

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİP-II BULANIK MANTIK VE KAYMA KİPLİ KONTROL
YÖNTEMLERİ İLE
SERVO SİSTEMLERİN DAYANIKLI KONTROLÜ**

Ayhan ALTINÖRS

Tez Yöneticisi
Prof. Dr. Z.Hakan AKPOLAT

DOKTORA TEZİ
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

ELAZIĞ, 2007

T.C.
FIRAT ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**TİP-II BULANIK MANTIK VE KAYMA KİPLİ KONTROL
YÖNTEMLERİ İLE
SERVO SİSTEMLERİN DAYANIKLI KONTROLÜ**

Ayhan ALTINÖRS

Tez Yöneticisi
Prof. Dr. Z.Hakan AKPOLAT

Doktora Tezi
ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

Bu tez, 28/09/2007 tarihinde aşağıda belirtilen jüri tarafından oybirliği /oyçokluğu ile başarılı / başarısız olarak değerlendirilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT

Üye: Prof. Dr. Hanifi GÜLDEMİR

Üye: Prof. Dr. Ömer Faruk BAY

Üye: Prof. Dr. Hasan KÜRÜM

Üye: Yrd. Doç. Dr. Mehmet İlyas BAYINDIR

Bu tezin kabulü, Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun/...../..... tarih ve sayılı kararıyla onaylanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasını gerçekleştirirken bilgi ve birikimlerini benimle paylaşan, yol gösteren ve büyük destek veren danışmanım Sayın Prof. Dr. Z. Hakan AKPOLAT'a ve ailesine gösterdikleri sabır ve anlayıştan dolayı çok teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmaların yapılması sırasındaki desteklerinden dolayı Öğr.Gör.Dr.Cafer BAL'a çok teşekkür ederim.

Doktora çalışmam boyunca gerek bilimsel gerekse manevi olarak sürekli paylaşım ve desteklerini gördüğüm Prof.Dr. Hanifi GÜLDEMİR'e, Yrd.Doç.Dr.Mehmet ÖZDEMİR'e, Yrd.Doç.Dr.M.İlyas BAYINDIR'a, Öğr.Gör.Dr.Mustafa KAYA'ya, Öğr.Gör.Haluk EREN'e çok teşekkür ederim.

Büyük bir sabırla tez çalışmamın bitmesini bekleyen, sürekli moral veren ve manevi olarak destekleyen eşime ve kızıma çok teşekkür ederim.

Ayrıca, mesai arkadaşlarıma ve aile büyüklerime teşekkür ederim

Ayhan ALTINÖRS

İÇİNDEKİLER

Sayfa

İÇİNDEKİLER	I
ŞEKİLLER LİSTESİ	III
TABLolar LİSTESİ	VI
EKLER LİSTESİ	VII
SİMGELER LİSTESİ	VIII
KISALTMALAR LİSTESİ	X
ÖZET	XI
ABSTRACT	XII
1 GİRİŞ	1
1.1 Kayma Kipli Kontrol Yöntemi (KKK)	2
1.2 Tip-2 Bulanık Mantık Sistemler (T2BMS)	3
1.3 Tez Çalışmasının Amacı ve İçeriği	3
2 KAYMA KİPLİ KONTROL	5
2.1 Kayma Kipli Kontrol Yöntemi	5
2.2 Klasik Lyapunov Yaklaşımli KKK Tasarımı	5
2.3 Erişim Kuralı Yaklaşımı (EKY)	9
2.4 KKK Yönteminde Çatırtı Problemi	11
2.4.1 KKK'de Çatırtıya Karşı Süreklileştirme Yaklaşımı (Sınır Tabakası)	12
2.5 Ayrık Zaman KKK	15
2.6 Kayma Kipli Bulanık Kontrolörler	16
2.7 Kayma Kipli Motor Hız Kontrol Sistemleri	19
3 BULANIK MANTIK TABANLI SİSTEMLER	22
3.1 Bulanık Mantık Nedir ?	22
3.2 Bulanık Mantık Uygulamalarının Kısa Bir Tarihçesi	23
3.3 Bulanık Kontrolörlerin Yapısı	24
3.3.1 Bulandırıcı	24
3.3.2 Kural Tabanı	25
3.3.3 Çıkarım Mekanizması	26
3.3.4 Durultucu	27
3.4 Takagi-Sugeno-Kang (TSK) Tipi Bulanık Kontrolörler	28
3.5 Singleton ve Non-Singleton Bulanık Sistemler	28
3.6 Tip-2 Bulanık Mantık	29
3.6.1 Belirsizlik Kavramı ve Tip-2 Üyelik Fonksiyonları	29
3.6.2 Tip-2 Bulanık Kümelerle İlgili Tanımlar	31
3.6.3 Tip-2 Bulanık Kümeler Üzerinde İşlemler	35
3.6.4 Tip-2 Bulanık Kümelerde Tip İndirgeme	39
3.7 Tip-2 Bulanık Sistemler	42
3.7.1 Singleton Tip-2 Bulanık Mantık Sistemler	45
3.7.2 Tip-1 Non-singleton Tip-2 Bulanık Mantık Sistemler	49
3.7.3 Tip-2 Non-singleton Tip-2 Bulanık Mantık Sistemler	56
3.7.4 Tip-2 TSK Bulanık Mantık Sistemler	64
3.8 Tip-1 ve Tip-2 Bulanık Mantık Sistemlerin Karşılaştırılması	66
4 GELİŞTİRİLEN YENİ TIP-2 BULANIK KAYMA KİPLİ KONTROLÖR	67
4.1 Önerilen Tip-2 Bulanık KKK'nın Yapısı	67
4.2 KKK ile Önerilen Tip-2 Bulanık KKK Sisteminin Performans Karşılaştırması	72
4.2.1 Kontrol Parametrelerinin Uyarlanması	73
4.2.2 Simulasyon Sonuçları	75
4.3 Deneysel Gerçekleştirme ve Sonuçlar	81

4.4	Deney Düzeneği.....	92
5	SONUÇ	95
5.1	Sonuçların Tartışılması.....	95
5.2	Öneriler.....	95
	KAYNAKLAR	97
	EK-1 DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN ASENKRON MOTORUN ETİKET	
	VE PARAMETRE BİLGİLERİ	101
	ÖZGEÇMİŞ	102

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 İkinci derece bir sistem için erişim ve kayma kipleri	7
Şekil 2.2 İdeal olmayan bir kontrol anahtarlama sonucunda ikinci derece bir sisteme ait faz düzlemi.	12
Şekil 2.3 Parametre değişimi ve bozucu etkisi altında olmayan ikinci derece KKK sistemin tipik faz yüzeyi	13
Şekil 2.4 Sınır tabakalı kontrol girişinin (u_{eq} haricinde) transfer karakteristiği	13
Şekil 2.5 Kapalı çevrim hata dinamiklerinin yapısı	15
Şekil 2.6 Bulanık kontrolörün Kural Tabanı	17
Şekil 2.7 Sınır Tabakalı KKK'nın transfer karakteristiği	18
Şekil 2.8 (a)KKBK Transfer Karakteristiği (Yüksek geçici durum dinamiklerin varlığında gürültü performansı sağlamak için düşük sürekli durum kazancı) (b)KKBK Transfer Karakteristiği (Hızlı şekilde bozucu engellemek için yüksek sürekli durum kazancı)	18
Şekil 2.9 Sınır Tabakalı KKK ve diagonal form bulanık kontrolör için sınır tabakası	19
Şekil 2.10 KKK'nın hız kontrol sistemlerinde gerçekleştirilmesi için İntegral Kompanzasyonlu Kayma Kipli Kontrol (İK-KKK) yaklaşımının kullanılması.	20
Şekil 2.11 KKK'nın hız kontrol sistemlerinde gerçekleştirilmesi için İntegral Kayma Kipli Kontrol (İKKK) veya İntegral Değişken Yapılı Kontrol (İDYK) yaklaşımının kullanılması.	21
Şekil 3.1 Keskin küme mantığında yaşa göre kümeleme işlemi	22
Şekil 3.2 Bulanık küme mantığında yaşa göre kümeleme işlemi	22
Şekil 3.3 Tip-1 Bulanık kontrolörün temel yapısı.....	24
Şekil 3.4 Giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları a) hata b) hatadaki değişim.....	25
Şekil 3.5 Çıkış değişkeni u için üyelik fonksiyonu	26
Şekil 3.6 (a) Belirtilmiş çıkış bulanık kümeleri (b) Sonuç çıkış bulanık kümesi $\mu_{out}(u)$	27
Şekil 3.7 a) Tip-1 üyelik fonksiyonu b) Yayılmış şekilde tip-1 üyelik fonksiyonu	30
Şekil 3.8 Tip-2 Üyelik Fonksiyonuna Örnek	31
Şekil 3.9 Tip-2 Bulanık Kümesi için FOU.....	34

Şekil 3.10 Bir Tip-2 Bulanık Mantık Sistemi çok sayıda gömülü tip-1 bulanık mantık sisteminin bir araya toplanmış hali olarak düşünülebilir.....	40
Şekil 3.11 Tip-2 Bulanık Mantık Sistemi	42
Şekil 3.12 Aralık singleton tip-2 bulanık mantık sistem için giriş varsayım işlemi sonucu.	48
Şekil 3.13 Aralık singleton tip-2 bulanık mantık sistem için sonuç (consequent) işlemi neticesi.	49
Şekil 3.14 Aralık tip-1 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistem için sonuç işlemi neticesi.....	54
Şekil 3.15 Giriş tip-1 Gaussian üyelik fonksiyonunun farklı konumlarının varsayım FOU ile ilişkisi (Giriş üyelik fonksiyonunun merkezi x'_k gibi bir noktadır.).....	56
Şekil 3.16 Aralık tip-2 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistemler için giriş-varsayım işlemi	60
Şekil 3.17 Çarpım t-norm kullanılarak giriş-varsayım işlemi (a) singleton tip-1 (b) non-singleton tip-1 (c) aralıklı singleton tip-2 (d) aralıklı tip-1 non-singleton tip-2 (e) aralıklı tip-2 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistemler	61
Şekil 3.18 Giriş FOU'nun farklı konumlarının varsayım FOU ile ilişkisi (Geniş olan FOU varsayımına ait iken diğer FOU girişe aittir. Girişe ait FOU'nun merkezi x'_k gibi bir noktadır.).....	62
Şekil 4.1 Kapalı çevrim sayısal hız kontrol sistemi	67
Şekil 4.2 Aralık Tip-2 Varsayım Bulanık Kümeler	70
Şekil 4.3 20 saniyelik uyarılama periyodu boyunca hatanın e_1 ($\omega_n - \omega$) değişimi.....	74
Şekil 4.4 (a) KKK ve T2BKK'ün $J = J_n$, $B = B_n$ için, $\omega_{ref}(k) = 150$ rad/s'lık bir basamak referansa verdikleri çıkış cevapları ($t = 2$ s'de $T_L = 3$ Nm'lik bir basamak yük momenti de uygulanmıştır.) (b) KKK ve T2BKK sistemlerinin elektriksel moment sinyalleri	76
Şekil 4.5 (a) KKK ve T2BKK'ün $J = 5 \times J_n$, $B = 5 \times B_n$ için, $\omega_{ref}(k) = 150$ rad/s'lık bir basamak referansa verdikleri çıkış cevapları ($t = 2$ s'de $T_L = 3$ Nm'lik bir basamak yük momenti de uygulanmıştır) (b) KKK ve T2BKK sistemlerinin elektriksel moment sinyalleri	77
Şekil 4.6 (a) KKK ve T2BKK'ün $J = 30 \times J_n$, $B = 30 \times B_n$ için, $\omega_{ref}(k) = 150$ rad/s'lık bir basamak referansa verdikleri çıkış cevapları ($t = 5$ s'de $T_L = 3$ Nm'lik bir basamak yük momenti de uygulanmıştır.) (b) Şekil 4.5.(a)'nın büyütülmüş hali (c) KKK ve T2BKK sistemlerinin elektriksel moment sinyalleri	79
Şekil 4.7 (a) KKK ve T2BKK sistemlerinin $t \geq 2$ s ($\omega_{ref}(k) = 20$ rad/s ve $J = 10 \times J_n$, $B = B_n$ için ($T_L(t) = 3 \sin(2\pi t)$) şeklinde değişen bir sinüsoidal yük momentine verdikleri çıkış cevapları (b) KKK ve T2BKK sistemlerinin elektriksel moment sinyalleri.....	80

Şekil 4.8 Deneysel sistemin nominal parametreleri için KKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak)	82
Şekil 4.9 Deneysel Sistemin Nominal Parametreleri için KKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak’ dan 2000 dev/dak’ya çıkarılıyor)	83
Şekil 4.10 Deneysel Sistemin Nominal Parametreleri için KKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 2000$ dev/dak’ dan 0 dev/dak’ya düşürülüyor)	84
Şekil 4.11 Deneysel sistemin nominal parametreleri için T2BKKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak)	85
Şekil 4.12 Deneysel sistemin nominal parametreleri için T2BKKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak’ dan 2000 dev/dak’ya çıkarılıyor)	86
Şekil 4.13 Deneysel sistemin nominal parametreleri için T2BKKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 2000$ dev/dak’ dan 0 dev/dak’ya düşürülüyor)	87
Şekil 4.14 Deneysel sistemin atalet momenti eklenen disk ile nominal değerin yaklaşık 4 katına çıkarıldığında KKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak)	88
Şekil 4.15 Deneysel Sistemin Atalet Momenti eklenen disk ile nominal değerin yaklaşık 4 katına çıkarıldığında T2BKKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak)	89
Şekil 4.16 Basamak bir yük momenti uygulandığında KKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) moment akım cevabı	90
Şekil 4.17 Basamak bir yük momenti uygulandığında T2BKKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) moment akım cevabı	91
Şekil 4.18 Deney düzeneğinin blok diyagramı	92
Şekil 4.19 Deneysel gerçekleştirme için oluşturulan MATLAB/Simulink modeli	94

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 3.1 e (k) =30 ve $\delta e(k) = -15$ giriş değerleri için bulanıklaştırma sonuçları	25
Tablo 3.2 Kural tabanı	26
Tablo 3.3 Şekil 3.16 için $\bar{x}_{k,\max}^{-l}$ değerleri	55
Tablo 3.4 Şekil 3.16 için çarpım t-norm'a bağlı olarak $\underline{x}_{k,\max}^l$ değerleri.....	55
Tablo 3.5 Şekil 3.16 için minimum t-norm'a bağlı olarak $\underline{x}_{k,\max}^l$ değerleri	55
Tablo 3.6 Şekil 3.19 için $\bar{x}_{k,\max}^{-l}$ değerleri	63
Tablo 3.7 Şekil 3.19 için çarpım t-norm'a bağlı olarak $\underline{x}_{k,\max}^l$ değerleri.....	63
Tablo 3.8 Şekil 3.19 için minimum t-norm'a bağlı olarak $\underline{x}_{k,\max}^l$ değerleri	63
Tablo 3.9 Tip-1 ve Tip-2 BMS'lerinin karşılaştırılması	66
Tablo 4.1 Uyarılama işleminden sonra elde edilen kontrol parametreleri	74
Tablo EK-1.1 Deneysel çalışmada kullanılan asenkron motorun etiket ve parametre bilgileri	101

EKLER LİSTESİ

EK-1 DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN ASENKRON MOTORUN ETİKET VE
PARAMETRE BİLGİLERİ

SİMGELER LİSTESİ

X, X_k	: Sürekli ve ayrık zamanda durum değişken vektörü
$\dot{X}$	: Durum değişken vektörü
x	: Durum değişkeni
e	: Hata vektörü
$\dot{e}$	: Hatanın değişimi
A	: Durum değişken matrisi
A_n	: Durum değişken matrisi (nominal parametrelerle)
B	: Kontrol giriş matrisi
B_n	: Kontrol giriş matrisi (nominal parametrelerle)
$u, u_{\max}$	: Kontrol işareti, maksimum değeri
ΔA	: Durum değişken matrisinin belirsiz kısmı
$f(t)$	: Genel bozucu girişi
T	: Örnekleme periyodu
S, S_k	: Sürekli ve ayrık zamanda kayma kipli kontrol anahtarlama fonksiyonu
C	: Kayma Kipli kontrolün anahtarlama fonksiyonu kazanç vektörü
L	: Toplam belirsizlik
μ	: Üyelik fonksiyonu
$\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$	: Üst üyelik fonksiyonu
$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$	: Alt üyelik fonksiyonu
$\tilde{A}$	: Tip-2 bulanık kümesi
$\tilde{A}_e$	: Gömülü küme (embeded)
$\star$	: genel t-normu
φ	: t-conorm fonksiyonu
$\sqcup$	: katılma (join) işlemi
Π	: buluşma (meet) işlemi
$\neg$	: olumsuzluk (negation) işlemi
$\overline{\tilde{A}}$	: $\tilde{A}$, tip-2 bulanık kümesinin tümleyeni
C_A	: Tip-1 bulanık kümesinin ağırlık merkezi
$C_{\tilde{A}}$	: Tip-1 bulanık kümesinin ağırlık merkezi
$Y_h(x)$	: Yükseklik yöntemi kullanılmış tip indirgeyici çıkışı
$Y_c(x)$	: Ağırlık merkezi kullanılmış tip indirgeyici çıkışı

$Y_a(x)$: Toplamların merkezi yöntemi kullanılmış tip indirgeyici çıkışı

$Y_{mh}(x)$: Uyarlanmış yükseklik yöntemi kullanılmış tip indirgeyici çıkışı

$Y_{cos}(x)$: Kümelerin merkezi yöntemi kullanılmış tip indirgeyici çıkışı

X : Giriş uzayı

Y : Çıkış uzayı

R^l : Kurallar

l : Kural sayısı ($l = 1, \dots, M$)

k : Varsayım sayısı ($k = 1, \dots, p$)

$\underline{f}^l$: Alt kural kesinlik derecesi

$\overline{f}^l$: Üst kural kesinlik derecesi

$Y_{TSK,2}(x)$: Tip-2 Sugeno bulanık mantık sistemin çıkışı

$\tilde{F}_1^i$: Aralık tip-2 varsayım bulanık kümesi

C_1^i : Aralık tip-1 sonuç bulanık kümesi

J : Atalet momenti

B : Sürtünme katsayısı

T_L : Yük momenti

KISALTMALAR LİSTESİ

BM	: Bulanık Mantık
BMK	: Bulanık Mantık Kontrolörü
BMS	: Bulanık Mantık Sistemi
DYK	: Değişken Yapılı Kontrol
EKKY	: Erişim Kuralı Kontrol Yaklaşımı
EKY	: Erişim Kuralı Yaklaşımı
FOU	: Belirsizliğin Ayak İzleri (footprint of uncertainty)
İDYK	: İntegral Değişken Yapılı Kontrol
İK-KKK	: İntegral Kompanzasyonlu Kayma Kipli Kontrol
İKKK	: İntegral Kayma Kipli Kontrol
KK	: Kayma Kipli
KKBK	: Kayma Kipli Bulanık Kontrolör
KKK	: Kayma Kipli Kontrol (Sliding Mode Control)
ST	: Sınır Tabakası
TSK	: Takagi-Sugeno-Kang
T2BKkk	: Tip-2 Bulanık Kayma Kipli Kontrolör

ÖZET

Doktora Tezi

TİP-II BULANIK MANTIK VE KAYMA KİPLİ KONTROL YÖNTEMLERİ İLE SERVO SİSTEMLERİN DAYANIKLI KONTROLÜ

Ayhan ALTINÖRS

Fırat Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

2007, Sayfa: 100

Bu tezde, elektriksel sürücülerin dayanıklı hız kontrolü için yeni bir kontrol tasarımı sunulmaktadır. Önerilen kontrol metodu, tip-2 bulanık mantık (T2BM) ve kayma kipli kontrol tekniği (KKK) üzerine kurulmuştur. Önerilen kontrolörün tasarımında bir kayma kipli kontrol tasarım yöntemi olan erişim kuralı kontrol yaklaşımı (EKKY) kullanılmıştır. Kontrol uygulamalarına daha elverişli olması sebebiyle, Takagi-Sugeno-Kang (TSK) bulanık sistemi ve aralık tip-2 bulanık küme tercih edilmiştir. Belirsizlikler üzerindeki etkinliği nedeniyle Non-singleton bulanıklaştırma uygulanmıştır. Kontrol performansı, atalet ve sürtünmeye bağlı değişimler ve harici yük moment bozucuları altında test edilmiştir. Yeni kontrol yaklaşımının etkinliğini göstermek için KKK ve tip-2 bulanık KKK (T2BKKK) sistemlerin simulasyon ve deneysel sonuçları beraber sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Tip-2 bulanık mantık, kayma kipli kontrol, erişim kuralı kontrol yaklaşımı, sürücü kontrolü, dayanıklı kontrol, hız kontrolü.

ABSTRACT

PhD Thesis

ROBUST CONTROL OF SERVO SYSTEMS USING TYPE-2 FUZZY LOGIC AND SLIDING MODE CONTROL METHODS

Ayhan ALTINÖRS

Firat University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Electrical and Electronic Engineering

2007, Page: 100

In this thesis, a new control scheme is presented for the robust speed control of electrical drives. The proposed control method is based on Type-2 Fuzzy Logic and Sliding Mode Control (SMC) techniques. In the design of the proposed controller, Reaching Law Control (RLC) approach (which is a SMC design method) is used. Takagi-Sugeno-Kang (TSK) fuzzy system and interval type-2 fuzzy sets are preferred due to their suitability for control applications. Non-singleton fuzzification is employed because of its effectiveness on uncertainties. The control performance is tested under inertial-frictional variations and external load torque disturbances. In order to show the effectiveness of the new control approach, simulation and experimental results of the SMC and Type-2 Fuzzy SMC (T2FSMC) systems are presented together.

Keywords : Type-2 fuzzy logic, sliding mode control, reaching law control, drive control, robust control, speed control.

1 GİRİŞ

Teknoloji, insanların ihtiyaçlarının artmasına paralel olarak çok büyük bir hızla gelişim göstermektedir. Bu gelişim, elektrik-elektronik ve kontrol teknolojisinde de araştırma ve geliştirme çalışmaları şeklinde sürmektedir. Üretimin her safhasında bir işlem ve süreç kontrolü rol oynamaktadır. Elektriksel sürücü sistemleri ve bu sistemlerin kontrolü de bu teknolojinin önemli parçalarından biridir. Endüstriyel tesislerde, işlem yapan mekanizmaların (motor, valf, silindir vs. gibi) en iyi şekilde çalışması üretimin de en iyi olması anlamına gelir. Bu mekanizmaların iyi çalışması, mekanizmalara ait sürücü sistemlerinin iyi kontrol edilmesi ile olur. Bu sebeple araştırmacılar sürekli yeni teknikler geliştirmeye çalışmaktadırlar [1].

Sürücü sistemlerinin kontrolünde karşımıza çıkan en önemli problem “belirsizlikler”dir [2]. Örnek olarak, deneysel bir aşamada belirsizlik, tüm ölçme ve ölçme hatalarının bir parçasıdır. Yine belirsizlik, anlama-kavrama aşamasında konuşulan dilin esnekliğinden yani bir durum ifade edilirken seçilen kelimeler, ifade edilmek istenilen mana dışında bir anlamayla ortaya çıkabilir. Ayrıca, çözülecek bir problem ile ilgili bilgi yetersizliği ve eksikliği de belirsizlik durumuna başka bir örnektir. Eğer problem yanlış algılanmışsa çözüm de yanlış olacaktır. Belirsizlik hayatı ilginç hale getiren bir durumdur. Belirsizlikler olmasaydı monoton bir hayat olurdu fakat belirsizliklerle de hayat bazen zorlaşmaktadır. İnsanlar belirsizliklerin etkisini azaltmak için türlü stratejiler geliştirmişlerdir. Tip-2 Bulanık Mantık Teorisinde de böyle bir strateji vardır [3].

Kontrol edilen bir sistemdeki parametre değişimlerine, modellenmemiş dinamiklere ve harici bozucu girişlere karşı istenen performansı muhafaza eden veya kabul edilebilir sınırlar içerisinde tutan kontrol sistemine “dayanıklı kontrol sistemi” ve bu sistemdeki kontrolöre de “dayanıklı kontrolör” denir [4,5].

Bu tezde, özellikle belirsizlikler üzerindeki etkinliğinden dolayı Tip-2 Bulanık Mantık ve dayanıklı kontrol yöntemleri arasında en etkili ve uygulanabilir yöntemlerden biri olması açısından Kayma Kipli Kontrol (KKK) tekniğinin bir arada kullanılarak geliştirildiği yeni bir kontrolör yapısı sunulmaktadır.

Bir servo sistemde elektrik motorunun dayanıklı (robust) hız veya konum kontrolü, mekanik ve elektriksel parametre değişimleri, gürültü ve bozucu girişler karşısında kontrol performansının kabul edilebilir bir düzeyde kalmasını sağlamak demektir. KKK yöntemi dayanıklı hız ve konum kontrolü için yaygın olarak kullanılan yöntemlerden biri olmasına rağmen ayrık zaman gerçekleştirme sorunları nedeni ile tek başına tatmin edici bir kontrol performansı sağlaması çoğu zaman mümkün olmamaktadır [4, 6-10]. Tip-II Bulanık Mantık ve KKK yöntemlerinin birlikte kullanılması sonucunda yeni dayanıklı kontrol yöntemlerinin

geliştirilebileceği rahatlıkla söylenebilir. Nitekim son zamanlarda, kontrol alanında performansı artırmak amacıyla, Tip-II Bulanık Mantık yoğun bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır [11-27, 28-32].

1.1 Kayma Kipli Kontrol Yöntemi (KKK)

Doğrusal olmayan ve model-parametre belirsizlikleri olan sistemlerin kontrolünde kullanılan en etkin yöntemlerden biri Kayma Kipli Kontrol (sliding mode control) veya diğer adıyla değişken yapıli kontrol (variable structure control) yöntemidir [7-9]. Bu yöntemin en büyük dezavantajı kontrolör çıkışının sonsuz hızda bir değerden başka bir değere anahtarlanabileceği veya değiştirilebileceği varsayımdır. Sonsuz hızda değişim pratikte gerçekleştirilmesi imkânsız olan bir varsayımdır. Bunun başlıca sebepleri pratik gerçeklemede kullanılan mikroişlemci için gerekli olan örnekleme periyodunun sonsuz küçüklükte seçilememesi ve fiziksel sistemdeki gecikmelerdir [7]. Kontrolörün çıkışı, sonsuz hızda anahtarlanamadığı için mikroişlemciyle gerçekleştirilen Kayma Kipli Kontrol (KKK), istenen denge noktasında ve kalıcı durumda yüksek frekanslı salınımlara (chattering) sebep olur [7, 8]. Bu durum birçok uygulamada olduğu gibi servo-motor hız ve konum kontrol sistemlerinde de istenmeyen bir durumdur [2]. Çünkü bu yüksek frekanslı titreşimler, sistemin modellenmemiş yüksek frekans dinamiklerini harekete geçirerek mekanik aksamda istenmeyen titreşimlere sebep olur ve servo sistemi kullanılmaz duruma getirir. Bu problemin çözümü için, birçok araştırmacı ve bilim adamı çeşitli yöntemler önermiş ve bazıları da uygulamalı olarak gösterilmiştir [2, 4, 10, 33-42]. Ancak, bu konudaki literatüre bakıldığında üç önemli husus dikkati çekmektedir. Birincisi, kayma kipli kontrol yöntemini ayrı zamanda ele alıp detaylı analiz yapan araştırmacılar genellikle sadece benzetim (simülasyon) sonuçlarını verip geliştirdikleri sistemin pratikteki sistemlere uygulanabilirliğini tartışmamakta ve ihmal etmektedirler [10, 39-41]. Dikkati çeken ikinci husus ise pratikte uygulama yapan araştırmacılar, analizlerini ve tasarımlarını sürekli zamanda yapıp daha sonra deneysel sonuçları sunmaktadırlar [33, 38, 41]. Ne yazık ki sürekli zamanda yapılan analiz ve tasarımların uygulama ile bağdaşması mümkün değildir. KKK yöntemi pratikle teorisinin uyumu açısından mutlaka ayrı zamanda ele alınmalı ve pratikteki sınırlamalar da kesinlikle göz önünde bulundurulmalıdır. Literatürde dikkati çeken üçüncü husus ise, ayrı zamanda KKK yöntemini ele alıp ve uygulamayı da bu analize göre gerçekleştiren araştırmacılar genellikle karmaşık, tasarımı zor, algoritmik olmayan yöntemler sunmaktadırlar [35-37, 42].

1.2 Tip-2 Bulanık Mantık Sistemler (T2BMS)

Özellikle son yıllarda oldukça dikkat çeken araştırma konularından biri de Tip-2 Bulanık Mantık ve uygulamalarıdır [3, 11-32, 43-46]. Bulanık mantığın tarihçesini anlattığımız Bölüm 3.2’de de bahsedileceği gibi bu kavram ilk kez 1975 yılında, Bulanık Mantığın mucidi olan Prof. Lütü Zadeh tarafından tanıtılmıştır [47]. Ancak uygulama zorlukları, konunun yeni oluşu ve Tip-1 Bulanık Mantığa göre daha karmaşık işlemler içermesi nedeni ile araştırmacılar bu konuya başlangıçta yeterli ilgiyi göstermemişlerdir. Özellikle son 7-8 yıl içerisinde, Tip-2 Bulanık mantık konusunda pek çok çalışma başlatılmış ve konuya ilgi giderek artmıştır. Tip-2 Bulanık Mantığın Tip-1’e göre avantajı belirsizlikleri daha iyi modelleyebilmesi ve belirsizlik içeren sistemlerde daha iyi netice vermesidir [3].

Bir bulanık kontrolör, uzman kişilerden alınmış ve düzenlenmiş kurallardan oluşur. Bu kurallar, kelimelerden oluşur ve zaten bulanık mantık da kelimelerle hesaplama için bir metodolojidir. Tip-1 bulanık kontrolörlerde, kurallarda kullanılan kelimelerin anlamları, bir kuralın neticesine bağlı olarak, aktiveştiren ölçümler sebebiyle ve parametrelerin uyarlanması için kullanılan bilgi ile ilgili sebeplerle belirsizlik durumları ortaya çıkmaktadır. Halbuki, Tip-1 bulanık üyelik fonksiyonları seçildiğinde belirsizlikler ortada yoktur. Çünkü tip-1 üyelik fonksiyonları tamamen kesindir. İşte bu noktada belirsizlikleri ele almak amacıyla Tip-2 bulanık mantık teorisi geliştirilmiştir. Tip-2 bulanık mantık teorisinde modellenmek suretiyle kelimelerin anlamındaki belirsizlikler ele alınmaktadır. Normal küme yapısından bulanık küme yapısına geçiş düşünülürse, bir elemanın küme içindeki üyeliğinin tam olarak ‘0’ veya ‘1’ şeklinde belirlenemediği durumlarda bulanık küme kullanıldığı hatırlanır. Benzer şekilde karmaşıklığın artıp üyeliğin $[0,1]$ aralığında kesin bir şekilde belirlenemediği durumda da Tip-2 bulanık küme kullanılmaktadır. Bulanık mantık kümelerinin tipini yükseltmekle belirsizlik kesin hale getirilmektedir. O zaman sonsuz tip bir bulanık küme yapısı kullanılırsa en kesin sonuç elde edilebilir fikri ortaya çıkmaktadır ve doğrudur. Fakat burada dikkate alınması gereken şey, tipi artırmakla bulanık sistemin de zorlaştırılmış olduğudur [3].

1.3 Tez Çalışmasının Amacı ve İçeriği

Bu doktora çalışmasının temel amacı, parametre değişimleri, model belirsizlikleri ve bozucu girişlerin olduğu bir servo sistemde KKK yönteminin performansını Tip-II Bulanık Mantığın belirsizlikleri modelleme yeteneğini kullanarak artırmak ve yeni bir dayanıklı hız/konum kontrol yöntemi geliştirmektir.

Bu tez çalışmasında sırasıyla; 2. Bölümde, Kayma Kipli Kontrol (KKK), 3.Bölümde, Tip-I ve Tip-II Bulanık Mantık Sistemler, 4.Bölümünde yeni geliştirilen kontrolör yapısı ve 5.Bölümde de tez çalışmasından elde edilen genel sonuçlar ve öneriler bulunmaktadır.

2 KAYMA KIPLİ KONTROL

2.1 Kayma Kipli Kontrol Yöntemi

Değişken Yapılı Kontrol (DYK-Variable Structure Control) olarak da bilinen Kayma Kipli Kontrol (KKK) yöntemi, doğrusal olmayan, değişen parametrelere sahip veya harici bozucu girişlerin etkisi altında bulunan sistemlerin kontrolünde kullanılan etkili bir kontrol yöntemidir [4, 7, 9]. Bu kontrol yöntemi, bozucu girişler ve modellenmemiş parametrelerin etkisinin görüldüğü durumlarda belirsizliklerin ve bozucuların sınırları bilindiği sürece dayanıklı bir kontrol sağlar.

KKK terimi ilk önce “değişken yapıli sistemler” konusu içinde ele alınmış olup kısa sürede değişken yapıli kontrol sistemlerinin temel çalışma kipi haline gelmiştir. Pratik olarak değişken yapıli sistemler için tüm tasarım metotları KKK metoduna dayanmaktadır. Derece azaltma özelliği sayesinde, dış bozuculardan ve parametre değişmelerinden etkilenmemesi sebebiyle KKK, belirsiz şartlar altında çalışan karmaşık yüksek dereceli dinamik sistemleri kontrol için çok etkili bir yöntem haline gelmiştir [5].

Sistemlerin kontrolünde karşılaşılan hata durumları ve belirsizlikler aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilir;

- a) Yapılandırılmış (parametrik) belirsizlikler.
- b) Yapılandırılmamış (modellenmemiş dinamikler) belirsizlikler.

Birinci tip belirsizlikler, model içindeki terimlere ait ölçme hatalarına, ikinci tip belirsizlikler ise sistem derecesindeki (eksik kestirim) belirsizliğe karşılık gelir.

Belirsizliklere çözüm getiren yaklaşımlardan biri “dayanıklı kontrol”dür. Dayanıklı kontrole basit bir yaklaşım ise kayma kipli kontrol yöntemidir. Yöntemin temeli, 1. dereceden bir sistemin kontrolünün n.dereceden bir sisteme göre daha kolay olacağı gerçeğine dayanmaktadır. Bununla beraber, n.dereceden problemler 1.dereceden eşdeğer problemlerle değiştirilebilecek şekilde notasyonel bir basitlik ortaya konmuştur [9].

2.2 Klasik Lyapunov Yaklaşımlı KKK Tasarımı

Aşağıda, ikinci dereceden, tek girişli, parametre belirsizliği ve bozucu girişi bulunan sürekli zamanda bir sistem için KKK yönteminin uygulanması anlatılmıştır [7]. Bu tür bir sistemin kanonik formdaki durum denklemlerinin,

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + bu(t) + df(t) = (A_n + \Delta A)x(t) + (b_n + \Delta b)u(t) + (d_n + \Delta d)f(t) \quad (2.1)$$

olarak verildiğini varsayalım.

Burada $x(t) = [x_1(t), \dot{x}_1(t)]^T$ durum vektörü, $u(t)$ kontrol girişi, A_n , b_n ve d_n nominal sistem parametrelerinden oluşan matris ve vektörler, ΔA , Δb ve Δd sistem parametrelerinin bilinmeyen belirsizliğini temsil eden matris ve vektörler, $f(t)$ ise bozucu girişi temsil etmektedir. ΔA , Δb Δd ve $f(t)$ tam olarak bilinmemekle beraber, sınırlı oldukları bilindiğinden (2.1) eşitliği aşağıdaki gibi olur.

$$\dot{x}(t) = A_n x(t) + b_n (u(t) + L(x, t)) \quad (2.2)$$

burada $L(x, t)$ toplam belirsizliği temsil etmektedir ve $L(x, t) = B_p(\Delta A x(t) + \Delta b u(t) + \Delta d f(t))$ dir. Ayrıca $|L(x, t)| \leq L_{\max}$ olarak sınırlıdır ve $B_p = (b_n^T b_n)^{-1} b_n^T$ dir.

Buradaki kontrol problemi, model belirsizlikleri ve bozucu girişler altında, durum vektörü x 'in istenen durum vektörü x^d 'yi takip etmesini sağlayacak u kontrol girişinin ne olması gerektiğini belirlemektir.

İzleme hatasını,

$$e = x - x^d = [e, \dot{e}]^T \quad (2.3)$$

olarak tanımlayalım (t zaman parametresi gösterim kolaylığı açısından kullanılmayacaktır). Anahtarlama fonksiyonu s 'yi

$$s = \lambda e + \dot{e} = C e \quad (2.4)$$

olarak tanımlayalım. Böylece kontrol problemi (x 'in x^d 'yi izlemesi), e hata vektörünün $s=0$ doğrusuna sonlu bir sürede ulaşarak, $1/\lambda$ zaman sabiti ile $e(0)$ orijinine kayarak ulaşması şeklinde tanımlanabilir. Bu kaymayı sağlayacak kontrol girişi u 'yu belirlemek için, bir Lyapunov fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanabilir.

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (2.5)$$

burada $V(0)=0$ dır. İstenen kontrolün sağlanması için gerek ve yeter şart [22],

$$\dot{V} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (s^2) \leq -\eta |s| \quad (2.6)$$

dır. (η pozitif bir sayıdır). (2.6) nolu eşitlikten,

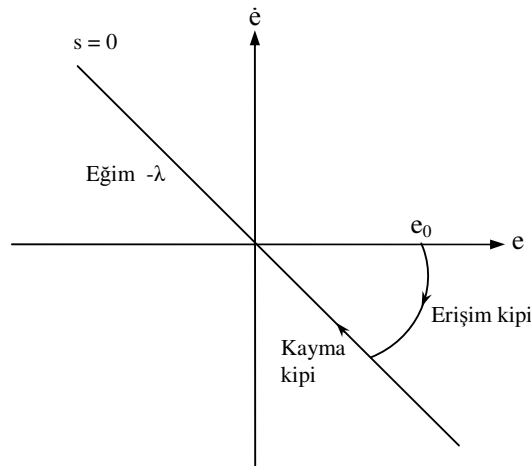
$$\dot{s} \text{sgn}(s) \leq -\eta \quad (2.7)$$

elde edilir. Burada,

$$\text{sgn}(s) = \begin{cases} s > 0 & \text{ise} & +1 \\ s < 0 & \text{ise} & -1 \end{cases}$$

dir. 2.7 Nolu eşitlik, “Erişim Şartı” veya “Kayma Kipinin var olma şartı” olarak bilinir ve eğer bu eşitlik sağlanacak şekilde bir u seçilirse sistem “Kayma kipine” ulaşır. Hata vektörü e , kayma doğrusu $s=0$ ’a eriştikten sonra, sistem parametre değişiklikleri ve bozucu girişlerden etkilenmeksizin, bu doğru üzerinden kayarak orijine ulaşır. Bu olaya kayma kipi denir. Erişim kipi ise, $s=0$ kayma doğrusuna erişme hareketi olarak tanımlanır.

Şekil 2.1, ikinci derece bir sistem için erişim ve kayma kiplerini göstermektedir ($e(0)=[e_0, 0]^T$).



Şekil 2.1 İkinci derece bir sistem için erişim ve kayma kipleri

Kayma kipinde eşdeğer kontrol yaklaşımı, $\dot{s} = 0$ olmaktadır. Bu eşitlikten elde edilen u “eşdeğer kontrol kuralı”, parametreler tam olarak bilindiğinde, $\dot{s} = 0$ eşitliğini sağlayan sürekli bir kontrol kuralıdır. Buna göre, parametre değişiklikleri ve bozucu girişlerin olmadığını varsayarak (2.1) eşitliği ile ifade edilen sistem,

$$\dot{x} = A_n x + b_n u \quad (2.8)$$

ile temsil edilir. (2.4) eşitliğinden $\dot{s} = 0$ elde edilir ve bu eşitliklerde (2.3) ve (2.8) yerine yazılırsa, eşdeğer kontrol kuralı u_{eq} ,

$$u_{eq} = (Cb_n)^{-1} C(\dot{x}^d - A_n x) \quad (2.9)$$

olarak elde edilir. Kayma kipli kontrolde kontrol işareti genellikle, nominal kısımla ilgili (u_{eq}) değerine ilaveten belirsizliklerin (parametre değişiklikleri ve bozucu giriş) etkisini bastıracak olan $u_{max} \text{sgn}(s)$ terimlerinden oluşur. Buna göre KKK kuralı,

$$u = u_{eq} - u_{max} \text{sgn}(s) \quad (2.10)$$

olarak yazılabilir. Böylece problem, parametre değişiklikleri ve bozucu girişler altında, (2.7) eşitliği ile verilen erişim şartını sağlayacak şekilde u_{max} 'ın belirlenmesine indirgenmiş olur.

(2.10) Eşitliğini, (2.2) eşitliğinde yerine yazıp, (2.3) ve (2.4) eşitliklerinden de faydalanılarak s 'in dinamiğini belirleyen,

$$\dot{s} = Cb_n (-u_{max} \text{sgn}(s) + L) \quad (2.11)$$

eşitliği elde edilir. Eğer, (2.11) eşitliği, (2.7) eşitsizliğinde yerine yazılırsa,

$$Cb_n u_{max} \geq Cb_n L \text{sgn}(s) + \eta \quad (2.12)$$

elde edilir. Bu eşitsizlik, en kötü şartlara göre dayanıklılığın sağlanması için,

$$u_{max} \geq \begin{cases} L_{max} + (Cb_n)^{-1} \eta & \text{şayet } Cb_n > 0 \text{ ise} \\ -L_{max} + (Cb_n)^{-1} \eta & \text{şayet } Cb_n < 0 \text{ ise} \end{cases} \quad (2.13)$$

olmasını gerektirir ($|L| \leq L_{\max} \Rightarrow -L_{\max} \leq L \leq L_{\max}$ olduğu unutulmamalıdır). Böylece, $U_{\max}$ (2.13) eşitsizliğini sağlarsa ve (2.10) eşitliğinde verilen kontrol kuralı kullanılırsa, (2.7) eşitliği ile verilen ulaşma şartı, (2.1) ile ifade edilen sistem için sağlanmış olur. Böylece, parametre değişimleri ve bozucu girişler altında belirli bir davranışı belirsizliklere rağmen koruyan dayanıklı bir kontrolör sağlanmış olur.

