

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

128742

**ENDÜSTRİYEL PROSESLER İÇİN PID TİPİ BULANIK
KONTROLÖR TASARIMI**

Elektrik Müh. Janset KUVULMAZ

FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Mühendisliği Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Şeref Naci ENGİN

Prof. Dr. Halit PASTACI
Doç. Dr. Tülay YILDIRIM

İSTANBUL, 2002

128742

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
SİMGE LİSTESİ.....	v
ŞEKİL LİSTESİ.....	vi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
ÖNSÖZ.....	x
ÖZET.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Giriş	1
1.2. Amaç ve Kapsam.....	3
2. BULANIKLIK TEORİSİ.....	4
2.1. Neden Bulanık Mantık.....	4
2.2. Bulanık Mantığın Tarihçesi	9
2.3. Bulanık Kümeler Ve Üyelik Dereceleri.....	12
2.4. Üyelik Fonksiyonları	14
2.5. Üyelik Derecesi Ataması	21
2.6. Bulanık Küme İşlemleri.....	25
2.6.1. Bulanık Küme Birleşmesi	25
2.6.2. Bulanık Küme Kesişmesi.....	28
2.6.3. Bağıdaşmayan kümeler	30
2.6.4. Bağımsız kümeler	31
2.6.5. İçerilen kümeler	31
2.6.6. Tamamlayıcı kümeler (değillenme)	33
2.6.7. Çıkarılan kümeler	35
2.6.8. Çarpım Kümeleri	36
2.6.9. Çoklu Küme İşlemleri	38
2.7. Bulanık Matematik	41
2.7.1. Bulanık Sayıların Toplanması Ve Çıkarılması	43
2.7.2. Genelleme İlkesi	45
2.7.3. Bulanık Sayıların Çarpılması Ve Bölünmesi	47
2.8. Küme İlişkileri	50
2.8.1. İlişki Geçiş Matrisi	52
2.8.2. Bulanık İlişkiler	54
2.8.3. Bulanık Tolerans ve Eşdeğerlik İlişkileri	57
2.8.4. Değer Atamaları	57
2.9. Bulanık Sistemler	59
2.9.1. Doğal Dil	61
2.9.2. Sözel Eşikler (Linguistic Hedges)	63
2.9.3. Daraltma (Concentration)	64

2.9.4.	Genişleme (Dilation)	65
2.9.5.	Yoğunlaştırma (Intensification)	66
2.10.	Bulanık Kuralların Harmanlanması	68
2.11.	Bulanık Sistem Yapıları	70
2.11.1.	Bulanıklaştırıcı	71
2.11.2.	Bulanık Kural Tabanı	72
2.11.3.	Bulanık Çıkarım Mekanizması.....	73
2.11.4.	Durulayıcı	73
2.11.4.1.	Bulanık Kümelerin Lamda Kesimleri	73
2.11.4.2.	Bulanık İlişkilerde Lamda Kesimleri	74
2.11.4.3.	Durulaştırma İşlemleri	75
3.	KURAL TABANLI BULANIK MODELLER	82
3.1.	Mamdani Bulanık Model:	82
3.1.1.	Mamdani Modelinin Bağıntısız Gösterimi:	84
3.1.2.	Max – Min (Mamdani) Çıkarımı :	86
3.1.3.	Çok Değişkenli Sistemler :	89
3.1.4.	Tekil (Singleton) Model :	91
3.2.	Takagi –Sugeno Modeli :	93
4.	PID TİPİ BULANIK MANTIK KONTROLÖRLER	97
4.1.	Bulanık Kontrolörlerin Analizi	98
4.2.	PID Tipi Kontrolörler	104
4.3.	Adaptif Parametre Metodu.....	108
5.	SİSTEMLERİN BULANIK MODELLENMESİ	113
5.1.	Bulanık Sistem Tanıma	113
5.2.	Bulanık Çıkarım Sistemleri	113
5.3.	Model Yapıları	114
5.4.	ANFİS	115
5.4.1.	Anfis Mimarisi :	116
5.4.2.	Hibrid Öğrenme Algoritması :	119
5.4.3.	Doğrusal Olmayan Bir Tank Sisteminin Anfis ile Modellenmesi	120
6.	GUNT RT512 Sıvı Seviye ÜNİTESİ	122
6.1.	GİRİŞ.....	122
6.2.	Sistemin Genel Yapısı	122
6.3.	Sistemin Teknik Özellikleri	123
6.4.	Sistemin Çalışması	124
6.5.	UDC5000 Kontrolör	125
6.6.	Önerilen Kontrol sistemi.....	125
6.7.	Sistem üzerinde yapılan değişiklikler.....	126
6.8.	Bilgisayar Yazılımı.....	127
7.	DENEYLER VE SONUÇLAR	128
7.1.	Simülasyon Sonuçları	128

7.2.	Tank Sisteminin Modellenmesi ve Kontrolü	134
7.3.	GUNT RT512 Sıvı Seviye Sisteminden Alınan Sonuçlar	140
8.	SONUÇ	142
	KAYNAKLAR	143
	EK: DELPHI PROGRAM KODU LİSTESİ	147
	ÖZGEÇMİŞ	



SİMGE LİSTESİ

\in	: elemanı olma
\cup	: Birleşim
\cap	: Kesişim
$<$: Büyüktür
\emptyset	: Boş küme
\subset	: Kapsar
\bar{A}	: A değil
$/$: Fark
Σ	: Toplam
Π	: Çarpım
abs	: Mutlak değer (absolute value)
\dot{x}	: 1. dereceden türev
\rightarrow	: Gerektirme
X	: Evrensel küme
R	: Gerçek sayılar kümesi
max	: Maksimum operatörü
min	: Minimum operatörü
\wedge	: Ve operatörü
\vee	: Veya operatörü
$\dot{u}(x)$: Üyelik fonksiyonu
EK	: En küçük
EB	: En büyük
λ	: Kesim seviyesi

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1.	Bitişik dikdörtgen gösterilim	15
Şekil 2.2.	Bitişik üçgen gösterim	15
Şekil 2.3.	Örtüşmeli üçgen gösterimi	16
Şekil 2.4.	Bulanık küme.....	17
Şekil 2.5.	Yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonları	17
Şekil 2.6.	Üyelik fonksiyonu kısımları	18
Şekil 2.7.	Bulanık kümeler, (a) normal, (b) normal olmayan.....	19
Şekil 2.8.	Bulanık kümeler, (a) dış bükey, (b) dış bükey olmayan	19
Şekil 2.9.	Dış bükey bulanık kümelerin kesişimi	20
Şekil 2.10.	Gauss (a) bulanık kümesi (b) dağılım fonksiyonu	21
Şekil 2.11.	Sıcaklık bulanık alt kümeleri.....	22
Şekil 2.12.	Birim dairede açısız bulanık kümeler.....	25
Şekil 2.13.	Klasik alt küme bileşimleri	26
Şekil 2.14.	A ve B bulanık küme birleşimleri	26
Şekil 2.15.	Klasik alt kümelerin kesişimi	28
Şekil 2.16.	A ve B bulanık küme kesişimleri	29
Şekil 2.17.	Bağdaşamayan klasik kümeler	30
Şekil 2.18.	Bağdaşamayan bulanık kümeler	30
Şekil 2.19.	İçerilen küme	32
Şekil 2.20.	İçerilen bulanık B kümesi	32
Şekil 2.21.	Tamamlayıcı klasik küme	34
Şekil 2.22.	Bulanık küme ve tamamlayıcısı	34
Şekil 2.23.	Çıkarılan kümeler	35
Şekil 2.24.	Çarpım kümesi	37
Şekil 2.25.	De Morgan kuralları için Venn diyagramı	41
Şekil 2.26.	Bulanık sayılar a) Üçgen, b) Yamuk	42
Şekil 2.27.	Bulanık sayı kesim seviyeleri	43
Şekil 2.28.	İki bulanık kümenin toplamı	44
Şekil 2.29.	Sagittal diyagramı	51
Şekil 2.30.	Üç uzayın öğelerinin Sagittal diyagramı.....	52
Şekil 2.31.	Üçlü zincir	53
Şekil 2.32.	Üyelik fonksiyonu daraltılması	65
Şekil 2.33.	Üyelik fonksiyonu genişletmesi	65
Şekil 2.34.	Üyelik fonksiyonu yoğunlaşması	66
Şekil 2.35.	Bir bulanık sistemin iç yapısı	71
Şekil 2.36.	Hassaslık (a) bulanık (b) klasik	72
Şekil 2.37.	İki bulanık kümenin (a) birleşimi, (b) kesişimi	76
Şekil 2.38.	Tipik bulanık küme çıktısı, (a) bulanık girdi ilk kısım, (b) bulanık girdi ikinci kısım, (c) ikisinin birleşimi	76
Şekil 2.39.	En büyük üyelik derecesi durulaştırması	77
Şekil 2.40.	Sentroid yöntemi ile durulaştırma	78
Şekil 2.41.	Ağırlıklı ortalama yöntemi ile durulaştırma.....	78
Şekil 2.42.	Ortalama en büyük üyelik durulaştırması	79
Şekil 2.43.	Toplamların merkezi durulaştırması.....	80
Şekil 2.44.	En büyük alan merkezi ile durulaştırma	80
Şekil 2.45.	İlk ve son en büyük üyelik dereceleri ile durulaştırma	81

