLARI

3.1 Giriş

Zadeh [16] tarafından önerilen Tip-2 bulanık kümeleri kural tabanlı bulanık mantık sistemlerde belirsizlik etkisinin modellenmesi ve azaltılması konusunda tip-1 bulanık kümelerden daha etkilidir [37,46,92]. Tip-1 üyelik fonksiyonlarının üyelik dereceleri keskin bir değer alırken tip-2 üyelik fonksiyonlarının üyelik derecelerinin kendisi de bulanıklık içermektedir. Bu özellik belirsizliklerle doğrudan baş edebilmek için bulanık sistemlerin tasarımında fazladan serbestlik derecesi sağlamaktadır. İkincil üyelik fonksiyonları 1 olan aralık tip-2 bulanık kümeleri sağladıkları hesaplama kolaylığı nedeniyle tip-2 bulanık sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır [25,41,44,52].

Tip-2 bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları belirsizlik taban alanları ile tanımlanırlar. Belirsizlik taban alanı tip-2 bulanık kümenin birincil üyelik değerlerindeki belirsizliğin sınırlandığı alan olarak tanımlanabilir ve bu alan tüm birincil üyelik değerlerinin birleşimini ifade etmektedir [36]. Aralık tip-2 bulanık kümelerde ikincil üyelik değerleri ayırt edici bir bilgi taşımadığından belirsizlik taban alanı bu bulanık kümeleri tanımlamada doğrudan yeterli olmaktadır [90]. Tip-2 bulanık sistemlerde belirsizlik taban alanı çeşitli yollarla tanımlanabilmektedir. Bunlara örnek olarak tip-1 temel üyelik fonksiyonu ile başlayıp bunu bulanıklaştırma ya da kaydırma [34, 53], tip-1 üyelik fonksiyonu dağılımını kullanma [54], aralık tip-2 bulanık kümenin alt ve üst üyelik fonksiyonlarını Gauss, üçgen, yamuk gibi klasik tip-1 üyelik fonksiyonu seçme [55-57], geometrik yaklaşım kullanma [58-60], zSlice yaklaşımını kullanma [61], dilsel biçimlendiricileri kullanmak [62,63], baklava biçimli üyelik fonksiyonlarını kullanma [64], sinüs-kare gömülü yapısını kullanma [65] gibi yöntemler verilebilir. Literatürde yaygın olarak kullanılan geleneksel tip-2 üyelik fonksiyonları Gauss, üçgen, yamuk, sigmoid gibi şekillerdedir. Fakat gerçek belirsizlik dağılımının her zaman bu geleneksel üyelik fonksiyonları şeklinde olduğunu varsaymak bulanık sistemin modelleme yeteneğini kısıtlamaktadır [59].

Bu yüzden bu geleneksel şekillerdeki tip-2 üyelik fonksiyonları hibrit ve anahtarlama sistemleri ve/veya ölü bölge, dişli boşluğu gibi yüksek doğrusal olmayan karakteristikler barındıran sistemler gibi bazı durumlarda belirsizliği modellemede yetersiz kalabilmektedirler. Bu gibi durumlarda belirsizlikleri modellemek ve tip-2 üyelik fonksiyonlarının belirsizlik taban alanını tanımlamak için daha esnek tasarım yaklaşımlarına ihtiyaç olduğu açıktır.

Bulanık granül kavramı Zadeh [93] tarafından önerilmiştir ve literatürde sıklıkla kullanılmaktadır [94-99]. Mendel ve Wu [68] çalışmalarında bir dikdörtgen yapıdaki aralık tip-2 bulanık granülü (DAT2-BG) bir bulanık küme olarak ele almıştır. Burada bulanık granülün taban alanı tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanını oluşturmaktadır. Fakat bu şekilde tanımlanmış bulanık küme dilsel tanımlama özelliğini yitirmiş olmaktadır. Bunun yerine dikdörtgen yapıdaki aralık tip-2 bulanık granülleri aralık tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanının bir parçası olarak kullanmak daha uygun bir yaklaşımdır [100].

Tez çalışmasının bu bölümünde Granüler Tip-2 Üyelik Fonksiyonu (GT2-ÜF) olarak adlandırılan, belirsizlik taban alanı dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüller (DT2-BG) kullanılarak oluşturulan yeni bir üyelik fonksiyonu önerilmiştir. Granüler tip-2 üyelik fonksiyonları tip-2 bulanık sistemlerde daha fazla serbestlik derecesi ve tasarım esnekliği sağlamak ve böylece tip-2 bulanık sistemin belirsizliklerle baş edebilme yeteneğini arttırmaktadır. Granüler tip-2 üyelik fonksiyonları kullanılarak tanım uzayındaki herhangi bir bölge için üyelik dereceleri üzerindeki belirsizlikler birbirinden bağımsız olarak tanımlanabilmektedir. Bu özellik yüksek doğrusal olmayan yapıya sahip, süreksiz ya da hibrit üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasına ve tanım uzayında ya da giriş-çıkış atama yüzeyinde istenilen süreksiz ve/veya çeşitli türdeki doğrusal olmayan bölgelerin modellenmesine imkan sağlamaktadır. Bu yüzden granüler tip-2 üyelik fonksiyonları ölü bölge, dişli boşluğu gibi yüksek doğrusal olmayan karakteristiklere sahip sistemlerin ve hibrit ya da anahtarlama sistemlerinin modellenmesi ve kontrolünde oldukça etkin ve faydalıdır. Ayrıca, granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının değişkenlerine bağlı türev ifadeleri oldukça basittir ve bu yüzden türeve dayalı en iyileme algoritmaları granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının parametrelerinin ayarlanmasında kolayca kullanılabilir. Önerilen granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının etkinliği Mackey-Glass zaman serisi

tahmini ve ölü bölgeye sahip parametreleri belirsiz doğrusal olmayan bir sistemin modellenmesi üzerinde yapılan benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir.

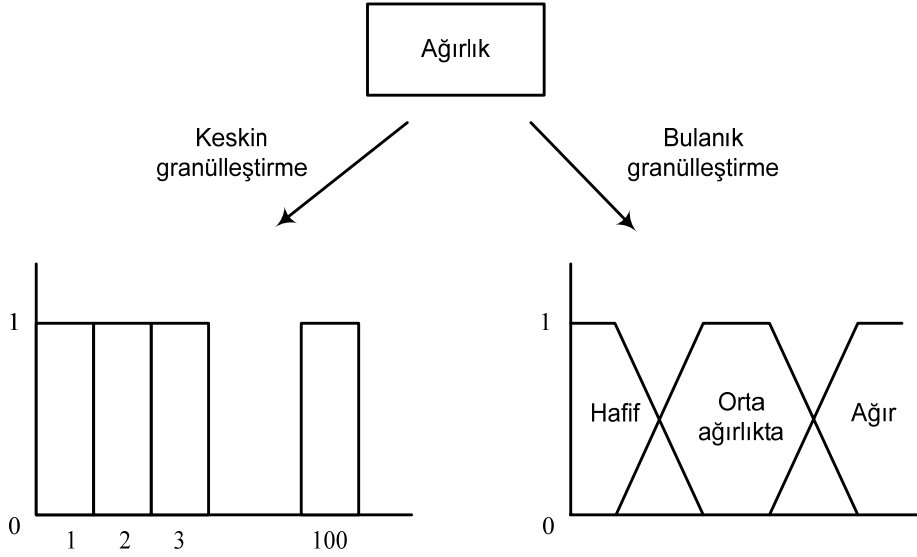
3.2 Granül Kavramı ve Dikdörtgen Yapıdaki Tip-2 Bulanık Granüller

3.2.1 Granül kavramı

Granül kavramı aynılık, benzerlik, yakınlık veya fonksiyonellik gibi kriterler gözönünde bulundurularak bir araya getirilmiş nesneler bütünü olarak tanımlanabilmektedir [93]. Granülleştirme ise bir bütünü benzer parçalara ayırarak onu bu granüllerin toplamı şeklinde ifade etmek anlamına gelmektedir. Granülleştirme karmaşık yapıdaki problemlerin daha küçük bölümlere ayrılarak daha kolay bir şekilde ele alınmasını sağlamaktadır.

Granüllerin oluşturulması konusunda iki önemli nokta vardır [101]. Bunlar granülleştirmenin amacının ve çözünürlüğünün belirlenmesidir. Örneğin granülleştirmenin amacı objeleri benzer ağırlıklara ayırmak olabilir. Bu durumda granüller objelerin ağırlıklarının benzerliklerine göre belirlenecektir. Granülleştirmenin çözünürlüğü ise bütünün bölünmesi ile ilgilidir, yani çözünürlük granüllerin boyutlarını belirleyecektir. Örneğin [0-100] arasındaki ağırlıklar için granülleştirmenin çözünürlüğü 25 kg olarak seçildiğinde [0-25],..., [75-100] granülleri elde edilecektir. Granülleştirme çözünürlüğünün 10 kg şeklinde daha yüksek seçilmesi durumunda ise [0-10],..., [90-100] şeklinde daha fazla granül elde edilecektir.

Şekil 3.1’ de gösterildiği gibi granüller keskin ya da bulanık tiplerde tanımlanabilir. Keskin granüller küme teorisi, aralık analizi, makina öğrenmesi, Dempster-Shafer teorisi, kümeleme analizi, niceleme, kısıtlı programlama, bulanık küme teorisi ve birçok farklı alanda kullanılmaktadır [102-113].



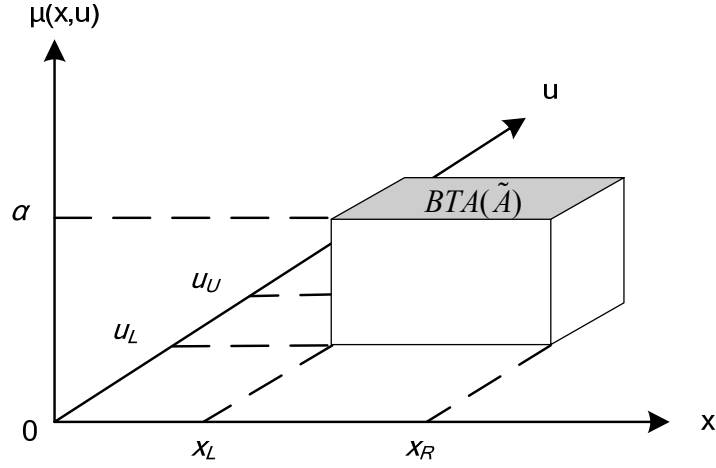
Şekil 3.1 : ‘Ağırlık’ teriminin keskin ve bulanık granülleştirilmesi.

Fakat insan akıl yürütme yaklaşımında gerçekleştirilen granülleştirmelerin neredeyse tümünde keskin yerine bulanık ifadeler hakimdir. Bu yüzden insan çıkarım yaklaşımının daha iyi yansıtılabilmesi adına bulanık granüllerin kullanılması daha uygundur [93]. Bulanık granüller keskin granüllerin bulanıklaştırılmış hali olarak düşünülebilir. Bu yüzden bir bulanık küme ya da bulanık sayı ile tanımlanabilirler [99] ve bulanık mantık teorisinin belirsizliği ve kesin olmayan bilginin modellenmesi üzerindeki üstün özelliklerini doğrudan kullanabilirler.

3.2.2 Dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüller

Bulanık granüller çember, dikdörtgen, üçgen, Gauss gibi birçok farklı şekilde tanımlanabilir. Bu çalışmada tip-2 bulanık sistemlerde sağladığı birçok hesaplama avantajı dolayısıyla dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüller kullanılmıştır. Dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granül ile ilgili aşağıdaki tanımlamalar yapılabilir.

Tanım 1. Bir dikdörtgen yapıda tip-2 bulanık granül Şekil 3.2’ de gösterildiği gibi taban alanı birincil üyelik fonksiyonu olarak belirsizlik taban alanını ve yüksekliği $\alpha \in [0,1]$ ikincil üyelik fonksiyonunu gösteren bir dikdörtgenler prizmasıdır.



Şekil 3.2 : Dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granül.

Şekil 3.2’ de x_L ve x_R dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granülün x -eksenindeki minimum ve maksimum sınır değerlerini, u_L ve u_U birincil minimum ve maksimum üyelik değerlerini, α ikincil üyelik değerini göstermektedir. Gri ile gösterilmiş alan ise dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granülün belirsizlik taban alanını göstermektedir.

Tanım 2. Dikdörtgen yapıdaki aralık tip-2 bulanık granül tüm ikincil üyelik değerleri $\alpha=1$ olan dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüldür.

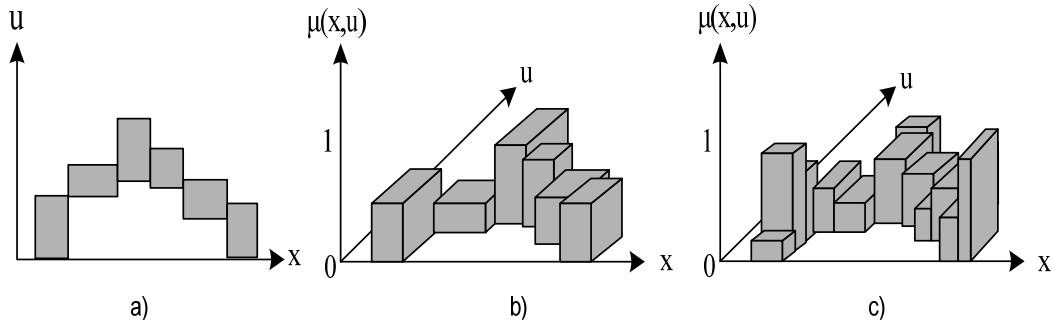
Mendel ve Wu [68] çalışmalarında taban alanı bulanık kümenin belirsizlik taban alanını belirtecek şekilde bir dikdörtgen yapıdaki aralık tip-2 bulanık granülün bir bulanık küme olarak ele alınabileceğini önermişlerdir. Ayrıca çalışmada dikdörtgen yapıdaki aralık tip-2 bulanık granül bir bulanık küme olarak ele alındığında, bu kümenin ağırlık merkezinin kapalı bir formül ile ifade edilebildiğini göstermişlerdir. Bu hiç şüphesiz dikdörtgen yapıdaki aralık tip-2 bulanık granüllerin en önemli özelliklerinden biridir. Fakat tek bir dikdörtgen yapıdaki aralık tip-2 bulanık granülün bu şekilde bir bulanık küme olarak kullanılması tip-2 bulanık küme anlamındaki bulanıklığı ve dilsel tanımlama özelliğini azaltmaktadır. Bunun yerine tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanının dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüller kullanılarak granülleştirilmesi bu sorunu ortadan kaldırır ve tip-2 bulanık sistemdeki dilsel ifade edilebilme ve bulanıklık özelliklerinin korunması sağlanmış olur. Bu çalışmada bu fikirden yola çıkılarak tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanının tanımlanmasında dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüller kullanılmıştır.

3.3 Granüler Tip-2 Üyelik Fonksiyonları

3.3.1 Granüler tip-2 üyelik fonksiyonları ile ilgili tanımlamalar ve gösterimler

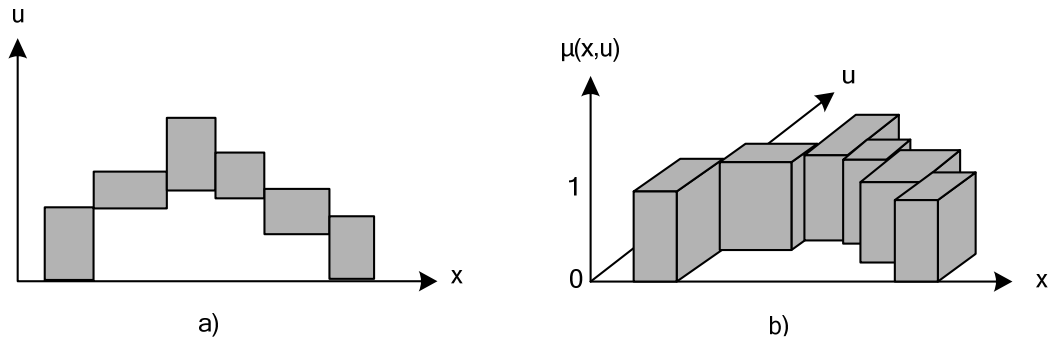
Bu bölümde granüler tip-2 üyelik fonksiyonu olarak adlandırılan ve dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüller kullanılarak oluşturulan yeni bir üyelik fonksiyonu tipi gösterilmiştir.

Tanım 3. Belirsizlik taban alanı dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüller kullanılarak oluşturulmuş bir tip-2 bulanık kümeye *Granüler Tip-2 Bulanık Küme (GT2-BK)* adı verilir ve bu kümenin üyelik fonksiyonu *Granüler Tip-2 Üyelik Fonksiyonu* olarak adlandırılır. Bu yaklaşım Şekil 3.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : a) GT2-ÜF’ nun belirsizlik taban alanı b) GT2-ÜF’nun üç boyutlu gösterimi c) daha yüksek çözünürlüğe sahip GT2-ÜF’ nun üç boyutlu gösterimi.

Tanım 4. Belirsizlik taban alanı dikdörtgen yapıdaki aralık tip-2 bulanık granüller kullanılarak oluşturulmuş bir aralık tip-2 bulanık kümeye *Granüler Aralık Tip-2 Bulanık Küme (GAT2-BK)* adı verilir ve bu kümenin üyelik fonksiyonu *Granüler Aralık Tip-2 Üyelik Fonksiyonu (GAT2-ÜF)* olarak adlandırılır. Granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonları için örnek bir gösterim Şekil 3.4’ de verilmiştir.



Şekil 3.4 : GAT2-ÜF için örnek bir gösterim a) GAT2-ÜF’ nun belirsizlik taban alanı b) GAT2-ÜF’ nun üç boyutlu gösterimi.

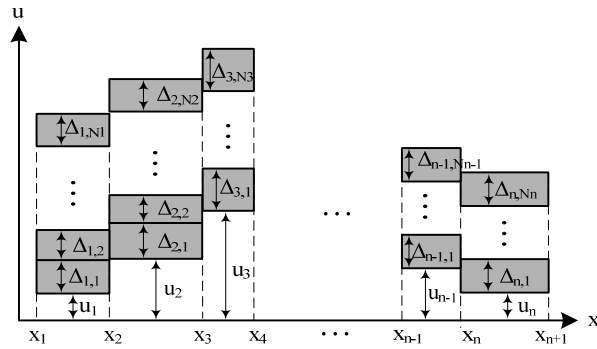
Granüler tip-2 üyelik fonksiyonunun matematiksel tanımı aşağıdaki gibidir

$$\underline{\mu}(x) = \{u_i \quad x_i \leq x < x_{i+1} \quad (3.1a)$$

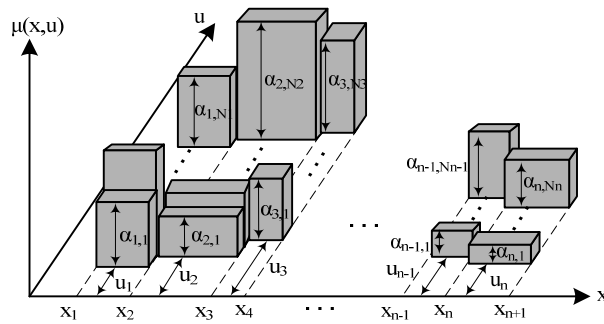
$$\bar{\mu}(x) = \left\{ u_i + \sum_{j=1}^{N_i} \Delta_{i,j} \quad x_i \leq x < x_{i+1} \quad (3.1b)$$

$$\mu(x, u) = \left\{ \alpha_{i,j} \quad u_i + \sum_{k=1}^j \Delta_{i,k-1} \leq u < u_i + \sum_{k=1}^j \Delta_{i,k} \quad \text{ve} \quad x_i \leq x < x_{i+1} \quad (3.1c)$$

Bu ifadelerde $\Delta_{i,0} = 0$, $i=1, \dots, n$ ve $j=1, \dots, N_i$ olmak üzere Şekil 3.5’ de gösterildiği gibi, n x -ekseni üzerindeki granüler bölge sayısını, N_i i^{inci} granüler bölge üzerindeki belirsizlik taban alanını oluşturan dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granül sayısını, x_i x -ekseni üzerinde her bir granüler bölgenin sınır noktalarını, $\underline{\mu}(x)$ ve $\bar{\mu}(x)$ granüler tip-2 üyelik fonksiyonunun alt ve üst üyelik fonksiyonlarını, u_i granüler tip-2 üyelik fonksiyonunun i^{inci} granüler bölgedeki alt üyelik değerini, $\Delta_{i,j}$ granüler tip-2 üyelik fonksiyonundaki i^{inci} granüler bölgedeki j^{inci} bulanık granülün derinliğini ve $\alpha_{i,j}$ tip-2 üyelik fonksiyonunda i^{inci} granüler bölgedeki j^{inci} bulanık granülün ikincil üyelik değerini göstermektedir.



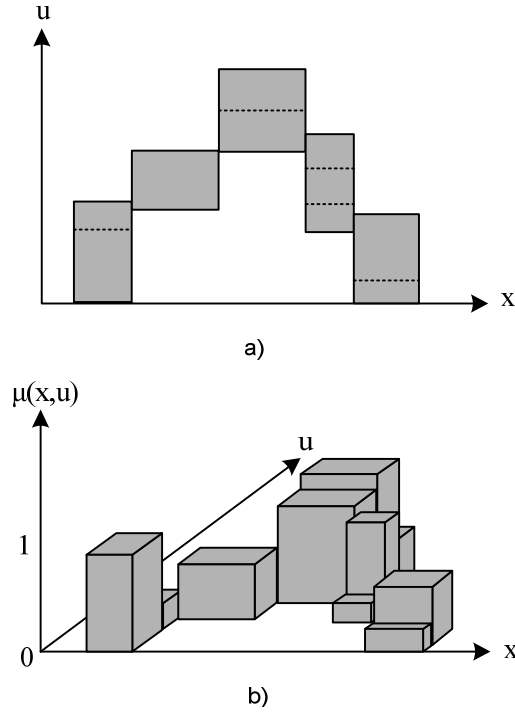
a)



b)

Şekil 3.5 : GT2-ÜF’ nun parametrelerinin a) belirsizlik taban alanı üzerinde b) üç boyutlu görünüm üzerinde gösterimi.

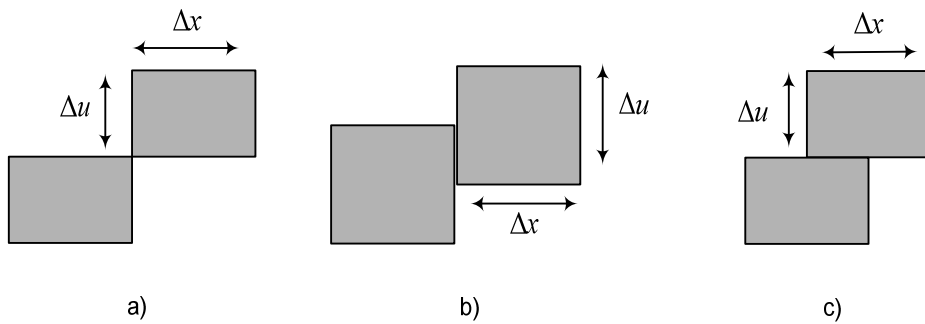
Parametre değerleri $i=5$ ve $N_1=2, N_2=1, N_3=2, N_4=3, N_5=2$ olarak seçilmiş örnek bir granüler tip-2 üyelik fonksiyonunun grafiksel gösterimi Şekil 3.6’ da verilmiştir.



Şekil 3.6 : Parametreleri $i=5$ ve $N_1=2, N_2=1, N_3=2, N_4=3, N_5=2$ olan GT2-ÜF gösterimi a) belirsizlik taban alanı b) üç boyutlu gösterim.

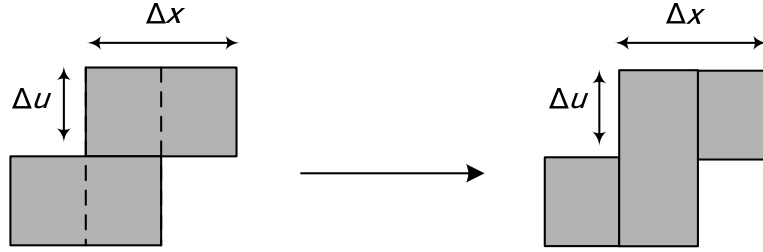
3.3.2 Granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının belirsizlik taban alanının oluşturulması

Dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüller granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının belirsizlik taban alanlarının oluşturulması için Şekil 3.7’ de gösterildiği gibi üç farklı şekilde biraraya getirilebilirler. Kullanılan temel yapı Şekil 3.7a’ da gösterilmiştir. Diğer iki yapı sırasıyla Şekil 3.7b ve Şekil 3.7c’ de gösterildiği gibi temel yapının yatay ya da dikey ekseninde kaydırılması ile elde edilmektedir.



Şekil 3.7 : DT2-BG’ lerin biraraya getirilmesinde kullanılan yapılar a) temel yapı b) dikey olarak kaydırılmış yapı c) yatay olarak kaydırılmış yapı.

Şekil 3.8’ de gösterildiği gibi yatay olarak kaydırılmış yapı dikey olarak kaydırılmış yapılar cinsinden tanımlanabilmektedir. Bu yüzden granüler tip-2 üyelik fonksiyonu tasarımında sadece temel yapı ve temel yapının dikey olarak kaydırılmış halinin kullanılması yeterlidir.



Şekil 3.8 : Yatay olarak kaydırılmış yapının dikey olarak kaydırılmış yapı cinsinden gösterimi.

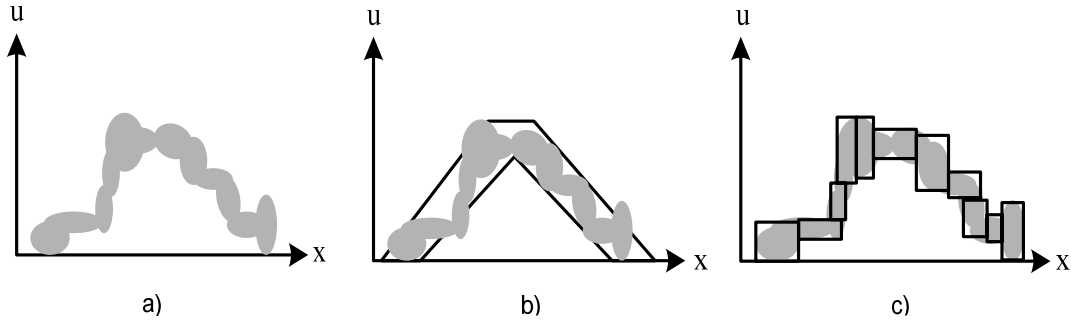
Sonuç olarak gösterilen yapıların kullanılması ile çok çeşitli şekillerde GT2-ÜF’ ları tanımlanabilmektedir.

3.3.3 Granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının özellikleri ve üstünlükleri

Aşağıda sıralanan özellikleri dolayısıyla granüler tip-2 üyelik fonksiyonları tip-2 bulanık sistemlerin tasarımında belirsizliğin modellenmesi ve baş edilmesi için daha fazla esneklik ve serbestlik sağlamaktadır.

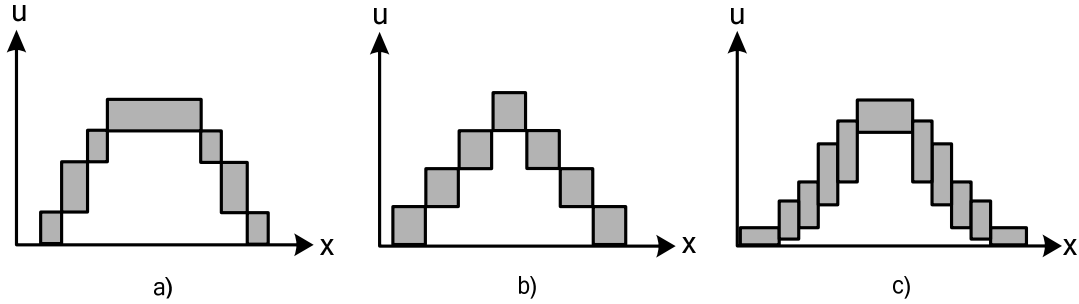
3.3.3.1 Modelleme ve tasarım özellikleri

Tip-2 üyelik fonksiyonlarının tanımlanmasında genellikle Gauss, üçgen, yamuk gibi geleneksel tip fonksiyonlar kullanılmaktadır. Bu şekilde oluşturulmuş geleneksel üyelik fonksiyonları gerçek belirsizlik dağılımını yansıtamayabilirler veya bazı durumlarda belirsizliği uygun şekilde modellemede yetersiz kalabilirler. Örneğin, bir bulanık kümenin üyelik dereceleri üzerinde Şekil 3.9a’ da gösterildiği gibi bir belirsizlik olması durumunda Şekil 3.9b’ den görüldüğü gibi yamuk şeklinde tanımlanmış geleneksel üyelik fonksiyonu bu belirsizliği kapsamakta ve ifade etmekte yetersiz kalmaktadır. Diğer taraftan Şekil 3.9c’ de gösterildiği gibi bu belirsizlik granüler tip-2 üyelik fonksiyonu ile daha iyi bir biçimde ifade edilebilmektedir.

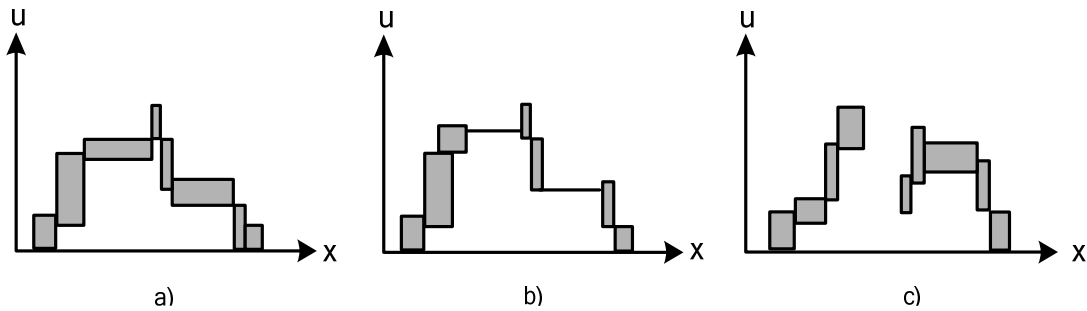


Şekil 3.9 : a) Üyelik değerlerinin belirsizlik dağılımı b) yamuk T2-ÜF ile belirsizliğin ifade edilmesi c) GT2-ÜF ile belirsizliğin ifade edilmesi.

Önerilen yöntemin bir diğer önemli özelliği granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının tip-2 bulanık sistemlerde daha çok serbestlik derecesi ve tasarım esnekliği sağlamasıdır. Şekil 3.10’ da gösterildiği gibi dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüller kullanılarak granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının belirsizlik taban alanları geleneksel üçgen, Gauss, yamuk gibi şekillerde oluşturulabilir. Üyelik fonksiyonlarının bu geleneksel şekillerinin yanında, önerilen yöntem ile üyelik değerleri üzerindeki belirsizlik herhangi bir fonksiyondan bağımsız şekilde tanımlanabilmektedir. Böylelikle sırasıyla Şekil 3.11a, Şekil 3.11b ve Şekil 3.11c’ de gösterildiği gibi doğrusal olmayan, hibrit (tip-1 ve tip-2 bulanıklığı bir arada barındıran) ve süreksiz yapıdaki tip-2 üyelik fonksiyonları kolayca tanımlanabilmektedir.



Şekil 3.10 : a) Yamuk b) üçgen ve c) Gauss şeklinde geleneksel yapıda oluşturulmuş granüler tip-2 üyelik fonksiyonları.



Şekil 3.11 : a) Doğrusal olmayan b) hibrit ve c) süreksiz yapıda tanımlanmış granüler tip-2 üyelik fonksiyonları.

Önerilen yöntem modelleme üzerindeki bu özellikleri sayesinde tasarımcıya herhangi bir belirli fonksiyon şekline bağlı kalmadan belirsizliği ifade edilebilme imkanı sağlamaktadır. Bu yüzden granüler tip-2 üyelik fonksiyonlar belirsizlikleri geleneksel tip-2 üyelik fonksiyonlarından daha iyi modelleyebilmektedir. Ayrıca önerilen granüler yaklaşımın tip-2 üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasında sahip olduğu esnek tasarım özelliklerine bağlı olarak modelleme ve kontrol uygulamalarında ihtiyaç duyulan, tanım uzayında veya giriş çıkış atama yüzeyindeki sürekli ve/veya süreksiz bölgeler kolayca oluşturulabilmektedir.

3.3.3.2 Hesaplama özellikleri

Bir granüler tip-2 üyelik fonksiyonunu tanımlamak (3.1a), (3.1b) ve (3.1c) numaralı denklemlerden görüldüğü gibi oldukça basittir. Bu özellik doğal olarak tip-2 bulanık küme ve tip-2 bulanık sistemlerdeki işlemleri basitleştirerek hesaplama karmaşıklığını azaltmaktadır. Ayrıca granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının parametrelerine bağlı türevleri her zaman sabit olup 1 değerindedir. Bu yüzden granüler tip-2 üyelik fonksiyonunun parametrelerinin ayarlanmasında En Dik Çökertme (Steepest Descent) (SD) gibi türeve dayalı en iyileme algoritmaları kolayca kullanılabilir.

Şekil 3.5' den görüldüğü gibi granüler tip-2 üyelik fonksiyonunun her bir granüler bölgesinde alt üyelik fonksiyonu derecesi u_i , belirsizlik aralığı $\Delta_{i,j}$ ve ikincil üyelik değeri $\alpha_{i,j}$ için $1+2 \cdot N_i$ parametrenin belirlenmesi gerekmektedir. Granüler bölgeler tanım uzayında eşit olarak ayrılabilir ya da her bir bölgenin uzunluğu değişken olabilir. Granüler bölgelerin uzunluklarının eşit seçilmediği durumda x_i parametresi de bir ayarlama parametresi olarak ortaya çıkmaktadır.

Bir granüler tip-2 üyelik fonksiyonunun $\Delta_{i,0} = 0$, $i=1, \dots, n$ ve $j=1, \dots, N_i$ olmak üzere u_i , $\Delta_{i,j}$ ve $\alpha_{i,j}$ parametrelerine göre alt, üst ve ikincil üyelik fonksiyonlarının türevleri aşağıdaki gibi tanımlanır

$$\frac{\partial \underline{\mu}(x)}{\partial u_i} = \begin{cases} 1 & x_i \leq x < x_{i+1} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \quad (3.2a)$$

$$\frac{\partial \underline{\mu}(x)}{\partial \Delta_{i,j}} = 0 \quad (3.2b)$$

$$\frac{\partial \underline{\mu}(x)}{\partial \alpha_{i,j}} = 0 \quad (3.2c)$$

$$\frac{\partial \bar{\mu}(x)}{\partial u_i} = \begin{cases} 1 & x_i \leq x < x_{i+1} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \quad (3.3a)$$

$$\frac{\partial \bar{\mu}(x)}{\partial \Delta_{i,j}} = \begin{cases} 1 & x_i \leq x < x_{i+1} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \quad (3.3b)$$

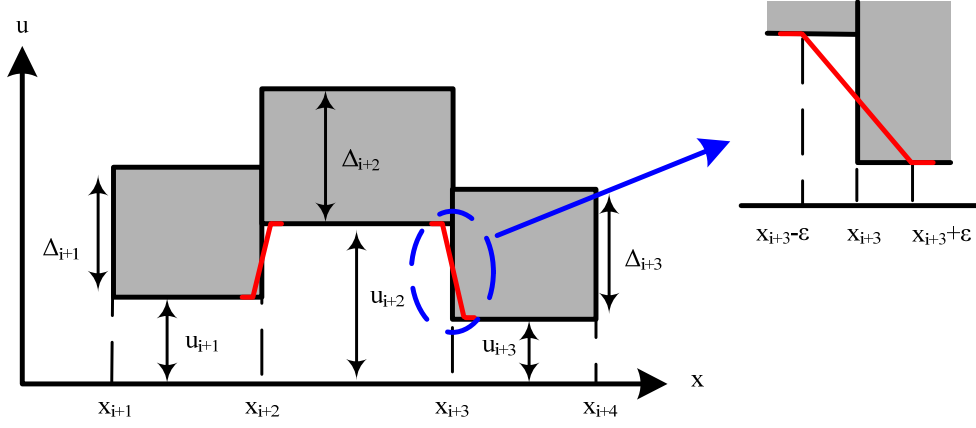
$$\frac{\partial \bar{\mu}(x)}{\partial \alpha_{i,j}} = 0 \quad (3.3c)$$

$$\frac{\partial \mu(x, u)}{\partial u_i} = 0 \quad (3.4a)$$

$$\frac{\partial \mu(x, u)}{\partial \Delta_{i,j}} = 0 \quad (3.4b)$$

$$\frac{\partial \mu(x, u)}{\partial \alpha_{i,j}} = \begin{cases} 1 & u_i + \sum_{k=1}^j \Delta_{i,k-1} \leq u < u_i + \sum_{k=1}^j \Delta_{i,k} \text{ and } x_i \leq x < x_{i+1} \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \quad (3.4c)$$

Türev ifadelerinden görüldüğü gibi granüler bölgelerin x_i sınır değerleri birer ayarlama parametresi olarak seçilebilmesine karşın, x_i sadece *eğer* koşul ifadelerinde bulunmaktadır. Bu yüzden bu değişkene bağlı türev ifadeleri mevcut değildir. Yine de en iyileme uygulaması için x_i ile ilgili türev ifadesinin çıkarılması için bir yaklaşık fonksiyon tanımı önerilebilir. Bu yaklaşımla alt üyelik fonksiyonundaki ardışık granüller arasındaki sınırlar Şekil 3.12’ de gösterildiği gibi $x_i - \varepsilon < x < x_i + \varepsilon$ gibi küçük bir aralık içinde dik bir eğime sahip doğrusal bir fonksiyon ile tanımlanabilir. Pratikte ε değerinin x-eksenindeki granüler çözünürlüğe bağlı genişliğinin %5’ i kadar seçilmesi yeterlidir.



Şekil 3.12 : Granüler sınır değerlerin doğrusal fonksiyon şeklinde tanımlanması.

Tanımlanan doğrusal fonksiyon aşağıdaki gibidir

$$f(x) = ax + b \quad (3.5)$$

burada

$$a = \frac{u_i - u_{i-1}}{2\varepsilon} \quad (3.6)$$

$$b = \frac{u_{i-1}(x_i + \varepsilon) - u_i(x_i - \varepsilon)}{2\varepsilon} \quad (3.7)$$

şeklinde. x_i parametresi için gerçekleştirilen en iyileme işleminde alt üyelik fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir

$$\underline{\mu}_{opt}(x) = \begin{cases} \left(\frac{u_i - u_{i-1}}{2\varepsilon} \right) x + \frac{u_{i-1}(x_i + \varepsilon) - u_i(x_i - \varepsilon)}{2\varepsilon} & x_i - \varepsilon < x < x_i + \varepsilon \\ \underline{\mu}(x) & \text{değilse} \end{cases} \quad (3.8)$$

x_i parametresine göre alt üyelik fonksiyonunun türevi

$$\frac{\partial \underline{\mu}_{opt}(x)}{\partial x_i} = \begin{cases} \frac{u_{i-1} - u_i}{2\varepsilon} & x_i - \varepsilon < x < x_i + \varepsilon \\ 0 & \text{değilse} \end{cases} \quad (3.9)$$

şeklinde olur.

(3.9) denkleminde görüldüğü gibi x_i parametresine bağlı ortaya çıkan türev ifadesi oldukça basittir. Benzer türev ifadesi üst üyelik fonksiyonları kullanılarak da çıkarılabilir. Bu türev ifadeleri türeve dayalı en iyileme yöntemlerini basit bir biçimde kullanma imkanı sağlar.

3.4 Benzetim Sonuçları

Önerilen granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının etkinliğini ve tasarımdaki esnekliğini gösterebilmek için aşağıda belirtilen iki modelleme örneği seçilmiştir:

- i) Mackey-Glass zaman serisi tahmini
- ii) Ölü bölgeye sahip doğrusal olmayan sistemin modellenmesi.

Modelleme çalışması klasik ve granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonları ile tasarlanmış aralık tip-2 bulanık sistemler kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu bulanık sistemler sırasıyla KAT2-BS ve GAT2-BS olarak adlandırılmıştır. Mackey-Glass zaman serisi tahmini çalışmasında KAT2-BS ve GAT2-BS başarımları gürültülü girişlerin mevcut olması durumu için karşılaştırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada granüler çözünürlüğün GAT2-BS başarımı üzerindeki etkisi de gösterilmiştir. Ölü bölgeye sahip doğrusal olmayan sistem için ise başarımların karşılaştırılması sistem parametrelerinde belirsizlik bulunması durumu için yapılmıştır.

3.4.1 Mackey-Glass zaman serisi tahmini

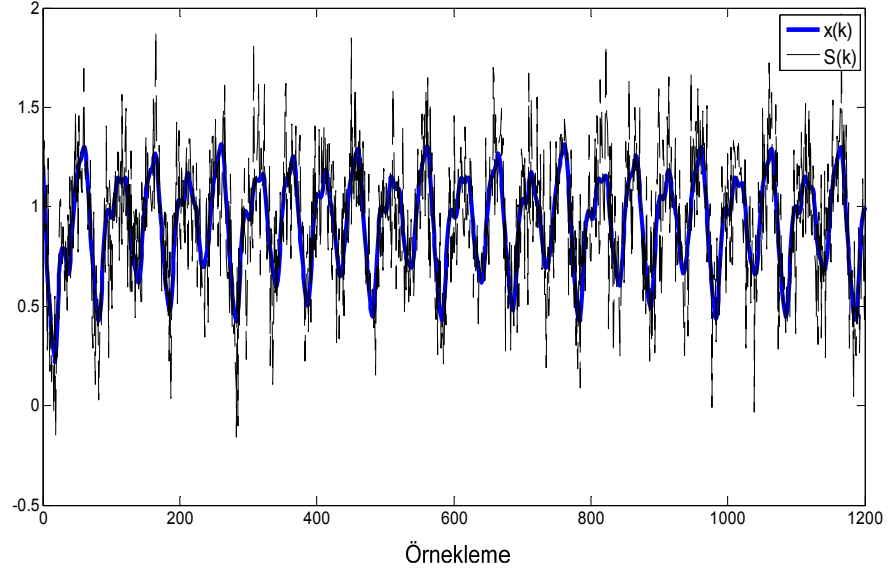
Mackey-Glass zaman serisi aşağıda belirtilen dinamik denklem ile ifade edilir [113]:

$$\dot{x}(t) = 0.2 \frac{x(t-\tau)}{1 + x^{10}(t-\tau)} - 0.1x(t) \quad (3.10)$$

Bu ifadede $\tau \geq 17$ için kaotik bir sistem yanıtı elde edilmektedir. Modeldeki değerler $\tau = 17$, $x(0) = 1.2$ olarak seçilmiştir.

Gürültülü girişlerin modelleme başarımı üzerindeki etkisini incelemek için bu çalışmada $x(k)$ verisine ortalaması sıfır ve işaret/gürültü oranı (SNR) 0 dB olan $n(k)$ gürültü verisi etki ettiği varsayılmıştır. Mevcut gürültülü veri $S(k) = x(k) + n(k)$, $k = 1, 2, \dots, N$ şeklinde ifade edilebilir. Veri örnekleme sayısı $N = 1000$ olarak seçilmiştir. İlk 500 veri $s(200), s(201), \dots, s(700)$ eğitim için, kalan 500 veri ise $s(701), s(702), \dots$,

$s(1200)$ test için kullanılmıştır. Mackey-Glass zaman serisinin gürültü etkimemiş ve gürültü etkimiş işaretleri Şekil 3.13’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.13 : Gürültü etkimemiş ve 0 dB SNR gürültü etkimiş Mackey-Glass zaman serisi işaretleri.

Aralık tip-2 bulanık sistemlerde Takagi-Sugeno-Kang tipi çıkarım tercih edilmiştir ve öncül üyelik fonksiyonları tip-2 bulanık kümeler ve sonuç üyelik fonksiyonları keskin fonksiyonlar (tip-0) olan Ö2-S0 TSK modeli kullanılmıştır. Ö2-S0 TSK sistemlerin genel yapısı aşağıdaki gibidir

$$\begin{aligned} R^i &= \text{EĞER } x_1 \tilde{F}_1^i \text{ ve } x_2 \tilde{F}_2^i \text{ ve } \dots x_n \tilde{F}_n^i \text{ ise} \\ &\text{O HALDE } y^i = a_0^i + a_1^i \cdot x_1 + a_2^i \cdot x_2 + \dots a_n^i \cdot x_n \quad i = 1, \dots, M. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Burada $\tilde{F}_j^i$ i kuralındaki j giriş değişkeninin tip-2 bulanık kümesini, $x_1, \dots, x_n$ girişleri, $a_0^i, \dots, a_n^i$ i kuralı için keskin çıkış fonksiyonunun katsayılarını, y^i i kuralının çıkışını ve M kural sayısını göstermektedir.