2.3 Erişim Kuralı Yaklaşımı (EKY)

Bu yaklaşım, Gao ve Hung tarafından KKK Sistemlerinin tasarımı için yeni bir metod olarak EKY adı altında geliştirilmiştir [8]. Yaklaşımında, ilk önce anahtarlama fonksiyonunun dinamiğini belirleyen bir diferansiyel denklem olan erişim kuralı seçilmektedir. Sonra, kontrol girişi, bilinen bir sistem modeli ve belirsizlik sınırları ile birlikte erişim kuralından sentezlenir. Bilinmelidir ki, asimptotik kararlı s'ın erişim şartı gerçekte bir diferansiyel denklemdir. Bu yaklaşımın ayrıcalığı, erişim kipinde KKK sisteminin dinamik niteliğinin, diferansiyel denklemdeki parametreleri seçerek kontrol edilebilmesidir.

(2.1) Eşitliğinde anlatılan sistemi tekrar ele alalım. Şayet bir asimptotik kararlı erişim kuralı aşağıdaki gibi seçilirse;

$$\dot{s} = -q \operatorname{sgn}(s) - \alpha.s \quad (2.14)$$

Burada q ve α pozitif sabitlerdir. (2.2), (2.4) ve (2.14) eşitlikleri kullanılarak kontrol girişi “u” aşağıdaki gibi elde edilir;

$$u = (C\bar{b}_n)^{-1} (-CA_n \underline{x} + C\dot{\bar{x}}^d - C\bar{b}_n L - q\operatorname{sgn}(s) - \alpha.s) \quad (2.15)$$

(2.15) eşitliğinin sağ tarafında, L toplam belirsizliğinin dışındaki tüm büyüklükler bilinmektedir. Şayet bu eşitlikteki L , değeri bilinen bir tutucu “ L_c ” ile değiştirilirse, u aşağıdaki gibi olur;

$$u = (C\bar{b}_n)^{-1} (-CA_n \underline{x} + C\dot{\bar{x}}^d - C\bar{b}_n L_c - q\operatorname{sgn}(s) - \alpha.s) \quad (2.16)$$

(2.2), (2.4) ve (2.16) eşitlikleri kullanılarak s'in dinamikleri aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\dot{s} = -q\text{sgn}(s) - \alpha.s + C_{\underline{b}_n}(L - L_c) \quad (2.17)$$

(2.17) ile (2.14) eşitlikleri kıyaslandığında, karıştırılmış sistemin erişim dinamiklerinde $C_{\underline{b}_n}(L - L_c)$ 'nin bir ek terim olarak ortaya çıktığı kolayca görülür. L_c değeri, bilinmeyen toplam belirsizlik değerini (L) baskılayacak ve böylece (2.14) erişim kuralını sağlayacak şekilde seçilir. L , $|L(\underline{x}, t)| \leq L_{\max}$ şeklinde sınırlandırıldığından ve $C_{\underline{b}_n}$ pozitif bir sabit olarak kabul edildiğinden, L_c için pratik bir seçim aşağıdaki gibi olacaktır;

$$L_c = \begin{cases} s > 0 & \text{ise } L_{\max} \\ s < 0 & \text{ise } -L_{\max} \end{cases} \quad (2.18)$$

Şayet $C_{\underline{b}_n}$ negatif olursa o zaman (2.18)'de $L_{\max}$ 'ın işareti ters olacaktır. Böylece;

$$L_c = L_{\max} \text{sgn}(s) \quad (2.19)$$

ve s 'in dinamikleri;

$$\dot{s} = -Q\text{sgn}(s) - \alpha.s + C_{\underline{b}_n}L \quad (2.20)$$

olur. Burada $Q = q + C_{\underline{b}_n}L_{\max}$ 'dır. Erişim kuralındaki (2.14), $\alpha.s$ teriminin erişim oranını artırmak için eklendiği hatırlanmalıdır. Eğer α değeri sıfıra ayarlanırsa o zaman (2.20) eşitliği (2.11)'e denk hale gelir ki burada s 'in dinamikleri klasik KKK tasarım yaklaşımı ile elde edilmektedir. Böylece, (2.15) kontrol kuralı, (2.10) kontrol kuralına denk hale gelir. Q , (2.11)'deki $C_{\underline{b}_n}u_{\max}$ 'a karşılık gelir. Bu anlamda, erişim kuralı tasarım yaklaşımı klasik yaklaşıma göre daha tutucudur çünkü erişim kuralını sağlayacak şekilde bozucuları dengelemek için ek bir L_c terimi kullanılmaktadır. Başka bir deyişle, L_c ve α sıfıra ayarlanmasına rağmen sistem halen q 'nun yeterince büyük seçilmesiyle $\dot{s}$ 'nin işaretinin, s 'nin işaretine zıt olması (erişim şartı) için zorlanacaktır. Bu, aslında klasik KKK tasarım yaklaşımıdır.

Klasik yaklaşım ile erişim kural KKK tasarım yaklaşımları arasındaki temel fark tasarım basamaklarının başlama noktasıdır. EKY'da tasarım s 'in (erişim kuralı) dinamiklerinin tanımlanması ile başlar ve erişim kuralı ile sistem denklemlerinin kullanılıp anahtarlama fonksiyonunun dinamiğinin erişim kuralına eşitlenmesiyle kontrol işareti kolaylıkla türetilir. Bununla beraber, klasik yaklaşımda ilk önce bir Lyapunov fonksiyonu tanımlanır, sonra bu

Lyapunov fonksiyonundan erişim şartını sağlayacak kontrol kuralı seçilir. Böylece EYK metodu, kontrol işaretinin türetilmesini basitleştirir [8].

2.4 KKK Yönteminde Çatırtı Problemi

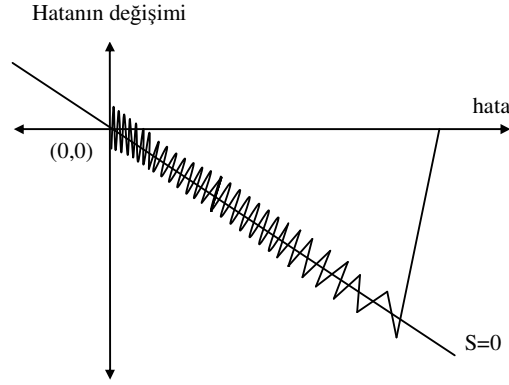
Kontrol çevrimi içerisinde, sistem modellemesinde ihmal edilmiş hızlı dinamiklerin varlığı ve mikrokontrolörlerin sayısal gerçeklemelerinde sabit örnekleme zamanı kullanmaları çatırtının ortaya çıkmasında iki temel sebeptir. Çatırtı terimi, durum değişkenlerinde görülen, sonlu frekansta, sonlu genlikli osilasyonlar olarak çoğu kayma kipli kontrol uygulamasında ortaya çıkmaktadır. Bu osilasyonlar, KKK'nın yüksek frekanslı anahtarlama ile kapalı çevrim içerisindeki modellenmemiş dinamikleri tahrik etmesiyle ortaya çıkar.

Neyse ki, çatırtının engellenmesi için tüm sistem parçalarının detaylı modeline gerek yoktur. Tercihen, bir kayma kipli kontrolör, en başta, hiç modellenmemiş dinamiğin olmadığı ideal kabulü ile tasarlanabilir. İkinci tasarım adımında, çatırtı problemi uygun bir yöntem ile engellenmelidir. Bölüm 2.4.1'de, "Süreklileştirme veya Sınır Tabakası" yöntemi ile çatırtı probleminin çözümü anlatılacaktır.

Gerçek sistemlerde KKK'nın daha verimli uygulanmasında çatırtı problemini çözmek çok önemlidir. Şayet uygun bir engelleme yöntemi uygulanmadığı takdirde KKK gerçeklemesinde çatırtı en büyük problem olarak ortaya çıkacaktır. Burada, çatırtı probleminin anahtarlama işleminden dolayı değil, sürekli zaman kayma kipli sistemin anahtarlama frekansının sonsuza gitmesi sebebiyle oluştuğu unutulmamalıdır [7-9, 49].

(2.15) Eşitliğinde görüldüğü gibi, "u" kontrol girişi, belirsizlikler ve bozucularla ilgili olarak bir "sgn(.)" fonksiyonu (ideal röle karakteristiği) içermektedir. Sürekli zaman KKK sistemlerinde, bu fonksiyonun $s=0$ eğrisi üzerinde sonsuz hızda +1 ile -1 arasında anahtarıldığı kabul edilir. Kontrol girişinin bu şekilde sonsuz hızda anahtarlama sebebiyle $s=0$ eğrisi üzerinde ideal bir kayma kipi oluşur ve bu da çatırtının olmaması anlamına gelir [7]. Fakat, pratik sistemlerde sonsuz hızda anahtarlama yapmak, mikroişlemcilerin sonsuz hızda hesaplama yapması anlamına geldiğinden, mümkün değildir. Kontrol girişinin sonsuz hızda anahtarlamaının mümkün olmaması sebebiyle KKK uygulamalarında sürekli çatırtı problemi olacaktır. Aslında ideal KKK tasarımında frekansı sonsuza giden anahtarlama arzu edilir. Çatırtı probleminden kastedilen, sistem durumlarında meydana gelen frekansı ve genliği sınırlı salınımlardır. Bu da gerçek fiziksel sistemlerin özelliklerinden kaynaklanmaktadır [5].

Şekil 2.2'de ideal olmayan bir kontrol anahtarlama sonucu ortaya çıkmış çatırtı problemine sahip ikinci derece bir sistemin tipik faz düzlemi görülmektedir.



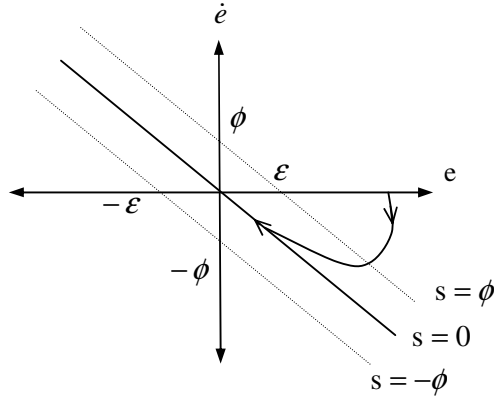
Şekil 2.2 İdeal olmayan bir kontrol anahtarlama sonucu oluşan ikinci derece bir sistemin faz düzlemi.

Çatırtı, sürekli durumda istenilen denge noktası üzerinde yüksek frekanslı bir osilasyon şeklinde görünmektedir ve sistemin modellenmemiş yüksek frekanslı dinamiklerini tahrik edebilir. Mekanik aşınmalar gibi pratik sakıncalara götürebilen çatırtı problemi, KKK'nın tek dezavantajıdır. Neredeyse tüm pratik uygulamalarda bu problem olduğundan KKK konusunda araştırmacılar çalışmalarını bu alana yönlendirmişlerdir [7].

Çatırtı problemini azaltmak veya ortadan kaldırmak için kullanılan metotlardan biri bölüm 2.4.1'de ayrıntılı olarak incelenecek olan "süreklileştirme metodu"dur. Daha önce incelenen EKY da kullanılan diğer bir metottur.

2.4.1 KKK'de Çatırtıya Karşı Süreklileştirme Yaklaşımı (Sınır Tabakası)

Kontrol girişinin sonsuz hızda anahtarlanamaması sebebiyle çatırtı probleminin olduğu bir önceki bölümde anlatılmıştı. Anahtarlama eğrisi etrafında bir Sınır Tabakası (ST) belirlemek çatırtıyı yok etmek için kullanılan en yaygın metotlardan biridir. Şekil 2.3'de parametre değişimi ve bozucu etkisi altında olmayan ikinci derece KKK sistemin tipik faz düzlemi görülmektedir.

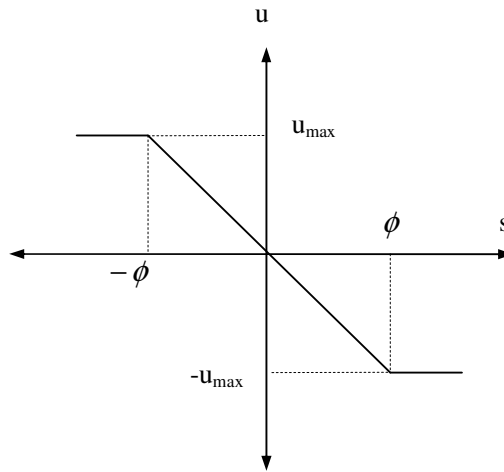


Şekil 2.3 Parametre değişimi ve bozucu etkisi altında olmayan ikinci derece KKK sistemin tipik faz yüzeyi

Sınır tabakasının genişliği 2ϕ ve garantili izleme hassasiyeti ϵ 'dur [9] ve;

$$\epsilon = \phi / \lambda \quad (2.21)$$

şeklinde verilmiştir.



Şekil 2.4 Sınır tabakalı kontrol girişinin (u_{eq} haricinde) transfer karakteristiği

ST, (u) kontrol girişinin dinamiklerini yatıştırır ve sistem davranışının tabaka içerisinde kalmasını sağlar. Şekil 2.4’de Sınır tabakalı kontrol girişinin (u_{eq} haricinde) transfer karakteristiği, $sat(s)$, görülmektedir. Böylece kontrol girişi aşağıdaki gibi olur;

$$u = u_{eq} - u_{max} sat(s) \quad (2.22)$$

burada;

$$sat(s) = \begin{cases} |s| \leq \phi & \text{ise } s/\phi \\ |s| > \phi & \text{ise } sgn(s) \end{cases} \quad (2.23)$$

burada; ϕ pozitif bir sabittir ve genellikle sınır tabakası kalınlığı olarak bilinir.

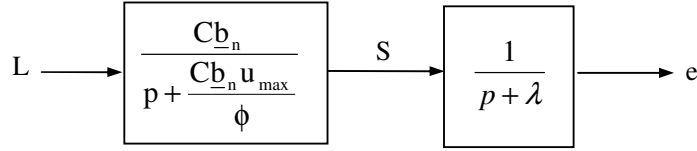
$s = 0$ Eğrisi, ideal KKK’de çekim aralığıdır. Bununla birlikte, sınır tabakalı KKK’da sınır tabakası çekim aralığı olur. Bu da izleme performansının azaltılmış olmasına karşın çatırtının yok edilmesi anlamına gelir [9, 49]. Fakat kontrol sürecinde bir integral işlemi yapılırsa sınır tabakasının etkisi takip hatasını artırır.

(2.2)’deki sistemi tekrar ele alalım; Sınır Tabakasında sistemin davranışı s ’in dinamikleri ile izlenebilir. Çünkü s ’in zamanla değişimi, kapalı çevrim davranışının esas tanımlayıcısıdır [9]. (2.11) eşitliğinde (2.10) yerine (2.22) kullanılarak sınır tabakadaki s ’in dinamikleri aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\dot{s} + \frac{C_{b_n} u_{max}}{\phi} s = C_{b_n} L \quad (2.24)$$

Burada, s anahtarlama fonksiyonunun, girişi $L(\underline{x}, t)$ toplam belirsizliği (bozucular) olan birinci derece bir filtre çıkışı olduğu görülebilir. (2.24) eşitliğinin dinamikleri, hata (e) takip izinin sınır tabakasındaki kayma hattına yaklaşığını tanımlamaktadır [9,51].

Kapalı çevrim hata dinamiklerinin yapısı Şekil 2.5’deki gibi özetlenebilir. (2.24)’e göre s ’i elde edecek şekilde toplam belirsizlik filtrelenir, sonra aslında s ’in tanımı (p türev operatörü) olan başka bir alt geçiren filtreden “e” elde edilir. Şayet $L=0$ ise, sistem, u_{eq} ’nun etkisinde düzgünce $s=0$ ’ın altına kayar; bu durumda, hata (e) takip yörüngesi, $1/(p+\lambda)$ filtresinin başlangıç şartından başlayarak yükselir. Ayrıca $\phi \rightarrow 0$ olduğunda, L ’nin tüm sonlu frekansları için birinci filtrenin kazancı sıfır olur. Bu da tam dayanıklı olan ideal anahtarlama durumuna karşılık gelir [4].



Şekil 2.5 Kapalı çevrim hata dinamiklerinin yapısı

2.5 Ayrık Zaman KKK

Uygulamalarda, KKK yöntemi kullanılmak istendiğinde karşımıza iki farklı seçenek çıkmaktadır;

1. Çok hızlı bir anahtarlama elemanı yardımıyla süreksiz bir kontrol kuralının doğrudan analog olarak gerçekleştirilmesi, (güç transistörleri ile)
2. Ayrık zaman KKK gerçekleştirilmesi (sayısal işlemcilerle).

Günümüzde birçok sistemde bu ikinci seçenek yani mikroişlemci temelli gerçekleştirme, kullanılmaktadır. İdeal KKK gerçekleştirilmesi için sonsuz anahtarlama frekansı gereklidir. Anahtarlama frekansının örnekleme oranı ile sınırlı olduğu ve bu sebeple de çatırtı probleminin olduğu Bölüm 2.3’de anlatılmıştı.

Sürekli zamanda modellenmiş birinci dereceden bir örnek sistemi inceleyelim;

$$\dot{x}(t) = g(x(t)) + u(t) \quad (2.25)$$

Burada; $x(t)$ durum değişkeni, $|g(x)| \leq \bar{g}$ sınırlı dinamikler ve $u(t)$ kontrol girişidir. Kayma kipinin belirli bir aralıkta tutulması için süreksiz kontrol kuralı aşağıdaki gibi tasarlanabilir;

$$u(t) = -u_0 \text{sgn}(x(t)) \quad (2.26)$$

Klasik Lyapunov temelli kararlılık analizi ile;

$$V = \frac{1}{2} \dot{x}^2(t) \quad (2.27)$$

incelendiğinde, (2.26) kontrolü ile (2.25) sisteminin hareket yörüngesi boyunca uygunluk gösterdiği görülmektedir.

$$\dot{V}(t) = x(t)(g(x(t)) - u_0 \operatorname{sign} x(t)) \leq -|x(t)|(u_0 - \bar{g}) \quad (2.28)$$

Buna göre Δt örnekleme zamanıyla sistemin doğrudan ayrık gerçekleştirilmesi aşağıdaki gibi olur;

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= x_k + (g_k + u_k) \Delta t \\ u_k &= -u_0 \operatorname{sgn} x_k \\ k &= 1, 2, \dots \end{aligned} \quad (2.29)$$

Burada k , örnekleme noktalarını göstermektedir. Anahtarlama frekansı $1/\Delta t$ örnekleme oranı ile sınırlıdır. Örnekleme oranının artması ayrıklaştırma çatırtısının değerinin düşmesini sağlar fakat $\Delta t = 0$ olmadıkça çatırtı problemi ortadan kalkmaz [48].

2.6 Kayma Kipli Bulanık Kontrolörler

Birçok doğrusal olmayan ikinci derece sistem için BMK tasarlanırken hata (e) ve hatanın değişimine ($\dot{e}$) ait bulanık değerlerle belirlenmiş bulanık faz düzlemi kullanılmaktadır. Şekil 2.6'da böyle bir bulanık kontrolöre ait kural tabanı görülmektedir. Her bir hata ve hatanın değişimi değer çiftine (her bir bulanık durum vektörüne) karşılık gelecek şekilde BMK'un bulanık kuralları, kontrol girişi (u) için bir bulanık değer belirler.

Bulanık kuralların tasarımını kolaylaştıracı bir yaklaşım, faz düzlemini kayma hattı diyebileceğimiz diagonal (köşeden köşeye) bir doğru ile ikiye ayırmaktır. Her bir yarı düzlem kontrol girişinin (u) sadece negatif veya pozitif bulanık değerlerini belirlemek için kullanılır. Karşılık gelen durum vektörünün bu kayma hattına olan uzaklığı kontrol girişinin büyüklüğünü belirler. Kurallar, anahtarlama hattının üstünde negatif çıkış, altında pozitif çıkış üretilecek şekilde düzenlenmiştir.

Bulanık kontrolörün çıkışı aşağıdaki biçimde ifade edilebilir;

$$u_{FZ} = -u_F(e, \dot{e}, \lambda) \operatorname{sgn}(s) \quad (2.30)$$

$\dot{e}$ \ e	NB	NO	NK	$\hat{s}$	PK	PO	PB
PB	S	NK	NK	NO	NO	NB	NB
PO	PK	S	NK	NK	NO	NO	NB
PK	PK	PK	S	NK	NK	NO	NO
S	PO	PK	PK	S	NK	NK	NO
NK	PO	PO	PK	PK	S	NK	NK
NO	PB	PO	PO	PK	PK	S	NK
NB	PB	PB	PO	PO	PK	PK	S

$S = 0$

Şekil 2.6 Bulanık kontrolörün Kural Tabanı

Bulanık kontrolör u_{FZ} 'nin büyüklüğünü hata vektörü ile diagonal $s=0$ arasındaki uzaklığa $|s|$ göre değiştirdiğinden (2.30) denklemi aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$u_{FZ} = -u_F(|s|)\text{sgn}(s) \quad (2.31)$$

Sınır tabakalı KKK'nın çıkışı aşağıdaki gibi verilmiştir;

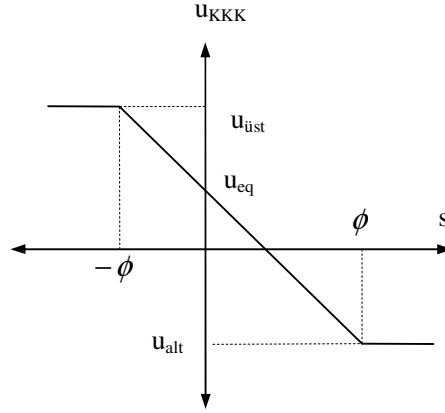
$$u_{KKK} = u_{eq} - \frac{u_{max}}{\phi} |s| \text{sgn}(s) \quad (2.32)$$

Buradan kolaylıkla görülmektedir ki, bu tasarım metodu sınır tabakalı KKK'ya çok benzerdir. Bu benzerlikten dolayı, yukarıdaki tarzda tasarlanan bulanık kontrolörlere “Kayma Kipli Bulanık Kontrolörler” (KKBK) denilmektedir [51].

u_{eq} terimi, KKBK'de kolaylıkla dahil edilebilir ve (2.31) eşitliği aşağıdaki gibi yazılabilir;

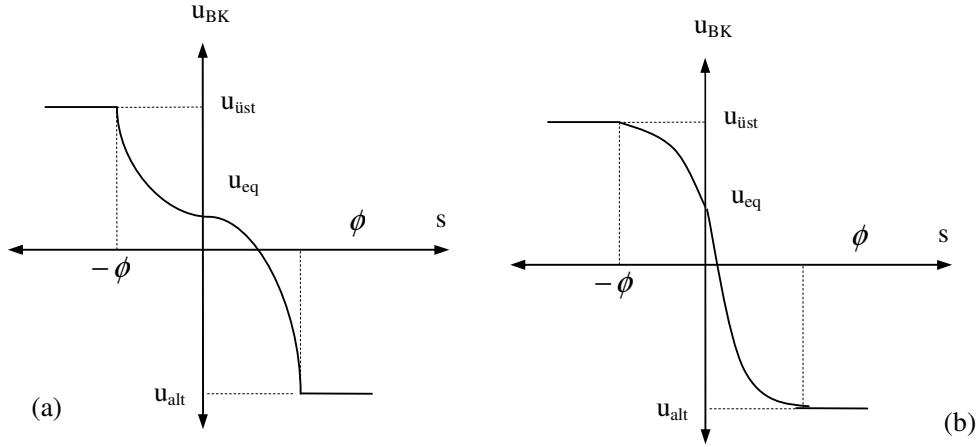
$$u_{FZ} = u_{eq} - u_F(|s|)\text{sgn}(s) \quad (2.33)$$

Bu da, sınır tabakalı KKK'nın, KKBK'nın özel bir hali olduğunu gösterir. Şekil 2.7'de gösterildiği gibi sınır tabakalı bir KKK, alt ve üst sınırları olan doğrusal bir transfer karakteristiği sağlar.



Şekil 2.7 Sınır Tabakalı KKK'nın transfer karakteristiği

Bununla birlikte, bir KKBK'nın tranfer karakteristiği, bu sınırlar arasında düzgün bir doğru şeklinde olmak zorunda değildir. Eğrinin şekli bulanık mantık araçları (üyelik fonksiyonları) ile istenilen performansı sağlayacak şekilde ayarlanabilir. Şekil 2.8.a ve b'de iki örnek görülmektedir [51].

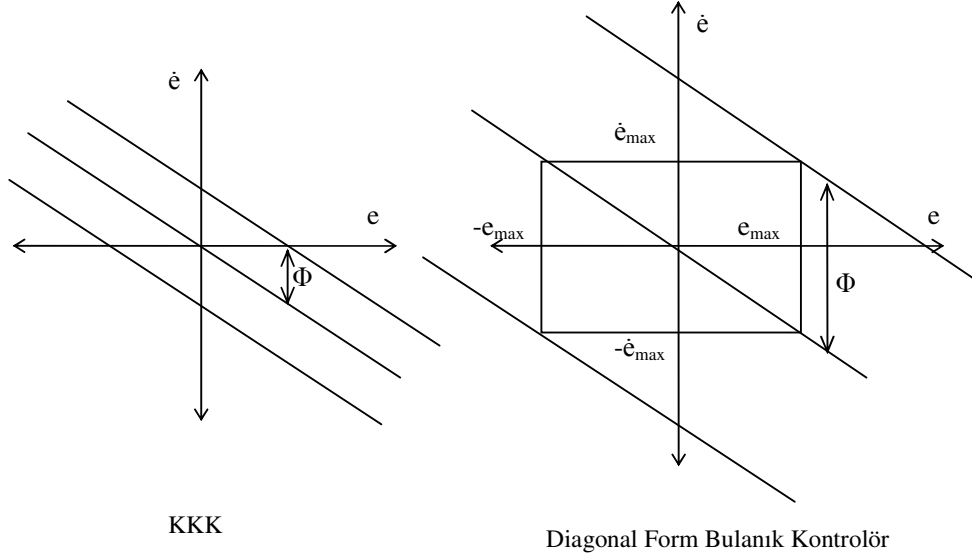


Şekil 2.8 (a)KKBK Transfer Karakteristiği (Yüksek geçici durum dinamiklerin varlığında gürültü performansı sağlamak için düşük sürekli durum kazancı) **(b)**KKBK Transfer Karakteristiği (Hızlı şekilde bozucu engellemek için yüksek sürekli durum kazancı)

Sınır tabakalı KKK ile diagonal form bulanık kontrolörü karşılaştırsak aşağıdaki iki temel fark görülecektir;

1-) Diagonal form bulanık kontrolörün transfer karakteristiği, sınır tabakalı KKK'nın tersine doğrusal değildir.

2-) Diagonal form bulanık kontrolör için hata vektörü, Şekil 2.9'da görüldüğü gibi bulanık durum uzay sınırları ile sınırlandırılmıştır.



Şekil 2.9 Sınır Tabakalı KKK ve diagonal form bulanık kontrolör için sınır tabakası

2.7 Kayma Kipli Motor Hız Kontrol Sistemleri

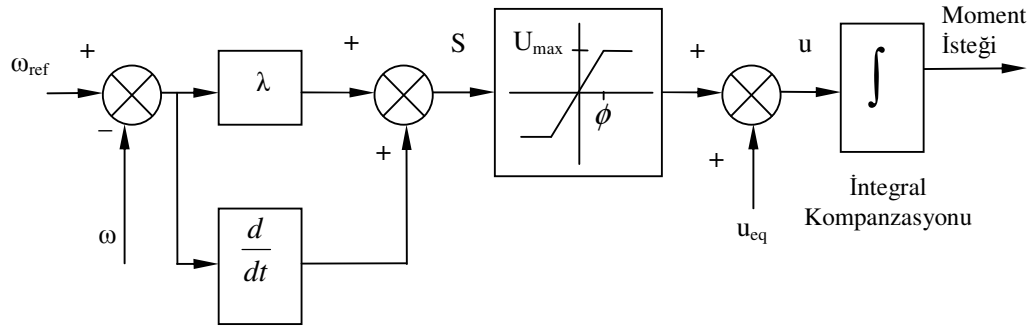
Son yıllarda KKK tekniğinin elektrik sürücü sistemleri üzerinde uygulandığı bir çok uygulama, dinamik şartların etkisi altındaki parametre değişikliklerinin çok etkili olduğunu ortaya çıkarmıştır. Elektriksel sürücü sistemlerindeki parametre değişiminin ortaya çıkması, örnek olarak sargılardaki sıcaklık değişimi, konverterlerin anahtarlama etkisi ve doyum gibi sebeplerden kaynaklanmaktadır. Servo uygulamalarında ise genellikle bilinmeyen yük sebebiyle parametre değişimi olmaktadır. Mesela robotik kontrolde, atalet momenti yüke bağlı olarak değişen bir parametredir [48]. Bununla beraber, elektriksel sürücü sistemlerinin kontrolünde KKK tekniğinin genellikle ikinci derece dinamiklere sahip konum kontrol sistemlerine uygulandığı görülmektedir [35-37]. Bu dinamikler, temel atalet veya sürtünme ile oluşan bir yükten dolayı ortaya çıkmaktadır. Şaft konumu θ olmak üzere durum vektörü $\underline{x} = [\theta, \dot{\theta}]^T$ şeklinde tanımlanır. Aynı yük için hız kontrolünde sadece birinci derece dinamikler söz konusudur (elektriksel dinamikler ihmal edilir) ve KKK doğrudan uygulanabilir değildir [33, 34]. Bununla birlikte integral kompanzasyonu eklenerek sistem ikinci derece haline getirilebilir. Böylece doğru akım sürekli durumda hız hatası da ortadan kaldırılmış olur.

İntegral kompanzasyonu için iki yaklaşım vardır; Birincisi, Şekil 2.10'da görülen İntegral Kompanzasyonlu Kayma Kipli Kontrol (İK-KKK) yaklaşımıdır [33]. İkincisi, Şekil 2.11'de görülen İntegral Kayma Kipli Kontrol (İKKK) veya İntegral Değişken Yapılı Kontrol (İDYK) yaklaşımıdır [34, 38].

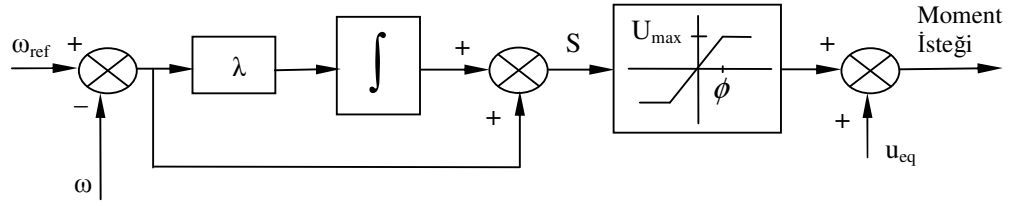
Bu iki yapıdaki temel fark anahtarlama fonksiyon seçimidir. Şekil 2.10'da önce klasik anahtarlama fonksiyonu $S = \lambda e + \dot{e}$ gerçekleştirilmiş ve sonra kontrol girişi u 'nun integrali alınarak birinci derece sisteme moment girişi sağlanmıştır. İkinci yaklaşımda ise;

$$S = e + \lambda \int_{-\infty}^t e d\tau \quad (2.34)$$

şeklinde bir anahtarlama fonksiyonu kullanılmıştır. Bu yaklaşımda, genellikle büyük bant genişliğine sahip ve uygulamada çok gürültülü olan ivmeye gerek duyulmamıştır. Bu da (İK-KKK) yaklaşımına göre (İKKK) yaklaşımının bir üstünlüğü olarak görülmesine rağmen iki sistem de Sınır Tabakasında eşdeğer hale gelmektedir. Çünkü ST'de sistemler doğrusaldır ve şayet Şekil 10'daki integral terimi sola doğru kaydırılırsa iki sistemin aynı olacağını kolaylıkla görülür.



Şekil 2.10 KKK'nın hız kontrol sistemlerinde gerçekleştirilmesi için İntegral Kompanzasyonlu Kayma Kipli Kontrol (İK-KKK) yaklaşımının kullanılması.



Şekil 2.11 KKK'nın hız kontrol sistemlerinde gerçekleştirilmesi için İntegral Kayma Kipli Kontrol (İKKK) veya İntegral Değişken Yapılı Kontrol (İDYK) yaklaşımının kullanılması.

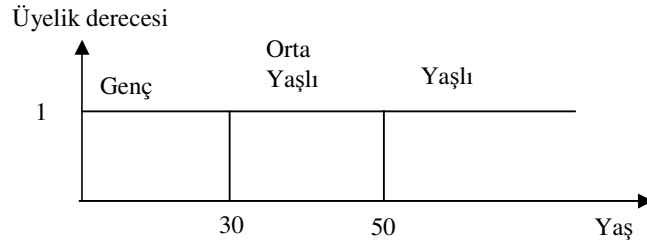
Uygulamalarda her iki yaklaşımın da avantaj ve dezavantajları olabilir. Uygulamanın yapılacağı yere göre bu yaklaşımlardan uygun olduğu düşünülen biri seçilebilir [4].

3 BULANIK MANTIK TABANLI SİSTEMLER

3.1 Bulanık Mantık Nedir ?

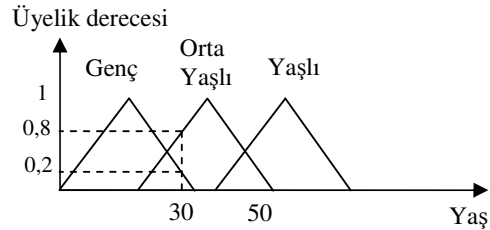
Boolean Mantık temelli küme teorisinde, her özel nesne ya verilen kümenin bir üyesidir (Lojik 1) veya değildir (Lojik 0). Bu tip kümelere keskin (crisp) kümeler denir. Ancak, bulanık mantık temelli bulanık küme teorisinde her özel nesne verilen kümede bir üyelik derecesine sahip olur. Bu üyelik derecesi, $[0,1]$ aralığında bir değer alabilir. Bir başka deyişle, bir özel nesne, kümenin kısmen üyesi olabilir. Bu anlamda, bulanık mantık sayesinde, matematiksel bir ifade içine insan bilgi esaslı daha etkili bir biçimde yerleştirilebilir [52].

Yukarıda anlatılanlara örnek olması açısından yaş kavramını ele alırsak bulanık küme mantığını daha iyi anlayabiliriz;



Şekil 3.1 Keskin küme mantığında yaşa göre kümeleme işlemi

Şekil 3.1'den görüleceği gibi keskin bir küme yaklaşımında 29,5 yaşında biri genç sayılırken 30,5 yaşında birisi orta yaşlı kümesi içine girmektedir. Halbuki bu iki yaş için ne tam yaşlı ne de tam genç demek uygun değildir. Şekil 3.2'de bulanık küme mantığında yaşa göre kümeleme yapılmıştır. Buna göre, bulanık küme mantığında, mesela 30 yaşında birisi 0,2 oranında Genç, 0,8 oranında Orta yaşlı olmaktadır. Buradan da görüleceği gibi bu tarz kümeleme mantığı daha uygun bir mantıktır.



Şekil 3.2 Bulanık küme mantığında yaşa göre kümeleme işlemi

3.2 Bulanık Mantık Uygulamalarının Kısa Bir Tarihçesi

Bulanık Mantık Teorisi, ilk defa 1965 yılında California Üniversitesinde öğretim elemanı olan Lutfi A. Zadeh tarafından bulunmuş ve “Bulanık Mantık Teorisi” ismiyle tanıtılmıştır [53]. O dönemde, bazı bilim adamları konuya olumlu yaklaşmış fakat bazıları da “bulanıklaştırmanın” bilimin temel prensiplerine aykırı olduğunu savunarak konuyu ciddiye almamışlar ve ayrıca hiçbir pratik uygulamanın olmaması da bulanık teorisinin savunulmasını güçleştirmişti. 1973 yılında, Zadeh, bulanık kontrolün temelini oluşturan başka bir makale yayınladı. Burada önemli durum bulanık kontrolörlerin gerçek sistemlerde uygulanmasıydı. 1975 yılında, Mamdani ve Assilian, buhar kazanının kontrolü için bir bulanık kontrolör tasarlayıp gerçekleştirdi. 1978’de, Holmblad ve Osterygaard, çimento üretiminde kullanılan değirmenin kontrolü için bir bulanık kontrolör tasarlayıp gerçekleştirdi. Bu uygulamalar, özellikle matematiksel modeli bilinmeyen endüstriyel süreçlerin kontrolünde bulanık mantığın çok faydalı olabileceği gerçeğini ortaya çıkarmıştır [54].

1983’de Sugeno, bulanık mantıkla kendi kendine park eden bir robot arabanın kontrolünü yaptı. Hitachi firmasından Yasunobu ve Miyamoto, 1987’de tamamlanan Sandai Metrosunun kontrol sistemini bulanık kontrol ile yaptılar [54].

1990’larda tüketicilerin karşısına çamaşır makinesi, kamera, araba motorları ve fren sistemleri gibi bir çok ürün bulanık mantık kullanılarak çıkarıldı. Şubat 1992’de bulanık sistemler üzerine ilk uluslararası IEEE konferansı San Diego’da düzenlendi. Bu olay, bulanık teorisinin dünyadaki en büyük mühendislik organizasyonu olan IEEE tarafından kabul gördüğünün delili oldu ve 1993’de “IEEE Transactions on Fuzzy Systems” adlı dergi yayını başladı [54].

Yukarıdaki tarih bilgileri Tip-1 Bulanık mantıkla ilgili gelişim sürecini göstermektedir. Diğer bilim adamları henüz Tip-1 bulanık mantıkla ilgili uygulamalar yapmaya çalışırken, Zadeh, 1975 yılında, yeni bir yaklaşım olan Tip-2 Bulanık mantık kavramını tanıtmıştır [47]. Fakat birinci teoride olduğu gibi Tip-2 bulanık mantık yaklaşımında da uygulamaların ortaya çıkması zaman almıştır. Tip-2 Bulanık Mantık Teorisi adı verilen yeni teori, gerçek hayattaki her problemde farklı şekillerde ortaya çıkan “belirsizlik” durumları için çözüm önermektedir.

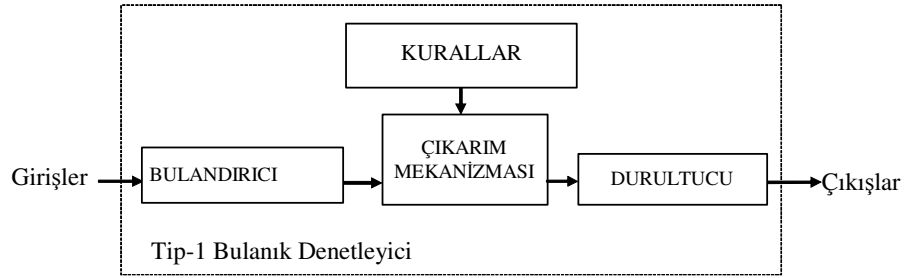
Tip-2 bulanık küme kavramı üzerine ilk ciddi çalışma ve uygulamalar Mendel ve Karnik tarafından yapılmıştır [56, 57]. Mendel ve Karnik’in, 1999 ve 2000’li yıllarda yapmış olduğu çalışmalar ile Tip-2 bulanık küme kavramının teorisinde ve matematiksel içeriğinde gelişmeler olmuş ve ayrıca belirsizlik problemleri üzerine uygulamalar ortaya konulmuştur. Bunların yanı sıra; Mizumoto ve Tanaka, Nieminen, Dubais ve Prade, Hisdal, Liang ve Mendel Tip-2 kümeler üzerine yeni kurallar, matematiksel işlemler ve teoriler geliştirmişlerdir [3, 45].

Tip-2 bulanık mantığa ait ilk uygulamalar 1996 yılından itibaren görülmeye başlanmıştır [28-32, 46]. Yapılan uygulamaların çoğunluğunun Tip-2 bulanık mantık teorisini var olan kontrol yöntemlerini iyileştirme ve destekleme üzerine olduğu görülmektedir.

3.3 Bulanık Kontrolörlerin Yapısı

Tip-1 bulanık kontrolör, Şekil 3.2’de gösterildiği gibi dört esas kısımdan oluşur. Bunlar;

- 1-) Bulandırıcı (fuzzifier),
- 2-) Kural tabanı (rule-base),
- 3-) Çıkarım mekanizması (inference mechanism veya inference engine)
- 4-) Durultucu (defuzzifier).