Şekil 3.1.	Üyelik fonksiyonları	83
Şekil 3.2.	$R_1 R_2 R_3$ ve R bağıntılarının grafik gösterimleri.....	86
Şekil 3.3.	Mamdani çıkarımının şematik gösterilimi	88
Şekil 3.4.	Öncül uzayın farklı bölünüşü	90
Şekil 3.5.	İki kural tabanının kaskad bağlantısı	91
Şekil 3.6.	Üçgen veya yamuk üyelik fonksiyonu ile tekil model.....	92
Şekil 3.7.	Fonksiyon yaklaşımıcı olarak Takagi – Sugeno bulanık modeli.....	94
Şekil 4.1.	A_i ve B_j ye ait üyelik fonksiyonları.....	99
Şekil 4.2.	(e-e) düzlemine ait ağ yapısı	99
Şekil 4.3.	PI tipi bulanık kontrol sistemi	105
Şekil 4.4.	A_i ve B_j 'ye ait üyelik fonksiyonları	106
Şekil 4.5.	PID tipi bulanık kontrol sistemi	108
Şekil 4.6.	Bir kontrol sistemine ait basamak cevabının farklı fazları.....	109
Şekil 4.7.	Aşım gözlemleyicisi içeren Parametre Adaptif Bulanık Kontrolöre ait blok diyagramı	110
Şekil 4.8.	Fonksiyon optimizasyonu içeren Parametre Adaptif Bulanık Kontrolöre ait blok diyagramı.....	112
Şekil 5.1.	(a) iki giriş ve iki kurala sahip birinci dereceden Sugeno bulanık modeli (b) eşdeğer ANFİS mimarisi	116
Şekil 5.2.	İki giriş ve iki kurala sahip Sugeno bulanık modeli için farklı bir Anfis yapısı	118
Şekil 5.3.	(a) birinci mertebeden iki girişli 9 kurallı bir Sugeno bulanık modelinin Anfis eşdeğer mimarisi (b) 9 bulanık bölgeye ayrılmış 2 boyutlu giriş uzayı.....	119
Şekil 5.4.	Basit bir tank sistemi.....	120
Şekil 5.5.	Modellemeye ilişkin blok diyagram	121
Şekil-6.1.	Sistemin genel yapısı	122
Şekil-6.2.	GUNT Sıvı seviye ünitesinin ana panel görüntüsü.....	123
Şekil-6.3.	Sıvı seviye ünitesinin işlem diyagramı	124
Şekil 6.4.	UDC 5000 kontrolörün yapısı	125
Şekil-6.5.	Önerilen kontrol sistemin blok diyagramı.....	126
Şekil 6.6.	Tasarlanan kontrolörün temel blok diyagramı	126
Şekil 6.7.	Yazılımın ekran görüntüsü	127
Şekil 7.1.	PI tipi bulanık kontrol sisteminin basamak cevabı	129
Şekil 7.2.	PD ve PID tipi bulanık kontrol sistemlerine ait karşılaştırmalı basamak cevapları	130
Şekil 7.3.	PI ve PID tipi kontrol sistemlerine ait karşılaştırmalı basamak cevapları	130
Şekil 7.4.	Farklı katsayılar için adaptif mekanizma içeren sistemle içermeyen sistemin karşılaştırılması (1)	131
Şekil 7.5.	Farklı katsayılar için adaptif mekanizma içeren sistemle içermeyen sistemin karşılaştırılması (2)	132
Şekil 7.6.	Farklı katsayılar için adaptif mekanizma içeren sistemle içermeyen sistemin karşılaştırılması (3)	132
Şekil 7.7.	Farklı katsayılar için adaptif mekanizma içeren sistemle içermeyen sistemin karşılaştırılması (4)	133
Şekil 7.8.	Sistem tanıma için uygulanan giriş işareti	134
Şekil 7.9.	Giriş işareti aracılığıyla elde edilen çıkış işareti.....	135
Şekil 7.10.	T-S bulanık modele ait yüzey	135
Şekil 7.11.	Bulanık kuralların ; (a) $u(t-1)$ girişine ilişkin üyelik fonksiyonları,	136
	(b) $y(t-1)$ girişine ilişkin üyelik fonksiyonları.	136
Şekil 7.12.	Sistem ve sistem tanıma sonucu elde edilen Anfis modelinin giriş işaretine verdiği cevap	136
Şekil 7.13.	Sistemin ve sistem tanıma sonucu elde edilen bulanık sistemin karşılaştırmalı	

	basamak cevabı	137
Şekil 7.14.	Sistem ve sistem tanıma sonucu elde edilen bulanık model arasındaki hata ...	137
Şekil 7.15.	Anfis modelinin PID ve PAPID kontrole verdiği basamak cevabı	138
Şekil 7.16.	Anfis modeline ait blok diyagram	138
Şekil 7.17.	Sistemin matematiksel modeline ait blok diyagram	139
Şekil 7.18.	Sistemin matematiksel modelinin PID ve PAPID kontrole verdiği basamak cevap	139
Şekil 7.19.	Referans 30 cm için	140
Şekil 7.20.	Sıvı seviye sisteminin PID ile kontrolü.....	141



ÇİZELGE LİSTESİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Bulanık mantık ve kontrolün tarihsel gelişimi	11
Çizelge 3.1. Öncül üyelik fonksiyonları.....	85
Çizelge 3.2. Sonuç üyelik fonksiyonları.....	85
Çizelge 4.1. Bulanık kural tablosu	107
Çizelge 5.1. Hibrid öğrenme kuralının içerdiği yayılım prosedürü	120
Çizelge 7.1. Önerilen kontrol yöntemlerine ait sonuçların tablo halinde sunumu.....	134
Çizelge 7.2. Gerçek zamanda kontrole ait sonuçların tablo halinde sunumu	141



ÖNSÖZ

Batı zihniyetini şekillendiren, parametrelerini, doğru-yanlış cetvellerini tanzim eden, Eski Yunan. Demokritos'un kainatı atomlar ve boşluklardan ibaret. Eflatun'un dünyası keskin doğrular ve üçgenlerle dolu. Aristo, siyah - beyaz mantığın kanunlarını yazdı ve Aristo'yu izleyen kuşaklar, akli ve kainatı onun mantığı ve bilimsel eğilimleri doğrultusunda algılamaya devam ediyorlar. Çağdaş bilim, matematik, mantık ve kültür dünyanın ak – kara olduğu ve bu niteliğinin değişmezliği esasına dayalı. Ağzımızdan çıkan her hüküm doğru ya da yanlış. Her yasa, her yönetmelik, her kural kesin. Aristo mantığının ikili sisteminde “gökyüzü ya mavidir ya da mavi değildir.” “ Hem mavidir hem de değildir” olamaz. Böylece 2000 yıldır bir şey ya doğrudur ya da yanlış. Dijital bilgisayarların 0 / 1 sistemi... Bilim, siyah – beyaz dünya görüşünün zaferidir.

Aristo'dan ikiyüz yıl önce ise, Budha, kelimelerin ak – kara dünyasını deldi. Dili bir perde gibi düşünürsek, “gök mavidir” cümlesinin göğün rengarenk olan aslını örttüğünü görürüz. Budha bu perdeyi kaldırdı. Arkasındaki dünyanın çelişkilerle dolu olduğunu gördü. Hem mavi hem de mavi olmayan gökyüzü , Yin-Yang denklemi, Zeno paradoksu gibi ...

Giritli yalancı, bütün Giritlilerin yalancı olduğunu söylediğinde yalan söylemişse, yalan söylememiş, yalan söylememişse yalan söylemiş olur. Yani Giritli ya yalancı ya da değildir diyemeyiz fakat kolaylıkla hem yalancı hem de değildir diyebiliriz. Bertrand Russell, modern matematiğin temelinde Giritli yalancının ikileminin yattığını biliyordu.

Matematik kanunları, gerçeği yansıttığı sürece kesin değilse, kesin olduklarında da gerçeği yansıtmıyorlarsa, tanımlamak için yola çıktıkları sahici dünyaya uymuyorlarsa, buna karşın matematikçiler bir sözün hem doğru hem de yalan olduğu durumu, bu bulanık durumu, yok saymaktan başka bir şey yapamıyorlarsa, Freud'un da dediği gibi “Matematikçiler birer saplantılı nevroitik” midirler?

Heisenberg, 1920'lerin sonlarında, fizik kanunlarının ancak belirli bir yere kadar doğru olduğunu fakat hiçbir zaman yüzde yüz doğru olmadığını, kuantum mekaniğinde bazı şeylerin ilkesel olarak bilinemez olduğunu matematiksel olarak kanıtladı. Yani dünyaya dair olup da yüzde yüz doğru ya da yüzde yüz yanlış olduğu kanıtlanmış tek bir veri yoktur.

Kesin olan hiçbir şey yok. Atmosferi molekül molekül tanımlayabilseniz bile, onu yeryüzünden ayıran kesin çizgiyi bulamıyorsunuz. Aynı şekilde, Dünya'nın , Mars'ın ya da Ay'ın en ayrıntılı haritaları bile ovaların nerede bitip dağların nerede başladığını söyleyemiyor. İşaret parmağınızı oluşturan moleküllerin hangilerinin bedenimize ait olduğunu, hangilerinin havada yüzdüğünü saptayamayız. Tıptaki gelişmelere rağmen, ölü ile diri arasındaki çizgi kesin olarak çizilemiyor. Foton aynı anda hem dalga hem de parçacık gibi davranıyor ve asla bilemeyeceğimizi kesin olarak bildiğimiz şey, nasıl davranacağıdır.

Sendai Metrosu'nun bulanık kontrolör ile kontrol edilmesinden sonra Prof. Myron Tribus, bulanık mantık kullanılarak gerçekleşen her kontrolü olasılık yöntemiyle de gerçekleştirebileceğini açıklamıştır. Bizce de bu, olası bir durumdur fakat tamamen griliklerin hakim olduğu bir dünya için yeterli olamaz. Çünkü “Tanrı zar atmaz”. Evren rastlantısal değil. Evren, deterministik fakat bulanık. Kaos teorisi, determinizmi yakalamıştı. Bulanık mantık da her şeyin bir derece meselesi olduğunu kanıtladı. Bilim adamlarının yadsıdıkları bulanık düşünce, bilimin ta kendisi. Pür elementer matematik...

Maddi manevi beni desteklemekten nedense hiç vazgeçmeyen aileme, hep son dakikaya kalan çalışmalarına sabırla destek veren değerli hocam ve tez danışmanım Sayın Yrd. Doç. Dr. Şeref Naci Engin'e, kendilerinden aldığım dersler sayesinde tezimin şekillenmesinde ve gelişmesinde büyük rol oynayan değerli hocalarım Sayın Prof. Dr. Galip Cansever'e ve Sayın Doç. Dr. Tülay Yıldırım'a, tezimin simülasyon bazlı bir çalışma olarak kalmaması için Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi laboratuvarı imkanlarından faydalanmamı sağlayan hocam Sayın Prof. Dr. Halit Pastacı'ya, orada çalışırken her türlü kolaylığı tanıyan Sayın Prof. Dr. Burhanettin Can'a [MÜ] ve sistemle ilgili pek çok sorunu aşmamda ve programın yazılım aşamasında elinden gelen desteği esirgemeyen Arş. Gör. Erkan Kaplanoğlu'na [MÜ], dostluğu ve yol göstericiliğiyle bana hep destek olan arkadaşım Arş. Gör. Engin Yeşil'e [İTÜ], çalışma arkadaşlarıma, özellikle de gerek tez aşamasından önce gerekse sonra her anlamda yanımda olan, tüm çekilmezliğime rağmen beni hala sevebilen teknisyenimiz Sayın Fatma Bayın'a ve son olarak hayata dair bana hep farklı pencereler açan, düşünsel anlamda birlikte çok yol katettiğimiz (birbirimizi bazen bulandırarak, bazen çıkartımlar yaparak, bazen de durulayarak) kuzenim Erkan Batır'a teşekkür ederim.



ÖZET

Bir bulanık küme, matematiksel olarak, evrensel kümedeki her elemana onun bulanık kümeye olan üyeliğini temsil eden bir değer atayarak tanımlanır. Bu değer ne kadar büyük ya da ne kadar küçükse elemanlar, kümeye o kadar fazla ya da o kadar az aittirler. Bu üyelik değerleri 0 ve 1 kapalı aralığında değişen gerçel sayılarla temsil edilirler.