Aralık tip-2 bulanık sistemlerin girişleri $s(k-3)$, $s(k-2)$, $s(k-1)$ ve $s(k)$ olarak ve çıkışı ise $x(k+1)$ olarak seçilmiştir. Her bir giriş için iki adet aralık tip-2 üyelik fonksiyonu (AT2-ÜF) kullanılmıştır ve böylece kural sayısı 2^4 olmaktadır. 16 kuralın ilki örnek olarak aşağıda gösterilmiştir

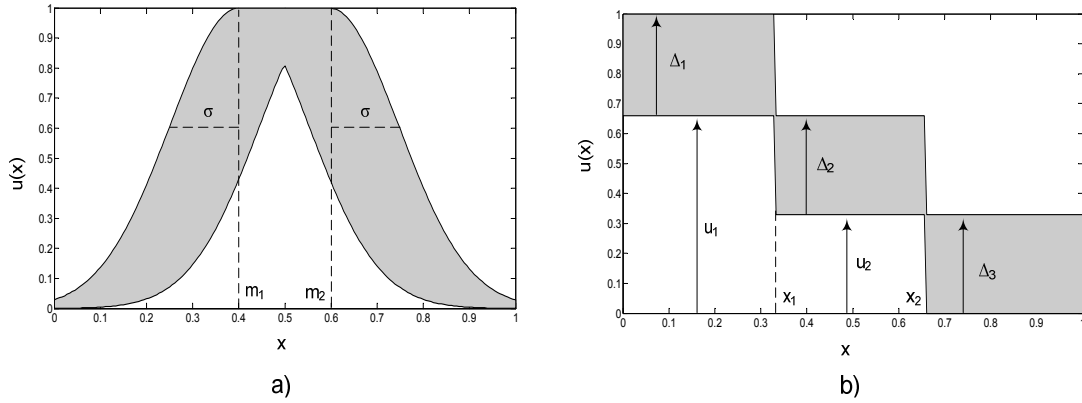
$$\begin{aligned} R^1 &= \text{EĞER } s(k-3) \tilde{F}_1^1 \text{ ve } s(k-2) \tilde{F}_2^1 \text{ ve } s(k-1) \tilde{F}_3^1 \text{ ve } s(k) \tilde{F}_4^1 \text{ ise} \\ &\text{O HALDE } y^1 = a_0^1 + a_1^1 \cdot s(k-3) + a_2^1 \cdot s(k-2) + a_3^1 \cdot s(k-1) + a_4^1 \cdot s(k) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Tip indirgeme işleminin hesaplama karmaşıklığından kaçınmak için durulama yöntemi olarak aşağıda gösterilen kapalı formül tercih edilmiştir [114]

$$y = m \frac{\sum_{i=1}^M \underline{f}^i y^i}{\sum_{i=1}^M \underline{f}^i} + n \frac{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i y^i}{\sum_{i=1}^M \bar{f}^i} \quad i=1, \dots, M. \quad (3.13)$$

Burada m ve n ağırlıklandırma parametreleri, $\underline{f}^i$ ve $\bar{f}^i$ her bir kuralın alt ve üst ateşlenme değerleri ve y^i i^{inci} kuralın çıkışıdır.

Zaman serisine etki eden gürültünün ortalama değeri sıfır olduğundan KAT2-BS' in üyelik fonksiyonları ortalaması $[m_1, m_2]$ aralığında belirsizlik içeren Gauss aralık tip-2 üyelik fonksiyonu şeklinde seçilmiştir. Gauss aralık tip-2 üyelik fonksiyonu Şekil 3.14a' da gösterilmiştir.



Şekil 3.14 : a) Ortalaması belirsizlik içeren Gauss AT2-ÜF b) granüler çözünürlüğü üç olan GAT2-ÜF.

Gauss AT2-ÜF' nun σ , m_1 ve m_2 olmak üzere üç parametresi olduğundan tüm öncül üyelik fonksiyonları için toplamda 24 adet parametrenin ayarlanması gerekmektedir. Benzer şekilde her bir kural için 5 adet çıkış fonksiyonu parametresi olduğundan ve toplamda kural sayısı 2^4 olduğundan çıkış fonksiyonları için toplamda 80 ayarlama parametresi mevcuttur. Ayrıca durulama yöntemi için de m ve n olmak üzere iki adet ayarlama parametresi mevcuttur. Böylece KAT2-BS için toplam ayarlama parametre sayısı 106 olmaktadır.

GAT2-BS' de kullanılan granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonları için granüler çözünürlük üç olarak seçilmiştir. Yani granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonları üç adet dikdörtgen yapıdaki aralık tip-2 bulanık granül kullanılması ile oluşturulmuştur. Kullanılan granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonu Şekil 3.14b' de gösterilmiştir. Bu durumda herbir granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonu için u_1 , u_2 , u_3 , Δ_1 , Δ_2 , Δ_3 , x_1 ve

x_2 olmak üzere 8 ayarlama parametresi ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden tüm öncül üyelik fonksiyonları göz önüne alındığında $8 \times 8 = 64$ tane ayar parametresi mevcuttur. Benzer şekilde KAT2-BS’ de olduğu gibi çıkış fonksiyonları için 80 parametre ve durulama yöntemi için 2 ayar parametresi bulunmaktadır. Böylece GAT2-BS için toplam ayarlama parametre sayısı 146 olmaktadır.

Aralık tip-2 bulanık sistemlerin en iyileme çalışmalarında SD algoritması kullanılmıştır. SD algoritmasında bir “ a ” parametresi aşağıdaki formül ile en iyilenir

$$a(k+1) = a(k) - \lambda \frac{\partial e(k)}{\partial a(k)} \quad (3.14)$$

Burada e hata ve $\lambda > 0$ ise algoritmanın öğrenme parametresidir. Öğrenme parametresinin değeri algoritmanın yakınsama hızını belirlemektedir. Öğrenme parametresi çok büyük seçilirse yakınsama gerçekleşmeyebilir. Diğer taraftan, öğrenme parametresi çok küçük seçilirse bu sefer yakınsama istenilenden çok yavaş olabilir. Pratikte öğrenme parametresi genellikle $0 < \lambda < 1$ aralığında seçilir [115]. Bu çalışmada gerçekleştirilen sistematik denemelerden sonra λ değerinin 0.1 olmasının istenilen yakınsama hızını sağladığı görülmüştür. SD algoritması için başarımlı ölçütü

$$E = \frac{1}{2} (y(k) - x(k))^2 \quad (3.15)$$

şeklinde seçilmiştir. Aralık tip-2 bulanık sistemlerin başarımlarının karşılaştırılması için ise hataların karelerinin ortalamasının karekökü (HKOK) ölçütü kullanılmıştır

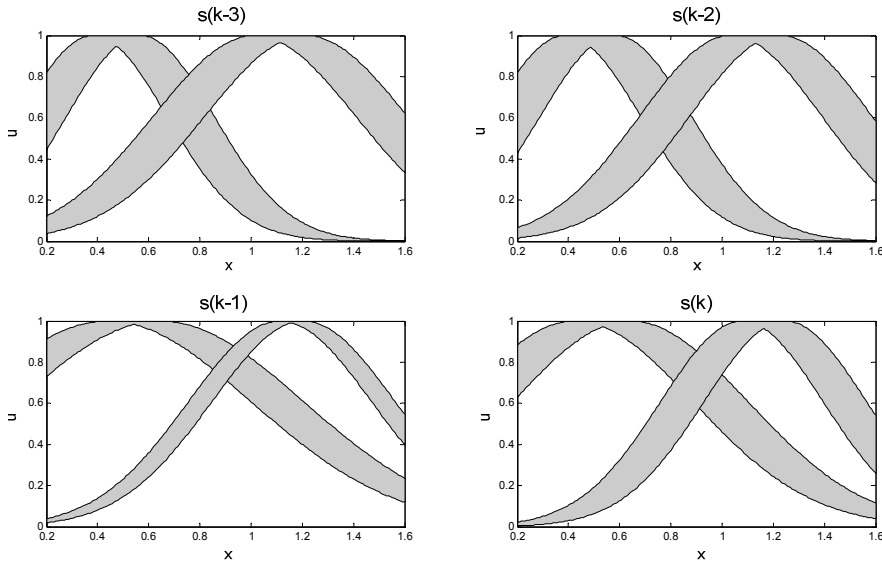
$$HKOK = \sqrt{\frac{1}{500} \sum_{k=1}^{500} (y(k) - x(k))^2} \quad (3.16)$$

Başlangıç Gauss ve granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonları tanım uzayında eşit olarak dağıtılacak şekilde seçilmiştir. Tüm çıkış fonksiyonlarının a_j^i parametreleri için başlangıç değeri 0.2 olarak seçilmiştir.

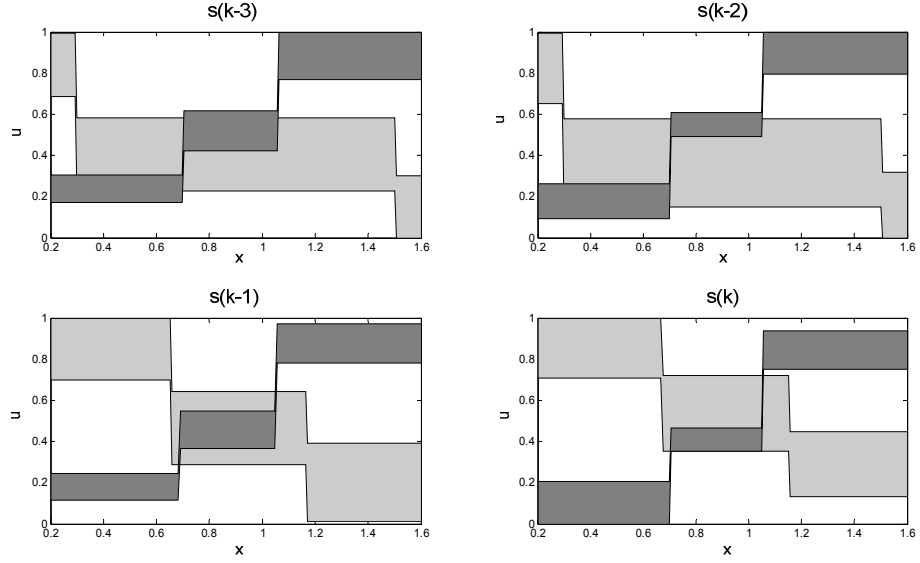
Bu çalışmada klasik ve granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonlarının modelleme başarımları karşılaştırılmaya çalışıldığından kural çıkış fonksiyonu ve durulama yöntemi parametreleri her iki bulanık sistem için de aynı seçilmiştir. Bu durumda KAT2-BS ve GAT2-BS’ in sadece öncül üyelik fonksiyonları farklı olacaktır.

Böylece KAT2-BS ve GAT2-BS' in modelleme başarımları yalnızca bulanık sistemlerin öncül üyelik fonksiyonlarına bağlı olmakta ve öncül üyelik fonksiyonları parametrelerinin seçimi dışında bulanık sistemlerin modelleme başarımını iyileştirecek başka bir etki bulunmamaktadır. Böylece karşılaştırma daha adil bir şekilde gerçekleştirilmiş olmaktadır. Bu nedenle her iki bulanık sistem için de durulama yöntemindeki m ve n parametrelerinin değeri 0.5 olarak seçilmiştir. Ayrıca GAT2-BS için bir dezavantaj oluşturduğu bilinmesine karşın kural çıkış fonksiyonu parametreleri sadece Gauss üyelik fonksiyonlarının kullanıldığı KAT2-BS için en iyilenmiş ve GAT2-BS için herhangi bir en iyileme çalışması yapılmadan GAT2-BS çıkış fonksiyonlarında aynı parametreler kullanılmıştır. Çıkış fonksiyonları parametrelerinin en iyilenmesi için 20 iterasyon gerçekleştirilmiştir.

Çıkış fonksiyonları parametreleri belirlendikten sonra KAT2-BS ve GAT2-BS' in öncül üyelik fonksiyonlarının en iyilenmesi için 10' ar iterasyon daha gerçekleştirilmiştir. Elde edilen Gauss ve granüler AT2-ÜF' ları sırasıyla Şekil 3.15 ve Şekil 3.16' de gösterilmiştir.

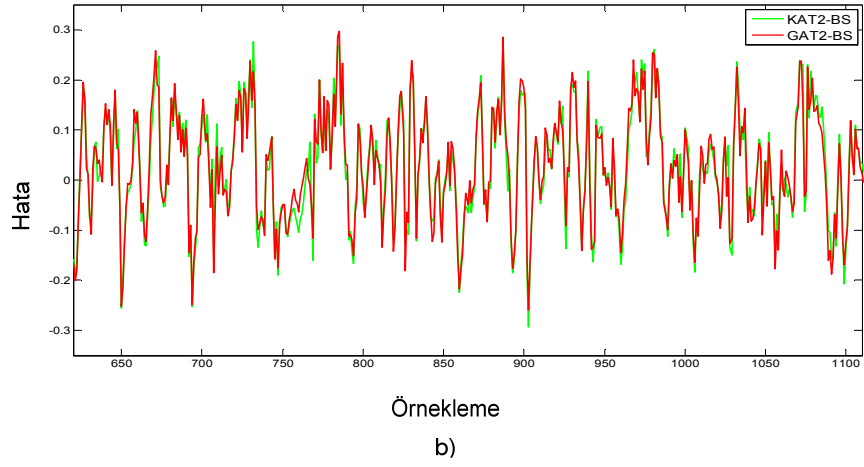
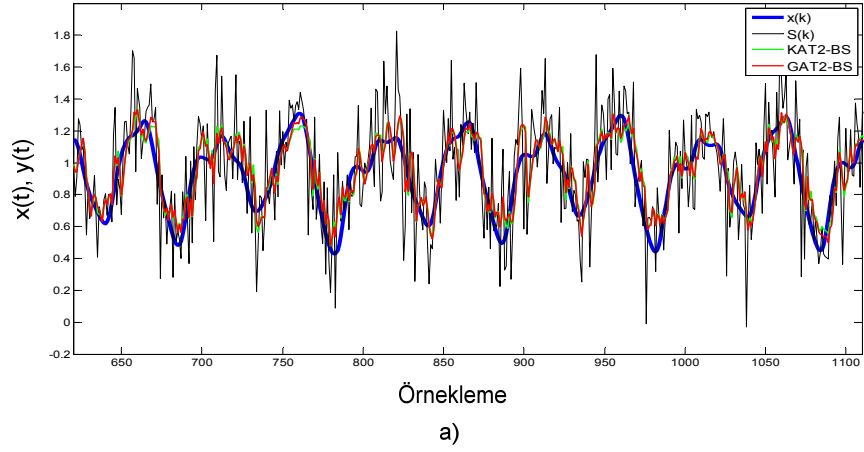


Şekil 3.15 : KAT2-BS' in ayarlanan Gauss AT2-ÜF' ları.



Şekil 3.16 : GAT2-BS' in ayarlanan granüler AT2-ÜF' ları.

Ayarlanan KAT2-BS ve GAT2-BS' in doğrulama sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 3.17' de gösterilmiştir.



Şekil 3.17 : KAT2-BS ve GAT2-BS' in a) sistem çıkışlarının ve b) modelleme hatalarının karşılaştırılması.

KAT2-BS ve GAT2-BS' in sistem çıkışlarının HKOK değerleri Çizelge 3.1' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1: KAT2-BS ve GAT2-BS için elde edilen HKOK sonuçları.

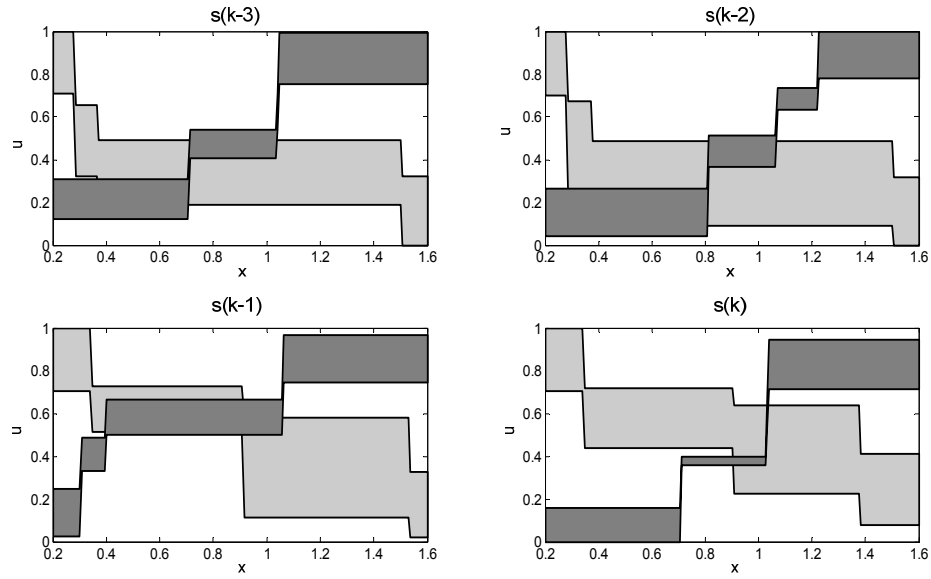
	Başlangıç durumunda	Ayarlanmış durumda
KAT2-BS	0.1137	0.1106
GAT2-BS	0.1134	0.1092

HKOK değerlerinden görüldüğü gibi çıkış fonksiyonları parametreleri sadece KAT2-BS için ayarlanmış olmasına rağmen, GAT2-BS belirsizlikleri modelleme ve etkisini azaltmakta KAT2-BS' den daha iyi bir başarımlı göstermiştir. Bu üstünlüğün nedeni granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonlarının tasarım parametrelerinde daha fazla serbestlik derecesine sahip olması ve bu yolla belirsizlikleri klasik aralık tip-2 üyelik fonksiyonlarından daha bağımsız bir şekilde modelleyebilmesidir.

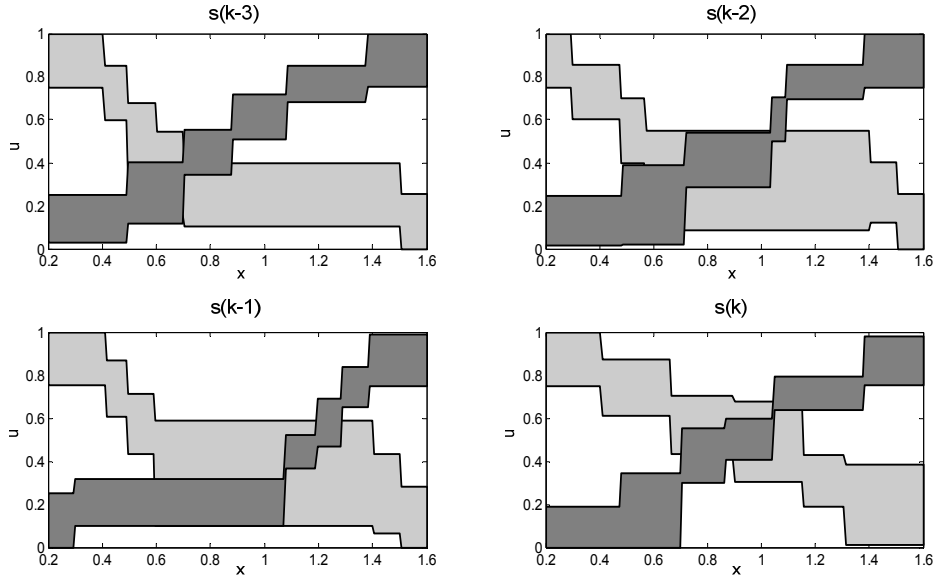
Granüler çözünürlüğün granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonlarının belirsizliği modelleme başarımlı üzerindeki etkisini göstermek için granüler çözünürlüğün 4 ve 6 olduğu durum ayrıca incelenmiştir. Bu granüler çözünürlük değerlerinin kullanıldığı bulanık sistemlere sırasıyla G4-AT2BS ve G6-AT2BS olarak adlandırılmıştır. Tüm başlangıç GAT2-ÜF için granüller tanım uzayına eşit olarak dağılacak şekilde seçilmiştir.

Her bir granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonu için granüler çözünürlüğün 4 ve 6 olması durumunda sırasıyla 11 ve 17 ayarlama parametresi mevcuttur. Bu yüzden G4-AT2BS ve G6-AT2BS öncül üyelik fonksiyonları için ayarlama parametreleri sayısı sırasıyla $11 \times 8 = 88$ ve $17 \times 8 = 136$ olmaktadır.

SD algoritmasında öğrenme katsayısı $\lambda = 0.1$ olarak seçilmiş ve G4-AT2BS ve G6-AT2BS' lerin en iyilenmesi için 10' ar iterasyon gerçekleştirilmiştir. G4-AT2BS ve G6-AT2BS için elde edilen üyelik fonksiyonları sırasıyla Şekil 3.18 ve Şekil 3.19' de gösterilmiştir.



Şekil 3.18 : G4-AT2BS için ayarlama sonucu elde edilen granüler üyelik fonksiyonları.



Şekil 3.19 : G6-AT2B için ayarlama sonucu elde edilen granüler üyelik fonksiyonları.

Tüm aralık tip-2 bulanık sistemler için elde edilen HKOK değerleri Çizelge 3.2’ de gösterilmiştir. Daha önce gösterilen ve granüler çözünürlük değeri 3 olan GAT2-BS tabloda G3-AT2BS olarak adlandırılmıştır.

Çizelge 3.2: Bulanık sistemlerin HKOK sonuçlarının karşılaştırılması.

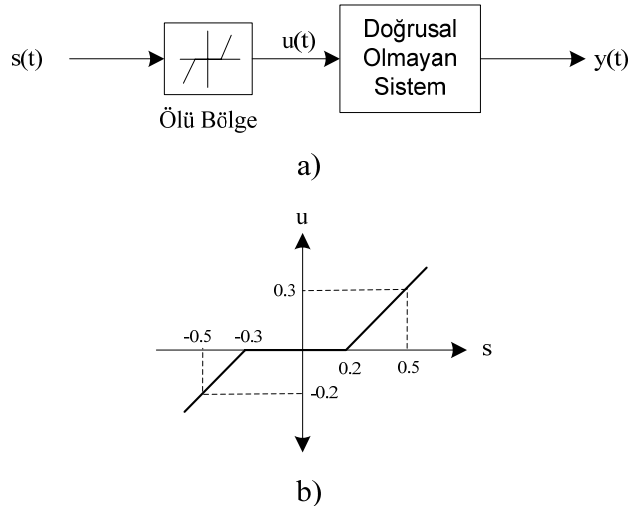
	Başlangıç durumunda	Ayarlanmış durumda
KAT2-BS	0.1137	0.1106
G3-AT2BS	0.1134	0.1092
G4-AT2BS	0.1140	0.1090
G6-AT2BS	0.1128	0.1087

HKOK sonuçlarından görüldüğü gibi granüler çözünürlük arttıkça GAT2-BS başarımı iyileşmektedir. Çünkü granüler çözünürlüğün artması belirsizliğin daha hassas ve dolayısıyla daha doğru bir şekilde modellenmesine imkan vermektedir. Bu durum Şekil 3.16, Şekil 3.18 ve Şekil 3.19 birlikte incelendiğinde açıkça görülmektedir. Burada modellenen belirsizliğe bağlı olarak ortaya çıkan üyelik fonksiyonlarının belirsizlik taban alanlarının genel yapısı birbirine oldukça benzemektedir. Yalnızca artan çözünürlüğe bağlı olarak belirsizliği daha iyi ifade edecek şekilde belirsizlik taban alanları daha hassas şekilde yapılandırılmışlardır. Diğer taraftan artan çözünürlükle birlikte doğal olarak ayarlama parametre sayısı da artmaktadır.

3.4.2 Girişinde ölü bölge bulunan belirsiz parametrelili doğrusal olmayan sistemin modellenmesi

Önerilen granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının tasarım esnekliğini göstermek için bu modelleme örneğinde girişinde ölü bölge bulunan ve parametreleri belirsiz doğrusal olmayan bir sistem göz önüne alınmıştır.

Sistemin blok şeması ve sahip olduğu ölü bölge karakteristiği sırasıyla Şekil 3.20a ve Şekil 3.20b’ de gösterilmiştir. Nominal sistem öncelikle KAT2-BS ve GAT2-BS ile modellenmiş ve bu iki bulanık sistemin modelleme başarımı sistem parametre belirsizliği durumu için karşılaştırılmıştır.



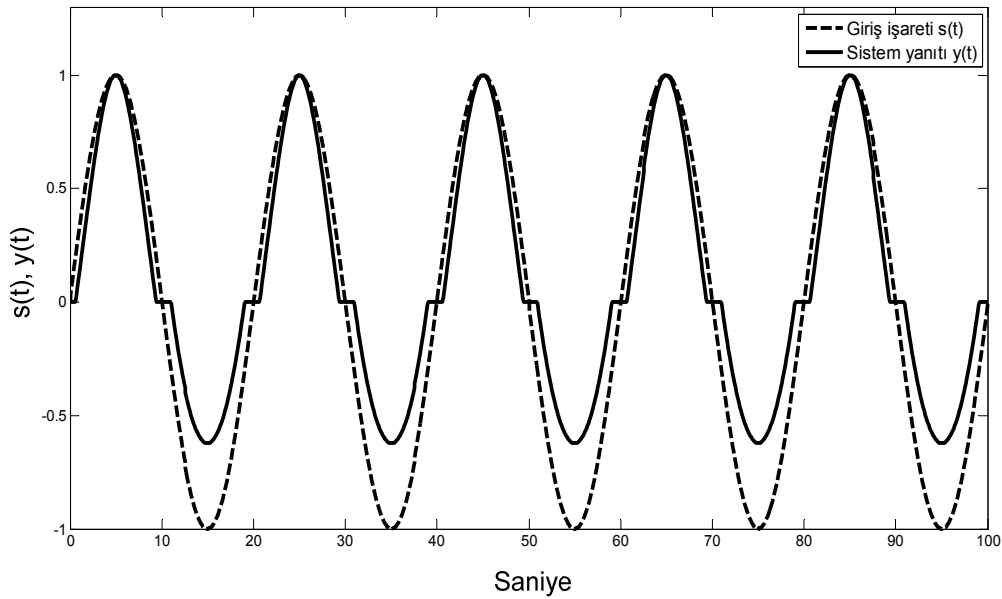
Şekil 3.20 : a) Doğrusal olmayan sistemin blok şeması b) sistemin ölü bölge karakteristiği.

Şekil 3.20' de gösterilen $s(t)$ tüm sistemin giriş işaretini, $u(t)$ ölü bölge çıkışı olarak doğrusal olmayan sistemin giriş işaretini ve $y(t)$ doğrusal olmayan sistemin çıkış işaretini göstermektedir. Doğrusal olmayan sistemin dinamik modeli

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= -ax(t) + bu(t) + cx^2(t) \\ y(t) &= x(t)\end{aligned}\tag{3.17}$$

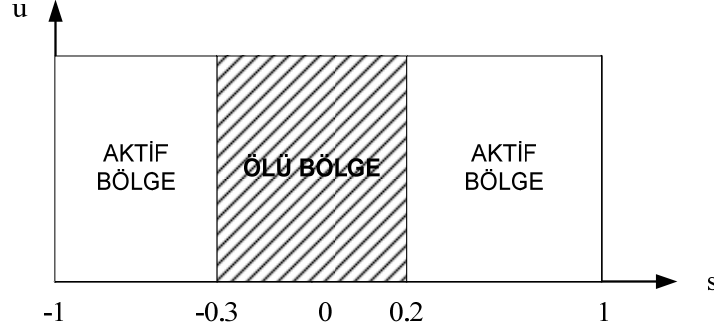
şeklinde. Burada $x(t)$ sistemin durum değişkeni ve a , b , ve c sistem parametreleridir. Nominal sistem parametreleri $a=100$, $b=100$ ve $c=20$ şeklinde seçilmiştir. Ayrıca a ve b sistem parametrelerinde nominal değerin %10' u kadar bir belirsizlik olduğu, yani parametrelerin $[90, 110]$ aralığında değiştiği kabul edilmiştir.

Sisteme $s(t)=\sin((2\cdot\pi\cdot0.05)\cdot t)$ şeklinde uygulanan sünisoidal giriş işareti ve buna bağlı olarak elde edilen sistem yanıtı $y(t)$ Şekil 3.21' de gösterilmiştir.



Şekil 3.21 : Sisteme uygulanan giriş işareti ve elde edilen sistem yanıtı.

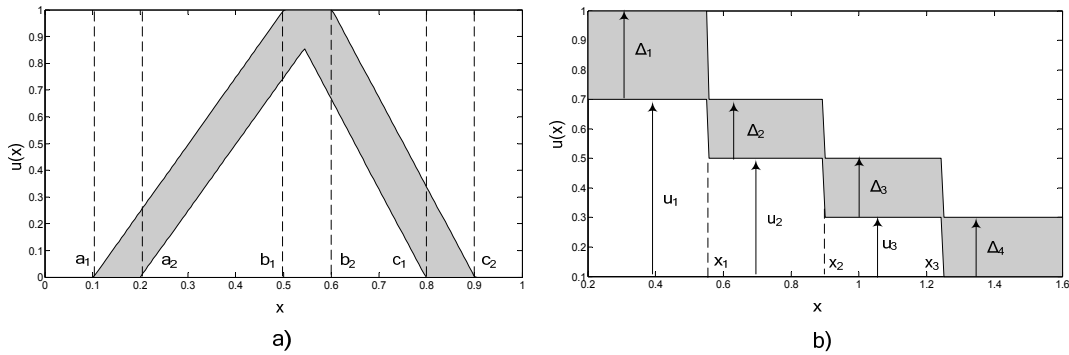
Şekil 3.21' den görüldüğü gibi, giriş işareti $[-0.3, 0.2]$ aralığında olduğunda ölü bölge nedeniyle sistem çıkışı sifıra eşit olmaktadır. Doğrusal olmayan bu sistem bir bulanık sistem ile modellenecek ise ölü bölge karakteristiğini uygun şekilde ifade edebilmek için giriş tanım uzayının bu aralığında herhangi bir üyelik fonksiyonu tanımlı olmamalıdır. Bu yüzden giriş tanım uzayı Şekil 3.22' de gösterildiği gibi üç bölgeye ayrılmış şekilde düşünülebilir.



Şekil 3.22 : Giriş tanım uzayındaki aktif ve ölü bölgeler.

Tasarlanacak aralık tip-2 bulanık sistemlerin yapısı Ö2-S0 TSK modeli olarak seçilmiştir. Burada bulanık sistemlerin girişleri $u(k-1)$, $u(k)$, $x(k-2)$ ve $x(k-1)$ ve çıkışı $x(k)$ olarak seçilmiştir. Modelleme için 1000 giriş-çıkış verisi kullanılmıştır. Bunların ilk 500 tanesi eğitim için kalan 500 tanesi ise doğrulama için kullanılmıştır. Her bir giriş için iki adet aralık tip-2 üyelik fonksiyonu kullanılmış ve buna bağlı olarak kural sayısı 2^4 olmuştur. Durulama için (3.13) numaralı denklemden gösterilen durulama yöntemi tercih edilmiştir.

KAT2-BS için Şekil 3.23a’ da gösterildiği gibi üçgen aralık tip-2 üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Burada a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 üçgen aralık tip-2 üyelik fonksiyonunun ayarlama parametreleridir. Her bir giriş değişkeni için iki üyelik fonksiyonu kullanıldığından, $u(k-1)$ ve $u(k)$ girişlerinin tanım uzayında ölü bölgeye ilişkin $[-0.3, 0.2]$ aralığının sağ ve solunda kalan aktif bölgeler için sadece bir üyelik fonksiyonu atanabilmektedir.



Şekil 3.23 : a) Üçgen AT2-ÜF b) 4 granül ile oluşturulmuş GAT2-ÜF.

Her bir üçgen aralık tip-2 üyelik fonksiyonu için 6 ayarlama parametresi olduğundan, öncül üyelik fonksiyonları için toplam 48 parametre mevcuttur. Benzer şekilde, her bir kural çıkış fonksiyonu için 5 parametre olduğundan toplam 24 kural çıkışı için 80 ayarlama parametresi mevcuttur. Ayrıca ağırlıklandırma parametreleri m ve n olmak

üzere durulama yöntemi için de 2 parametre mevcuttur. Böylece KAT2-BS için toplamda 130 ayarlama parametresi mevcuttur.

GAT2-BS için Şekil 3.23b' de gösterilen ve granüler çözünürlüğü 4 olan granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonları tercih edilmiştir. Her bir granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonu için $u_1, u_2, u_3, u_4, \Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4, x_1, x_2$ ve x_3 olmak üzere 11 ayarlama parametresi olduğundan öncül üyelik fonksiyonları için toplam 88 parametre mevcuttur. Benzer şekilde kural çıkış fonksiyonları için 80 ve durulama yöntemi için 2 ayarlama parametresi vardır. Böylece GAT2-BS için toplamda 170 ayarlama parametresi vardır.

Aralık tip-2 bulanık sistemlerin en iyileme çalışmasında SD algoritması yerine genetik algoritma (GA) kullanılmıştır. Genetik algoritma en iyileme çalışması için MATLAB Optimization Toolbox v5.1 kullanılmıştır. Seçilen genetik algoritma parametreleri Çizelge 3.3' de verilmiştir.

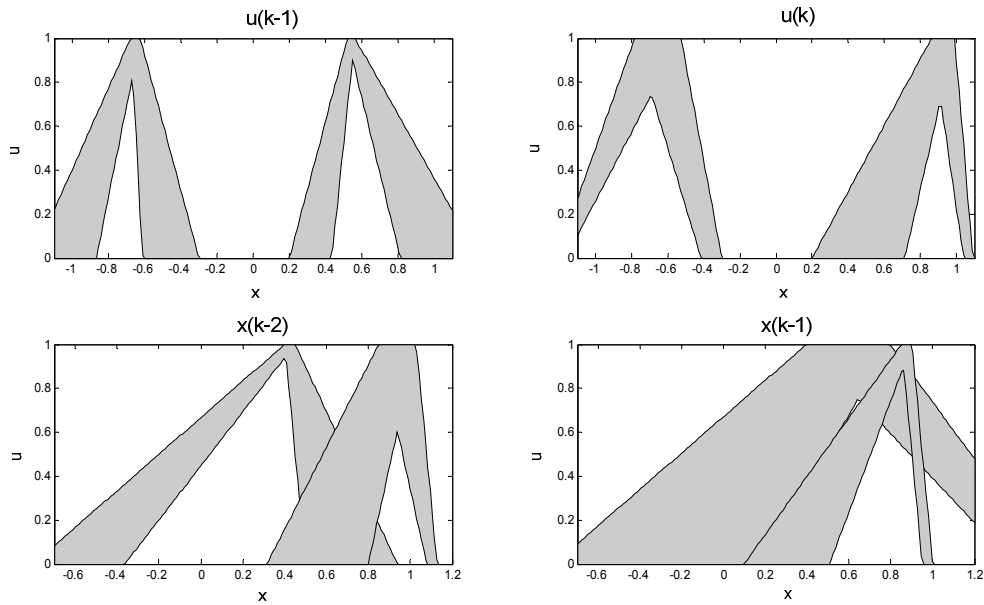
Çizelge 3.3: Genetik algoritma parametreleri.

Parametreler	Değerler/yöntemler
Populasyon tipi	Gerçel sayı
Populasyon büyüklüğü	100
Maksimum generasyon	300
Seçim tipi	Düzgün rastlantısal
Mutasyon tipi	Düzgün
Mutasyon oranı	0.01
Çaprazlama tipi	Dağınık
Çaprazlama oranı	0.8

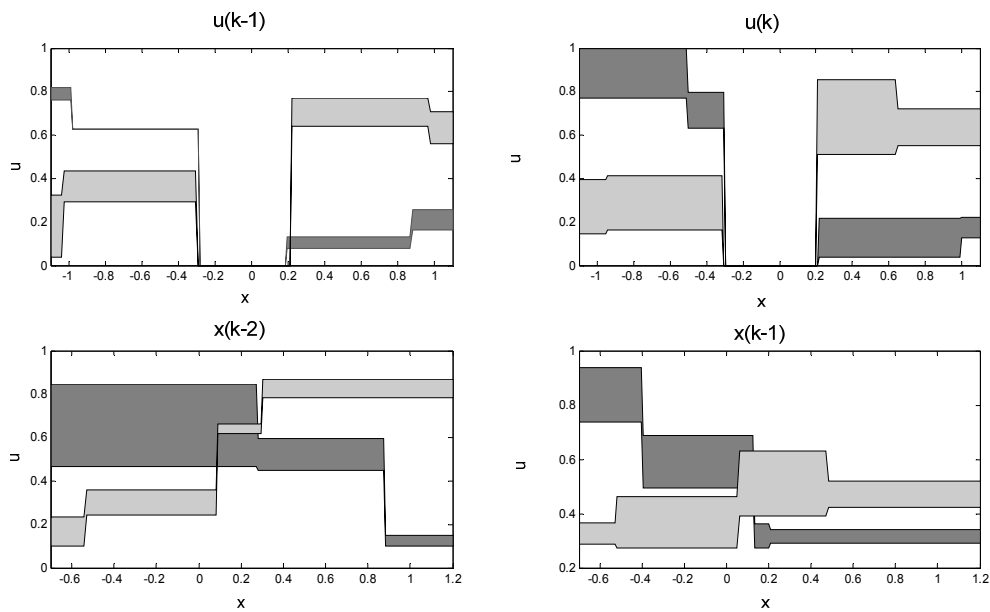
Daha önce de bahsedildiği gibi $u(k-1)$ ve $u(k)$ girişlerinin tanım uzaylarında süreksizlik mevcuttur ve bu süreksiz tanım uzaylarının her bir aktif bölgesi için sadece bir üyelik fonksiyonu atanabilmektedir. Bu durumda süreksizliğe bağlı olarak her zaman 16 kuralın en fazla 4 tanesi ateşlenmektedir. Bu yüzden KAT2-BS' in en iyilenmesi için türeve dayalı SD algoritması uygun olmamaktadır. Bu yüzden bu modelleme çalışmasında en iyileme yöntemi olarak genetik algoritma kullanılmıştır.

Önerilen granüler tip-2 üyelik fonksiyonları ile süreksiz üyelik fonksiyonları tanımlanabildiğinden giriş tanım uzayında bahsedilen bu iki süreksiz bölge tek bir

granüler tip-2 üyelik fonksiyonu ile ifade edilebilmektedir. Yani her bir aktif bölge için iki adet üyelik fonksiyonu olmakta ve böylece daha fazla kural ateşlenerek daha etkin bir modelleme sağlanabilmektedir. Burada KAT2-BS ile adil bir karşılaştırma sağlamak için GAT2-BS' in en iyilenmesi çalışmasında yine genetik algoritma kullanılmıştır. Buna ek olarak benzetim çalışmalarının sonunda karşılaştırma amaçlı SD algoritması ile elde edilmiş sonuçlar da gösterilmiştir. Genetik algoritma için (3.16) denkleminde gösterilen başarımlı ölçütü kullanılmıştır. En iyilenmiş üçgen ve granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonları sırasıyla Şekil 3.24 ve Şekil 3.25' de gösterilmiştir.



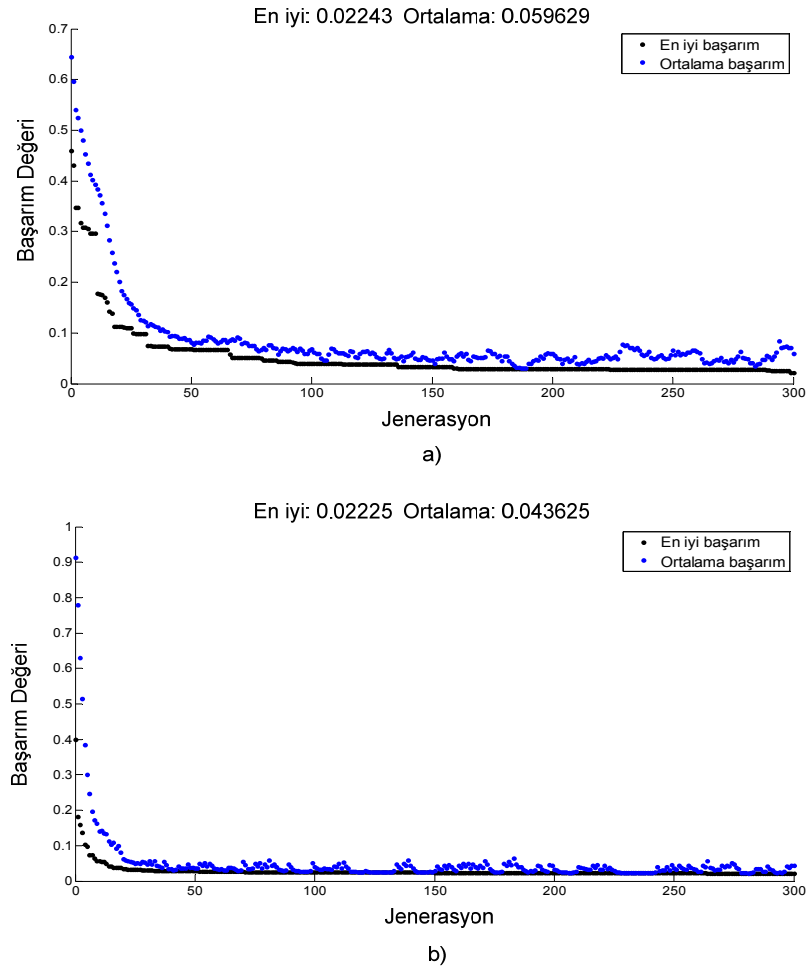
Şekil 3.24 : Ayarlanmış üçgen AT2-ÜF' ları.



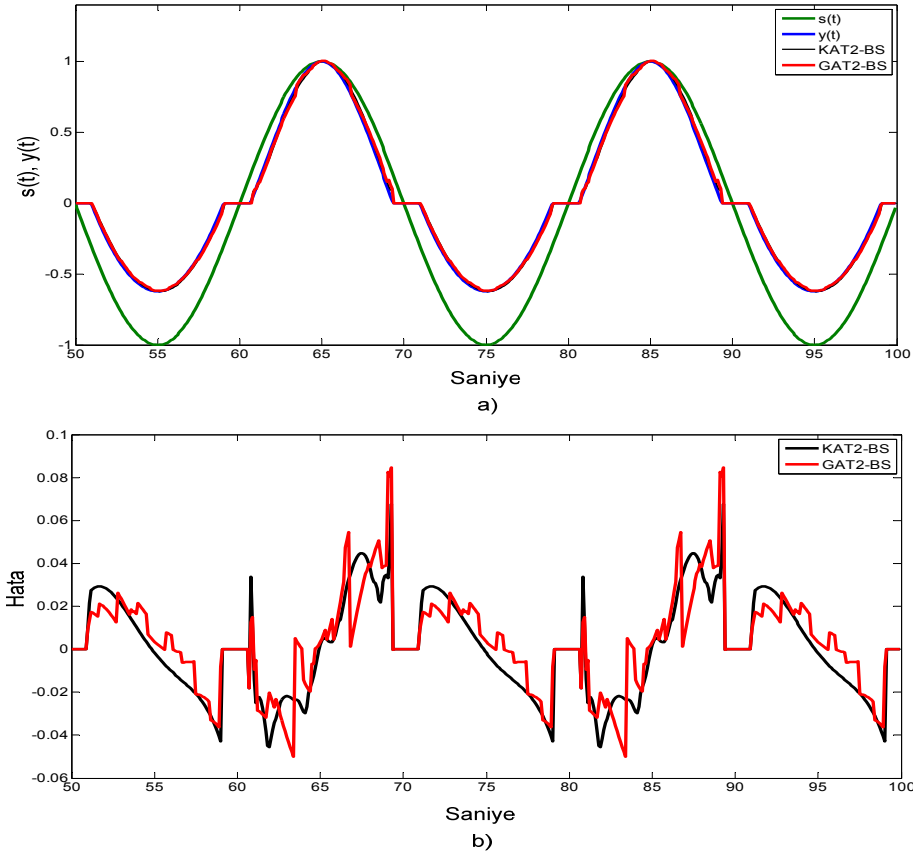
Şekil 3.25 : Ayarlanmış granüler AT2-ÜF' ları.

Şekil 3.25’ ten granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının tasarım esnekliği açıkça görülmektedir. Burada $u(k-1)$ tanım uzayında süreksiz ve hibrit granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonları, $u(k)$ tanım uzayında süreksiz granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonları ve $x(k-2)$ tanım uzayında granüler çözünürlüğü 4 yerine 3 olan bir granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonu mevcuttur. Özellikle Şekil 3.25’ ten görüldüğü gibi süreksiz granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonları süreksiz tanım uzayları için oldukça etkilidir.

KAT2-BS ve GAT2-BS için elde edilen genetik algoritma arama sonuçları Şekil 3.26’ da gösterilmiştir. Doğrulama sonuçlarının karşılaştırılması Şekil 3.27’ de ve sistem yanıtlarının HKOK değerleri Çizelge 3.4’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.26 : a) KAT2-BS ve b) GAT2-BS için genetik algoritma arama sonuçları.