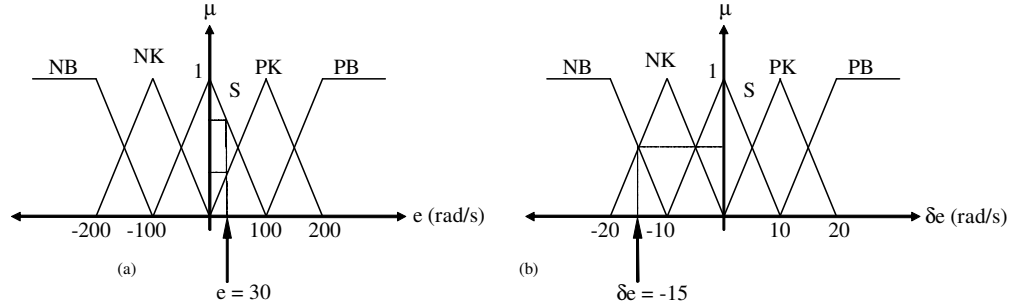
Şekil 3.3 Tip-1 Bulanık kontrolörün temel yapısı

3.3.1 Bulandırıcı

Bulandırıcı, bulanık kontrolörlerin giriş birimidir ve girişten gelen kesin değerleri çıkarım mekanizmasında kolayca kullanılacak bilgi haline getirir. Bulandırma işleminden sonra her bir girdi değeri, karşılık gelen giriş için tanımlanan bulanık kümesine ait üyelik derecesiyle gösterilir. Örnek olarak, kontrolör girdileri $e(k)$ hatası ve hatadaki değişme $\delta e(k)$ olsun. Burada, $\delta e(k) = e(k) - e(k-1)$ 'dir.

Şekil 3.4’de bu girişlere ait üyelik fonksiyonlarıyla oluşmuş bulanık kümeler görülmektedir. Ayrıca, örnek olması açısından $e(k) = 30$ rad/s ve $\delta e(k) = -15$ rad/s girdilerinin de bulandırılması görülmektedir. Tablo 3.1’de bulandırma sonuçları (giriş değeri $e(k) = 30$ ve $\delta e(k) = -15$ iken) NB, NK, S, PK ve PB olarak isimlendirilen kümelerle gösterilmiştir. Burada P, N, B, K ve S harfleri sırasıyla Pozitif, Negatif, Büyük, Küçük ve Sıfır anlamını taşımaktadır. Sonuç çıktı bulanık kümesini elde etmek için bu tablodaki üyelik dereceleriyle kural tabanı, çıkarım mekanizmasında beraber kullanılır [4].

Yukarıda açıklanan bulandırma metodu, kontrol uygulamalarında çok sıkça kullanılan bulandırma metodu olan ‘singleton’ bulandırma olarak bilinilir. Bundan başka, Gaussian ve Üçgensel (triangular) bulandırma metotları da bulunmaktadır fakat bunlar kontrol uygulamalarında fazladan bir sayısal karmaşıklığa sebep olduklarından tercih edilmezler.



Şekil 3.4 Giriş değişkenleri için üyelik fonksiyonları **a)** hata **b)** hatadaki değişim

Hata ($e(k) = 30$)		Hatadaki değişim ($\delta e(k) = -15$)	
Üyelik Derecesi	Bulanık Kümeler	Üyelik Derecesi	Bulanık Kümeler
0.7	S	0.5	NK
0.3	PK	0.5	NB
0	NB, NK, PB	0	S, PK, PB

Tablo 3.1 $e(k) = 30$ ve $\delta e(k) = -15$ giriş değerleri için bulanıklaştırma sonuçları

3.3.2 Kural Tabanı

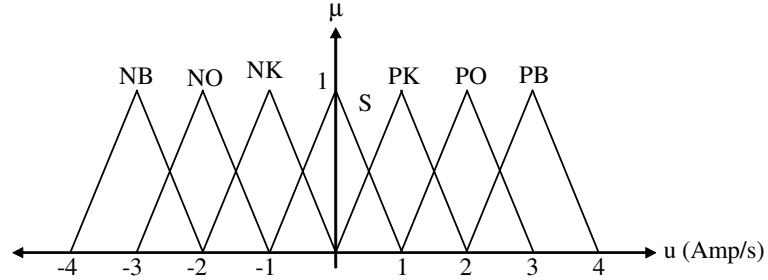
Tip-1 bulanık kontrolör kural tabanında uzmanın dilsel tanımlamalarıyla elde edilmiş bir IF-THEN bulanık kümesi bulunur. Bununla beraber kurallar matematiksel bir bağıntıdan da türetilir. Bu kuralların oluşturulmasında diğer bütün parçalar kabul edilebilir ve etkin bir şekilde kullanıldığından kural tabanına bulanık kontrolörün kalbi denilebilir. Tablo 3.2’de 25 kural içeren bir kural tabanı görülmektedir. Giriş değişkenleri, üyelik fonksiyonları Şekil 3.4’de görülen, hata ve hatanın değişimidir.

Bulanık kontrolörün çıkışı (u)’dur ve üyelik fonksiyonu Şekil 3.5’de görülmektedir. Örneğin, Tablo 3.2’den bir kural aşağıdaki gibi yazılabilir:

IF ($e = S$ **AND** $\delta e = NK$) **THEN** ($u = NK$)

Görülen dilsel kuralların genel şekli; **IF** varsayım (önerme) kısmı **THEN** sonuç kısmı’dır. Varsayımlar, kontrolör girdileriyle, sonuçlar ise kontrolör çıktılarıyla ilgilidir. Her

varsayım, bu örnekteki gibi birbirine AND işlemiyle bağlı iki terimden oluşur. Bunun yanında varsayımlar ikiden fazla terimden de oluşabilir ve bu terimler OR ve NOT gibi işlemlerle de birleştirilebilir. Çıkışın birden fazla olduğu durumlarda sonuç kısmı birden çok terimin birleşiminden oluşabilir.



Şekil 3.5 Çıkış değişkeni u için üyelik fonksiyonu

Şe

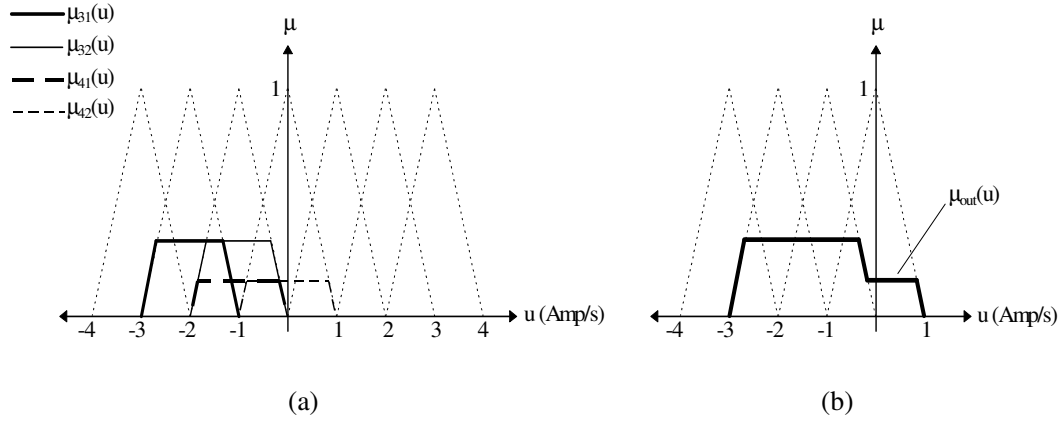
e	u	δe				
		NB	NK	S	PK	PB
e	NB	NB	NB	NO	NK	S
	NK	NB	NO	NK	S	PK
	S	NO	NK	S	PK	PO
	PS	NK	S	PK	PO	PB
	PL	S	PK	PO	PB	PB

Tablo 3.2 Kural tabanı

3.3.3 Çıkarım Mekanizması

Çıkarım mekanizmasında, bulanıklaştırıcı çıktısı ve kural tabanı kullanılarak durulaştırıcı kısmına gönderilecek ve kontrolör çıktısını hesaplamaya yarayan bir (veya daha fazla) bulanık küme üretilir. Burada iki temel yaklaşım vardır. Birincisi, birleşim esaslı çıkarım (composition based inference), diğeri tek-kural esaslı çıkarım (Individual-Rule based inference)'dır. Birleşim esaslı çıkarım metodunda kural tabanı ilk önce tek bir bulanık bağıntıda

toplanır. Sonra, bulanıklaştırılmış girişlerle tüm kural kümesini temsil eden bağıntı arasında çıkarım gerçekleştirilir. Son olarak, tüm kontrol çıkışının bulanık değerini tanımlayan bir bulanık küme elde edilir. Bunun yanında tek-kural esaslı çıkarım metodunda kural tabanındaki her kural ayrı bir bulanık çıkış kümesini belirler ve tüm bulanık çıkarım mekanizmasının çıkışı ayrı ayrı bulanık küme çıkışlarının bir araya toplanmasıyla elde edilir. Genellikle tek-kural esaslı çıkarım metodu tercih edilir çünkü hesaplama yönünden daha etkilidir ve birleşim esaslı çıkarım metoduna göre daha az hafıza alanı kaplar. Çıkarım mekanizmasında, dikkate alınması gereken üç esas işlem tipi vardır; Birinci tip, kural tabanındaki kuralların varsayım terimlerinin arasındaki işlemlerdir. Bilindiği gibi bu işlemler AND, OR ve NOT gibi işlemlerdir. Bu işlemler aslında giriş değerlerinin üyelik derecelerine uygulanır ve kural tabanındaki her bir kural için tek bir çıkış elde edilir ki buna kesin kural denir. İkinci tip işlem, kesin kural ile kurala karşılık gelen çıkış bulanık kümesi arasındaki belirtme işlemidir. Belirtme işleminden sonra, kural tabanındaki her kural belirtilmiş bulanık kümesinde sonuçlandırılır. Üçüncü tip işlem, sonuç çıktı bulanık kümesini elde etmek için tüm belirtilmiş çıkış bulanık kümelerini birleştiren, bir araya toplama işlemidir [4].



Şekil 3.6 (a) Belirtilmiş çıkış bulanık kümeleri (b) Sonuç çıkış bulanık kümesi $\mu_{out}(u)$

3.3.4 Durultucu

Sonuç çıkış bulanık kümesinin durultulmasından sonra kontrolör çıkışı hesaplanır. Durultma işleminde, sayısal (kesin) bir kontrolör çıkışı elde etmek için sonuç çıkış bulanık kümesi durultulur. En çok kullanılan durultma yöntemi “Ağırlık Merkezi” yöntemidir (COG). Bu yöntemde, kesin kontrolör çıkışı (u^*) üyelik fonksiyonu $\mu_{out}(u)$, tarafından kaplanan alanın ağırlık merkezi olarak hesaplanır. Kontrol uygulamalarında en çok kullanılan yöntem ise

hesaplama kolaylığı sağlayan “Merkezlerin Ağırlıklı Ortalaması” yöntemidir [54]. Bu yöntem gere, örneğin, $e = 30$, $\delta e = -15$ durumu için kontrolör çıkışı aşağıdaki gibi olur.

$$u^* = \frac{0.35 * (-2) + 0.35 * (-1) + 0.15 * (-1) + 0.15 * 0}{0.35 + 0.35 + 0.15 + 0.15} = -1.2$$

Yukarıda kısaca ifade edilen ve en çok kullanılan Ağırlık Merkezi ve Merkezlerin Ağırlıklı Ortalaması Yöntemleri dışında, Toplamların Merkezi Tip Durultucu, Yükseklik Tip Durultucu, Kümelerin Merkezi Tip Durultucu ve Uyarlanmış Yükseklik Tip Durultucu, diğer kullanılan durultma yöntemleridir.

3.4 Takagi-Sugeno-Kang (TSK) Tipi Bulanık Kontrolörler

Bundan önceki bölümde anlatılan bulanık kontrolör yapısı “standart bulanık kontrolör” olarak bilinmektedir. Özellikle kontrol uygulamalarında sıkça kullanılan yöntemlerden birisi de Takagi-Sugeno-Kang (TSK) tipi bulanık kontrolör tipidir. Bu yöntemi standart bulanık kontrolörlerden ayıran en önemli fark kurallarda gösterilen çıkışların bulanık kümelerle değil de giriş değişkenlerinin fonksiyonları şeklinde ifade edilmesidir.

TSK tipi bulanık kontrolörde kuralların ifade ediliş şekli aşağıdaki gibidir;

IF u_1 is A_1 and u_2 is A_2 and..... and u_n is A_n THEN $b_i = g(.)$

Burada $g(.)$, giriş değişkenlerinin doğrusal veya doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Çıkış doğrudan bir fonksiyonla hesaplandığı için bu tip kontrolörde “durultucu” birimine gerek yoktur. Kontrolörün çıkışı genellikle her kuralın oluşturacağı çıkışların ağırlıklı ortalaması hesaplanarak bulunur. Bu tip kontrolörler, özellikle bilinen veya önceden tasarlanmış birkaç klasik kontrolör arasında iç değerlendirme yaparak çıkışı hesaplamak için kullanılır [52].

3.5 Singleton ve Non-Singleton Bulanık Sistemler

Giriş değerleri tek bir değer (kesin bir sayı) olan bulanık sistemlere Singleton (tekil) bulanık sistemler denir. Buna karşın, girişleri bulanık sayılar olarak modellenen bulanık sistemlere Non-Singleton (tekil olmayan) bulanık sistemler denir. Non-Singleton bulanık sistemler özellikle giriş belirsizliklerinin etkin olduğu gürültülü girişlere sahip sistemlerde

belirsizliklerle başa çıkmak için kullanılır [3]. Singleton ve Non-Singleton bulanık sistemlerin bulandırıcı kısmı hariç diğer birimleri tamamen aynıdır.

3.6 Tip-2 Bulanık Mantık

3.6.1 Belirsizlik Kavramı ve Tip-2 Üyelik Fonksiyonları

Belirsizlik, gerçek hayattaki bir problemle uğraşılırken kesinlikle göz ardı edilemez bir olgudur. Pek çok safhada sürekli belirsizliklerle karşı karşıya kalırız. Mesela deneysel bir aşamada belirsizlik, tüm ölçme ve ölçme hatalarının bir parçasıdır. Yine belirsizlik, anlamak kavrama aşamasında konuşulan dilin esnekliğinden yani ifadelere verilebilecek farklı farklı anlamların olabilmesi sebebiyle ortaya çıkar. Başka bir ifade ile, bir durum ifade edilirken seçilen kelimeler, ifade edilmek istenilen mana dışında bir anlamaya sebep olabilir. Ayrıca, çözülecek bir problem ile ilgili bilgi yetersizliği ve eksikliği de belirsizlik durumuna başka bir örnektir [3, 56].

Bir bulanık kontrolör, bilindiği gibi uzman kişilerden alınmış ve düzenlenmiş kurallardan oluşur. Bu kurallar, kelimelerden oluşur ve zaten bulanık mantık da kelimelerle hesaplama için bir metodolojidir. Kelimeler farklı insanlar için farklı anlamlar ifade ederler. Bu da kelimelerdeki belirsizlik durumu olarak ortaya çıkar.

Tip-1 bulanık kontrolörlerde aşağıda sıralanan sebeplerle belirsizlik durumları ortaya çıkmaktadır:

- 1- Kurallarda kullanılan kelimelerin anlamları ile ilgili belirsizlik,
- 2- Bir kuralın neticesine bağlı belirsizlik,
- 3- Bulanık kontrolörü aktifleştiren ölçümlerle ilgili belirsizlik,
- 4- Bulanık kontrolörün parametrelerinin uyarlanması için kullanılan bilgi ile ilgili belirsizlik,

Buna rağmen, Tip-1 bulanık üyelik fonksiyonları seçildiğinde belirsizlikler ortada yoktur. Çünkü tip-1 üyelik fonksiyonları tamamen kesindir. İşte bu noktada belirsizlikleri ele almak amacıyla Tip-2 bulanık mantık teorisi geliştirilmiştir. Tip-2 bulanık mantık teorisinde modellenmek suretiyle kelimelerin anlamındaki belirsizlikler ele alınmaktadır.

Normal küme yapısından bulanık küme yapısına geçiş düşünülürse, bir elemanın küme içindeki üyeliğinin tam olarak '0' veya '1' şeklinde belirlenemediği durumlarda bulanık küme kullanıldığı hatırlanır. Benzer şekilde karmaşıklığın artıp üyeliğin $[0,1]$ aralığında kesin bir şekilde belirlenemediği durumda da Tip-2 bulanık küme kullanılmaktadır. Bulanık mantığın tarihçesini anlattığımız bölümde de bahsedildiği gibi bu kavram ilk kez 1975 yılında Zadeh

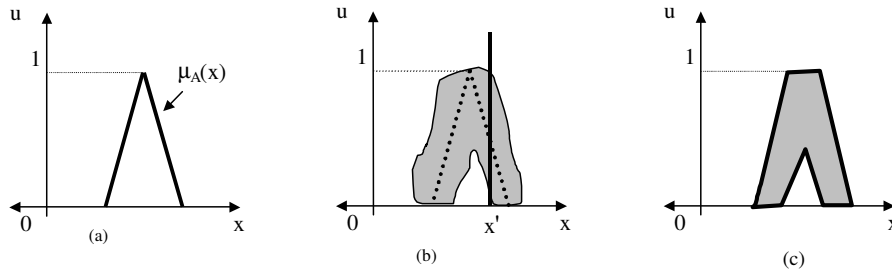
tarafından tanıtılmıştır. Bulanık mantık kümelerinin tipini yükseltmekle belirsizlik kesin hale getirilmektedir. O zaman sonsuz tip bir bulanık küme yapısı kullanılırsa en kesin sonuç elde edilebilir fikri ortaya çıkmaktadır ve doğrudur. Fakat burada dikkate alınması gereken şey, tipi artırmakla bulanık kontrolörü de zorlaştırmış olduğumuzdur.

Tip-2 bulanık üyelik fonksiyonlarını elde etmek için Tip-1 bulanık üyelik fonksiyonlarının sınırları bir çeşit yayma işlemi ile genişletilir. Bu yayma işlemi ile elde edilen alana belirsizliğin ayak izi denir.

Bu kısımda $x \in X$ şeklinde tek değişkeni olan bir tip-1 bulanık kümesini ele alacağız. Bu küme (3.1) bağıntısı ile ifade edilebilir.

$$A = \{ (x, \mu_A(x)) \mid \forall x \in X \} \quad (3.1)$$

Şekil 3.7.(a)'da görülen Tip-1 üyelik fonksiyonunda üçgenin noktalarını sağa ve sola yaymak suretiyle genişletildiğini düşünelim. Bu durumda tek bir çizgi yerine (b)'deki gibi bir alan elde edilir [3].



Şekil 3.7 a) Tip-1 üyelik fonksiyonu b) Yayılmış şekilde tip-1 üyelik fonksiyonu
c) Belirsizliğin ayak izleri (FOU)

Herhangi bir x' değeri için artık üyelik fonksiyonu tek bir değer olmaz. Onun yerine taralı alanda dik çizginin kestiği birden çok üyelik fonksiyon değerleri olur. Bu değerlerin hiçbirinin aynı ağırlıkta olmaması gerekir. Bu noktaların tümüne büyüklük dağılımı atanır. Her $x \in X$ için bu işlem yapılırsa 3 boyutlu bir üyelik fonksiyonu (tip-2 üyelik fonksiyonu) elde edilmiş olur. Bu da, tip-2 bulanık mantık kümesini temsil eder.

3.6.2 Tip-2 Bulanık Kümelerle İlgili Tanımlar

Tanım 1 : $\tilde{A}$ şeklinde gösterilen bir tip-2 bulanık mantık kümesi $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ tip-2 üyelik fonksiyonu ile karakterize edilmektedir. Burada $x \in X$ ve $u \in J_x \subseteq [0,1]$ ' dir. Bununla beraber;

$$\tilde{A} = \{ ((x,u), \mu_{\tilde{A}}(x,u)) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x \subseteq [0,1] \} \quad (3.2)$$

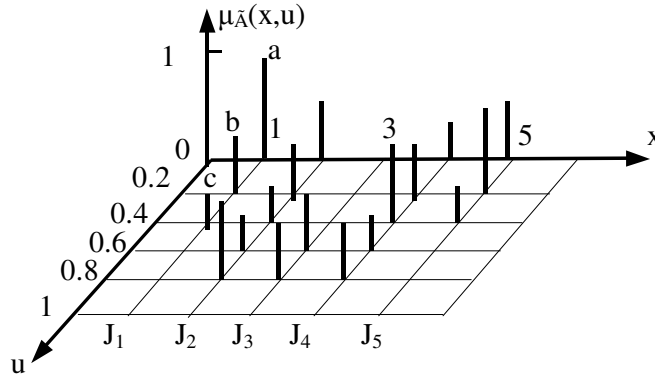
Burada, $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x,u) \leq 1$ olduğundan, $\tilde{A}$, aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x} \mu_{\tilde{A}}(x,u) / (x,u) \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (3.3)$$

$\int$ işlemi tüm kabul edilebilir x ve u değerlerinin birleşimini ifade etmektedir.

Şekil 3.8'de her ayrık x ve u için $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ üyelik fonksiyonu görülmektedir [3].

$X=\{1, 2, 3, 4, 5\}$ ve $U=\{0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1\}$ özel değerleri için; $J_1=\{0, 0.2, 0.4\}$, $J_2=\{0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8\}$, $J_3=\{0.6, 0.8\}$, $J_4=J_2$ ve $J_5=J_1$ olduğunu ve bu değerlere $\mu_{\tilde{A}}(x,u) \neq 0$ durumunda sahip olduğumuza dikkat edelim. Her bir dikme özel bir (x,u) çifti için karşılık gelen $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ üyelik fonksiyonunu temsil etmektedir.



Şekil 3.8 Tip-2 Üyelik Fonksiyonuna Örnek

Tanım 1'deki $\forall u \in J_x \subseteq [0,1]$ ifadesi, tip-1'deki $0 \leq \mu_A(x,u) \leq 1$ ifadesiyle bağdaşmaktadır. O halde yayma ortadan kalkarsa tip-2 üyelik fonksiyonu tip-1 üyelik fonksiyonuna düşürülebilir (reducing type). Bu durumda u , $\mu_A(x)$ 'e eşit olur ve $0 \leq \mu_A \leq 1$ 'dır. Bir diğer kısıtlama olan $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x,u) \leq 1$ ifadesi de yine üyelik fonksiyonu değerinin 1 ile 0 arasında olması gerekliliği durumuna uygundur.

Tanım 2 : x' 'in herbir değeri için (mesela $x = x'$), eksenleri u ve $\mu_{\tilde{A}}(x',u)$ olan iki boyutlu yüzeye $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ 'nın dikey dilimi denir. $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ 'nın bir dikey dilimi ikincil bir üyelik fonksiyonudur. Yani her $x' \in X$ ve $\forall u \in J_{x'} \subseteq [0,1]$ için üyelik fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x=x',u)$ 'dır.

$$\mu_{\tilde{A}}(x = x', u) \equiv \mu_{\tilde{A}}(x') = \int_{u \in J_{x'}} f_{x'}(u) / u \quad J_{x'} \subseteq [0,1] \quad (3.4)$$

Burada; $0 \leq f_{x'}(u) \leq 1$ 'dir. $\forall x' \in X$ olduğundan $\mu_{\tilde{A}}(x')$ ifadesinde üssü işareti kullanılır ve ikincil bir üyelik fonksiyonu olarak $\mu_{\tilde{A}}(x)$ üyelik fonksiyonunu işaret (ima) eder. Bu da, aynı zamanda ikincil bir küme olarak ima edilen tip-1 bulanık kümesidir.

İkincil küme kavramına dayanarak tip-2 bulanık kümesini tüm ikincil kümelerin birleşimi olarak tekrar yorumlayabiliriz. (3.4) ifadesini kullanarak $\tilde{A}$ 'yı dikey-dilim tarzında yeniden yazabiliriz.

$$\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) \mid \forall x \in X\} \quad (3.5)$$

Veya;

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) / x = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in J_x} f_x(u) / (u) \right] / x \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (3.6)$$

Not: Bir tip-2 bulanık kümesi, her $x \in X$ için atanmış bir bulanık değerlikli fonksiyon şeklinde, bir tip-1 bulanık küme olarak da düşünülebilir. Bu anlamda X , tip-2 bulanık kümesinin domaini olarak alınması gerekirken burada $U_{x \in X} J_x$ domain alınarak 3-boyutlu ortam belirtilmek istenmiştir.

Tanım 3 : Bir ikincil üyelik fonksiyonunun domaini “ x 'in birincil üyeliği” olarak adlandırılır. (3.6) bağıntısında (ki burada; $\forall x \in X$ için $J_x \subseteq [0,1]$ 'dir) J_x , x 'in birincil üyeliğidir.

Tanım 4 : Bir ikincil üyelik fonksiyonunun değeri “ikincil derece” olarak adlandırılır. (3.6) bağıntısında $f_x(u)$ bir ikincil derecedir, (3.2) bağıntısında $\mu_{\tilde{A}}(x',u)$ ($x' \in X$, $u \in J_{x'}$) bir ikincil derecedir.

Şayet hem X hem de J_x ayrık olursa o zaman (3.6)'nın sağ tarafı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\tilde{A} = \sum_{x \in X} \left[\sum_{u \in J_x} f_x(u) / u \right] / x = \sum_{i=1}^N \left[\sum_{u \in J_{x_i}} f_{x_i}(u) / u \right] / x_i \quad (3.7)$$

Şekil 3.8’e bakılırsa, $x=1$ ’deki ikincil üyelik fonksiyonlarının $a/0 + b/0.2 + c/0.4$ olduğu görülür. Birincil üyelik değerleri ve ikincil dereceleri ise sırasıyla $u = 0, 0.2, 0.4$ ve a, b, c ’dir.

İkincil üyelik fonksiyonları için birçok seçenek mevcuttur. Uyumluluk için, tüm tip-2 üyelik fonksiyonunda, hangi üyelik fonksiyonu kullanılıyorsa o isim verilmektedir. Örneğin, eğer ikincil üyelik fonksiyonu Gaussian şeklinde ise $\mu_{\tilde{A}}(x,u)$ Gaussian tip-2 üyelik fonksiyonu olarak isimlendirilir.

Tanım 5 : Bir tip-2 bulanık kümenin her bir ikincil üyelik fonksiyonunun 1’e eşit tek bir ikincil derecesinin olduğunu varsayalım. Bütün bu noktaların birleşimine “Prensibal Üyelik Fonksiyonu” denir ve bir tip-1 bulanık kümeyle ilişkilidir.

$$\mu_{prensibal}(x) = \int_{x \in X} u / x \quad (3.8)$$

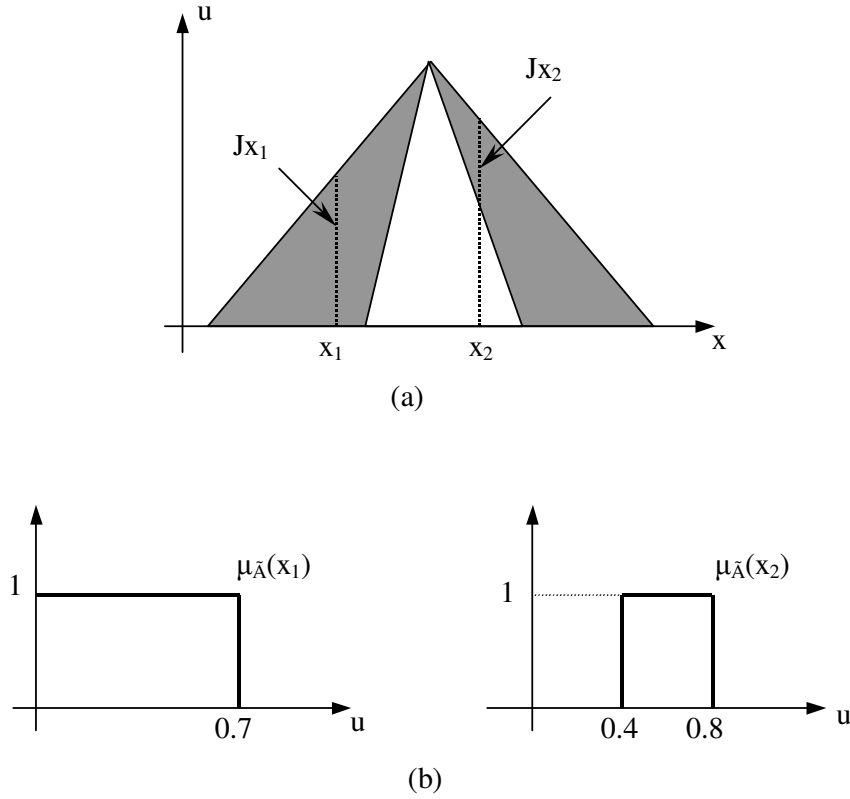
burada; $f_x(u) = 1$ ’dir.

Tanım 6 : Bir tip-2 bulanık kümesinin ($\tilde{A}$), birincil üyeliklerindeki belirsizlik sınırlandırılmış bir alandan oluşur ki buna belirsizliğin ayak izleri (footprint of uncertainty-FOU) denir. FOU, tüm birincil üyeliklerin birleşimidir.

$$FOU(\tilde{A}) = \bigcup_{x \in X} J_x \quad (3.9)$$

FOU, çok yararlı bir terimdir. FOU, ile sadece belirsizlik durumuna odaklanılmayıp bunun yanında tip-2 üyelik fonksiyonunun tüm ikincil dereceleri için uygun aralık desteği sağlanmaktadır.

Tip-2 bulanık mantık sistemleri üzerine yapılan tüm uygulamalarda en uygun tip-2 üyelik fonksiyonu seçmek için uygun FOU terimleri üzerinde düşünmenin faydalı olduğu görülmüştür. Şekil 3.9’da FOU ile ilgili bir örnek görülmektedir.



Şekil 3.9 Tip-2 Bulanık Kümesi için FOU

- a) J_{x_1} ve J_{x_2} birincil üyelikleri ile x_1 ve x_2 noktalarındaki ilgili ikincil fonksiyonları $\mu_{\tilde{A}}(x_1)$, $\mu_{\tilde{A}}(x_2)$
b) ikincil üyelik fonksiyonları aralık kümeleridir.

Tanım 7 : Bir Tip-2 bulanık kümenin belirsizlik ayak izinin (FOU'nun) sınırları birer tip-1 üyelik fonksiyonudur ki bunlar “üst ve alt üyelik fonksiyonu” olarak adlandırılırlar. Üst üyelik fonksiyonu $\text{FOU}(\tilde{A})$ 'nın üst sınırıyla ilgili olup $\overline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$, alt üyelik fonksiyonu ise $\text{FOU}(\tilde{A})$ 'nın alt sınırıyla ilgili olup $\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x)$ şeklinde gösterilir.

Tanım 8 : Bir Tip-2 bulanık kümenin içinde bir çok alt küme bulunabilir, bunların her birine gömülü küme (embedded) denir.

$$\tilde{A}_e = \int_{x \in X} [f_x(\theta) / (\theta)] / x \quad \theta \in J_x \subseteq U = [0,1] \quad (3.10)$$

$\tilde{A}_e$ kümesi, $\tilde{A}$ kümesinin bir gömülü kümesidir ve sayılamayacak kadar gömülü tip-2 küme vardır. x 'in her değeri için $\tilde{A}_e$ sadece bir birincil üyeliğe (θ) sahiptir. Bu üyeliğe karşılık gelen ikincil derece $f_x(\theta)$ 'dır.

3.6.3 Tip-2 Bulanık Kümeler Üzerinde İşlemler

Tip-2 BM kümeleri üzerindeki işlemlere geçmeden, Tip-1 BM kümelerinde maximum t-conorm ve minimum t-norm kullanılarak, birleşim, kesişim ve tümleyen üyelik fonksiyonlarını hatırlatmak amacıyla yazalım;

$$F_1 = \int_{y \in Y} \mu_{F_1}(y)/y \quad \text{ve} \quad F_2 = \int_{y \in Y} \mu_{F_2}(y)/y \text{ 'nın } \mu_{F_1}(y) \text{ ve } \mu_{F_2}(y) \text{ üyelik fonksiyonları ile}$$

tanımlanmış birer tip-1 bulanık kümesi olduğunu farzederek sırasıyla birleşim, kesişim, tümleyen üyelik fonksiyonları ve cebirsel çarpma işlemi aşağıdaki gibidir;

$$\mu_{F_1 \cup F_2}(y) = \max[\mu_{F_1}(y), \mu_{F_2}(y)] \quad \forall y \in Y \quad (3.11)$$

$$\mu_{F_1 \cap F_2}(y) = \min[\mu_{F_1}(y), \mu_{F_2}(y)] \quad \forall y \in Y \quad (3.12)$$

$$\mu_{\overline{F_1}}(y) = 1 - \mu_{F_1}(y) \quad \forall y \in Y \quad (3.13)$$

$$\mu_{\overline{F_2}}(y) = 1 - \mu_{F_2}(y) \quad \forall y \in Y \quad (3.14)$$

$$\mu_{F_1 \cap F_2}(y) = \mu_{F_1}(y) \times \mu_{F_2}(y) \quad \forall y \in Y \quad (3.15)$$

• Zadeh'in Genişleme Prensibi

Tip-2 Bulanık kümelerde, birleşim, kesişim, tümleyen üyelik fonksiyonları ve cebirsel çarpma işlemlerini yapabilmek için her bir kesin (crisp) değerden Tip-1 kümeye *genişlemek* gerekir. Çünkü her bir y için $\mu_{F_1}(y, u)$, bir fonksiyondur. Halbuki, Tip-1'de $\mu_{F_1}(y)$ bir kesin değere karşılık gelmekteydi. Yukarıda adı geçen “*genişleme*” terimi Zadeh'in Genişleme Prensibi olarak bilinen, Tip-2 Bulanık kümelerde, birleşim, kesişim, tümleyen üyelik fonksiyonları ve cebirsel çarpma işlemlerini yapabilmek için kullanılan bir araçtır [3].

$A_1, A_2, \dots, A_r$ 'in sırasıyla $X_1, X_2, \dots, X_r$ içinde tip-1 bulanık kümeler olduğunu kabul edersek, Zadeh'in Genişleme İlkesi sayesinde r adet tip-1 bulanık kümesi yerine, f yoluyla, Y evrenindeki B tip-1 bulanık kümesiyle yani $B = f(A_1, A_2, \dots, A_r)$ ile işlem yapabiliriz. Şöyle ki;

$$\mu_B(y) = \begin{cases} \sup_{(x_1, \dots, x_r) \in f^{-1}(y)} \min\{\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_r}(x_r)\} \\ 0 \quad \text{if } f^{-1}(y) = \emptyset \end{cases} \quad (3.15)$$

Burada; $f^{-1}(y)$, $y = f(x_1, \dots, x_r)$ olmak üzere tüm $x_1 \in X_1, \dots, x_r \in X_r$ noktalarının kümesini gösterir.

(3.15) Denklemini yerine getirmek için önce $x_1, \dots, x_r$ değerleri bulunup bu değerlerdeki $\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_r}(x_r)$ değerleri ve sonra da $\min\{\mu_{A_1}(x_1), \dots, \mu_{A_r}(x_r)\}$ değerleri bulunur. Şayet, $(x_1, \dots, x_r)$ 'in birden fazla kümesi $y = f(x_1, \dots, x_r)$ 'yi sağlıyorsa, bu işlem diğerleri için de tekrarlanır ve minimaların en büyüğü, $\mu_B(y)$ için seçilir. Zadeh, Genişleme İlkesini, minimum t-norm ve maximum t-conorm'u kullanarak tanımlamıştır. Fakat, bunun dışında t-norm ve t-conorm'lar diğer araştırmacılar tarafından kullanılmaktadır. Denklem (3.16)'da Mendel tarafından kullanılan ve doğrudan (3.15) denkleminde türetilmiş ve birleşim için maximum işlemi ve minimum için de genel t-normu ($\star$) görülmektedir [3].

$$f(A_1, \dots, A_r) = \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_r \in X_r} \mu_{A_1}(x_1) * \dots * \mu_{A_r}(x_r) / f(x_1, \dots, x_r) \quad (3.16)$$

• Tip-2 Bulanık Kümelerinin Birleşimi

$\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$, (3.17) ve (3.18)'deki gibi tanımlanan iki tip-2 bulanık kümesi olsun;

$$\tilde{A} = \int_x \mu_{\tilde{A}}(x) / x = \int_x \left[\int_{J_x^u} f_x(u) / u \right] / x \quad J_x^u \subseteq [0,1] \quad (3.17)$$

$$\tilde{B} = \int_x \mu_{\tilde{B}}(x) / x = \int_x \left[\int_{J_x^w} g_x(w) / w \right] / x \quad J_x^w \subseteq [0,1] \quad (3.18)$$

bu iki kümenin birleşimi bir başka tip-2 bulanık kümesi olacaktır;

$$\tilde{A} \cup \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x, v) = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}}(x) / x = \int_{x \in X} \left[\int_{v \in J_x^v \subseteq [0,1]} h_x(v) / v \right] / x \quad (3.19)$$

Burada;

$$\int_{v \in J_x^v \subseteq [0,1]} h_x(v)/v = \varphi \left(\int_{u \in J_x^u} f_x(u)/u, \int_{w \in J_x^w} g_x(w)/w \right) = \varphi(\mu_{\tilde{A}}(x), \mu_{\tilde{B}}(x)) \quad (3.20)$$

Buradaki φ , (3.16)'daki f 'in işlevini yerine getiren, $\mu_{\tilde{A}}(x)$ ve $\mu_{\tilde{B}}(x)$ tip-1 bulanık kümelerinin ikincil üyelik fonksiyonlarının t-conorm fonksiyonudur.

Genişleme İlkesi ve (3.16) denkleminde;

$$\varphi \left(\int_{u \in J_x^u} f_x(u)/u, \int_{w \in J_x^w} g_x(w)/w \right) = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} f_x(u) \star g_x(w) / \varphi(u, w) \quad (3.21)$$

olduğu görülür ve sonuç olarak;

$$\mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}} = \int_{v \in J_x^v \subseteq [0,1]} h_x(v)/v = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} f_x(u) \star g_x(w) / (u \vee w) \quad x \in X \quad (3.22)$$

olarak bulunur. Denklemdaki $\star$ minumum veya çarpma işlemini, $\iint$ ise $J_x^u \times J_x^w$ 'nin birleşimini gösterir.

(3.22) denklemini $\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$ 'nin ikincil üyelik fonksiyonları, $\mu_{\tilde{A}}(x)$ ve $\mu_{\tilde{B}}(x)$ ile ifade etmek istersek;

$$\mu_{\tilde{A} \cup \tilde{B}} = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} f_x(u) \star g_x(w) / v \equiv \mu_{\tilde{A}}(x) \sqcup \mu_{\tilde{B}}(x) \quad x \in X \quad (3.23)$$

şeklinde yazılır ve burada $v \equiv u \vee w$ ve $\sqcup$ katılma (join) işlemini gösterir.

• Tip-2 Bulanık Kümelerin Kesişimi

$\tilde{A}$ ve $\tilde{B}$, tip-2 bulanık kümelerinin kesişimi yine bir tip-2 bulanık kümesidir ve A ve B tip-1 bulanık kümelerinin kesişimi gibidir.

$$\tilde{A} \cap \tilde{B} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x, v) = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}}(x) / x \quad (3.24)$$

Birleşim işlemindekilere benzer şekilde;

$$\mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}} = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} f_x(u) \star g_x(w) / (u \wedge w) \quad x \in X \quad (3.25)$$

$$\mu_{\tilde{A} \cap \tilde{B}} = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} f_x(u) \star g_x(w) / v \equiv \mu_{\tilde{A}}(x) \sqcap \mu_{\tilde{B}}(x) \quad x \in X \quad (3.26)$$

olarak yazılabilir. Burada $v \equiv u \wedge w$ ve $\sqcap$ buluşma (meet) işlemini göstermektedir.

• **Tip-2 Bulanık Kümesinin Tümlenyeni**

Bir $\tilde{A}$, tip-2 bulanık kümesinin tümlenyeni yine bir tip-2 bulanık kümesidir.

$$\tilde{\tilde{A}} \Leftrightarrow \mu_{\tilde{\tilde{A}}}(x, v) = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) / x \quad (3.27)$$

Genişleme ilkesi kullanılarak aşağıdaki ifade elde edilir.

$$\mu_{\tilde{\tilde{A}}}(x) = \int_{u \in J_x^u} f_x(u) / (1 - u) \equiv \neg \mu_{\tilde{A}}(x) \quad x \in X \quad (3.28)$$

Buradaki $\neg$ olumsuzluk (negation) işlemini gösterir.

• **Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler için Katılma (Join) İşlemi**

F ve G, $[l_f, r_f]$ ve $[l_g, r_g]$ domaininde iki aralık tip-1 bulanık kümesi olsun. F ve G arasındaki katılma (join) işlemi;

$$F \sqcup G = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} 1 / (u \vee w) \quad (3.29)$$

şeklinde ifade edilir. Burada, $J_x^u = [l_f, r_f]$ ve $J_x^w = [l_g, r_g]$ 'dir.

• **Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler için Buluşma (Meet) İşlemi (Minumum t-norm veya çarpma t-norm altında)**

F ve G aralık tip-1 kümeleri arasındaki buluşma (meet) işlemi, $J_x^u = [l_f, r_f]$ ve $J_x^w = [l_g, r_g]$ olmak üzere, t-norm çarpma işlemi kullanılarak,

$$F \sqcap G = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} (1 \times 1) / (uw) \quad (3.30)$$

şeklinde ifade edilebilir.

• **Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler için Toplama İşlemi**

F ve G, $[l_f, r_f]$ ve $[l_g, r_g]$ domaininde iki aralık tip-1 bulanık kümesi olsun. F ve G arasındaki toplama işlemi aşağıdaki gibi bulunur.

$$F + G = \int_{u \in [l_f, r_f]} \int_{w \in [l_g, r_g]} 1 \star 1 / (u + w) \quad (3.31)$$

• Aralık Tip-2 Bulanık Kümeler İçin Çarpma İşlemi

F ve G, $[l_f, r_f]$ ve $[l_g, r_g]$ domaininde iki aralık tip-1 bulanık kümesi olsun. F ve G arasındaki toplama işlemi aşağıdaki gibi bulunur.

$$F \cap G = \int_{u \in J_x^u} \int_{w \in J_x^w} (1 \times 1) / (uw) \quad (3.32)$$

3.6.4 Tip-2 Bulanık Kümelerde Tip İndirgeme

Tip-1 bulanık mantık sistemlerinde çıkış, her işlenen kurala karşılık gelen bir tip-1 kümedir. Durulaştırıcı, işlenen tüm kurallara karşılık gelen çıkış kümelerini birleştirip tek bir çıkış kümesi elde eder ve kesin bir sonuç değeri bulur. Ağırlık merkezi ile değer bulma yöntemlerden biridir.