Bulanık kümeler veya bulanık mantık ve bunlarla ilişkili olan matematiksel yapıyı içeren, statik veya dinamik sistemlere "bulanık sistem" denir. EĞER-O HALDE bulanık kurallar kümesi bulanık modeli oluşturur. Bulanık modeller iki kategoride sınıflandırılabilirler: (1) E. H. Mamdani'nin ilk bulanık mantık kontrolörünü geliştirmesinden sonra adlandırılan, Mamdani bulanık modeli. (2) T. Takagi ve M. Sugeno tarafından 1985 yılında ilk defa öne sürülen, Takagi-Sugeno-Kang bulanık modeli. 90'lı yıllarda, hem araştırma çevrelerinden hem de endüstriden T-S bulanık modele karşı ilgi artmıştır. T-S bulanık modelin temel avantajlarından biri de, bir fonksiyona daha az kural ile yaklaşmasıdır.

Bu çalışmada bulanık kontrolörlerin giriş-çıkış davranışları incelenmiştir. Prensip parametresi zamanla değişen PD tipi kontrolörlerle aynı yapıda olduğu görülmüştür. PID kontrol teorisine göre bu kontrolörün performansını arttırmaya yönelik bir çalışma yapılmıştır. Tipi "0" olan sistemlerde PD tarzında bir kontrolörlerin sürekli hal hatasını önleyemediği, PI tipi kontrolörlerin ise bu hatayı elimine ettikleri gözlenmiştir. Bu nedenle her iki kontrolörün de avantajlarını birleştirecek PID tipi yeni bir kontrolör elde edilmiştir. Böylelikle sistem hızlı cevap verirken aşım azalmış, oturma zamanı kısalmıştır. Performansı daha da arttırabilmek için adaptif parametrelili bir kontrolör geliştirilmiştir. Daha sonra sistem ANFİS mimarisi ile modellenmiş ve sözü edilen kontrolörle kontrol edilmiştir. Gerçek zamanlı kontrolde ise GUNT RT512 sıvı seviye sistemi kontrol edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

Sistemlerin bilgisayar ortamında gerçekleşmesi esnasında PCWIN-MATLAB (V.5.3), Simulink ve Fuzzy Logic Toolbox kullanılmıştır. Gerçek zamanlı kontrol için Delphi 3.0 programlama dili kullanılmıştır.

Anahtar Kelimeler: PID tipi bulanık kontrolör, öz uyarılama, sıvı seviye sistemi kontrolü, anfis modelleme

ABSTRACT

A fuzzy set can be defined mathematically by assigning to each element in the universal set a value representing its grade of membership in the fuzzy set. Elements may belong in the fuzzy set to a greater or lesser degree as indicated by a larger or smaller membership grade. These membership grades are represented by real number values ranging in the closed interval between 0 and 1.

A static or dynamic system, which makes use of fuzzy sets or fuzzy logic and of the corresponding mathematical framework, is called a "fuzzy system". A set of IF -THEN fuzzy rules form a fuzzy model. Fuzzy models can be classified into two categories: (1) Mamdani model, which is named after E. H. Mamdani who developed first fuzzy logic controller using the model. Most fuzzy control systems developed in 80's use the Mamdani model. (2) Takagi - Sugeno - Kang (TS) model, which was first introduced by T. Takagi and M. Sugeno around 1985. The TS model has drawn much more attention in the 90's, both in the research community and in the industry. One of the main advantages of the TS model is that it can approximate a function using a fewer rules.

In this paper we have studied the input-output behaviour of the Fuzzy Controller. According to the conventional PID control theory, we worked for improve performance of the controller. It has been illustrated that the PD type fuzzy controller yields a steady-state error for the type 0 system, the PI type fuzzy controller can eliminate the steady-state error. We used a controller structure that combine the features of both PD type and PI type fuzzy controller, obtaining a PID type fuzzy controller which allows the control system to have a fast rise and a small overshoot as well as a short settling time. To improve further the performance of the PID type fuzzy controller we used a parameter adaptive fuzzy controller. Than system is modeled by ANFIS architecture and controlled using purposed controller. In real time control, we worked on GUNTRT 512 liquid level system and compared the results.

To form the system we used PCWIN-MATLAB (V.5.3), Simulink and Fuzzy Logic Toolbox. In realtime control we used Delphi 3.0 programming language.

Keywords: PID type fuzzy controller, self-tuning, liquid level system control, anfis modelling

1. GİRİŞ

1.1. Giriş

1965 yılında, Lofti A. Zadeh, “Bulanık Kümeler” adlı makalesini yayımlayarak bulanık mantığa ilişkin kuramı ortaya koymuştur. Zadeh, 1960’ların başlarında klasik kontrol teorisinin kesinliğe çok önem verdiğini, dolayısıyla karmaşık sistemlerin ele alınmasında zorluklar ortaya çıktığını düşünmekteydi. 1962’de yazdığı bir makalede, “Biyolojik sistemleri ele alabilmek için çok farklı bir matematik sisteme ihtiyacımız var; bu, olasılık dağılımlarıyla tanımlanamayan bulanık miktarlar matematiğidir” ifadesine yer vermiştir. 1960’larda bulanık kümeler teorisi tartışmaya yol açmış ancak pek de önemli bir çalışma yapılmamıştır. Zadeh, 1965’de bulanık kümeleri ortaya attıktan sonra 1968’de bulanık algoritmalar, 1970’de ise bulanık kontrol kavramını açıklayan bir makale yayımlamıştır. Bu makalede bulanık kontrolde, insan bilgisinin “Eğer – O Halde” kurallarıyla ifade edilmesi için dilsel değişkenler kavramını ortaya koymuştur.

Her insan günlük hayatında kesin olarak bilinemeyen, bazen de önceden sanki kesinmiş gibi düşünülen ama sonuçta kesinlik arz etmeyen durumlarla karşılaşır. Bu durumların örgün (sistemik) bir şekilde önceden planlanarak sayısal öngörülerinin yapılması ancak bir takım kabul ve varsayımlardan sonra mümkün olabilmektedir. Şimdiye kadar yapılan mühendislik araştırmalarında ve modellemelerinde bu varsayım, kabul ve kavramlara kesinlik kazandırmak için değişik çalışmalarda bulunulmuştur. Halbuki, büyük ölçeklerden küçük ölçeklere doğru gidildikçe incelenen olayların kesinlikten uzaklaşarak belirsizlikler içeren yönleri doğru gitmeleri söz konusudur. Mesela, çok uzakta bulunan bir cisme bakıldığında bunun nokta şeklinde algılanması onun boyutsuz ve şekilsiz olduğu sonucuna varmamıza sebep olabilir. Bu cisim bize yaklaştıkça bir boyutludan önce tepsi gibi iki, daha sonra da sanki adeta üç boyutlu hale dönüşür. Böylece boyutlar arasında kesin bir geçişten ziyade tedricen bir değişimin olduğuna akıl ile varılabilir. Zaten bu konuda Mandelbrot (1982) tarafından ilkeleri açıklanan kesirli (fractal) geometrisinde boyutlar ondalık sayıdır. Doğanın geometrisi denilen kesir geometrisi belirsiz ve gelişigüzel şekillerin incelenmesine yarar.

Gerçek dünya karmaşıktır. Bu karmaşıklık genel olarak belirsizlik ve kesin düşünce ve kararlar verilemeyişten kaynaklanır. Birçok sosyal, iktisadi ve teknik konularda insan düşüncelerinin tam anlamı ile olgunlaşmamış oluşundan dolayı belirsizlikler her zaman bulunur. İnsan tarafından geliştirilmiş olan bilgisayarlar, bu türlü belirsizlikleri işleyemezler; çalışmalarını için sayısal bilgiler gereklidir. Gerçek bir olayın tam olarak kavranılması insan

bilgisinin yetersizliği sonucunda tam anlamı ile mümkün olamadığından insan, düşünce sisteminde ve zihinde bu gibi olayları yaklaşık olarak canlandırarak yorumlar. Bilgisayarlardan farklı olarak insanın yaklaşık düşünce ve oldukça yetersiz, eksik ve belirsizlik içeren veri ve bilgi ile işlem yapabilme yeteneği vardır. Bu durumlar bilgisayarlarda bulunmaz. Genel olarak, değişik biçimlerde ortaya çıkan karmaşıklık ve belirsizlik gibi tam ve kesin olmayan bilgi kaynaklarına *Bulanık kaynaklar* adı verilir. Zadeh (1973), gerçek dünya sorunlarının ne kadar yakından incelenmeye alınır, çözümlerinin daha da bulanık hale geleceğini ifade etmiştir. Çünkü çok fazla olan bilgi kaynaklarının tümünü insan aynı anda ve etkileşimli olarak kavrayamaz ve bunlardan kesin sonuçlar çıkaramaz. Burada bilgi kaynaklarının temel ve kesin bilgilere ilave olarak, özellikle sözel olan bilgileri de ihtiva ettiği vurgulanmalıdır. İnsan sözel düşünen ve bildiklerini başkalarına sözel ifadelerle aktarabildiğine göre bu ifadelerin kesin olması söz konusu olamaz.

Bir sistem hakkında ne kadar fazla öğrenerek bilgi sahibi olursak, onu o kadar daha iyi anlayabiliriz ve onun hakkındaki karmaşıklıklar da o derece azalır, fakat tamamen yok olmaz. İncelenen sistemlerin karmaşıklığı ne kadar fazla ve yeterli miktarda veri bulunmazsa bulanıklık o kadar etkili olacaktır. Bu sistemlerin çözümlerinin araştırılmasında bulanık olan girdi ve çıktı bilgilerinden, bulanık mantık kurallarının kullanılması ile anlamlı ve yararlı çözüm çıkarımlarının yapılması yoluna gidilebilir.

Bulanıklık belirsizliğin bir ifadesi olarak karşımıza çıkar. Geçmişte, belirsizliklerin işlenmesi ve anlamlı sonuçlara varılabilmesi için olasılıklar teorisi kullanılmıştır. Matematik ve mühendislikte bu teori belirsizlik durumlarında istatistik yöntemlerle beraber kullanılır. Bu nedenle de, bütün belirsizliklerin rastgele karakterde olduğu kavramı yerleşmiştir. Rastgeleliğin en önemli özelliği, sonuçların ortaya çıkmasında tamamen şans olayının rol oynaması ve gerekli öngörülerin ve tahminlerin kesin bir doğrulukla önceden yapılamamasıdır. Ancak, bilinen belirsizliklerin hepsi rastgele karakterde değildir. Günlük hayatta karşılaşılan belirsizliklerin çoğunun rastgele olmadığı kolayca anlaşılabilir. Rastgele karakterde olmayan olaylarda, örneğin, sözel belirsizlikler halinde inceleme ve sonuç çıkarma işlemlerinde ihtimal teorisi ve istatistik gibi sayısal belirsizlikleri gerektiren yöntembilimler (metodolojiler) kullanılamaz.