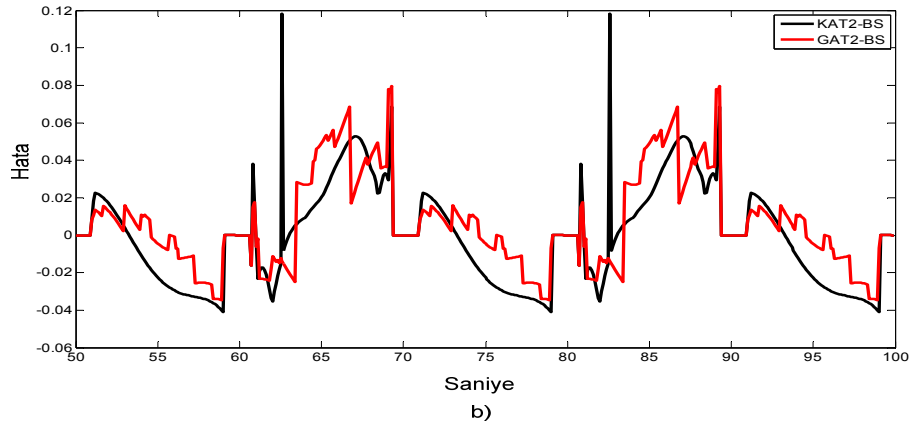
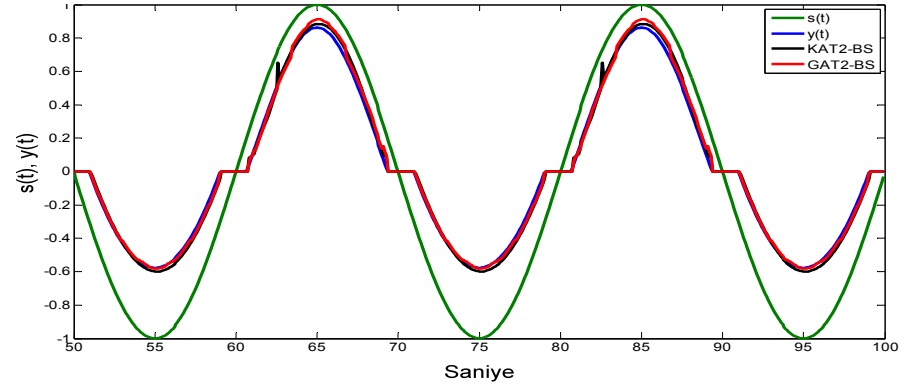


Şekil 3.27 : KAT2-BS ve GAT2-BS' in a) çıkış işaretleri ve b) modelleme hataları.

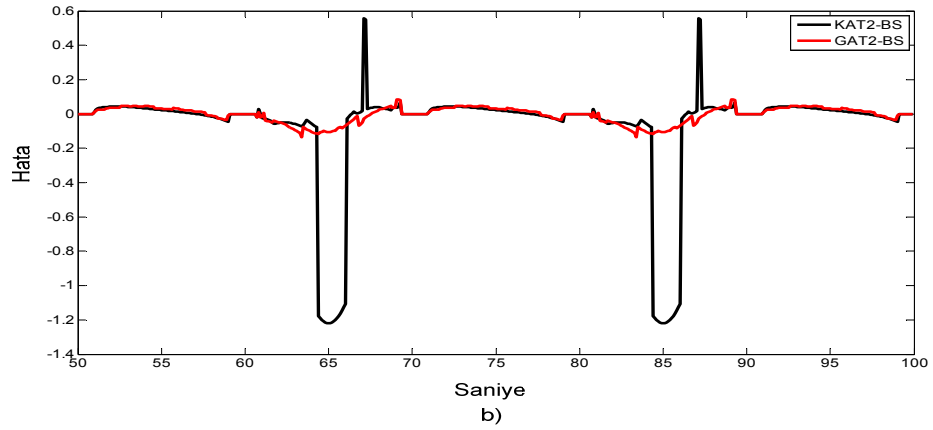
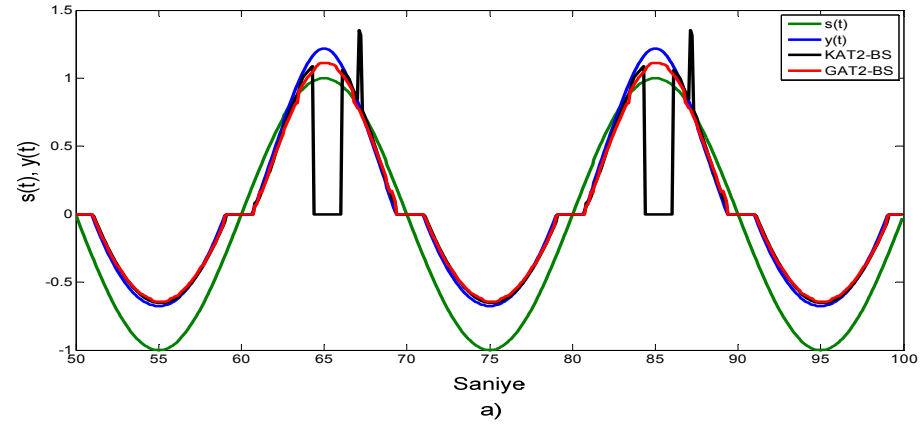
Çizelge 3.4: Nominal sistem için KAT2-BS ve GAT2-BS' in HKOK sonuçları.

	HKOK
KAT2-BS	0.02243
GAT2-BS	0.02225

Nominal sistem için modellenen KAT2-BS ve GAT2-BS' in sistem parametrelerinin değişmesi durumundaki başarımları karşılaştırılmıştır. a parametresinin nominal değerinden $a=110$ ve $a=90$ olarak değişmesi durumunda elde edilen sistem yanıtları ve ortaya çıkan modelleme hata değerleri sırasıyla Şekil 3.28 ve Şekil 3.29' da gösterilmiştir.

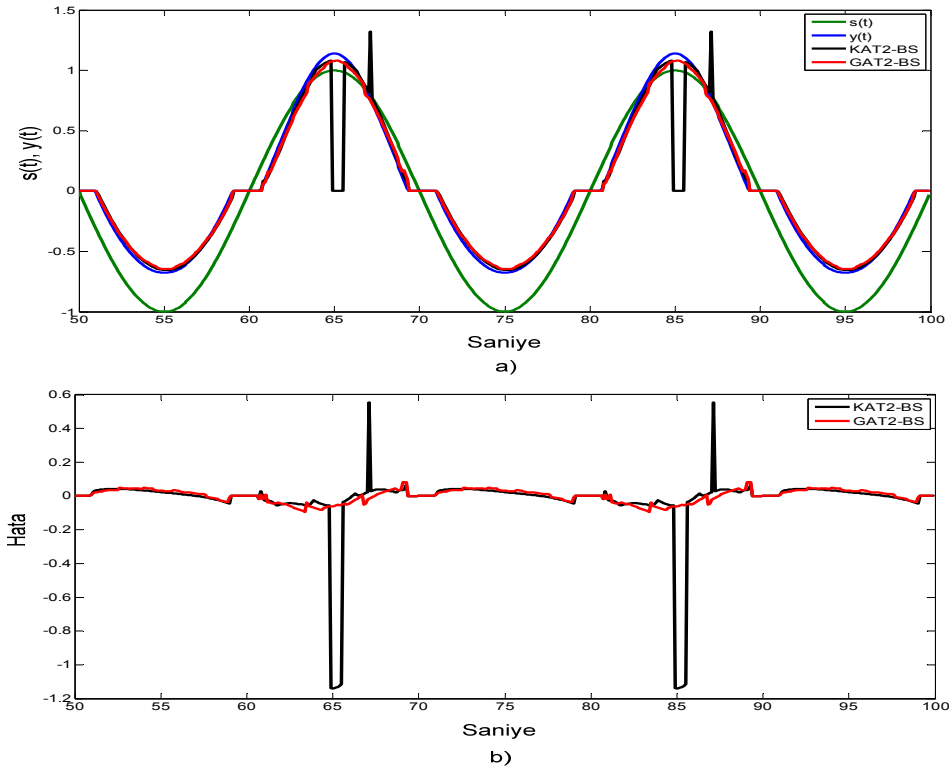


Şekil 3.28 : $a=110$ için a) sistem yanıtları ve b) modelleme hata değerleri.

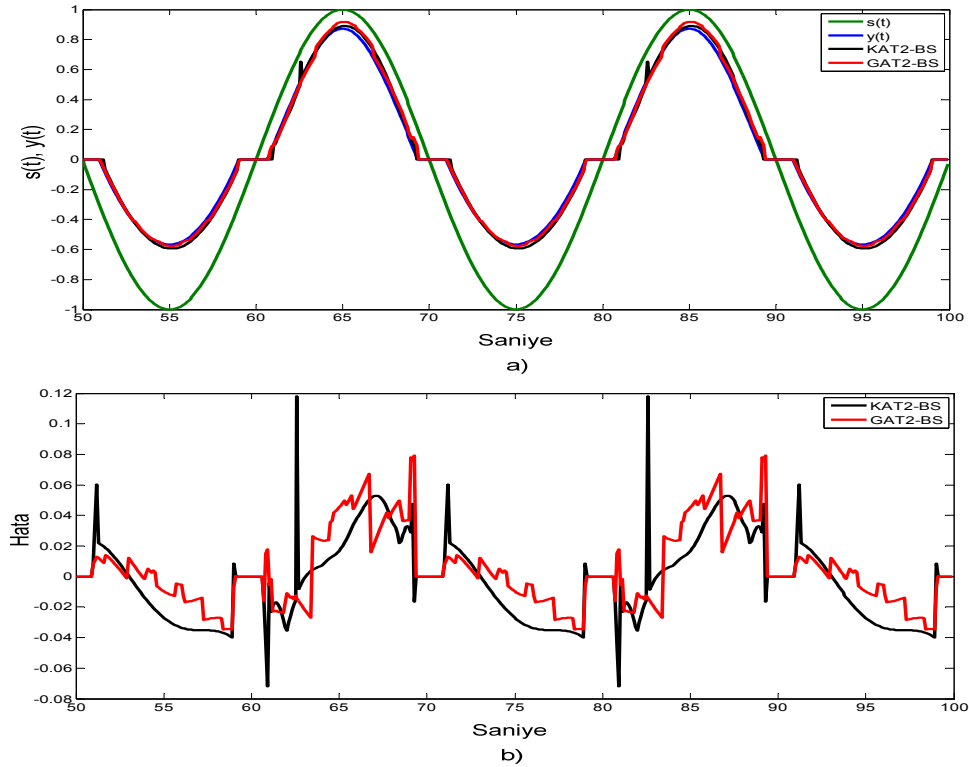


Şekil 3.29 : $a=90$ için a) sistem yanıtları ve b) modelleme hata değerleri.

Benzer şekilde b sistem parametresinin nominal değerinden $b=110$ ve $b=90$ olarak değişmesi durumunda elde edilen sistem yanıtları ve ortaya çıkan modelleme hata değerleri sırasıyla Şekil 3.30 ve Şekil 3.31’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.30 : $b=110$ için a) sistem yanıtları ve b) modelleme hata değerleri.



Şekil 3.31 : $b=90$ için a) sistem yanıtları ve b) modelleme hata değerleri.

Bahsedilen tüm sistem parametre değişimleri için KAT2-BS ve GAT2-BS' in HKOK karşılaştırma sonuçları Çizelge 3.5' de gösterilmiştir.

Çizelge 3.5: Sistem parametre belirsizlikleri durumunda KAT2-BS ve GAT2-BS' in HKOK karşılaştırma sonuçları.

	$a=110$	$a=90$	$b=110$	$b=90$
KAT2-BS	0.0264	0.3150	0.1948	0.0271
GAT2-BS	0.0254	0.0467	0.0377	0.0258

HKOK sonuçlarından görüldüğü gibi GAT2-BS sistem parametre değişimlerine karşı KAT2-BS' den daha iyi bir başarımlı göstermektedir. Yukarıda bahsedildiği gibi GAT2-BS' in en iyilenmesinde SD algoritması da kullanılabilir. Bu yüzden SD yöntemi kullanılarak en iyilenmiş GAT2-BS' e ilişkin sonuçlar da karşılaştırma amaçlı gösterilmiştir.

Başlangıç durumunda kural çıkış fonksiyonlarının tüm a_j^i parametreleri 0.2 ve durulama yöntemindeki m ve n parametreleri 0.5 olarak seçilmiştir. SD algoritmasının öğrenme katsayısı $\lambda=0.1$ olarak seçilmiş ve GAT2-BS parametrelerinin en iyilenmesi için 50 iterasyon gerçekleştirilmiştir.

Sistem parametre değişimlerine karşı SD algoritması kullanılarak en iyilenen GAT2-BS' in başarımının genetik algoritma kullanılarak en iyilenmiş GAT2-BS ve KAT2-BS başarımı ile karşılaştırılması Çizelge 3.6' da verilmiştir. Bu tabloda SD algoritması ve genetik algoritma kullanılması ile elde edilen granüler bulanık sistemler sırasıyla GAT2-BS-SD ve GAT2-BS-GA olarak adlandırılmıştır.

Çizelge 3.6: SD ve GA ile en iyilenmiş bulanık sistemlerin HKOK sonuçlarının karşılaştırılması.

	Nominal	$a=110$	$a=90$	$b=110$	$b=90$
KAT2-BS	0.0224	0.0264	0.3150	0.1948	0.0271
GAT2-BS-GA	0.0222	0.0254	0.0467	0.0377	0.0258
GAT2-BS-SD	0.0214	0.0242	0.0371	0.0345	0.0214

HKOK sonuçlarından görüldüğü gibi SD algoritması kullanılarak en iyilenmiş GAT2-BS diğerlerine göre en üstün başarımlı göstermiştir ve sistem parametre değişimlerine karşı diğer bulanık sistemlere göre daha dayanıklıdır. SD algoritması kullanarak granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonlarını ayarlamak oldukça basittir ve sonuçlardan görüldüğü gibi oldukça etkilidir.

4. PARÇALI DOĞRUSAL ARALIK TİP-2 BULANIK KÜMELER İÇİN KAPALI YAPIDA TİP İNDİRGEME YÖNTEMİ

4.1 Giriş

Aralık tip-2 bulanık kümeler sağladıkları hesaplama kolaylıkları nedeniyle tip-2 bulanık sistemlerde sıklıkla kullanılmaktadır [38-45]. Aralık tip-2 bulanık kümelerin ikincil üyelik fonksiyonları bir fonksiyon yerine keskin bir değer olduğundan tip-2 bulanık mantık işlemlerinde sadece birincil üyelik fonksiyonlarının sınır değerlerinin kullanılması yeterli olmaktadır.

Aralık tip-2 bulanık kümelerin tip indirgeme işlemi aralık tip-2 bulanık sistemlerde önemli ve en çok zaman alan işlemidir. Çünkü bazı özel durumlar dışında [67,68] şimdiye kadar bu işlem için kapalı bir formül tanımlanamamıştır. Tip indirgeme işleminde hesaplama kesinliği ve hesaplama süresi arasında bir ödünleşim söz konusudur. Sürekli yapıda tanımlanmış iteratif algoritmalarla aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezi tam olarak bulunabilmesine karşın hesaplama süresi oldukça uzundur ve bu yüzden gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılamazlar. Bu nedenle sürekli yapıda ifadeler kullanmak yerine neredeyse tüm tip indirgeme yöntemlerinde aralık tip-2 bulanık kümeye ayrıklaştırma işlemi uygulanmaktadır. Bu yolla tip indirgeme işlemi daha hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilmesine karşın elde edilen sonucun hesaplama kesinliği doğal olarak azalmaktadır. Hesaplama kesinliğini arttırmak için ayrıklaştırma adımının küçültülmesi gerekir, fakat yine buna bağlı olarak hesaplama karmaşıklığı ve süresi artmaktadır. Bu yüzden sürekli yapıdaki ifadeler sadece teorik analizler için kullanılırken ayrık yapıdaki ifadeler gerçek zamanlı uygulamalar için kullanılmaktadır.

İlk tip indirgeme yöntemi aynı zamanda tip indirgeme işleminin teorik açıklaması olarak da düşünebileceğimiz geniş kapsamlı tip indirgeme yöntemidir [37]. Bu yöntemde bir aralık tip-2 bulanık küme içindeki tüm olası gömülü tip-1 bulanık kümelerin ağırlık merkezleri tek tek hesaplanır. Gömülü tip-1 bulanık kümelerin sayısı çok fazla olduğundan (sürekli halde sonsuz sayıda) bu yöntemin pratik

uygulamalar için kullanılması imkansızdır. Bu yüzden birçok araştırmacı tip indirgeme işleminin hızını ve/veya doğruluğunu arttırmak için yeni yöntemler önermişlerdir.

Kapsamlı tip indirgeme yönteminden daha etkili ve şimdiye kadar kullanılan en popüler tip indirgeme yöntemi Karnik-Mendel yöntemidir [37,66]. Bu yöntemde aralık tip-2 bulanık kümenin sadece alt ve üst sınır bilgisi kullanılır. Fakat bu yöntem iteratif bir yöntemdir ve birçok gerçek zamanlı uygulama için hala fazla hesaplama yoğunluğuna sahiptir. Belirsizlik sınırları yöntemi [74] aralık tip-2 bulanık kümenin tip indirgeme işlemi için yaklaşık sonuçlar veren kapalı yapıda bir tip indirgeme yöntemidir. Bu yüzden gerçek zamanlı uygulamalarda kolayca kullanılabilir. [75]' de gerçek zamanlı uygulamalara yönelik eşdeğer tip-1 bulanık küme kavramına dayalı, hesaplama kolaylığına sahip tip indirgeme yöntemleri önerilmiştir. Genel tip-2 bulanık kümeleri için önerilmiş örnekleme yöntemi [116,117] kapsamlı tip indirgeme yönteminin basitleştirilmiş ve azaltılmış bir versiyonu olarak düşünülebilir. Bu yöntemde tüm olası gömülü bulanık kümeler yerine sadece nispeten daha az, rasgele seçilmiş örnek gömülü bulanık kümeler dikkate alınmaktadır. [76]' da bu yöntemin aralık tip-2 bulanık kümeler için de uygulanabilir olduğu fakat yukarıda bahsedilen tip indirgeme yöntemleri kadar etkili olmadığı gösterilmiştir. Doğrudan durulama yöntemi [58,76,77] parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümeleri (PDAT2-BK) bir geometrik obje olarak ele alır ve hesaplamasal geometriden yararlanarak tip indirgeme işlemi için kapalı bir formül sağlar. Bu yöntem hesaplamasal olarak etkili olmasına karşın sadece geometrik ağırlık merkezi hesapladığından sadece yaklaşık sonuçlar ortaya koyabilmektedir. [67]' de aralık tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanının sabit genişlikte olması durumunda ağırlık merkezinin iterasyona gerek kalmadan kapalı bir formül ile tam olarak hesaplanabileceği gösterilmiştir. Bu tip indirgeme işlemi için şüphesiz çok önemli bir sonuçtur. Benzer şekilde aynı sonucun bulanık granüller için de geçerli olduğu gösterilmiştir [6]. Karnik-Mendel yönteminin hesaplama yoğunluğunu düşürmek için İyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi önerilmiştir [69]. İyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi daha iyi bir başlangıç koşulu kullanmak, sonuçlandırma koşulunu değiştirmek ve daha iyi bir hesaplama tekniği kullanmak yoluyla Karnik-Mendel yönteminin hesaplama süresini hızlandırmaktadır. Karnik-Mendel yöntemine alternatif olarak hızlı yinelemeli tip indirgeme yöntemi [70] önerilmiştir. Bu

yöntemin iyileştirilmiş versiyonları [118] ve [119]' de gösterilmiştir. Nie-Tan yöntemi [78] kapalı yapıda ifade edilen hesaplama olarak basit bir tip indirgeme yöntemidir. Fakat bu yöntemde sadece alt ve üst üyelik fonksiyonlarının ortalaması göz önüne alındığından belirsizliğin büyüklüğü hakkındaki bilgi ve buna bağlı olarak hesaplama kesinliği kaybolmaktadır. Benzer bir şekilde aralık tip-2 Takagi-Sugeno-Kang bulanık kontrolörler için alternatif bir kapalı yapıda tip indirgeme yöntemi önerilmiştir [79]. Bu yöntem Nie-Tan tip indirgeme yönteminin ağırlıklandırma parametreleri kullanılarak iyileştirilmiş bir hali olarak düşünülebilir. [81]' de ayrıklaştırılmış aralık tip-2 bulanık kümeler için çöküntü durulama yöntemi (collapsing method) önerilmiştir. Bu yöntemde aralık tip-2 bulanık kümesi ters bulanıklaştırma yaklaşımı kullanılarak orjinal bulanık küme ile yaklaşık olarak aynı durulanmış değere sahip tip-1 temsili gömülü bulanık kümeye çevrilir. [71]' de aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezi tip indirgeme işleminin kök bulma problemi olarak ele alınabileceği gösterilmiştir ve bu yolla ağırlık merkezi değeri tam olarak bulunabilmektedir. Fakat bu yöntem yine hesaplama olarak karmaşıktır ve hesaplama süresi oldukça uzundur. [72]' de üç farklı ağırlıklandırma atama yöntemi kullanılarak ağırlıklandırılmış iyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi önerilmiştir. Bu çalışmada ağırlıklandırılmış iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminin iyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi ile karşılaştırıldığında daha küçük mutlak hata değeri ve daha hızlı bir yakınsama sağladığı iddaa edilmiştir. Fakat bu yöntemin hesaplama hızı iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminden daha yavaştır. [56]' da Karnik-Mendel yönteminin sürekli yapıda ifade edilmiş hali önerilmiştir. Benzer şekilde [72]' de iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminin sürekli yapıda ifade edilmiş hali önerilmiştir. [120]' de sürekli yapıdaki KMY/İKMY' nin iyileştirilmiş hali önerilmiştir. Burada yakınsama hızının karasel ifadeden kübik ifadeye iyileştirildiği iddia edilmiştir. Literatürde ardından durulamanın geldiği Karnik-Mendel yöntemi için ilk kez kapalı yapıda yaklaşık bir çözüm önerilmiştir [80]. Bu yöntemde Nie-Tan kapalı yapıda tip indirgeme yönteminin sürekli yapıda ifade edilmiş hali Taylor serisi açılımı kullanılarak iyileştirilmiştir. [73]' de ön hesaplamalar ve belirsizlik sınırları tabanlı başlangıç koşulu kullanan yeni bir iteratif yöntem önerilmiştir. Bahsedilen bu tip indirgeme yöntemleri ile ilgili karşılaştırma çalışmaları [82-84]' de mevcuttur.

Bu çalışmada parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümeler için granüler bir yaklaşımla yeni bir ağırlık merkezi tip indirgeme yöntemi önerilmiş ve bu yöntem

Granüler Tip İndirgeme Yöntemi (GTİY) olarak adlandırılmıştır. Önerilen granüler tip indirgeme yönteminde temel olarak sabit genişlikte belirsizlik taban alanına sahip aralık tip-2 bulanık kümelerin tip indirgeme özelliklerinden ve aralık tip-2 bulanık kümelerin geometrik özelliklerinden yararlanılmaktadır. Bu yöntemde parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümeler bir geometrik obje olarak ele alınmaktadır. Bu yolla geometrik formüllerden yararlanılarak aralık tip-2 bulanık kümenin seçilen herhangi bir bölgesinin alanı ve ağırlık merkezi analitik olarak hesaplanabilmektedir. Böylece tip indirgeme işlemlerindeki ayrıklaştırma ihtiyacı ortadan kaldırılmış olmakta ve sonuçların hesaplama kesinliği artırılmış olmaktadır. Önerilen yöntemde aralık tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanının ağırlık merkezinin arandığı bölgesinin sabit genişlikte olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezinin iterasyona gerek kalmadan kapalı bir formül ile hesaplanabilmesini sağlamaktadır. Belirsizlik taban alanının bahsedilen bölgesi gerçekten sabit genişlikte ise önerilen yöntem ile aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezi tam olarak bulunmaktadır. Aksi takdirde gerçek ve hesaplanan ağırlık merkezi değerleri arasındaki hatayı azaltmak için önerilen yöntemde iyileştirme işlemi gerçekleştirilir. Sabit genişlikte varsayılan belirsizlik taban alanına bağlı olarak ortaya çıkan fazla ya da eksik hesaplanmış alanlar iyileştirme işleminde daha önce hesaplanan değerden çıkarılır ya da eklenir. Önerilen yöntemde ayrıklaştırma ve iterasyon gerekliliğinin ortadan kaldırılması ile tip indirgeme işleminin hesaplama kesinliği ve hesaplama süresi iyileştirilmiştir. Önerilen granüler tip indirgeme yöntemi yedi adet test bulanık kümesi üzerinde hesaplama kesinliği ve hesaplama zamanı kriterleri açısından iyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonucu granüler tip indirgeme yönteminin iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminden hesaplama kesinliği daha yüksek sonuçlar ortaya koyduğu ve daha kısa hesaplama süresi sağladığı gösterilmiştir.

4.2 Granüler Tip İndirgeme Yöntemi

Bu bölümde parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümeler için granüler bir yaklaşımla yeni bir tip indirgeme yöntemi önerilmiştir. Önerilen granüler tip indirgeme yönteminin ana fikri aralık tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanında ağırlık merkezi noktasının arandığı bölgenin sabit genişlikte olduğu

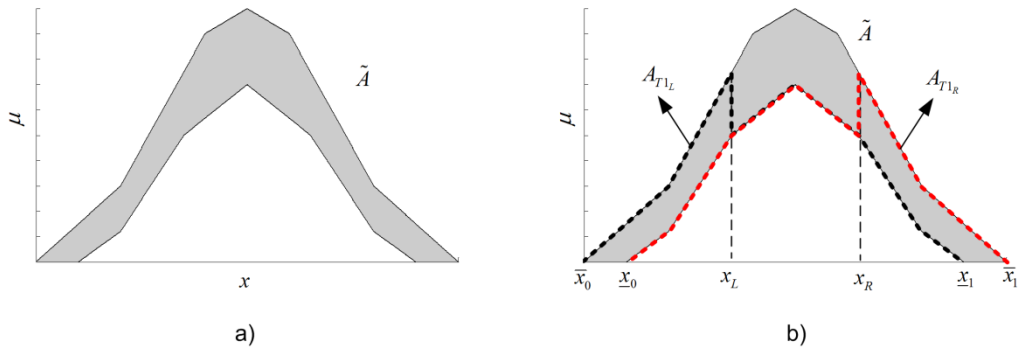
varsayımına dayanmaktadır. Böylece aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezi iterasyona gerek kalmadan kapalı bir formül ile bulunabilmektedir.

Önerilen granüler tip indirgeme yöntemi kolay anlaşılabilmesi açısından Şekil 4.1a’ da gösterilen bir $\tilde{A}$ parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümesi üzerinde adım adım uygulanarak gösterilmiştir. Granüler tip indirgeme yöntemi minimum ağırlık merkezi c_l ve maksimum ağırlık merkezi c_r değerlerinin hesaplanması olmak üzere iki bölümden oluşmaktadır. İlk olarak Şekil 4.1b’ de A_{T1_L} ve A_{T1_R} olarak gösterilen iki tip-1 bulanık kümeyi belirleyen uygun x_L ve x_R noktaları seçilir. Köşeler üyelik fonksiyonunun doğrusal parçalarını birbirinden ayıran kısımlar olduğundan x_L ve x_R noktalarının köşeler üzerinde seçilmesi geometrik yaklaşım kullanıldığı için hesaplama kolaylığı sağlamaktadır. x_L ve x_R için uygun köşeler belirlenirken İKMY’ nin başlangıç noktasından yararlanılır ve alt üyelik fonksiyonunda İKMY’ nin başlangıç noktasına en yakın olan köşe seçilir

$$x_L = \min_{x_i} \|x_i - (\bar{x}_0 + (\bar{x}_1 - \bar{x}_0)/2.4)\| \quad (4.1)$$

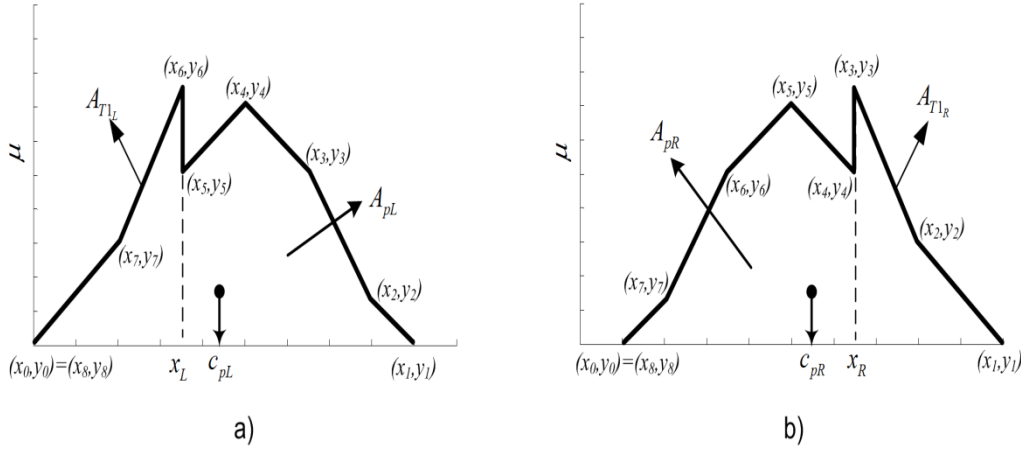
$$x_R = \min_{x_i} \|x_i - (\bar{x}_0 + (\bar{x}_1 - \bar{x}_0)/1.7)\| \quad (4.2)$$

burada $\bar{x}_0$ ve $\bar{x}_1$ x ekseninde üst üyelik fonksiyonun sınır değerleri ve x_i alt üyelik fonksiyonunun köşelerinden biridir. Alt üyelik fonksiyonunun köşelerinin kullanılmasının nedeni genellikle alt üyelik fonksiyonunun üst üyelik fonksiyonundan daha az doğrusal parça sayısına sahip olmasıdır.



Şekil 4.1 : a) Parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümesi “ $\tilde{A}$ ” b) seçilen x_L ve x_R köşe değerleri ile ortaya çıkan T1-BK’ leri “ A_{T1_L} ” ve “ A_{T1_R} ”.

Şekil 4.1b' den görüldüğü gibi, elde edilen tip-1 bulanık kümeleri $A_{T_{1L}}$ ve $A_{T_{1R}}$, Şekil 4.2a ve Şekil 4.2b' de gösterildiği gibi n köşesi (x_i, y_i) ($i = 0, \dots, n$) bulunan kapalı bir poligon şeklindedir. Parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümelerde seçilen herhangi bir x_L ve x_R noktası için her zaman bu tür tip-1 bulanık kümelerin elde edileceği açıktır.



Şekil 4.2 : a) “ $A_{T_{1L}}$ ” ve b) “ $A_{T_{1R}}$ ” bulanık kümelerinin poligon olarak gösterimi.

$A_{T_{1L}}$ ve $A_{T_{1R}}$ ’nin alanı ve ağırlık merkezi aşağıda gösterilen poligon alan ve ağırlık merkezi formülleri kullanılarak kolayca hesaplanabilmektedir

$$A_{pL} = A_{pR} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (4.3)$$

$$c_{pL} = \frac{1}{6A_{pL}} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (4.4)$$

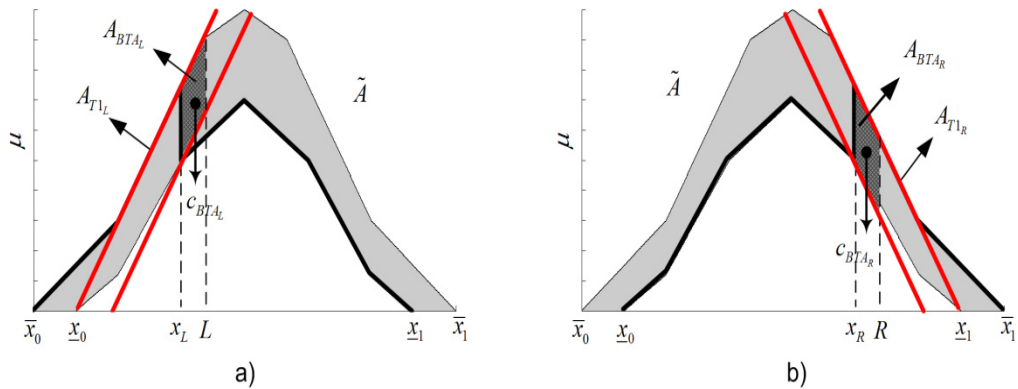
$$c_{pR} = \frac{1}{6A_{pR}} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1})(x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i) \quad (4.5)$$

Burada poligonun ilk ve son köşeleri $(x_n, y_n) = (x_0, y_0)$ şeklinde aynıdır. Belirtilen formüllerde poligonun köşeleri saatin ters yönünde sıralandığı kabul edilmiştir. Aksi durumda hesaplanan ağırlık merkezi değeri değişmemekte fakat hesaplanan A_{pL} ve A_{pR} alanları negatif işaretli olmaktadır.

A_{T_L} ve A_{T_R} bulanık kümelerinin alan ve ağırlık merkezleri belirledikten bir sonraki adım L ve R aday minimum ve maksimum ağırlık merkezi değerlerinin belirlenmesidir.

[67] ve [68]' da aralık tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanı sabit bir genişliğe sahipse c_l minimum ve c_r maksimum ağırlık merkezlerinin iterasyona gerek kalmadan kapalı bir formül ile hesaplanabildiği gösterilmiştir. Çünkü bu durumda integral ifadelerine bağlı olarak (2.22a) ve (2.22b) denkleminde gösterilen ağırlık merkezi ifadesinin payı ve paydası c_l ve c_r parametreleri cinsinden sırasıyla ikinci dereceden ve birinci dereceden bir denklem haline gelmektedir. Böylece sınır değerlerin bulunması için türev alındığında ortaya ikinci dereceden bir ifade çıkmaktadır. İkinci dereceden ifadelerin çözümleri kapalı bir formül ile ifade edilebildiğinden c_l ve c_r sınır değerlerinin hesaplanması oldukça kolay olmaktadır.

Belirsizlik taban alanının sabit genişlikte olmadığı durumda ise (2.22a) ve (2.22b) denklemlerinin c_l ve c_r parametrelerine göre türevi üçüncü dereceden bir denklem olmaktadır ve üçüncü dereceden denklemlerin kapalı yapıda basit çözümleri bulunmamaktadır [67]. Bu durum için önerilen yöntemde A_{T_L} ve A_{T_R} bulanık kümelerinin alanları ve ağırlık merkezleri bulunduktan sonra ikinci dereceden ifadeler kullanabilmek için Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b' de kırmızı çizgiler ile gösterildiği gibi granüler bir yaklaşımla aralık tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanının sabit genişlikte olduğu varsayılmaktadır. Böylece ikinci dereceden denklem halindeki türev ifadelerinin çözüm formülleri kullanılarak L ve R aday minimum ve maksimum ağırlık merkezleri hesaplanabilmektedir.



Şekil 4.3 : BTA' nın sabit genişlikte olarak gösterimi ve ortaya çıkan alan ve ağırlık merkezlerinin aday a) L minimum ve b) R maksimum ağırlık merkezi için gösterimi.

L ve R değerlerine bağlı olarak sabit genişlikte varsayılan belirsizlik taban alanına ait alan ve ağırlık merkezleri sırasıyla A_{BTA_L} , c_{BTA_L} ve A_{BTA_R} , c_{BTA_R} olarak Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b’ de gösterilmiştir. Burada A_{BTA_L} ve c_{BTA_L} aşağıdaki gibi hesaplanır

$$A_{BTA_L} = \int_{x_L}^L \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L) dx = (L - x_L) \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L) \quad (4.6)$$

$$c_{BTA_L} = \frac{\int_{x_L}^L x \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L) dx}{\int_{x_L}^L \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L) dx} = \frac{L + x_L}{2} \quad (4.7)$$

Benzer şekilde A_{BTA_R} ve c_{BTA_R}

$$A_{BTA_R} = \int_{x_R}^R \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R) dx = (R - x_R) \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R) \quad (4.8)$$

$$c_{BTA_R} = \frac{\int_{x_R}^R x \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R) dx}{\int_{x_R}^R \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R) dx} = \frac{R + x_R}{2} \quad (4.9)$$

şeklinde hesaplanır. Burada $\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L)$ ve $\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R)$ Şekil 4.3’ de kırmızı çizgilerle gösterilen belirsizlik taban alanının sabit genişlik değerini göstermektedir

$$\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L) = \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_L) - \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_L) \quad (4.10)$$

$$\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R) = \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_R) - \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_R) \quad (4.11)$$

Ağırlık merkezi değerleri tip-1 bulanık küme ve sabit genişlikteki belirsizlik taban alanının alan ve ağırlık merkezleri cinsinden aşağıdaki gibi ifade edilebilir

$$c_l(\tilde{A}) = \frac{A_{pL} c_{pL} + A_{BTA_L} c_{BTA_L}}{A_{pL} + A_{BTA_L}} \quad (4.12)$$

$$c_r(\tilde{A}) = \frac{A_{pR} c_{pR} - A_{BTA_R} c_{BTA_R}}{A_{pR} - A_{BTA_R}} \quad (4.13)$$

(4.12) ve (4.13) denkleminde A_{BTA_L} ve A_{BTA_R} zıt işaretlidir. Çünkü Şekil 4.3a ve Şekil 4.3b' de gösterildiği gibi hesaplanan A_{BTA_R} alanı zaten A_{pR} alanına dahil iken hesaplanan A_{BTA_L} alanı A_{pL} alanına dahil değildir. Bu yüzden A_{BTA_L} alanı A_{pL} alanına eklenmesi ve A_{BTA_R} alanının A_{pR} alanından çıkarılması gerekmektedir.

A_{BTA_L} ve A_{BTA_R} ifadelerini (4.12) ve (4.13) denklemlerinde yerine koyduğumuzda aşağıdaki ifadeler elde edilir

$$c_l(\tilde{A}) = \frac{A_{pL}c_{pL} + (L^2 - x_L^2)\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L)/2}{A_{pL} + (L - x_L)\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L)} \quad (4.14)$$

$$c_r(\tilde{A}) = \frac{A_{pR}c_{pR} - (R^2 - x_R^2)\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R)/2}{A_{pR} - (R - x_R)\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R)} \quad (4.15)$$

$c_l(\tilde{A})$ ' i minimum yapan L ve $c_r(\tilde{A})$ ' i maksimum yapan R değerini bulmak için türevleri $dc_l(\tilde{A})/dL = 0$ ve $dc_r(\tilde{A})/dR = 0$ şeklinde sıfıra eşitlenir. Bu durumda aşağıda gösterilen denklemler elde edilir

$$L^2\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L)/2 + L(A_{pL} - x_L\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L)) + (x_L^2\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L)/2 - A_{pL}c_{pL}) = 0 \quad (4.16)$$

$$R^2\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R)/2 + R(-A_{pR} - x_R\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R)) + (x_R^2\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R)/2 + A_{pR}c_{pR}) = 0 \quad (4.17)$$

Buradan görüldüğü gibi bu denklemler ikinci dereceden denklemlerdir ve geçerli çözümleri aşağıda gösterildiği gibidir

$$L = x_L + \frac{-A_{pL} + \sqrt{(A_{pL}^2 + 2\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L)A_{pL}(c_{pL} - x_L))}}{\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L)} \quad (4.18)$$

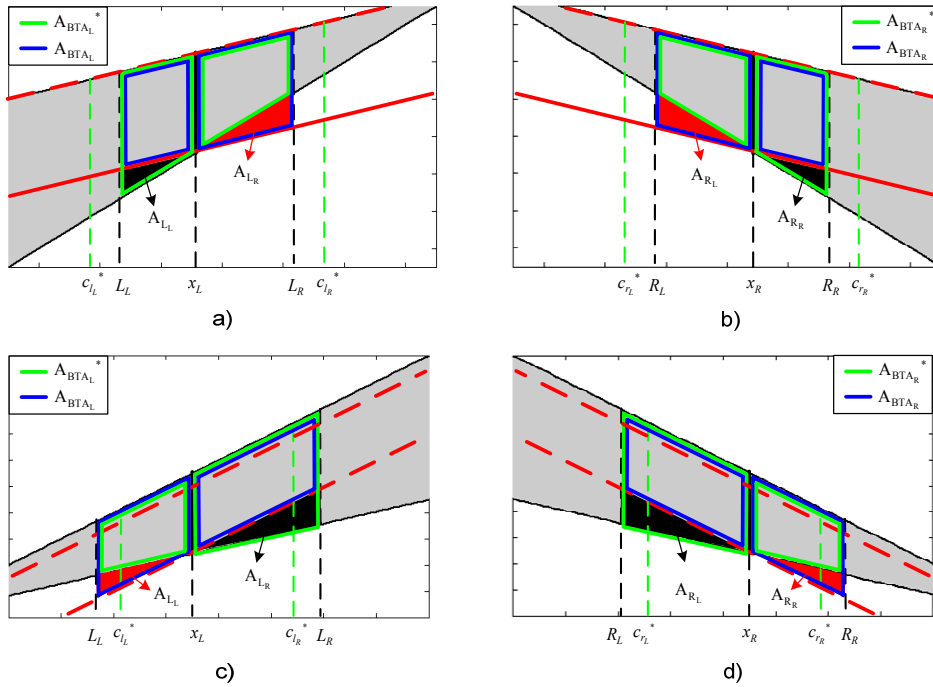
$$R = x_R + \frac{A_{pR} - \sqrt{(A_{pR}^2 - 2\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R)A_{pR}(c_{pR} - x_R))}}{\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R)} \quad (4.19)$$

Eğer belirsizlik taban alanı gerçekten sabit genişlikte ise hesaplanan L ve R değerleri $L = c_l^*(\tilde{A})$ ve $R = c_r^*(\tilde{A})$ şeklinde kesin doğrulukta minimum ve maksimum ağırlık merkezi değerlerini vermektedir. Aksi takdirde hesaplanan ve gerçek ağırlık merkezi

değerleri arasında her zaman $\varepsilon_l = L - c_l^*(\tilde{A})$ ve $\varepsilon_r = R - c_r^*(\tilde{A})$ şeklinde bir hata varolacaktır. Bu hatanın nedeni hesaplanan A_{BTA_L} ve A_{BTA_R} değerlerinin $\tilde{A}$ bulanık kümesinin alt ve üst üyelik fonksiyonlarının eğimlerine bağlı olarak gerçek alan değerlerinden küçük ya da büyük olmasıdır. Bu yüzden sonucun hesaplama kesinliği değerinin arttırılması isteniyorsa bir iyileştirme işleminin gerçekleştirilmesi zorunludur.

Gerçek ve hesaplanan ağırlık merkezi değerleri arasındaki fark göz önüne alındığında Şekil 4.4' de gösterildiği gibi alt ve üst üyelik fonksiyonlarının eğimlerine bağlı olarak iki farklı durum ortaya çıkmaktadır:

- Şekil 4.4a ve Şekil 4.4b' de gösterildiği gibi üst üyelik fonksiyonunun eğimi alt üyelik fonksiyonunun eğiminden daha küçük olabilir $(|\bar{a}| - |\underline{a}|) < 0$
- Şekil 4.4c ve Şekil 4.4d' de gösterildiği gibi üst üyelik fonksiyonunun eğimi alt üyelik fonksiyonunun eğiminden daha büyük olabilir $(|\bar{a}| - |\underline{a}|) > 0$



Şekil 4.4 : Sabit genişlikte olmayan belirsizlik taban alanı durumunda fazla ve az hesaplanan alanlar için ortaya çıkan olası durumların gösterimi.

$(|\bar{a}| - |\underline{a}|) < 0$ durumunda, eğer L Şekil 4.4a' da L_R olarak gösterildiği gibi x_L noktasının sağında ise (yani belirsizlik taban alanı daralıyorsa) hesaplanan A_{BTA_L} alanı (mavi sınırlar içerisinde kalan alan) gerçek $A_{BTA_L}^*$ alanından (yeşil sınırlar

içerisinde kalan alan) Şekil 4.4a' da kırmızı olarak gösterilen A_{L_R} alanı kadar daha büyük olacaktır. Bu yüzden hesaplama kesinliği değerini iyileştirmek adına bu A_{L_R} alanının hesaplanan A_{BTA_L} alanından çıkarılması gerekmektedir.

Aksine eğer L Şekil 4.4a' da L_L olarak gösterildiği gibi x_L noktasının solunda ise (yani belirsizlik taban alanı genişliorsa) hesaplanan A_{BTA_L} alanı (mavi sınırlar içerisinde kalan alan) gerçek $A_{BTA_L}^*$ alanından (yeşil sınırlar içerisinde kalan alan) Şekil 4.4a' da siyah olarak gösterilen A_{L_L} alanı kadar daha küçük olacaktır. Bu yüzden hesaplama kesinliği değerini iyileştirmek adına bu A_{L_L} alanının hesaplanan A_{BTA_L} alanına eklenmesi gerekmektedir.

R için aynı şekilde Şekil 4.4b' de sırasıyla kırmızı ve siyah olarak gösterilen fazla hesaplanan A_{R_L} ve eksik hesaplanan A_{R_R} alanları hesaplama kesinliği değerini iyileştirmek için sırasıyla A_{BTA_R} alanından çıkarılmalı ve eklenmelidir.

$(|\bar{a}| - |\underline{a}|) > 0$ durumunda, eğer L Şekil 4.4c' de L_R olarak gösterildiği gibi x_L noktasının sağında ise (yani belirsizlik taban alanı genişliorsa) hesaplanan A_{BTA_L} alanı (mavi sınırlar içerisinde kalan alan) gerçek $A_{BTA_L}^*$ alanından (yeşil sınırlar içerisinde kalan alan) Şekil 4.4c' de siyah olarak gösterilen A_{L_R} alanı kadar daha küçük olacaktır. Bu yüzden hesaplama kesinliği değerini iyileştirmek adına bu A_{L_R} alanının hesaplanan A_{BTA_L} alanına eklenmesi gerekmektedir.

Aksine eğer L Şekil 4.4c' de L_L olarak gösterildiği gibi x_L noktasının solunda ise (yani belirsizlik taban alanı daralıyorsa) hesaplanan A_{BTA_L} alanı (mavi sınırlar içerisinde kalan alan) gerçek $A_{BTA_L}^*$ alanından (yeşil sınırlar içerisinde kalan alan) Şekil 4.4c' de kırmızı olarak gösterilen A_{L_L} alanı kadar daha büyük olacaktır. Bu yüzden hesaplama kesinliği değerini iyileştirmek adına bu A_{L_L} alanının hesaplanan A_{BTA_L} alanından çıkarılması gerekmektedir.