Tip-2 bulanık mantık sistemlerinde her kurala karşılık gelen çıkış kümesi yine bir tip-2 bulanık kümesidir.

Tip indirgeyici, tip-1 bulanık mantık sistemlerinde olmayan ve tip-2 bulanık mantık ile ortaya çıkan bir kısımdır. Tip indirgeyici, tüm çıkış kümelerini toplayıp bir ağırlık merkezi işlemi yapar. Bu işlem sonunda bir tip-1 bulanık kümesi elde edilir. Bu kümeye “tipi indirgenmiş küme” denir. Bu şekilde tüm belirsizlik durumları ortadan kaldırılmış olmaktadır.

Değişik tip indirgeyici tipleri mevcuttur. Bunların bazıları aşağıda kısaca açıklanmıştır.

1- Ağırlık merkezi (centroid) tip indirgeme işlemi :

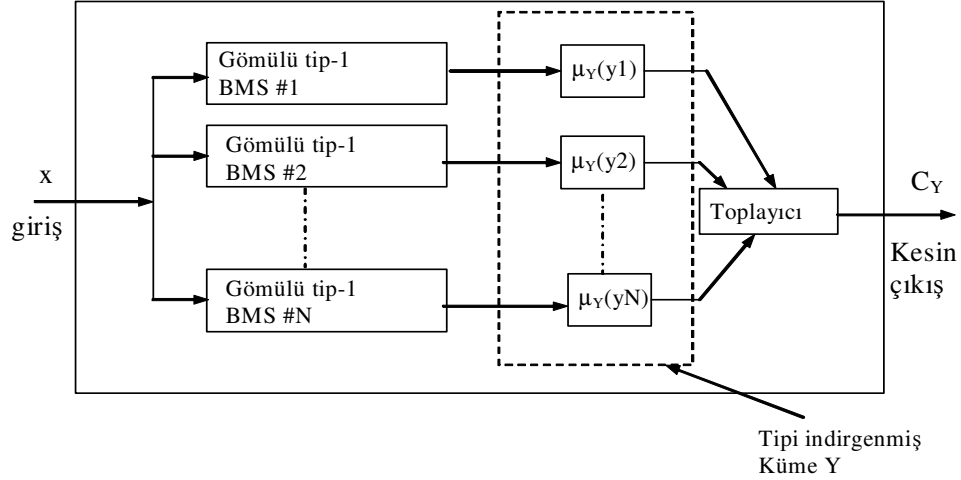
Domaini N noktaya ayrılmış bir tip-1 bulanık kümesinin (A) ağırlık merkezi aşağıdaki gibidir;

$$C_A = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \mu_A(x_i)}{\sum_{i=1}^N \mu_A(x_i)} \quad (3.33)$$

Buna benzer olarak, tip-2 bulanık kümesi için ağırlık merkezi hesabı aşağıdaki gibi yapılabilir;

$$C_A = \int_{\theta_1} \dots \int_{\theta_N} [\mu_{D1}(\theta_1) * \dots * \mu_{DN}(\theta_N)] \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i} \quad (3.34)$$

Bir tip-2 bulanık mantık sistemi, çok sayıda tip-1 bulanık mantık sisteminin bir araya toplanmış şekli olarak düşünülebilir. Tipi indirgenmiş küme, Y, tüm bu gömülü tip-1 bulanık mantık sisteminin çıkışlarının toplanılmasıdır. Şekil 3.10'daki blok diyagramda bu durum gösterilmektedir.



Şekil 3.10 Bir Tip-2 Bulanık Mantık Sistemi çok sayıda gömülü tip-1 bulanık mantık sisteminin bir araya toplanmış hali olarak düşünülebilir.

2- Yükseklik (height) tip indirgeme işlemi :

Yükseklik tip durultucu, çıkış kümesinde en büyük üyeliğe sahip noktadaki bir singleton ile her bir kural çıkış kümesini değiştirir ve bu singletonlardan oluşmuş tip-1 kümenin ağırlıklı merkezini hesaplar.

Yükseklik tip düşürücüsü, her tip-2 çıkış kümesini, y-domaini tek bir noktaya sahip (ikincil üyelik fonksiyonları tip-1 bulanık küme olan) bir tip-2 bulanık kümesi ile değiştirir. Yükseklik tip düşürücüye ait ifade (3.35)'de görülmektedir;

$$Y_h(x) = \int_{\theta_1 \in J_{\bar{y}^1}} \dots \int_{\theta_M \in J_{\bar{y}^M}} \left[f_{\bar{y}^1}(\theta_1) * \dots * f_{\bar{y}^M}(\theta_M) \right] \frac{\sum_{l=1}^N \bar{y}^l \theta_l}{\sum_{l=1}^N \theta_l} \quad (3.35)$$

Bu iki tip düşürücü dışında aşağıda isimleri belirtilen başka tip düşürme yöntemleri bulunmaktadır.

3- Toplamların merkezi tip indirgeme işlemi

Toplamların merkezi tip durultucu, tip-1 bulanık kümelerinin çıkışlarını toplayarak birleştirir, yani;

$$\mu_B(y) = \sum_{\ell=1}^M \mu_{B^\ell}(y) \quad \forall y \in Y \quad (3.36)$$

ve buradan kümenin merkezi bulunur. Toplamların merkezi tip durultucu aşağıdaki gibi ifade edilebilir;

$$y_a(x) = \frac{\sum_{\ell=1}^M c_{B^\ell} a_{B^\ell}}{\sum_{\ell=1}^M a_{B^\ell}} \quad (3.37)$$

burada $c_{B^\ell} = l'$ inci çıkış kümesinin ağırlık merkezini, a_{B^ℓ} ise bu kümenin alanını gösterir.

Toplamların merkezi tip indirgeyici, tip-2 kural çıkış kümelerini ikincil üyelik fonksiyonlarını toplayarak birleştirir ve sonra bu sonuç tip-2 kümesinin ağırlık merkezini bulur. Yani;

$$\mu_{\tilde{B}}(y) = \sum_{\ell=1}^M \mu_{\tilde{B}^\ell}(y) \quad \forall y \in Y \quad (3.38)$$

4- Kümelerin merkezi tip indirgeme işlemi

Bu tip indirgeme yönteminde (3.39) denklemi yardımıyla indirgeme işlemi yapılmaktadır.

$$Y_{\cos}(x) = \int_{d_1} \cdots \int_{d_M} \int_{e_1} \cdots \int_{e_M} 1 \left/ \frac{\sum_{l=1}^M d_l e_l}{\sum_{l=1}^M e_l} \right. \quad (3.39)$$

5- Uyarlanmış yükseklik tip indirgeme işlemi

Bu indirgeme yönteminde aşağıdaki denklem yardımıyla indirgeme işlemi yapılmaktadır. Yükseklik tip indirgeyiciden farkı her bir çıkış ikincil üyelik fonksiyonu $\mu_{\tilde{B}^\ell}(\tilde{y})$, $1/\delta^{l^2}$ faktörü ile çarpılmaktadır.

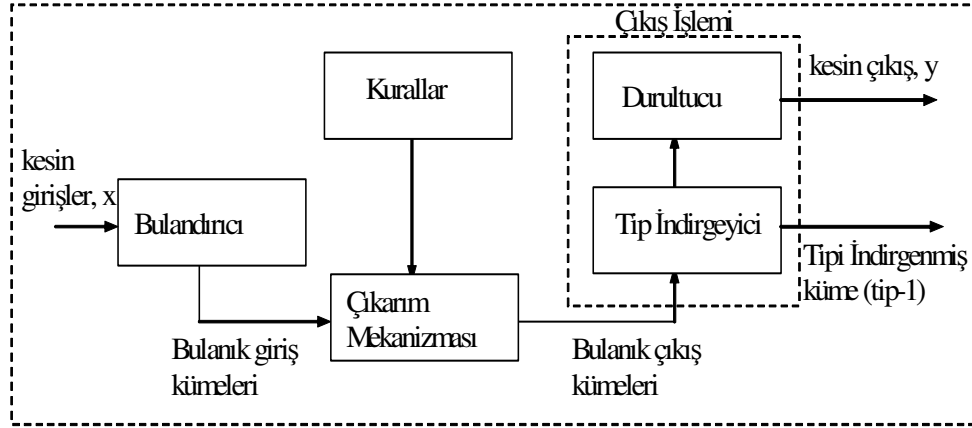
$$Y_{mh}(x) = \int_{\theta_1} \cdots \int_{\theta_M} \left/ \frac{\sum_{l=1}^M y^{-l} \theta_l}{\sum_{l=1}^M \theta_l} \right/ \delta^{l^2} \quad (3.40)$$

Yukarıda anlatılan yöntemlere de bakıldığında Tip indirgeme işleminin hesaplama olarak gayet zor ve karmaşık olduğu açık biçimde görülmektedir. Yükseklik ve uyarlanmış yükseklik kullanmak işlemleri oldukça kolaylaştırır. Sadece tek kuralın işletildiği durumda kümelerin merkezi tip düşürücü kullanmak uygun olur. Tip indirgeme yöntemlerini kolaydan

zora doğru sıralamak gerekirse; yükseklik ve yükseklik en kolay, kümelerin merkezi orta zorlukta, ağırlık merkezi ve toplamaların merkezi en zor olan indirgeme yöntemidir.

3.7 Tip-2 Bulanık Sistemler

Tip-2 bulanık mantık sistemine ait genel bir blok diyagram, Şekil 3.11’de görülmektedir. Şekil 3.11’de görüldüğü gibi tip-1 bulanık mantık sistemi ile tip-2 bulanık mantık sistemi arasındaki önemli fark, çıkış işlem bloğudur. Bu blokta durultucudan önce “tip indirgeyici” bulunmaktadır. Tip-2 bulanık mantık sistemi geliştirilirken, tüm varsayım (antecedent) ve sonuç (consequent) kümeleri tip-2 olarak kabul edilir. Sistemde sadece bir tek Tip-2 bulanık küme olsa bile sistem Tip-2 kabul edilir. Yani, herhangi bir varsayım veya sonuç kümesinin tip-2 olması, bu BMK’nın tip-2 olması için yeterlidir.



Şekil 3.11 Tip-2 Bulanık Mantık Sistemi

Bulanık mantığın prensipleri, Tip-1 kümelerden ve Tip-2 kümelere geçişte değişme göstermemiştir. Sadece değişen üyelik fonksiyonlarının yapısı ve buna bağlı olarak da üyelik fonksiyonları üzerindeki işlemlerdir. Bulanık mantığın temel prensipleri, üyelik fonksiyonlarının yapısından bağımsızdır.

Aşağıda tip-2 BMK’nın kısımları hakkında kısa bilgiler verilmiştir. Daha ayrıntılı bilgiler önceki bölümlerde verildiğinden burada tekrar ayrıntıya girilmemiştir.

• Kurallar

Tip-1 ile Tip-2 bulanık mantık sistemi arasındaki fark üyelik fonksiyonlarının yapısı (tabiatı) ile ilgilidir. Bu sebeple kuralların oluşturulmasında önemli bir fark olmayabilir. Sonuç

olarak, kural, kuraldır. Yani her iki durumda kuralların yapısı aynıdır fakat kümeler Tip-2 bulanık kümelerdir.

Tip-1’de kural yapısı:

$$R^l : IF \ x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and } x_2 \text{ is } F_2^l \text{ and...and } x_p \text{ is } F_p^l \text{ THEN } y \text{ is } G^l \quad l=1,...,M$$

şeklindedir.

Tip-2’de kural yapısı aynı kalmaktadır. Sadece kuraldaki bir veya daha fazla küme tip-2 olmaktadır. P tane girişi olan $x_1 \in X_1, ..., x_p \in X_p$, tek çıkışlı, M tane kurala sahip tip-2 bulanık mantık sistemde 1. kural

$$R^l : IF \ x_1 \text{ is } \tilde{F}_1^l \text{ and } x_2 \text{ is } \tilde{F}_2^l \text{ and...and } x_p \text{ is } \tilde{F}_p^l \text{ THEN } y \text{ is } \tilde{G}^l \quad l = 1, ..., M \quad (3.41)$$

şeklinde ifade edilir.

Bu kural $X_1 \times ... \times X_p$ giriş uzayı ve Y çıkış uzayı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

• Çıkarım Mekanizması

Tip-1 bulanık mantık sisteminde çıkarım mekanizması, kuralları birleştirir ve tip-1 giriş bulanık kümelerinden Tip-1 çıkış bulanık kümelerine doğru bir planlama ortaya koyar. Başka bir ifade ile, bulandırıcının çıkışlarını (üyelik derecelerini) ve kural tabanını kullanarak bir bulanık küme oluşturur. Bu bulanık küme, daha sonra, durultucu tarafından, kontrolörün çıkışını hesaplamak için kullanılacaktır. Kuraldaki varsayımlar t-norm ile bağlıdır. Giriş kümelerindeki üyelik dereceleri çıkış kümesindeki üyelik dereceleri ile sup-star yöntemi kullanılarak birleştirilir.

Tip-2’de de durum oldukça benzerdir. Yine kurallar birleştirilir, Tip-2 giriş bulanık kümelerinden tip-2 çıkış bulanık kümelerine doğru bir planlama ortaya konulur. Bunun için tip-2 kümeler için birleşim ve kesişimler hesaplanmalıdır. Tip-2 bulanık mantık sistemde de üyelik dereceleri, genişletilmiş sup-star yöntemi kullanılarak birleştirilmektedir.

Denklem (3.41)’den görüldüğü gibi her kural tip-2 bulanık ima işlemini açıklamaktadır.

$\tilde{F}_1^l \times \dots \times \tilde{F}_p^l = \tilde{A}^l$ olarak alınırsa (3.41) denklemi, (3.42)’deki şekilde yeniden düzenlenebilir;

$$R^l : \tilde{F}_1^l \times \dots \times \tilde{F}_p^l \rightarrow \tilde{G}^l = \tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l \quad l = 1, ..., M \quad (3.42)$$

.

R^l , $\mu_{R^l}(x, y) = \mu_{R^l}(x_1, ..., x_p, y)$ üyelik fonksiyonuyla tanımlanmıştır.

$$\mu_{R^l}(x, y) = \mu_{\tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l}(x, y) \quad (3.43)$$

$$\begin{aligned}\mu_{R^l}(x, y) &= \mu_{\tilde{A}^l \rightarrow \tilde{G}^l}(x, y) = \mu_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \Pi \dots \Pi \mu_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \Pi \mu_{\tilde{G}^l}(y) \\ &= \left[\Pi_{i=1}^p \mu_{\tilde{F}_i^l}(x_i) \right] \Pi \mu_{\tilde{G}^l}(y)\end{aligned}\quad (3.44)$$

Burada, meet işlemi için sadece çarpım ve minimum t-norm kullanılmıştır.

P tane giriş için $\tilde{A}_x$ tip-2 bulanık kümesi,

$$\mu_{\tilde{A}_x}(x) = \mu_{\tilde{X}_1}(x_1) \Pi \dots \Pi \mu_{\tilde{X}_p}(x_p) = \Pi_{i=1}^p \mu_{\tilde{X}_i}(x_i) \quad (3.45)$$

şeklinde gösterilmektedir. Her kural $(R^l), \tilde{B}^l = \tilde{A}_x \circ R^l$ ile tip-2 bulanık ilişkisini belirlemektedir.

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{A}_x \circ R^l}(y) = \sqcup_{x \in X} \left[\mu_{\tilde{A}_x}(x) \Pi \mu_{R^l}(x, y) \right] \quad y \in Y \quad l = 1, \dots, M \quad (3.46)$$

Denklem (3.46), Şekil 3.11'deki giriş-çıkış ilişkisini, yani başka bir ifadeyle, çıkarım mekanizmasındaki bir kuralı işleten tip-2 bulanık küme ile bu mekanizmanın çıkışındaki tip-2 bulanık küme arasındaki ilişkiyi göstermektedir. (3.44) ve (3.45) denklemleri, (3.46) denkleminde yerine yazıldığında; $l = 1, \dots, M$

$$\begin{aligned}\mu_{\tilde{B}^l}(y) &= \sqcup_{x \in X} \left[\mu_{\tilde{A}_x}(x) \Pi \mu_{R^l}(x, y) \right] \\ &= \sqcup_{x \in X} \left\{ \left[\Pi_{i=1}^p \mu_{\tilde{X}_i}(x_i) \right] \Pi \left[\Pi_{i=1}^p \mu_{\tilde{F}_i^l}(x_i) \right] \Pi \mu_{\tilde{G}^l}(y) \right\} \\ &= \sqcup_{x \in X} \left\{ \left[\Pi_{i=1}^p \mu_{\tilde{X}_i}(x_i) \Pi \mu_{\tilde{F}_i^l}(x_i) \right] \Pi \mu_{\tilde{G}^l}(y) \right\} \\ &= \mu_{\tilde{G}^l}(y) \Pi \left\{ \left[\sqcup_{x_1 \in X_1} \mu_{\tilde{X}_1}(x_1) \Pi \mu_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \right] \Pi \right. \\ &\quad \left. \dots \Pi \left[\sqcup_{x_p \in X_p} \mu_{\tilde{X}_p}(x_p) \Pi \mu_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \right] \right\}, \quad y \in Y\end{aligned}\quad (3.47)$$

denklemini elde edilir.

• Bulandırıcı

Bulandırıcı, kesin x değerini X dahilinde bir tip-2 bulanık kümesine ($\tilde{A}$) dönüştürür. Başka bir ifade ile, giriş değişkenlerinin değerlerini, çıkarım mekanizmasında kolayca kullanılacak bilgilere dönüştüren giriş birimidir diyebiliriz. Tip-1'deki bulandırıcı ile tip-2'deki bulandırıcı arasında işlem olarak fark yoktur denilebilir. Fakat tip-2'deki bulandırıcı çıkışındaki küme tip-2 kümedir. Bulandırıcı, giriş değişkenlerinin aldığı her değere, ilgili giriş

değişkeni için tanımlanan tüm bulanık kümeler için bir üyelik derecesi hesaplar. X 'de tanımlı bir $\tilde{A}_x$ tip-2 bulanık kümesinde $x = (x_1, \dots, x_p)^T \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_p \equiv X$, bir kesin noktadır.

Şayet, $x = x'$ için $\mu_{\tilde{A}_x}(x) = 1/1$ ve diğer tüm $x \neq x'$ değerleri için $\mu_{\tilde{A}_x}(x) = 1/0$ ise o zaman $\tilde{A}_x$ bir singleton tip-2 bulanık kümedir.

• Tip İndirgeyici (Type reducer)

Tip indirgeyici, tip-1 bulanık mantık sistemlerinde olmayan ve tip-2 bulanık mantık ile ortaya çıkan bir kısımdır. Tip indirgeyici, tüm çıkış kümelerini toplayıp bir ağırlık merkezi işlemi yapar. Bu işlem sonunda bir tip-1 bulanık kümesi elde edilir. Bu kümeye “tipi indirgenmiş küme” denir. Bu şekilde tüm belirsizlik durumları ortadan kaldırılmış olmaktadır.

3.7.1 Singleton Tip-2 Bulanık Mantık Sistemler

Singleton Tip-2 BMS'ler, kurallardaki varsayımlar ve sonuçlarla ilgili belirsizlikleri hesaba katan fakat bunun yanında giriş ölçüm belirsizliklerine ilgisiz bir yapıya sahiptir. Singleton Tip-2 BMS'ler, “singleton” ifadesini bulandırıcısının “singleton” olmasından dolayı almaktadırlar.

Daha önce de ifade edildiği gibi, bulandırıcı, giriş değişkenlerinin aldığı her değere, ilgili giriş değişkeni için tanımlanan tüm bulanık kümeler için bir üyelik derecesi hesaplamaktadır. X 'de tanımlı bir $\tilde{A}_x$ tip-2 bulanık kümesinde $x = (x_1, \dots, x_p)^T \in X_1 \times X_2 \times \dots \times X_p \equiv X$, bir kesin noktadır. Şayet, $x = x'$ için $\mu_{\tilde{A}_x}(x) = 1/1$ ve diğer tüm $x \neq x'$ değerleri için $\mu_{\tilde{A}_x}(x) = 1/0$ ise o zaman $\tilde{A}_x$ bir singleton tip-2 bulanık kümedir.

$\tilde{A}_x$, tip-2 bulanık giriş kümesi tek bir x' elamanına sahip olduğunda (3.47) denkleminin hesaplanması daha kolay olacaktır, çünkü her bir $\mu_{\tilde{A}_x}(x_i)$, sadece bir noktada ($x_i = x'_i$) sıfırdan farklı olur, Böylece (3.47) denklemi aşağıdaki gibi sadeleştirilebilir;

$$\mu_{\tilde{B}^l} = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \left[\bigcup_{x_1 \in X_1} \mu_{\tilde{A}_1}(x_1) \cap \mu_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \right] \cap \dots \cap \left[\bigcup_{x_p \in X_p} \mu_{\tilde{A}_p}(x_p) \cap \mu_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \right]$$

$$\begin{aligned}
&= \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \{ \mu_{\tilde{X}_1}(x'_1) \cap \mu_{\tilde{F}_1^l}(x'_1) \} \cap \dots \cap \{ \mu_{\tilde{X}_p}(x_p) \cap \mu_{\tilde{F}_p^l}(x'_p) \} \\
&= \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \{ (1/1) \cap \mu_{\tilde{F}_1^l}(x'_1) \} \cap \dots \cap \{ (1/1) \cap \mu_{\tilde{F}_p^l}(x'_p) \} \\
&= \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \left[\bigcap_{i=1}^p \mu_{\tilde{F}_i^l}(x'_i) \right], \quad y \in Y
\end{aligned} \tag{3.48}$$

Fakat yine de (3.48) denklemini hesaplamak kolay değildir. Genel tip-2 bulanık kümelerde buluşma işleminin hesaplanması oldukça karmaşıktır. Bu sebeple uygulamalarda kolaylık olması için genel tip-2 bulanık kümeler yerine aralık tip-2 bulanık kümeler tercih edilmektedir. Aralık tip-2 bulanık kümelerde yapılan işlemleri ve tip indirgeme de kolaylık olması açısından 3.bölümde anlatılmış olan “alt ve üst üyelik fonksiyonlar” ile aşağıda belirtilen kavramlar çok önemlidir.

• **Üyelik fonksiyonu** ($\mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$): $\underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$ ve $\overline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$ alt ve üst üyelik fonksiyonlarını, $l = 1, \dots, M$ kural sayısını, $k = 1, \dots, p$ varsayım sayısını ifade etmek üzere, $\mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$ ikinci üyelik fonksiyonu, $\mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k) = \int_{w^l \in [\underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k), \overline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)]} 1/w^l$ şeklinde gösterilebilir.

• **Merkezi Belirsiz Gaussian Birincil Üyelik Fonksiyonu:** Çok kullanışlı bir üyelik fonksiyonudur.

$$\mu_k^l(x_k) = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_k - m_k^l}{\sigma_k^l} \right)^2 \right] \quad m_k^l \in [m_{k1}^l, m_{k2}^l] \tag{3.49}$$

Burada; $l = 1, \dots, M$ kural sayısını, $k = 1, \dots, p$ varsayım sayısını göstermektedir.

Üst üyelik fonksiyonu $\overline{\mu}_k^l(x_k)$,

$$\overline{\mu}_k^l(x_k) = \begin{cases} N(m_{k1}^l, \sigma_k^l; x_k) & x_k < m_{k1}^l \\ 1 & m_{k1}^l \leq x_k \leq m_{k2}^l \\ N(m_{k2}^l, \sigma_k^l; x_k) & x_k > m_{k2}^l \end{cases} \tag{3.50}$$

ve alt üyelik fonksiyonu $\underline{\mu}_k^l(x_k)$,

$$\underline{\mu}_k^l(x_k) = \begin{cases} N(m_{k2}^l, \sigma_k^l; x_k) & x_k \leq \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} \\ N(m_{k1}^l, \sigma_k^l; x_k) & x_k > \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} \end{cases} \tag{3.51}$$

• **Standart Sapması Belirsiz Gaussian Birincil Üyelik Fonksiyonu:** Çok kullanışlı bir diğer üyelik fonksiyonudur.

$$\mu_k^l(x_k) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_k - m_k^l}{\sigma_k^l}\right)^2\right] \quad \sigma_k^l \in [\sigma_{k1}^l, \sigma_{k2}^l] \quad (3.52)$$

Burada; $l = 1, \dots, M$ kural sayısını, $k = 1, \dots, p$ varsayım sayısını göstermektedir. Üst üyelik fonksiyonu $\bar{\mu}_k^l(x_k)$,

$$\bar{\mu}_k^l(x_k) = N(m_k^l, \sigma_{k2}^l; x_k) \quad (3.53)$$

ve alt üyelik fonksiyonu $\underline{\mu}_k^l(x_k)$,

$$\underline{\mu}_k^l(x_k) = N(m_k^l, \sigma_{k1}^l; x_k) \quad (3.54)$$

Aşağıda, aralık singleton tip-2 bulanık mantık sistem için önemli sonuçlar bir teorem yardımıyla özetlenmiştir:

Teorem : a) Giriş ve varsayım işlemi sonucu (kuralın kesinlik derecesi/AND işlemi sonucu):

$$F^l(x') = [\underline{f}^l(x'), \bar{f}^l(x')] \equiv [\underline{f}^l, \bar{f}^l] \quad (3.55)$$

Burada :

$$\underline{f}^l(x') = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x'_1) \star \dots \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x'_p) \quad (3.56)$$

ve

$$\bar{f}^l(x') = \bar{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x'_1) \star \dots \star \bar{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x'_p) \quad (3.57)$$

b) İma işlemi sonucu:

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \int_{b^l \in [\underline{f}^l * \underline{\mu}_{\tilde{G}^l}(y), \bar{f}^l * \bar{\mu}_{\tilde{G}^l}(y)]} 1/b^l, \quad y \in Y \quad (3.58)$$

$\bar{\mu}_{\tilde{G}^l}(y)$ ve $\underline{\mu}_{\tilde{G}^l}(y)$, $\mu_{\tilde{G}^l}(y)$ 'nin üst ve alt üyelik dereceleridir.

c) İma işlemi sonucu birleştirilmiş çıkış sonuç kümeler: (M kuraldan N tanesi kullanılmıştır.)

$$\mu_{\tilde{B}}(y) = \int_b \in [\underline{f}^1 * \underline{\mu}_{\tilde{G}^1}(y) \vee \dots \vee [\underline{f}^N * \underline{\mu}_{\tilde{G}^N}(y)] [\bar{f}^1 * \bar{\mu}_{\tilde{G}^1}(y) \vee \dots \vee [\bar{f}^N * \bar{\mu}_{\tilde{G}^N}(y)]] 1/b, \quad y \in Y \quad (3.59)$$

Örnek : Şekil 3.12’de giriş-varsayım işlemi iki varsayım, tek sonuç küme, minumum ve çarpım t-norm için gösterilmiştir.

$$\underline{f}^l = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1}(x'_1) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_2}(x'_2) \quad \text{ve} \quad \overline{f}^l = \overline{\mu}_{\tilde{F}_1}(x'_1) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_2}(x'_2)$$

minumum t-norm için,

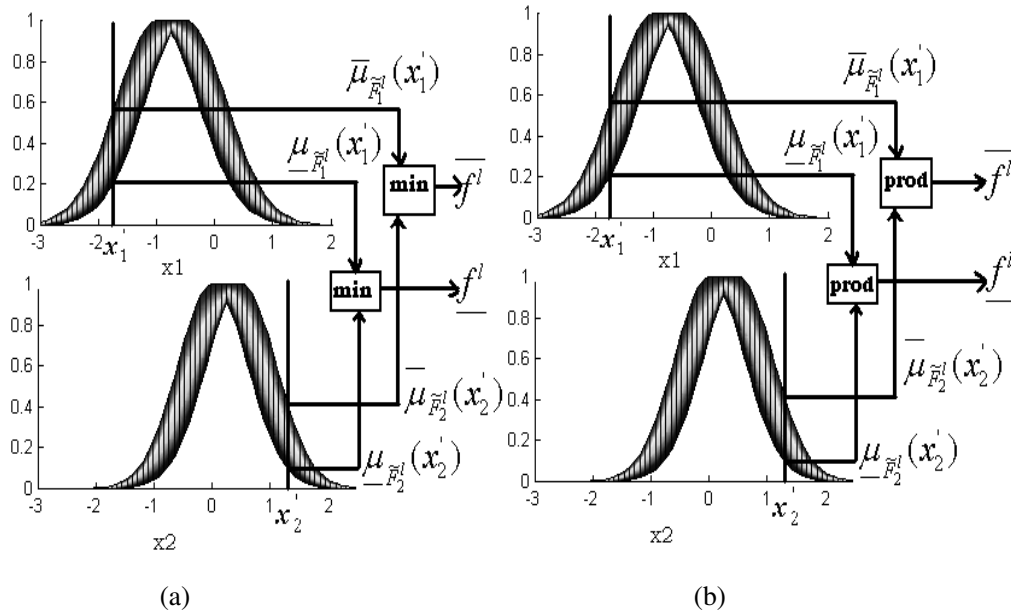
$$\underline{f}^l = \min[\underline{\mu}_{\tilde{F}_1}(x'_1), \underline{\mu}_{\tilde{F}_2}(x'_2)] \quad (3.60)$$

$$\overline{f}^l = \min[\overline{\mu}_{\tilde{F}_1}(x'_1), \overline{\mu}_{\tilde{F}_2}(x'_2)] \quad (3.61)$$

çarpım t-norm için,

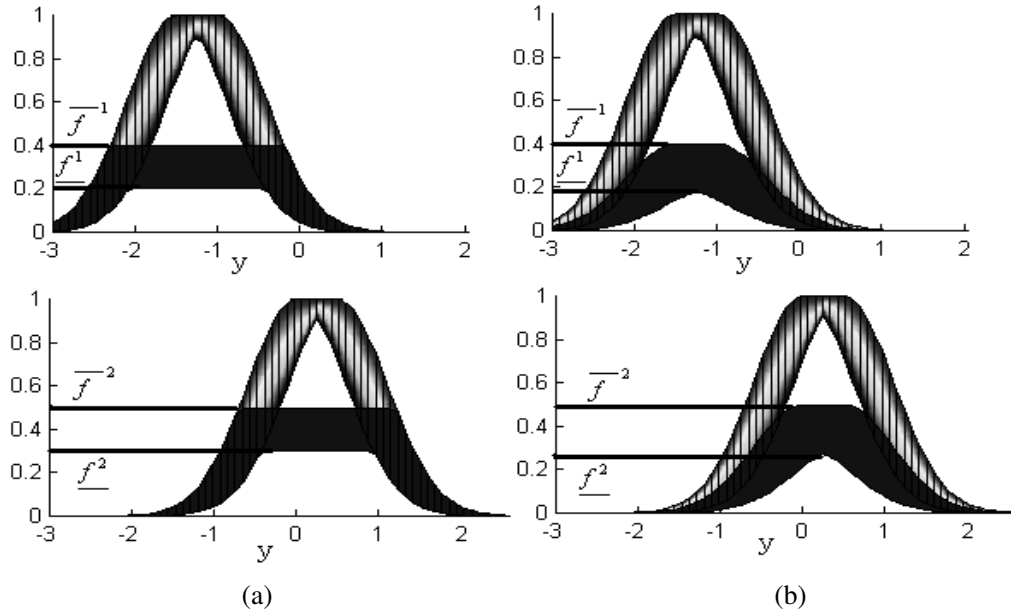
$$\underline{f}^l = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1}(x'_1) \times \underline{\mu}_{\tilde{F}_2}(x'_2) \quad (3.62)$$

$$\overline{f}^l = \overline{\mu}_{\tilde{F}_1}(x'_1) \times \overline{\mu}_{\tilde{F}_2}(x'_2) \quad (3.63)$$



Şekil 3.12 Aralık singleton tip-2 bulanık mantık sistem için giriş varsayım işlemi sonucu.
(a) minimum t-norm (b) çarpım t-norm

Şekil 3.13’de çıkış sonuç (ima) işlemi minimum ve çarpım t-norm için gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Aralık singleton tip-2 bulanık mantık sistem için sonuç (consequent) işlemi neticesi.
(a) minimum t-norm (b) çarpım t-norm

Şekil 3.11'den görüldüğü gibi Tip-2 kontrolörde, bulandırıcıyı, çıkarım mekanizması, tip-indirgeme ve durultma izlemektedir. Giriş-varsayım işleminin sonucu aralıklı tip-1 kümedir. Şekil 3.13'den görüldüğü gibi $\underline{f}^l$ ve $\overline{f}^l$ alt ve üst kural kesinlik derecelerini göstermektedir. Aralıklı çıkış kümesi, denklem (3.59)'dan bulunabilir. Tip-indirgeme yöntemi olarak daha önce anlatılan bir yöntem seçilir. Elde edilen aralık küme, y^l ve y^r 'nin aritmetik ortalaması alınarak durultulur. Sonuç olarak, bir aralık singleton tip-2 BMK'ün durultulmuş çıkışı (3.64)'deki gibidir:

$$y(x) = f_{s2}(x) = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (3.64)$$

3.7.2 Tip-1 Non-singleton Tip-2 Bulanık Mantık Sistemler

Girişleri tip-1 bulanık sayılar olarak modellenmiş tip-2 BMK'lerine, Tip-1 Non-singleton Tip-2 BMK denir. Bir tip-1 non-singleton tip-2 BMK'ün yapısı, bir singleton tip-2 BMK'ün yapısı ile aynı diyagramla gösterilebilir. Kural tabanı her ikisinde de aynıdır. Farklılık bulandırıcıdadır. Burada girişler tip-1 kümeler gibi ele alınır ve bu da dolayısıyla çıkarım mekanizmasını etkiler. Çıkarım mekanizmasının çıkışı, yine tip-2 bulanık kümedir. Böylece, tip

indirgeyici ve durultucu blokları bir singleton tip-2 BMK’de olduğu gibi tip-1 non-singleton tip-2 BMK’de aynı işlemleri yerine getirirler. Şimdi, daha önceki bölüme benzer olarak bu sefer de Tip-1 non-singleton tip-2 BMK’ün bölümlerini inceleyelim;

• Bulandırıcı

$x = x'_i$ için $\mu_{X_i}(x'_i) = 1$ ($i = 1, \dots, p$) ve x_i, x'_i ’den uzaklaştıkça $\mu_{X_i}(x_i)$ değeri 1’den küçük değerlere sahip ise bu tip bulandırıcılar, Non-singleton bulandırıcılar olarak adlandırılır. Örnek üyelik fonksiyonları aşağıdaki gibi yazılabilir:

$$1. \text{ Gaussian: } \mu_{X_i}(x_i) = \exp\left[-(x_i - x'_i)^2 / 2\sigma^2\right]$$

$$2. \text{ Üçgen: } \mu_{X_i}(x_i) = \max(0, 1 - |(x_i - x'_i)/c|)$$

$$3. \text{ İsimli: } \mu_{X_i}(x_i) = 1/(1 + |(x_i - x'_i)/c|^n)$$

x'_i Bulanık kümenin merkez değeri ve $\sigma(c)$ bu kümenin yayılımını (sigmasını) göstermektedir.

• Bulanık Çıkarım Mekanizması

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \left[\bigcap_{x_1 \in X_1} \mu_{\tilde{X}_1}(x_1) \cap \mu_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \right] \cap \\ \dots \cap \left[\bigcap_{x_p \in X_p} \mu_{\tilde{X}_p}(x_p) \cap \mu_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \right], y \in Y \end{aligned} \quad (3.65)$$

Tip-1 non-singleton bulandırıcı için (3.64) denklemi, tip-2 giriş kümeleri yerine tip-1 kümeler yazılarak,

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \left[\bigcap_{x_1 \in X_1} \mu_{X_1}(x_1) \cap \mu_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \right] \cap \\ \dots \cap \left[\bigcap_{x_p \in X_p} \mu_{X_p}(x_p) \cap \mu_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \right], y \in Y \end{aligned} \quad (3.66)$$

şeklinde yeniden düzenlenebilir.

$$\mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \equiv \mu_{X_k}(x_k) \cap \mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k) \quad (3.67)$$

olarak tanımlanırsa,

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \left[\bigcap_{x_1 \in X_1} \mu_{\tilde{Q}_1^l}(x_1) \right] \cap \dots \cap \left[\bigcap_{x_p \in X_p} \mu_{\tilde{Q}_p^l}(x_p) \right] \\ = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \left\{ \bigcap_{x \in X} \left[\bigcap_{k=1}^p \mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \right] \right\}, y \in Y \end{aligned} \quad (3.68)$$

olur.

$$\mu_{\tilde{Q}^l}(x) \equiv \prod_{k=1}^p \mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \quad (3.69)$$

olarak tanımlanırsa,

$$F^l(x') \equiv \sqcup_{x \in X} \left[\prod_{k=1}^p \mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \right] = \sqcup_{x \in X} \mu_{\tilde{Q}^l}(x) \quad (3.70)$$

ve

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \prod F^l(x'), \quad y \in Y \quad (3.71)$$

olur. Bu denklem tip-1 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistemler için temel denklemdir.

• Aralık Tip-1 Non-Singleton Tip-2 Bulanık Mantık Sistemler

Genel olarak, keyfi tip-2 bulanık kümeler için denklem (3.71)'i hesaplamak çok zor olduğundan aralık tip-2 kümeler kullanılmaktadır. Aşağıda, Aralık tip-1 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistem için önemli sonuçlar bir teorem yardımıyla özetlenmiştir [50]:

Teorem : a) Giriş ve Varsayım işlemi sonucu (kuralın kesinlik derecesi/AND işlemi sonucu):

$$F^l(x') = [\underline{f}^l(x'), \overline{f}^l(x')] \equiv [\underline{f}^l, \overline{f}^l] \quad (3.72)$$

$$\begin{aligned} \underline{f}^l(x') = \sup_x \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_p \in X_p} [\mu_{X_1}(x_1) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1)] \star \\ \dots \star [\mu_{X_p}(x_p) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p)] \Big/ x \end{aligned} \quad (3.73)$$

ve

$$\begin{aligned} \overline{f}^l(x') = \sup_x \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_p \in X_p} [\mu_{X_1}(x_1) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1)] \star \\ \dots \star [\mu_{X_p}(x_p) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p)] \Big/ x \end{aligned} \quad (3.74)$$

b) İma işlemi sonucu:

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \int_{b^l \in [\underline{f}^l \star \underline{\mu}_{\tilde{G}^l}(y), \overline{f}^l \star \overline{\mu}_{\tilde{G}^l}(y)]} 1/b^l, \quad y \in Y \quad (3.75)$$

$\overline{\mu}_{\tilde{G}^l}(y)$ ve $\underline{\mu}_{\tilde{G}^l}(y)$, $\mu_{\tilde{G}^l}(y)$ 'nin üst ve alt üyelik dereceleridir.

c) İma işlemi sonucu birleştirilmiş çıkış kümeleri: (M kuraldan N tanesi kullanılmıştır.)

$$\mu_{\tilde{B}}(y) = \int_{b \in [\underline{f}^l * \underline{\mu}_{\tilde{G}^1}(y) \vee \dots \vee [\underline{f}^N * \underline{\mu}_{\tilde{G}^N}(y)] [\bar{f}^1 * \bar{\mu}_{\tilde{G}^1}(y) \vee \dots \vee [\bar{f}^N * \bar{\mu}_{\tilde{G}^N}(y)]]} 1/b, \quad y \in Y \quad (3.76)$$

İspat:

Denklem (3.70) kullanılarak $F^l(x')$ 'i hesaplamak için, önce denklem (3.67)'den $\mu_{\tilde{Q}^l}(x_k)$ sonra denklem (3.69)'dan $\mu_{\tilde{Q}^l}(x)$ bulunur. Aralık tip-1 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistemler için,

$$\mu_{X_k}(x_k) = [\underline{\mu}_{X_k}(x_k), \bar{\mu}_{X_k}(x_k)] \Big|_{\underline{\mu}_{X_k}(x_k) = \bar{\mu}_{X_k}(x_k)} \quad (3.77)$$

ve

$$\mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k) = \int_{w^l \in [\underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k), \bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)]} 1/w^l, \quad y \in Y \quad (3.78)$$

denklemlerinden;

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) &= \mu_{X_k}(x_k) \Pi \mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k) \\ &= \int_{q^l \in [\mu_{X_k}(x_k) * \underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k), \mu_{X_k}(x_k) * \bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)]} 1/q^l \\ &= [\mu_{X_k}(x_k) * \underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k), \mu_{X_k}(x_k) * \bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)] \quad \forall x_k \in X_k \end{aligned} \quad (3.79)$$

elde edilir. Tip-1 giriş kümesi ve varsayım tip-2 kümesi arasında T-norm (çarpım veya minimum) işareti kullanılmıştır. Denklem (3.79)'den $\mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k)$ 'nin alt $\underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k)$ ve üst

$\bar{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k)$ fonksiyonlarının

$$\underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) = \int_{x_k \in X_k} [\mu_{X_k}(x_k) * \underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)] / x_k \quad (3.80)$$

$$\bar{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) = \int_{x_k \in X_k} [\mu_{X_k}(x_k) * \bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)] / x_k \quad (3.81)$$

olduğu görülmektedir. Denklem (3.69)'a göre alt ve üst üyelik fonksiyonları,

$$\begin{aligned} \bar{\mu}_{\tilde{Q}^l}(x) &= \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_p \in X_p} [\mu_{X_1}(x_1) * \bar{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1)] * \\ &\quad \dots * [\mu_{X_p}(x_p) * \bar{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p)] / x \end{aligned} \quad (3.82)$$

$$\begin{aligned} \underline{\mu}_{\tilde{Q}^l}(x) &= \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_p \in X_p} [\mu_{X_1}(x_1) * \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1)] * \\ &\quad \dots * [\mu_{X_p}(x_p) * \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p)] / x \end{aligned} \quad (3.83)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Denklem (3.82)'den

$$\begin{aligned} \overline{f}^l(x') = \sup_x \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_p \in X_p} [\mu_{X_1}(x_1) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1)] \star \\ \dots \star [\mu_{X_p}(x_p) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p)] \Big/ x \end{aligned} \quad (3.84)$$

bulunur. $F^l(x')$ 'nin sağ en büyük noktası $\overline{f}^l(x')$, $\overline{\mu}_{\tilde{Q}^l}(x)$ 'nin maximum değerini (supremum) göstermektedir. Denklem (3.83)'den

$$\begin{aligned} \underline{f}^l(x') = \sup_x \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_p \in X_p} [\mu_{X_1}(x_1) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1)] \star \\ \dots \star [\mu_{X_p}(x_p) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p)] \Big/ x \end{aligned} \quad (3.85)$$

bulunur. $F^l(x')$ 'nin sol en büyük noktası $\underline{f}^l(x')$, $\underline{\mu}_{\tilde{Q}^l}(x)$ 'nin maximum değerini (supremum) göstermektedir.

$$\underline{f}_k^l(x_k') \equiv \sup_{x_k} \int_{x_k \in X_k} [\mu_{X_k}(x_k) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)] \Big/ x_k = \sup_{x_k} \underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \quad (3.86)$$

$$\overline{f}_k^l(x_k') \equiv \sup_{x_k} \int_{x_k \in X_k} [\mu_{X_k}(x_k) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)] \Big/ x_k = \sup_{x_k} \overline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \quad (3.87)$$

$k = 1, \dots, p$ için denklem (11-9) ile (11-22) ve denklem (11-10) ile (11-23) birbirine denktir.