Son on yıl içerisinde, bulanık kontrol, hem endüstriden hem de akademik çevreden büyük ilgi gördü. Birçok araştırmacı, bulanık kontrolörlere ilişkin teorik araştırmalara ve bu kontrolün

uygulama yöntemlerine çok fazla zaman harcadı. Artık günümüzde, bulanık kontrol, karmaşık kontrol sistemlerinin kontrolünde klasik kontrol tekniklerine bir alternatif olarak görülmektedir.

Bir sisteme ait nitel bilgilerden yararlanarak kontrolör tasarlamada en kullanışlı yaklaşım bulanık kontroldür. Matematik modelin zayıf ve uzman operatörlerin nitel bilgilerinin mevcut olduğu bir sistemde, bulanık kontrol bu nitel bilginin kullanımı için çok uygundur. Bulanık kontrol, insan bilgisini, ustalığını ve kontrol edilecek sistemin belirsizliğini birlikte ifade eder.

1.2. Amaç ve Kapsam

Bu tezin amacı, Takagi – Sugeno tabanlı Anfis (Adaptive Network Based Fuzzy Inference System) bulanık modelleme ve Mamdani tabanlı PID tipi bulanık kontrolör tasarımı ele alınmıştır. Buna göre konunun genel olarak sunulduğu giriş bölümünü takiben öncelikle;

İkinci bölümde; Bulanıklık Teorisi başlığı altında bulanık mantık, bulanık küme teorisi ve bulanık matematik anlatılmıştır.

Üçüncü bölümde; kural tabanlı bulanık sistem modellerine yer verilmiştir. (Mamdani, Singleton, Takagi – Sugeno Bulanık Modelleri).

Dördüncü bölümde; PID tipi bulanık kontrolörlere ilişkin kuramsal bilgiler verilmiş ve bu kontrolör yapısını iyileştirecek, öz uyarlamalı sistemler üzerinde durulmuştur. Bunlardan ilki aşım gözlemleyicisi (peak observer) içeren yapı diğeri ise ölçekleme faktörleri için uygun fonksiyonun optimizasyonuna yönelik yapıdır.

Beşinci bölümde; sistemlerin Anfis tabanlı bulanık modellenmesi yöntemi ele alınmıştır.

Altıncı bölümde; gerçek zamanda PID tipi bulanık kontrolün gerçekleştirileceği GUNT RT512 sıvı seviye sisteminin genel yapısı, çalışma prensibi ve teknik özellikleri verilmiştir.

Yedinci bölümde; bilgisayar ortamında PCWIN – MATLAB programı aracılığı ile gerçekleştirilen simülasyon bazlı çalışmaların ve deneysel çalışmanın sonuçları yer almaktadır.

Sekizinci bölüm ise; yapılan çalışmayla ilgili sonuçlar, yorumlar ve öneriler içermektedir.

2. BULANIKLIK TEORİSİ

2.1. Neden Bulanık Mantık?

Etrafımızda ilgimizi çeken birçok sorunun yorumlanmasında sayısal bilgidен ziyade kendi görüş, değer yargısı, takdir ve düşüncelerimizi sözel olarak ifade ederek olayları inceleriz. Bu ifadelerin anlamlı olmaları ve başkalarına iletilebilmesi için mutlaka her insanın en az bir tane dile (ana dil) ihtiyacı vardır. Dil ne kadar kesin olmayan kelime ve cümleleri ihtiva etse bile, insan iletişimde ve bilgi akışında en etkin vasıtaдır fakat dil içinde de belirsizlik içeren birçok kelime bulunmaktadır. Bunu anlamak için okuyucunun bir arkadaşı ile konuştuğu cümleleri yazarak içlerinde bulunabilecek belirsizlik ifade eden kelime ve cümlelere bakması yeterlidir. Örneğin, “hava sıcak” denildiğinde herkes hava kelimesinin günlük hayattaki kullanımını kesinlikle anlamaktadır ancak “sıcak” kelimesinin ifade ettiği anlam izafi (göreceli) olarak birbirinden farklı olabilir. Kutuplarda bulunan bir kişinin sıcak için 15 °C’yi algılamasına mukabil ekvator civarındaki bir kişi için bu 35 °C’yi bulabilir. Arada birçok kişinin görüşü olarak başka dereceler de bulunabilir. Böylece “sıcak” kelimesinin altında insanların ima ettiği sayısal anlayışın bir sonucu olarak belirsiz bir durum ortaya çıkar. Bu rastgele değildir, ancak belirsizdir. Bu şekilde kelimelerin kastettikleri belirsizliklere bulanıklık (fuzziness) denir. Burada hemen dikkat etmemiz gerekli bir nokta, sadece “sıcak” kelimesinin dahi ne kadar fazla bir sayısal dereceler topluluğunu temsil ettiğidir. İşte bu gibi topluluklara ileriki bölümlerde küme adı verilecektir. Bulanık kümenin ne olduğu belki şimdiden anlaşılmıştır. Bazı insanların sıcaklığı 15 °C, bazılarının ise 35 °C gibi oldukça farklı sayısal biçimde algılamasına karşılık, bu insanlar arasında bir ihtilaf bulunmaz. İşte bulanık mantığın üstünlüklerinden bir tanesi de budur. Ancak Aristo mantığı geçerli sayılacak olsa idi bu iki grup insan arasında sürekli anlaşmazlıklar bulunacaktı. Çünkü Aristo mantığında sıcak veya soğuk vardır ikisi arasına müsaade edilmez. Böylece bulanık mantığın sayılardan ziyade sözel kelimeleri esas aldığı da anlaşılmış olmaktadır. Bugün okuduğumuz herhangi bir kitap, dergi veya gazeteden birkaç sayfa alarak belirsizlik ifade eden kelimelerin altlarını çizerek, günlük hayatımızda ne kadar belirsiz (bulanık) kelimeler kullandığımızı görürüz.

Bulanık mantığın en geçerli olduğu iki durumdan biri, incelenen olayın çok karmaşık olması ve bununla ilgili yeterli bilginin bulunmaması durumunda kişilerin görüş ve değer yargılarına yer verilmesi, ikincisi ise insan muhakemesine, kavrayışlarına ve karar vermesine ihtiyaç gösteren hallerdir. Bulanık mantıktan, karşılaşılan her türlü sorunun karmaşık da olsa çözülebileceği anlamı çıkarılmamalıdır. Ancak, en azından insan düşüncelerinin incelenen

olayla ilgili olarak bazı sözel çıkarımlarda bulunması dolayısı ile en azından daha iyi anlaşılabilirdiği sonucuna varılabilir.

İnsanın fiziki olaylar hakkındaki bilgi ve yorumlarının çoğu, kişisel görüşleri şeklinde ortaya çıkar. Bu bakımdan insan düşüncesinde sayısal olmasa bile belirsizlik, faydalı bir bilgi kaynağıdır. İşte bu tür bilgi kaynaklarının, olayların incelenmesinde örgün bir biçimde kullanılmasına bulanık mantık ilkeleri yardımcı olacaktır. Mühendislik modellemelerinde, kesinlik kazanılmasına uğraşılması durumunda maliyetlerin artması ve zamanın uzaması söz konusudur. Çünkü maliyetle kesinlik (prezisyon) arasında doğru orantı bulunur. Ancak olayın bulanık mantık ile incelenmesinde araştırmacı veya mühendisin her şeyden önce yapacağı çıkarımların belirli tolerans sınırları içinde kalmasına önceden karar vermesi gerekir. Yüksek kesinlik sadece yüksek maliyetleri değil, aynı zamanda sorunun çözülmesinin çok karmaşıklaşmasına da sebep olur. Bu durumu açıklayabilmek için değişik şehirler arasında gezerek kazancını temin etmeye çalışan bir gezgin satıcıyı örnek alalım. Bu satıcı değişik şehirler arasındaki gezisini en iyilemeye çalışsın. Az sayıda şehir durumunda mümkün olan tüm seçeneklerin düşünülmesi ile en kısa mesafe sorunu kesin olarak çözülebilir. Halbuki, fazla sayıda şehir arasında gezme durumunda en kısa yolun tespit edilmesi günümüzde mevcut olan bilgisayar zamanının yetmeyeceği sınırlara ulaşır. Mesela, 100 tane şehir arasında gezme imkanı olması durumunda $100 \times 99 \times 98 \times \dots \times 2 \times 1$ yani aşağı yukarı 10^{200} tane yol bulunur. Dünya ömrünün 10^{17} saniye civarında olduğu düşünülürse bu sayıdaki gezme seçeneğinin dünya ömrü boyunca bile çözülemeyeceği sonucuna varılabilir.

Bir sorunun çözümlenmesine başlamadan önce, mühendis, toplayabildiği kadar sayısal ve/ya sözel verileri göz önünde tutarak çözüm için en uygun yöntem hakkında karar vermelidir. Bulanık yöntemlerin sözel verileri işlemekte etkin olduğu bir gerçektir. Günlük örneklerden bir tanesi, bir annenin çocuğuna fırına koyduğu keklerin pişmesi durumunda fırını kapatmasını söylemesi için ya sayısal olarak sıcaklığın hangi dereceye kadar devam etmesini veya daha basit olarak keklerin üstünün açık kahverengi olmaya başlaması halinde kapatmasını söyleyebilir. Bunlardan ikinci tür bilgi bulanıktır ve sayısal yönleri ima etmesine rağmen kesinlikle bilinmemektedir. Bu tür sözel bilginin, yani renk bilgisinin, birçok kişi tarafından tercih edileceği gerçektir. O halde böyle bilgileri bilgisayarlara tanıtılarak bulanık işlemlerin yapılmasını temin etmek yoluna gidilmelidir. İşte bu yoldaki en geçerli yöntem bilim (metodoloji) bulanık küme, mantık ve sistemlerdir. Yukarıdaki kek örneğinde,

sıcaklığın 60 °C olması gibi bir bilgiyi uygulamak oldukça zordur fakat keklerin piştiğini açık kahverengi rengin ifade etmesini çocuk bile anlar.