R için aynı şekilde Şekil 4.4d' de sırasıyla kırmızı ve siyah olarak gösterilen fazla hesaplanan A_{R_R} ve eksik hesaplanan A_{R_L} alanları hesaplama kesinliği değerini

iyileştirmek için sırasıyla A_{BTA_R} alanından (mavi sınırlar içinde kalan alan) çıkarılmalı ve eklenmelidir.

Fazla ya da eksik hesaplanan alanlar ve bunlarla ilgili ağırlık merkezleri aşağıdaki gibi hesaplanır

$$A_{L_L} = A_{L_R} = \int_{x_L}^L (\underline{\mu}_{\tilde{A}} - (\bar{\mu}_{\tilde{A}} - \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L))) dx = \frac{(L - x_L)}{2} (\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L) - \Delta\mu_{\tilde{A}}(L)) \quad (4.20)$$

$$c_{L_L} = c_{L_R} = \frac{\int_{x_L}^L x (\underline{\mu}_{\tilde{A}} - (\bar{\mu}_{\tilde{A}} - \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L))) dx}{\int_{x_L}^L (\underline{\mu}_{\tilde{A}} - (\bar{\mu}_{\tilde{A}} - \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_L))) dx} = \frac{2L + x_L}{3} \quad (4.21)$$

$$A_{R_L} = A_{R_R} = \int_{x_R}^R (\underline{\mu}_{\tilde{A}} - (\bar{\mu}_{\tilde{A}} - \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R))) dx = \frac{(R - x_R)}{2} (\Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R) - \Delta\mu_{\tilde{A}}(R)) \quad (4.22)$$

$$c_{R_L} = c_{R_R} = \frac{\int_{x_R}^R x (\underline{\mu}_{\tilde{A}} - (\bar{\mu}_{\tilde{A}} - \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R))) dx}{\int_{x_R}^R (\underline{\mu}_{\tilde{A}} - (\bar{\mu}_{\tilde{A}} - \Delta\mu_{\tilde{A}}(x_R))) dx} = \frac{2R + x_R}{3} \quad (4.23)$$

Burada x_L , L ve x_R , R çiftlerinin parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümenin aynı doğrusal parçasında olduğu varsayılmıştır. Sonuç olarak iyileştirilmiş ağırlık merkezi değerleri L_e ve R_e aşağıdaki gibi elde edilir

$$L_e = \frac{(A_{pL} + A_{BTA_L})L - A_{L_{L,R}} c_{L_{L,R}}}{A_{pL} + A_{BTA_L} - A_{L_{L,R}}} \quad (4.24)$$

$$R_e = \frac{(A_{pR} - A_{BTA_R})R + A_{R_{L,R}} c_{R_{L,R}}}{A_{pR} - A_{BTA_R} + A_{R_{L,R}}} \quad (4.25)$$

burada ' L, R ' alt indisleri denklemin L ya da R için de geçerli olduğunu göstermektedir.

Son olarak önerilen granüler tip indirgeme yöntemi Çizelge 4.1' de özetlenmiştir.

Çizelge 4.1: Granüler tip indirgeme yöntemi.

Adım	c_l 'nin hesaplanması	c_r 'nin hesaplanması
1	$x_1 = \min(x_i)$ 'i sağlayan (x_1, y_1) ilk köşe noktası olacak şekilde alt $(\underline{x}_i, \underline{y}_i)$ ($i=1, \dots, n_1$) ve üst $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$ ($i=1, \dots, n_2$) üyelik fonksiyonlarının köşe noktalarını saat yönünün tersi düzeninde sırala. Burada n_1 ve n_2 sırasıyla alt ve üst üyelik fonksiyonlarının köşe noktası sayısıdır.	$x_1 = \min(x_i)$ 'i sağlayan (x_1, y_1) ilk köşe noktası olacak şekilde alt $(\underline{x}_i, \underline{y}_i)$ ($i=1, \dots, n_1$) ve üst $(\bar{x}_i, \bar{y}_i)$ ($i=1, \dots, n_2$) üyelik fonksiyonlarının köşe noktalarını saat yönünün tersi düzeninde sırala. Burada n_1 ve n_2 sırasıyla alt ve üst üyelik fonksiyonlarının köşe noktası sayısıdır.
2	$k_1 \in [1, \dots, n_1]$ değerini $\underline{x}_{k_1} = \min_{\underline{x}} \left\ \underline{x}_i - (\bar{x}_1 + (\bar{x}_2 - \bar{x}_1)/2.4) \right\ $ şeklinde bul ve $k_2 \in [1, \dots, n_2]$ değerini $\bar{x}_{k_2} \leq \underline{x}_{k_1} \leq \bar{x}_{k_2+1}$ şeklinde belirle.	$k_1 \in [1, \dots, n_1]$ değerini $\underline{x}_{k_1} = \min_{\underline{x}} \left\ \underline{x}_i - (\bar{x}_1 + (\bar{x}_2 - \bar{x}_1)/1.7) \right\ $ şeklinde bul ve $k_2 \in [1, \dots, n_2]$ değerini $\bar{x}_{k_2} \geq \underline{x}_{k_1} \geq \bar{x}_{k_2+1}$ şeklinde belirle.
3	x_i ve y_i 'i $x_i = [\bar{x}_1, \underline{x}_2, \underline{x}_3, \dots, \underline{x}_{k_1}, \underline{x}_{k_1}, \bar{x}_{k_2}, \bar{x}_{k_2+1}, \dots, \bar{x}_{n_2}, \bar{x}_1]$ $y_i = [\bar{y}_1, \underline{y}_2, \underline{y}_3, \dots, \underline{y}_{k_1}, \bar{\mu}_A(\underline{x}_{k_1}), \bar{y}_{k_2}, \bar{y}_{k_2+1}, \dots, \bar{y}_{n_2}, \bar{y}_1] \quad (i=0, \dots, n)$ şeklinde oluştur ve $A_{pL} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$ $A_{pL} c_{pL} = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1}) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$ hesapla.	x_i ve y_i 'i $x_i = [\underline{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3, \dots, \bar{x}_{k_2}, \underline{x}_{k_1}, \underline{x}_{k_1}, \underline{x}_{k_1+1}, \dots, \underline{x}_{n_1}, \underline{x}_1]$ $y_i = [\underline{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3, \dots, \bar{y}_{k_2}, \bar{\mu}_A(\underline{x}_{k_1}), \underline{y}_{k_1}, \underline{y}_{k_1+1}, \dots, \underline{y}_{n_1}, \underline{y}_1] \quad (i=0, \dots, n)$ şeklinde oluştur ve $A_{pR} = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$ $A_{pR} c_{pR} = \frac{1}{6} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i + x_{i+1}) (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$ hesapla.
4	$\Delta \mu_{\bar{A}}(x) = \bar{\mu}_{\bar{A}}(x) - \underline{\mu}_{\bar{A}}(x)$ olmak üzere aday minimum ağırlık merkezini hesapla $L = x_L + \frac{-A_{pL} + \sqrt{A_{pL}^2 + 2\Delta \mu_{\bar{A}}(x_L) A_{pL} (c_{pL} - x_L)}}{\Delta \mu_{\bar{A}}(x_L)}$ Eğer $\Delta \mu_{\bar{A}}(x_L) = \Delta \mu_{\bar{A}}(L)$ ise algoritmayı durdur ve $c_l = L$ eşitle; aksi durumda Adım 5'e git.	$\Delta \mu_{\bar{A}}(x) = \bar{\mu}_{\bar{A}}(x) - \underline{\mu}_{\bar{A}}(x)$ olmak üzere aday maksimum ağırlık merkezini hesapla $R = x_R + \frac{A_{pR} - \sqrt{A_{pR}^2 - 2\Delta \mu_{\bar{A}}(x_R) A_{pR} (c_{pR} - x_R)}}{\Delta \mu_{\bar{A}}(x_R)}$ Eğer $\Delta \mu_{\bar{A}}(x_R) = \Delta \mu_{\bar{A}}(R)$ ise algoritmayı durdur ve $c_r = R$ eşitle; aksi durumda Adım 5'e git.

Çizelge 4.1(devam) : Granüler tip indirgeme yöntemi.

Adım	c_l ' nin hesaplanması	c_r ' nin hesaplanması
5	İyileştirilmiş minimum ağırlık merkezi değerini $c_l = L_e = \frac{(A_{pL} + A_{BTA_L})L - A_L c_L}{A_{pL} + A_{BTA_L} - A_L}$ hesapla. Burada $A_{BTA_L} = (L - x_L) \Delta \mu_{\tilde{A}}(x_L)$ $A_L = \frac{(L - x_L)}{2} (\Delta \mu_{\tilde{A}}(x_L) - \Delta \mu_{\tilde{A}}(L))$ $c_L = \frac{2L + x_L}{3}$ şeklindedir.	İyileştirilmiş maksimum ağırlık merkezi değerini $c_r = R_e = \frac{(A_{pR} - A_{BTA_R})R + A_R c_R}{A_{pR} - A_{BTA_R} + A_R}$ hesapla. Burada $A_{BTA_R} = (R - x_R) \Delta \mu_{\tilde{A}}(x_R)$ $A_R = \frac{(R - x_R)}{2} (\Delta \mu_{\tilde{A}}(x_R) - \Delta \mu_{\tilde{A}}(R))$ $c_R = \frac{2R + x_R}{3}$ şeklindedir.

4.3 Granüler Tip İndirgeme Yönteminin Parçalı Doğrusal Aralık Tip-2 Bulanık Kümelere Uygulanması

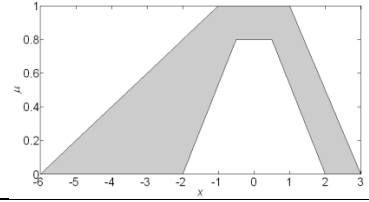
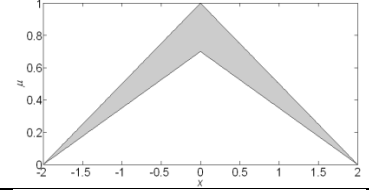
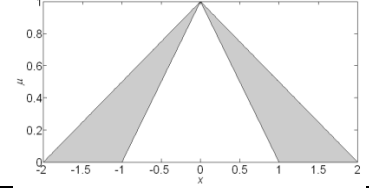
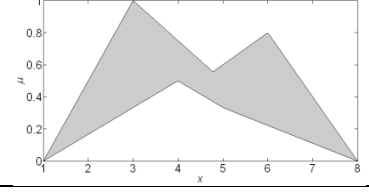
Bu bölümde, granüler tip indirgeme yöntemi Çizelge 4.2' de gösterilen $\tilde{A}_1 \sim \tilde{A}_7$ parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümelerine uygulanmıştır. Bu parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümelerinin seçilmesindeki amaç literatürde kullanılan birçok aralık tip-2 bulanık küme tipinden örnek vererek yöntemin geçerliliğini kanıtlamak ve bir yandan da alt ve üst üyelik fonksiyonunun farklı ve uç eğim değerleri alması durumunda yöntemin başarımını incelemektir. Bu yolla önerilen yöntemin etkinliği gösterilmeye çalışılmıştır.

$\tilde{A}_1$ ve $\tilde{A}_3$ bulanık kümeleri aralık tip-2 bulanık sistemlerde en çok kullanılan yamuk ve üçgen parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümeleri için seçilmiş örneklerdir. $\tilde{A}_2$ [56] bulanık kümesi $\tilde{A}_3$ bulanık kümesi ile birlikte önerilen yöntemin alt ve üst üyelik fonksiyonlarının iki zıt eğim durumu için gösterdiği başarımı incelemek için seçilmiştir. $\tilde{A}_4$ [121] bulanık kümesi literatürde önerilen tip indirgeme yöntemlerinin etkinliğini göstermek için kullanılan genel bir örnektir. $\tilde{A}_5$ [122] yine literatürde karşılaştırma amaçlı kullanılan ve iki Gauss aralık tip-2 bulanık kümenin birleşimi olan bir bulanık kümenin parçalı doğrusal olarak yaklaşık ifade edilmiş halini göstermektedir. Bu örnek ile önerilen yöntemin parçalı doğrusal yaklaşım yöntemi uygulanarak herhangi bir aralık tip-2 bulanık kümesine de uygulanabileceğini

göstermek amaçlanmaktadır. $\tilde{A}_6$ bulanık kümesi literatürde yeni önerilmiş baklava şeklinde parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık küme için verilmiş bir örnektir [64]. $\tilde{A}_7$ bulanık kümesi ise aralık tip-2 bulanık sistemlerde ateşlenen kurallara bağlı olarak gerçekleştirilen çıkarımın sonucu olan bulanık sonuç kümesi üzerinde önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için seçilen bir örnektir. Bu gibi durumların neredeyse tamamında ateşleme aralık değerlerine bağlı olarak sonuç aralık tip-2 bulanık kümesinin belirsizlik taban alanında sabit genişlikte bölgeler ortaya çıkmaktadır ve bu bölgeler aranan minimum ve maksimum ağırlık merkezinin muhtemel bulunacağı yerlerdir.

Önerilen granüler tip indirgeme yöntemi hesaplama kesinliği ve hesaplama süresi kriterleri üzerinden iyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmada kullanılmak üzere gerçek ağırlık merkezi değerleri kök bulma yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır [71]. c_l ve c_r için kullanılan algoritmalar çok benzer olduğundan karşılaştırmada sadece c_l için kullanılan algoritma gösterilmiştir.

Çizelge 4.2: Karşılaştırmada kullanılan PDAT2-BK örnekleri.

Test ÜF	AT2-ÜF köşe noktaları	AT2-ÜF çizimi
$\tilde{A}_1$	$\underline{x} = \{-2, -0.5, 0.5, 2\}$ $\underline{y} = \{0, 0.8, 0.8, 0\}$ $\bar{x} = \{-6, -1, 1, 3\}$ $\bar{y} = \{0, 1, 1, 0\}$	
$\tilde{A}_2$	$\underline{x} = \{-2, 0, 2\}$ $\underline{y} = \{0, 0.7, 0\}$ $\bar{x} = \{-2, 0, 2\}$ $\bar{y} = \{0, 1, 0\}$	
$\tilde{A}_3$	$\underline{x} = \{-1, 0, 1\}$ $\underline{y} = \{0, 1, 0\}$ $\bar{x} = \{-2, 0, 2\}$ $\bar{y} = \{0, 1, 0\}$	
$\tilde{A}_4$	$\underline{x} = \{1, 4, 5, 8\}$ $\underline{y} = \{0, 0.5, 1/3, 0\}$ $\bar{x} = \{1, 3, 43/9, 6, 8\}$ $\bar{y} = \{0, 1, 25/45, 0.8, 0\}$	

Çizelge 4.2 (devam) : Karşılaştırmada kullanılan PDAT2-BK örnekleri.

Test ÜF	AT2-ÜF köşe noktaları	AT2-ÜF çizimi
$\tilde{A}_5$	$\underline{x} = \{0, 1, 2, 3, 4, 4.5, 5.5, 6, 6.5, 8, 9\}$ $\underline{y} = \{0, 0.06, 0.31, 0.5, 0.3, 0.15, 0.33, 0.4, 0.33, 0.05, 0\}$ $\bar{x} = \{0, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10\}$ $\bar{y} = \{0.32, 0.88, 1, 0.88, 0.66, 0.8, 0.66, 0.25, 0.1\}$	
$\tilde{A}_6$	$\underline{x} = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ $\underline{y} = \{0, 0.35, 1, 0.35, 0\}$ $\bar{x} = \{-2, -1, 0, 1, 2\}$ $\bar{y} = \{0, 0.65, 1, 0.65, 0\}$	
$\tilde{A}_7$	$\underline{x} = \{2.5, 3.5, 4.66, 5.78, 8.69, 9\}$ $\underline{y} = \{0, 0.6, 0.6, 0.1, 0.1, 0\}$ $\bar{x} = \{1, 3.25, 4.75, 5.8, 8.8, 10\}$ $\bar{y} = \{0, 0.75, 0.75, 0.4, 0.4, 0\}$	

4.3.1 Hesaplama kesinliği karşılaştırması

Önerilen granüler tip indirgeme yönteminin ve iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminin hesaplama kesinliği karşılaştırması Çizelge 4.3' te verilmiştir. Burada c_l^* parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümenin gerçek minimum ağırlık merkezi değerini göstermektedir. $c_{l_{IKMY}}$ ve $c_{l_{GTİY}}$ sırasıyla iyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi ve önerilen granüler tip indirgeme yöntemi kullanılarak elde edilen minimum ağırlık merkezi değerlerini göstermektedir. Ayrıca karşılaştırma amaçlı olarak önerilen yöntemde iyileştirme olmaksızın Adım 4' te elde edilen $c_{l_{GTİY-İO}}$ minimum ağırlık merkezi sonucu da gösterilmiştir. x_k ve x_L değişkenleri sırasıyla iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminin başlangıç noktasını ve önerilen yöntemin başlangıç köşesini belirtmektedir. İyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi için elde edilen sonuçların hesaplama kesinliği hassasiyeti 10^{-6} olarak seçilmiştir. İyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminde bu kesinliği sağlayan minimum ayrıklaştırma noktası sayısı N ve önerilen yöntem için köşe sayısı N_v ayrıca parantez içinde gösterilmiştir.

Çizelge 4.3: Hesaplama kesinliği karşılaştırması.

Test ÜF	c_l^*	x_k	$ c_{l_{IKMY}} - c_l^* $	x_L	$ c_{l_{GTIY-IO}} - c_l^* $	$ c_{l_{GTIY}} - c_l^* $
$\tilde{A}_1$	-1.5066702301	-2.250	8.24×10^{-6} ($N=700$)	-2	1.57×10^{-3} ($N_v=8$)	1.97×10^{-7} ($N_v=8$)
$\tilde{A}_2$	-0.1188691116	-0.333	1.82×10^{-6} ($N=100$)	0	1.93×10^{-5} ($N_v=6$)	3.18×10^{-11} ($N_v=6$)
$\tilde{A}_3$	-0.3354300187	-0.333	5.96×10^{-6} ($N=300$)	0	1.91×10^{-3} ($N_v=5$)	2.08×10^{-7} ($N_v=5$)
$\tilde{A}_4$	3.6605336687	3.916	2.37×10^{-6} ($N=400$)	4	9.17×10^{-4} ($N_v=9$)	6.14×10^{-8} ($N_v=9$)
$\tilde{A}_5$	3.1469220806	4.166	1.38×10^{-3} ($N=1000$)	4	2.21×10^{-3} ($N_v=20$)	3.43×10^{-7} ($N_v=20$)
$\tilde{A}_6$	-0.1500845177	-0.333	7.86×10^{-6} ($N=200$)	0	6.87×10^{-5} ($N_v=10$)	5.32×10^{-11} ($N_v=10$)
$\tilde{A}_7$	4.0382536237	4.750	8.82×10^{-6} ($N=300$)	4.66	0 ($N_v=12$)	0 ($N_v=12$)

Çizelge 4.3' ten görüldüğü gibi granüler tip indirgeme yöntemi tüm test parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümeleri için iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminden daha üstün bir başarımla göstermiştir. İyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminin kullandığı ayrıklaştırma noktası sayısı ile karşılaştırıldığında granüler tip indirgeme yöntemi oldukça az sayıdaki köşe noktası sayısı kullanarak iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminden hesaplama kesinliği daha yüksek sonuçlar ortaya koymuştur. Ayrıca önemli bir sonuç olarak, ağırlık merkezinin arandığı belirsizlik taban alanının ilgili bölgesi gerçekten sabit genişlikte olduğundan granüler tip indirgeme yöntemi ile $\tilde{A}_7$ bulanık kümesinin gerçek minimum ağırlık merkezi tam olarak bulunmuştur.

Yapılan karşılaştırmalarda görülmektedir ki granüler tip indirgeme yönteminde iyileştirme gerçekleştirilmeden elde edilen sonuçların hesaplama kesinliği en düşük 10^{-3} şeklindedir. Bu hesaplama kesinliği değeri kontrol uygulamaları gibi birçok gerçek zamanlı uygulamaların hesaplama kesinliği gereksinimini karşılamaktadır. Bu yüzden granüler tip indirgeme yöntemi iyileştirme adımına gerek kalmadan kontrol uygulamalarında doğrudan kullanılabilir. Diğer taraftan bu hesaplama kesinliği modelleme uygulamaları gibi daha hassas hesaplama kesinliği gerektiren uygulamalar için yeterli olmayabilir. Bu durumda önerilen yöntemde hesaplama kesinliğini en düşük 10^{-7} değerine çıkaran Adım 5' teki iyileştirme kullanılmalıdır.

4.3.2 Hesaplama süresi karşılaştırması

Tip indirgeme yöntemlerinde hesaplama kesinliği ve hesaplama süresi arasında bir ödünleşim söz konusudur. İstenen hesaplama kesinliği değeri arttıkça hesaplama süresi de uzamaktadır. Bu yüzden yüksek hesaplama kesinliği değeri çoğunlukla hesaplama süresinin çok önemli olmadığı teorik analizler için tercih edilmektedir. Diğer taraftan gerçek zamanlı uygulamalarda ise değişen sistem dinamiklerine daha iyi cevap verebilmek için kısa hesaplama süresi tercih edilmektedir.

Bu bölümde granüler tip indirgeme yöntemi ve iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminin hesaplama sürelerinin karşılaştırılması gösterilmiştir. Karşılaştırmalar için Windows XP Professional, Version 2002, Service Pack 3, Intel (R) Core (TM) 2 Duo CPU, T9300@2.50 GHz, 2.49 GHz, 3.00 GB RAM donanımına sahip bir bilgisayar kullanılmıştır. Karşılaştırılacak algoritmalar Matlab R2010b ortamında programlanmıştır ve hesaplama süreleri ‘tic’ ve ‘toc’ Matlab zaman fonksiyonu kullanılarak saniye mertebesinde elde edilmiştir. Algoritmalar 1000 kez koşturulmuş ve karşılaştırmada elde edilen bu hesaplama sürelerinin ortalaması kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar Çizelge 4.4’ de gösterilmiştir. Hesaplama kesinliği karşılaştırmasında olduğu gibi burada da önerilen yöntemde iyileştirme olmadan elde edilmiş sonuçlar GTİY-İO şeklinde ek olarak verilmiştir.

Çizelge 4.4: Hesaplama sürelerinin karşılaştırılması.

Test ÜF	İKMY (s)	GTİY-İO (s)	GTİY (s)
$\tilde{A}_1$	1.9627×10^{-4}	6.8424×10^{-5}	7.2557×10^{-5}
$\tilde{A}_2$	1.0412×10^{-4}	6.8128×10^{-5}	7.2265×10^{-5}
$\tilde{A}_3$	7.5684×10^{-5}	6.8032×10^{-5}	7.2023×10^{-5}
$\tilde{A}_4$	1.3537×10^{-4}	6.8623×10^{-5}	7.2997×10^{-5}
$\tilde{A}_5$	2.1705×10^{-4}	7.0912×10^{-5}	7.4134×10^{-5}
$\tilde{A}_6$	1.1575×10^{-4}	6.8980×10^{-5}	7.3389×10^{-5}
$\tilde{A}_7$	1.5024×10^{-4}	7.0345×10^{-5}	7.3840×10^{-5}

Çizelge 4.4’ den görüldüğü gibi, granüler tip indirgeme yöntemi tüm durumlarda iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminden daha üstün bir başarımla göstermiştir. Granüler tip indirgeme yönteminin kullandığı köşe noktası sayısı iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminin ayrıklaştırma noktası sayısına nazaran oldukça az olduğundan iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminin ayrıklaştırma noktası sayısının

$N=100$ olduğu $\tilde{A}_2$ bulanık kümesi için bile granüler tip indirgeme yöntemi ile elde edilen sonuçlar iyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi ile elde edilmiş sonuçlardan daha iyidir. Ayrıca iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminin iterasyona gitmeden sonucu ilk adımda doğrudan bulduğu $\tilde{A}_3$ üyelik fonksiyonu için bile granüler tip indirgeme yönteminin hesaplama süresi hala iyileştirilmiş Karnik-Mendel yönteminden daha kısadır. Daha az hesaplama adımına sahip olduğu için granüler tip indirgeme yönteminde iyileştirme olmadan elde edilen sonuçların hesaplama süresi beklenildiği gibi diğerleri arasında en kısa olanıdır.

Burada dikkat çekici bir nokta da şudur; iyileştirme adımı ile sonuçların hesaplama kesinliği değeri yaklaşık olarak 10^{-4} daha iyileştirilebilmesine karşın, iyileştirilmiş durumda elde edilen hesaplama süreleri iyileştirme olmadan elde edilen hesaplama sürelerinden sadece çok az bir miktar uzundur. Yani önerilen yöntem çok az ek bir hesaplama süresi ile çok daha iyi bir hesaplama kesinliği değeri sağlamaktadır. Bu durum granüler tip indirgeme yöntemini gerçek zamanlı uygulamalarda doğrudan kullanılabilir kılmaktadır.

4.3.3 Granüler tip indirgeme yöntemin kesinlik hassasiyetini etkileyen etkenler

Önerilen granüler tip indirgeme yönteminin hesaplama kesinliğini etkileyen üç önemli etken vardır. Bunlar; alt ve üst üyelik fonksiyonu eğimleri arasındaki fark $|\bar{a} - \underline{a}|$, aday ağırlık merkezi ve seçilen köşe değeri arasındaki fark $|L - x_L|$ ve seçilen köşe değeri x_L şeklindedir. İlk iki etkenin hesaplama kesinliği üzerindeki etkisi test üyelik fonksiyonları için Çizelge 4.5’ de gösterilmiştir.

Çizelge 4.5: $|\bar{a} - \underline{a}|$ ve $|L - x_L|$ değerlerinin GTİY hesaplama kesinliğine olan etkisi.

Test ÜF	$ \bar{a} - \underline{a} $	$ L - x_L $	$ c_{l_{GTİY-IO}} - c_l^* $
$\tilde{A}_1$	0.3333	0.4917	1.57×10^{-3}
$\tilde{A}_2$	0.1500	0.1188	1.93×10^{-5}
$\tilde{A}_3$	0.5000	0.3335	1.91×10^{-3}
$\tilde{A}_4$	0.4166	0.3385	9.17×10^{-4}
$\tilde{A}_5$	0.08	0.8552	2.21×10^{-3}
$\tilde{A}_6$	0.3	0.1500	6.87×10^{-5}
$\tilde{A}_7$	0	0.6217	0

Bu iki etken ayrı ayrı değerlendirildiğinde aşağıdaki sonuçlar çıkarılabilir:

- i) Alt ve üst üyelik fonksiyonlarının eğimleri arasındaki fark $|\bar{a} - \underline{a}|$ küçüldükçe sonucun hesaplama kesinliği artmaktadır.

Bu granüler tip indirgeme yöntemi için beklenen bir sonuçtur. Çünkü belirsizlik taban alanının sabit genişlikte yani $|\bar{a} - \underline{a}| = 0$ olduğu kabul edilmiştir. Bu sonuç $\tilde{A}_7$ için açıkça görülmektedir. $\tilde{A}_7$ 'nin belirsizlik taban alanının ilgili parçası gerçekten sabit genişlikte olduğundan ($|\bar{a} - \underline{a}| = 0$), gerçek ağırlık merkezi granüler tip indirgeme yöntemi ile tam kesinlikte hesaplanmıştır. Bu sonuç ayrıca $\tilde{A}_3$ ve $\tilde{A}_4$ bulanık kümelerinden de görülmektedir. Bu bulanık kümeler için $|L - x_L|$ değerleri birbirine çok yakın olmasına rağmen $\tilde{A}_4$ bulanık kümesi için elde edilen sonucun hesaplama kesinliği $\tilde{A}_3$ için elde edilen sonucun hesaplama kesinliğinden daha yüksektir.

- ii) Hesaplanan aday minimum ağırlık merkezi ve seçilen uygun köşe değeri arasındaki fark $|L - x_L|$ küçüldükçe sonucun hesaplama kesinliği artmaktadır.

Bu sonuç $\tilde{A}_1$ ve $\tilde{A}_6$ bulanık kümelerinden açıkça görülmektedir. Bu bulanık kümeleri için $|\bar{a} - \underline{a}|$ değeri birbirlerine çok yakın olmasına karşın $\tilde{A}_6$ bulanık kümesi için elde edilen sonucun hesaplama kesinliği $\tilde{A}_1$ için elde edilen sonucun hesaplama kesinliğinden daha yüksektir. Ayrıca bu sonuç $\tilde{A}_2$ ve $\tilde{A}_5$ bulanık kümeleri için elde edilmiş sonuçlardan da doğrulanmaktadır. Burada $\tilde{A}_2$ bulanık kümesinin $|\bar{a} - \underline{a}|$ değeri $\tilde{A}_5$ bulanık kümesinden daha büyük olmasına karşın, $\tilde{A}_2$ için elde edilen sonuçların hesaplama kesinliği $\tilde{A}_5$ için elde edilmiş sonuçların hesaplama kesinliğinden daha yüksektir.

Bu iki etken birarada göz önüne alındığında, eğer $|\bar{a} - \underline{a}| \neq 0$ ise en iyi sonuç $\tilde{A}_2$ bulanık kümesinde olduğu gibi $|\bar{a} - \underline{a}|$ ve $|L - x_L|$ değerlerinin minimum olduğu durumda elde edilmektedir. $\tilde{A}_1$ ve $\tilde{A}_3$ bulanık kümeleri incelendiğinde, $\tilde{A}_3$ bulanık kümesinin $|L - x_L|$ değeri $\tilde{A}_1$ bulanık kümesinden daha küçük iken $\tilde{A}_1$ bulanık

kümesinin $|\bar{a} - \underline{a}|$ değeri $\tilde{A}_3$ bulanık kümesinden daha küçüktür. Fakat burada $\tilde{A}_1$ bulanık kümesi için elde edilen sonucun $\tilde{A}_3$ bulanık kümesi için elde edilen sonuçtan yüksek bir hesaplama kesinliği değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu yüzden $|\bar{a} - \underline{a}|$ değerinin sonuçların hesaplama kesinliği üzerindeki etkisinin $|L - x_L|$ değerinden daha baskın olduğu sonucu çıkarılabilir.

Granüler tip indirgeme yönteminde x_L ve L noktalarının parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümenin aynı doğrusal parçasında olduğu varsayılmıştır. Eğer bu varsayım seçilen x_L ile sağlanamazsa granüler tip indirgeme yönteminde sonuçların hesaplama kesinliği doğal olarak etkilenecektir. Bu yüzden bu durum test üyelik fonksiyonları $\tilde{A}_1$, $\tilde{A}_4$, $\tilde{A}_5$ ve $\tilde{A}_7$ üzerinde x_L köşe noktasının belirtilen varsayım bilerek ihlal edilecek şekilde seçilmesiyle analiz edilmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6’ da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6: Seçilen köşe noktasının GTİY hesaplama kesinliği üzerindeki etkisi.

Test ÜF	x_L	$ c_{l_{GTIY-IO}} - c_l^* $	$ c_{l_{GTIY}} - c_l^* $
$\tilde{A}_1$	- 0.5	2.05×10^{-2}	2.78×10^{-3}
$\tilde{A}_4$	5	1.38×10^{-2}	2.96×10^{-2}
$\tilde{A}_5$	4.5	9.05×10^{-3}	5.76×10^{-6}
$\tilde{A}_7$	5.78	4.28×10^{-2}	9.75×10^{-3}

Çizelge 4.6 incelendiğinde eğer seçilen köşe değeri x_L ve hesaplanan L değeri aynı doğrusal parçada değil ise granüler tip indirgeme yöntemi ile elde edilen sonuçların hesaplama kesinliğinde bir düşüş gözlemlenmektedir. Fakat elde edilen hesaplama kesinliği değerleri hala kabul edilebilir sınırlar içindedir.

5. ARALIK TİP-2 BULANIK MANTIK KONTROLÖRLER İÇİN PD TİPİ AĞIRLIKLANDIRMALI DİNAMİK DURULAMA YÖNTEMİ

5.1 Giriş

Belirsizlik gerçek sistemlerin doğal bir karakteristiğidir. Birçok çalışmada tip-2 bulanık mantık kontrolörlerin (T2-BMK) tasarım aşamasında daha çok serbestlik derecesine sahip olduklarından dolayı tip-1 bulanık mantık kontrolörlere (T1-BMK) göre belirsizliklerle daha iyi baş edebilme yeteneğine sahip oldukları gösterilmiştir [37,46-48]. Sahip oldukları hesaplama kolaylıklarına bağlı olarak gerçek zamanlı uygulamalarda çoğunlukla aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörler (AT2-BMK) kullanılmaktadır [25,32,41,44,49-52].

Tip-2 bulanık mantık kontrolörlerde çıkarım mekanizmasının sonucu olan tip-2 bulanık kümesinin durulama işleminin uygulanabilmesi için tip indirgeme işlemine tabi tutulması gerekir. Literatürde ağırlık merkezi, kümeler merkezi, yükseklik gibi çeşitli tip indirgeme yöntemleri mevcuttur [15,37,66].

Bir aralık tip-2 bulanık kümenin tip indirgeme işlemi sonucunda sağ ve sol sınır değerleri ile tanımlanan aralık tip-1 bulanık kümesi elde edilir. Tip-1 bulanık kümenin tanımladığı bu aralık değeri mevcut belirsizliğe bağlı olarak keskin çıkış değerinin alabileceği tüm değerleri ifade etmektedir. Klasik durulama yönteminde keskin çıkış değeri bu aralığın sınır değerlerinin ortalaması alınarak elde edilir [39,85-88]. Bu durumda belirsizlikler ya da sistem dinamikleri dikkate alınmadan tip indirgenmiş kümeden keskin çıkış değerine her zaman sabit bir atama tanımladığından, klasik durulama yöntemi ile aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörün başarımından tam olarak yararlanılamamaktadır [24].

Bu çalışmada keskin çıkış değerini belirlerken sistem dinamiklerinden yararlanan yeni bir durulama yöntemi önerilmiştir. Önerilen durulama yönteminde, klasik durulama yönteminde olduğu gibi ortalama almak yerine tip indirgenmiş aralık kümenin sınır değerlerinin doğrusal kombinasyonu kullanılmaktadır. Bu doğrusal kombinasyon PD (oransal-türev) tipi ağırlıklandırılmış sistem hata ve hatanın türevi

bilgisi kullanılarak oluşturulmuştur. Böylece durulama işleminde tip indirgenmiş kümeden keskin çıkış değerine sabit bir atama yerine dinamik bir atama gerçekleştirilmektedir. Keskin çıkış değeri belirsizliği ifade eden tip indirgenmiş aralık küme sınır değerleri arasında sistem dinamiklerine bağlı olarak uygun değerler alabildiğinden bu durulama yöntemi ile aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörün başarımını ve dayanıklılığını iyileştirilebilmek mümkündür. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler üzerinde benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir ve elde edilen sonuçlar şekiller ve çizelgeler ile gösterilmiştir.

5.2 Klasik Durulama Yöntemi

Aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörlerde tip indirgeme işleminin sonucu $U_{TR} = [u_l, u_r]$ şeklinde bir aralık kümedir. Bu aralık değer kontrol edilecek sistemdeki ve kontrolörün giriş değerlerindeki belirsizliklere bağlı olarak sisteme uygulanması gereken kontrol işaretinin alabileceği değerler aralığıdır [15,37,66]. Burada u_l ve u_r sırasıyla tip indirgenmiş kümenin minimum ve maksimum sınır değerlerini göstermektedir. Bu sınır değerler çoğunlukla Karnik-Mendel iteratif algoritması [66,69] ya da belirsizlik sınırları yöntemi [74] kullanılarak belirlenir.

Keskin çıkış değeri mevcut belirsizliğe bağlı olarak bu tanımlı aralık içinden herhangi bir değer olabilir. Aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörlerde sisteme uygulanacak u keskin kontrol değeri $U_{TR} = [u_l, u_r]$ tip indirgenmiş aralık kümenin sınır değerlerinin $u = (u_l + u_r)/2$ şeklinde ortalaması alınarak elde edilir [37,85]. Fakat bu durulama yöntemi belirsizliği ifade eden tip indirgenmiş kümeden keskin çıkış değerine mevcut belirsizlikleri ya da sistem dinamiklerini dikkate almadan sabit bir atama gerçekleştirmektedir. Bu yüzden bu klasik durulama yöntemi ile tip indirgenmiş aralık kümeden etkin bir şekilde faydalanılamamaktadır.

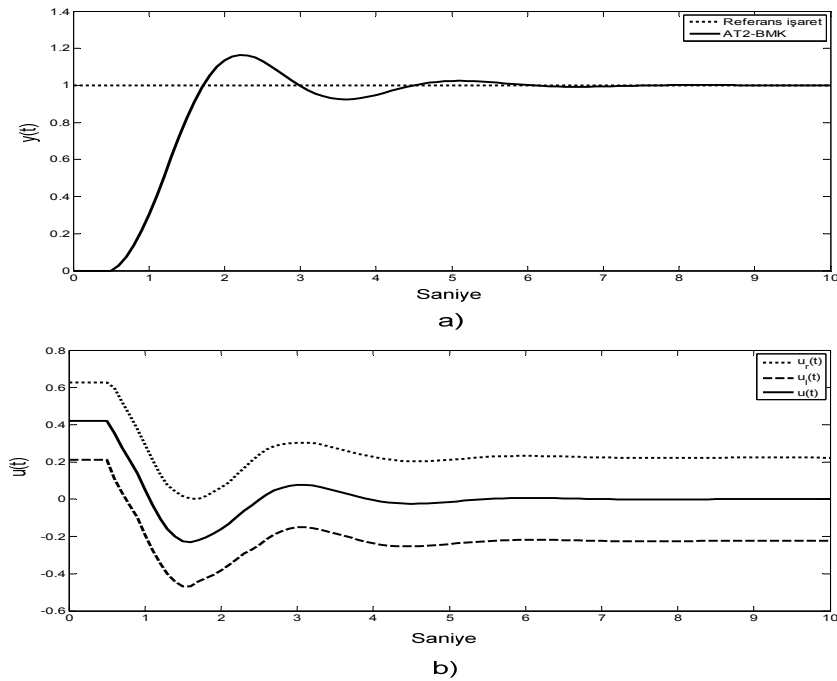
5.3 PD Tipi Ağırlıklandırılmalı Dinamik Durulama Yöntemi

Daha önce de belirtildiği gibi durulama yöntemi olarak sınır değerlerin ortalamasını alma yöntemini kullanmak belirsizliği ifade eden çıkış işaretindeki değer aralığını etkin olarak kullanmamızı engellemektedir. Bu durum tip-2 üyelik fonksiyonları ile bu üyelik fonksiyonlarının sahip olduğu gömülü tip-1 üyelik fonksiyonları arasındaki

ilişkiye benzetilebilir. Bulanık kontrolör tasarımı sırasında üyelik fonksiyonlarını belirlerken bir belirsizlik mevcutsa tip-1 üyelik fonksiyonları yerine tip-2 üyelik fonksiyonları tercih edilmektedir. Tip-2 üyelik fonksiyonu sonsuz sayıda gömülü tip-1 üyelik fonksiyonundan oluşmaktadır [37]. Bu yüzden net olarak üyelik derecelerini belirleyemediğimiz bulanık kontrolörün başarımını en iyi yapan tip-1 üyelik fonksiyonu, seçtiğimiz tip-2 üyelik fonksiyonunun gömülü tip-1 üyesidir. Tip-2 bulanık kontrolörde çıkarım sonucu çıkış işlemi bloğunda bu en iyi tip-1 üyelik fonksiyonunun çıkış değerini de içinde barındıran çıkış değeri aralığı elde edilir. Bu yüzden kontrolör başarımını arttırmak için durulama işleminde bu çıkış aralık değerinden sisteme uygulanacak en iyi kontrol işareti değerinin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu çıkış işareti aralık bandı içinde sistem dinamiklerine ve belirsizliklere göre uygun en iyi kontrol işaretini seçecek bir durulama yöntemine ihtiyaç vardır. Literatürde önerilen sabit parametre kullanan yöntemler çevrimdışı olarak belirlendiği için adaptiflik özelliğini taşımamaktadır [123].

Durulama işleminde keskin çıkış değeri seçiminin kontrolör başarımı üzerindeki etkisini daha iyi göstermek için aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörler ile elde edilmiş örnek bir aşımli sistem basamak cevabı ve klasik durulama yöntemi ile elde edilmiş kontrol işareti Şekil 5.1’ de verilmiştir.



Şekil 5.1 : a) Sistem basamak cevabı b) minimum (u_l), maksimum (u_r) ve durulanmış kontrol işareti (u).

Şekil 5.1' den görüldüğü gibi kontrol işaretini tip indirgenmiş aralık kümenin alt sınırına (u_l) yakın seçerek sistem yanıtındaki aşım azaltılabilir. Diğer taraftan eğer eksik sönümlü bir sistem yanıtı mevcut olsaydı kontrol işareti tip indirgenmiş aralık kümenin üst sınırına (u_r) yakın seçilerek yanıtın yükselme zamanı iyileştirilebilirdi. Bu yüzden tip indirgenmiş çıkış aralığını daha etkin bir şekilde kullanabilmek için daha uygun bir durulama yönteminin gerekliliği açıktır.

Bu çalışmada keskin çıkış değerini belirlerken sistem dinamiklerinden yararlanan yeni bir durulama yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde u keskin çıkış değeri tip indirgenmiş kümenin u_l ve u_r sınır değerlerinin doğrusal bir kombinasyonu olarak

$$u(t) = \alpha(t)u_l + (1 - \alpha(t))u_r \quad (5.1)$$

şeklinde hesaplanmaktadır. Bu denklemde α kontrolörün başarımını arttırmak için belirlenmesi gereken bir ayar parametresidir. Literatürde α parametresi sabit bir değer olarak ayarlanmaktadır [123]. Bu çalışmada ise yeni bir yaklaşım ile α parametresini ayarlamak için sistem dinamiklerine bağlı aşağıdaki ifade önerilmiştir

$$\alpha(t) = K_e \cdot e(t) + K_{\Delta e} \cdot \Delta e(t) + 0.5 \quad (5.2)$$

Burada e ve Δe sırasıyla geribesleme hatası ve hatanın türevidir. K_e ve $K_{\Delta e}$ parametreleri ise sistem dinamiklerinin α değeri üzerindeki PD tipinde oluşturulmuş ağırlıklarını ayarlamak için kullanılan ağırlıklandırma parametreleridir. Önerilen yöntemde geçici sistem cevabı süresince α parametresi e ve Δe değerlerine bağlı olarak değişmektedir. Geçici sistem cevabından sonra ise e ve Δe değerleri sıfır olduğundan önerilen yöntemde α parametresi ortalama değer olan 0.5 değerine eşit olmaktadır. Çünkü diğer durumda e ve Δe değerlerinin sıfır olması dolayısıyla α değeri kararlı rejimde sürekli u_r üst sınır değerine eşit olacak ve bu sistemin kararlı rejiminin bozulmasına neden olacaktı. Bu yüzden $\alpha = 0.5$ olduğunda önerilen durulama yöntemi ortalama alan klasik durulama yöntemine dönüşerek herhangi bir kararlı hal hatasına neden olması ya da sistemin kararlılığının bozulmasına yol açması engellenmiş olmaktadır. Böylece önerilen dinamik durulama yöntemi geçici hal durumunda sistem dinamiklerine bağlı olarak geçici hal cevabını iyileştirme imkânı sağlamakta ve kararlı hal durumunda ise klasik durulama yöntemine dönüşmektedir.