Supremum için $\underline{x}_{k,\max}^l$ ve $\overline{x}_{k,\max}^l$ değişkenleri atanırsa,

$$\underline{f}_k^l(x_k') = \underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(\underline{x}_{k,\max}^l) \quad (3.88)$$

ve

$$\overline{f}_k^l(x_k') = \overline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(\overline{x}_{k,\max}^l) \quad (3.89)$$

olur. (3.73) ve (3.74) denklemlerinin son hali

$$\underline{f}^l(x') = T_{k=1}^p \underline{f}_k^l(x_k') = T_{k=1}^p \underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(\underline{x}_{k,\max}^l) \quad (3.90)$$

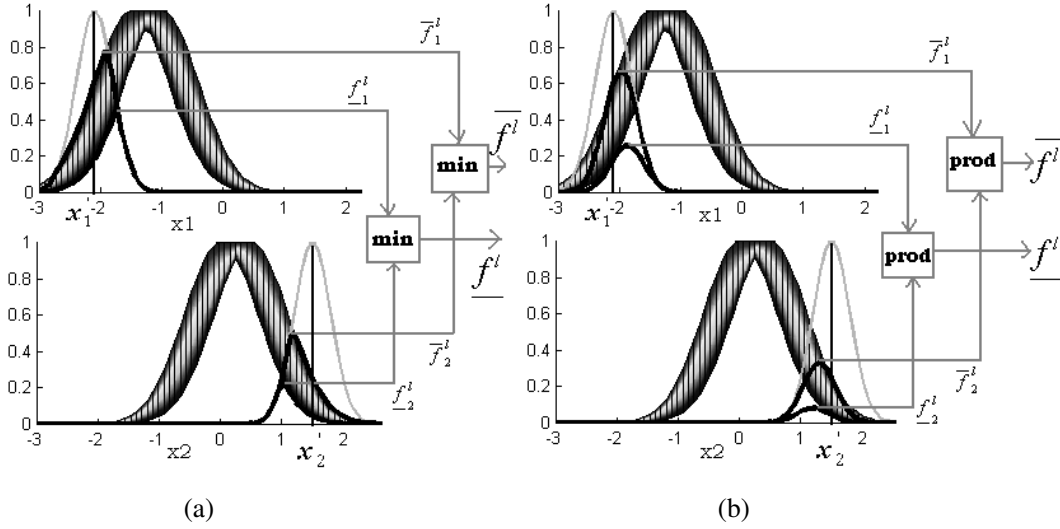
$$\overline{f}^l(x') = T_{k=1}^p \overline{f}_k^l(x_k') = T_{k=1}^p \overline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(\overline{x}_{k,\max}^l) \quad (3.91)$$

şeklindedir.

Örnek: Şekil 3.14’de giriş-varsayım işlemleri ((3.86) ve (3.91) denklemleri), iki varsayım ve bir sonuca sahip kural ve minumum, çarpım t-norm için gösterilmiştir. İşlem sonucu aralık kümedir ($[\underline{f}^l, \overline{f}^l]$).

$$\underline{f}^l = \underline{f}_1^l \star \underline{f}_2^l \quad \text{ve} \quad \overline{f}^l = \overline{f}_1^l \star \overline{f}_2^l$$

$\mu_{X_k}(x_k)$ ’nin merkezi $x_k = x_k'$ ’dir. Denklem (3.86)’ya göre $\underline{f}_k^l$, $\mu_{X_k}(x_k)$ ile $\mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$ arasındaki t-norm işleminin ve denklem (3.87)’ye göre $\overline{f}_k^l$, $\mu_{X_k}(x_k)$ ile $\overline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$ arasındaki t-norm işleminin maximum değeridir ($k = 1, 2$).



Şekil 3.14 Aralık tip-1 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistem için sonuç işlemi neticesi.
(a) minimum t-norm (b) çarpım t-norm

Örnek: Şekil 3.15’de; $\mu_k^l(x_k) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_k - m_k^l}{\sigma_k^l}\right)^2\right]$, $m_k^l \in [m_{k1}^l, m_{k2}^l]$ denkleminde

sahip varsayım (merkezi belirsiz gaussian birincil üyelik fonksiyonu) ile

$\mu_{X_k}(x_k) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_k - x_k'}{\sigma_{X_k}}\right)^2\right]$ denkleminde sahip merkezleri farklı giriş (gaussian tip-1

üyelik fonksiyonu) üyelik fonksiyonları görülmektedir. Giriş üyelik fonksiyonunun merkezinin

farklı yerlerde bulunmasına bağlı olarak yapılan $\overline{x}_{k,\max}^l$ ve $\underline{x}_{k,\max}^l$ hesaplamaları tablo 3.3, tablo

3.4 ve tablo 3.5’den görülebilir.

Durumlar	x'_k 'nin yeri	Çarpım t-norm	Minumum t-norm
Şekil 3.16 (a)	$x'_k \leq m_{k1}^l$	${}^{-l}x_{k,max} = \frac{\sigma_{X_k}^2 m_{k1}^l + \sigma_k^{l^2} x'_k}{\sigma_{X_k}^2 + \sigma_k^{l^2}}$	${}^{-l}x_{k,max} = \frac{\sigma_{X_k} m_{k1}^l + \sigma_k^l x'_k}{\sigma_{X_k} + \sigma_k^l}$
Şekil 3.16 (b)-(d)	$x'_k \in [m_{k1}^l, m_{k2}^l]$	${}^{-l}x_{k,max} = x'_k$	${}^{-l}x_{k,max} = x'_k$
Şekil 3.16 (e)	$x'_k \geq m_{k2}^l$	${}^{-l}x_{k,max} = \frac{\sigma_{X_k}^2 m_{k2}^l + \sigma_k^{l^2} x'_k}{\sigma_{X_k}^2 + \sigma_k^{l^2}}$	${}^{-l}x_{k,max} = \frac{\sigma_{X_k} m_{k2}^l + \sigma_k^l x'_k}{\sigma_{X_k} + \sigma_k^l}$

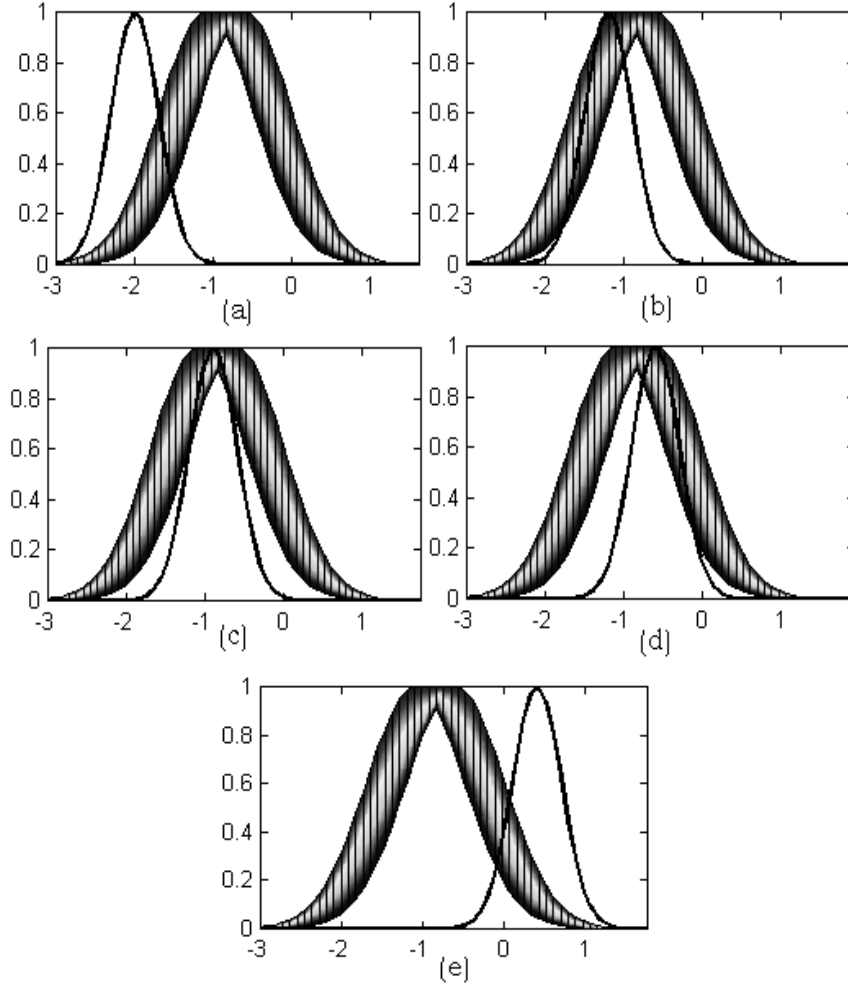
Tablo 3.3 Şekil 3.15 için ${}^{-l}x_{k,max}$ değerleri

Durumlar	x'_k 'nin yeri	Çarpım t-norm
Şekil 3.16 (a) ve (b)	$x'_k < \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} - \frac{\sigma_{X_k}^2 (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^{l^2}}$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{\sigma_{X_k}^2 m_{k2}^l + \sigma_k^{l^2} x'_k}{\sigma_{X_k}^2 + \sigma_k^{l^2}}$
Şekil 3.16 (c)	$x'_k \in \left[\frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} - \frac{\sigma_{X_k}^2 (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^{l^2}}, \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} + \frac{\sigma_{X_k}^2 (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^{l^2}} \right]$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2}$
Şekil 3.16 (d) ve (e)	$x'_k > \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} + \frac{\sigma_{X_k}^2 (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^{l^2}}$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{\sigma_{X_k}^2 m_{k1}^l + \sigma_k^{l^2} x'_k}{\sigma_{X_k}^2 + \sigma_k^{l^2}}$

Tablo 3.4 Şekil 3.15 için çarpım t-norm'a bağlı olarak $\underline{x}_{k,max}^l$ değerleri

Durumlar	x'_k 'nin yeri	Çarpım t-norm
Şekil 3.16 (a) ve (b)	$x'_k < \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} - \frac{\sigma_{X_k} (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^l}$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{\sigma_{X_k} m_{k2}^l + \sigma_k^l x'_k}{\sigma_{X_k} + \sigma_k^l}$
Şekil 3.16 (c)	$x'_k \in \left[\frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} - \frac{\sigma_{X_k} (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^l}, \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} + \frac{\sigma_{X_k} (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^l} \right]$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2}$
Şekil 3.16 (d) ve (e)	$x'_k > \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} + \frac{\sigma_{X_k} (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^l}$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{\sigma_{X_k} m_{k1}^l + \sigma_k^l x'_k}{\sigma_{X_k} + \sigma_k^l}$

Tablo 3.5 Şekil 3.15 için minumum t-norm'a bağlı olarak $\underline{x}_{k,max}^l$ değerleri



Şekil 3.15 Giriş tip-1 Gaussian üyelik fonksiyonunun farklı konumlarının varsayım FOU ile ilişkisi (Giriş üyelik fonksiyonunun merkezi x'_k gibi bir noktadır.)

3.7.3 Tip-2 Non-singleton Tip-2 Bulanık Mantık Sistemler

Girişleri tip-2 bulanık sayılar olarak modellenmiş tip-2 BMK'leri, Tip-2 Non-singleton Tip-2 BMK olarak ifade edilir. Bu durum örnek olarak, zaman serisi tahmininde ölçme gürültüsünün sabit olmadığı durumda gerçekleşebilir. Bu kontrolörün diğerlerinden farkı, bulandırıcı blokundadır. Kural tabanı diğeriyle (tip-1 non-singleton tip-2 BMK) aynıdır. Farklılık bulandırıcıdadır. Burada girişler tip-2 kümeler olarak ele alınır ve bu da dolayısıyla çıkarım mekanizmasını etkiler. Çıkarım mekanizmasının çıkışı, yine tip-2 bulanık kümedir. Böylece, tip indirgeyici ve durultucu blokları normal singleton tip-2 BMK'de olduğu gibi tip-2 non-singleton tip-2 BMK'de aynı işlemleri yerine getirirler.

• Bulandırıcı

Bu sistemlerde bulunan bulandırıcılar, singleton değildir. Kullanılan üyelik fonksiyonları ise tip-2'dir.

• Bulanık Çıkarım Mekanizması

Tip-1 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistemlere ait (3.66), (3.67), (3.68) no'lu denklemler yerine tip-2 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistemlerde (3.92), (3.93), (3.94) denklemleri gelmektedir çünkü tip-1 giriş kümelerinin yerini tip-2 giriş kümeleri almaktadır.

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \left\{ \bigcap_{x_1 \in X_1} \mu_{\tilde{X}_1}(x_1) \cap \mu_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \right\} \cap \dots \cap \left\{ \bigcap_{x_p \in X_p} \mu_{\tilde{X}_p}(x_p) \cap \mu_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \right\}, y \in Y \quad (3.92)$$

$$\mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \equiv \mu_{\tilde{X}_k}(x_k) \cap \mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k) \quad (3.93)$$

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{B}^l}(y) &= \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \left\{ \bigcap_{x_1 \in X_1} \mu_{\tilde{Q}_1^l}(x_1) \right\} \cap \dots \cap \left\{ \bigcap_{x_p \in X_p} \mu_{\tilde{Q}_p^l}(x_p) \right\} \\ &= \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap \left\{ \bigcap_{x \in X} \left[\bigcap_{k=1}^p \mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \right] \right\}, y \in Y \end{aligned} \quad (3.94)$$

Tip-1 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistemlerde olduğu gibi,

$$\mu_{\tilde{Q}^l}(x) \equiv \bigcap_{k=1}^p \mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \quad (3.95)$$

olarak tanımlanırsa

$$F^l(x') \equiv \bigcap_{x \in X} \left[\bigcap_{k=1}^p \mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \right] = \bigcap_{x \in X} \mu_{\tilde{Q}^l}(x) \quad (3.96)$$

denklem (3.94)

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \mu_{\tilde{G}^l}(y) \cap F^l(x'), y \in Y \quad (3.97)$$

şeklinde yeniden tanımlanabilir. Bu denklem tip-2 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistemler için temel denklemdir.

• Aralık Tip-2 Non-Singleton Tip-2 Bulanık Mantık Sistemler

Aşağıda, Aralık tip-2 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistem için önemli sonuçlar bir teorem yardımıyla özetlenmiştir:

Teorem : a) Giriş ve varsayım işlemi sonucu (kuralın kesinlik derecesi/AND işlemi sonucu):

$$F^l(x') = [\underline{f}^l(x'), \overline{f}^l(x')] \equiv [\underline{f}^l, \overline{f}^l] \quad (3.98)$$

$$\overline{f}^l(x') = \sup_x \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_p \in X_p} [\overline{\mu}_{\tilde{X}_1}(x_1) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1)] \star$$

$$\dots \star [\underline{\mu}_{\tilde{X}_P}(x_P) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_P^l}(x_P)] /_x \quad (3.99)$$

ve

$$\begin{aligned} \bar{f}^l(x') = \sup_x \int_{x_l \in X_l} \dots \int_{x_p \in X_p} [\bar{\mu}_{\tilde{X}_l}(x_l) \star \bar{\mu}_{\tilde{F}_l^l}(x_l)] \star \\ \dots \star [\bar{\mu}_{\tilde{X}_P}(x_P) \star \bar{\mu}_{\tilde{F}_P^l}(x_P)] /_x \end{aligned} \quad (3.100)$$

b) İma işlemi sonucu:

$$\mu_{\tilde{B}^l}(y) = \int_{b^l \in [\underline{f}^l * \underline{\mu}_{\tilde{G}^l}(y), \bar{f}^l * \bar{\mu}_{\tilde{G}^l}(y)]} 1/b^l, \quad y \in Y \quad (3.101)$$

c) İma işlemi sonucu birleştirilmiş çıkış sonuç kümeler: (M kuraldan N tanesi kullanılmıştır.)

$$\mu_{\tilde{B}}(y) = \int_{b \in [\underline{f}^l * \underline{\mu}_{\tilde{G}^l}(y)] \dots [\underline{f}^N * \underline{\mu}_{\tilde{G}^N}(y)] \star [\bar{f}^l * \bar{\mu}_{\tilde{G}^l}(y)] \dots [\bar{f}^N * \bar{\mu}_{\tilde{G}^N}(y)] } 1/b, \quad y \in Y \quad (3.102)$$

İspat:

Denklem (3.96) kullanılarak $F^l(x')$ 'i hesaplamak için, önce denklem (3.91)'den $\mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k)$ sonra denklem (3.95)'den $\mu_{\tilde{Q}^l}(x)$ bulunur. Aralıklı tip-2 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistemler için,

$$\mu_{\tilde{X}_k}(x_k) = \int_{v \in [\underline{\mu}_{\tilde{X}_k}(x_k), \bar{\mu}_{\tilde{X}_k}(x_k)]} 1/v, \quad y \in Y \quad (3.103)$$

ve

$$\mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k) = \int_{w^l \in [\underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k), \bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)]} 1/w^l, \quad y \in Y \quad (3.104)$$

denklemlerinden

$$\begin{aligned} \mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) &= \mu_{\tilde{X}_k}(x_k) \sqcap \mu_{\tilde{F}_k^l}(x_k) \\ &= \int_{q^l \in [\underline{\mu}_{\tilde{X}_k}(x_k) * \underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k), \bar{\mu}_{\tilde{X}_k}(x_k) * \bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)]} 1/q^l \\ &= [\underline{\mu}_{\tilde{X}_k}(x_k) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k), \bar{\mu}_{\tilde{X}_k}(x_k) \star \bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)] \quad \forall x_k \in X_k \end{aligned} \quad (3.105)$$

elde edilir. Tip-2 giriş kümesi ve varsayım tip-2 kümesi arasında T-norm (çarpım veya minumum) işareti kullanılmıştır. Denklem (3.105)'den $\mu_{\tilde{Q}_k^l}(x_k)$ 'nin alt $\underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k)$ ve üst $\bar{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k)$ fonksiyonlarının,

$$\underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) = \int_{x_k \in X_k} \left[\underline{\mu}_{\tilde{X}_k}(x_k) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k) \right] / x_k \quad (3.106)$$

$$\overline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) = \int_{x_k \in X_k} \left[\overline{\mu}_{\tilde{X}_k}(x_k) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k) \right] / x_k \quad (3.107)$$

olduğu görülmektedir. Denklem (3.95)'e göre alt ve üst üyelik fonksiyonları,

$$\begin{aligned} \underline{\mu}_{\tilde{Q}^l}(x) &= \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_p \in X_p} \left[\underline{\mu}_{\tilde{X}_1}(x_1) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \right] \star \\ &\dots \star \left[\underline{\mu}_{\tilde{X}_p}(x_p) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \right] / x \end{aligned} \quad (3.108)$$

$$\begin{aligned} \underline{\mu}_{\tilde{Q}^l}(x) &= \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_p \in X_p} \left[\underline{\mu}_{\tilde{X}_1}(x_1) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \right] \star \\ &\dots \star \left[\underline{\mu}_{\tilde{X}_p}(x_p) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \right] / x \end{aligned} \quad (3.109)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Denklem (3.108)'den

$$\begin{aligned} \overline{f}^l(x') &= \sup_x \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_p \in X_p} \left[\overline{\mu}_{\tilde{X}_1}(x_1) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \right] \star \\ &\dots \star \left[\overline{\mu}_{\tilde{X}_p}(x_p) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \right] / x \end{aligned} \quad (3.110)$$

bulunur. $F^l(x')$ 'nin sağ en büyük noktası $\overline{f}^l(x')$, $\overline{\mu}_{\tilde{Q}^l}(x)$ 'nin maximum değerini (supremum) göstermektedir. Denklem (3.109)'den

$$\begin{aligned} \underline{f}^l(x') &= \sup_x \int_{x_1 \in X_1} \dots \int_{x_p \in X_p} \left[\underline{\mu}_{\tilde{X}_1}(x_1) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^l}(x_1) \right] \star \\ &\dots \star \left[\underline{\mu}_{\tilde{X}_p}(x_p) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^l}(x_p) \right] / x \end{aligned} \quad (3.111)$$

bulunur. $F^l(x')$ 'nin sol en büyük noktası $\underline{f}^l(x')$, $\underline{\mu}_{\tilde{Q}^l}(x)$ 'nin maximum değerini (supremum) göstermektedir.

$$\underline{f}_k^l(x_k') \equiv \sup_{x_k} \int_{x_k \in X_k} \left[\underline{\mu}_{\tilde{X}_k}(x_k) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k) \right] / x_k = \sup_{x_k} \underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \quad (3.112)$$

$$\overline{f}_k^l(x_k') \equiv \sup_{x_k} \int_{x_k \in X_k} \left[\overline{\mu}_{\tilde{X}_k}(x_k) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k) \right] / x_k = \sup_{x_k} \overline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(x_k) \quad (3.113)$$

$k = 1, \dots, p$ için denklem (3.99) ile (3.112) ve denklem (3.100) ile (3.113) birbirine denktir.

Supremum için $\underline{x}_{k,\max}^l$ ve $\overline{x}_{k,\max}^l$ değişkenleri atanırsa,

$$\underline{f}_k^l(x_k') = \underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(\underline{x}_{k,\max}^l) \quad (3.114)$$

ve

$$\bar{f}_k^l(x_k') = \bar{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(\bar{x}_{k,\max}^l) \quad (3.115)$$

olur. (3.99) ve (3.100) denklemlerinin son hali

$$\underline{f}^l(x') = T_{k=1}^p \underline{f}_k^l(x_k') = T_{k=1}^p \underline{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(\underline{x}_{k,\max}^l) \quad (3.116)$$

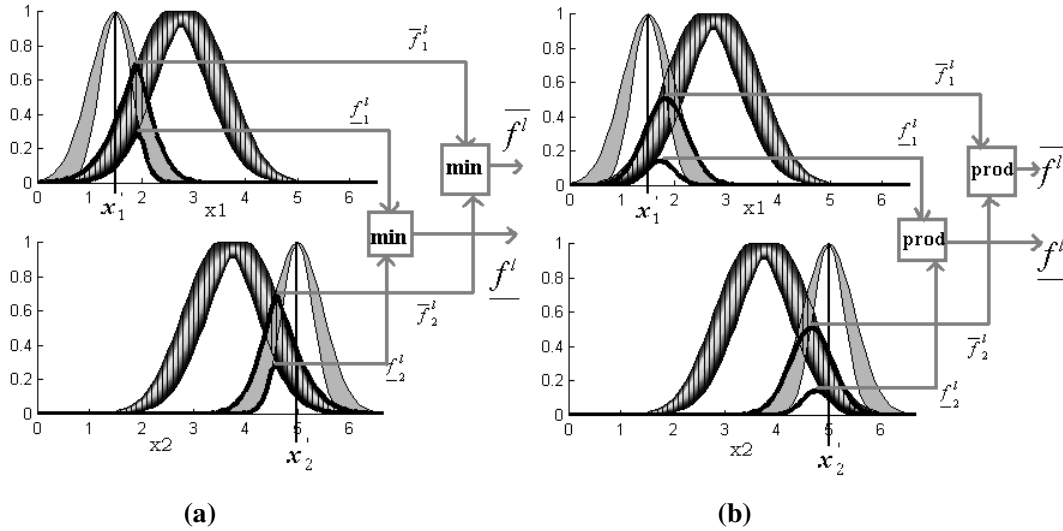
$$\bar{f}^l(x') = T_{k=1}^p \bar{f}_k^l(x_k') = T_{k=1}^p \bar{\mu}_{\tilde{Q}_k^l}(\bar{x}_{k,\max}^l) \quad (3.117)$$

şeklindedir.

Örnek: Şekil 3.16'de giriş-varsayım işlemleri ((3.112) ve (3.117)) denklemleri), iki varsayım ve bir sonuç'a sahip kural ve minimum, çarpım t-norm için gösterilmiştir. İşlem sonucu aralıklı kümedir ($[\underline{f}^l, \bar{f}^l]$).

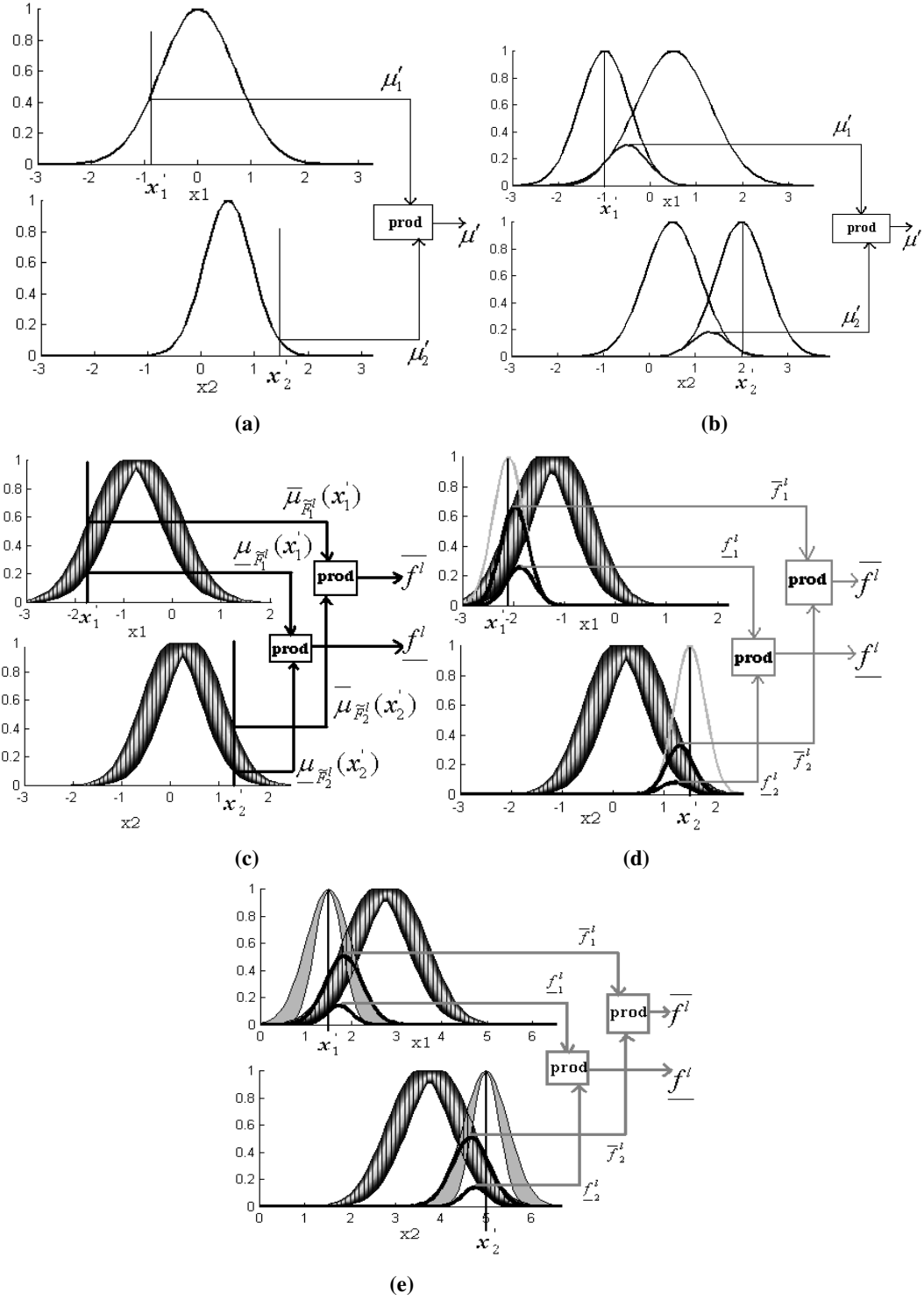
$$\underline{f}^l = \underline{f}_1^l \star \underline{f}_2^l \quad \text{ve} \quad \bar{f}^l = \bar{f}_1^l \star \bar{f}_2^l$$

$\mu_{\tilde{X}_k}(x_k)$ 'nin merkezi $x_k = x_k'$ 'dir. Denklem (3.112)'e göre $\underline{f}_k^l$, $\mu_{\tilde{X}_k}(x_k)$ ile $\underline{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$ arasındaki t-norm işleminin ve denklem (3.113)'ye göre $\bar{f}_k^l$, $\mu_{\tilde{X}_k}(x_k)$ ile $\bar{\mu}_{\tilde{F}_k^l}(x_k)$ arasındaki t-norm işleminin maximum değeridir ($k = 1, 2$).



Şekil 3.16 Aralık tip-2 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistemler için giriş-varsayım işlemi
(a) minimum t-norm (b) çarpım t-norm

Şekil 3.17'den, tip-1 ve tip-2 sistemlerin giriş-varsayım işlemleri karşılaştırılarak daha iyi anlaşılabilir.



Şekil 3.17 Çarpım t-norm kullanılarak giriş-varsayım işlemi (a) singleton tip-1 (b) non-singleton tip-1 (c) aralıklı singleton tip-2 (d) aralıklı tip-1 non-singleton tip-2 (e) aralıklı tip-2 non-singleton tip-2 bulanık mantık sistemler

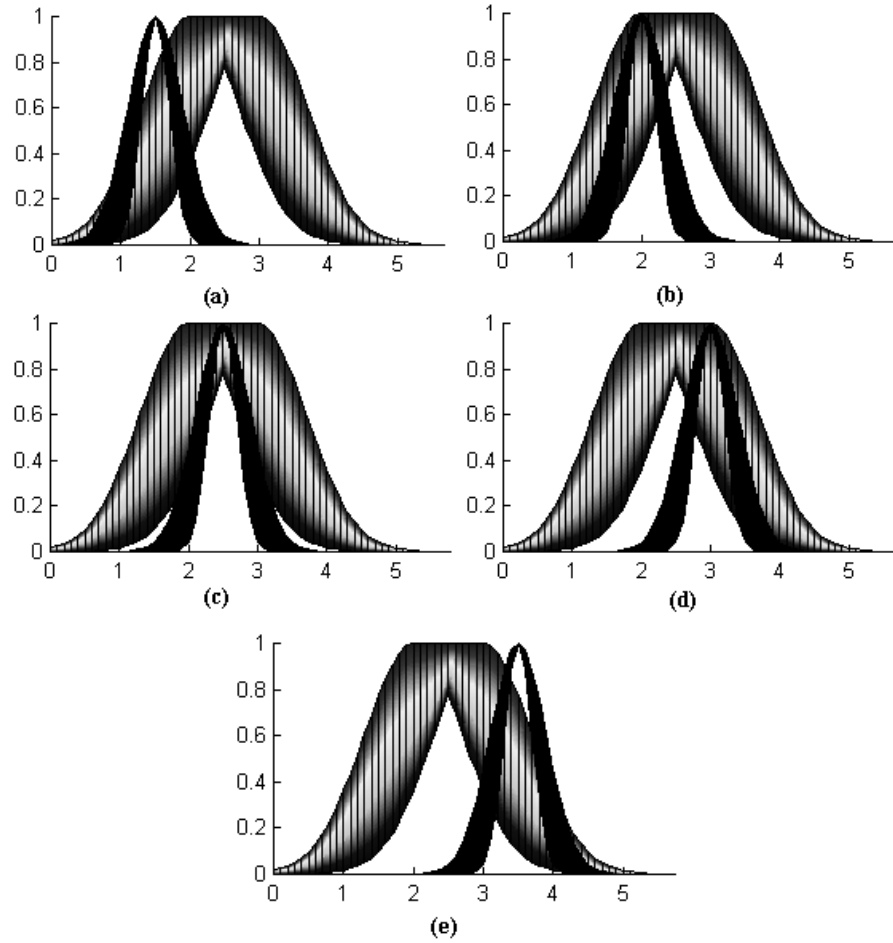
Örnek: Şekil 3.18’de

$$\mu_k^l(x_k) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_k - m_k^l}{\sigma_k^l}\right)^2\right] \quad m_k^l \in [m_{k1}^l, m_{k2}^l]$$

denklemine sahip varsayım (merkezi belirsiz gaussian birincil üyelik fonksiyonu) ile

$$\mu_k^l(x_k) = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x_k - m_k^l}{\sigma_k^l}\right)^2\right] \quad \sigma_k^l \in [\sigma_{k1}^l, \sigma_{k2}^l]$$

denklemine sahip merkezleri farklı giriş (standart sapması belirsiz gaussian birincil üyelik fonksiyonu) üyelik fonksiyonları görülmektedir. Giriş üyelik fonksiyonunun merkezinin farklı yerlerde bulunmasına bağlı olarak yapılan $\bar{x}_{k,\max}^l$ ve $\underline{x}_{k,\max}^l$ hesaplamaları tablo 3.6, 3.7 ve 3.8’den görülebilir.



Şekil 3.18 Giriş FOU’nun farklı konumlarının varsayım FOU ile ilişkisi (Geniş olan FOU varsayıma ait iken diğer FOU girişe aittir. Girişe ait FOU’nun merkezi x_k^l gibi bir noktadır.)

Durumlar	x'_k 'nin yeri	Çarpım t-norm	Minumum t-norm
Şekil(3.19) (a)	$x'_k \leq m_{k1}^l$	$\overset{-l}{x}_{k,max} = \frac{\sigma_{k2}^2 m_{k1}^l + \sigma_k^{l^2} x'_k}{\sigma_{k2}^2 + \sigma_k^{l^2}}$	$\overset{-l}{x}_{k,max} = \frac{\sigma_{k2} m_{k1}^l + \sigma_k^l x'_k}{\sigma_{k2} + \sigma_k^l}$
Şekil(3.19) (b)-(d)	$x'_k \in [m_{k1}^l, m_{k2}^l]$	$\overset{-l}{x}_{k,max} = x'_k$	$\overset{-l}{x}_{k,max} = x'_k$
Şekil(3.19) (e)	$x'_k \geq m_{k2}^l$	$\overset{-l}{x}_{k,max} = \frac{\sigma_{k2}^2 m_{k2}^l + \sigma_k^{l^2} x'_k}{\sigma_{k2}^2 + \sigma_k^{l^2}}$	$\overset{-l}{x}_{k,max} = \frac{\sigma_{k2} m_{k2}^l + \sigma_k^l x'_k}{\sigma_{k2} + \sigma_k^l}$

Tablo 3.6 Şekil 3.18 için $\overset{-l}{x}_{k,max}$ değerleri

Durumlar	x'_k 'nin yeri	Çarpım t-norm
Şekil(3.19) (a) ve (b)	$x'_k < \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} - \frac{\sigma_{k1}^2 (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^{l^2}}$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{\sigma_{k1}^2 m_{k2}^l + \sigma_k^{l^2} x'_k}{\sigma_{k1}^2 + \sigma_k^{l^2}}$
Şekil(3.19) (c)	$x'_k \in \left[\frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} - \frac{\sigma_{k1}^2 (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^{l^2}}, \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} + \frac{\sigma_{k1}^2 (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^{l^2}} \right]$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2}$
Şekil(3.19) (d) ve (e)	$x'_k > \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} + \frac{\sigma_{k1}^2 (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^{l^2}}$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{\sigma_{k1}^2 m_{k1}^l + \sigma_k^{l^2} x'_k}{\sigma_{k1}^2 + \sigma_k^{l^2}}$

Tablo 3.7 Şekil 3.18 için çarpım t-norm'a bağlı olarak $\underline{x}_{k,max}^l$ değerleri

Durumlar	x'_k 'nin yeri	Çarpım t-norm
Şekil(3.19) (a) ve (b)	$x'_k < \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} - \frac{\sigma_{k1} (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^l}$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{\sigma_{k1} m_{k2}^l + \sigma_k^l x'_k}{\sigma_{k1} + \sigma_k^l}$
Şekil(3.19) (c)	$x'_k \in \left[\frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} - \frac{\sigma_{k1} (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^l}, \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} + \frac{\sigma_{k1} (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^l} \right]$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2}$
Şekil(3.19) (d) ve (e)	$x'_k > \frac{m_{k1}^l + m_{k2}^l}{2} + \frac{\sigma_{k1} (m_{k2}^l - m_{k1}^l)}{2\sigma_k^l}$	$\underline{x}_{k,max}^l = \frac{\sigma_{k1} m_{k1}^l + \sigma_k^l x'_k}{\sigma_{k1} + \sigma_k^l}$

Tablo 3.8 Şekil 3.18 için minumum t-norm'a bağlı olarak $\underline{x}_{k,max}^l$ değerleri

3.7.4 Tip-2 TSK Bulanık Mantık Sistemler

Mamdani ve Sugeno, en çok kullanılan iki bulanık sistemdir. Bu iki bulanık sistem, IF-THEN kuralları ile karakterize edilir ve aynı varsayım yapısına sahiptir. İki sistemin tek farklı özelliği sonuç yapısındadır. Sonuç kısmı, Mamdani sistemlerde bulanık küme iken Sugeno sistemlerde fonksiyondur.

a) Birinci dereceden tip-2 TSK bulanık mantık sistemler

“p” adet girişe $x_1 \in X_1, \dots, x_p \in X_p$ ve tek çıkışa $y \in Y$ sahip tip-2 TSK bulanık mantık sistemin kural yapısı:

$$\begin{aligned} R^i : & \text{ IF } x_1 \text{ is } \tilde{F}_1^i \text{ and...and } x_p \text{ is } \tilde{F}_p^i, \\ & \text{ THEN } Y^i = C_0^i + C_1^i x_1 + C_2^i x_2 + \dots + C_p^i x_p \end{aligned} \quad (3.118)$$

şeklindedir. ($i = 1, \dots, M$ için C_j^i ($j = 1, \dots, p$) sonuç tip-1 bulanık kümelerdir. Bu yapı ayrıca sistemin giriş ve çıkışı arasındaki ilişkiyi göstermektedir.

Tip-2 Sugeno bulanık mantık sistemlerde, i 'inci kuralın “and” (ve) işleminin sonucu $F^i(x)$, aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$F^i(x) = \prod_{k=1}^p \mu_{\tilde{F}_k^i}(x_k) \quad (3.119)$$

Sistemin çıkışı genişleme ilkeleri uygulanarak,

$$\begin{aligned} Y_{TSK2}(x) = & \int_{y^1 \in Y^1} \dots \int_{y^M \in Y^M} \int_{f^1 \in F^1} \dots \int_{f^M \in F^M} \left[T_{l=1}^M \mu_{Y^i}(y^i) \right. \\ & \left. \star T_{l=1}^M \mu_{F^i}(f^i) \right] \bigg/ \frac{\sum_{l=1}^M f^i y^i}{\sum_{l=1}^M f^i} \end{aligned} \quad (3.120)$$

denkleminde hesaplanabilir. $Y^i = C_0^i + C_1^i x_1 + C_2^i x_2 + \dots + C_p^i x_p$ tip-1 bulanık kümedir.

Denklem (3.120), kümelerin merkezi yöntemi ile tip-indirgemenin formülüne benzemektedir. Ancak tip-2 Sugeno bulanık mantık sistemler için tip-indirgeme kullanılmamaktadır.

b) Aralık Tip-2 TSK Bulanık Mantık Sistemler

Tip-2 Sugeno bulanık mantık sistem kurallarında, varsayım için aralık tip-2 bulanık kümeler ve sonuç için aralık tip-1 bulanık kümeler kullanıldığında,

$$\mu_{\tilde{F}_k^i}(x_k) = \left[\underline{\mu}_{\tilde{F}_k^i}(x_k), \overline{\mu}_{\tilde{F}_k^i}(x_k) \right] \quad (k = 1, \dots, p) \quad (3.121)$$

$$C_j^i = [c_j^i - s_j^i, c_j^i + s_j^i] \quad (3.122)$$

olarak ifade edilir. c_j^i , C_j^i 'nin merkezini ve s_j^i , C_j^i 'nin standart sapmasını göstermektedir.