Yukarıda kısaca değinilen belirsizlik durumunun aslında doğal, sosyal, toplum ve fizik olayların hepsinde olduğu bugün insanlar tarafından bilimsel olarak anlaşılmıştır. Örneğin, matematik hesaplamaların sadece belirgin (deterministik) yöntemlerle çözümlenmesinin yetersiz olduğu nasıl 17.yüzyılda şans oyunlarının hesaplamalarının düşünülmesi ile anlaşıldı ise, daha sonraki yüzyıllarda bilimsel çalışmalar belirgin yönere gideceğine, belirsizlik yöntemlerinin gelişmesi ve hesaplamalara dahil edilmesi yönlerinde oluşmuştur. Sanayi devriminin 18. yüzyılda gerçekleşmesi ile elde edilen bilgi ve bilimsel sorgulamalar sonunda ortaya çıkan, mesela, termodinamik yani ısı iletimi olayının moleküler seviyede tamamen belirsizlik yöntemleri ile çözümlenebileceği anlaşılacak belirsizliğin bilimsel ölçütü olarak entropi kavramı karşımıza çıkmaktadır. Bunun kısaca anlamı, doğal ve fizik olayların sürekli olarak belirsizliklerinin arttığı ve asla azalmadığı yani düzensizliğe doğru bir gidişat olduğudur. Bir bakıma entropi belirsizlik ve düzensizliğin ölçüsüdür. Buradan anlaşılmalıdır ki belirsizliğin ve düzensizliğin arttığı bir dünyada doğal olarak bunları nesnel (objektif) biçimlerde kontrol edebilecek belirsizlik yöntemlerine önem verilmelidir.

Aslında günlük hayatta evdeki hesabın çarşıya uymaması da insanın belirsizlik ortamında yaşadığının bir kanıtıdır. Belirsizlik yöntemlerinin son yüzyılda daha da gelişerek ve gecikmiş olarak kullanılması, insanların belirsiz sıfatı olan yöntemlerin başlangıçta öğrenilmesinin, uygulanmasının ve sonuca gidildiği takdirde bulunan sonucun tam güvenilir olmamasının verdiği tereddüt nedeni ile olmuştur. Genel olarak, bir çok toplumda belirsizlik ilkelerine ve özellikle de ihtimal (olasılık) sıfatı taşıyan sözlere güven duyulmamıştır. Sonradan belirsizlik yöntemlerinin verdiği sonuçların daha genel olduğu, bunların ortalamalarının belirgin yöntemlerle bulunan sonuçları verdiği anlaşılmıştır. Böylece belirgin yöntemlerin verdikleri sonuca varıldıktan sonra, o sonucun etrafında ne kadarlık bir hata ile neticeye varılabileceğinin de hesaplanmasının mümkün olduğu nesnel bir matematik dil ile ifade edilebilmiştir.

Son yüzyıl içinde yapılan bilimsel devrimlerin hemen hepsi belirsizlik ilkelerini ve bunların sonucunda geliştirilen yöntemleri içermektedir. Örneğin, daha 20. yüzyılın başında fizikçiler bundan sonra fizikte yapılacak bir şey kalmadı, herşey belirlilik yöntemleri olan Newton ilke ve kanunları ile izah edilebilir diyerek bir genelleme yapmak istedikleri sırada molekül ve

atom altı yapılarla uğraşan fizikçilerin belirgin yöntemlerin bu olayları inceleyemeyeceği sonucuna varmaları, onlar arasında bir huzursuzluğa neden olmuştur. Takip eden yıllarda alışlagelmiş klasik, yani Newton fiziğini devrim yaparak yıkan *kuantum fiziği* ortaya çıkmıştır. Hele 1927 yılında Heisenberg isimli bir fizikçinin insanlık var oldukça aynı zamanda, konum ve hız ölçümünü hatasız olarak yapamayacağı genellemesi ile fizik belirgin ortamdaki belirsizlik ortamına, oradan da olasılık ve istatistik gibi belirsizlik yöntemlerinden yararlanan kuantum fiziği haline gelmiş ve bugünkü teknolojik patlamaya neden olmuştur.

İnsanların bütün tasarımlarında kullandıkları yaklaşık 2000 yıllık Öklid geometrisi 1970'li yıllarda yerini artık daha doğal olayların geometrisini yapabilen ve yine belirsizlik ilkelerinden doğan kesirli geometriye bırakmıştır. Öklid geometrisinde noktanın 0, doğrunun 1, yüzeyin 2 ve hacmin 3 boyutlu olduğu varsayılmıştır. Bu varsayımlar birer belirginlik örneğidir. Ancak kesirli geometrisinde belirsizlik için içine girerek incelenen her şeklin kesirli boyutlarının olabileceği ileri sürülmüştür. Mesela, çok girintili çıkıntılı olan Türkiye'nin Ege sahillerinin uzunluğunun 1 boyutunda değil, 1.32 küsurlu bir boyuta sahip olabileceği söylenir hale gelmiştir.

Belirgin fizik ve matematik kurallarının bir araya getirilmesi ile elde edilen madde, enerji ve momentumun korunumu ilkeleri ile akışkanlar mekaniğinde ve diğer akla gelen her türlü durumlarda geçerli olan diferansiyel denklemler elde edilmiştir. Aslında bunların çözülmesi ile incelenen olayın gelecek durumlarının tahminleri yapılır. Burada başlangıç ve sınır koşulları için girer. Diferansiyel denklemler çok ideal sınır ve başlangıç koşulları için analitik olarak çözülebilir. Büyük bir kısmının özellikle mühendislik gibi uygulamalı alanlarda kullanılması için çözümlerinde sayısal yöntemler kullanılır. Çözümlerinin belirgin olduğu sanılan bu diferansiyel denklemlerin, çözümlerinin asla kesin olmadığı ve kaotik yani belirsiz çözümler içerdiği son 30 yılda anlaşılmıştır. (Lorenz 1956) Kısacası diferansiyel denklemlerin çözümleri genel olarak acaip fraktal geometrik şekiller üzerinde olur ama noktasal olarak bunun nerede olacağı kestirilemez. Bunun için geliştirilen çözümlerinde olasılık ve istatistik gibi belirsizlik yöntemlerinden yararlanır.

Son 30 yıla kadar sürekli kullanılan belirgin mantık, ve özellikle de yine 2000 yıl kadar insanların basitçe kullandıkları Aristo mantığı, yerine belirsizlik içeren ve bugün Azeri asıllı Amerikalı bilim adamı Lütü Askerzadeh tarafından ortaya konan "fuzzy" veya Türkçe "bulanık" denilen bir mantık yapısı değişik teknolojilerde kullanılır hale gelmiştir.

Burada günlük konuşma dilinde geçen sözel belirsizlikleri de modelleme veya hesaplamalar yapılırken işin içine katması yolu seçilmiştir. Günümüz teknolojisinin çeşitli bulanık mantık uygulama alanlarına göz atılacak olursa, çimento fırını, otomatik tren işletimi, endüstriyel robotlar, gezgin robotlar, çelik dökümü, otomobil hız kontrolü, motor kontrolü, ABS frenler, otomatik vites, otomatik park etme, atık su arıtımı, içme suyu arıtımı, konumlandırma sistemleri (elektromekanik, pnömatik, hidrolik), asansör işletimi, vinç işletimi, çeşitli imalat işlemleri, seviye kontrolü, uçuş kontrolü, trafik geçiş kontrolü, ev aletleri (çamaşır ve bulaşık makineleri, elektrikli süpürge, buzdolabı), görüntü işleme, görüntü tanıma, otomatik karakter tanıma, kamera görüntü stabilizasyonu, otomatik karar verme gibi pek çok alanda karşımıza çıkmaktadır. Yapay zeka modelleme türü de, pek çok çalışmada son günlerde bulanık mantık yöntemlerinin de katılımı ile ilerleme kaydetmiştir.

Genellenecek olursa, bir çok işlem insanlarca çok kolay olarak yapılabilirken, otomatik hale getirilmeye çalışıldığında problemler ortaya çıkmaktadır. Böyle durumlar bulanık mantık kullanımı için idealdir. Çünkü bulanık mantıkta operatörün uzman bilgisi bir kural tabanı oluşturularak doğal bir şekilde kullanılabilir. İnsan bir kontrol organı olarak incelenirse, doğrusal olmayan ve zamanla değişen bir kontrolcü olduğu görülür. Aynı gözlem bulanık mantık kontrolcüsü için de geçerlidir. Son olarak, bulanık mantık kullanıldığında bulanık olmayan kontrol yaklaşımındaki analitik / deneysel modelleme işlemi kolaylaşır, kullanılacak bir performans ölçütünün analitik olarak belirlenmesi gerekmez.

Bütün yukarıda söylenenlerden sonra belirsizliğin her tarafa bulunduğu ve bunların nesnel olarak incelenmeleri için bazı teknik, yöntem, algoritma ve yaklaşımların alışıla gelmiş belirgin matematik (diferansiyel denklem, türev) dışında belirsizliği yakalayabilecek ve onu sayısallaştırabilecek kuralları olan bazı bilimsel yöntemlere ihtiyaç olduğu aşikardır. Bu türlü konular için geçerli olabilecek olasılık, istatistik, stokastik, fraktal, kaotik, pertürbasyon kuantum gibi değişik belirsizlik yöntemleri bulunmaktadır. Ancak bunların en eskisi ve diğerlerinin anlaşılması için gerekli olanı olasılık yöntemleridir. Bu yöntemler olayın incelenmesinde kuralcı, basitleştirici ve donuk kavramlar olması yerine daha dinamik, belirsiz ve verimli yaklaşım ve görüşlerle yardımcı olmaktadır.

2.2 Bulanık Mantığın Tarihçesi

Klasik Boole mantığında değişkenler sıfır-bir, açık-kapalı vs. şeklinde gösterilen iki değerden birini almak zorundadırlar. 1920'li yıllarda Polonyalı mantıkçı Jan Lucasiewicz değişkenlerinin sıfır ve bir dışında ara değerler de alabileceği çok değerli mantığın temellerini atmıştır. Max Blanck 1937'de Philosophy of Science dergisindeki makalesinde çok değerli mantığı nesne kümelerine uygulayarak ilk bulanık küme eğrilerini çizmiştir. Bu gelişmeler tarihsel sıra içinde daha önce yer almasına karşın bulanık mantık fikri yukarıda da bahsedildiği gibi 1965'de University of California at Berkeley'de Elektrik Mühendisliği Bölümünün başkanıyken Information and Control dergisinde Bulanık Kümeler adlı makalesi yayınlanan Lotfi Zadeh'e atfedilir. Fakat bu fikirler batı dünyasında şüphe ile karşılanmış ve oldukça yoğun tenkitler almıştır.

1970'lerde bulanık teori büyük gelişme göstermiş ve gerçek sistemler için bulanık kontrolörler yapılmaya başlanmıştır. 1975'de Madani ve Assilian bulanık kontrolörler için temel çerçeveyi oluşturmuşlar ve bir buhar makinası kontrol etmek için bulanık kontrolör kullanmışlardır. Böylece bulanık kontrolör gerçekleminin kolay olduğunu ve bu kontrolörün iyi de çalıştığını göstermişlerdir. 1978'de Holmblad ve Ostergaard büyük bir endüstriyel proses (çimento fırını) için ilk bulanık kontrolörü geliştirmişlerdir.