Önerilen dinamik durulama yöntemi aşağıda gösterildiği gibi K_e ve $K_{\Delta e}$ parametreleri 0.5 olarak nominal ağırlıklandırma değerinde seçilerek de doğrudan kullanılabilir

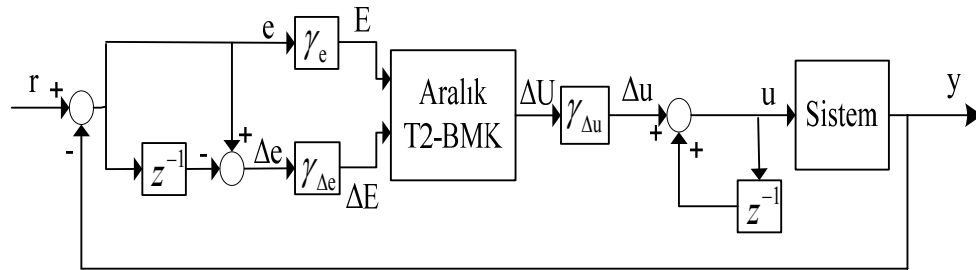
$$\alpha(t) = 0.5 \cdot e(t) + 0.5 \cdot \Delta e(t) + 0.5 \quad (5.3)$$

Böylece fazladan ayarlama parametresi kullanılmamış olur ve önerilen yöntem aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörlerde klasik durulama yöntemi gibi hiçbir ayarlama yapmadan doğrudan kullanılabilir. Ya da alternatif olarak farklı K_e ve $K_{\Delta e}$ parametreleri yerine aşağıdaki gibi tek bir ağırlıklandırma parametresi kullanılabilir

$$\alpha(t) = K(e(t) + \Delta e(t)) + 0.5 \quad (5.4)$$

5.4 Benzetim Çalışmaları

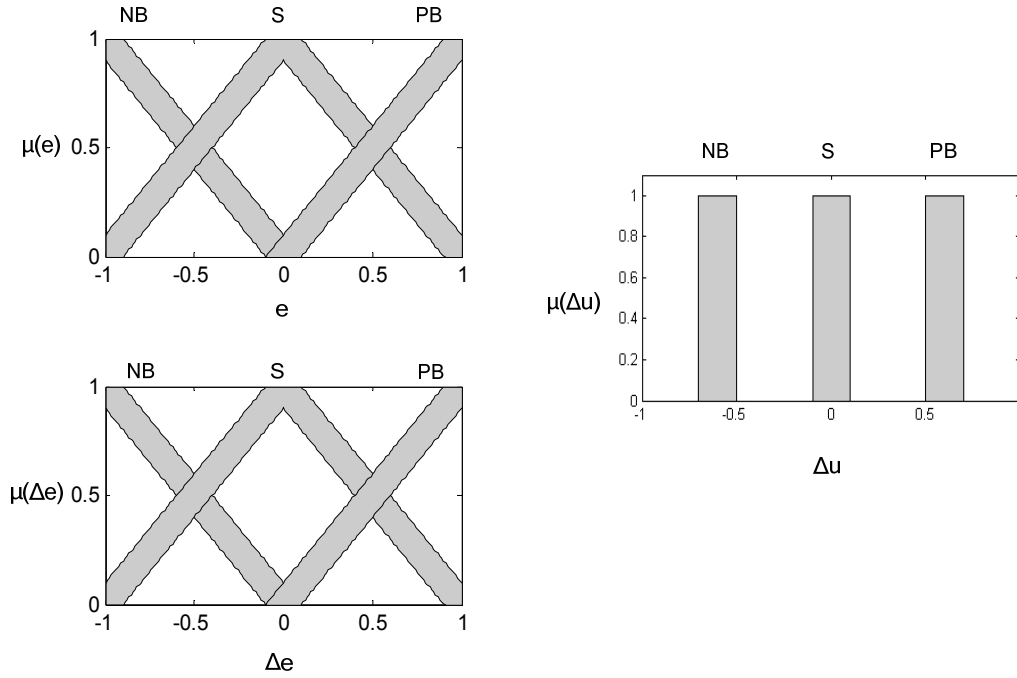
Önerilen dinamik durulama yönteminin etkinliğini göstermek için doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler üzerinde benzetim çalışması yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında PI (oransal-integral) tipinde aralık tip-2 TSK bulanık mantık kontrolör yapısı tercih edilmiştir. Kontrol sistem blok şeması Şekil 5.2’de gösterilmiştir. Giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları için $[-1, 1]$ aralığında normalize edilmiş tanım uzayı kullanılmıştır. Giriş değişkeni üyelik fonksiyonları için üçgen üyelik fonksiyonları ve çıkış değişkeni üyelik fonksiyonları için tekil tip üyelik fonksiyonları tercih edilmiştir. Tüm üyelik fonksiyonları için belirsizlik taban alanı genişliği $\Delta=0.1$ olarak seçilmiştir.



Şekil 5.2 : PI tipi aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörün yapısı.

Giriş ve çıkış değişkenleri için belirlenen tanım uzayına eşit olarak dağıtılmış Negatif Büyük (NB), Sıfır (S) ve Pozitif Büyük (PB) olmak üzere üçer bulanık küme

belirlenmiştir. Belirlenen giriş ve çıkış üyelik fonksiyonları Şekil 5.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.3 : PI tip-2 TSK bulanık kontrolörde kullanılan üyelik fonksiyonları.

Kontrolörde kullanılan kural tablosu ise Çizelge 5.1’ den görüldüğü gibi basit ve en genel simetrik yapıda olup dokuz kural içermektedir.

Çizelge 5.1: Bulanık kontrolörde kullanılan kural tablosu.

$\Delta e/e$	NB	S	PB
NB	NB	NB	S
S	NB	S	PB
PB	S	PB	PB

Çıkış bloğunda ağırlıklı ortalama tip indirgeme yöntemi kullanılmış ve kontrol işaretinin minimum ve maksimum sınır değerleri Karnik-Mendel yöntemi [66] yardımı ile hesaplanmıştır.

Bu çalışmada önerilen yöntem için (5.3) ifadesi ile gösterilen nominal ağırlıklandırmanın kullanıldığı durum Dinamik Durulama Yöntemi (DDY) ve (5.2) ifadesi ile gösterilen PD tipi ağırlıklandırmanın yapılabildiği durum Ağırlıklandırılmış Dinamik Durulama Yöntemi (ADDY) olarak adlandırılmıştır. Klasik durulama yönteminin kullanıldığı durum için ise KDY kısaltması kullanılmıştır.

Tüm benzetimlerde referans giriş işareti birim basamak fonksiyonu ve örnekleme zamanı 0.1 saniye şeklinde seçilmiştir. Benzetim çalışmaları MATLAB®/Simulink için hazırlanmış Interval Type-2 Fuzzy Logic Toolbox [124] kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

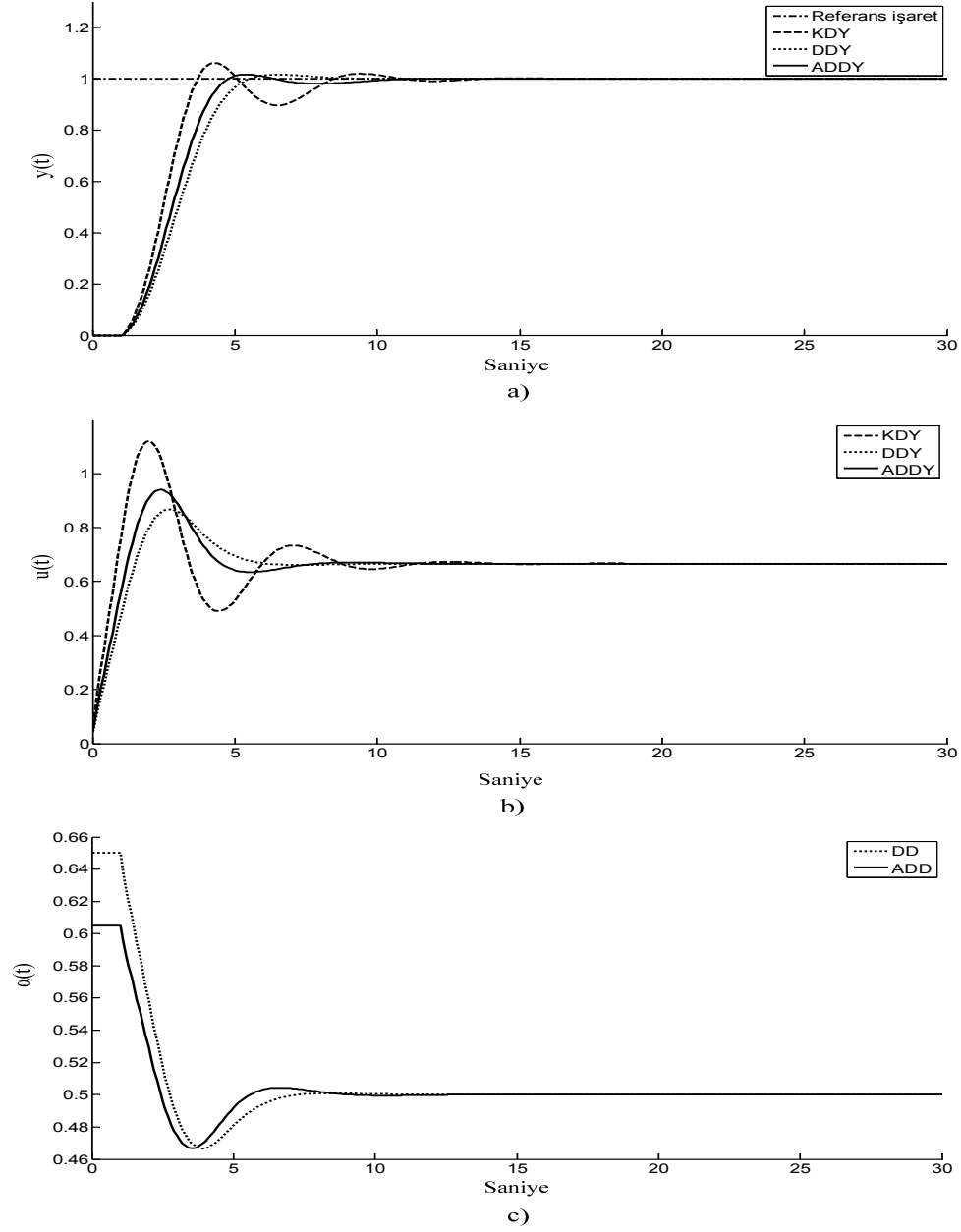
5.4.1 Ölü zamanlı doğrusal sistem üzerinde yapılan benzetim çalışmaları

Transfer fonksiyonu aşağıda verilmiş birinci dereceden ölü zamanlı doğrusal sistemi göz önüne alalım.

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} e^{-Ls} \quad (5.5)$$

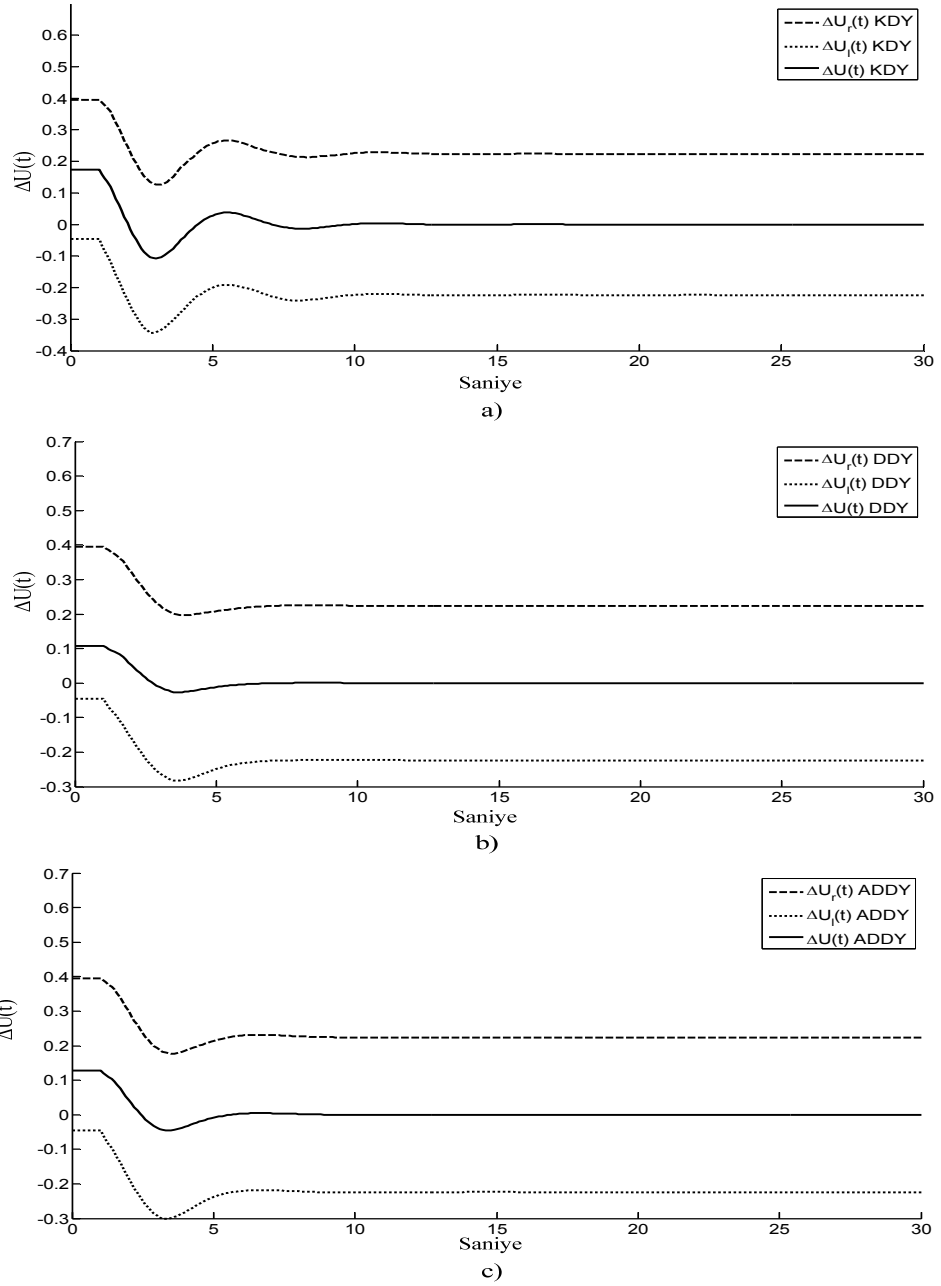
Burada K , τ ve L sırasıyla sistem kazancı, zaman sabiti ve ölü zaman değerini göstermektedir. Nominal sistem parametreleri $K=1.5$, $\tau=2$ ve $L=1$ şeklinde seçilmiştir. Önerilen yöntemin etkinliğini göstermek için giriş ve çıkış ölçekleme çarpanları klasik durulama yöntemi kullanılması durumunda sistem yanıtında bir miktar aşım olacak şekilde $\gamma_e=0.3$, $\gamma_{\Delta e}=0.5$ ve $\gamma_{\Delta u}=0.4$ olarak belirlenmiştir. Bu durumda ADDY için ağırlıklandırma parametreleri deneme yanılma yoluyla $K_e = 0.35$ ve $K_{\Delta e} = 0.35$ şeklinde belirlenmiştir.

Nominal sistem için elde edilen birim basamak yanıtları, uygulanan kontrol işaretleri ve önerilen yöntem için α parametresinin değişimleri Şekil 5.4' de gösterilmiştir.



Şekil 5.4 : a) Nominal sistem için birim basamak yanıtları b) kontrol işaretleri c) α parametresinin değişimi.

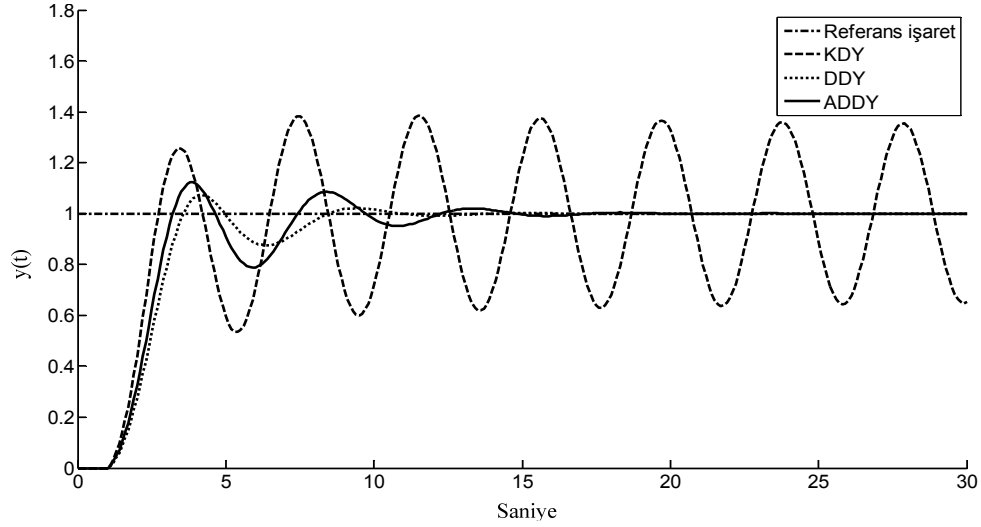
Tip indirgeme işleminden sonra elde edilen kontrol işareti aralıkları ve durulama yöntemleri ile elde edilen durulanmış kontrolör çıkışları Şekil 5.5’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.5 : a) KDY b) DDY ve c) ADDY için tip indirgeme işleminden sonra elde edilen kontrol işaretleri aralıkları ve durulanmış çıkış işaretleri.

Şekil 5.4' ten görüldüğü gibi DDY ile aşırma neden olan hızlı sistem yanıtı yavaşlatılarak referans değere aşırımsız şekilde oturması sağlanmıştır. Ayrıca sahip olduğu ayar parametrelerine bağlı olarak ADDY ile DDY' e göre başarıımı daha yüksek bir sistem yanıtı elde edilmiştir.

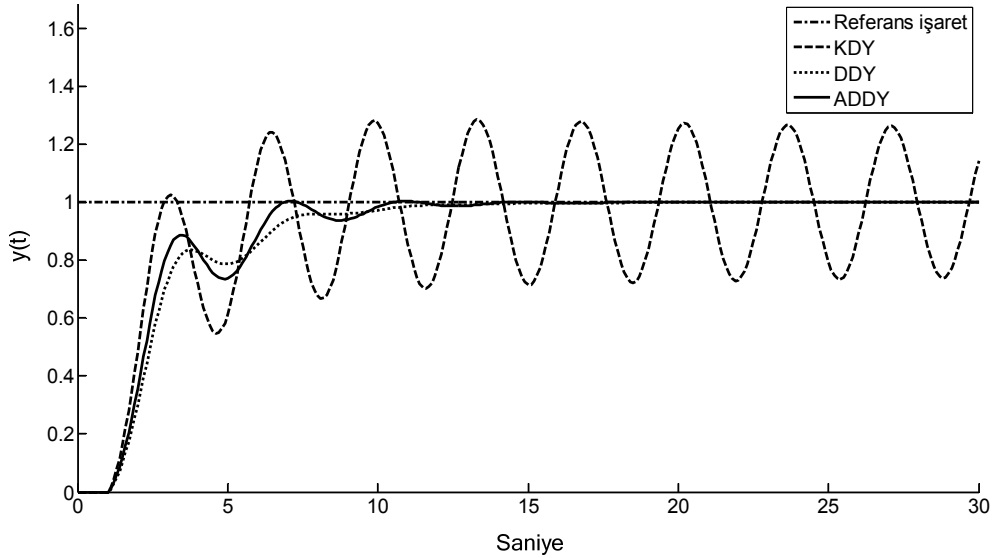
Sistem parametre belirsizliği olması durumunda önerilen dinamik durulama yöntemi ve klasik durulama yönteminin başarıımı karşılaştırılmıştır. Sistem kazanç değerinin nominal değerinden $K=2.5$ değerine değişmesi durumunda elde edilen basamak yanıtları Şekil 5.6' da gösterilmiştir.



Şekil 5.6 : $K=2.5$, $\tau=2$, $L=1$ için elde edilen birim basamak yanıtları.

Şekil 5.6' dan görüldüğü gibi K kazancının bu şekilde değişmesi durumunda klasik durulama yöntemi ile elde edilen sistem yanıtı kararsızlık sınırında iken önerilen durulama yöntemleri ile elde edilen sistem yanıtları daha az salınımlıdır ve dolayısıyla kararlılığını korumaktadır.

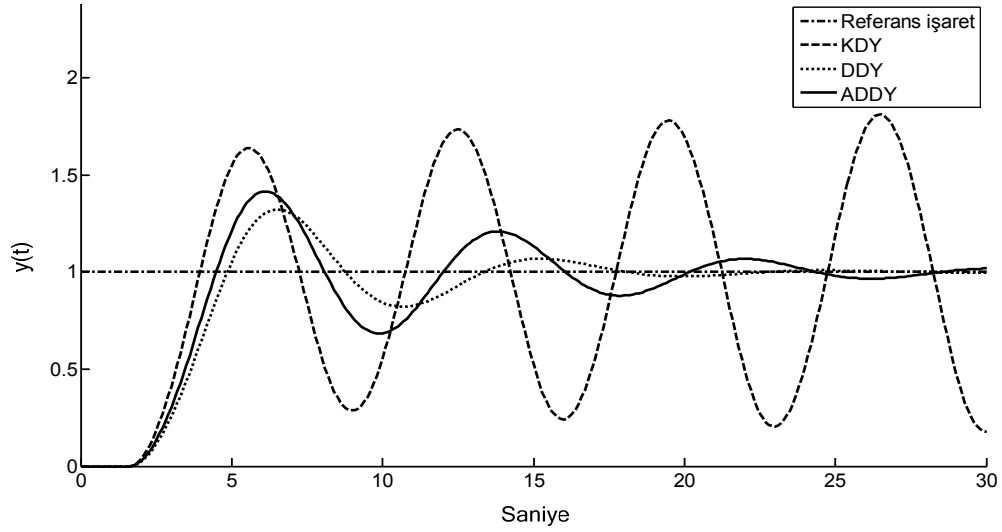
Sistem zaman sabitinin nominal değerinden $\tau=0.9$ değerine değişmesi durumunda elde edilen birim basamak yanıtları Şekil 5.7' de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : $K=1.5$, $\tau=0.9$, $L=1$ için elde edilen birim basamak yanıtları.

Sistem zaman sabiti değerinin bu ani değişiminde bile klasik durulama yöntemi ile elde edilen sistem yanıtı kararsızlık sınırında olurken önerilen dinamik durulama yöntemleri ile elde edilen sistem yanıtları hala kararlılıklarını korumakta ve istenen referans değere yerleşmektedir.

Sistem ölü zaman değerinin nominal değerinden $L=1.7$ değerine değişmesi durumunda elde edilen birim basamak yanıtları Şekil 5.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 5.8 : $K=1.5$, $\tau=2$, $L=1.7$ için elde edilen birim basamak yanıtları.

Şekil 5.8’ den görüldüğü gibi önerilen dinamik durulama yöntemleri ile sistem yanıtları kararlılıklarını korurken klasik durulama yöntemi ile elde edilen sistem yanıtı kararsızdır.

Son olarak yukarıda incelenen sistem parametre değişimlerine karşı önerilen dinamik durulama yöntemlerinin ve klasik durulama yönteminin başarımları Çizelge 5.2’ de karşılaştırılmıştır. Çizelgede t_r yükselme zamanını, t_s yerleşme zamanını ve $\ddot{U}A$ yüzde üst aşımı belirtmektedir.

Çizelge 5.2: Doğrusal sistem için başarımlar karşılaştırma sonuçları.

Parametreler			t_r (s)			t_s (s) ($\pm 2\%$)			$\ddot{U}A\%$		
K	τ	L	KDY	DDY	ADDY	KDY	DDY	ADDY	KDY	DDY	ADDY
1.5	2	1	1.8	2.7	2.4	8.1	5.2	4.5	6.2	1.6	1.7
2.5	2	1	X	1.7	1.5	X	8.2	11.8	X	7.3	12.2
1.5	0.9	1	X	5	4.6	X	10.4	9.9	X	0	0
1.5	2	1.7	X	2.1	1.9	X	20.7	27.5	X	32.2	41.4

X: Kararlı değil

Çizelge 5.2’ den açıkça görülmektedir ki önerilen dinamik durulama yöntemleri klasik durulama yöntemine göre daha üstün bir başarımlar göstermekte ve sistem parametre değişimlerine karşı sistem kararlılığını iyileştirmektedir. Önerilen yöntemler kendi aralarında karşılaştırıldığında ise nominal sistem durumunda sahip olduğu ayar parametrelerine bağlı olarak ADDY ile elde edilen sistem yanıtının başarımları DDY ile elde edilen sistem yanıtından daha iyidir. Ağırlıklandırma

kullanılarak DDY ile elde edilen yanıt hızlandırılmış ve yerleşme zamanı kısaltılmıştır. Burada DDY ile daha yavaş bir sistem yanıtı elde edildiğinden K kazanç değeri ve L ölü zaman değerinin artması gibi sistem yanıtının hızlanmasına neden olan sistem parametre değişimlerinde ADDY ile daha aşımli bir sistem yanıtı elde edilmiştir. Diğer taraftan τ zaman sabiti değerinin düşmesi gibi sistem yanıtının yavaşlamasına neden olan sistem parametre değişimlerinde ADDY ile elde edilen sistem yanıtı DDY ile elde edilen sistem yanıtına göre daha iyi bir yerleşme zamanı değerine sahip olmuştur.

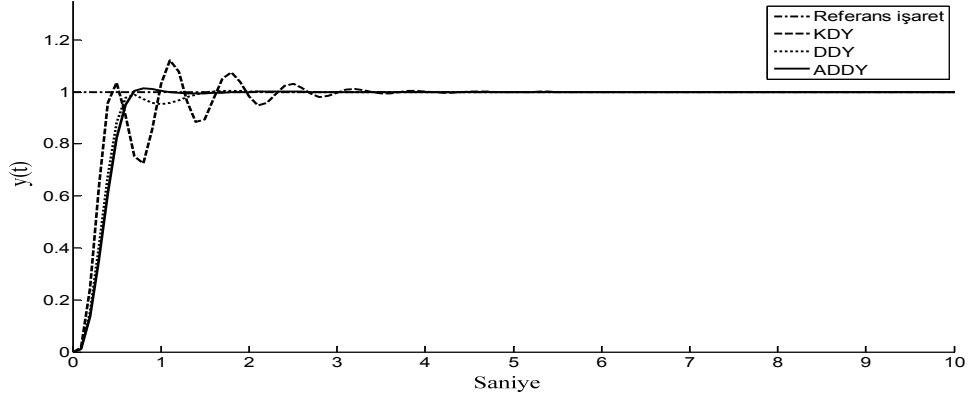
5.4.2 Doğrusal olmayan sistem üzerinde yapılan benzetim çalışmaları

Bu benzetim çalışmasında aşağıda belirtilen doğrusal olmayan sistem [46] göz önüne alınmıştır

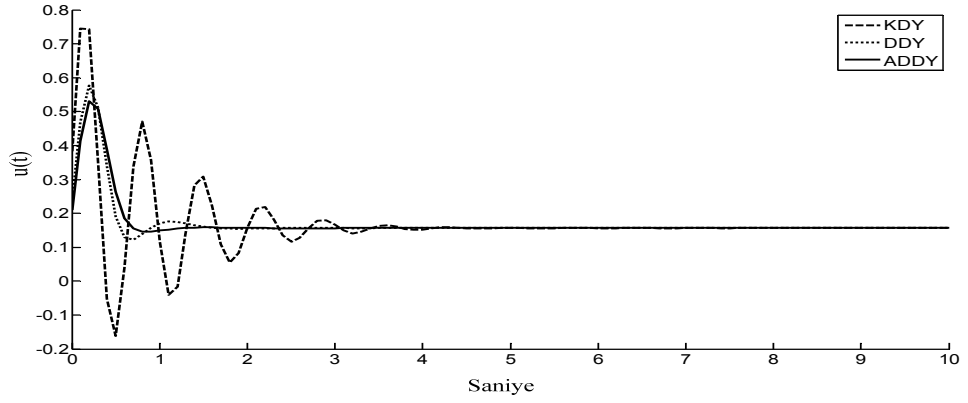
$$y(k) = 0.2 \cdot y(k-3) \cdot 0.07 \cdot y(k-2) + a \cdot y(k-1) + 0.05 \cdot u(k-1) + b \cdot u(k-2) \quad (5.6)$$

Burada u kontrol girişi, y sistem çıkışı, a ve b sistem parametreleridir. Nominal durumda bu parametrelerin değeri $a=0.9$ ve $b=0.5$ şeklindedir. Kontrolörün giriş çıkış ölçekleme çarpanları $\gamma_e=0.3$, $\gamma_{\Delta e}=0.1$ ve $\gamma_{\Delta u}=2.2$ şeklinde seçilmiştir. Ayrıca ADDY için ağırlıklandırma parametreleri yine deneme yanılma yoluyla $K_e = 0.6$ ve $K_{\Delta e} = 0.6$ şeklinde belirlenmiştir.

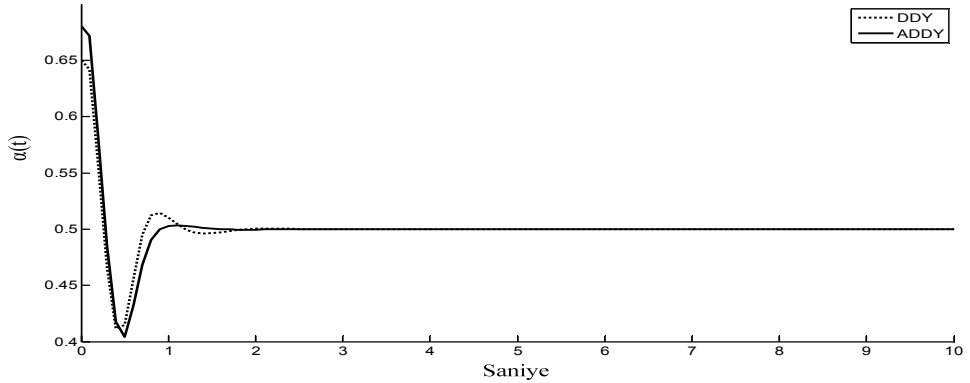
KDY ve önerilen dinamik durulama yöntemlerinin uygulanması sonucu nominal sistem için elde edilen birim basamak yanıtları, uygulanan kontrol işaretleri ve önerilen yöntem için α parametresinin değişimleri Şekil 5.9' da gösterilmiştir.



a)



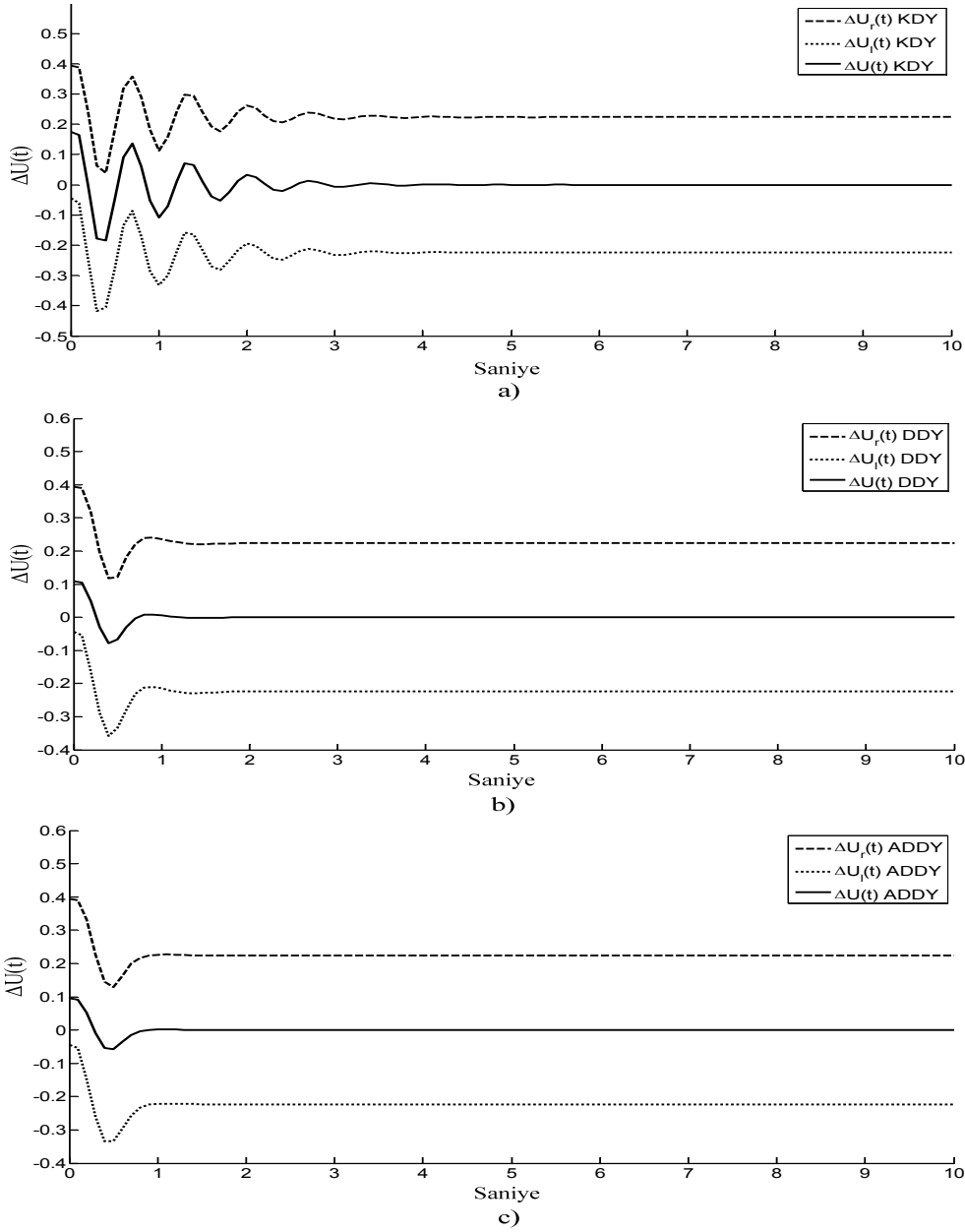
b)



c)

Şekil 5.9 : a) Nominal sistem için birim basamak yanıtları b) kontrol işaretleri c) α parametresinin değişimi.

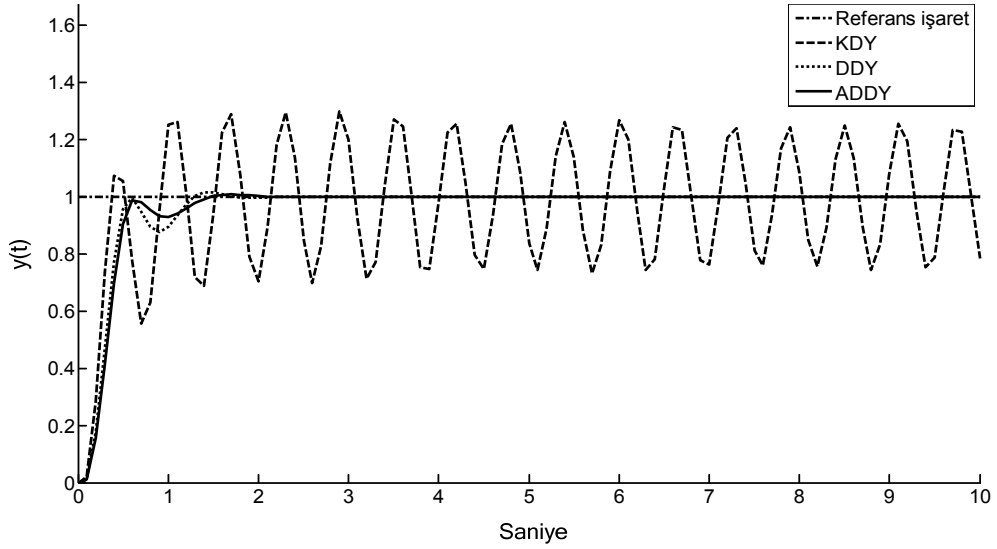
Tip indirgeme işleminden sonra elde edilen kontrol işareti aralıkları ve durulama yöntemleri ile elde edilen durulanmış kontrolör çıkışları Şekil 5.10' da gösterilmiştir.



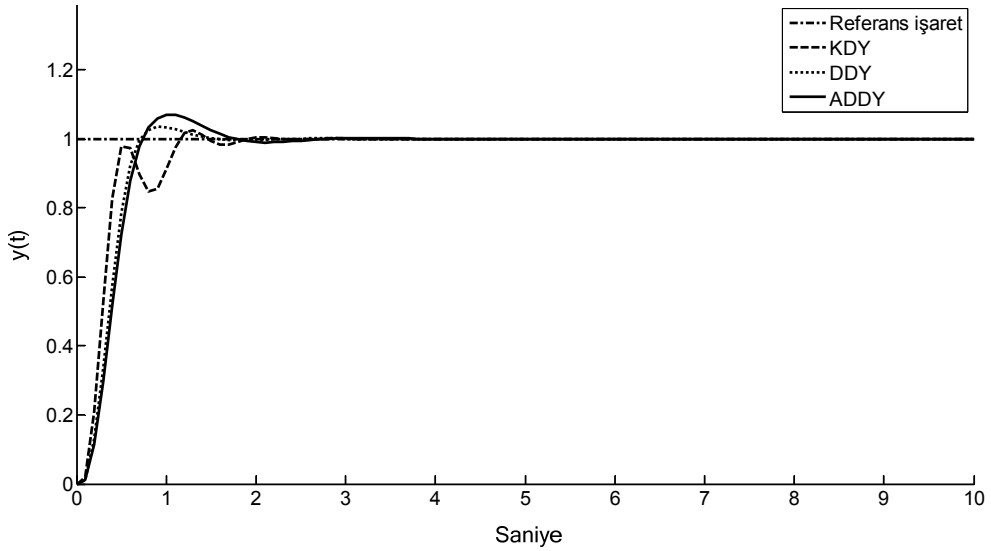
Şekil 5.10 : a) KDY b) DDY ve c) ADDY için tip indirgeme işleminden sonra elde edilen kontrol işareti aralıkları ve durulanmış çıkış işaretleri.

Şekil 5.9' dan görüldüğü gibi nominal sistem için bulanık kontrolörde DDY kullanılması durumunda KDY kullanılması durumuna göre sistem başarımı önemli ölçüde iyileştirilmiştir. En iyi sistem yanıtı ise ADDY kullanılması durumunda elde edilmiştir. ADDY' nin sahip olduğu ek ayar parametreleri ile sistem başarımı DDY' ne göre daha çok iyileştirilebilmektedir.

Sistem parametre değeri b nominal değerinden $b=0.6$ ve $b=0.4$ değerine değişmesi durumunda elde edilen basamak yanıtları sırasıyla Şekil 5.11 ve Şekil 5.12' de gösterilmiştir.



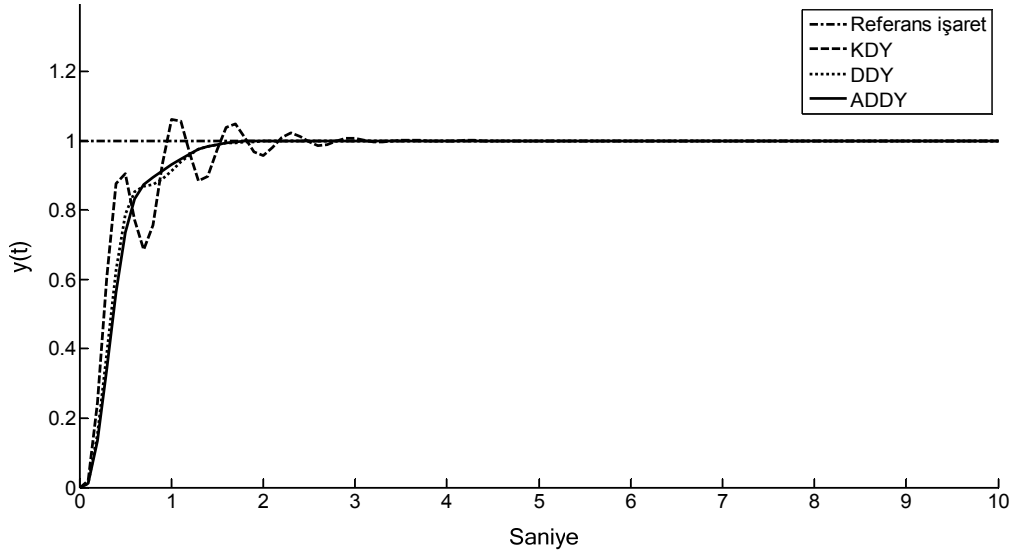
Şekil 5.11 : $a=0.9$, $b=0.6$ için elde edilen sistem birim basamak yanıtları.



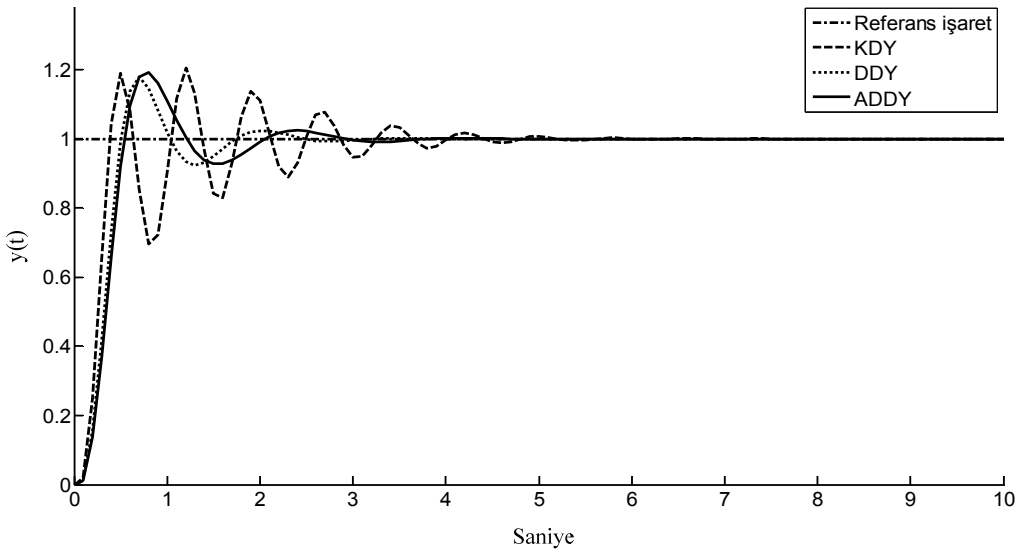
Şekil 5.12 : $a=0.9$, $b=0.4$ için elde edilen sistem birim basamak yanıtları.

Şekil 5.11' den görüldüğü gibi $b=0.6$ parametre değişimi durumunda KDY ile elde edilen sistem yanıtı kararsızlık sınırındadır. Önerilen dinamik durulama yöntemleri ile elde edilen sistem yanıtlarının başarımı ise bu parametre değişimine bağlı olarak minör seviyede bir kötüleşme göstermiş ve istenen referans değere hızlı bir şekilde yerleşmiştir. Diğer taraftan $b=0.4$ parametre değişimi durumunda ise en iyi sistem yanıtı DDY ile elde edilmiştir. ADDY ile daha hızlı bir sistem yanıtı sağlandığı için DDY' ne göre daha aşımli bir sistem yanıtı elde edilmiştir.

Sistem parametre değeri a nominal değerinden $a=0.8$ ve $a=1$ değerine değişmesi durumunda elde edilen basamak yanıtları sırasıyla Şekil 5.13 ve Şekil 5.14' de gösterilmiştir.



Şekil 5.13 : $a=0.8$, $b=0.5$ için elde edilen sistem birim basamak yanıtları.



Şekil 5.14 : $a=1$, $b=0.5$ için elde edilen sistem birim basamak yanıtları.

Şekil 5.13 ve Şekil 5.14' ten görüldüğü gibi a sistem parametresi değişimlerine karşı klasik durulama yöntemi ile elde edilen sistem yanıtlarında ciddi salınımlar gözlenirken önerilen dinamik durulama yöntemleri ile elde edilen sistem yanıtlarının başarımı ve dayanıklılığı daha iyidir.

Son olarak bahsedilen parametre değişimlerine karşı elde edilen sistem yanıtlarının başarımlarının karşılaştırması Çizelge 5.3' te gösterilmiştir. Başarım değerlerinden görüldüğü gibi önerilen dinamik durulama yöntemleri ile KDY' ne göre daha üstün bir sistem başarımı elde edilmektedir. Ayrıca önerilen yöntemler ile parametre değişimlerine karşı sistem dayanıklılığı da arttırılmaktadır.

Çizelge 5.3: Doğrusal olmayan sistem için başarımlar karşılaştırma sonuçları.

Parametreler		tr (s)			ts (s) ($\pm 2\%$)			ÜA%		
a	b	KDY	DDY	ADDY	KDY	DDY	ADDY	KDY	DDY	ADDY
0.9	0.5	0.2	0.3	0.3	2.5	1.3	0.7	12	0	1.4
0.9	0.6	X	0.3	0.3	X	1.3	1.3	X	0	0
0.9	0.4	0.3	0.4	0.4	1.4	1.2	1.6	0	3.5	7
0.8	0.5	0.7	0.8	0.8	2.4	1.4	1.4	6.2	0	0
1	0.5	0.2	0.3	0.3	3.9	2.2	2.6	19	17.9	19.2

X: Kararlı değil

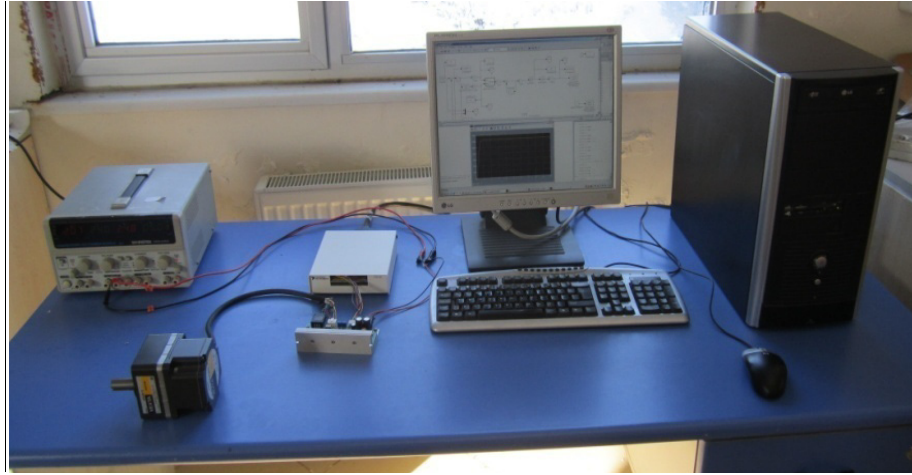
6. GERÇEK ZAMANLI KONTROL UYGULAMALARI

6.1 Giriş

Bu bölümde ilk olarak dinamik durulama yönteminin daha önce benzetim çalışmaları ile gösterilen etkinliği gerçek zamanlı bir kontrol uygulaması ile deneysel olarak gösterilmiştir. Daha sonra granüler üyelik fonksiyonlarının tip-2 bulanık kontrolör tasarımında kullanılması gösterilmiş ve tasarlanan bu kontrolör ile gerçek zamanlı kontrol uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

6.2 Test Düzeneği

Bu çalışmada gerçek zamanlı kontrol uygulamaları için kullanılan test düzeneği Şekil 6.1’ de gösterilmiştir. Burada 100W gücünde bir fırçasız doğru akım motoru, redüktörü, sürücüsü, veri toplama kartı ve bir masaüstü bilgisayar mevcuttur.