Kümeler aralık olduğunda $F^i(x)$ 'i hesaplamak daha kolay olacaktır:

$$F^i(x) = [\underline{f}^i(x), \overline{f}^i(x)] \quad (3.123)$$

burada

$$\underline{f}^i(x) = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^i}(x_1) \star \dots \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_p^i}(x_p) \quad (3.124)$$

ve

$$\overline{f}^i(x) = \overline{\mu}_{\tilde{F}_1^i}(x_1) \star \dots \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_p^i}(x_p) \quad (3.125)$$

dir.

Kuralın sonuç kısmı bir aralık kümedir $Y^i = [y_l^i, y_r^i]$. Burada,

$$y_l^i = \sum_{k=1}^p c_k^i x_k + c_0^i - \sum_{k=1}^p |x_k| s_k^i - s_0^i \quad (3.126)$$

$$y_r^i = \sum_{k=1}^p c_k^i x_k + c_0^i + \sum_{k=1}^p |x_k| s_k^i + s_0^i \quad (3.127)$$

şeklinde ifade edilir.

Aralık kümeler için denklem (3.120),

$$Y_{TSK,2}(x) = [y_l, y_r] = \int_{y^1 \in [y_l^1, y_r^1]} \dots \int_{y^M \in [y_l^M, y_r^M]} \int_{f^1 \in [\underline{f}^1, \overline{f}^1]} \dots \int_{f^{M1} \in [\underline{f}^M, \overline{f}^M]} 1 \left/ \frac{\sum_{i=1}^M f^i y^i}{\sum_{i=1}^M f^i} \right. \quad (3.128)$$

şeklinde yazılabilir. $\underline{f}^i$, $\overline{f}^i$, y_l^i ve y_r^i ifadeleri (3.124) ve (3.127) denklemlerinden hesaplanmaktadır.

Aralık tip-2 sugeno bulanık mantık sistemlerde Y , aralık tip-1 bulanık küme olduğundan sistem çıkışı y_l ve y_r 'nin aritmetik ortalaması alınarak;

$$Y_{TSK,2}(x) = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (3.129)$$

şeklinde bulunur.

c) Normalleştirilmemiş Aralık Tip-2 TSK Bulanık Mantık Sistemler

TSK bulanık mantık sistemlerin çıkışını normalleştirmek, sistemin karmaşıklığını artırır ve bazı durumlarda gereksizdir. Normalleştirilmemiş aralık tip-2 Sugeno bulanık mantık sistemin çıkışı aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

$$Y_{TSK,2}(x) = [y_l, y_r] = \int_{y^1 \in [y_l^1, y_r^1]} \dots \int_{y^M \in [y_l^M, y_r^M]} \int_{f^1 \in [\underline{f}^1, \overline{f}^1]} \dots \int_{f^{M1} \in [\underline{f}^M, \overline{f}^M]} 1 \left/ \sum_{i=1}^M f^i y^i \right. \quad (3.130)$$

3.8 Tip-1 ve Tip-2 Bulanık Mantık Sistemlerin Karşılaştırılması

Tablo 3.9 genel olarak Tip-1 ve Tip-2 BMS arasındaki farkları karşılaştırmalı olarak göstermektedir. Bir Tip-2 BMS, belirsizlikleri geniş bir alanda modelleyebilir. Daha geniş bir ifade ile; kurallarda kullanılan kelimelerin anlamları ile ilgili belirsizlikler, bir kuralın neticesine bağlı belirsizlik, bulanık kontrolörü aktifleştiren ölçümlerle ilgili belirsizlik, bulanık kontrolörün parametrelerinin uyarlanması için kullanılan bilgi ile ilgili belirsizlikler Tip-2 BMS ile kesinleştirilir [3].

Bir Tip-1 BMS ise sadece bulanık kontrolörü aktifleştiren ölçümlerle ilgili belirsizliği modelleyebilir. Bu da Tip-2 BMS’dekine göre daha sınırlı olur.

Sonuç olarak, Tip-2 BMS’ler Tip-1 BMS’lere göre daha verimlidir. Daha fazla tasarım parametresine (serbestlik derecesi-degree of freedom) sahiptir. Ancak, Tip-1 BMS’ye göre daha karmaşıktır. Fakat belirsizliklere karşı sağladığı fayda ve gelişmiş performansı yanında uygulama zorluğu kabul edilebilir bir durumdur. Aralık tip-2 BMS, uygulaması daha basit olan ve tercih edilen sistemlerdir.

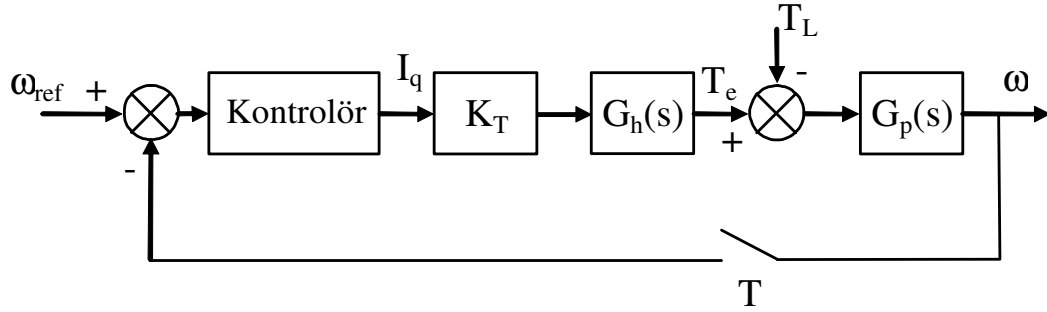
	Tip-1 BMS	Tip-2 BMS
Singleton Bulandırma	Varsayımlar ve sonuçlarla ilgili belirsizlik yok	Varsayımlar ve sonuçlarla ilgili belirsizlikler hesaba katılmaktadır (FOU)
	BMK’ü aktifleştiren ölçümlerle ilgili belirsizlik yok	BMK’ü aktifleştiren ölçümlerle ilgili belirsizlik yok
	Sadece tek bir nokta çıkışı sağlanır	Hem bir tipi indirgenmiş küme hem de bir nokta çıkışı sağlanır
Non-Singleton Bulandırma	Varsayımlar ve sonuçlarla ilgili belirsizlik yok	Varsayımlar ve sonuçlarla ilgili belirsizlikler hesaba katılmaktadır (FOU)
	BMK’ü aktifleştiren ölçümlerle ilgili belirsizlikler vardır; ölçümler tip-1 bulanık değerler kabul edilerek modelleme yapılır.	BMK’ü aktifleştiren ölçümlerle ilgili belirsizlikler vardır; ölçümler tip-1 veya tip-2 bulanık değerler kabul edilerek modelleme yapılır.
	Sadece tek bir nokta çıkışı sağlanır	Hem bir tipi indirgenmiş küme hem de bir nokta çıkışı sağlanır

Tablo 3.9 Tip-1 ve Tip-2 BMS’lerinin karşılaştırılması

4 GELİŞTİRİLEN YENİ TİP-2 BULANIK KAYMA KİPLİ KONTROLÖR

4.1 Önerilen Tip-2 Bulanık KKK'nın Yapısı

Bu bölümde, ilk önce bir elektrik motorunun hız kontrolü için erişim kural yaklaşımı ile ayrık zaman (sayısal) KKK tasarımı yapılacak, daha sonra ise, aralık tip-2 non-singleton TSK BMK'nın kullanıldığı EKY temelli önerilen kontrolörün tasarımı anlatılacaktır [59].



Şekil 4.1 Kapalı çevrim sayısal hız kontrol sistemi

Şekil 4.1'de bir elektriksel sürücü sisteminin kapalı çevrim sayısal hız kontrolü için blok diyagramı görülmektedir. Hız kontrolörünün çıkışı moment akımı (I_q) istemidir ve elektriksel sürücü sistemlerinin, iyi bir moment kontrol performansına sahip olması istenir. Bu tez çalışması hız kontrolü üzerinde yoğunlaşmakta olup iyi bir moment ve akı kontrolünün sağlandığı varsayılmaktadır. Bu nedenle hız kontrol çevrimine göre daha yüksek bant genişliğine sahip olan (daha hızlı olan) akım kontrol çevrimi, hız kontrolör tasarımında ihmal edilmiştir. Buna göre, kontrol edilen sistemde elektriksel dinamikler ihmal edilmiş ve sürücü sistemin sadece mekanik dinamikleri ele alınmıştır ($T_L = 0$ için):

Böylece kontrol edilen sistemin transfer fonksiyonu;

$$G_p(s) = \frac{\omega(s)}{T_e(s)} = \frac{1}{Js + B} \quad (4.1)$$

olur. Burada;

ω : motor milinin açısal hızı (rad/sn)

T_e : elektriksel moment (Nm)

J : atalet momenti (kgm^2)

B : viskoz sürtünmedir (Nms/rad).

Şekil 4.1’de, K_T moment sabitini, I_q moment akımını, T_L yük momentini, T örnekleme periyodunu ve $G_h(s)$ sıfırıncı derece tutmayı (zero order hold) temsil etmektedir [5]. Buradaki kontrol probleminin, yük momenti, atalet ve sürtünme değişimleri altında dayanıklı bir hız kontrol performansı sağlamak olduğu unutulmamalıdır.

Daha önce, 2. bölümde, ayrıntılı bir şekilde incelendiği gibi, ayrık zamanlı sistemlerde, bir $\text{sgn}(\cdot)$ fonksiyonu içeren erişim kuralının doğrudan uygulanmasının bir çatırtı problemine sebep olduğu bilinmektedir. Bir hız kontrol sisteminde, modellenmemiş mekanik dinamikleri uyatarak mekanik titreşimlere neden olacağı için, moment isteminde çatırtı istenmeyen bir şeydir [55]. Çatırtıyı önlemek için $\text{sgn}(\cdot)$ fonksiyonu yerine bir $\text{sat}(\cdot)$ fonksiyonu kullanılabilir. Fakat elektrik sürücü sistemlerindeki hız kontrol uygulamalarında bu $\text{sat}(\cdot)$ fonksiyonunu kullanmak gereksizdir, çünkü zaten kontrolör çıkışında moment istemini sınırlamak için aşırı toplamayı engelleyici yapı (anti-wind up integrator) içinde bir $\text{sat}(\cdot)$ fonksiyonu kullanılmaktadır [55]. Buna göre, $\text{sgn}(\cdot)$ fonksiyonsuz bir ayrık zaman erişim kuralı, anahtarlama fonksiyonu S için aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\Delta S(k+1) = -\alpha S(k) \quad (4.2)$$

Burada;

k : örnekleme anı (yani $k = 0,1,2,\dots$)

α : pozitif bir sabit

Δ operatörü ise aşağıdaki gibi ifade edilir;

$$\Delta f(k+1) = \frac{f(k+1) - f(k)}{T} \quad (4.3)$$

$\{ \Delta f(0) = 0 \}$ şartı ile T örnekleme zamanı olmak üzere, anahtarlama fonksiyonu aşağıdaki gibi yazılır;

$$S(k) = \lambda e(k) + \Delta e(k) \quad (4.4)$$

Burada;

$$e(k) = \omega_{ref}(k) - \omega(k) \quad (4.5)$$

dir.

(4.2)’deki erişim kuralı, temel olarak anahtarlama fonksiyonu S ’nin exponansiyel olarak α ’nın belirlediği dinamikle sıfıra doğru azaldığını göstermektedir.

Şimdi, Şekil 4.1'deki kontrolör blokunun çıkışına bir integratör yerleştirilmiş olan kapalı çevrim hız kontrol sistemi düşünelim. Sistemin darbe transfer fonksiyonu aşağıdaki gibi olacaktır [5];

$$G_p(z) = Z\{G_h(s)G_p(s)\} = \frac{C_p}{z - P_p} \quad (4.6)$$

Burada;

$$P_p = \exp(-BT/J) \text{ ve } C_p = (1 - P_p)/B \text{.'dir.}$$

EKY kullanılarak erişim kuralı aşağıdaki gibi türetilbilir [56];

$$u(k) = \left(\frac{T\alpha}{(1 + \lambda T)K_T C_p} \right) S(k) + \left(\frac{(1 + \lambda T)P_p - 1}{(1 + \lambda T)K_T C_p} \right) \Delta e(k) + \frac{1}{K_T C_p} (\Delta \omega_{ref}(k+1) - P_p \Delta \omega_{ref}(k)) \quad (4.7)$$

$\Delta \omega_{ref}(k+1)$ teriminin (4.7) denkleminin sağ tarafında olması problem değildir, çünkü $\omega_{ref}(k)$ bilinen bir referans girişidir. Basit olarak, ω_{ref} 'yi bir basamak istemi kabul edersek, ω_{ref} sabit olduğu için $\Delta \omega_{ref}(k+1)$ ve $\Delta \omega_{ref}(k)$ değerleri sifıra eşit olur ve böylece (4.7) denkleminin üçüncü terimi ortadan kalkar. Buna göre kontrol kuralı aşağıdaki gibi olur;

$$u(k) = K_1 S(k) + K_2 \Delta e(k) \quad (4.8)$$

Burada

$$K_1 = \frac{T\alpha}{(1 + \lambda T)K_T C_p} \quad (4.9)$$

$$K_2 = \frac{(1 + \lambda T)P_p - 1}{(1 + \lambda T)K_T C_p} \quad (4.10)$$

(4.2) ve (4.3) nolu denklemler kullanılarak, S için aşağıdaki ifade elde edilir;

$$S(k+1) = (1 - \alpha T)S(k) \quad (4.11)$$

S 'nin çatırtı olmaksızın exponansiyel olarak sifıra yaklaşması için $0 < \alpha \leq \frac{1}{T}$ eşitsizliğinin sağlanması gerekir [58].

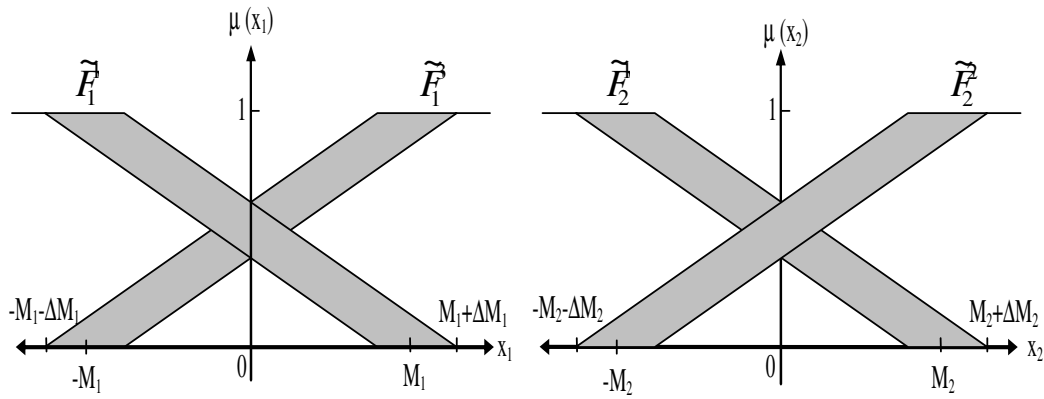
Bu bağlamda, bir elektriksel sürücü sisteminin hız kontrolü için, aralık tip-2 non-singleton TSK BMK'nın kullanıldığı EKY temelli önerilen kontrolörün tasarımı aşağıda anlatılmaktadır:

İki giriş (S ve Δe) $x_1 \in X_1, x_2 \in X_2$ ve bir çıkışa $u \in U$ sahip bir tip-2 TSK BMK'ü düşünelim. Kural tabanının i 'inci kuralı:

$$R^i: \text{IF } x_1 \text{ is } \tilde{F}_1^i \text{ and } x_2 \text{ is } \tilde{F}_2^i \text{ THEN } u^i = C_1^i x_1 + C_2^i x_2 \quad (4.12)$$

olarak ifade edilebilir.

Burada; $i = 1, \dots, 4$; $\tilde{F}_1^i$ ve $\tilde{F}_2^i$ aralık tip-2 varsayım bulanık kümeler; C_1^i ve C_2^i aralık tip-1 sonuç bulanık kümeler ve u^i ise i 'inci kuralın çıkışı ve aynı zamanda aralık tip-1 bulanık kümedir. Non-singleton bir yapı kullanıldığından x_1 ve x_2 girişleri de aralık tip-1 bulanık kümelerdir. Şekil 4.2'de, önerilen kontrolörde kullanılan aralık tip-2 varsayım bulanık kümeleri ($\tilde{F}_1^1 \equiv \tilde{F}_1^2, \tilde{F}_1^3 \equiv \tilde{F}_1^4$ ve $\tilde{F}_2^1 \equiv \tilde{F}_2^2, \tilde{F}_2^3 \equiv \tilde{F}_2^4$) görülmektedir.



Şekil 4.2 Aralık Tip-2 Varsayım Bulanık Kümeler

Unutulmamalıdır ki, bir aralık kümesi sadece kendi domain aralığında gösterilebilir. Bu domain aralığı da kendi sol ve sağ son-noktalarıyla, $[L, R]$ şeklinde ifade edilebilir. Ayrıca, aralık küme, kendi merkeziyle ve $c=(L+R)/2$ ve $s = (R-L)/2$ olmak üzere, $[c-s, c+s]$ şeklinde yayılarak da ifade edilebilir. Bir aralık kümenin, kendi domaini $[L, R]$ veya $[c-s, c+s]$ ile gösterilmesi olarak kullanılan ortak bir ifade şeklidir. Bu aralık kümelerde, domainin her bir noktasındaki üyelik derecesinin 1'e eşittir.

Varsayımlar için aralık tip-2 bulanık kümeler ve bir tip-2 TSK kuralının sonuç kümeleri için ise aralık tip-1 C_j^i bulanık kümeler kullanıldığında, üyelik derecesi $\mu_{\tilde{F}_k^i}(x_k)$ ve ateşleme (firing) kümesi (çarpım veya minimum t-norm altında) $F^i(x)$ aralık kümeler olur. Yani;

$$C_j^i = [c_j^i - s_{jL}^i, c_j^i + s_{jR}^i] \quad i = 1, \dots, 4 \text{ and } j = 1, 2 \quad (4.13)$$

Burada; c_j^i , C_j^i 'nin merkezini ve s_{jL}^i ve s_{jR}^i ise C_j^i 'nin sağa ve sola yayılmasını göstermektedir.

$$\mu_{\tilde{F}_k^i}(x_k) = [\underline{\mu}_{\tilde{F}_k^i}(x_k), \overline{\mu}_{\tilde{F}_k^i}(x_k)] \quad k = 1, 2 \quad (4.14)$$

Burada; $\underline{\mu}_{\tilde{F}_k^i}(x_k)$ ve $\overline{\mu}_{\tilde{F}_k^i}(x_k)$ alt ve üst üyelik dereceleri ve

$$F^i(x) = [\underline{f}^i(x), \overline{f}^i(x)] \quad (4.15)$$

dir.

Burada;

$$\underline{f}^i(x) = \underline{\mu}_{\tilde{F}_1^i}(x_1) \star \underline{\mu}_{\tilde{F}_2^i}(x_2) \quad (4.16)$$

ve

$$\overline{f}^i(x) = \overline{\mu}_{\tilde{F}_1^i}(x_1) \star \overline{\mu}_{\tilde{F}_2^i}(x_2). \quad (4.17)$$

R^i , kuralının sonucu u^i , da aynı zamanda bir aralık kümedir. Yani,

$$u^i = [u_L^i, u_R^i] \quad (4.18)$$

Burada;

$$u_L^i = \sum_{j=1}^2 c_j^i x_{jL} - \sum_{j=1}^2 |x_{jL}| s_{jL}^i \quad (4.19)$$

$$u_R^i = \sum_{j=1}^2 c_j^i x_{jR} + \sum_{j=1}^2 |x_{jR}| s_{jR}^i \quad i = 1, \dots, 4 \quad (4.20)$$

Burada $i = 1, \dots, 4$ için sabitler $c_1^i = K_1$ ve $c_2^i = K_2$ 'dir. Diğer sabitler, s_{jL}^i ve s_{jR}^i uyarılama işlemi sırasında belirlenmekte olup ilerde açıklanacaktır.

Non-singleton bulanıklaştırma kullanıldığından, girişler de aralık kümeler olarak tanımlanır, yani; $x_1 = [x_{1L}, x_{1R}]$ ve $x_2 = [x_{2L}, x_{2R}]$ veya $x_1 = [S - S_s, S + S_s]$ ve $x_2 = [\Delta e - \Delta e_s, \Delta e + \Delta e_s]$, burada S , $S = \lambda e(k) + \Delta e(k)$ denklemiyle verilen anahtarlama fonksiyonu, Δe hatadaki değişim, S_s ve Δe_s ise S ve Δe 'nin yayılmalarıdır.

Normalize edilmemiş bir aralık tip-2 TSK BMK için çıkış aşağıdaki gibidir;

$$u = \frac{u_L + u_R}{2} \quad (4.21)$$

Burada;

$$u_L = \sum_{i=1}^4 \underline{f}^i(x) u_L^i \quad (4.22)$$

$$u_R = \sum_{i=1}^4 \overline{f}^i(x) u_R^i . \quad (4.23)$$

Kontrolörün çıkışı moment akımı I_q , sürekli durum hatasını azaltmak için BMS'nin çıkışı entegre edilerek elde edilir. Ayrık zamanda ki fark denklemi aşağıdaki şekildedir:

$$I_q(k) = I_q(k-1) + Tu(k) . \quad (4.24)$$

Gerçeğe (pratiğe) uygun bir kontrolör elde etmek için bir anti-windup integratör (aşırı toplamayı engelleyici) [55] yapısı kullanılmıştır. Böylece, sürücü sistemi korunmuş ve aşırı entegrasyon durdurulup moment istemi de ($T_{max} = 10$ Nm) sınırlandırılmıştır.

4.2 KKK ile Önerilen Tip-2 Bulanık KKK Sisteminin Performans Karşılaştırması

Bu bölümde, önerilen kontrolörün etkisi, kıyaslamalı simülasyon sonuçları ile ortaya konulacaktır. Harici bozucular (yük momenti) ve parametre değişimleri altında, önerilen Tip-2 Bulanık KKK (T2BKKK) sistem ile KKK sistemin performansı, verilen simülasyon sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Burada nominal atalet ve viskos sürtünme değerleri (J_n ve B_n), sürücü makinenin (minimum atalet ve sürtünme sınırına karşılık gelen) atalet ve sürtünme değeri olarak seçilmiştir. Çünkü, tüm sürücü motorları mekanik bir yüke bağlanmadan önce kendi nominal atalet ve sürtünme değerlerine sahiptir.

Karşılaştırmada kullanılan KKK, anahtarlama hattının eğimi λ olacak şekilde tasarlanmıştır. Yani, nominal atalet ve sürtünme katsayısı ($J_n = 0.005 \text{ kgm}^2$ ve $B_n = 0.001 \text{ Nms/rad}$) için kontrol bant genişliği $\lambda = 100 \text{ s}^{-1}$ ve sabit $\alpha = 0.1/T$ olmaktadır.

(4.8) İle ifade edilen kontrol kuralındaki K_1 ve K_2 parametreleri, $T = 2.5 \text{ ms}$ 'lik örnekleme periyodu için; $K_1 = 0.032$ ve $K_2 = 0.0798$ olarak bulunmuştur. Adaletli bir karşılaştırma sağlamak amacıyla bu katsayılar (4.8) kontrol kuralı ile ifade edilen KKK'de ve önerilen Tip-2 Bulanık KKK (T2BKKK) sistemin çıkış kısmında kullanılmıştır ($c_1^i = K_1$ ve $c_2^i = K_2, i = 1, \dots, 4$).

4.2.1 Kontrol Parametrelerinin Uyarlanması

Yapılan çalışmada, sürücü sistemin ataleti (J), sürtünme katsayısı (B) ve yük momentini (T_L) değerlerinin net olarak bilinmediği fakat $J_n \leq J \leq 30 \times J_n$ ve $B_n \leq B \leq 30 \times B_n$ sınırları arasında değişebileceği varsayılmıştır. Önerilen T2BKKK'ün bilinmeyen kontrol parametrelerini (s_{jL}^i ve s_{jR}^i , $i = 1, \dots, 4$, $j = 1, 2$) belirlemek için nominal parametreleri (J_n , B_n) kullanan bir referans kapalı çevrim hız kontrol modeli ve önceki kısımda parametreleri verilmiş olan bir KKK kullanılmıştır. Böylece, tasarımın ilk bölümünde referans model ile sistem çıkışı arasındaki hata kullanılarak bilinmeyen kontrol parametreleri belirlenmiştir. Önerilen kontrolörün uyarlanabilir (adaptive) bir kontrolör olmadığı ve uyarlama işlemi sonrasında kontrol parametrelerinin tüm simülasyonlarda sabit kaldığı unutulmamalıdır.

Minimize edilecek toplam karesel hata [60],

$$E(k) = \frac{1}{2} e_1^2(k) = \frac{1}{2} (\omega_m(k) - \omega(k))^2 \quad (4.26)$$

olarak ifade edilebilir.

Burada; $\omega_m(k)$ referans modelin çıkışıdır. Eğim düşme yöntemi (Gradient Descent Method), kullanılarak kontrol parametreleri için güncelleştirme kuralları aşağıdaki gibi verilebilir [60];

$$s_{jL}^i(k+1) = s_{jL}^i(k) - \eta \frac{\partial E(k)}{\partial s_{jL}^i(k)} \quad (4.27)$$

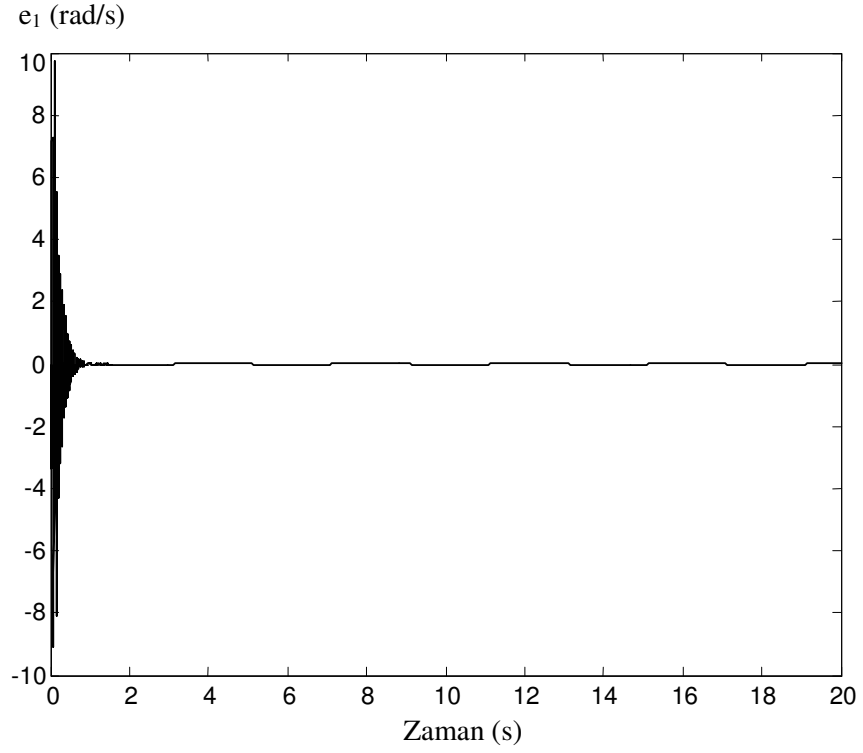
$$s_{jR}^i(k+1) = s_{jR}^i(k) - \eta \frac{\partial E(k)}{\partial s_{jR}^i(k)} \quad (4.28)$$

burada η , öğrenme oranıdır ve 0.1 seçilmiştir. Zincir kuralı kullanılarak yukarıdaki denklemlerin türevleri bulunabilir. Örneğin,

$$\frac{\partial E(k)}{\partial s_{jL}^i(k)} = \frac{\partial E}{\partial e_1} \frac{\partial e_1}{\partial \omega} \frac{\partial \omega}{\partial u} \frac{\partial u}{\partial u_L} \frac{\partial u_L}{\partial s_{jL}^i(k)} \quad (4.29)$$

dir.

Kontrol parametrelerinin uyarlama işlemi süresince, uygun referans giriş sinyali sayesinde, kontrolör çıkışının doyuma gitmesi engellenmiştir.



Şekil 4.3 20 saniyelik uyarlama periyodu boyunca hatanın $e_1 (\omega_m - \omega)$ değişimi

Şekil 4.3’de, önerilen T2BMKKK sistemi için 20 saniyelik uyarlama periyodu boyunca hatanın $e_1 (\omega_m - \omega)$ değişimi görülmektedir. Şekil 4.3’den de görüldüğü gibi hata sıfıra doğru düşmektedir. Uyarlama işleminden sonra elde edilen kontrol parametreleri tablo 4.1’de gösterilmiştir. Bu değerler sabit tutularak tüm simülasyonlarda kullanılmıştır.

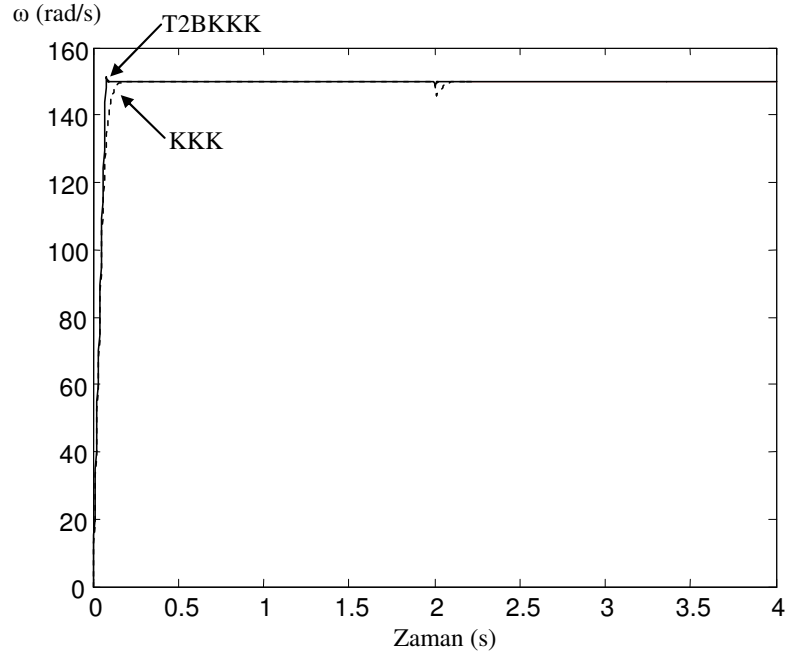
$s_{1L}^i = [57.3084 \ 57.2632 \ 54.0734 \ 54.0286]$
$s_{1R}^i = [53.0059 \ 53.0544 \ 56.5100 \ 56.5590]$
$s_{2L}^i = [56.5282 \ 56.4392 \ 50.0086 \ 49.9199]$
$s_{2R}^i = [34.6372 \ 34.7357 \ 41.5926 \ 41.6915]$

Tablo 4.1 Uyarlama işleminden sonra elde edilen kontrol parametreleri.

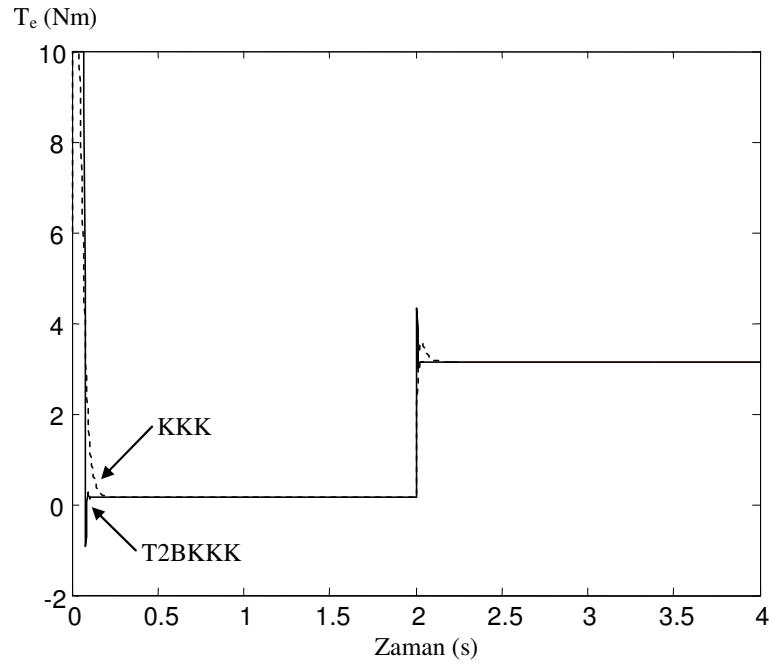
4.2.2 Simulasyon Sonuçları

Bu bölümde, karşılaştırma amacıyla KKK ve T2BMKKK sistemlerine ait simulasyon sonuçları aynı ölçekte verilmiştir. Şekil 4.4’de, sistemlerin, $J = J_n$, $B = B_n$ için, bir basamak referans girişi ($\omega_{ref}(k) = 150$ rad/s) verdikleri hız cevapları görülmektedir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6’da iki farklı atalet ve sürtünme değeri için, önerilen T2BKKK’ün dayanıklılığını gösteren simulasyon sonuçları görülmektedir. Şekil 4.5, $J = 5 \times J_n$, $B = 5 \times B_n$ için ve Şekil 4.6, $J = 30 \times J_n$, $B = 30 \times B_n$ değerleri için bir basamak referans giriş uygulandığında ($\omega_{ref}(k)=150$ rad/s) KKK ve T2BKKK sistemlerinin çıkış ve moment cevaplarını göstermektedir. Şekillerden, geliştirilen T2BKKK yönteminin üstünlüğü açıkça görülmektedir.

Şekil 4.5’de $t = 2$. s’de (Şekil 4.6’da ise $t = 5$. s’de) bir basamak yük momenti ($T_L = 3$ Nm) uygulanmıştır. Sonucun daha iyi görülebilmesi için Şekil 4.6’nın bir kısmı büyütülerek Şekil 4.6 (b)’de gösterilmiştir. Şekillerden de açıkça görüldüğü gibi, önerilen T2BKKK’ün, atalet ve sürtünme değer değişimleri ve yük momenti altındaki kontrol performansı, KKK sisteminin kontrol performansından çok daha iyidir. Burada kontrolör çıkışları, moment akım istemleri (I_q) 2 Amper ile sınırlandırılmıştır ($K_T = 5$ olduğundan, elektriksel moment istemi (T_e) ise 10 Nm ile sınırlandırılmıştır). Böylece doğal olarak hız cevaplarının eğimi, moment akım doyumu boyunca (moment akımı sınıra ulaşınca) farklı atalet değerleri için farklı değerler alır.

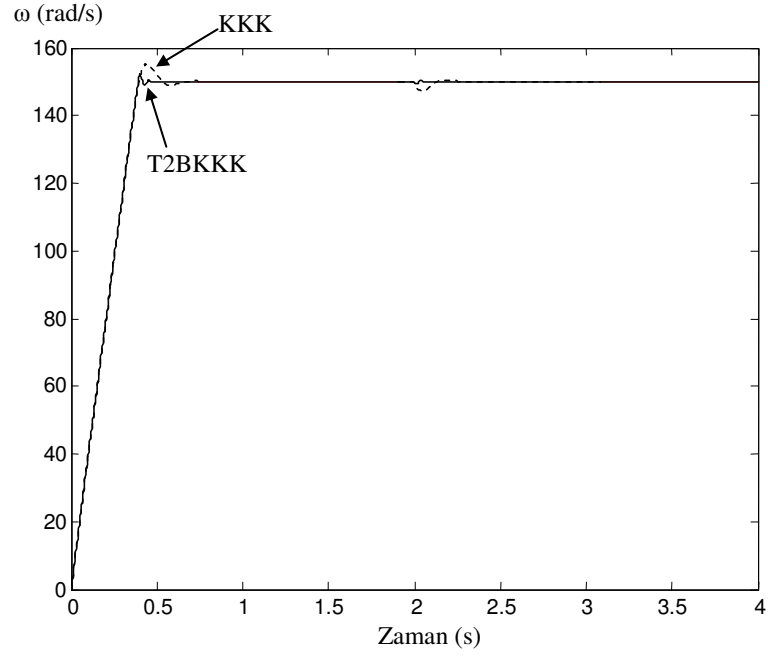


(a)

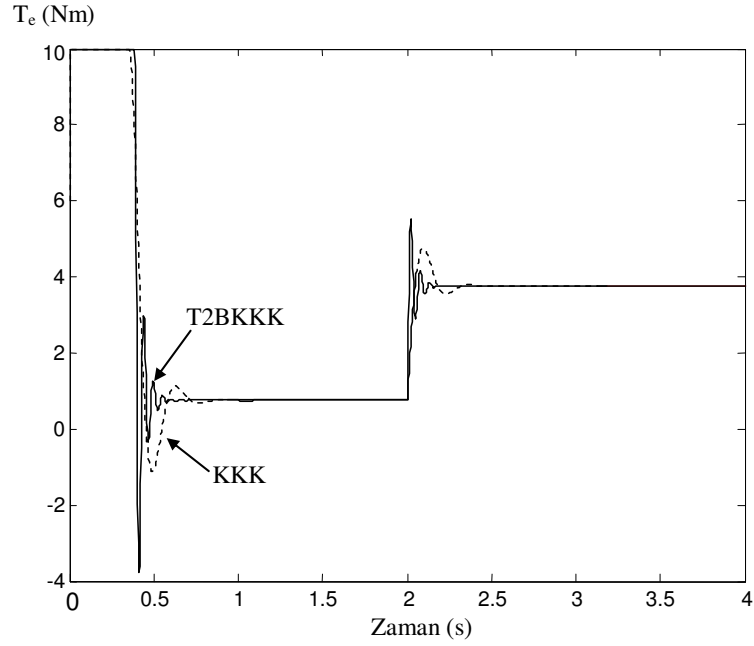


(b)

Şekil 4.4 (a) KKK ve T2BKK'ün $J = J_n$, $B = B_n$ için, $\omega_{ref}(k) = 150$ rad/s'lık bir basamak referansa verdikleri çıkış cevapları ($t = 2$ s'de $T_L = 3$ Nm'lik bir basamak yük momentini de uygulanmıştır.)
(b) KKK ve T2BKK sistemlerinin elektriksel moment sinyalleri

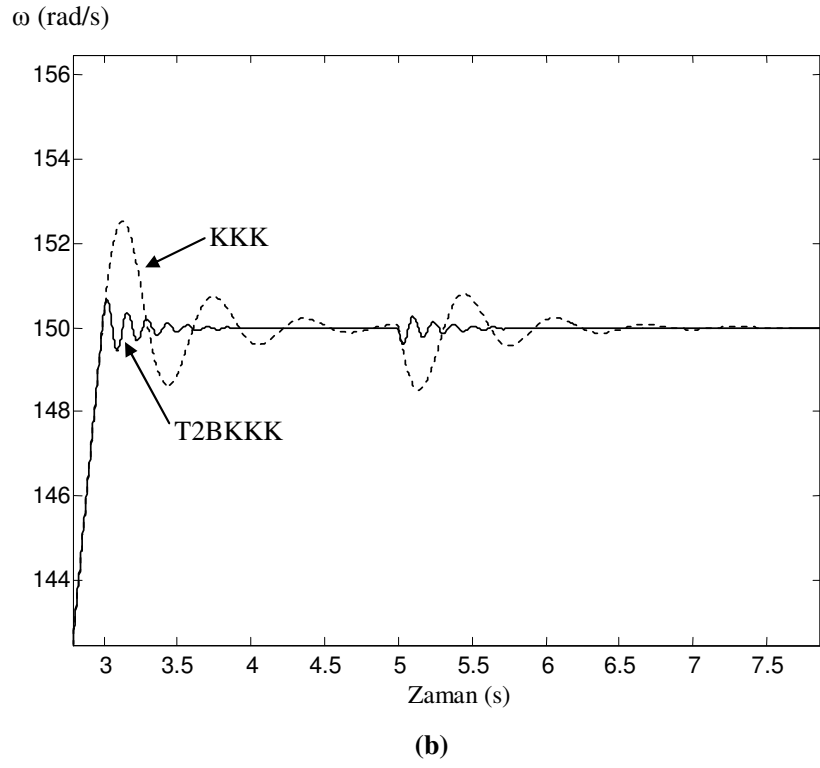
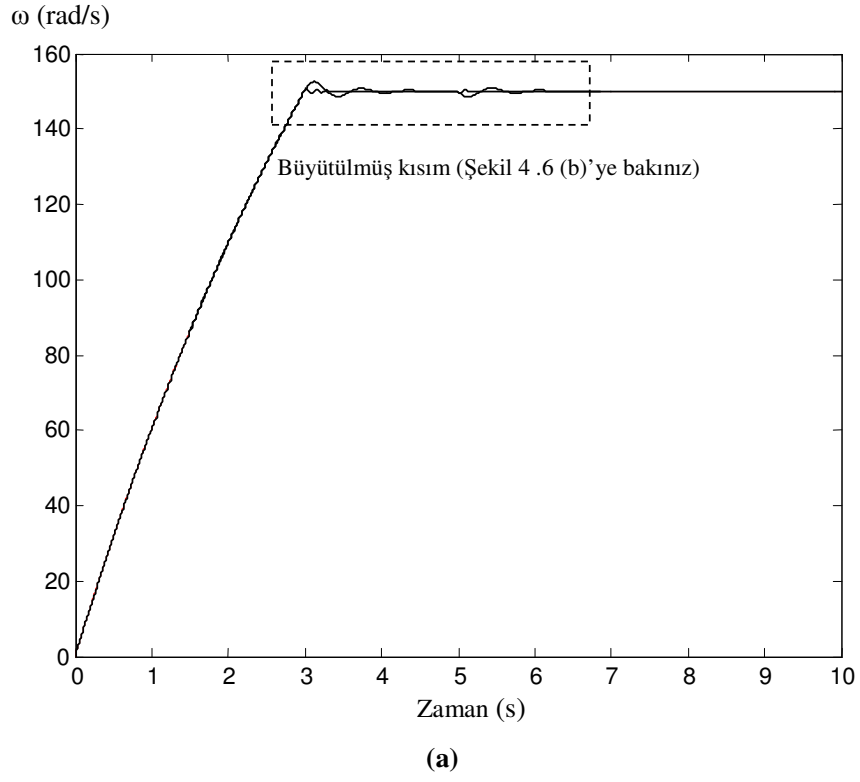