1980'lerde özellikle Japonya'da bulanık kontrol alanında önemli çalışmalar olmuştur. Yeni teknolojiye açık olan Japon mühendisler bulanık kontrol tasarımının kolaylığını ve pek çok problem için bu kontrolörün çok iyi çalıştığını görmüşlerdir. Bulanık kontrol, prosesin matematiksel modeline ihtiyaç duymadığı için geleneksel kontrol kuramının matematiksel model eksikliği nedeniyle yetersiz kaldığı pek çok sisteme kolaylıkla uygulanabilir. 1980'de Sugeno, Japonya'nın ilk bulanık uygulamasını geliştirmiştir. 1983'de komutların söylenmesiyle kontrol edilen bulanık robot (kendi kendine park eden araba) üzerindeki öncü çalışmasına başlamıştır. (Sugeno ve Nishida [1985]). 1980'lerin başında Hitachi'den Yasunobu ve Miyamoto, Sandai metrosu için bulanık kontrol sistemi geliştirmeye başlamışlardır. 1987'de projeyi bitirmiş ve dünyadaki en gelişmiş metroyu yapmışlardır. Metroda hızlanma, yavaşlama ve durma işlemleri bulanık sistemlerle kontrol edilmektedir. Bulanık kontrolün bu önemli uygulaması geniş yankı uyandırmıştır. 1988'de Yamachi Securities firmasının geliştirdiği bulanık temelli uzman sistem 1988 yılının Ekim ayında meydana gelen Kara Pazar adı verilen büyük çöküşü 18 gün önceden haber vermiştir. Bu

kadar başarılı uygulamanın ardından bulanık mantığa olan ilgi artmış, uluslararası bir çalışma zemini oluşturabilmek amacıyla 1989 yılında aralarında SGS-Thomson, Omron, Hitachi, NCR, IBM, Toshiba ve Matsushita gibi dünya devlerinin de bulunduğu 51 firma tarafından LIFE (Laboratory for International Fuzzy Engineering) laboratuvarları kurulmuştur.

Bulanık sistemlerin Japonya'daki başarısı ABD'deki ve Avrupa'daki araştırmacıları şaşırtmış ve pek ciddiye alınmayan bulanık kuramı önemsenmeye başlanmıştır. Şubat 1992'de San Diego'da Birinci IEEE Bulanık Sistemler Konferansı yapılmıştır ve bu olay bulanık kuramının, en büyük mühendislik kuruluşu olan IEEE tarafından kabul edilmesi anlamına gelmiştir. 1980'lerin sonlarında ve 1990'ların başlarında bulanık sistemler ve bulanık kontrol alanlarındaki gelişmeler devam etmiştir. Örneğin, üyelik fonksiyonlarının sistematik bir şekilde elde edilmesi için yapay sinir ağları teknikleri kullanılmaya başlanmıştır. Günümüzde Uzakdoğu ülkelerinde ABD ve Avrupa'ya nazaran daha fazla bulanık kuramı içeren araştırma ve geliştirme yapılmaktadır. Matsushita, Canon, Mitsubishi, Boeing, General Motors, Allen-Bradley, Chrysler gibi önemli firmalar ürünlerinde bulanık sistemlerden yararlanmaktadır.

Son on yıl içerisinde, bulanık kontrol, hem endüstriden hem de akademik çevreden büyük ilgi gördü. Birçok araştırmacı, bulanık kontrolörlere ilişkin teorik araştırmalara ve bu kontrolün uygulama yöntemlerine çok fazla zaman harcadı. Artık günümüzde, bulanık kontrol, karmaşık kontrol sistemlerinin kontrolünde klasik kontrol tekniklerine bir alternatif olarak görülmektedir.

Bir sisteme ait nitel bilgilerden yararlanarak kontrolör tasarlamada en kullanışlı yaklaşım bulanık kontroldür. Matematik modelin zayıf ve uzman operatörlerin nitel bilgilerinin mevcut olduğu bir sistemde, bulanık kontrol bu nitel bilginin kullanımı için çok uygundur. Bulanık kontrol, insan bilgisini, ustalığını ve kontrol edilecek sistemin belirsizliğini birlikte ifade eder.

Kontrolör tasarımında ilk adım, kontrol edilecek sistemin basitleştirilmiş bir modelidir. Böyle bir basitleştirilmiş model, Friedland (1996) tarafından tasarım modeli olarak adlandırılmıştır. Tasarım modeli, sistemin başlıca özelliklerini içermelidir. Çoğu kez, sistemi EĞER – O HALDE kurallarıyla dilsel şekilde ifade edebilecek bir uzman mevcuttur. Sisteme ait eldeki matematiksel ifadeleri ve dilsel verileri kullanarak bulanık sistem modeli elde edilebilir. Modellemeye bu türden bir yaklaşım Takagi ve Sugeno (1985) tarafından öne sürüldü.

Daha sonra ise bu yaklaşım Sugeno ve Kang (1988) tarafından geliştirildi. Bu türden bir modele, Takagi-Sugeno (T-S) veya Takagi-Sugeno-Kang (TSK) bulanık modeli denildi. Bu modelin ayrık zaman hali ise Tanaka ve Sugeno (1992) ve Tanaka (1995) tarafından ifade edilmiştir. Wang ve arkadaşları (1996), Cao ve arkadaşları (1996), ve Feng ve arkadaşları (1997), TSK bulanık modelini kullanarak doğrusal olmayan sistemleri kararlı kılan kontrolörler tasarlamışlardır. Tasarım yöntemi temelde basittir : doğrusal olmayan sistem T-S tipi bulanık model ile modellenir. Bu bulanık modelde farklı durum uzayı bölgelerindeki yerel dinamikler, doğrusal modeller ile ifade edilir. Sistemin toplam modeli ise bu doğrusal modellerin, doğrusal olmayan bulanık üyelik fonksiyonları aracılığıyla, bulanık harmanlanmasıyla elde edilir.

Çizelge 2.1. Bulanık Mantık ve Kontrolün Tarihsel Gelişimi

1965	Zadeh	Bulanık mantık
1972	Zadeh	Bulanık kontrolün gereği
1973	Zadeh	Linguistik yaklaşım
1974	Mamdani ve Assilian	Buhar makinası kontrolü
1976	Rutherford vd	Kontrol algoritmalarının analizi
1977	Ostergaard	Isı değiştirgeci ve çimento sanayii uygulaması
1977	Willaeys vd	Optimal bulanık kontrol
1979	Komolovvd	Otomasyon uygulaması
1980	Tong vd	Atık su iyileştirme işlemi
1980	Fukami vd	Bulanık karar mekanizması
1983	Hirota ve Pedrvez	İstatistiksel bulanık kümeler
1983	Takagi ve Sugeno	Bulanık kontrol kurallarının çıkarılması
1983	Yasunobu vd	Prediktif bulanık kontrol
1984	Sugeno ve Murakami	Model arabanın park etme kontrolü
1985	Kiszka vd	Bulanık dinamik sistemlerin kararlılığı
1985	Togai ve Watanabe	Bulanık entegre devre
1986	Yamakawa	Bulanık kontrol donanımı
1988	Dubois ve Prade	Tahmini karar verme
1988-	--	Bir çok uygulama, yeni bulanık kontrol yapılan, bulanık sistem tanıma, kararlılık performans analizi

2.3 Bulanık Kümeler ve Üyelik Dereceleri

Klasik mantıkta kümeler ve kümelere üyelik tanımlanırken sadece iki durumdan biri olabilir. Eleman ya kümeye aittir ya da değildir. Örneğin matematikteki tek sayılar kümesine baktığımızda 1 sayısı tek sayı olduğu için o kümeye aittir. Ama 2 sayısı çift sayı olduğu için tek sayılar kümesine ait değildir. Bu örnek tamamen matematiksel olduğu için küme üyeliğinin tam olarak bilinmediği bulanık mantık fikri burada fazla kullanışlı değildir. Fakat sayıların dünyasından ayrılıp gerçek dünyaya geçtiğimizde fiziksel olaylarla ilgili bilgimiz doğal olarak bir miktar hata içereceği için bulanık mantık fikrinin kullanışlılığı daha fazla hissedilebilir.

Klasik kümelerde üyelik dereceleri Aristo mantığına dayanarak sadece 1 veya 0 derecelerinden ibarettir. Bugün bilgisayarlar 0 ve 1 gibi ikili sayı tabanına göre işlemlerini gerçekleştirmekte ve kendi içinde çalışmayı yaptıktan sonra çözümü insanların anlayabileceği ondalık sayı sistemine dönüştürmektedir. Bu şekilde ikili seçeneği olan ve hepimiz tarafından düşünülmeden kabullenilmiş birçok olay vardır. Bunlar arasında siyah-beyaz, artı-eksi, zengin-fakir, sıcak-soğuk gibi birçok olay sıralayabiliriz. Bugün imal edilen arabalar % 100'ü Türk, Japon, Alman vb. ülke yapımı olmayışları karşısında böyle melez arabaları nasıl bir sayı ile temsil edeceğiz. Bu bakımdan Aristo mantığı esaslı klasik küme ve ona dayalı olarak geliştirilmiş her türlü matematik yöntemin gerçek dünya sorunlarının tam anlamıyla üstesinden gelemeyeceği sonucuna varırız. Diğer taraftan mühendis olmayan ve sadece edebiyatçı veya sosyal bilimci olan kişiler birçok gerçeği sözel olarak ifade edebilirler. Sözel bilgi ve gerçeklerin modellenmesi mantık, diferansiyel matematik ve diğer nümerik yöntemlerle yapılamaz.

Klasik kümelerde bir öğeden diğerine geçiş keskin ve aniden değişen üyelik dereceleri sayesinde olmaktadır. Ancak bulanık kümelerde bu geçiş yumuşak ve sürekli bir şekilde olmaktadır. Bu geçişte müphemlik, belirsizlik, hayal gücü, sezgi gibi görüşler rol oynar. Aslında üyelik derecesi fonksiyonu bu tür görüşlerin karışık bir şekilde öğelere yayılmasını temsil eder. Buradan bulanık kümenin değişik üyelik derecesinde öğeleri olan bir topluluk olduğu sonucuna varabiliriz. Ortaya çıkan önemli noktalardan biri de üyelik derecesinin klasik kümelerde 0 veya 1 olması gerekirken, bulanık kümelerde bütün üyelerin farklı üyelik dereceleriyle kümeye ait olmaları mümkündür. Ayrıca bir bulanık küme öğesi aynı değişken özelliğe sahip olmak üzere başka bir kümenin de öğesi olabilir. Örneğin bir yerde 30⁰ C sıcak

olarak kabul edilmesine karşılık, aynı derece nem miktarının artması sonucunda bunaltıcı sıcak olarak da kabul edilebilir.