Şekil 6.1 : Test düzeneği.

Motor 2500 d/d nominal dönüş hızına sahip olup bu dönüş hızı sürücüye verilen 0-5VDC referans gerilimi ile kontrol edilmektedir. Sürücü motordan gelen enkoder bilgisini değerlendirerek kendi içindeki düşük seviye kontrol ile motor hızının giriş gerilimine karşılık gelen referans hız değerine ulaşmasını sağlamaktadır. Burada motor ve sürücüyü tek bir sistem olarak düşündüğümüzde sistem adına ulaşılabilir tek değer enkoderden okunan motor dönüş hızı bilgisidir. Bunun dışında motor ve

sürücü modelleri hakkında elimizde herhangi bir bilgi mevcut değildir. Bu sistemde motor dönüş hızını istenen referans hız değerine ulaştıracak kapalı çevrim bir bulanık kontrol sistemi tasarlanmıştır. Burada enkoderden gelen motor hız bilgisini okumak ve sistem girişine uygulanması gereken 0-5VDC kontrol işaretini elde etmek için NI-6229 veri toplama kartı kullanılmıştır.

6.3 PD Tipi Ağırlıklandırılmalı Dinamik Durulama Yönteminin Uygulanması

Bu çalışmada benzetim çalışmaları ile etkinliği gösterilmiş dinamik durulama yönteminin gerçek sistem üzerinde test edilmesi gösterilmiştir. Dinamik durulama yönteminde parametreden bağımsız eşit ağırlıklandırma kullanılması durumu DDY olarak ve parametrelerin ayarlanabildiği PD tipi ağırlıklandırılma kullanılması durumu ise ADDY olarak adlandırılmıştır. Elde edilen sonuçlar klasik durulama yöntemi kullanılması durumu ile karşılaştırılmıştır. Her üç yöntemin etkinliği nominal çalışma durumu dışında sisteme bozucu etkimesi ve sistem parametre belirsizliğinin olması durumu için ayrı ayrı değerlendirilmiştir.

6.3.1 PI tip-2 bulanık kontrolör tasarımı

Burada benzetim çalışmalarında kullanılan PI aralık tip-2 bulanık mantık kontrolör aynen kullanılmıştır. Sadece sonuç tekil tip üyelik fonksiyonlarının merkez değerleri $[-0.6, 0, 0.6]$ yerine $[-0.8, 0, 0.8]$ olarak seçilmiştir. Kontrol uygulaması MATLAB Real-time workshop toolbox kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örneklem zamanı 0.1s ve sistem yanıtının yerleşme kriteri referans değerinin %2' si olarak seçilmiştir.

6.3.1.1 Sistemin modellenmesi

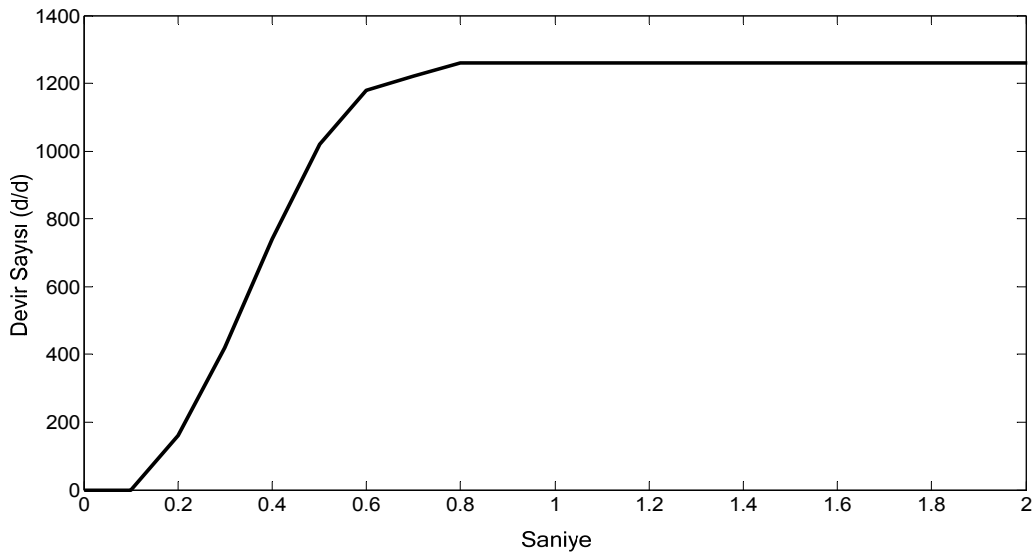
Doğru akım motorlarının genel transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n + \omega_n^2} e^{-Ls} \quad (6.1)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada K sistem kazancı, ω_n doğal frekans, ζ sönüm oranı ve L ölü zamandır. Fakat bu uygulama için unutulmaması gereken nokta, sistem motor ve sürücünden oluştuğundan ve sürücüde bir kontrol yapısı kullanıldığından toplam sistemin modeli yukarıda belirtilen genel transfer fonksiyonunu sağlamayacaktır. Bilindiği gibi bulanık mantığın en önemli özelliği

sistem modeline ihtiyaç duymamasıdır. Fakat kontrol tasarımında ölçekleme çarpanlarının seçimi ve üyelik fonksiyonlarının ayarlanması için yaklaşık bir modelin olması kolaylık sağlamaktadır. Böylece sistem üzerinde deneme yanılma sonucunda ortaya çıkabilecek problemler ve zaman kaybı önlenmiş olmaktadır. Bu yüzden burada (6.1) ile gösterilen ikinci dereceden ölü zamanlı sistem modeli kullanılarak yaklaşık bir sistem modeli elde edilmiştir.

Sistem model parametrelerini elde etmek için sistem girişine 2VDC giriş gerilimi uygulanmış ve elde edilen motor dönüş hızını gösterir sistem yanıtı Şekil 6.2’ de gösterilmiştir. Bu hız değeri sistemin çalışma hız değeri olarak belirlenmiştir.

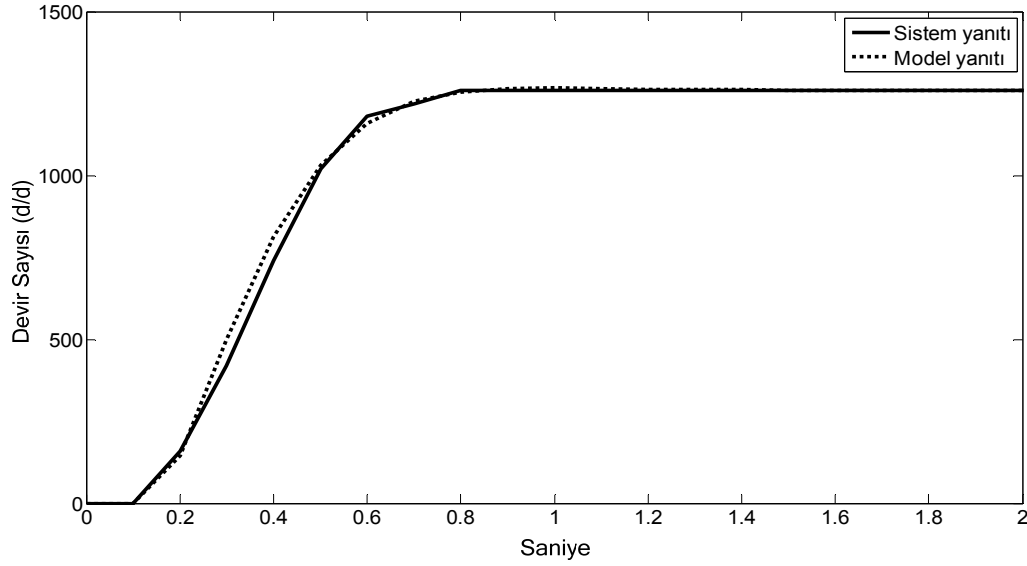


Şekil 6.2 : 2VDC referans giriş gerilimine karşı elde edilen sistem yanıtı.

Şekil 6.2’ den görüldüğü gibi sistem girişine 2VDC değerinde giriş gerilimi uygulandığında motor dönüş hızı 1260 d/d değerinde olmaktadır. Ayrıca sistem yanıtında $L=0.1s$ değerinde bir ölü zaman mevcuttur. Sistem açık çevrim yanıtına bağlı olarak genel ikinci dereceden doğrusal sistem modelleme yöntemi kullanılarak transfer fonksiyonunun parametreleri $K=630$, $\omega_n = 7$, $\zeta = 0.8571$ ve $L=0.1$ olarak hesaplanır. Bu durumda sistemin yaklaşık transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{630 \cdot 49}{s^2 + 12s + 49} e^{-0.1s} \quad (6.2)$$

şeklinde elde edilir. Bu nominal sistem modelidir. Elde edilen sistem modeli ile gerçek sistem yanıtının karşılaştırılması Şekil 6.3’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.3 : Sistem ve model yanıtlarının karşılaştırılması.

Şekil 6.3’ ten görüldüğü gibi belirlenen parametreler ile benzer sistem dinamiklerini gösteren yaklaşık sistem modeli elde edilmiş olmaktadır.

6.3.1.2 Bulanık kontrolörün ölçekleme çarpanlarının seçimi

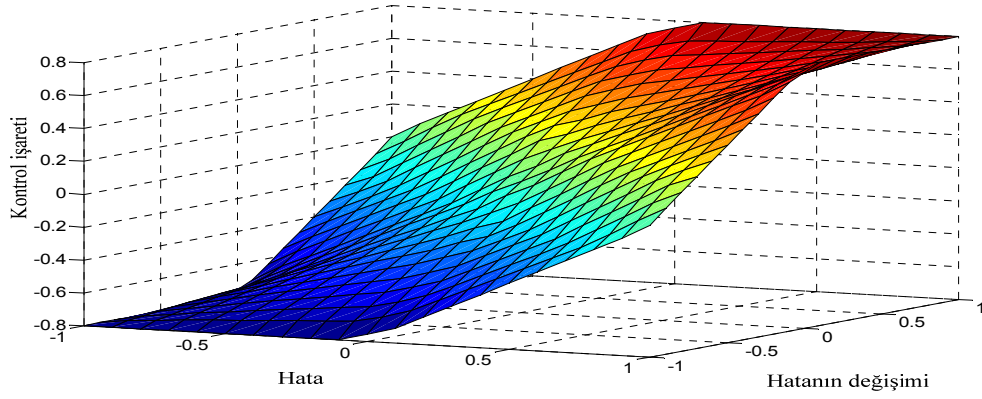
Belirlenen sistem modeli üzerinde benzetim çalışmaları yapılarak deneme yanılma yöntemi ile PI aralık tip-2 bulanık kontrolörün ölçekleme çarpanları belirlenmiş ve gerçek sisteme uygulanarak minör iyileştirmeler yapılmıştır. Sonuç olarak geleneksel durulama yönteminin kullanılması durumu için az aşımli bir sistem yanıtı elde edilecek şekilde ölçekleme çarpanları $\gamma_e = 0.6$, $\gamma_{\Delta e} = 0.1$ ve $\gamma_{\Delta u} = 1$ şeklinde belirlenmiştir. Bu ölçekleme çarpanları sabit tutularak gerçek sistem üzerinde karşılaştırmalar yapılmıştır.

6.3.1.3 PD Tipi ağırlıklandırılmalı dinamik durulama yöntemi parametrelerinin seçimi

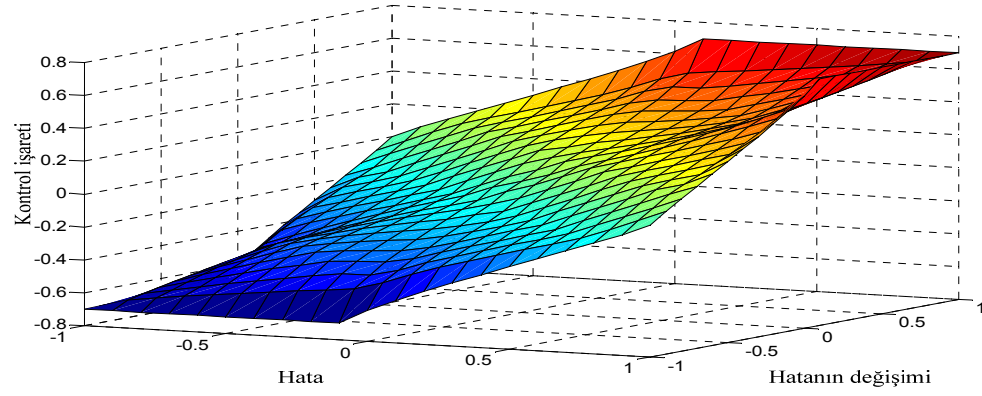
Kontrolörün ölçekleme çarpanları KDY kullanılması durumu için belirlendiğinden DDY kullanıldığında sistem yanıtı beklenildiği ölçüde hızlı olmamaktadır. Bunun için ADDY kullanılarak sistem yanıtı hızlandırılabilir. ADDY için ağırlıklandırma değerleri $K_e = 0.4$ ve $K_{\Delta e} = 0.7$ şeklinde belirlenmiştir.

6.3.1.4 Tasarlanan bulanık kontrolörlerin kontrol yüzeyleri

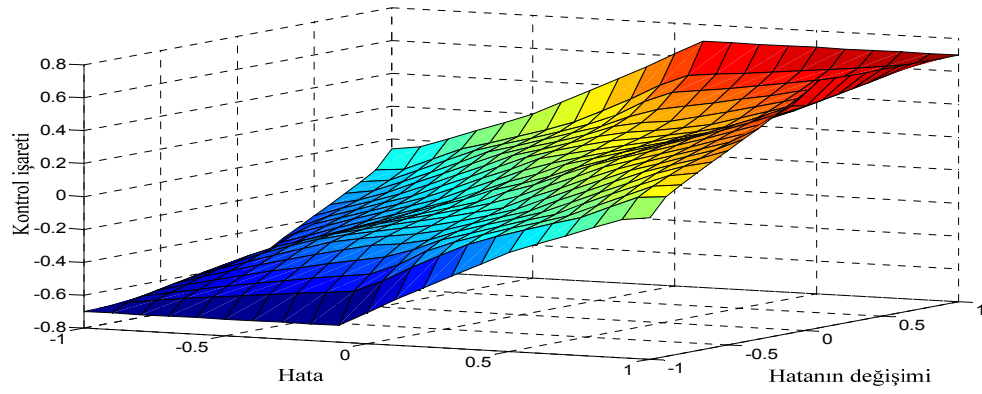
KDY, DDY ve ADDY kullanan bulanık kontrolörlerin sahip oldukları kontrol yüzeyleri Şekil 6.4’ de gösterilmiştir.



a)



b)



c)

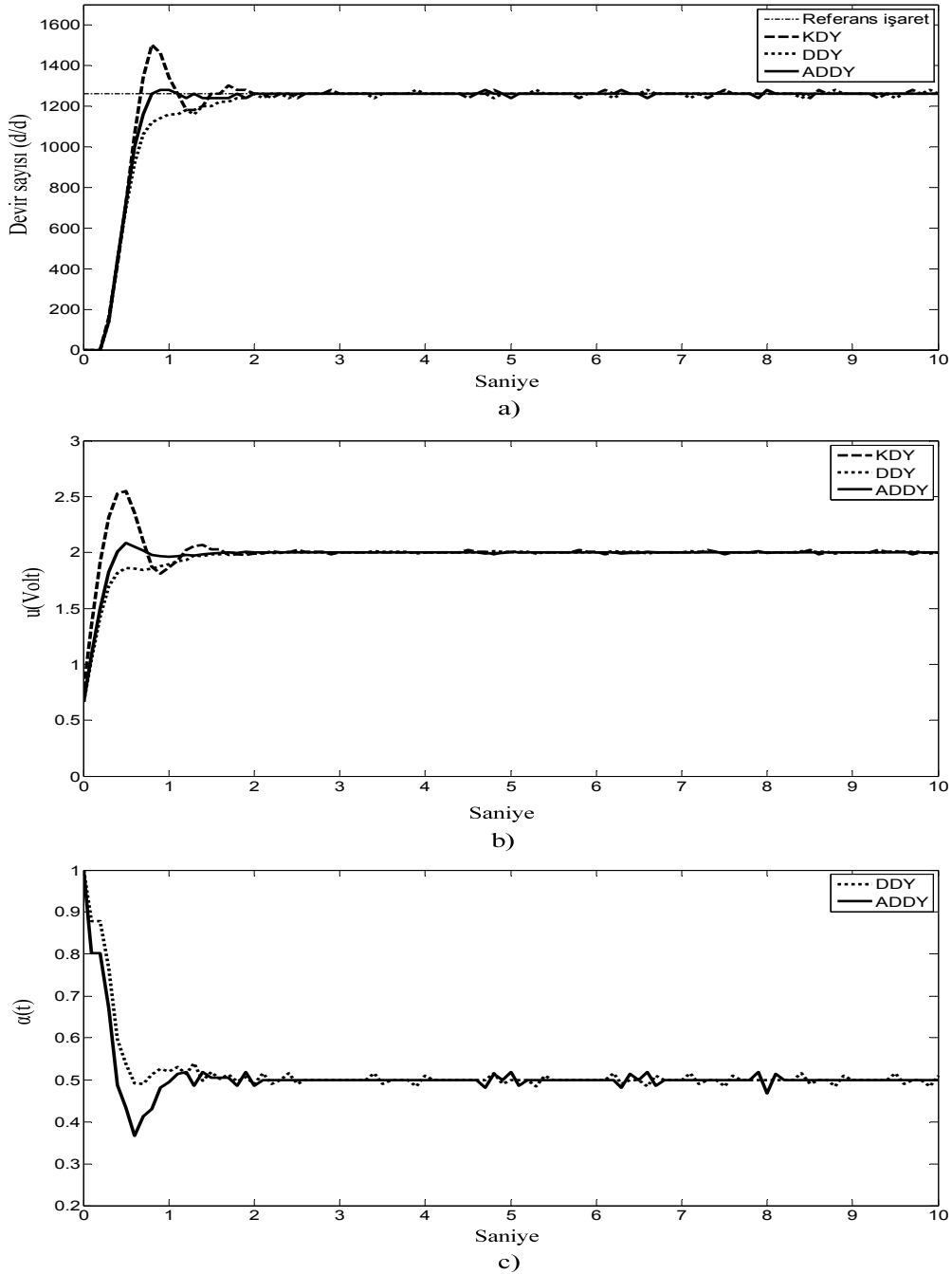
Şekil 6.4 : a) KDDY b) DDDY ve c) ADDY kullanılan bulanık kontrolörün kontrol yüzeyleri.

Şekil 6.4' ten görüldüğü gibi hata ve hatanın değişimi değerlerinin sıfıra yakın olduğu bölgede DDDY ve ADDY' nin kontrol yüzeyleri ile KDDY' nin kontrol yüzeyi birbirine oldukça benzemektedir. Fakat hata ve hatanın değişimi değerlerinin büyük olduğu ve geçici hal cevabına karşılık gelen diğer bölgelerde DDDY ve ADDY kontrol yüzeyleri KDDY kontrol yüzeyine göre daha doğrusal olmayan bir yapıdadır.

6.3.2 Dinamik durulama yöntemi için gerçek zamanlı uygulama sonuçları

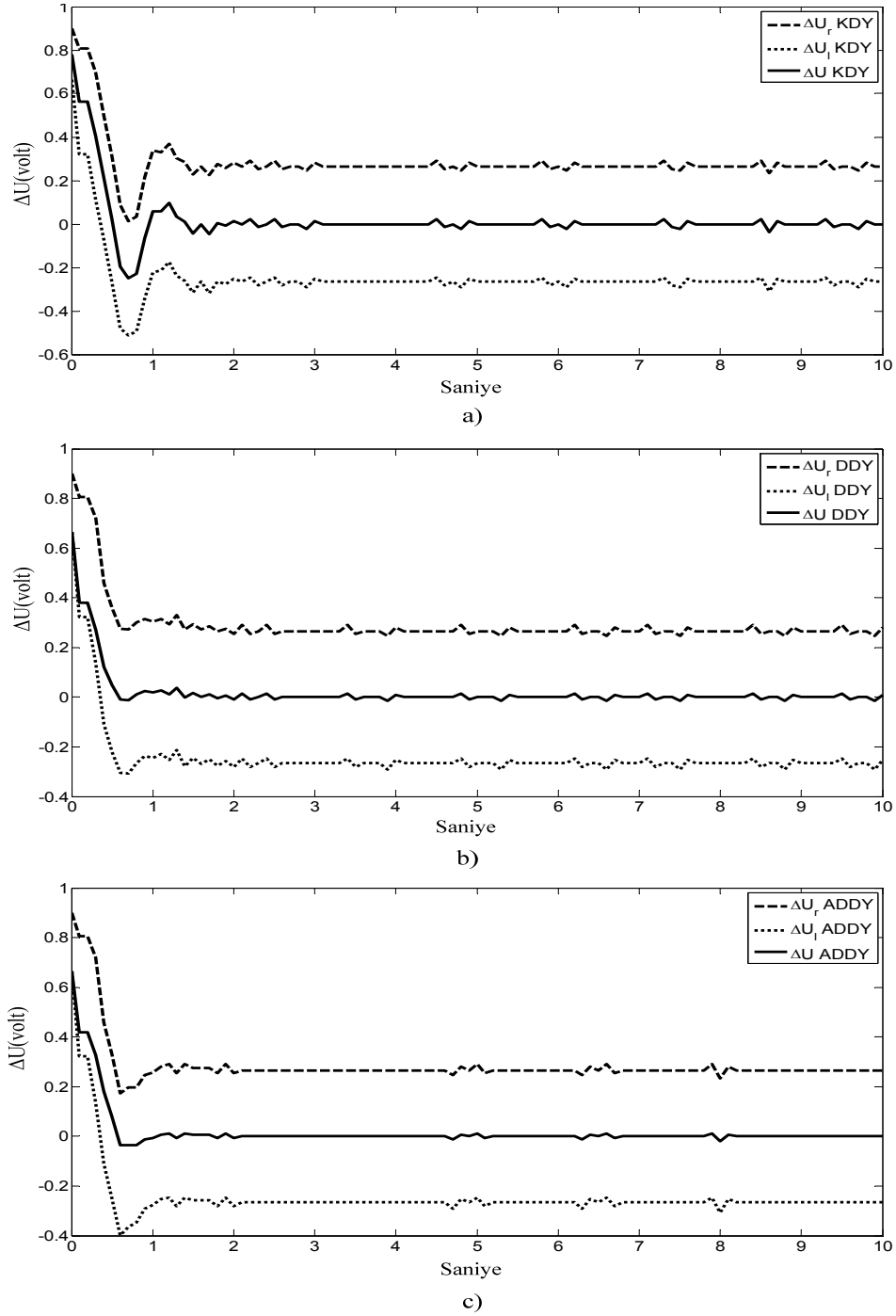
6.3.2.1 Nominal sistem için uygulama sonuçları

Nominal durumda 1260 d/d referans değerine karşı KDY, DDY ve ADDY' nin kullanılması durumunda elde edilen sistem yanıtları, kontrol işaretleri ve α değerinin değişimleri Şekil 6.5' de gösterilmiştir.



Şekil 6.5 : Nominal sistem için a) basamak yanıtları b) uygulanan kontrol işaretleri c) α değerinin değişimi.

Tip indirgeme işleminden sonra elde edilen kontrol işareti aralıkları ve durulama yöntemleri ile elde edilen durulanmış kontrolör çıkışları Şekil 6.6’ da gösterilmiştir.



Şekil 6.6 : a) KDY b) DDY ve c) ADDY için tip indirgeme işleminden sonra elde edilen kontrol işareti aralıkları ve durulanmış kontrolör çıkışları.

Şekil 6.5’ ten görüldüğü gibi KDY’ nin kullanıldığı bulanık kontrolörde DDY kullanıldığında yavaş bir sistem yanıtı elde edilmektedir. Bu beklenen bir sonuçtur çünkü ölçekleme çarpanları KDY kullanıldığı durum için belirlenmiştir. ADDY

kullanıldığı durumda ise daha uygun seçilen α değerlerine bağlı olarak sistem başarımı büyük ölçüde iyileştirilmiştir.

DDY ve ADDY' nin iyileştirici etkisi Şekil 6.5c' deki α değeri değişimlerinde açıkça görülmektedir. Özellikle ADDY α değerinin değişimi incelendiğinde, α değeri ilk olarak [0.5, 1] aralığında değişmekte (yani tip indirgenmiş çıkışın minimum değerine yakın olmakta) ve böylece aşım neden olan hızlı sistem yanıtı yavaşlatılmaktadır. Daha sonra α değeri [0, 0.5] aralığında değişerek (yani tip indirgenmiş çıkışın maksimum değerine daha yakın olmakta) sistem yanıtı referans değere yerleşmekte ve negatif aşım önlenmektedir.

Belirtilen yöntemlerin kullanılması durumunda ortaya çıkan sistem yanıtı başarımları Çizelge 6.1' de gösterilmiştir. Burada 630 olan nominal sistem kazanç değeri K olarak belirtilmiştir.

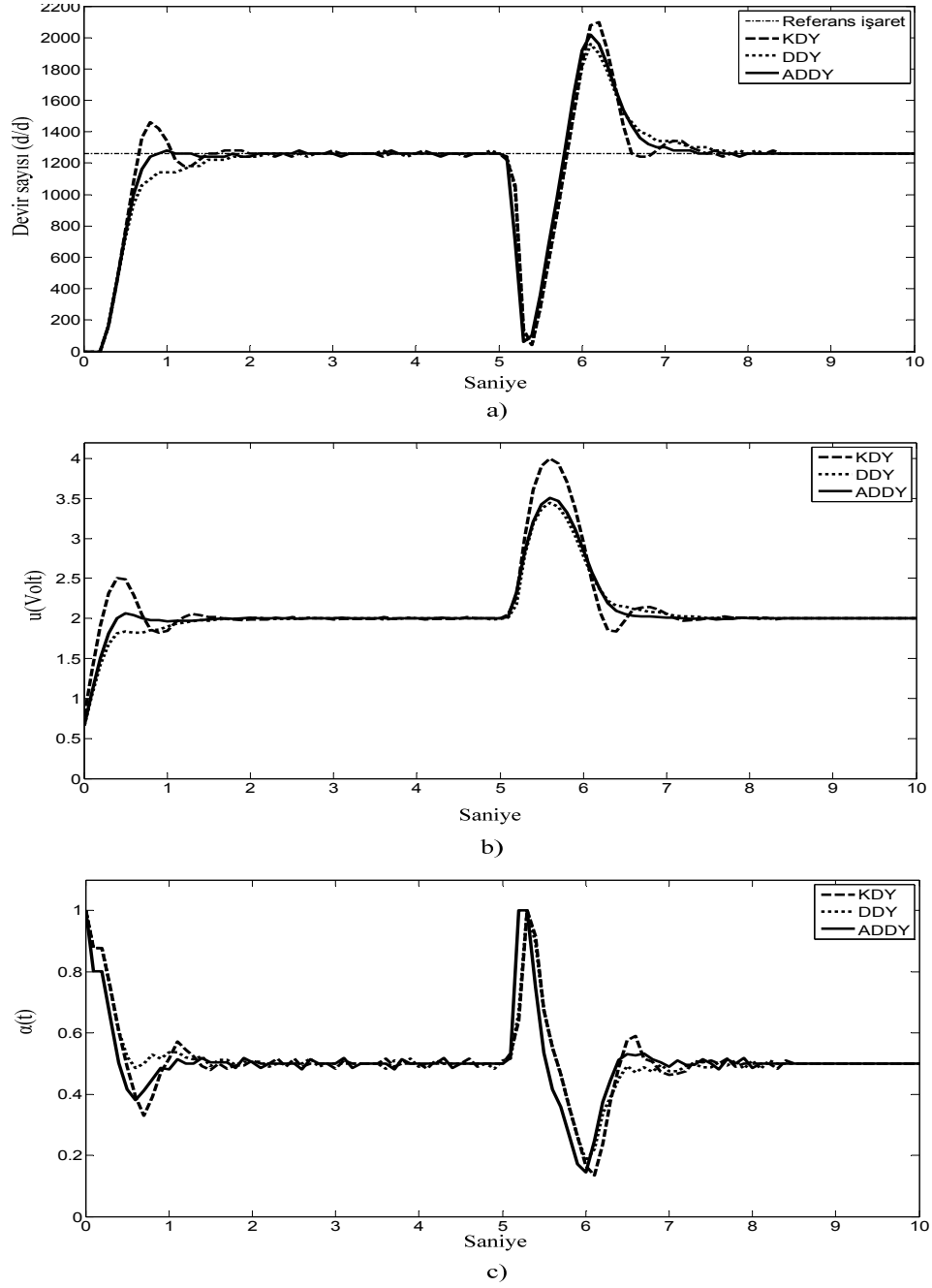
Çizelge 6.1: Nominal durum için elde edilen başarımları değerleri.

Parametreler		tr (s)			ts (s) ($\pm 2\%$)			ÜA%		
K	L	KDY	DDY	ADDY	KDY	DDY	ADDY	KDY	DDY	ADDY
K	0.1	0.3	0.4	0.6	1.8	1.8	0.8	19	0	0

Bulanık kontrolörlerin bozucu etkisine ve sistem parametre değişimlerine karşı duyarlılığı aşağıdaki bölümlerde ayrı ayrı incelenmiştir.

6.3.2.2 Bozuculara karşı kontrolör başarımlarının incelenmesi

Bulanık kontrolörlerin bozuculara karşı başarımlarını incelemek için motor miline mekanik yük uygulanmıştır. Motor mili $t=5s$ anında mekanik olarak tamamen frenlenerek serbest bırakılmıştır. Bu bozucu durumu altında elde edilen sistem yanıtları, kontrol işaretleri ve α değerinin değişimleri Şekil 6.7' de gösterilmiştir.



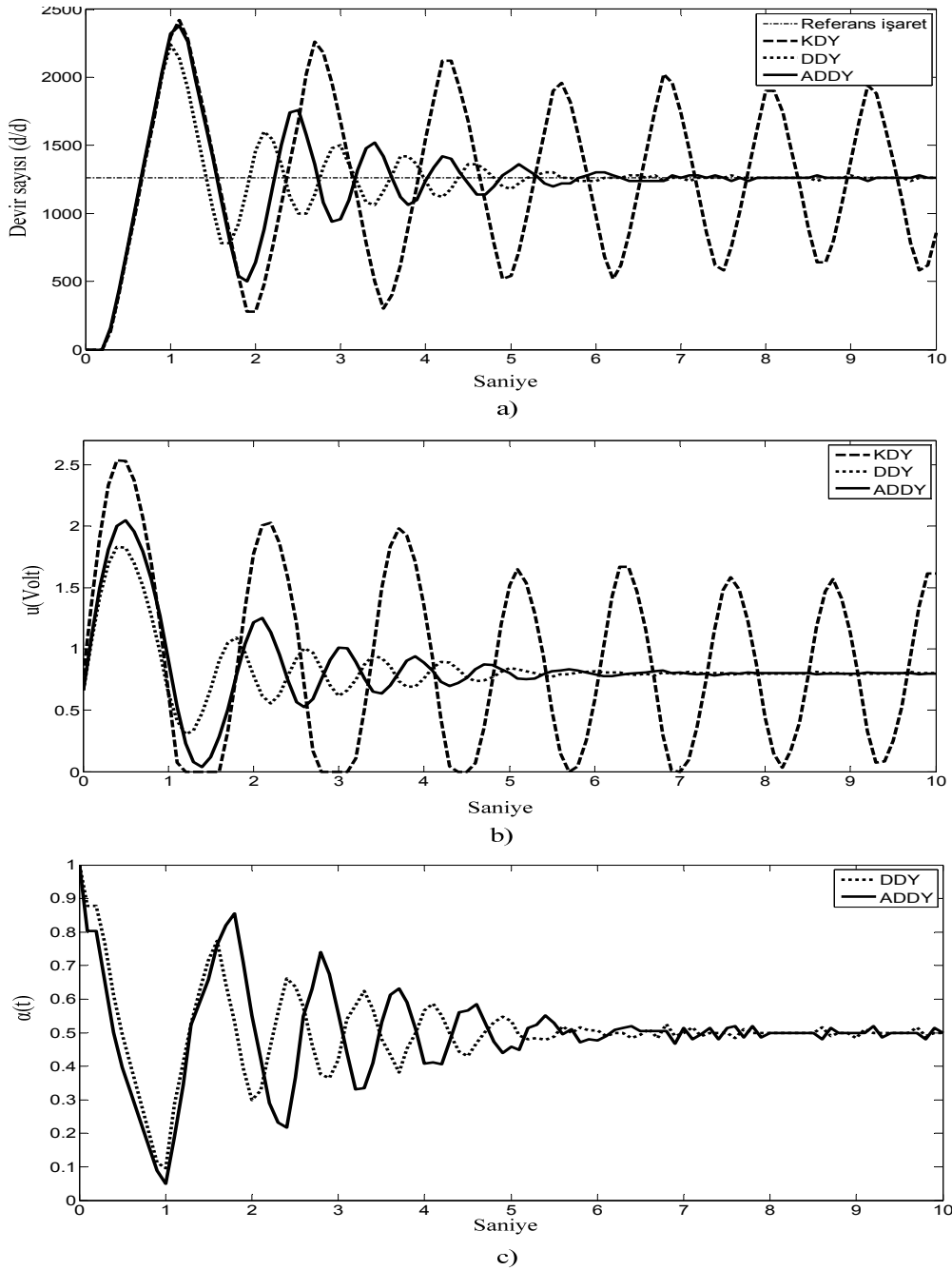
Şekil 6.7 : Bozucu durumda elde edilen a) basamak yanıtları b) uygulanan kontrol işaretleri c) α değerinin değişimi.

Sistem yanıtlarından görüldüğü gibi bozucu etkisine karşı DDY ile KDY kullanılması durumuna göre daha aşırı bir yanıt elde edilmektedir. Diğer taraftan DDY ile elde edilen sistem yanıtında yerleşme zamanı değeri KDY ile elde edilen sistem yanıtının yerleşme zamanı değerinden daha uzundur. ADDY yöntemi kullanılması durumunda ise elde edilen sistem yanıtının başarımı hem aşım değeri hem de yerleşme zamanı değeri açısından KDY ile elde edilen sistem yanıtının başarımından daha iyidir.

6.3.2.3 Parametre belirsizliklerine karşı kontrolör başarımlarının incelenmesi

Önerilen dinamik durulama yöntemlerinin sistem parametre belirsizliği durumunda sistem dayanıklılığı üzerine etkisini göstermek için K sistem kazanç değerinin ve L sistem ölü zaman değerinin değiştiği durumlar incelenmiştir.

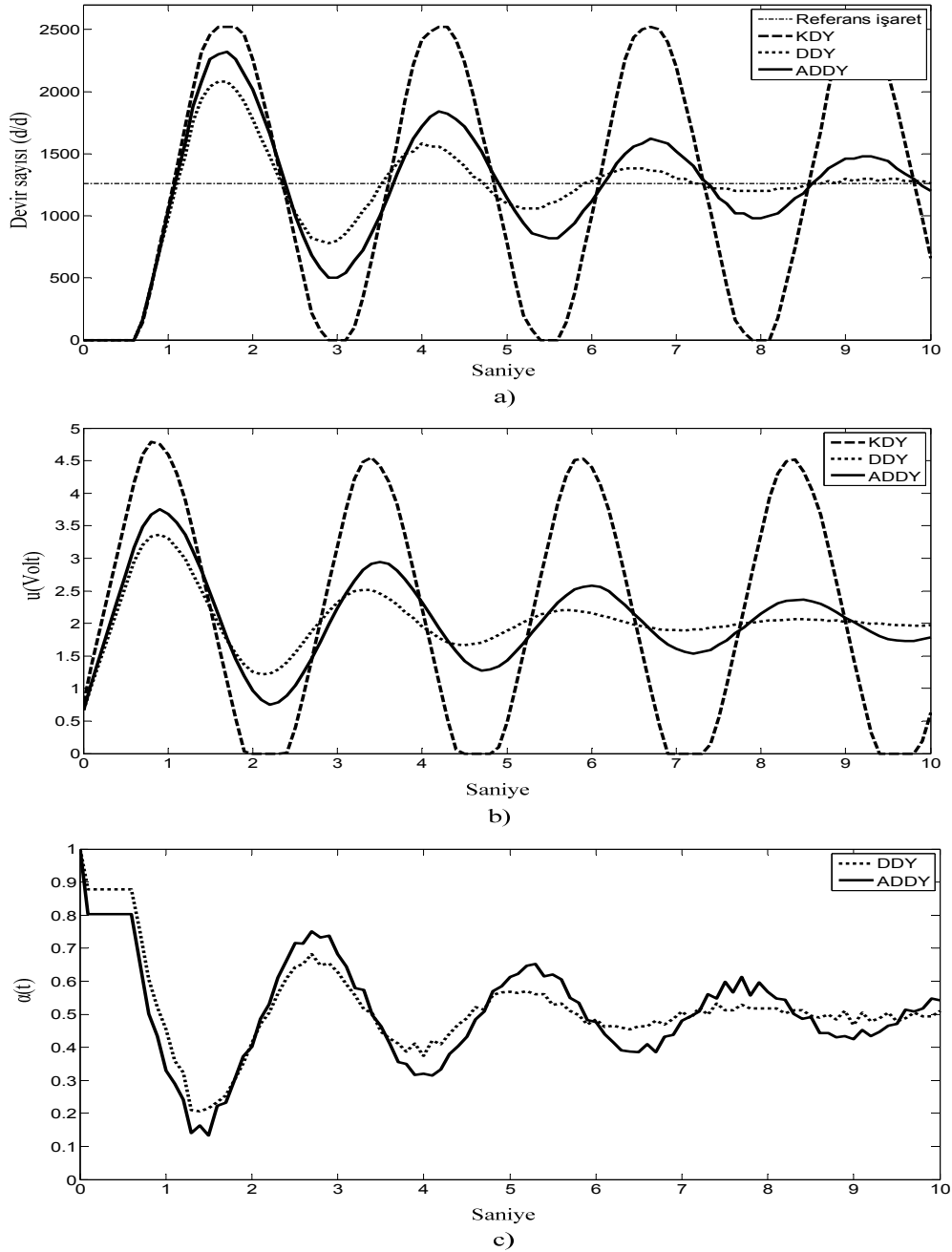
K sistem kazancının 2.5 katına çıkması durumunda elde edilen sistem yanıtları, kontrol işaretleri ve α değerinin değişimleri Şekil 6.8’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.8 : Kazanç değerinin 2.5 katına çıkması durumunda elde edilen a) basamak yanıtları b) uygulanan kontrol işaretleri c) α değerinin değişimi.

Şekil 6.8’deki sistem yanıtlarından açıkça görüldüğü gibi bu kazanç değerinde KDY ile elde edilen sistem yanıtı kararsızlık sınırındadır. Diğer taraftan DDY ve ADDY kullanılması durumunda elde edilen sistem yanıtları ise kararlılıklarını korumaktadır.

Sistem ölü zaman değeri değişiminin bulanık kontrolör başarımı üzerindeki etkisini incelemek için kontrol işareti sisteme geciktirilerek uygulanmıştır. Sistem ölü zaman değeri $L=0.5s$ olması durumunda elde edilen sistem yanıtları, kontrol işaretleri ve α değerinin değişimleri Şekil 6.9’da gösterilmiştir.



Şekil 6.9 : $L=0.5s$ olması durumunda elde edilen a) basamak yanıtları b) uygulanan kontrol işaretleri c) α değerinin değişimi.

Şekil 6.9’ dan görüldüğü gibi $L=0.5s$ olması durumunda KDY kullanan bulanık kontrolör ile sistem yanıtı kararsızlık sınırında olmaktadır. Önerilen DDY ve ADDY kullanan bulanık kontrolörler ile elde edilen sistem yanıtları ise kararlılığını korumaktadır.

Sistem kazanç değeri ve ölü zaman değerinin değişimi durumunda kullanılan durulama yöntemlerine bağlı olarak elde edilen sistem yanıtlarının başarımlarları Çizelge 6.2’ de karşılaştırılmıştır.

Çizelge 6.2: Sistem parametre belirsizlikleri durumunda kontrolör başarımları.

Parametreler		tr (s)			ts (s) ($\pm 2\%$)			ÜA%		
K	L	KDY	DDY	ADDY	KDY	DDY	ADDY	KDY	DDY	ADDY
K	0.1	0.3	0.4	0.6	1.8	1.8	0.8	19	0	0
2.5K	0.1	0.3	0.3	0.3	X	5.5	6.1	92	77.7	88.8
K	0.5	0.3	0.3	0.3	X	9.7	14.2	100	65	84.1

X: Kararlı değil

Çizelge 6.2’ den görüldüğü gibi önerilen DDY ve ADDY kullanılması bulanık kontrolörün sistem parametre belirsizliklerine karşı dayanıklılığını iyileştirmektedir.

6.4 Granüler Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolörün Gerçek Zamanlı Uygulaması

Bu çalışmada granüler üyelik fonksiyonlarının bulanık kontrolör tasarımında kullanılması ve bulanık kontrolör başarımları üzerindeki iyileştirici etkisi gösterilmiştir. Burada granüler üyelik fonksiyonları kullanılarak tasarlanmış olan aralık tip-2 bulanık kontrolör Granüler Aralık Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolör (GAT2-BMK) olarak adlandırılmıştır. Girişinde süreksizlik içeren bir gerçek sistem üzerinde PI yapısında GAT2-BMK ile kontrol uygulaması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar PI yapısında klasik aralık tip-2 bulanık mantık kontrolör (KAT2-BMK) kullanılması durumu ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar nominal çalışma durumu dışında sisteme bozucu etkimesi ve sistem parametre belirsizliğinin olması durumu için de ayrı ayrı gösterilmiştir.

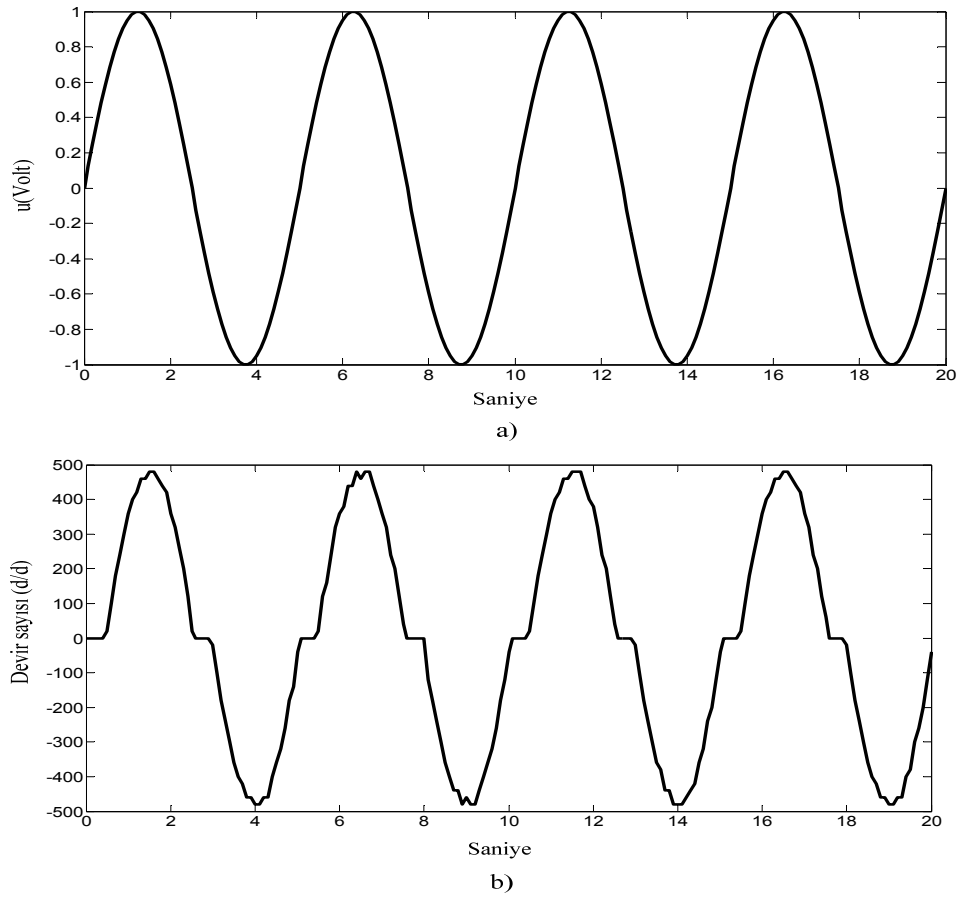
6.4.1 Granüler ve klasik tip-2 bulanık kontrolörlerin tasarımı

Kontrol uygulaması MATLAB Real-time workshop toolbox kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Örnekleme zamanı $0.1s$ ve sistem yanıtının yerleşme kriteri referans

değerin %2' si olarak seçilmiştir. Sistem girişinde bir süreksizlik yaratmak için sistem girişine 0.3V değerinde bir ölü bölge eklenmiştir.

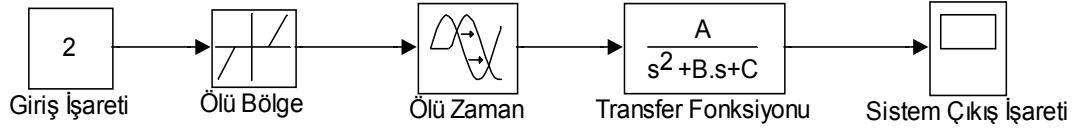
6.4.1.1 Sistemin modellenmesi

Sistem model parametrelerini elde etmek için sistem girişine genliği 1VDC ve frekansı 0.2 Hz olan sinüsoidal giriş gerilimi uygulanmış ve buna karşılık gelen motor dönüş hızı grafiği incelenmiştir. Sistem giriş işareti ve elde edilen sistem yanıt Şekil 6.10' da gösterilmiştir.