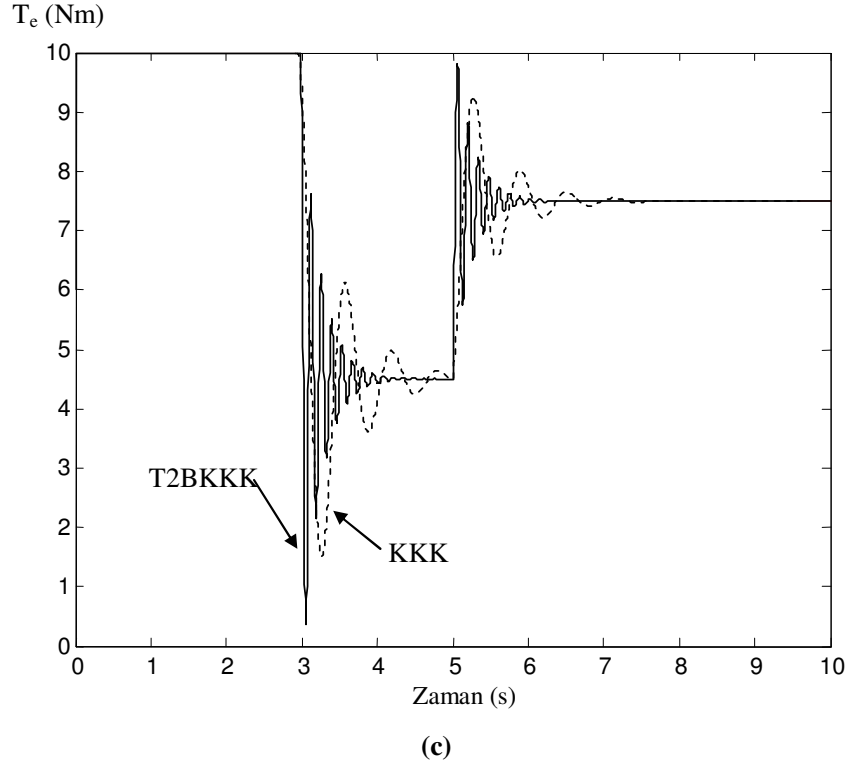
(a)



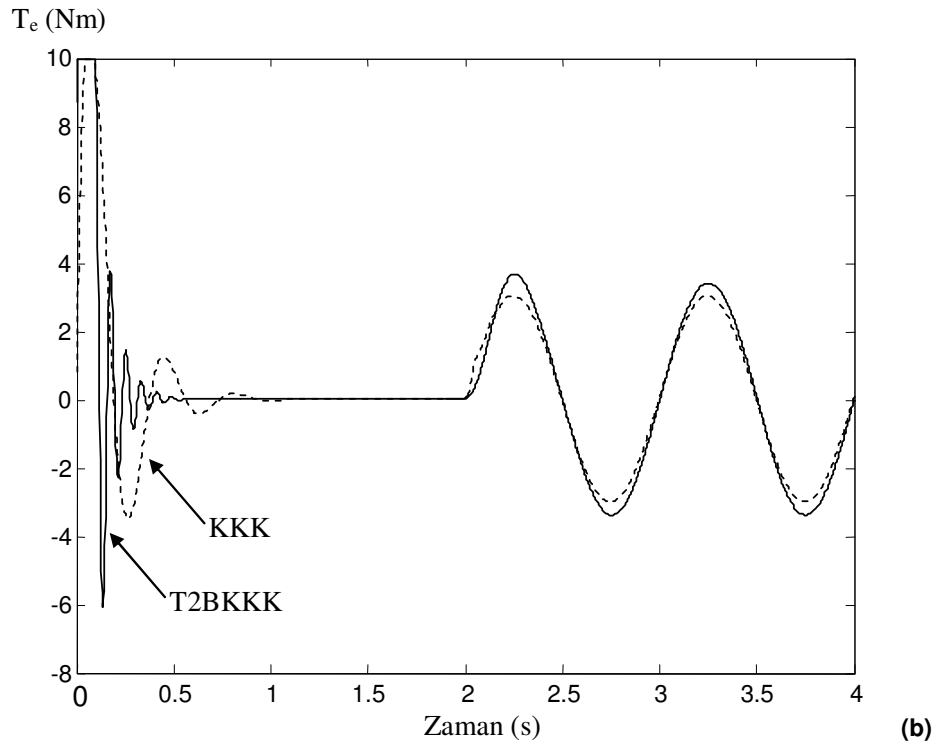
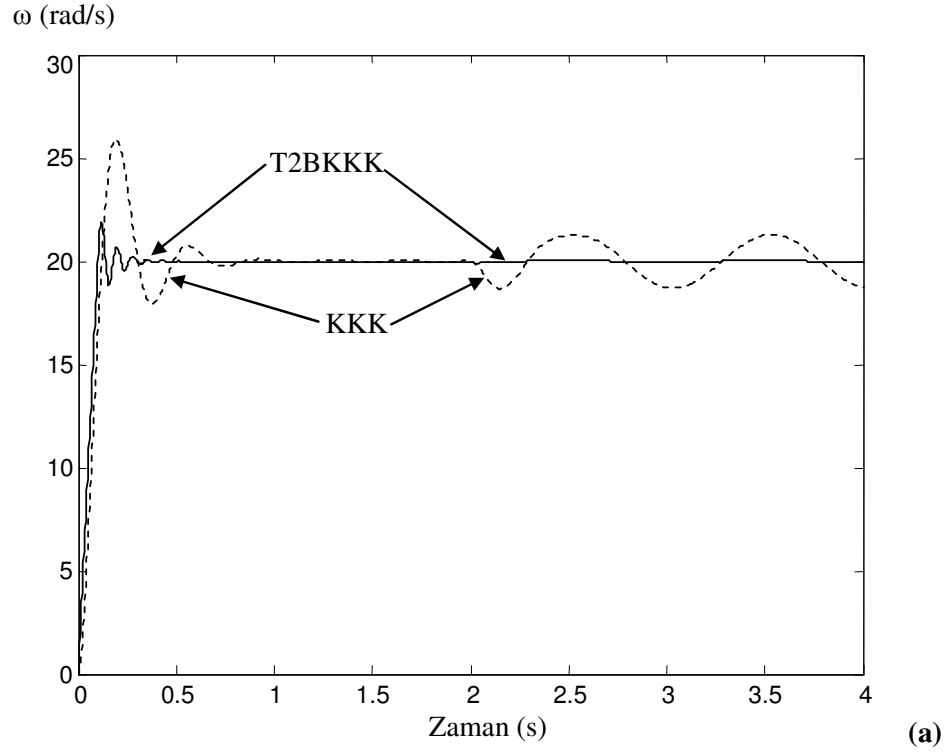
(b)

Şekil 4.5 (a) KKK ve T2BKK'ün $J = 5 \times J_n$, $B = 5 \times B_n$ için, $\omega_{ref}(k) = 150$ rad/s'lık bir basamak referansa verdikleri çıkış cevapları ($t = 2$ s'de $T_L = 3$ Nm'lik bir basamak yük momenti de uygulanmıştır)
(b) KKK ve T2BKK sistemlerinin elektriksel moment sinyalleri





Şekil 4.6 (a) KKK ve T2BKKK'ün $J = 30 \times J_n$, $B = 30 \times B_n$ için, $\omega_{ref}(k) = 150$ rad/s'lık bir basamak referansa verdikleri çıkış cevapları ($t = 5$ s'de $T_L = 3$ Nm'lik bir basamak yük momenti de uygulanmıştır.)
(b) Şekil 4.5.(a)'nın büyütülmüş hali (c) KKK ve T2BKKK sistemlerinin elektriksel moment sinyalleri



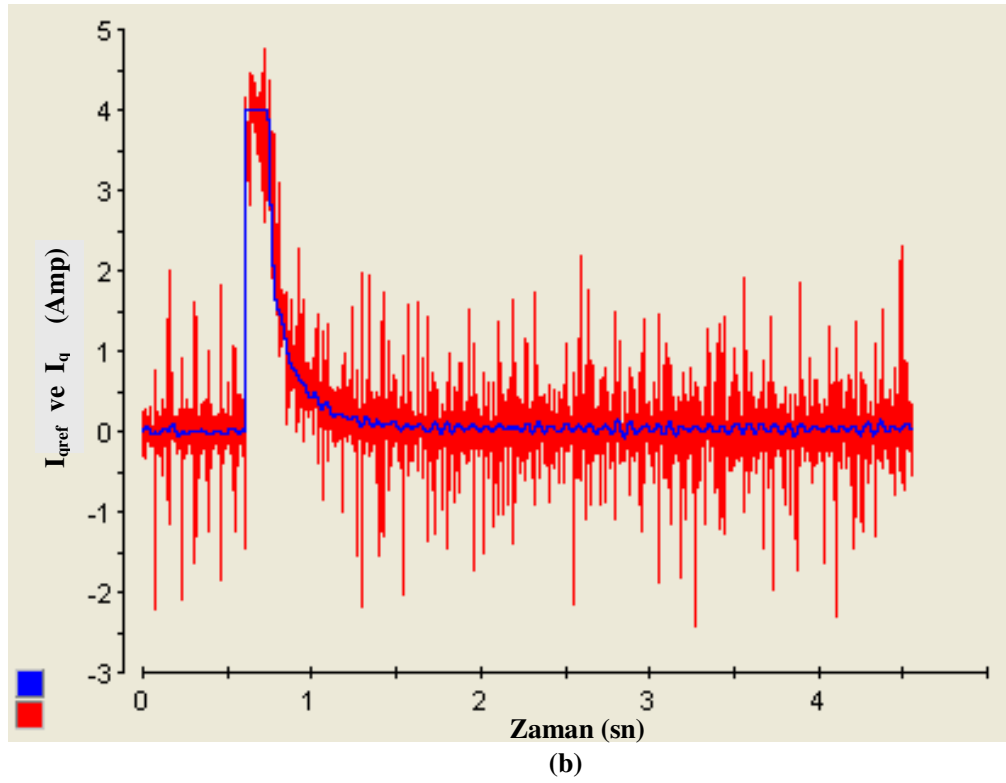
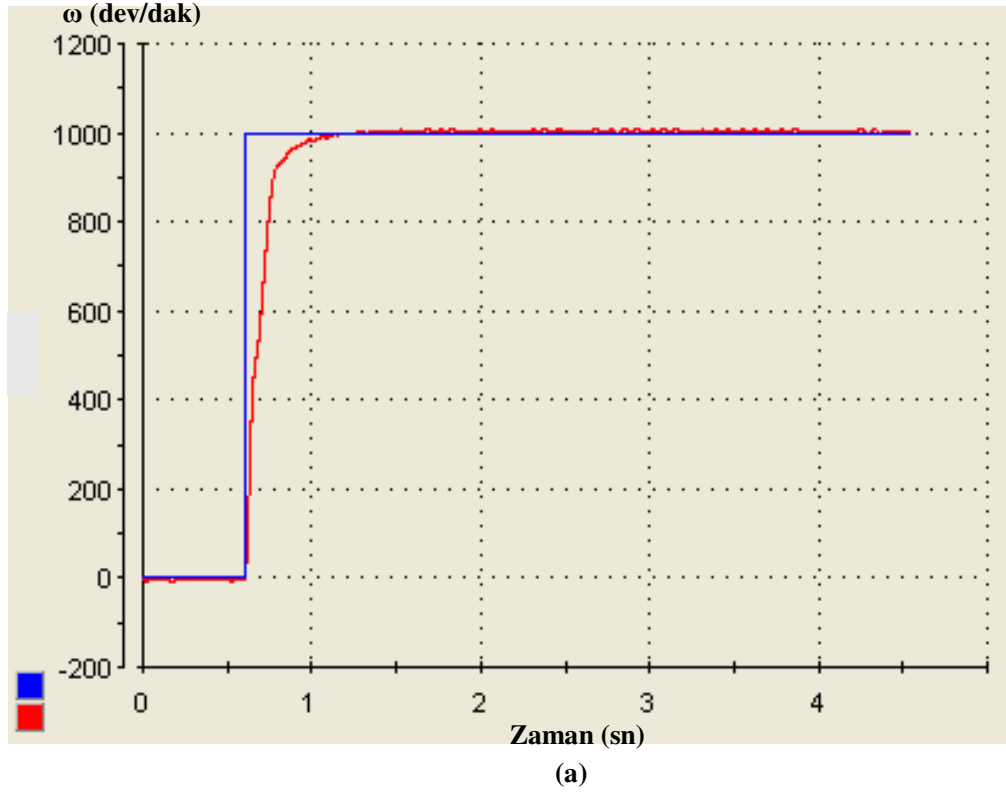
Şekil 4.7 (a) KKK ve T2BKK sistemlerinin $t \geq 2$ s ($\omega_{ref}(k) = 20$ rad/s ve $J = 10 \times J_n$, $B = B_n$ için ($T_L(t) = 3\sin(2\pi t)$) şeklinde değişen bir sinüsoidal yük momentine verdikleri çıkış cevapları
(b) KKK ve T2BKK sistemlerinin elektriksel moment sinyalleri

Şekil 4.7’de ise sistemlerin $t \geq 2$ s için referans hız $\omega_{ref}(k) = 20$ rad/s’lık bir basamak istemi ve $J = 10 \times J_n$ ve $B = B_n$ iken uygulanan $T_L(t) = 3\sin(2\pi t)$ şeklindeki bir sinüsoidal yük momentine verdikleri çıkış ve moment cevapları görülmektedir. Sinüsoidal yük momentinin, T2BKKK sistemini çok az etkilediği, buna karşın KKK sisteminin kontrol performansının ise oldukça bozulduğu Şekil 4.7’den açıkça görülmektedir.

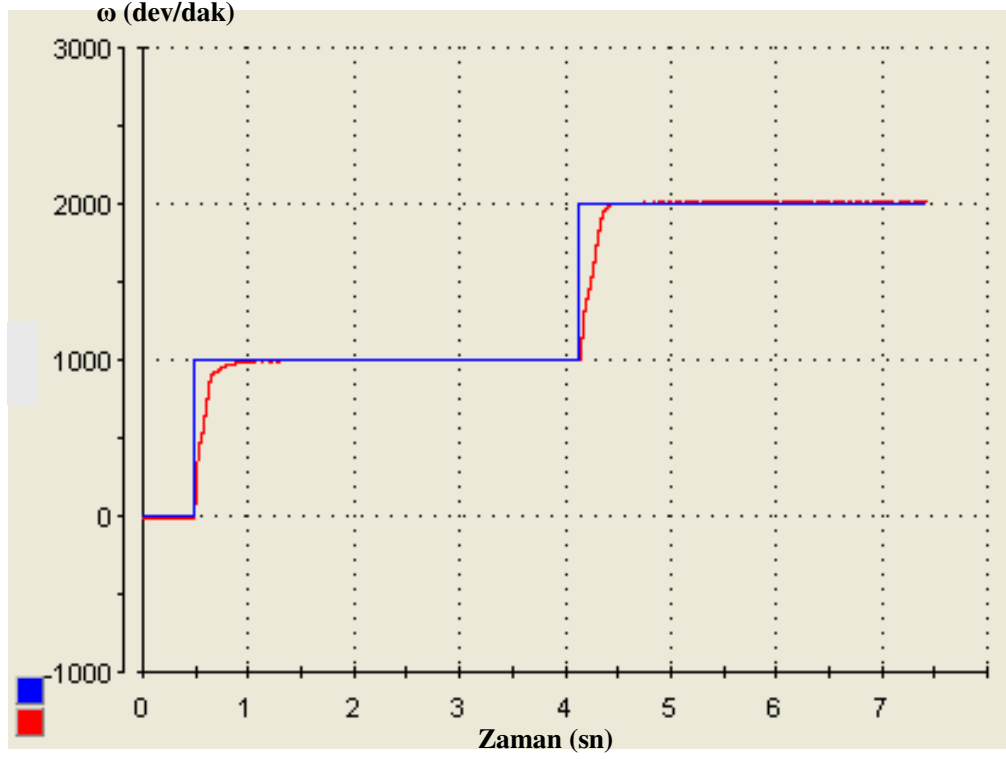
4.3 DeneySEL Gerçekleştirme ve Sonuçlar

Geliştirilen T2BKKK ve Erişim Kuralı Yaklaşımına (EYK) göre tasarlanan KKK yöntemleri, Bölüm 4.4’de ayrıntıları verilen deneysel düzene kullanılarak gerçekleştirilmiş ve önerilen T2BKKK yönteminin etkinliğini gösteren başarılı sonuçlar alınmıştır. Şekil 4.8, 4.9 ve 4.10 deneysel düzeneğin nominal parametreleri için EKY ile tasarlanan KKK yöntemiyle kontrol edilen sistemin çeşitli basamak girişlerine verdiği hız ve moment akımı cevaplarını göstermektedir. Benzer olarak, Şekil 4.11, 4.12 ve 4.13 ise yine deneysel düzeneğin nominal parametreleri için geliştirilen T2BKKK yöntemiyle kontrol edilen sistemin çeşitli basamak girişlerine verdiği hız ve moment akımı cevaplarını göstermektedir. Nominal parametreler için sunulan bu sonuçlarda geliştirilen kontrol yönteminin belirgin bir üstünlüğünü görmek doğal olarak mümkün değildir. Kontrol performansları özellikle atalet momenti gibi etkili parametre değişimlerinde ve bozucu yük momenti altında incelenmelidir. Bu anlamda, Şekil 4.14 ve 4.15 deneysel düzeneğin toplam atalet momenti motor miline disk eklenerek nominal değerin yaklaşık 4 katına çıkarıldığı durum için sırasıyla KKK ve T2BKKK yöntemleriyle elde edilen hız ve moment akımı cevaplarını göstermektedir. Geliştirilen T2BKKK yönteminin KKK yöntemine göre daha iyi bir kontrol performansı sağladığı Şekil 4.14 ve 4.15’den açıkça görülmektedir.

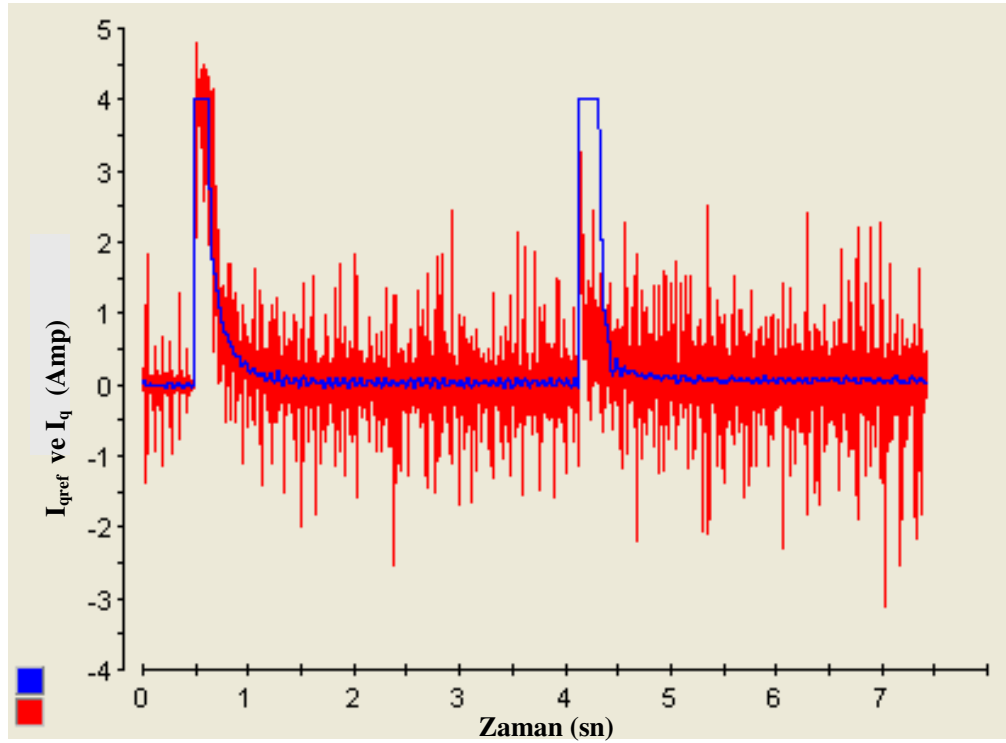
Yine, kontrol yöntemlerinin performansı basamak şeklinde bir yük momenti uygulanarak test edilmiştir. Şekil 4.16 ve 4.17 sırasıyla KKK ve T2BKKK yöntemlerinin basamak yük momentine karşı hız ve moment akımı tepkilerini göstermektedir. Şekil 4.16 ve 4.17 karşılaştırıldığında, T2BKKK yönteminin KKK yöntemine göre daha iyi bir performans sağladığı rahatlıkla söylenebilir.



Şekil 4.8 Deneysel sistemin nominal parametreleri için KKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak)

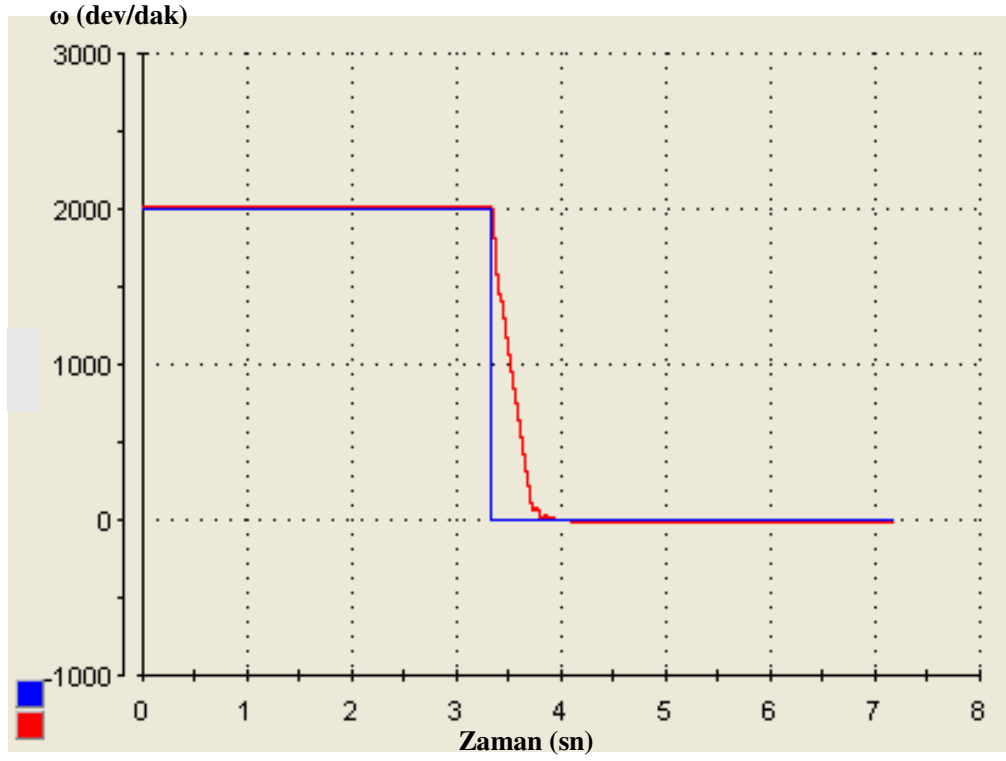


(a)

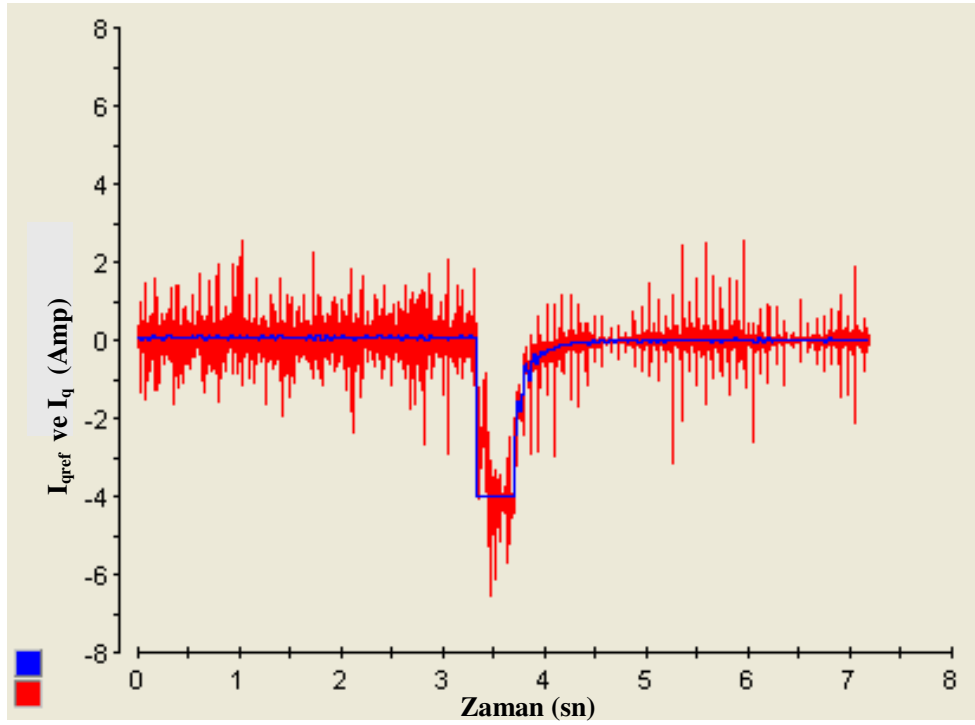


(b)

Şekil 4.9 Deneysel Sistemin Nominal Parametreleri için KKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak'dan 2000 dev/dak'ya çıkarılıyor)

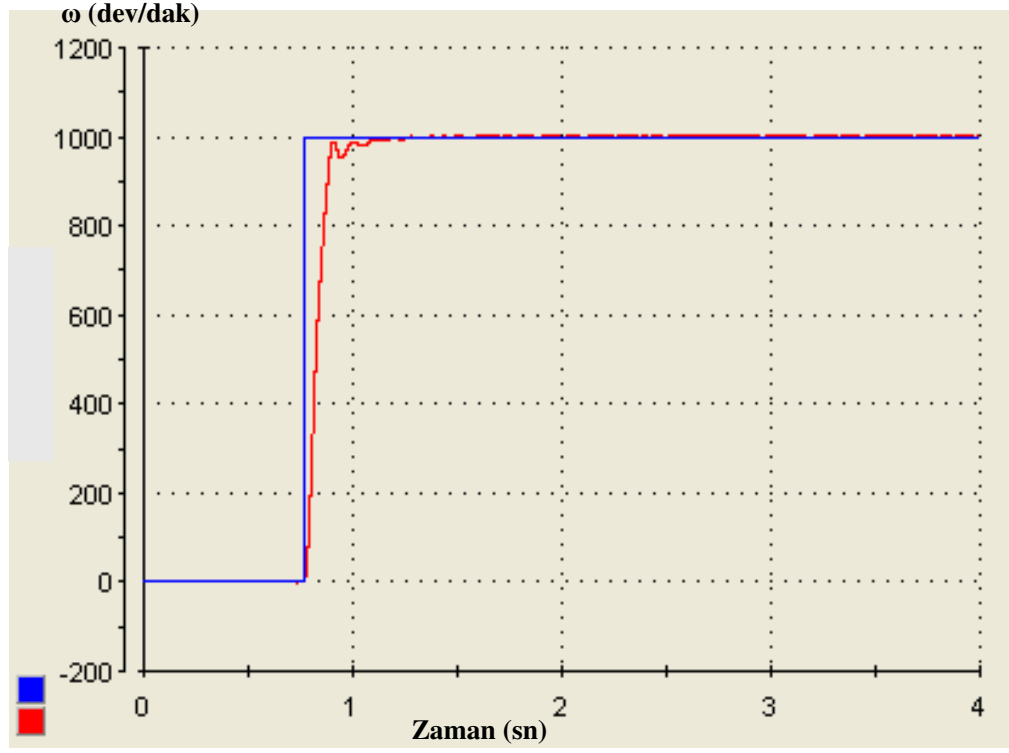


(a)

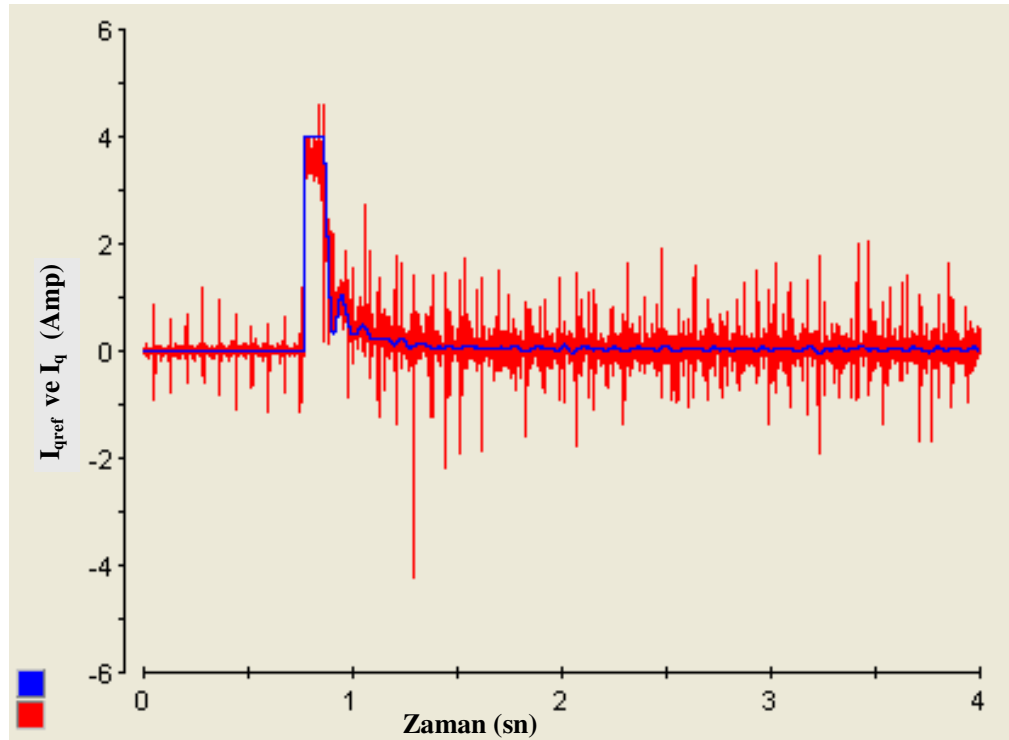


(b)

Şekil 4.10 Deneysel Sistemin Nominal Parametreleri için KKK yöntemi ile elde edilen (a)hız cevabı (b)Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 2000$ dev/dak'dan 0 dev/dak'ya düşürülüyor)

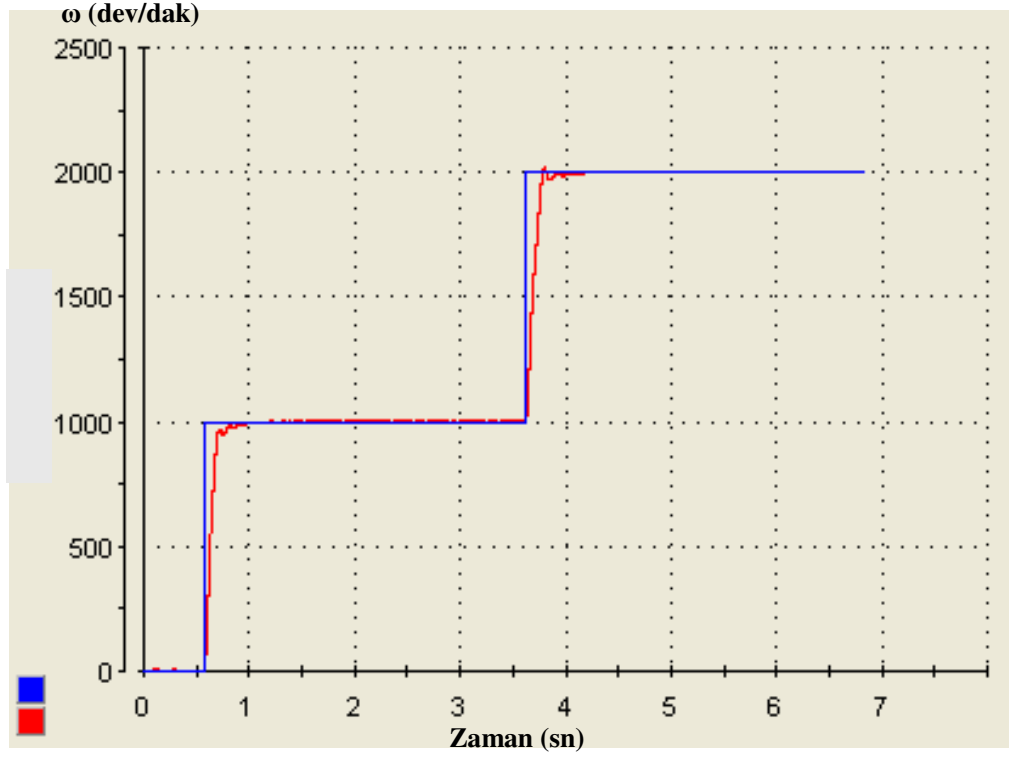


(a)

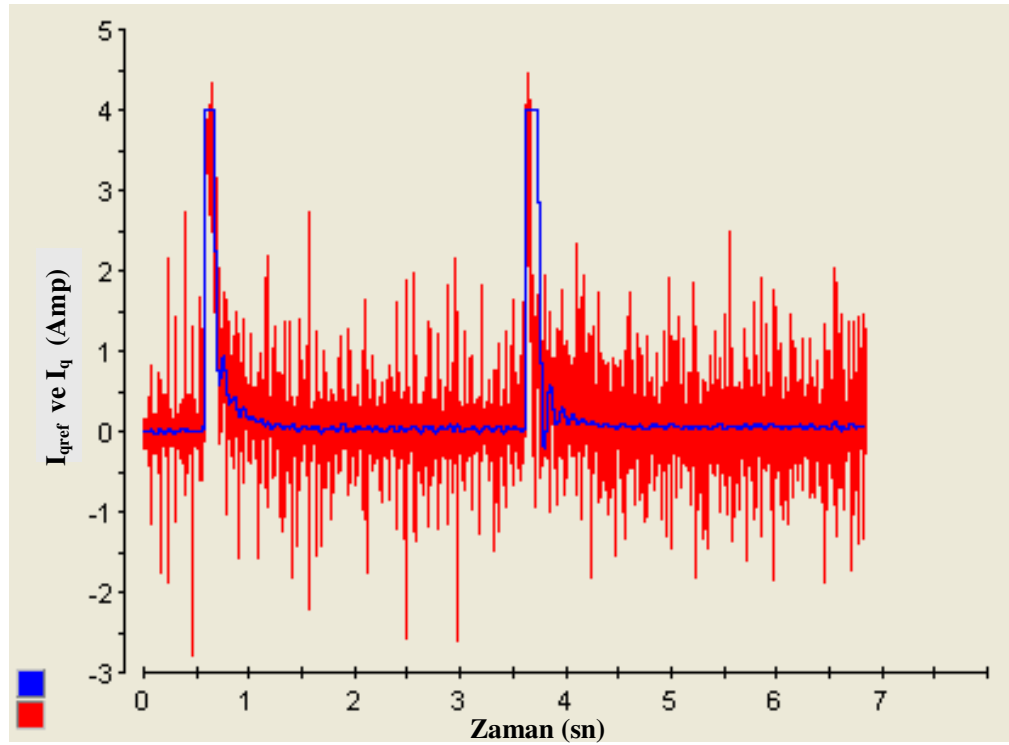


(b)

Şekil 4.11 Deneysel sistemin nominal parametreleri için T2BKKK yöntemi ile elde edilen (a)hız cevabı (b)Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak)

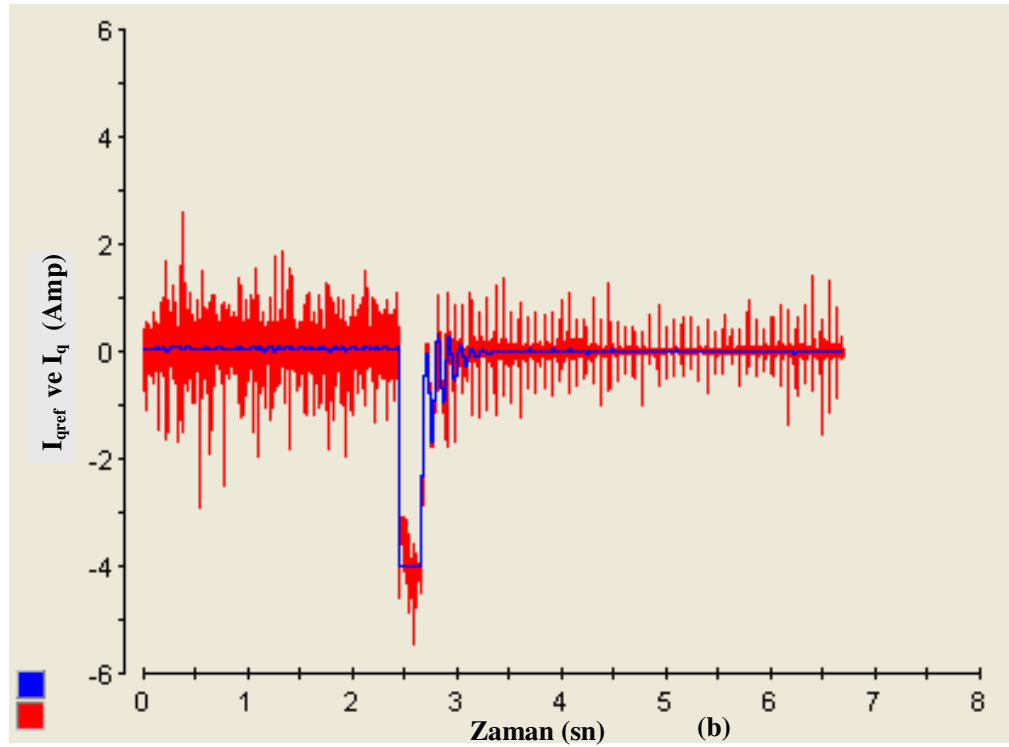
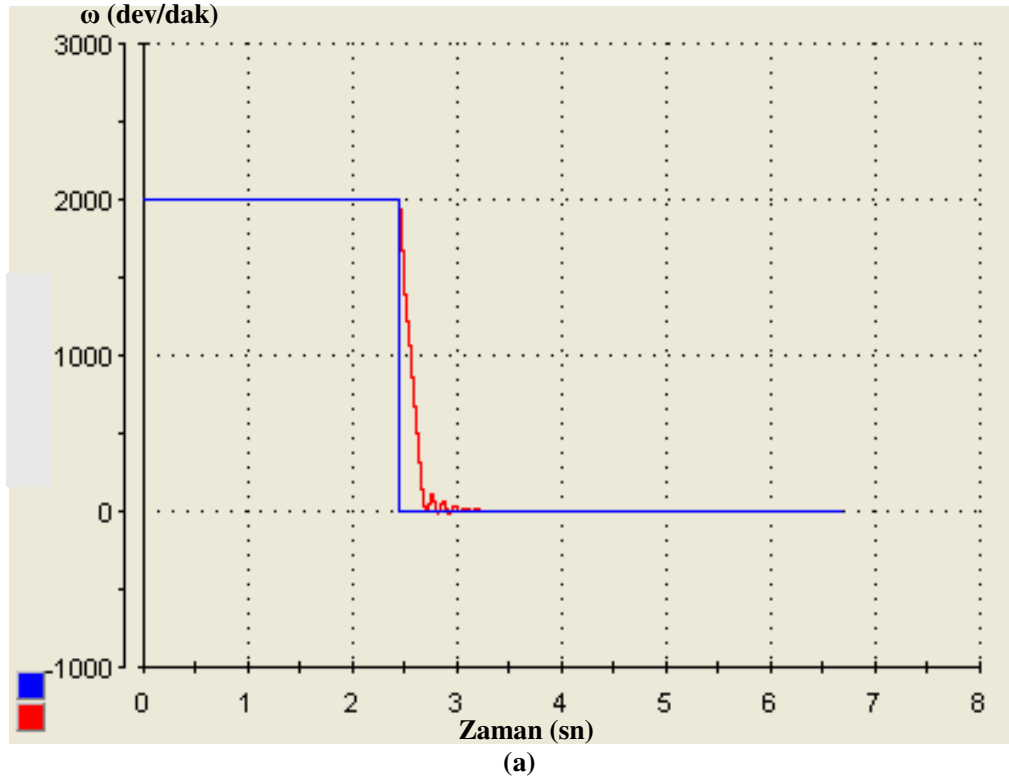


(a)