Böylece öge değerleri ile üyelik dereceleri arasında birebir tekabuliyet vardır. Burada notasyon olarak bulanık kümeler altı çizili ve büyük harfler olarak ifade edilecektir. Mesela bir A bulanık kümesinin notasyonu \underline{A} 'dır. bulanık kümede yatay eksendeki gerçek sayıların herbiri düşey ekseninde 0 ile 1 arasında değişen üyelik derecelerine dönüştürülür. Böylece yatay eksenindeki bir gerçek sayı x ile gösterilirse bunun üyelik derecesi $\underline{u}(x)$ ile gösterilecektir. Üyelik derecesi 0 ile 1 arasında bir değer alır. Klasik bir X kümesinin elemanları:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots\}$$

Şeklinde gösterilirken bunun bulanık hali

$$\underline{X} = \left\{ \frac{\underline{u}(x_1)}{x_1} + \frac{\underline{u}(x_2)}{x_2} + \dots \right\} = \left\{ \sum \frac{\underline{u}(x_i)}{x_i} \right\}$$

Şeklinde gösterilir. Bulanık kümenin sürekli olması durumunda

$$\underline{X} = \left\{ \int \frac{\underline{u}(x_i)}{x_i} \right\}$$

Olur. Her iki notasyonda da bölüm işareti asla bölmeyi göstermez. Sadece alttaki gerçek sayıya yani küme ögesine üstteki üyelik derecesinin karşılık geldiğini belirtir. Yukarıdaki denklemlerin ilkinde toplam işareti de alışageldiğimiz toplamı değil, küme üyeleri topluluğunu ifade etmek içindir. İkinci denklemde integral işareti de asla bildiğimiz integral anlamına gelmez yine topluluk üyeleri arasındaki birlikteliğin sürekli olduğunu gösterir. “Sıcaklık” kelimesinin bulanık küme olarak gösterimi

$$\text{“Sıcaklık”} = \left\{ \frac{0.1}{18} + \frac{0.3}{20} + \frac{0.5}{22} + \frac{0.7}{24} + \frac{0.8}{26} + \frac{0.9}{28} + \frac{1.0}{30} \right\}$$

şeklinde olabilir.

Örneğin sıcaklık 20° C dendiği zaman kullanılan ölçüm yöntemine, kişinin hassasiyetine bağlı olarak sıcaklık aslında 20.1° C olabileceği gibi 25° C da olabilir. Görüldüğü gibi sıcaklığın 20° C olup olmadığı tam olarak bilinemez. Küşü genellikle en iyi tahminini yapar. Sıcaklığın 20° C olduğundan şu kadar (% 80, %40 vs.) eminim tipi ifadeler kişinin bu tahminini daha iyi yansıtır. Bu da bulanık küme fikrinin temelini oluşturur. Bulanık bir kümenin elemanı kümeye değişik yüzdelerle hem ait hem de ait olmayabilir. Bir çok konu hakkındaki tahmini bilgimiz bulanık mantık kullanacak şekilde gösterilir. Örnek olarak “hava sıcak” ve “hava sıcak değil” ifadelerini inceleyelim. Klasik mantıkta hava sıcak ifadesi doğruysa “hava sıcak değil” ifadesinin doğru olmasına imkan yoktur. Bulanık mantıkta iki ifade de doğru olabilir. Örneğin “hava sıcak” ifadesinin doğruluğundan %15 oranında emin olmamız mümkündür. Bu tip durumlar bulanık kümelerle gösterilir. Bulanık küme, küme elemanları ve bu elemanların kümeye dahil olma oranlarını gösteren bir üyelik fonksiyonundan oluşur. Yukarıdaki gösterime ek olarak “sıcak” ifadesi şu şekilde de gösterilebilir.

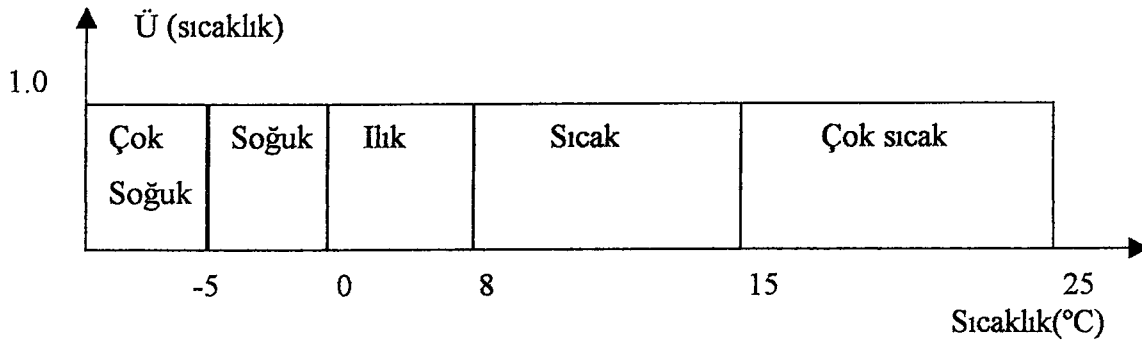
X: hava ısısı

S : “sıcak”

$$\underline{S} = \{(x, \underline{u}(x)): x \in (-10, 50)\}$$

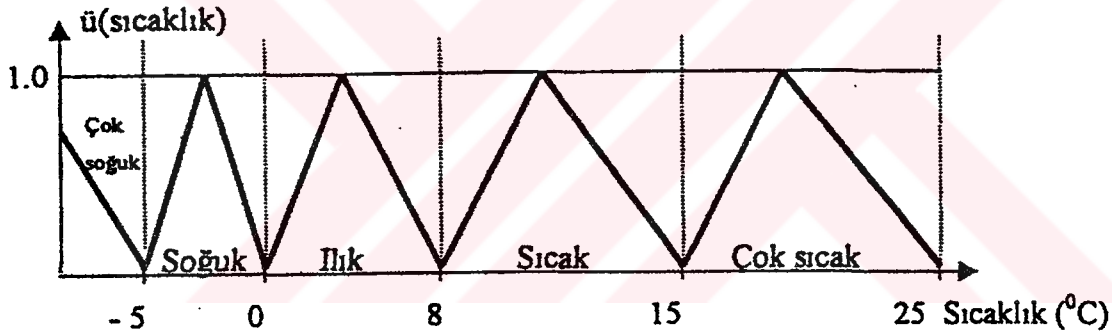
2.4 Üyelik Fonksiyonları

Göz önünde tutulan bir bulanık kelime veya ifadenin temsil ettiği sayısal aralık, o ifade hakkında bilgi sahibi olan kişiler tarafından belirlenebilir. Mesela, İstanbul’da sıcaklık derecesinin değişim aralığının aşağı-yukarı -5° C’den $+35^{\circ}$ C ye kadar olduğu söylenebilir. İşte bu aralık sıcaklık kümesinin İstanbul için öğelerinin bulunabileceği aralığı belirtir. Böylece tüm sıcaklık uzayı belirlenmiştir. Ancak, günlük konuşmalarda bu sıcaklık uzayının da bir takım alt aralıklardan oluştuğu düşünülür. Mesela, “çok soğuk” , “soğuk”, “ılık”, “sıcak”, “aşırı sıcak” gibi. Burada, önce herbir alt terimin aralığının ne olduğuna karar veriniz diye bir soru ile karşılaşırsa, belki mühendis olanlar bu alt kümelerin herbirinin üst üste örtüşmeyen ancak birbirinin sınırında devamlarıymış gibi olduklarını söyleyebilir. Mesela çok soğüğün -5° C’den ile 0° C, soğüğün 0° C ile $+8^{\circ}$ C ile $+15^{\circ}$ C’den , sığığın $+15^{\circ}$ C + 25° C’den , çok sığığın ise $+25^{\circ}$ C’den başladığını söylenebilir. Burada dikkat edilirse aralık tahminlerinde bulunmuş ve herbir alt aralıktan biri bitince diğeri başlamıştır (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Bitişik dikdörtgen gösterim

Bu aralıkların sınırlarında yine Aristo mantığına göre katı kararlar alınmalıdır. Örneğin, 7.9 °C'nin soğuk 8.1 °C'nin ise ılık olduğuna karar verilir. Bu şekilde gösterim bakımından önemli bir noktada, her alt aralığa düşen sıcaklık değerinin üyelik derecesinin sadece o aralıkta 1'e, diğer aralıklarda ise 0'a eşit olduğudur. Bu nedenle, her sıcaklık alt kelimesinin üyelik fonksiyonu yüksekliği 1'e eşit olan bir dikdörtgen şeklindedir.

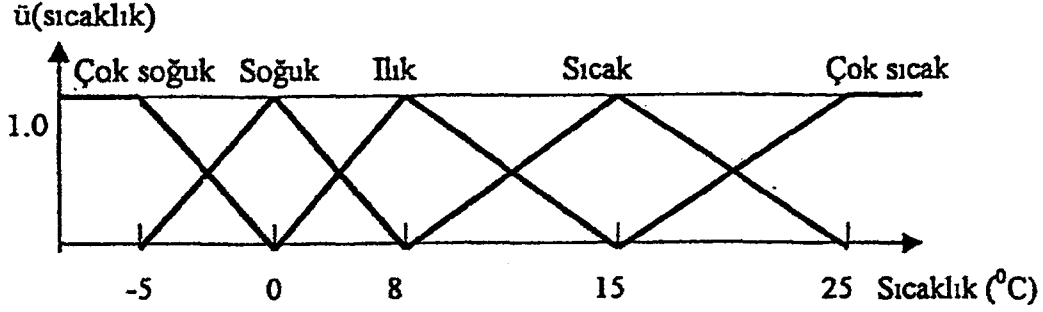


Şekil 2.2. Bitişik üçgen gösterim

Burada, yukarıdaki tartışmanın bir doğal sonucu olarak en basit üçgen üyelik fonksiyonları bitişik olarak alınmıştır. Bu üçgenlerin de sıcaklık alt kümelerini tam yansıtmadığı açıktır. Çünkü yine sınırlardaki sıcaklık değerlerinin üyelik dereceleri sıfır olarak alınmıştır. Ayrıca, bu sınır değerleri ne alttaki nede üstteki sıcaklık alt kümelerine dahildir. Böylece, sınır değerler için tam anlamı ile bir belirsizlik vardır. Diğer taraftan, Şekil 2.2'deki alt aralıklar halen Aristo mantığına göre işlem görür. Çünkü bir alt aralığa düşen sıcaklık değeri sadece o alt aralığa aittir ancak Şekil 2.1'den farklı olarak üyelik derecesi 1'e eşit değildir.