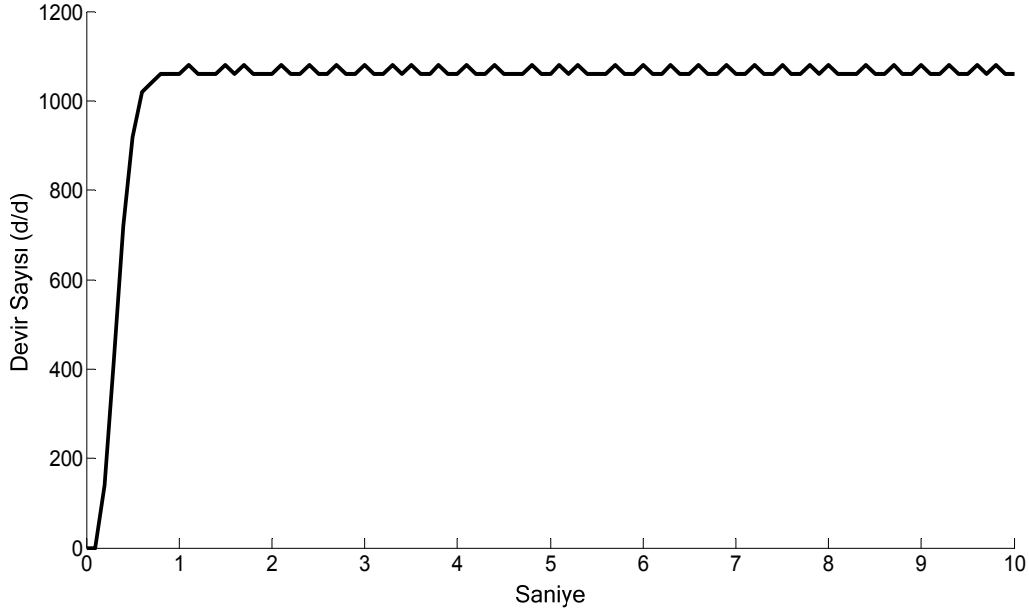
Şekil 6.10 : a) Sinüsoidal giriş işareti b) elde edilen motor devir sayısı.

Sistem yanıtından görüldüğü gibi sistem girişinde bir ölü bölge mevcuttur. Daha önceki testlerde sistemin $L=0, I_s$ ölü zaman değerine sahip olduğu bilinmektedir. Bu durumda giriş işaretinin hangi değerinden itibaren motorun dönmeye başladığı verilerden incelendiğinde ölü bölge değeri 0.3V olarak belirlenmektedir. Böylece sistem Şekil 6.11' de gösterildiği gibi girişinde ölü bölge bulunacak şekilde modellenebilir.



Şekil 6.11 : Sistem model blok şeması.

Bu çalışmada nominal çalışma hız değeri 2VDC giriş gerilime karşılık gelen 1260 d/d olarak seçilmiştir. Bu giriş değeri için elde edilen sistem yanıtı Şekil 6.12’ de gösterilmiştir.

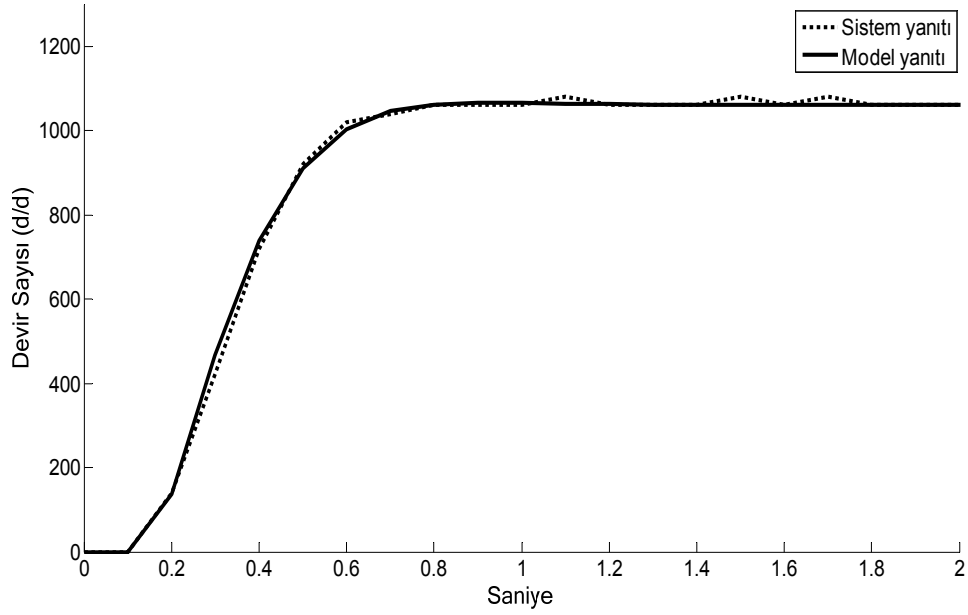


Şekil 6.12 : 2VDC referans giriş gerilimine karşı elde edilen sistem yanıtı.

Şekil 6.12’ den görüldüğü gibi sistem girişine 2VDC değerinde giriş gerilimi uygulandığında motor dönüş hızı 1260 d/d olması gerekirken sistemin sahip olduğu girişindeki ölü bölge değerine bağlı olarak 1060 d/d değerinde olmaktadır. Sistem deneme yanılma yöntemi kullanılarak Şekil 6.11’ de gösterildiği gibi modellendiğinde elde edilen model parametre değerleri $K = 624$, $\omega_n = 7.61$, $\zeta = 0.86$, $L = 0.1$ ve ölü bölge değeri $D = 0.3$ olarak belirlenmiştir. Bu durumda sistemin yaklaşık transfer fonksiyonu

$$G(s) = \frac{624 \cdot 58}{s^2 + 13.1s + 58} e^{-0.1s} \quad (6.3)$$

şeklinde elde edilir. Bu nominal sistem modelidir. Elde edilen sistem modeli ile gerçek sistem yanıtının karşılaştırılması Şekil 6.13’ te gösterilmiştir.



Şekil 6.13 : Sistem ve model yanıtlarının karşılaştırılması.

Şekil 6.13’ ten görüldüğü gibi belirlenen parametreler ile benzer sistem dinamiklerini gösteren yaklaşık sistem modeli elde edilmiş olmaktadır.

6.4.1.2 Kontrolör yapısının seçimi

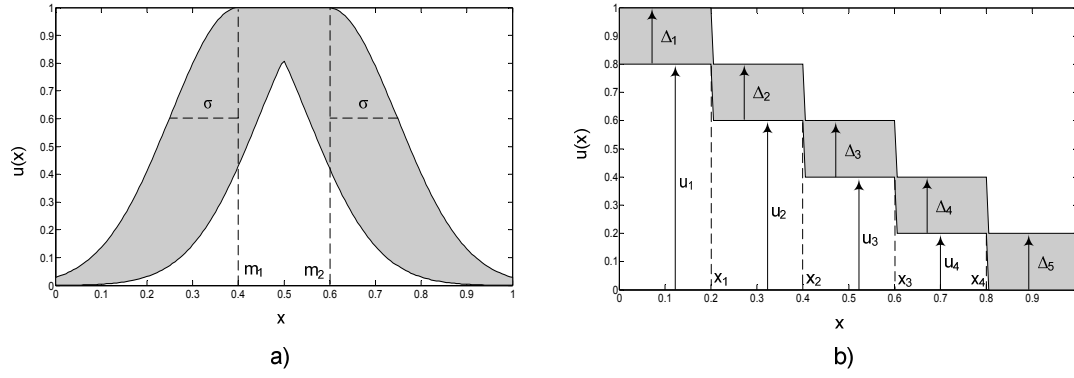
Tasarlanan bulanık kontrolörde TSK tipi çıkarım yöntemi kullanılmıştır. Kullanılan kural yapısı aşağıda gösterilmiştir

$$R^i : \text{EĞER } e \text{ } \tilde{F}_1^i \text{ ve } \Delta e \text{ } \tilde{F}_2^i \text{ ise O HALDE } y^i = c_0^i + c_1^i e + c_2^i \Delta e \text{ dir.} \quad (6.4)$$

Burada $i=1,...,N$ kural sayısı olmak üzere e ve Δe sırasıyla hata ve hatanın değişimini, $\tilde{F}$ aralık tip-2 bulanık kümeyi, y^i her bir kuralın sonuç fonksiyonu değerini ve c_j^i ise sonuç önermesindeki keskin parametreleri göstermektedir.

Bulanık kontrolörde (3.13) denkleminde gösterilen doğrudan durulama yöntemi kullanılmıştır.

Ortaya çıkacak kararlı hal hatalarını ortadan kaldırmak için kontrol stratejisi olarak PI kontrol yapısı tercih edilmiştir. KAT2-BMK tasarımında hata ve hatanın türevi girişleri için beşer adet Şekil 6.14a’ da gösterilen Gauss tipinde aralık tip-2 üyelik fonksiyonu kullanılmıştır.



Şekil 6.14 : a) Ortalaması belirsizlik içeren Gauss tipi aralık üyelik fonksiyonu b) 5 granülden oluşan granüler üyelik fonksiyonu.

Şekil 6.14a' dan görüldüğü gibi bu üyelik fonksiyonu için belirsiz ortalama parametreleri m_1, m_2 ve genişliği σ olmak üzere toplamda 3 ayarlama parametresi mevcuttur. Kural tablosu 25 adet kuraldan oluşmakta ve her bir kural çıkışı için üçer adet parametrenin belirlenmesi gerekmektedir.

Bu durumda 10 üyelik fonksiyonu için 30 parametre, 25 çıkış fonksiyonu için 75 parametre, tip indirgeme işleminde kullanılan ağırlıklandırmalar için 2 parametre ve giriş-çıkış ölçekleme çarpanları için 3 parametre olmak üzere toplamda 110 kontrolör parametresi mevcuttur.

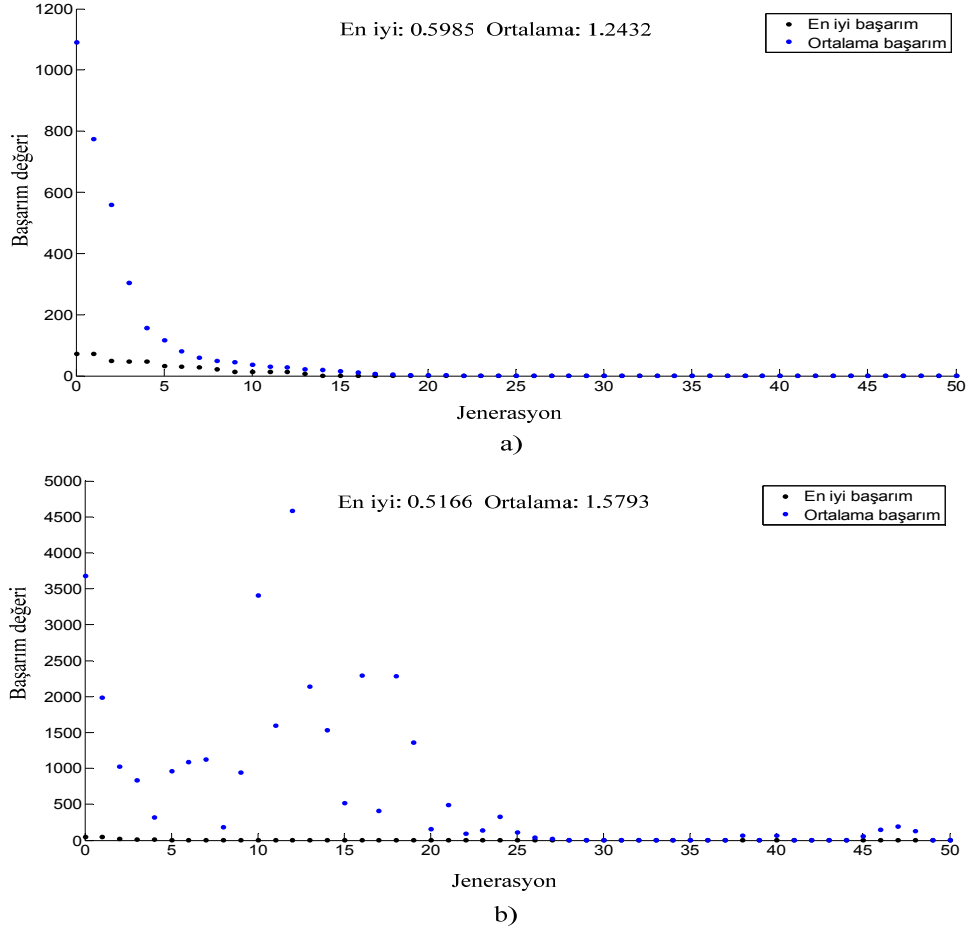
GAT2-BMK tasarımında hata ve hatanın türevi girişleri için Şekil 6.14b' de gösterilen beş granülden oluşan granüler aralık tip-2 üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Granüler üyelik fonksiyonlarının etkinliğini daha iyi göstermek için burada her bir giriş için beş yerine üç üyelik fonksiyonu kullanılmıştır. Bu durumda kural sayısı 9 olmaktadır.

Bu durumda 6 üyelik fonksiyonu için 84 parametre, 9 çıkış fonksiyonu için 27 parametre, tip indirgeme işleminde kullanılan ağırlıklandırmalar için 2 parametre ve giriş-çıkış ölçekleme çarpanları için 3 parametre olmak üzere toplamda 116 kontrolör parametresi mevcuttur.

Belirlenen sistem modeli kullanılarak her iki kontrolör için de benzetim ortamında kontrol parametreleri genetik algoritma kullanılarak belirlenmiştir. Başarım ölçütü olarak aşağıda belirtilen hatanın karesinin zaman ile çarpımının integrali (HKZİ) kullanılmıştır

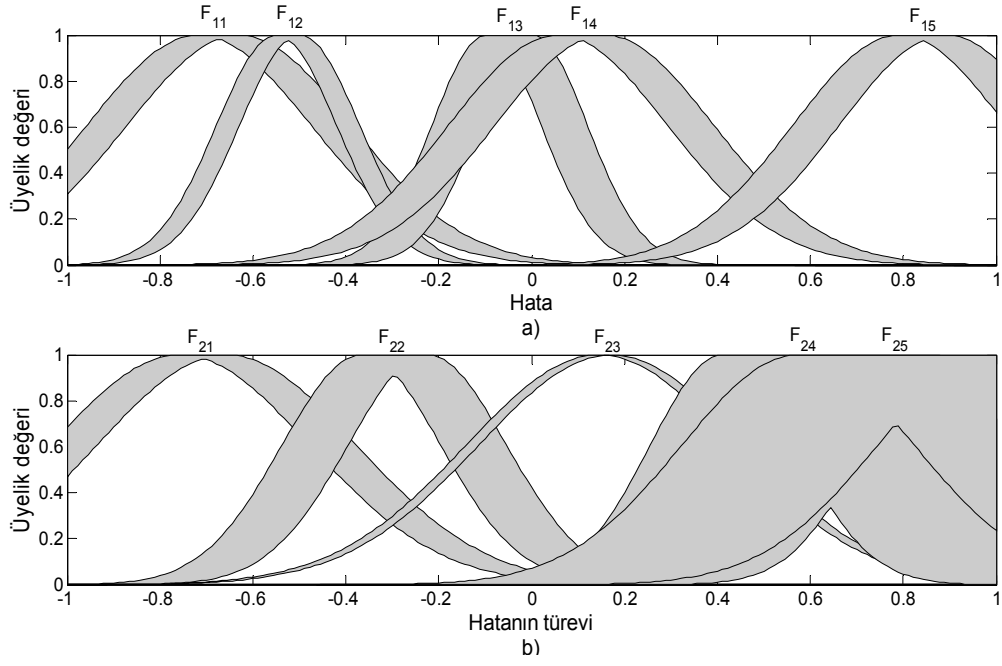
$$HKZI = \int_0^{10} e^2 t \, dt \quad (6.5)$$

KAT2-BMK ve GAT2-BMK için elde edilen genetik algoritma arama sonuçları sırasıyla Şekil 6.15a ve Şekil 6.15b' de gösterilmiştir.

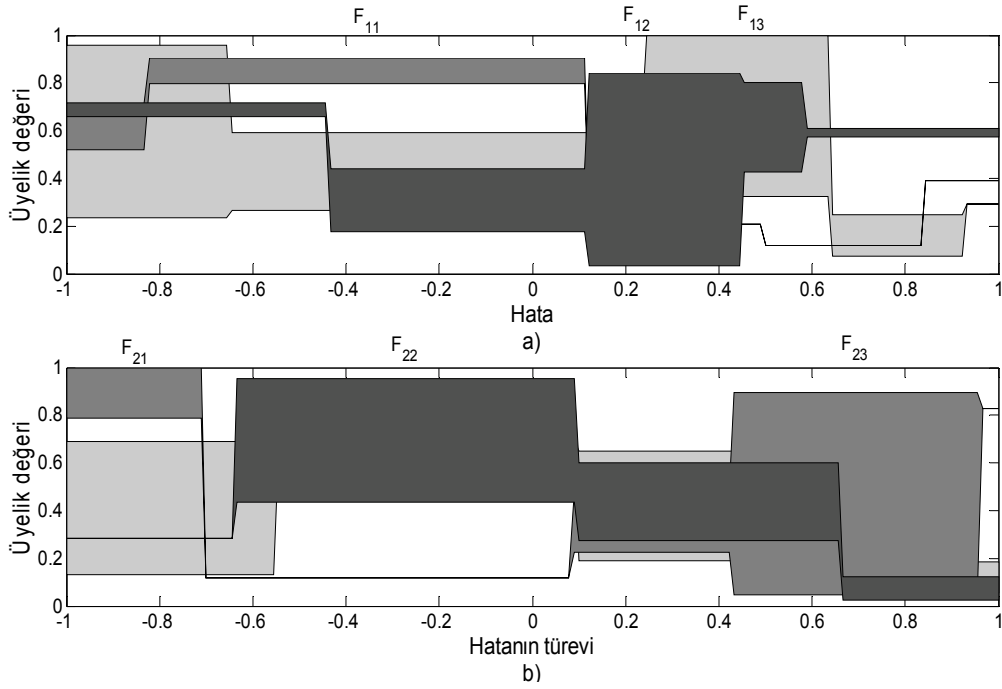


Şekil 6.15 : a) KAT2-BMK ve b) GAT2-BMK için elde edilen genetik algoritma arama sonuçları.

Şekil 6.15' den görüldüğü gibi GAT2-BMK için elde edilen başarımlar değeri KAT2-BMK için elde edilen değerden daha düşüktür. Arama sonucunda her iki kontrolör için ayarlanmış üyelik fonksiyonları Şekil 6.16 ve Şekil 6.17' de gösterilmiştir.



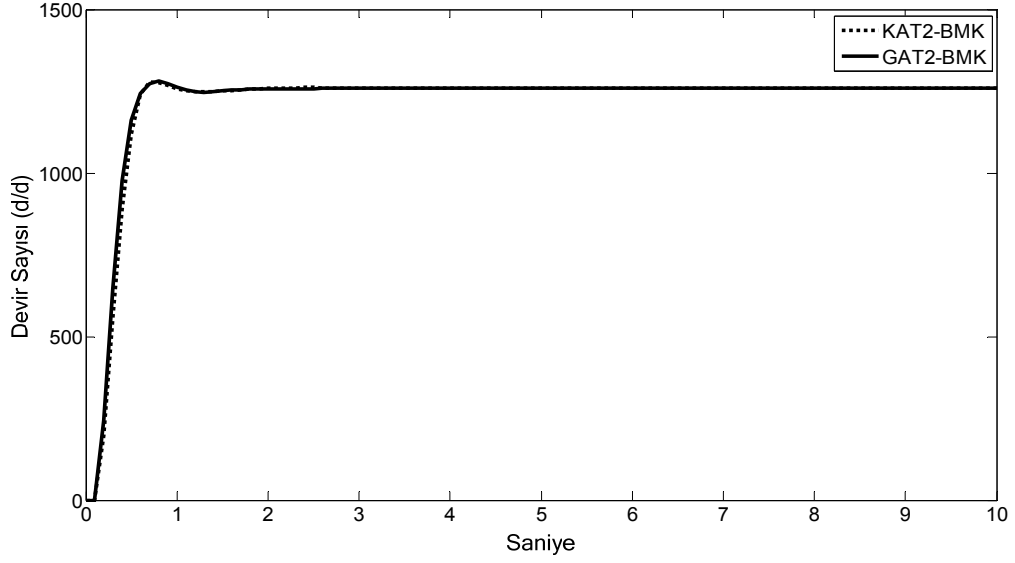
Şekil 6.16 : KAT2-BMK ayarlanmış Gauss üyelik fonksiyonları.



Şekil 6.17 : GAT2-BMK ayarlanmış granüler üyelik fonsiyonları.

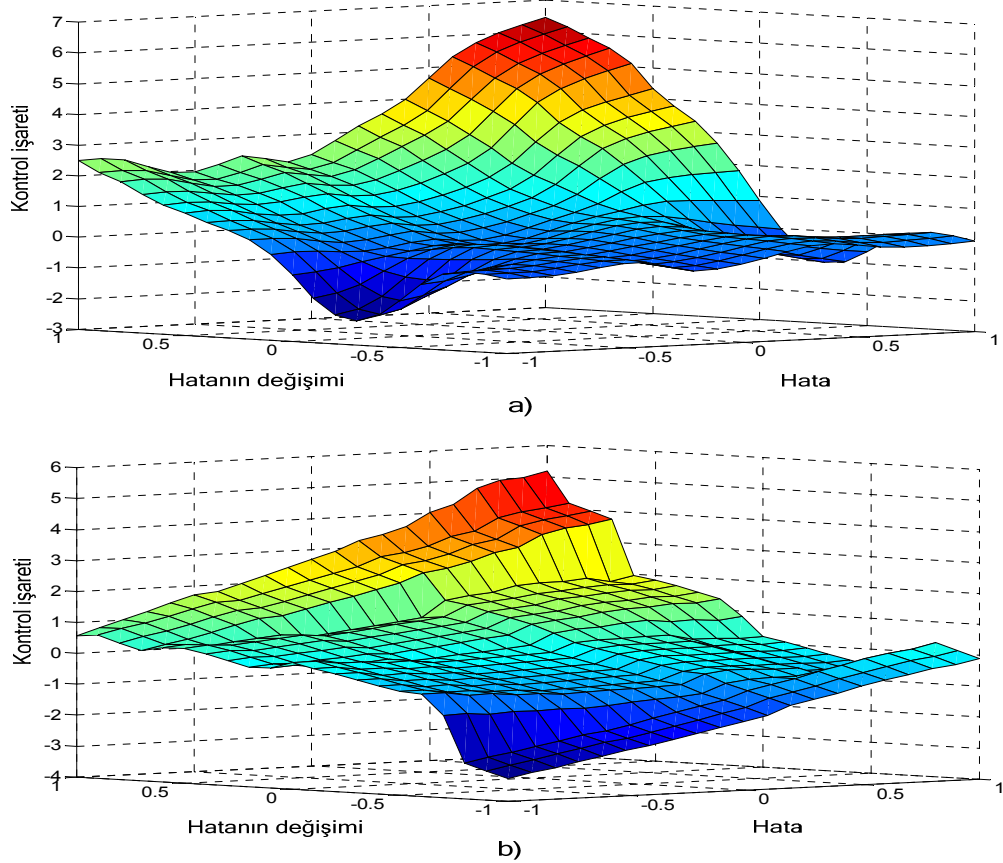
Şekil 6.17’ den görüldüğü gibi ayarlama sonucu elde edilen granüler üyelik fonksiyonları tip-1 granül yapılarını da içeren hibrit bir yapıdadır.

Tasarlanan bulanık kontrolörler ile elde edilmiş sistem yanıtlarının karşılaştırılması Şekil 6.18’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.18 : Tasarlanan kontrolörler ile elde edilen sistem model yanıtlarının karşılaştırılması.

Son olarak tasarlanan KAT2-BMK ve GAT2-BMK' ün kontrol yüzeyleri Şekil 6.19a ve Şekil 6.19b' de gösterilmiştir.



Şekil 6.19 : a) KAT2-BMK ve b) GAT2-BMK' ün kontrol yüzeyi.

Şekil 6.19' dan görüldüğü gibi granüler üyelik fonksiyonları kullanılarak kontrol yüzeyi lineer bölgeler olarak granülleşmektedir. Klasik üyelik fonksiyonlarının

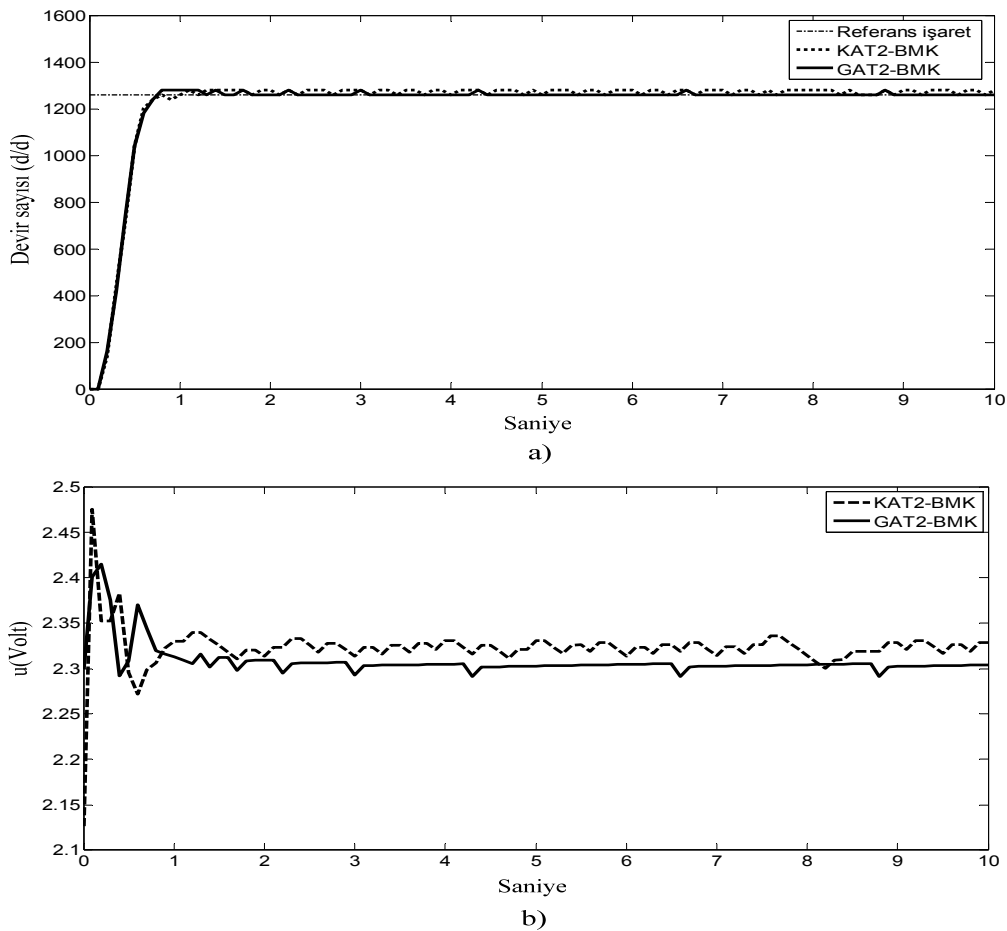
aksine kontrol yüzeyinin istenen lineer bölgesi sadece o bölgeye ait granül değerlerinin değiştirilmesi ile diğer bölgelerden bağımsız olarak ayarlanabilmektedir. Bu özellik kontrolör tasarımı kolaylık ve ekstra serbestlik sağlamaktadır.

Benzetim ortamında tasarlanan bulanık kontrolörler gerçek sistem üzerinde uygulanırken ölçekleme çarpanlarında minör düzeyde düzeltmeler yapılmıştır. Bu durumda KAT2-BMK için ölçekleme çarpanları $\gamma_e = 0.6$, $\gamma_{\Delta e} = 0.33$ ve $\gamma_{\Delta u} = 0.36$ şeklinde ve GAT2-BMK için ölçekleme çarpanları $\gamma_e = 1.5$, $\gamma_{\Delta e} = 0.08$ ve $\gamma_{\Delta u} = 0.455$ şeklinde belirlenmiştir.

6.4.2 Granüler tip-2 bulanık kontrolör için gerçek zamanlı uygulama sonuçları

6.4.2.1 Nominal sistem için uygulama sonuçları

Tasarlanan bulanık kontrolörler ile 1260 d/d nominal çalışma durumunda uygulanan kontrol işaretleri ve elde edilen sistem yanıtları Şekil 6.20’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.20 : Nominal çalışma durumunda a) elde edilen sistem yanıtları b) uygulanan kontrol işaretleri.

Sistem yanıtı başarımlar değeri Çizelge 6.3’ de gösterilmiştir.

Çizelge 6.3: Nominal durum için elde edilen başarımlar değeri.

Parametreler			tr (s)		ts (s) ($\pm 2\%$)		ÜA%	
			KAT2	GAT2	KAT2	GAT2	KAT2	GAT2
K	L	D	BMK	BMK	BMK	BMK	BMK	BMK
K	0.1	0.3	0.4	0.4	0.7	0.7	0	0

Şekil 6.20 ve Çizelge 6.3’ den görüldüğü gibi nominal durumda tasarlanan kontrolörler ile elde edilen sistem yanıtları birbirine oldukça yakındır.

6.4.2.2 Kontrolörlerin dayanıklılık başarımlarının değerlendirilmesi

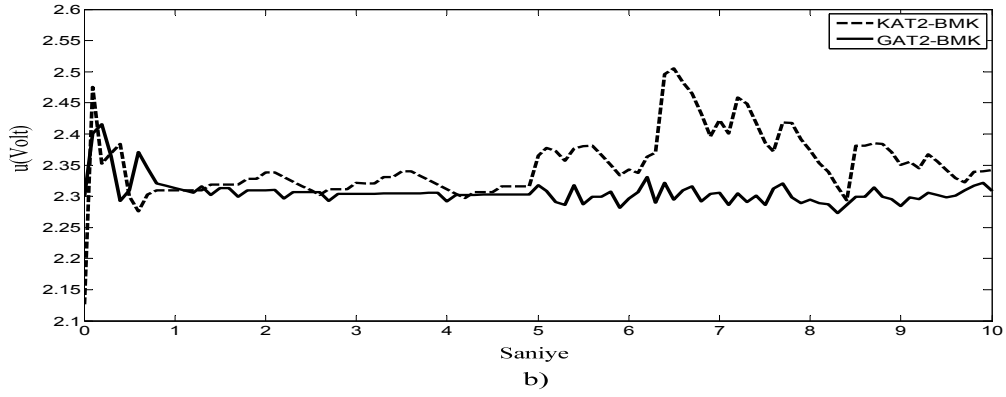
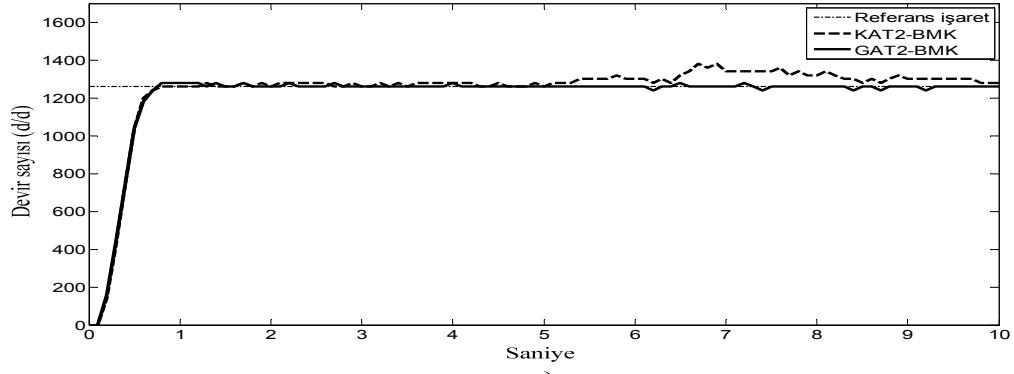
Bulanık kontrolörlerin bozucu etkisine, gürültüye ve sistem parametre değişimlerine karşı duyarlılığı aşağıdaki bölümlerde ayrı ayrı incelenmiştir.

6.4.2.3 Gürültüye karşı dayanıklılık başarımları

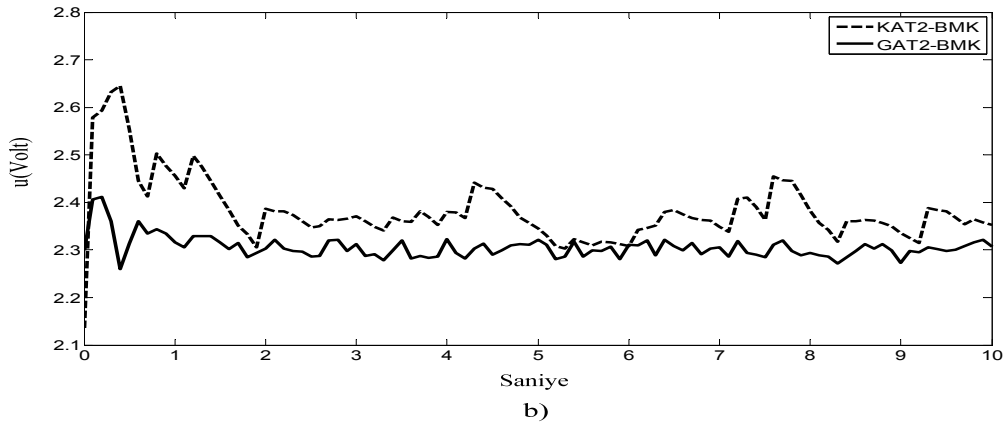
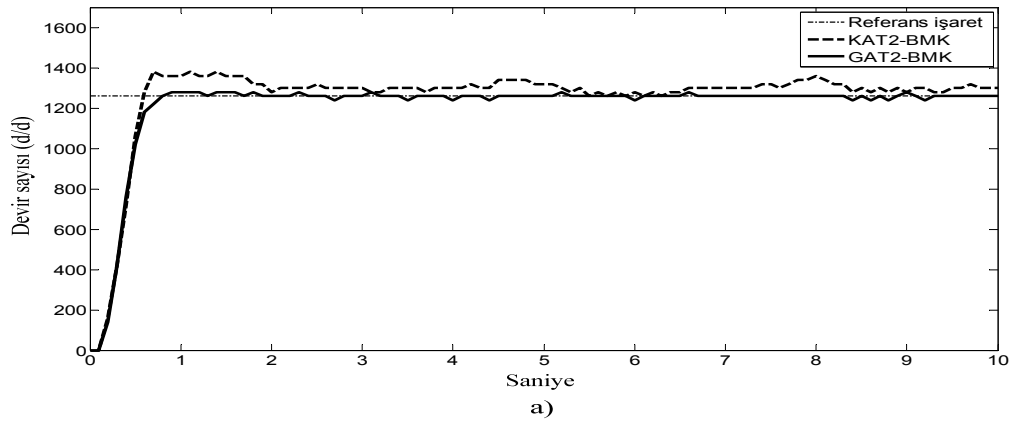
Motor devir sayısı ölçümünde sisteme gürültü etkimesi durumunda bulanık kontrolör başarımlarını karşılaştırmak için motordan ölçülen devir sayısı verisine $[-30, +30]$ d/d arasında değişen beyaz gürültü eklenmiştir. Kontrolör başarımları gürültü sisteme $t=5s$ anından itibaren etkimesi ve tüm ölçüm boyunca etkimesi durumu için ayrı ayrı karşılaştırılmıştır.

Sisteme $t=5s$ anından itibaren gürültü etkimesi durumunda uygulanan kontrol işaretleri ve elde edilen sistem yanıtları Şekil 6.21’ de gösterilmiştir.

Sisteme tüm ölçüm süresi boyunca gürültü etkimesi durumunda uygulanan kontrol işaretleri ve elde edilen sistem yanıtları Şekil 6.22’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.21 : Sisteme $t=5s$ anında gürültü etkimesi durumunda a) sistem yanıtları b) kontrol işaretleri.

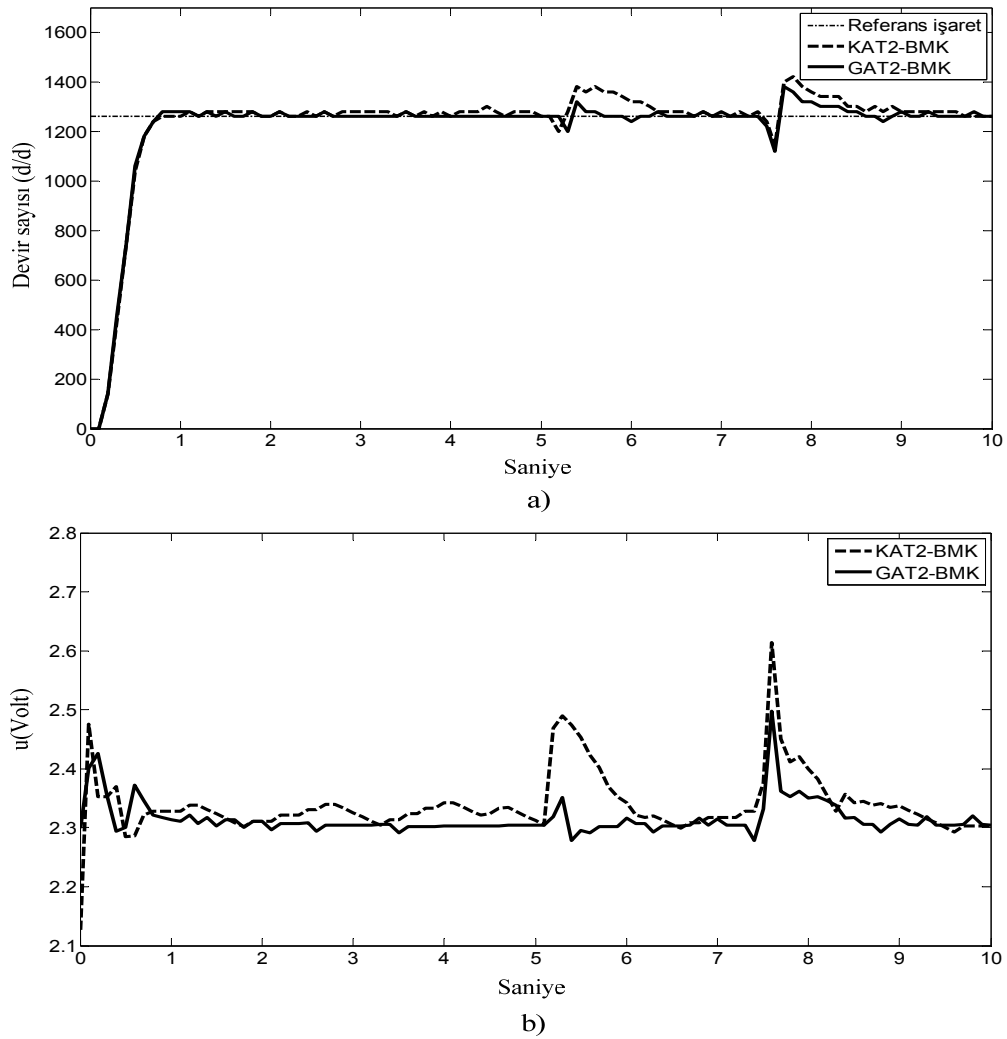


Şekil 6.22 : Sisteme tüm ölçüm süresince gürültü etkimesi durumunda a) sistem yanıtları b) kontrol işaretleri.

Şekil 6.22’ den görüldüğü gibi sisteme gürültü etkimesi durumunda KAT2-BMK başarımı oldukça kötüleşmekte ve sistem istenen referans değere ulaşamamaktadır. GAT2-BMK başarımı ise etkiyen gürültüden neredeyse etkilenmemiştir.

6.4.2.4 Bozuculara karşı dayanıklılık başarımı

Bulanık kontrolör başarımlarının bozuculara karşı duyarlılıklarını inceleyebilmek için motor miline $t=5s$ ve $t=7.5s$ anında frenleme yönünde kuvvet uygulanmıştır. Bu durumda uygulanan kontrol işaretleri ve elde edilen sistem yanıtları Şekil 6.23’ te gösterilmiştir.



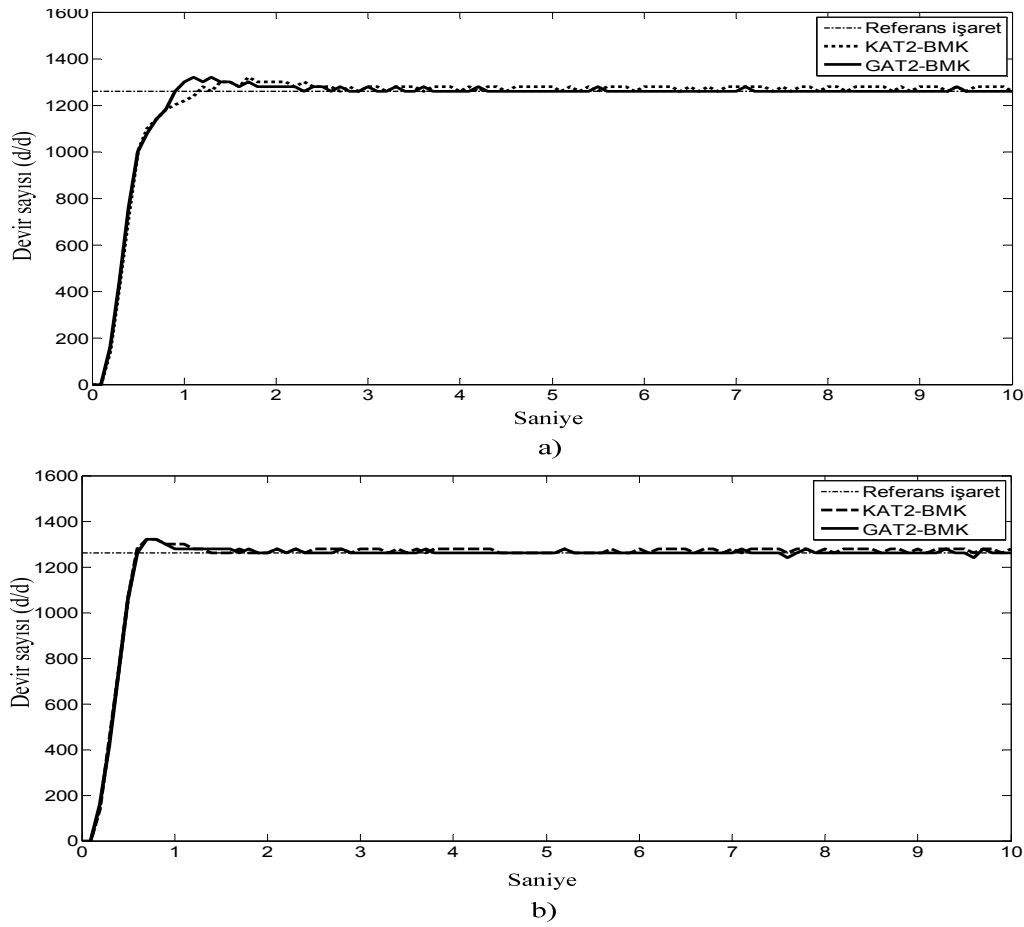
Şekil 6.23 : Sisteme bozucu etkimesi durumunda a) sistem yanıtları b) kontrol işaretleri.

Şekil 6.23’ den görüldüğü gibi bozucu etkilerine karşı GAT2-BMK ile KAT2-BMK’ e göre daha iyi bir başarımlar elde edilmektedir.

6.4.2.5 Sistem parametre değişimlerine karşı kontrolör başarımlarının değerlendirilmesi

Tasarlanan bulanık kontrolörlerin sistem parametre değişimlerine karşı sergileyecekleri başarımlı incelemek için sistem kazanç değerinde, ölü zaman değerinde ve ölü bölge değerinde belirsizlik olduğu durumlar göz önüne alınmıştır.

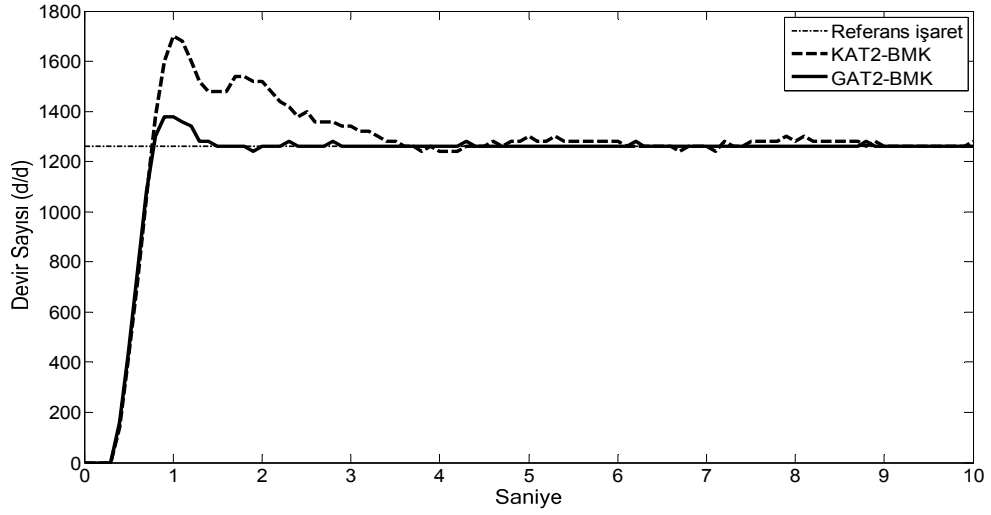
Sistem kazanç değerinin $K=0.9K$ ve $K=1.1K$ olması durumunda elde edilen sistem yanıtları sırasıyla Şekil 6.24a ve Şekil 6.24b’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.24 : a) $K=0.9K$ ve b) $K=1.1K$ olması durumunda elde edilen sistem yanıtları.