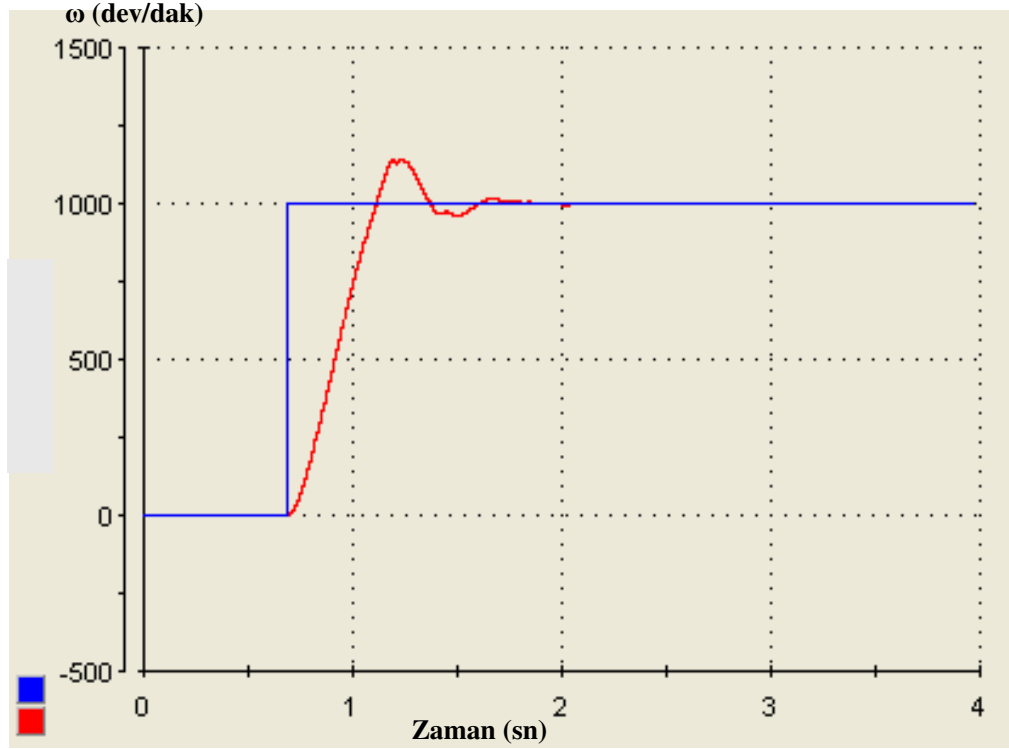


(b)

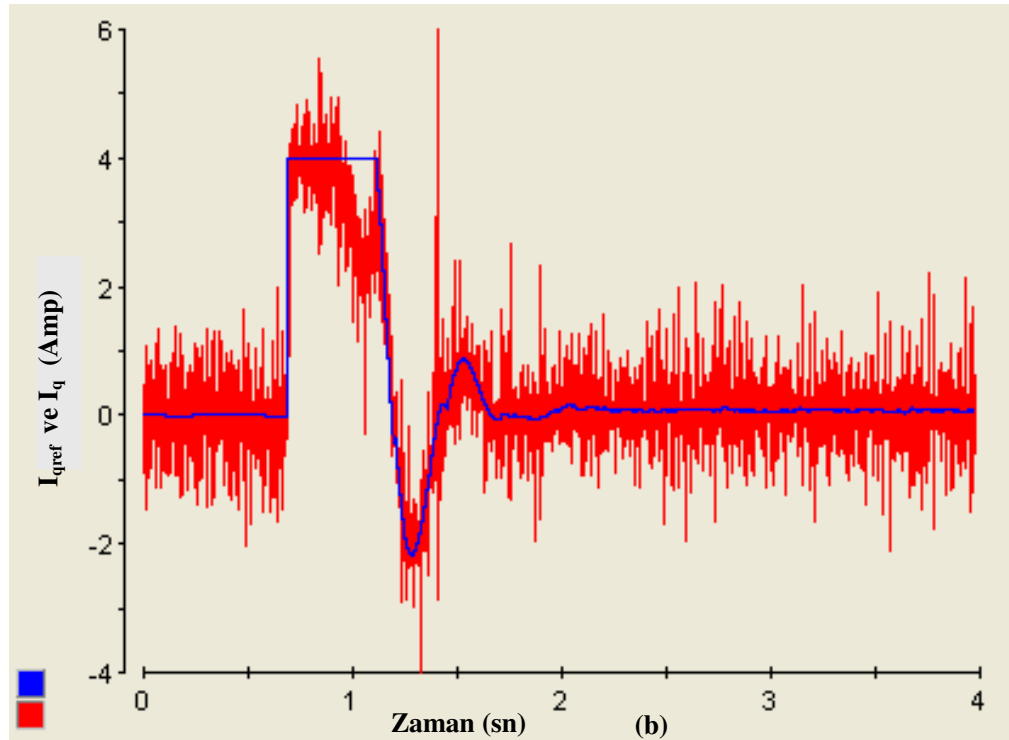
Şekil 4.12 Deneysel sistemin nominal parametreleri için T2BKKK yöntemi ile elde edilen (a)hız cevabı (b)Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak'dan 2000 dev/dak'ya çıkarılıyor)



Şekil 4.13 Deneyisel sistemin nominal parametreleri için T2BKKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans giriş $\omega_{ref} = 2000$ dev/dak'dan 0 dev/dak'ya düşürülüyor)

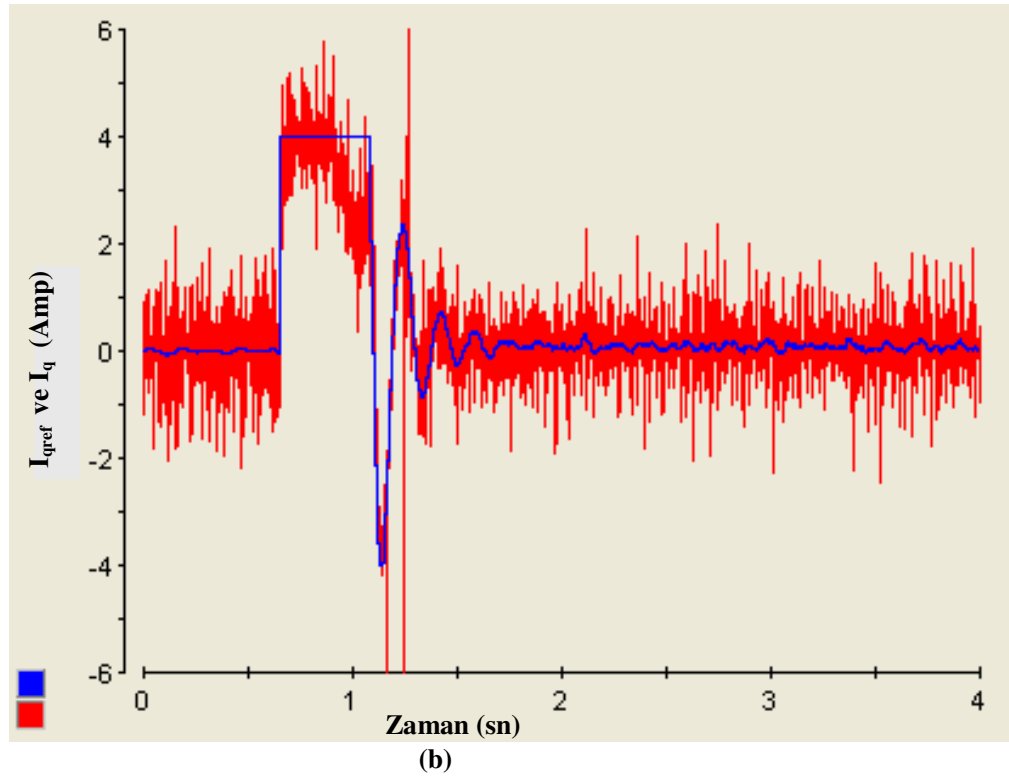
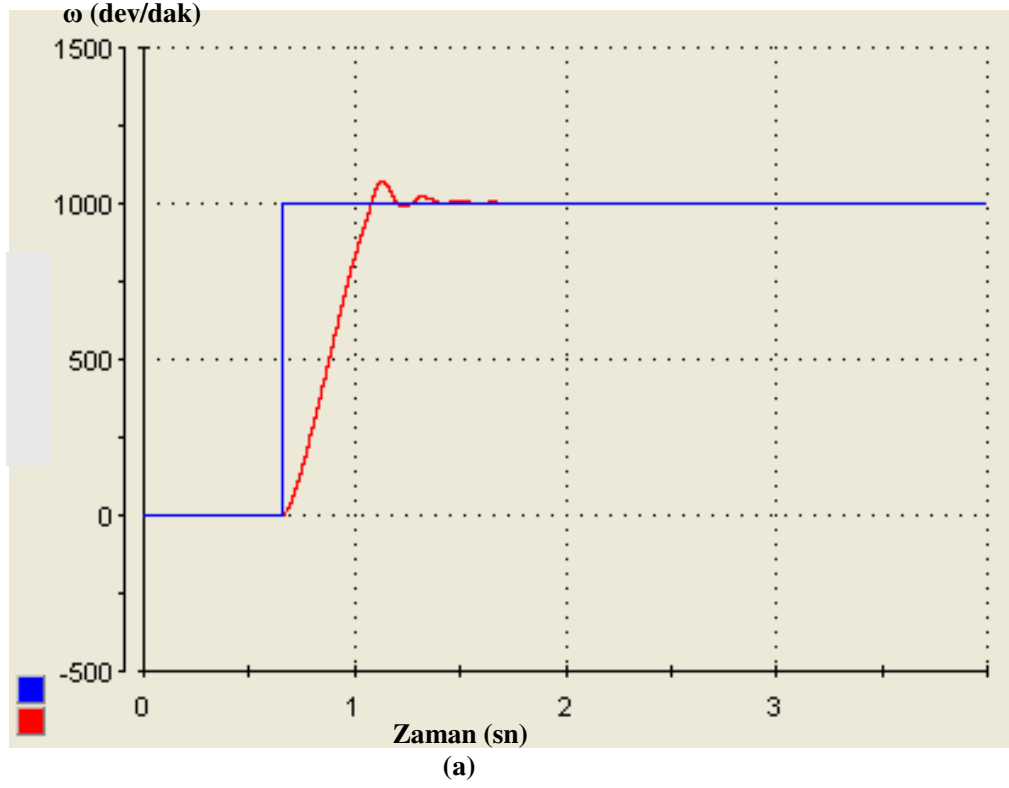


(a)

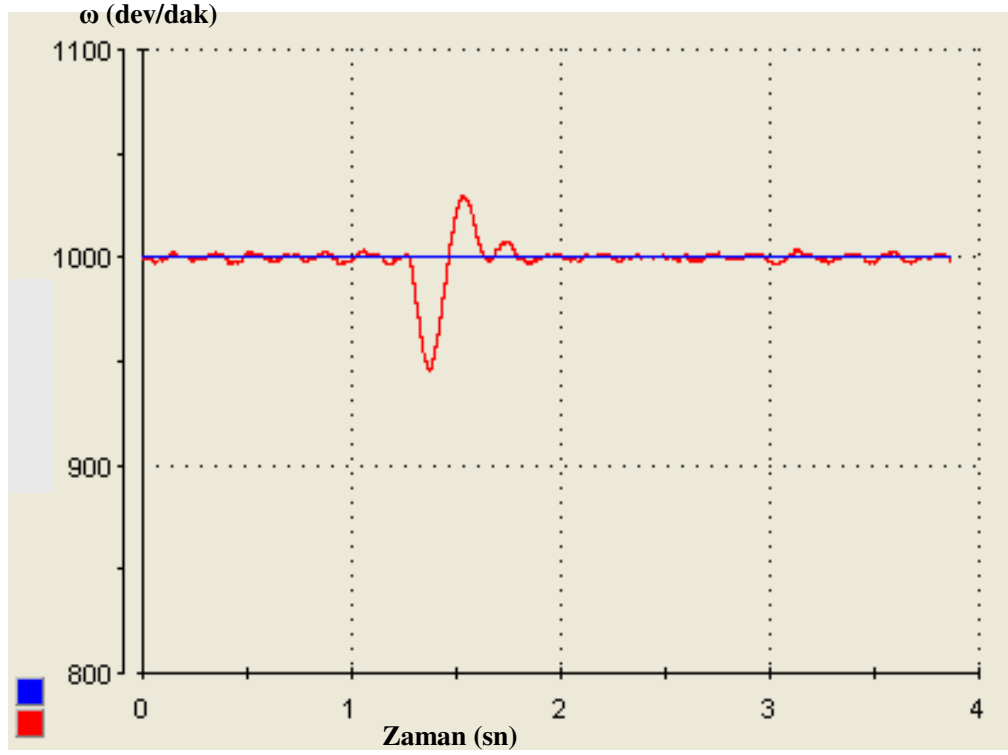


(b)

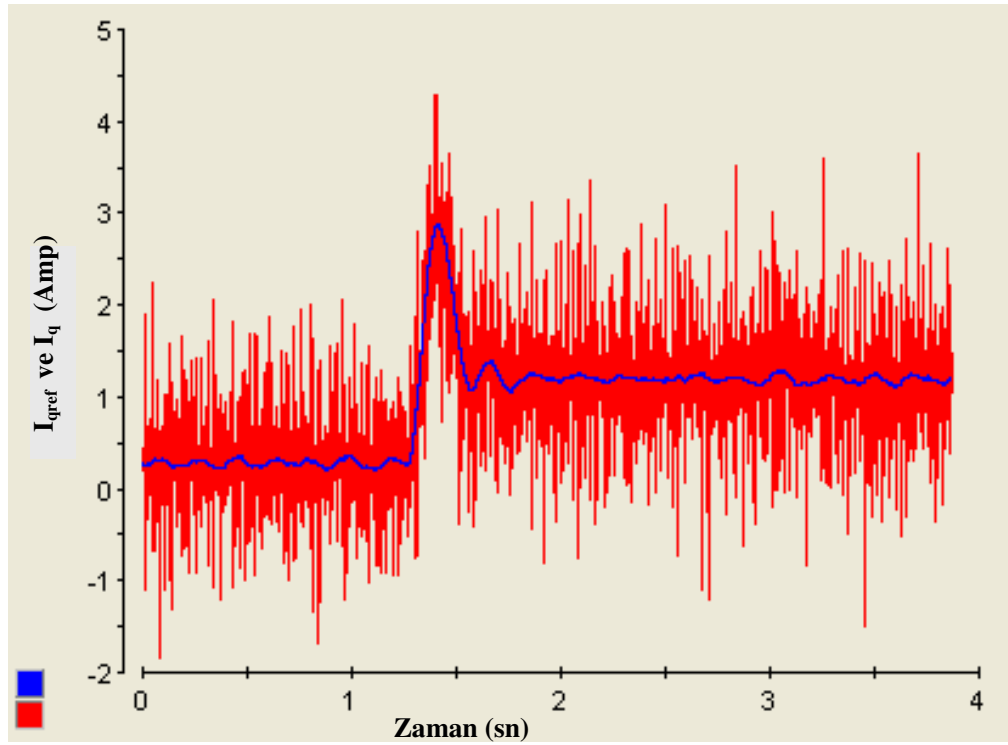
Şekil 4.14 Deneysel sistemin atalet momenti eklenen disk ile nominal değerin yaklaşık 4 katına çıkarıldığında KKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans girişi $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak)



Şekil 4.15 Deneyisel Sistemin Atalet Momenti eklenen disk ile nominal değerin yaklaşık 4 katına çıkarıldığında T2BKKK yöntemi ile elde edilen (a) hız cevabı (b) Moment akım cevabı (Basamak referans girişi $\omega_{ref} = 1000$ dev/dak)

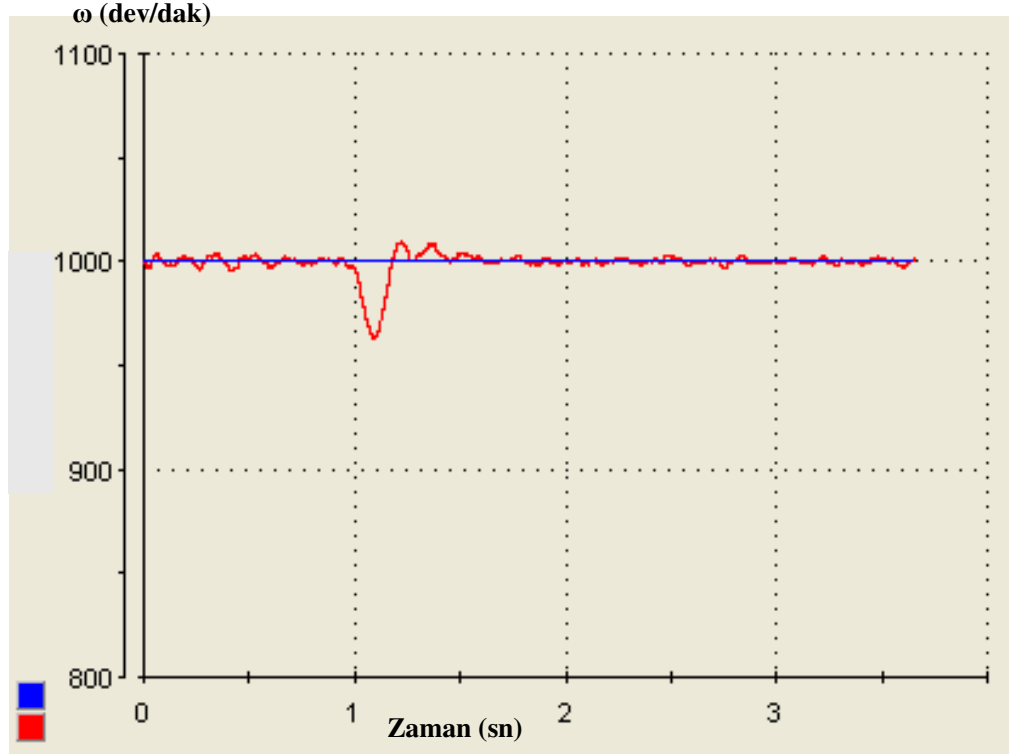


(a)

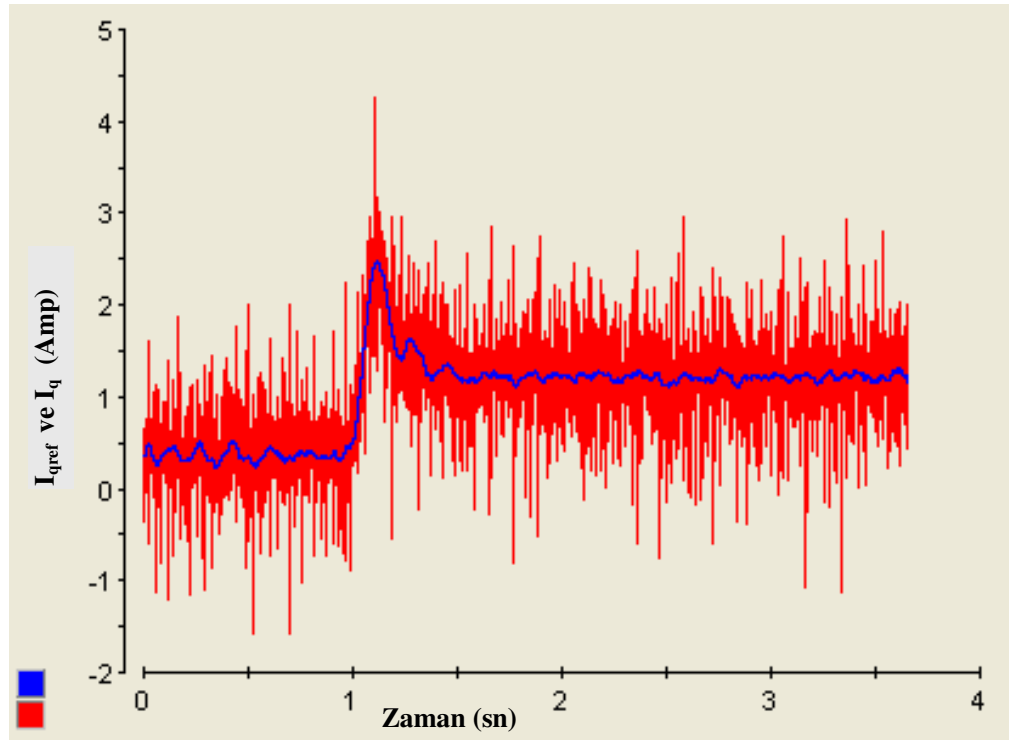


(b)

Şekil 4.16 Basamak yük momentı uygulandığında KKK yöntemi ile elde edilen (a)hız cevabı (b)moment akım cevabı



(a)

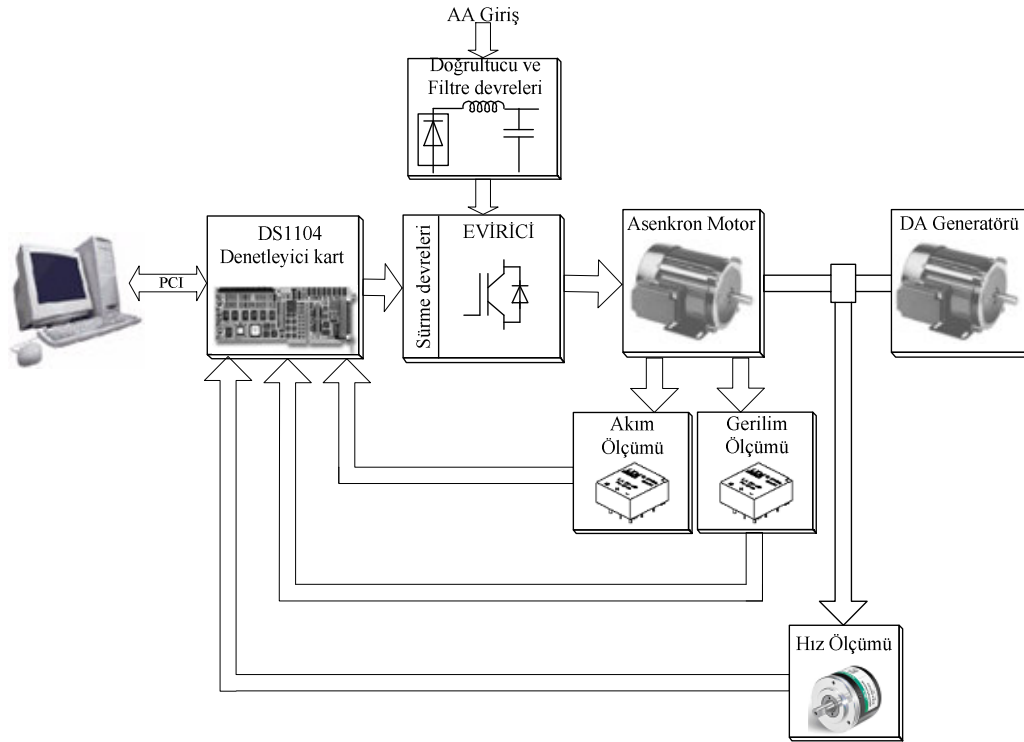


(b)

Şekil 4.17 Basamak yük momenti uygulandığında T2BKKK yöntemi ile elde edilen (a)hız cevabı
(b)moment akım cevabı

4.4 Deney Düzeneği

Bu tez çalışmasında kullanılan deney düzeneğinin genel blok diyagramı Şekil 4.18’de verilmiştir. Burada motordan ölçülen hız bilgisi DS1104 kontrolör kartının sayısal girişlerine, akım bilgileri ise kartın ADC girişlerine uygulanmaktadır. Kontrolör kart bu bilgileri, asenkron motorun hız kontrolü için hazırlanan ve kontrol algoritması ile gerçek zamanlı olarak işleyerek evirici devresinin anahtarlama işaretleri üretir. DS1104 kontrolör kartının sayısal çıkışlarında bu işaretler alınarak evirici devresine uygulanır ve böylece motorun istenilen hızda dönebilmesi için üretilen Darbe Genlik Modülasyonu (DGM) işaretlerine göre elde edilen üç faz gerilimleri motora uygulanır. Şekil 4.18’deki blok diyagramda hız kontrolü yapılacak asenkron motorun etiket bilgileri ve parametreleri EK-1’de verilmiştir. Fırat Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Elektronik ve Bilgisayar Bölümüne ait olan deney seti hakkında daha detaylı bilgi [61] nolu referansta bulunabilir.



Şekil 4.18 Deney düzeneği blok diyagramı

Deneyisel çalışmalarda kontrol yapısının gerçekleştirilmesi için Şekil 4.19’da görüldüğü gibi bir MATLAB/Simulink modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model, Simulink Real-Time Workshop ve dSPACE’ in Real Time Interface yazılımları sayesinde gerçek zamanlı kodlara dönüştürülerek DS1104 PPC kartın program hafızasına yüklenmektedir. Bir Simulink model dosyası ile dSPACE çalışması oluşturmak için dSPACE tarafından geliştirilen Control Desk Developper yazılımı kullanılmıştır. Bu yazılım, algoritmanın gerçek zamanlı olarak yürütülmesi için değişkenlerin yazılım kontrolörlerine atanmasını ve bir kullanıcı arayüzü oluşturulmasını sağlar. Böylece değişkenlerin gerçek zamanlı olarak kontrolü ve gözlemlenmesi etkileşimli olarak sağlanır [61].

5 SONUÇ

5.1 Sonuçların Tartışılması

Bu tezde, Erişim Kuralı Yaklaşımına göre tasarlanan KKK yöntemi ve tip-2 bulanık mantık kullanılarak, parametre değişimleri ve yük momenti etkisi altındaki elektriksel sürücülerinin dayanıklı hız kontrolü için yeni bir kontrolör yapısı önerilmiştir. KKK tekniği, her ne kadar teorik olarak mükemmel sonuç sağlasa da ayırık zaman gerçeklemede mükemmel bir dayanıklı kontrol sağlayamamaktadır [4, 6, 55]. Çatırtı problemi, KKK yönteminin ayırık zaman gerçeklemede ana sorundur. Çatırtıyı azaltmanın veya ortadan kaldırmanın bir yolu, kontrol kuralındaki $\text{sgn}(\cdot)$ fonksiyonu yerine $\text{sat}(\cdot)$ fonksiyonu kullanmaktır. Bununla beraber, bu çalışmada olduğu gibi çoğu sürücü kontrol sistemlerinde, kontrolör çıkışı aşırı moment akımı talebini önlemek için bir $\text{sat}(\cdot)$ fonksiyonu ile sınırlandırılmış olduğundan KKK'deki $\text{sat}(\cdot)$ fonksiyonu gereksiz hale gelmektedir. Bu çalışmadaki KKK, $\text{sat}(\cdot)$ veya $\text{sgn}(\cdot)$ fonksiyonu olmaksızın “Erişim Kuralı Kontrolü” yaklaşımıyla tasarlanmıştır. Bu anlamda ortaya çıkan kontrolör yapısına literatürde “Eşdeğer kontrol” yapısı da denilmektedir [9, 48].

Önerilen kontrol yönteminde, kontrol uygulamalarında TSK BMK yapısı, Mamdani BMK yapısına göre daha elverişli olduğundan, TSK BMK yapısı tercih edilmiştir. Yine önerilen kontrolörde, belirsizliklere karşı etkinliği ve hesaplama basitliği sebebiyle, aralık tip-2 kümeler ve non-singleton bulanıklaştırma kullanılmıştır. Simulasyon sonuçları, parametre değişimleri ve yük momenti etkisi altında, önerilen T2BKKK'ün KKK'ya göre daha iyi bir kontrol performansı sağladığını açıkça göstermektedir. Önerilen T2BKKK ve KKK yöntemleri deneysel olarak gerçekleştirilmiş ve alınan sonuçlar tezde sunulmuştur. Uygulamadan kaynaklanan sınırlamalardan dolayı, simulasyon sonuçlarındaki kadar başarılı olmasada, T2BKKK yönteminin KKK'ya göre daha iyi bir kontrol performansı sağladığı deneysel sonuçlarda da açıkça görülmektedir.

Çalışma alanı yeni sayılabileceğinden Tip-2 bulanık mantık tabanlı kontrol uygulamaları ancak son beş yıl içinde yoğun bir şekilde artmıştır. Ayrıca Eylül 2007 itibarıyla yaptığımız son literatür taramalarına göre, bu tez çalışmasının, Tip-2 bulanık mantığın elektrik sürücü sistemlerinin hız kontrolüne uygulaması konusunda yapılan ilk çalışmalardan biri olduğu rahatlıkla söylenebilir.

5.2 Öneriler

Tip-2 bulanık mantığı, tip-1 bulanık mantıktan ayıran en önemli farklardan biri “tip indirgeme” özelliğidir. Bu tez çalışmasında, geliştirilen kontrol yönteminin uygulanabilirliğini

artırmak için tip indirgemenin kullanılmadığı TSK yöntemi tercih edilmiştir. Ancak, pratik gerçekte daha zor olan ve tip indirgeme özelliğinin kullanıldığı Mamdani tipi kontrolör yapısının belirsizliklere karşı daha iyi bir kontrol performansı sağlayabileceği düşünülmekte olup bu konu üzerinde de çalışmaların yapılması rahatlıkla önerilebilir.

KAYNAKLAR

1. T.G.Habetler, R.G.Harley, 2001, Power electronics converter and system control, Proceedings of the IEEE 89, 6, 913-925.
2. V.I.Utkin, 1993, Sliding Mode Control Design Principles and Applications to Electric Drives, IEEE Trans.Ind.Electron., 40, no.1, 23-36.
3. J.M.Mendel, 2001, Uncertain Rule-Based Fuzzy Logic Systems:Introduction and New Directions, Prentice-Hall PTR.
4. Z.H. Akpolat, 1999, Application of Fuzzy-Sliding Mode Control and Electronic Load Emulation to the Robust Control of Motor Drives, Ph.D.Thesis, University of Nottingham.
5. G.F.Franklin, J.D.Powell and M.L.Workman, 1998, Digital Control of Dynamic Systems, 3rd edn., Menlo Park, CA: Addison-Wesley.
6. M.İ.Bayındır, 2003, Ayrık Zaman Kayma Kipli Kontrol Yönteminin Servo Sistemlere Uygulanması, Doktora Tezi, Fırat Üniv.Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
7. J.Y. Hung, W.B. Gao and J.C. Hung, 1993, Variable structure control: A survey, IEEE Trans. Ind. Electron., 40, no.1, 2-22.
8. W.B. Gao and J.C. Hung, 1993, Variable structure control of nonlinear systems: A new approach, IEEE Trans. Ind. Electron., 40, no.1, 45-55.
9. J.J.E. Slotine and W. Li, 1991, Applied Nonlinear Control. Prentice-Hall.
10. W.Gao, Y.Wang and A.Homaifa, 1995, Discrete Time Variable Structure Control Systems, IEEE Trans.Ind Electron., 42, no.2, 117-122.
11. H.Hagras, 2007, Type-2 FLCs: A New Generation of Fuzzy Controllers, Computational Intelligence Magazine-IEEE, 2, Issue: 1, 30-43.
12. R.John, S.Coupland, 2007, Type-2 Fuzzy Logic: A Historical View, Computational Intelligence Magazine-IEEE, 2, Issue: 1, 57-62.
13. X.Du, H.Ying, 2007, Control Performance Comparison between a Type-2 Fuzzy Controller and a Comparable Conventional Mamdani Fuzzy Controller, North American Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS'07, Annual Meeting, 100-105.
14. J.R.Castro, O.Castillo, 2007, Interval Type-2 Fuzzy Logic for Intelligent Control Applications, North American Fuzzy Information Processing Society, NAFIPS'07, Annual Meeting, 592-597.
15. C.Wagner, H.Hagras, 2007, A Genetic Algorithm Based Architecture for Evolving Type-2 Fuzzy Logic Controllers for Real World Autonomous Mobile Robots, Fuzzy System Conference, FUZZ-IEEE 2007, IEEE International, 1-6.

16. N.Baklouti, M.A.Alimi, 2007, Motion Planning in Dynamic and Unknown Environment Using an Interval Type-2 TSK Fuzzy Logic Controller, Fuzzy System Conference, FUZZ-IEEE 2007, IEEE International, 1-6.
17. R.Sepulveda, O.Castillo, P.Melin, A.D.Rodriguez, O.Montiel, 2005, Handling Uncertainty in Controllers Using Type-2 Fuzzy Logic, Fuzzy Systems 2005, FUZZ'05, The 14th IEEE International Conference, 248-253.
18. W.Dongrui, W.T.Woei, 2005, Computationally Efficient Type-Reduction Strategies for a Type-2 Fuzzy Logic Controller, Fuzzy Systems 2005, FUZZ'05, The 14th IEEE International Conference, 353-358.
19. J.Figueroa, J.Posada, J.Soriano, M.Melgarejo, S.Rojas, 2005, A Type-2 Fuzzy Controller for Tracking Mobile Objects in the Context of Robotic Soccer Games, Fuzzy Systems 2005, FUZZ'05, The 14th IEEE International Conference, 359-364.
20. P.Z.Lin, C.F.Hsu, T.T.Lee, 2005, Type-2 Fuzzy Logic Controller Design for Buck DC-DC Converters, Fuzzy Systems 2005, FUZZ'05, The 14th IEEE International Conference, 365-370.
21. P.Z.Lin, C.M.Lin, C.F.Hsu, T.T.Lee, 2005, Type-2 Fuzzy controller design using a sliding-mode approach for application to DC-DC converters, Electric Power Applications, IEEE Proceedings, 152, Issue: 6, 1482-1488.
22. A.Mencattini, M.Salmeri, R.Lojacono, 2006, Type-2 Fuzzy Sets for Modelling Uncertainty in Measurement, Proceedings of the 2006 IEEE International Workshop on Advanced Methods for Uncertainty Estimation in Measurement (AMUEM 2006), 8-13.
23. C.H.Lee, H.H.Chang, B.H.Wang, 2006, Decoupled Adaptive Type-2 Fuzzy Controller (DAT2FC) Design for Nonlinear TORA Systems, Fuzzy Systems 2006 IEEE International Conference, 506-512.
24. T.W.Wan, D.H.Kamal, 2006, On-line Learning Rules for Type-2 Fuzzy Controller, Fuzzy Systems 2006 IEEE International Conference, 513-520.
25. C.Lynch, H.Hagras, V.Callaghan, 2006, Using Uncertainty Bounds in Design of an Embedded Real-Time Type-2 Neuro-Fuzzy Speed Controller for Marine Diesel Engines, Fuzzy Systems 2006 IEEE International Conference, 1446-1453.
26. O.Castillo, N.Cazarez, P.Melin, 2006, Design of Stable Type-2 Fuzzy Logic Controllers based on a Fuzzy Lyapunov Approach, Fuzzy Systems 2006 IEEE International Conference, 2331-2336.
27. M.Y.Hsiao, T.H.S.Li, 2006, Design of Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller, Systems, Man and Cybernetics, ICSMC'06 IEEE International Conference, 6, 4976-4981.
28. P.Melin and O.Castillo, 2003, A new method for adaptive model-based control of non-linear plants using type-2 fuzzy logic and neural networks, Proc.12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, May 25-28, 1, 420-425.

29. P.Melin and O.Castillo, 2003, Intelligent control of non-linear plants using type-2 fuzzy logic and neural networks, Proc.International Joint Conference on Neural Networks, July 20-24, 2, 1558-1562.
30. P.Melin and O.Castillo, 2002, A new approach for quality control of sound speakers combining type-2 fuzzy logic and fractal theory, Proc. IEEE International Conference on Fuzzy Systems, May 12-17, 2, 825-830.
31. A.Homaifar, Y.Shen and B.V.Stack, 2001, Vibration control of plate structures using PZT actuators and type II fuzzy logic, Proc.American Control Conference, June 25-27, 2, 1575 -1580.
32. Q.Liang, N.N.Karnik and J.M.Mendel, 2000, Connection admission control in ATM networks using survey-based type-2 fuzzy logic systems, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part C, 30, no.3, 329-339.
33. E.Y.Y. Ho and P.C. Sen, 1991, Control dynamics of speed drive systems using sliding mode controllers with integral compensation, IEEE Trans. Ind. Appl., 27, no.5, 883-892.
34. S.K. Chung, J.H. Lee, J.S. Ko and M.J. Youn, 1995, Robust speed control of brushless direct-drive motor using integral variable structure control, IEE Proc.Electr Power Appl., 142, no.6, 361-370.
35. T.L.Chern, C.W.Chuang and R.L.Jiang, 1996, Design of discrete integral variable structure control systems and application to a brushless DC motor control, Automatica, 32, no.5, 773-779.
36. F.J.Lin and S.L.Chiu, 1997, Robust PM synchronous motor servodrive with variable structure model-output-following control, IEE Proc.Electr.Power Appl., 144, no.5, 317-324.
37. T.L.Chern, C.S.Liu, C.F.Jong and G.M.Yan, 1996, Discreate integral variable structure model following control for induction motor drives, IEE Proc.Electr.Power Appl., 143, no. 6, 467-474.
38. K.K.Shyu and H.J.Shieh, 1996, A new switching surface sliding mode speed control for induction motor drive systems, IEEE Trans.Power Electron., 11, no. 4, 660-667.
39. A.Bartoszewicz, 1998, Discrete Time Quasi-Sliding-Mode Control Strategies, IEEE Trans. Ind.Electron., 45, no.4, 633-637.
40. S.Z.Sarpturk, Y.Istefanopulos and O.Kaynak., 1987, On The Stability of Discrete-Time Sliding Mode Control Systems, IEEE Trans.Aut.Control, AC-32, no.10.
41. Y.Pan and K.Furuta, 1997, Discrete-Time VSS Controller Design, International Journal of Robust and Nonlinear Control, 7, 373-386.
42. I.C.Baik, K.H.Kim and M.J.Youn, 1998, Robust nonlinear speed control of PM synchronous motor using adaptive and sliding mode control techniques, IEE Proc.Electr. Power Appl., 145, no.4, 369-376.
43. J.M.Mendel, 2007, Type-2 Fuzzy Sets and Systems: An Overview, Computational Intelligence Magazine-IEEE, 2, Issue: 2, 20-29.

44. J.M.Mendel, R.I.John, F.Liu, 2006, Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple, Fuzzy Systems, IEEE Transactions, 14, Issue: 6, 808-821.
45. J.M.Mendel, 2003, Type-2 fuzzy logic made simple, Proc.12th IEEE International Conference on Fuzzy Systems, May 25-28, 2, 1493-1493.
46. C.H.Lee, Y.C.Lin and W.Y.Lai, 2003, Systems identification using type-2 fuzzy neural network (type-2 fnn) systems, Proc. 2003 IEEE International Symposium on Computational Intelligence in Robotics and Automation, July 16-20, 3, 1264-1269.
47. L.A.Zadeh, 1975, The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-1, Information Science, 8, 199-249.
48. V.Utkin, J.Guldner, J.Shi, 1999, Sliding Mode Control in Electromechanical Systems, Taylor & Francis.
49. J.J.E.Slotine, 1984, Sliding controller design for nonlinear systems, Int.J.Cont., 40, no. 2, 421-434.
50. M.Bulut, 2004, Tip-2 Bulanık Mantık Sistemlerin Benzetimi İçin Yazılım Geliştirme, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniv.Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
51. R.Palm, D.Driankov and H.Hellendoorn, 1977, Model Based Fuzzy Control, Springer-Verlag.
52. K.M.Passino and S.Yurkovich, 1988, Fuzzy Control, Addison-Wesley.
53. L.A.Zadeh, 1965, Fuzzy Sets, Information and Control, 8, 338-353.
54. L.X.Wang, 1997, A Course in Fuzzy Systems and Control, Upper Saddle River, NJ.
55. Z.H.Akpolat, G.M.Asher and J.C.Clare, 2000, A practical approach to the design of robust speed controllers for machine drives, IEEE Trans.Ind.Electron., 47(2), 315-324.
56. N.N.Karnik, J.M.Mendel and Q.Liang, 1999, Type-2 fuzzy logic systems, IEEE Trans on Fuzzy Systems, 7(6), 643-658.
57. Q.Liang and J.M.Mendel, 2000, Interval type-2 fuzzy logic systems: theory and design, IEEE Trans on Fuzzy Systems, 8(5), 535-550.
58. Z.H.Akpolat and M.Gokbulut, 2003, Discrete time adaptive reaching law speed control of electrical drives, Electr Eng., 85(1), 53-58.
59. Z.H.Akpolat and A.Altınors, 2007, Type-2 fuzzy reaching law speed control of an electric drive, International Journal of Modeling and Simulation, 27(3).
60. K.J.Astrom and B.Wittenmark, 1995, Adaptive Control, 2nd edn., Mass.: Addison-Wesley.
61. C.Bal, 2007, Asenkron motorun kayma kipli ve sinirsel bulanık gözlemleyicilerle algılayıcısız hız denetimi, Doktora Tezi, Fırat Üniv.Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.

EK-1 DENEYSEL ÇALIŞMADA KULLANILAN ASENKRON MOTORUN ETİKET VE PARAMETRE BİLGİLERİ

3 Faz 220/380 v	$T_n = 3,72 \text{ Nm}$	$L_{ls} = 0,02129 \text{ H}$
$I_n = 4,5 / 2,6 \text{ A}$	$J = 0,0019 \text{ Kgm}^2$	$L_{lr} = 0,02129 \text{ H}$
$n = 2820 \text{ d/d}$	$B = 0,000263 \text{ Nms/rad}$	$L_m = 0,5787 \text{ H}$
$\cos \varphi = 0,85$	$R_s = 8,231 \Omega$	$L_s = 0,5999 \text{ H}$
$p = 2$		$L_r = 0,5999 \text{ H}$

Tablo EK-1.1 Deneyisel çalışmada kullanılan asenkron motorun etiket ve parametre bilgileri

ÖZGEÇMİŞ

Ayhan ALTINÖRS

Fırat Üniversitesi
Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu
Endüstriyel Otomasyon Programı
23119, Elazığ

Tel: 0-424-2370000/4383
E-Posta: aaltinors@firat.edu.tr

- 1966** Ankara’da doğdu.
- 1987-1990** Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik bölümünden mezun oldu.
- 1998-2001** Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde “*Dinamometreler İçin Yeni Bir Kontrol Sistemi Tasarımı*” konusunda yaptığı tez çalışmasıyla Yüksek lisansını tamamladı.
- 2002-...** Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde doktora başladı.
- 1993-...** Fırat Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Endüstriyel Otomasyon Programında Öğretim Görevlisi ve Program Koordinatörü olarak hizmet yapmaktadır.