Şekil 6.24’ den görüldüğü gibi sistem kazanç değeri değişimi durumunda GAT2-BMK başarımlı KAT2-BMK başarımlına göre az da olsa daha iyidir.

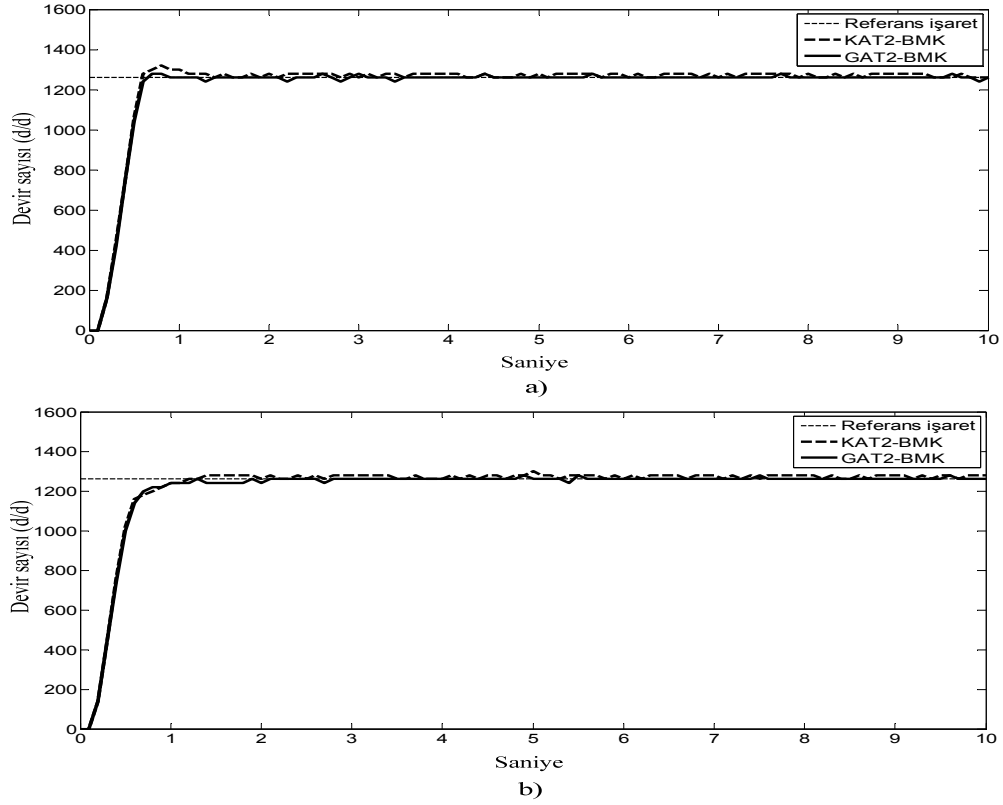
Bulanık kontrolörlerin sistem ölü zaman değerinin değişimine karşı etkisini incelemek için kontrol işareti sisteme gecikmeli olarak gönderilmiştir. $L=0.3s$ olması durumunda elde edilen sistem yanıtları Şekil 6.25’ te gösterilmiştir.



Şekil 6.25 : Ölü zamanının $L=0.3s$ olması durumunda elde edilen sistem yanıtları.

Şekil 6.25’ ten görüldüğü gibi ölü zaman değerinin değişimine karşı GAT2-BMK KAT2-BMK’ e göre daha üstün bir başarımla göstermektedir. KAT2-BMK ile elde edilen sistem yanıtında büyük aşım olmasına karşın GAT2-BMK ile elde edilen sistem yanıtı az bir aşım ile istenen referans değere hızlıca yerleşmektedir.

Sistem girişinde bulunan ölü bölge değerinin $D=0.2V$ ve $D=0.4V$ olarak değişmesi durumunda elde edilen sistem yanıtları sırasıyla Şekil 6.26a ve Şekil 6.26b’ de gösterilmiştir.



Şekil 6.26 : a) $D=0.2V$ ve b) $D=0.4V$ olması durumunda elde edilen sistem yanıtları.

Şekil 6.26’ dan görüldüğü gibi ölü bölge değerinin değişimine karşı GAT2-BMK ile daha iyi bir başarımla elde edilmektedir.

Yukarıda irdelenen sistem parametre belirsizliklerine karşı elde edilen KAT2-BMK ve GAT2-BMK başarımlarının genel karşılaştırılması Çizelge 6.4’ te gösterilmiştir.

Çizelge 6.4: Sistem parametre belirsizliklerine karşı kontrolör başarımlarının karşılaştırılması.

Parametreler			tr (s)		ts (s) ($\pm 2\%$)		ÜA%	
K	L	D	KAT2 BMK	GAT2 BMK	KAT2 BMK	GAT2 BMK	KAT2 BMK	GAT2 BMK
K	0.1	0.3	0.4	0.4	0.7	0.7	0	0
0.9K	0.1	0.3	0.5	0.5	2.4	1.8	4.76	4.76
1.1K	0.1	0.3	0.4	0.4	1.3	1.0	4.76	4.76
K	0.3	0.3	0.4	0.4	3.4	1.3	34.92	9.52
K	0.1	0.2	0.4	0.4	1.1	0.6	4.76	1.58
K	0.1	0.4	0.4	0.4	1.1	1.0	1.58	0

Çizelge 6.4’ ten açıkça görüldüğü gibi sistem parametre belirsizliklerine karşı GAT2-BMK KAT2-BMK’ e göre daha üstün bir başarımla göstermektedir. Ayrıca GAT2-

BMK ile elde edilen sistem yanıtları sistem parametre belirsizliklerine karşı daha dayanıklıdır.

7. SONUÇLAR

Tez çalışmasında elde edilen sonuçlar önerilen her bir yöntem için aşağıda ayrı ayrı verilmiştir.

7.1 Granüler Tip-2 Üyelik Fonksiyonları İle İlgili Sonuçlar

Tez çalışmasında tip-2 bulanık kümelerde belirsizlik taban alanını daha esnek ve daha doğru bir şekilde oluşturmak için granüler tip-2 üyelik fonksiyonu adında yeni bir üyelik fonksiyonu tipi önerilmiştir. Granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının belirsizlik taban alanı dikdörtgen yapıdaki tip-2 bulanık granüller kullanılarak oluşturulmaktadır. Granüler tip-2 üyelik fonksiyonları ile üyelik değerlerindeki belirsizlik tanım uzayındaki herhangi bir bölge için bağımsız olarak ifade edilebildiğinden granüler tip-2 üyelik fonksiyonları tip-2 bulanık sistemlerde daha fazla serbestlik derecesi ve tasarım esnekliği sağlamaktadır. Bu yüzden granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarını kullanan tip-2 bulanık sistemler belirsizlikleri modelleme ve baş etme konusunda klasik tip-2 bulanık sistemlerden daha yeteneklidirler. Granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının bu özelliği sayesinde doğrusal olmayan, süreksiz ve hibrit yapıda üyelik fonksiyonları tanımlanabilmekte ve böylece bulanık sistemin üyelik fonksiyonu tanım uzayında ya da giriş-çıkış atama yüzeyinde istenen süreksiz ya da doğrusal olmayan herhangi bir bölge kolayca tanımlanabilmektedir. Bu özellikle satürasyon, ölü bölge, dişli boşluğu ve histerizis gibi zor tanımlanabilen karakteristiklere sahip doğrusal olmayan sistemlerin modellenmesi ve kontrolü için oldukça önemlidir. Ayrıca önerilen granüler tip-2 üyelik fonksiyonu diyot, tristör, röle ya da anahtar içeren alt sistemlere sahip hibrit ve/veya anahtarlama sistemler; transmisyon sistemi ve adım motoru gibi hareket denetleyiciler; valf ve pompolarla kontrol edilen kimyasal ve endüstriyel süreçler; sınırlandırılmalı robotik sistemler gibi sistemlerin ele alınmasında da oldukça etkilidir. Bu tip sistemlerin modellenmesi ve kontrolünde genellikle her bir alt sistem ayrı ayrı ele alınır. Fakat önerilen yöntem her bir alt sistem için ayrı ayrı bulanık sistem tasarlamak yerine tek bir bulanık sistem tasarlama imkanı sağlamaktadır.

Granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının matematiksel ifadeleri oldukça basittir ve bu doğal olarak tip-2 bulanık küme ve sistemlerdeki hesaplama karmaşıklığını ve yükünü azaltmaktadır. Ayrıca granüler tip-2 üyelik fonksiyonları ile ilgili türev tanımları her zaman bir sabit olduğundan granüler tip-2 üyelik fonksiyonların parametrelerinin ayarlanması için türeve dayalı en iyileme algoritmaları kolayca kullanılabilir.

Yapılan benzetim çalışmaları ile granüler tip-2 üyelik fonksiyonları kullanılarak oluşturulan bulanık sistemlerin geleneksel tip-2 üyelik fonksiyonları kullanılarak oluşturulan bulanık sistemlere göre daha çok modelleme kabiliyetine sahip oldukları ve sistem parametre değişimlerine ve gürültülü girişlere karşı daha dayanıklı oldukları gösterilmiştir.

7.2 Granüler Tip İndirgeme Yöntemi İle İlgili Sonuçlar

Tez çalışmasında parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümeler için Granüler Tip İndirgeme Yöntemi adında kapalı yapıda ifade edilmiş yeni bir tip indirgeme yöntemi önerilmiştir. Granüler tip-2 bulanık kümeleri de bir parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık küme olduğundan bu tip indirgeme yöntemi doğrudan granüler tip-2 bulanık kümeler için de kullanılabilir. Bu yöntemde parçalı doğrusal aralık tip-2 bulanık kümeler bir geometrik obje olarak ele alınmış ve böylece yöntemde sadece analitik formüller kullanılmıştır. Bu yolla tip indirgeme işleminde ihtiyaç duyulan ayırıştırma ihtiyacı ortadan kaldırılmış olmaktadır. Ayrıca bu yöntemde aralık tip-2 bulanık kümenin belirsizlik taban alanında ağırlık merkezinin arandığı bölgenin sabit genişlikte olduğu varsayılmıştır. Bu varsayım aralık tip-2 bulanık kümenin ağırlık merkezinin iterasyona gerek kalmadan kapalı bir formül ile hesaplanabilmesini sağlamaktadır. Ayırıştırmaya ve iterasyona olan ihtiyacın ortadan kaldırılması ile önerilen granüler tip indirgeme yönteminde hesaplama kesinliği ve hesaplama süresi doğal olarak iyileştirilmiş olmaktadır. Granüler tip indirgeme yönteminin en önemli özelliği sabit genişlikte varsayılan belirsizlik taban alanının ilgili parçasının gerçekten sabit genişlikte olması durumunda gerçek ağırlık merkezi değerinin tam kesinlikte hesaplanmasıdır. Aksi takdirde hesaplanan ve gerçek ağırlık merkezi değerleri arasındaki hatayı azaltmak için önerilen yöntemde bir iyileştirme adımı gerçekleştirilir.

Granüler tip indirgeme yöntemi hesaplama kesinliği ve hesaplama süresi kriterleri açısından iyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemi ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar göstermiştir ki granüler tip indirgeme yöntemi ile iyileştirilmiş Karnik-Mendel yöntemine göre daha kısa hesaplama süresi ile hesaplama kesinliği daha yüksek sonuçlar elde edilmektedir. Önerilen granüler tip indirgeme yönteminde iyileştirme olmadan elde edilen sonuçların hesaplama kesinliği değeri bir çok gerçek zamanlı uygulamadaki hesaplama kesinliği gereksinimini karşılamaktadır. Bu yüzden granüler tip indirgeme yöntemi iyileştirme adımı kullanılmadan bir çok gerçek zamanlı uygulamada doğrudan kullanılabilir. Diğer taraftan, sonuçların hesaplama kesinliği değeri modelleme uygulamaları gibi hassas hesaplama kesinliği gerektiren uygulamalar için yeterli olmayabilir. Bu durumda granüler tip indirgeme yönteminde sonucun hesaplama kesinliği değerini arttıran iyileştirme adımı kullanılabilir. Ayrıca elde edilen sonuçlar göstermiştir ki granüler tip indirgeme yönteminde iyileştirme adımının kullanılması yöntemin hesaplama kesinliğini büyük ölçüde arttırmasına karşın yöntemin hesaplama süresinde önemli bir değişime neden olmamaktadır. Bu nedenle granüler tip indirgeme yöntemi iyileştirme adımı ile birlikte doğrudan gerçek zamanlı uygulamalarda kullanılmaya uygundur.

Aralık tip-2 bulanık sistemlerde çıkarım sonucu elde edilen sonuç bulanık kümesinin belirsizlik taban alanı kuralların ateşleme aralıklarına bağlı olarak neredeyse her zaman sabit genişlikte granüler bölgeler içerir. Karşılaştırma sonuçlarından görüldüğü gibi önerilen yöntem bu tip bulanık kümelerin tip indirgeme işlemi için oldukça etkilidir ve gerçek ağırlık merkezi değerini tam olarak bulma ihtimali yüksektir. Bu yüzden granüler tip indirgeme yöntemi aralık tip-2 bulanık sistemler için oldukça uygun bir yöntemdir. Ayrıca granüler tip indirgeme yöntemi kapalı yapıda bir formülle ifade edildiğinden aralık tip-2 bulanık sistemlerde teorik analizlerin gerçekleştirilmesi için imkan sağlamaktadır.

7.3 PD Tipi Ağırlıklandırılmalı Dinamik Durulama Yöntemi İle İlgili Sonuçlar

Tez çalışmasında aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörler için sistem dinamiklerinden yararlanan yeni bir durulama yöntemi önerilmiştir. Bu yöntemde keskin çıkış değeri ortalama almak yerine tip indirgenmiş kümenin sağ ve sol sınır değerlerinin doğrusal kombinasyonunun kullanılması ile elde edilir. Bu doğrusal kombinasyon PD tipi ağırlıklandırılmış sistem hata ve hatanın türevi değişkenleri kullanılarak

oluşturulmuştur. Böylece önerilen durulama yöntemi ile sistem dinamiklerine bağlı olarak sistem geçici hal yanıtı iyileştirilebilmektedir. Sistem hata ve hatanın türevi sifıra eşit olduğu kararlı hal durumunda ise önerilen yöntem klasik durulama yöntemine eşit olmakta ve böylece kararlı hal hatasının ortaya çıkması ya da sistemin kararsızlığa gitmesi önlenmektedir. Önerilen yöntem ile literatürde kullanılan klasik durulama yönteminin karşılaştırılması doğrusal ve doğrusal olmayan iki örnek sistem üzerinde benzetim çalışmaları yapılarak gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen dinamik durulama yönteminin kontrolör başarımını ve parametre değişimlerine karşı sistem dayanıklılığını arttırdığını göstermiştir.

Eşit ağırlıklandırmanın kullanıldığı dinamik durulama yönteminde herhangi bir ayar parametresi bulunmamaktadır. Böylece herhangi bir ayarlama yapmadan önerilen yöntem bulanık kontrolörlerde klasik durulama yöntemi yerine doğrudan kullanılabilir. Bunun yanında sistem dinamikleri hata ve hatanın türevi için PD tipi ağırlıklandırmanın kullanıldığı dinamik durulama yöntemi ile daha etkili bir kontrolör başarımı elde etmek mümkündür.

7.4 Gerçek Zamanlı Kontrol Uygulamaları İle İlgili Sonuçlar

Önerilen dinamik durulama yönteminin ve granüler üyelik fonksiyonunun etkinliğini deneysel olarak da ispatlamak için gerçek zamanlı kontrol uygulamaları gerçekleştirilmiştir.

Dinamik durulama yöntemi için deneysel olarak elde edilen sonuçların daha önce gerçekleştirilen benzetim çalışmaları ile elde edilen sonuçları desteklediği görülmüştür. Gerçek zamanlı kontrol uygulamalarında elde edilen sonuçlar ile dinamik durulama yönteminin klasik durulama yöntemine göre aralık tip-2 bulanık kontrolörün başarımını iyileştirdiği ve ayrıca sistem parametre değişimlerine ve bozuculara karşı kontrolörün dayanıklılığını arttırdığı ispatlanmıştır.

Önerilen granüler tip-2 üyelik fonksiyonları ile tasarlanmış tip-2 bulanık sistemlerin modelleme uygulamalarındaki üstünlüğü benzetim çalışmaları ile gösterilmiştir. Gerçek zamanlı kontrol uygulamaları ile granüler tip-2 üyelik fonksiyonlarının bulanık kontrolör tasarımında kullanılması ve kontrolör başarımı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar ile granüler tip-2 üyelik fonksiyonları kullanan granüler aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörün klasik üyelik fonksiyonu kullanan

aralık tip-2 bulanık mantık kontrolörlere göre daha üstün bir başarımlı sergilediği gösterilmiştir. Ayrıca kontrolör dayanıklılığını incelemek için yapılan çalışmalarda granüler aralık tip-2 bulanık kontrolörün sistem parametre belirsizliklerine, bozucu ve gürültü etkilerine karşı klasik aralık tip-2 bulanık kontrolöre göre daha dayanıklı olduğu görölmüştür.

KAYNAKLAR

- [1] **Zadeh, L. A.** (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8, pp. 338-353.
- [2] **Mamdani, E. H.** (1974). Application of fuzzy logic algorithms for control of simple dynamic plant. *In Proceedings of the Institute of Electrical Engineering*, 121, pp. 1585-1588.
- [3] **Smith S. M., Rae G. J. S., Anderson D. T., Shein A. M.** (1994). Fuzzy logic control of an autonomous underwater vehicle. *Control Engineering Practice*, 2 (2), pp. 321-331.
- [4] **Silva C. W.** (1995). Applications of fuzzy logic in the control of robotic manipulators. *Fuzzy Sets and Systems*, 70 (2-3), pp. 223-234.
- [5] **Lower, M., Szlachetko, B., Krol, D.** (2005). Fuzzy flight control system for helicopter intelligence in hover. *In Proceedings of 5th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications, ISDA '05*, pp. 370 – 374, 8-10 Sept.
- [6] **Chou C. H., Teng J. C.** (2002). A fuzzy logic controller for traffic junction signals. *Information Sciences*, 143 (1-4), pp. 73-97.
- [7] **Altrock C.V, Arend H.O., Krause B., Steffens C., Römmler E. B.** (1994). Adaptive fuzzy control applied to home heating system. *Fuzzy Sets and Systems*, 61 (1), pp. 29-35.
- [8] **Hong C. W., Shio T. W.** (1996). Fuzzy control strategy design for an autopilot on automobile chassis dynamometer test stands. *Mechatronics*, 6 (5), pp. 537-555.
- [9] **Soliman A., Rizzoni G., Kim Y. W.** (1999). Diagnosis of an automotive emission control system using fuzzy inference. *Control Engineering Practice*, 7 (2), pp. 209-216.
- [10] **Fay A.** (2000). A fuzzy knowledge-based system for railway traffic control. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 13 (6), pp. 719-729.
- [11] **Bose, B. K.** (1997). Intelligent control and estimation in power electronics and drives. *In Proceedings of IEEE International Electric Machines and Drives Conference Record*, pp. TA2/2.1 - TA2/2.6, 18-21 May.
- [12] **Shahraz A., Boozarjomehry R. B.** (2009). A fuzzy sliding mode control approach for nonlinear chemical processes. *Control Engineering Practice*, 17 (5), pp. 541-550.
- [13] **Zhang Z., Zhou H., Liu S., Harrington P.B.** (2006). An application of Takagi-Sugeno fuzzy system to the classification of cancer patients based on elemental contents in serum samples. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 82 (1-2), pp. 294-299.

- [14] **Karnik N. N.**, (1998). Type-2 fuzzy logic systems. Ph.D. Dissertation, ProQuest Dissertations & Theses (PQDT).
- [15] **Karnik, N. N., Mendel J. M., Liang Q.** (1999). Type-2 Fuzzy Logic Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 7 (6), pp. 643-658.
- [16] **Zadeh L. A.** (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—1, *Inform. Sci.*, 8, pp. 199–249.
- [17] **Mizumoto M., Tanaka K.** (1976). Some properties of fuzzy sets of type-2. *Information and Control*, 31, pp. 312-340.
- [18] **Mizumoto M., Tanaka K.** (1981). Fuzzy sets and type-2 under algebraic product and algebraic sum. *Fuzzy Sets and Systems*, 5 (3), pp. 277-290.
- [19] **Nieminen, J.** (1977). On the algebraic structure of fuzzy sets of type-2. *Kybernetika*, 13 (4), pp. 261-273.
- [20] **Yager R. R.** (1980). Fuzzy subsets of type II in decisions. *J. Cybern.* 10, pp.137-159.
- [21] **Castillo O., Melin P.** (2004). Adaptive noise cancellation using type-2 fuzzy logic and neural networks. *In Proc. FUZZ-IEEE*, 2, pp 1093–1098, 25-29 July.
- [22] **Zeng J., Liu Z. Q.** (2004). Type-2 fuzzy hidden markov models to phoneme recognition. *In Proceedings of the 17th International Conference on Pattern Recognition*, 1, pp. 192–195.
- [23] **Castillo O., Melin P.** (2003). A new hybrid approach for plant monitoring and diagnostics using type-2 fuzzy logic and fractal theory. *In Proc. FUZZ-IEEE*, 1, pp. 102–107.
- [24] **Tan W. W., Lai J.** (2004). Development of a type-2 fuzzy proportional controller. *In Proceedings. FUZZ-IEEE*, 3, pp. 1305-1310.
- [25] **Hagras H.** (2004). A hierarchical type-2 fuzzy logic control architecture for autonomous mobile robots. *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, 12 (4), pp. 524-539.
- [26] **Melin P., Castillo O.** (2002). A new approach for quality control of sound speakers combining type-2 fuzzy logic and fractal theory. *In Proc. FUZZ-IEEE*, 2, pp. 625–630.
- [27] **Melin P., Castillo O.** (2003). A new method for adaptive model-based control of nonlinear plants using type-2 fuzzy logic and neural networks. *In Proc. 12th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Syst.*, 1, pp. 420-425.
- [28] **Lee C.-H., Lin Y.-C.** (2004). Control of nonlinear uncertain systems using type-2 fuzzy neural network and adaptive filter. *In Proc. IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, 2, pp. 1177-1182.
- [29] **Tan W. W., Pall S. N.** (2003). Performance study of type-2 fuzzy controllers. *In Proc. 2nd Int. Conf. Comput. Intell., Robot. and Autonomous Syst.*, Singapore.

- [30] **Wu D. R., Tan W. W.** (2004). A type-2 fuzzy logic controller for the liquid-level process. *In Proc. FUZZ-IEEE*, 2, Budapest, July, pp. 953–958.
- [31] **Park S., Kwang H. L.** (2001). A designing method for type-2 fuzzy logic systems using genetic algorithms. *In Proc. Joint 9th IFSA World Congress and 20th NAFIPS Int. Conf.*, 5, Vancouver, BC, Canada, July, pp. 2567–2572.
- [32] **Lynch C., Hagraas H., Callaghan V.** (2005). Embedded type-2 FLC for real-time speed control of marine & traction diesel engines. *In Proc. FUZZ-IEEE*, Reno, Nevada, May, pp. 347–352.
- [33] **Zarandi M. H. F., Rezaee B., Turksen I. B., Neshat E.** (2009). A type-2 fuzzy rule-based expert system model for stock price analysis. *Expert Systems with Applications*, 36 (1), pp. 139-154.
- [34] **Karnik, N. N., Mendel J. M.** (1999). Applications of Type-2 Fuzzy Logic Systems to Forecasting of Time-Series. *Information Sciences*, 120, pp. 89-111.
- [35] **Castillo O., Melin P.** (2008). Type-2 Fuzzy Logic: Theory and Applications. Verlag Berlin Heidelberg, Springer.
- [36] **Mendel J. M., John R. I. B.** (2002). Type-2 fuzzy sets made simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 10 (2), pp. 117-127.
- [37] **Mendel J. M.** (2001). Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems: Introduction and New Directions. Upper Saddle River, NJ, Prentice-Hall.
- [38] **Linda O., Manic M.** (2011). Interval type-2 fuzzy voter design for fault tolerant systems. *Information Sciences*, 181 (14), pp. 2933–2950.
- [39] **Hsiao M.-Y., Li T.-H. S., Lee J.-Z., Chao C.-H., Tsai S.-H.** (2008). Design of interval type-2 fuzzy sliding-mode controller. *Information Sciences*, 178 (6), pp. 1696-1716.
- [40] **Martínez R., Castillo O., Aguilar L.T.** (2009). Optimization of interval type-2 fuzzy logic controllers for a perturbed autonomous wheeled mobile robot using genetic algorithms. *Information Sciences*, 179 (13), pp. 2158–2174.
- [41] **Nurmaini S., Zaiton S., Norhayati D.** (2009). An embedded interval type-2 neuro-fuzzy controller for mobile robot navigation. *In Proc. IEEE Int. Conf. Systems, Man, and Cybernetics, SCM2009*, Hyatt Regency Riverwalk, San Antonio, Texas, USA, pp. 4315–4321.
- [42] **Leottau L., Melgarejo M.** (2010). Implementing an interval type-2 fuzzy processor onto a DSC 56F8013. *In Proc. Int. Conf. Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE 2010*, Barcelona, Spain, pp. 1939–1942.
- [43] **Leal-Ramírez C., Castillo O., Melin P., Rodríguez-Díaz A.** (2011). Simulation of the bird age-structured population growth based on an interval type-2 fuzzy cellular structure. *Information Sciences*, 181 (3), pp. 519–535.

- [44] **Wu D., Tan W. W.** (2006). Genetic learning and performance evaluation of interval type-2 fuzzy logic controllers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 19 (8), pp. 829-841.
- [45] **Jammeh E. A., Fleury M., Wagner C., Hagraas H., Ghanbari M.** (2009). Interval type-2 fuzzy logic congestion control for video streaming across IP networks. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17 (5), pp. 1123–1142.
- [46] **Sepulveda R., Castillo O., Melin P., Rodríguez-Díaz A., Montiel O.** (2007). Experimental study of intelligent controllers under uncertainty using type-1 and type-2 fuzzy logic. *Information Sciences*, 177 (10), pp. 2023-2048.
- [47] **Coupland S., Gongora M., John R. I., Wills K.** (2006). A comparative study of fuzzy logic controllers for autonomous robots. *In Proc. IPMU'06*, pp. 1332-1339.
- [48] **Biglarbegian M., Melek W. W., Mendel J. M.** (2009). A practical approach for design of PD and PI like interval type-2 TSK fuzzy controllers. *In Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics SMC'09*, pp. 255 – 261.
- [49] **Lin P.-Z., Hsu C.-F., and Lee T.-T.** (2005). Type-2 fuzzy logic controller design for buck DC-DC converters. *In Proceedings of IEEE FUZZ Conference*, pp. 365-370.
- [50] **Wagner C. and Hagraas H.** (2007). A genetic algorithm based architecture for evolving type-2 fuzzy logic controllers for real world autonomous mobile robots. *In Proceedings of IEEE FUZZ Conference*, pp. 193–198.
- [51] **Leottau L. and Melgarejo M.** (2010). A simple approach for designing a type-2 fuzzy controller for a mobile robot application. *In Proc. Annual Meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS)*, pp. 1–6.
- [52] **Bulla J., Sierra G., and Melgarejo M.** (2008). Implementing a simple microcontroller-based interval type-2 fuzzy processor. *In Proc. Midwest Symposium on Circuits and Systems Conference*, 1, pp. 69–72.
- [53] **Linda O., Manic, M.** (2011). Uncertainty-Robust Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller for Delta Parallel Robot. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 7 (4), pp. 661-670.
- [54] **Giridhar M. S., Sivanagaraju, S.** (2010). Distribution transformer load modeling with interval Type-2 Fuzzy Sets. *In Proceedings of the Joint International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & Power*, India, pp.1-5.
- [55] **Lee C. H., Pan, H. Y.** (2009). Performance enhancement for neural fuzzy systems using asymmetric membership functions. *Fuzzy Sets and Systems*, 160 (7), pp. 949-971.
- [56] **Mendel J. M., Wu H.** (2006). Type-2 Fuzzistics for Symmetric Interval Type-2 Fuzzy Sets: Part 1, Forward Problems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14 (6), pp. 781 – 792.

- [57] **Mendel J. M., Wu, H.** (2007). Type-2 Fuzzistics for Nonsymmetric Interval Type-2 Fuzzy Sets: Forward Problems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15 (5), pp. 916 – 930.
- [58] **Coupland S., John R.** (2007). Geometric Type-1 and Type-2 Fuzzy Logic Systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15 (1), pp. 3-15.
- [59] **Sahab N., Hagrass H.** (2011). An Adaptive Non-singleton Type-2 Fuzzy Logic Systems: A Way Forward for Handling Numerical Uncertainties in Real World Applications. *International Journal of Computers, Communications & Control*, 6 (3), pp. 503-529.
- [60] **Chen S. M., Lee L. W.** (2011). Fuzzy interpolative reasoning for sparse fuzzy rule-based systems based on interval type-2 fuzzy sets. *Expert Systems with Applications*, 38 (8), pp. 9947-9957.
- [61] **Wagner C., Hagrass H.** (2010). Toward General Type-2 Fuzzy Logic Systems Based on zSlices. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 18 (4), pp. 637-660.
- [62] **Khanesar M. A., Kayacan E., Teshnehlab M., Kaynak O.** (2011). Analysis of the Noise Reduction Property of Type-2 Fuzzy Logic Systems Using a Novel Type-2 Membership Function. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 41 (5), pp. 1395-1406.
- [63] **Tizhoosh H. R.** (2005). Image thresholding using type II fuzzy sets. *Pattern Recognition*, 38, pp. 2363-2372.
- [64] **Khanesar M. A., Teshnehlab M., Kayacan E., Kaynak O.** (2010). A Novel Type-2 Fuzzy Membership Function: Application to the Prediction of Noisy Data. In *Proc. IEEE International Conference on Computational Intelligence for Measurement Systems and Applications (CIMSAS)*, pp. 128-133.
- [65] **Karakose M.** (2010). Sine-square Embedded Fuzzy Sets. In *Proc. IEEE International Conference on Systems Man and Cybernetics (SMC)*, pp. 3628-3631.
- [66] **Karnik N. N. and Mendel J. M.** (2001). Centroid of a type-2 fuzzy set. *Information Sciences*, 132, pp. 195-220.
- [67] **Mendel J. M., Wu H., Kreinovich V., Xiang G.** (2006). Fast computation of centroids for constant-width interval-valued fuzzy sets. In *Proc. Annual meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS '06*, Montreal, QC, pp. 621-626.
- [68] **Mendel J. M., Wu H.** (2007). New results about the centroid of an interval type-2 fuzzy set, including the centroid of a fuzzy granule. *Information Sciences*, 177 (2), pp. 360-377.
- [69] **Wu D., Mendel J. M.** (2009). Enhanced Karnik-Mendel algorithms. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17 (4), pp. 923-934.
- [70] **Melgarejo M.** (2007). A fast recursive method to compute the generalized centroid of an interval type-2 fuzzy set. In *Proc. Annual meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS '07*, San Diego, California, USA, pp.190-194.

- [71] **Liu X., Mendel J. M.** (2011). Connect Karnik–Mendel algorithms to root-finding for computing the centroid of an interval type-2 fuzzy set. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 19 (4), pp. 652-665.
- [72] **Liu X., Mendel J. M., Wu D.** (2012). Study on enhanced Karnik–Mendel algorithms: Initialization explanations and computation improvements. *Information Sciences*, 184 (1), pp. 75-91.
- [73] **Celemin C. E., Melgarejo M. A.** (2012). A faster iterative computation of the centroid of an interval type-2 fuzzy set. *In Proc. Annual meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS '12*, California, pp.1-6.
- [74] **Wu H., Mendel J. M.** (2002). Uncertainty bounds and their use in the design of interval type-2 fuzzy logic systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 10 (5), pp. 622–639.
- [75] **Wu D., Tan W. W.** (2005). Computationally efficient type-reduction strategies for a type-2 fuzzy logic controller. *In Proc. 14th Int. Conf. Fuzzy Systems, FUZZ '05*, Reno, Nevada, USA, pp. 353-358.
- [76] **Coupland S., John R.** (2006). An investigation into alternative methods for the defuzzification of an interval type-2 fuzzy set. *In Proc. IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE '06*, Vancouver, BC, Canada, pp. 1425-1432.
- [77] **Coupland S., John R.** (2005). Geometric interval type-2 fuzzy systems. *In Proc. 4th Conf. the European Society for Fuzzy Logic and Technology and 11th Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications, EUSFLAT-LFA '05*, Barcelona, Spain, pp. 449 – 454.
- [78] **Nie M., Tan W. W.** (2008). Towards an efficient type-reduction method for interval type-2 fuzzy logic systems. *In Proc. IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence), FUZZ-IEEE '08*, Hong Kong, pp.1425-1432.
- [79] **Biglarbegian M., Melek W. W., Mendel J. M.** (2010). On the stability of interval type-2 TSK fuzzy logic control systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 40 (3), pp. 798-818.
- [80] **Mendel J. M., Liu X.** (2012). New closed-form solutions for Karnik-Mendel algorithm+defuzzification of an interval type-2 fuzzy set. *In Proc. IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE '12*, Brisbane, Australia, pp.1-8.
- [81] **Greenfield S., Chiclana F., Coupland S., John R.** (2009). The collapsing method of defuzzification for discretised interval type-2 fuzzy sets. *Information Sciences*, 179 (13), pp. 2055-2069.
- [82] **Wu D.** (2013). Approaches for reducing the computational cost of interval type-2 fuzzy logic controllers: Overview and comparison. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 21 (1), pp.80-99.
- [83] **Wu D. and Nie M.** (2011). Comparison and practical implementation of type-reduction algorithms for type-2 fuzzy sets and systems. *In Proc. IEEE*

Int. Conf. Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE '11, Taipei, Taiwan, pp. 2131 - 2138.

- [84] **Greenfield S., Chiclana F., John R.** (2009). Type-reduction of the discretised interval type-2 fuzzy set. *In Proc. IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE '09*, Jeju Island, Korea, pp.738-743.
- [85] **Liang Q. and Mendel J. M.** (2000). Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 8(5), pp. 535-550.
- [86] **Hsiao M.-Y. and Li T.-H. S.** (2006). Design of interval type-2 fuzzy logic controller. *In Proc. IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics SMC '06*, 6, pp. 4976-4981.
- [87] **Chen X. T. and Tan W. W.** (2010). A type-2 fuzzy logic controller for dynamic positioning systems. *In Proc. 8th IEEE International Conference on Control and Automation*, pp. 1013–1018.
- [88] **Figuerola J., Posada J., Soriano J., Melgarejo M., and Rojas S.** (2005). A type-2 fuzzy logic controller for tracking mobile objects in the context of robotic soccer games. *In Proc. The 14th IEEE International Conference on Fuzzy Systems FUZZ '05*, pp. 359–364.
- [89] **Celikyilmaz A., Türksen I. B.** (2009). Modeling Uncertainty with Fuzzy Logic: With Recent Theory and Applications. Verlag Berlin Heidelberg, Springer.
- [90] **Mendel J.M., John R. I., Liu F.** (2006). Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 14, pp. 808-821.
- [91] **Mendel J.M., Liu F.** (2007). Super-exponential convergence of the Karnik–Mendel algorithms for computing the centroid of an interval type-2 fuzzy set. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 15 (2), pp. 309-320.
- [92] **Oh S. K., Jang H. J., Pedrycz W.** (2011). A comparative experimental study of type-1/type-2 fuzzy cascade controller based on genetic algorithms and particle swarm optimization. *Expert Systems with Applications*, 38 (9), pp. 11217-11229.
- [93] **Zadeh L. A.** (1997). Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. *Fuzzy Sets and Systems*, 90 (2), pp. 111-127.
- [94] **Aja-Fernandez S., Alberola-Lopez C.** (2003). Inference with fuzzy granules for computing with words: a practical viewpoint. *In Proc. The 12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, 1, pp. 566- 571.
- [95] **Mencar C., Fanelli A. M.** (2008). Interpretability constraints for fuzzy information granulation. *Information Sciences*, 178 (24), pp. 4585-4618.
- [96] **Mendel J. M.** (2007). Computing with words and its relationships with fuzzistics. *Information Sciences*, 177 (4), pp. 988-1006.
- [97] **Ozer M.** (2011). An application of fuzzy information granulation in the emerging area of online sports. *Expert Systems with Applications*, 38 (4), pp. 4514-4521.

- [98] **Yu F., Pedrycz W.** (2009). The design of fuzzy information granules: Tradeoffs between specificity and experimental evidence. *Applied Soft Computing*, 9 (1), pp. 264-273.
- [99] **Zadeh L. A.** (1999). From computing with numbers to computing with words. From manipulation of measurements to manipulation of perceptions. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 46 (1), pp. 105-119.
- [100] **Ulu C., Güzelkaya M., Eksin I.** (2011). Granular Interval Type-2 Membership Functions and Modeling Application on a Nonlinear System. In *Proc. The 12th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics*, November 21-22, Budapest, Hungary, pp. 397-402.
- [101] **Pedrycz W., Skowron A., Kreinovich V.** (eds.) (2008). Handbook of Granular Computing. Chichester, John Wiley & Sons.
- [102] **Bargiela A., Pedrycz W.** (2003). Recursive information granulation: aggregation and interpretation issues. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B* 33, pp. 96–112.
- [103] **Bargiela A., Pedrycz W.** (2005). Granular mappings. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans* 35 (2), pp. 292- 297.
- [104] **Castillo O., Melin P., Pedrycz W.** (2011). Design of interval type-2 fuzzy models through optimal granularity allocation. *Applied Soft Computing* 11 (8), pp. 5590-5601.
- [105] **Hu H., Shi Z.** (2009). Machine learning as Granular Computing. In *Proc. IEEE International Conference on Granular Computing, GRC '09*, pp. 229 – 234
- [106] **Jaulin L., Kieffer M., Didrit O., Walter E.** (2001). Applied Interval Analysis. London, Springer.
- [107] **Lin T. Y.** (2001). Granular Fuzzy Sets: A View from Rough Set and Probability Theories. *International Journal of Fuzzy Systems* 3 (2), pp. 373-381.
- [108] **Pawlak Z., Skowron A.** (2007). Rudiments of rough sets. *Information Sciences*, 177 (1), pp. 3–27.
- [109] **Wu W. Z., Zhang M., Li H. Z.** (2005). Knowledge reduction in random information systems via Dempster-Shafer theory of evidence. *Information Sciences*, 174 (3-4), pp. 143–164.
- [110] **Xu R., Wunsch D.** (2005). Survey of clustering algorithms. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 16 (3), pp. 645–678.
- [111] **Pedrycz A., Hirota K., Pedrycz W., Dong F.** (2012). Granular representation and granular computing with fuzzy sets. *Fuzzy Sets and Systems*, 203, pp. 17–32.
- [112] **Kundu S.** (2001). The normal form of a granular fuzzy function. *Fuzzy Sets and Systems*, 124 (1), pp. 97–107

- [113] **Mackey M., Glass L.** (1977). Oscillation and chaos in physical control system. *Science*, 197, pp. 287–289.
- [114] **Begian M. B., Melek W. W., Mendel J. M.** (2008). Stability analysis of type-2 fuzzy systems. In *Proc. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE' 08*. (IEEE World Congress on Computational Intelligence), Hong Kong, pp. 947-953.
- [115] **Nocedal J., Wright S. J.** (2006). Numerical Optimization 2nd ed., New York, Springer.
- [116] **Greenfield S., John R., Coupland S.** (2005). A novel sampling method for type-2 defuzzification. In *Proc. UK Workshop on Computational Intelligence, UKCI 05*, London, England, pp. 120-127.
- [117] **Greenfield S., Chiclana F., John R., Coupland S.** (2012). The sampling method of defuzzification for type-2 fuzzy sets: Experimental evaluation. *Information Sciences*, 189, pp. 77-92.
- [118] **Bernal H., Duran K., Melgarejo M.** (2008). A comparative study between two algorithms for computing the generalized centroid of an interval type-2 fuzzy set. In *Proc. IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence), FUZZ-IEEE '08*, Hong Kong, pp. 954-959.
- [119] **Duran K., Bernal H., Melgarejo M.** (2008). Improved iterative algorithm for computing the generalized centroid of an interval type-2 fuzzy set. In *Proc. Annual meeting of the North American Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS '08*, New York, pp. 1-5.
- [120] **Liu X., Qin Y., Wu L.** (2012). Fast and direct Karnik-Mendel algorithm computation for the centroid of an interval type-2 fuzzy set. In *Proc. IEEE Int. Conf. Fuzzy Systems, FUZZ-IEEE'12*, Brisbane, Australia, pp.1-8.
- [121] **Liu F.** (2008). An efficient centroid type-reduction strategy for general type-2 fuzzy logic system. *Information Sciences*, 178 (9), pp. 2224-2236.
- [122] **Mendel J. M., Liu F., Zhai D.** (2009). α -Plane representation for type-2 fuzzy sets: Theory and applications. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 17 (5), pp. 1189-1207.
- [123] **Rezaee B.** (2008). Enhanced interval type2 FLS with improved the output processing using uncertainty bounds. *Engineering Letters*, 13 (2), pp. 138-147.
- [124] **Castro J. R., Castillo O., and Melin P.** (2007). An interval type-2 fuzzy logic toolbox for control applications. In *Proc. IEEE International Fuzzy Systems Conference*, pp. 1-6.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Cenk ULU

Doğum Yeri ve Tarihi: Çekerek 20.08.1981

E-Posta: cenkulu@gmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği

Yüksek Lisans : İstanbul Teknik Üniversitesi, Kontrol ve Otomasyon Müh.

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

2007 - ... TUBİTAK Marmara Araştırma Merkezi, Enerji Enstitüsü
(Uzman Araştırmacı)

Yayın ve Patent Listesi:

- **Cenk Ulu**, İbrahim Eksin, Müjde Güzelkaya. Bulanık Kontrolör Tasarımında Üyelik Fonksiyonlarının Dilsel Biçimlendiricilerle Çevrimiçi Ayarlanması. *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı (TOK 2008)*, sayfa 376-381, 13-15 Kasım 2008, İstanbul.
- **Cenk Ulu**, E. Utku Genç, İlter Hancıoğlu, M. Ufuk Altunkaya, Onur Canbak, Eren Özsu. MOSA: Modüler İnsansız Sualtı Aracı. *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı (TOK 2011)*, sayfa 537-543, 14-16 Eylül 2011, İzmir.
- **Cenk Ulu**, Yasser El-Kahlout, İlter Hancıoğlu, Onur Canbak, E. Utku Genç, D. Mehmet Bahar. Madenlerde Kullanılan Arama ve Kurtarma Robotu Tasarımı. *Otomatik Kontrol Türk Milli Komitesi Ulusal Toplantısı (TOK 2012)*, sayfa 590-596, 11-13 Ekim 2012, Niğde.
- **Cenk Ulu**, Güven Kömürgöz. Rüzgar Türbini Uygulamaları için 500 kW Çift Beslemeli Asenkron Generatör Tasarımı. *Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO 2012)*, sayfa 46-50, 29 Kasım - 01 Aralık 2012, Bursa.
- **Cenk Ulu**, Yasser El-Kahlout, İlter Hancıoğlu, Onur Canbak, E. Utku Genç, D. Mehmet Bahar. Design of an Inspection Robot for Search and Rescue Operations in Mines. *23rd International Mining Congress and Exhibition of Turkey (IMCET 2013)*, pages 1913-1921, 16-19 April 2013, Antalya.
- **Cenk Ulu**, Müjde Güzelkaya, İbrahim Eksin. A New Approach to an Exact Inversion of TSK Fuzzy Systems. *The International Conference on Technological Advances in Electrical, Electronics and Computer Engineering (TAECE 2013)*, pages 264-267, 9-11 May 2013, Konya.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

- **Ulu C.**, Guzelkaya M., Eksin I. 2011. A Dynamic Defuzzification Method for Interval Type-2 Fuzzy Logic Controllers. *IEEE International Conference on Mechatronics (ICM' 11)*, April 13-15, 2011 Istanbul, Turkey, pp. 318-323
- **Ulu C.**, Guzelkaya M., Eksin I. 2011. Granular Interval Type-2 Membership Functions and Modeling Application on a Nonlinear System. *The 12th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI' 11)*, November 21-22, 2011, Budapest, Hungary, pp. 397-402.
- **Ulu C.**, Guzelkaya M., Eksin I. 2012. A New Type Reduction Method for Piecewise Linear Interval Type-2 Fuzzy Sets. *2nd World Conference on Soft Computing*, December 3-5, 2012, Baku, Azerbaijan, pp. 494-498.
- Ulu C.**, Guzelkaya M., Eksin I. 2013. Granular Type-2 Membership Functions: A New Approach to Formation of Footprint of Uncertainty in Type-2 Fuzzy Sets. *Applied Soft Computing*, Available online 19 April 2013.