Ancak biraz daha makul düşünen birisi, bu aralıkların arasındaki geçiş kısımlarının böyle birbirinin devamı olmayacağını ve bir örtüşmenin söz konusu olabileceğini söylerse, daha mantıklı, günlük hayatta daha geçerli ve uzlaştırıcı çözümlere gitmiş olur. Çünkü herkesin ılık sınırlarının +5 ile +15 8.1 °C'de sıfır üyelik derecelerine sahip olacağını kabul etmesini

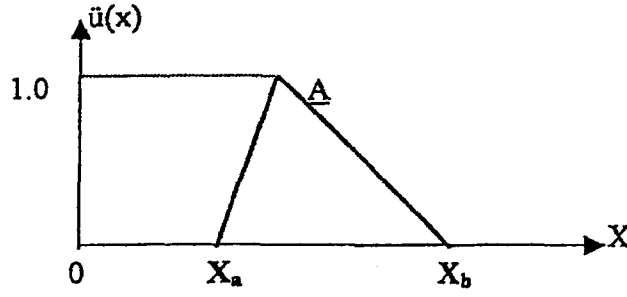
savunmak mümkün değildir. Halbuki, günlük hayatta sınıra yakın olan değerlerin hangi aralığa düşeceği oldukça müphem, şüpheli yani bulanıktır. Böylece sıcaklık alt aralıklarının birbiri ile örtüşmeli geçişlere sahip olmasının gerekliliği ile sonuçta Şekil 2.3'te verilen üyelik fonksiyonları karşımıza çıkar.



Şekil 2.3. Örtüşmeli üçgen gösterimi

Burada yukarıda söylenenlerden sonra ilk ve son alt aralıktaki sıcaklık durumlarının çok çok soğuğa veya çok çok sığağa doğru giderken başka alt aralıklar olmadığından üyelik derecelerinin 1'e eşit kalmasının makul olacağı anlaşılır. Bunun doğal bir sonucu olarakta, ilk ve son üyelik fonksiyonlarının üçgen değil de yamuk şeklinde olacağı sonucuna varılır. Böylece her alt aralığa girişimli olarak bir üyelik fonksiyonu şekli atanmıştır.

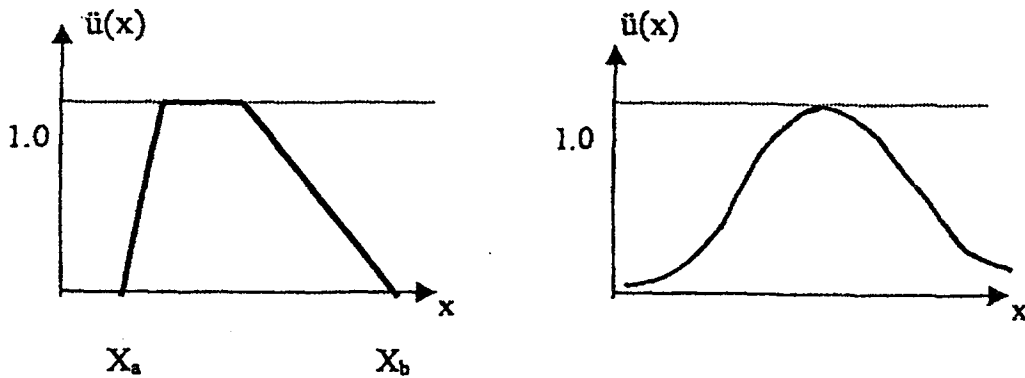
Burada sorun her alt aralığa, örneğin ılık aralığına, düşen sıcaklık derecelerinin hepsinin aynı önemde olup olmayacağıdır. Tabii olarak, ılık aralığının alt ve üst uçlarına yaklaştıkça onun komşusu olan altta soğuk üstte ise sıcak alt kümelerine doğru geçişler beklendiği için, o geçiş bölgelerine rastlayan kısımların tam anlamı ile ılık vasfına sahip olacağı söylenemez. Böylece, herbir alt aralığa düşen sıcaklık derecelerinin, o alt aralığın uçlarına yakın kısımlarında önemlerini ortaya kıyasla göreceli olarak kaybedeceği sonucuna, buradan da eğer bir alt aralıktaki önem derecesi diye bir değer düşünülecek olursa bunun en büyük değerlerinin o alt aralığın ortalarında, en düşük değerlerinin ise uçlarda olacağını söyleyebiliriz. Bu düşünceler bizi Şekil 2.4'de gösterilen bir geometrik gösterime sürükler. Genel olarak, her alt aralığın ayrık üyelik fonksiyonu Şekil 2.4'de gösterildiği gibi olur. Bu fonksiyonların simetrik olması gerekmez. Böylece X_a ve X_b gibi alt ve üst sınırlara sahip X değişkeninin bu aralıktaki her değerine ayrı bir üyelik derecesi, $\bar{u}(x)$, atanmış olur. Bu aralıktaki tüm X değerleri, o X değişkeninin bir alt kümesini teşkil eder.



Şekil 2.4. Bulanık küme

Genel olarak, küme üyelerinin değerleri ile değişiklik gösteren böyle bir eğriye **üyelik fonksiyonu (önem eğrisi)** adı verilir. Bunun en önemli özellikleri, alt küme sınırlarındaki değerlerinin orta öğelerinkine göre daha düşük olmasıdır. Ancak klasik kümelere bir benzerlik teşkil etmesi açısından en büyük önem derecesine sahip olan ortaya yakın öğelere 1 değeri atanırsa, diğerlerinin 0 ile 1 arasında ondalıklı ve sürekli bir değiştiği sonucuna varılır. İşte bu şekilde 0 ile 1 arasındaki değişimin, her bir öğe için değerine, **üyelik derecesi**, bunun bir alt küme içindeki değişimine ise **üyelik fonksiyonu** adı verilir. Böylece, üyelik fonksiyonu semsiyesi altında toplanan öğeler önem derecelerine göre birer üyelik derecesine sahiptir.

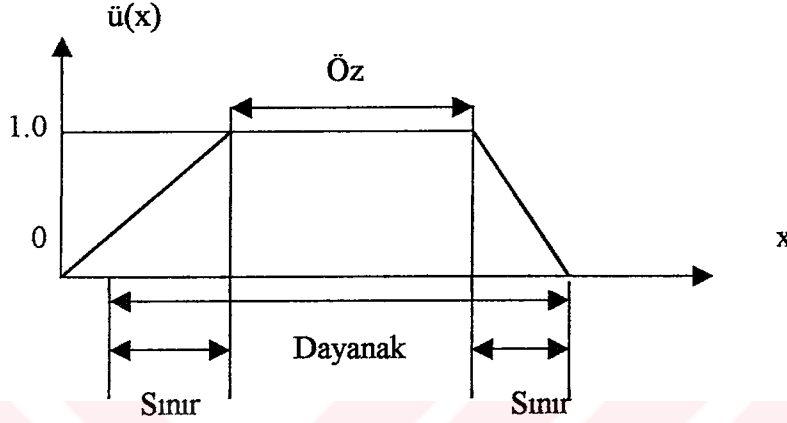
Bu kısmın kapatılmasından önce bizim matematik kurallarına uygun olarak düzgün şekilli üyelik fonksiyonlarının Şekil 2.4'de gösterilen üçgenden başka, yamuk veya çan eğrisi şeklinde olacağı aklımıza gelebilir (Şekil 2.5). Pratik uygulamalarda bunlardan üçgen en fazla, ondan sonra da yamuk olanı kullanılır.



Şekil 2.5. Yamuk ve çan eğrisi üyelik fonksiyonları

Üyelik Fonksiyonunun Kısımları

Yukarıda yapılan açıklamalardan, genel olarak bir üyelik fonksiyonunda bulunması gereken kısımlar hakkında fikirler oluşmuştur. Bunların, daha bilimsel tekminoloji olarak açıklaması aşağıda yapılacaktır. En genel hali ile, yamuk şeklindeki bir üyelik fonksiyonu Şekil 2.6'da gösterildiği gibi değişik kısımlara sahiptir.



Şekil 2.6. Üyelik fonksiyonu kısımları

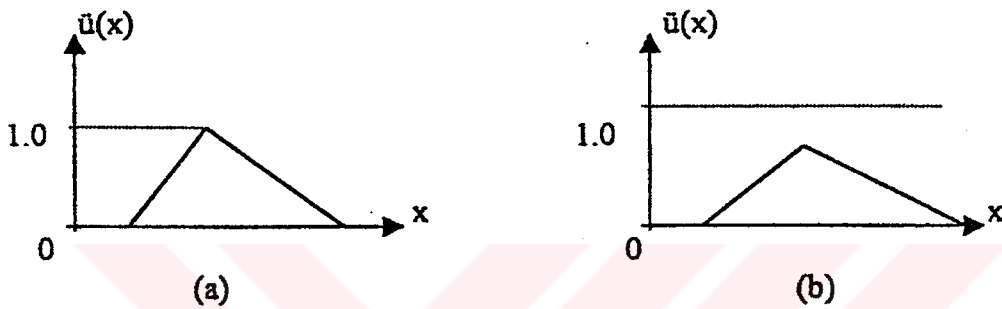
Buradaki gibi verilen bir bulanık alt kümede bir değil, birden fazla ögenin üyelik derecesi 1'e eşit alınabilir. Bu durumda, 1 üyelik dereceli ögelerin tam anlamı ile hiçbir şüphe getirmeden sadece o alt kümeye ait olduğu sonucuna varılır. Böyle üyelik derecesine sahip olan ögeler alt kümenin orta kısmında toplanmıştır. İşte üyelik dereceleri 1'e eşit olan ögelerin toplandığı alt küme kısmına, o alt kümenin **özü (core)** denir. Burada $\bar{u}(x) = 1$ 'dir. Üçgen şeklindeki üyelik fonksiyonunda bir tane ögenin üyelik derecesi 1'e eşit olduğundan, üçgen üyelik fonksiyonlarının özü bir nokta olarak karşımıza çıkar.

Bunun aksine bir alt kümenin tüm ögelerini içeren aralığa o alt kümenin **dayanağı (support)** adı verilir. Dayanakta bulunan her ögenin az veya çok değerde (0 ile 1 arasında) üyelik dereceleri vardır. Bunun matematik gösterilimi $\bar{u}(x) > 0$ 'dır. Aslında bu ögeler topluluğu önceki kısımda belirtilen aralığa karşı gelir.

Üyelik dereceleri 1'e veya 0'a eşit olmayan ögelerin oluşturduğu kısımlara üyelik fonksiyonunun **sınırları (boundary)** veya **geçiş bölgeleri** adı denilir. Bunun matematik tanımı $0 < \bar{u}(x) < 1$ şeklindedir. Bunlar alt kümenin kısmi ögeleridir. Aslında bir alt kümeye bulanıklık özelliğinin takılması bu geçiş yerlerinin bulunması sonucundadır. Genel olarak,

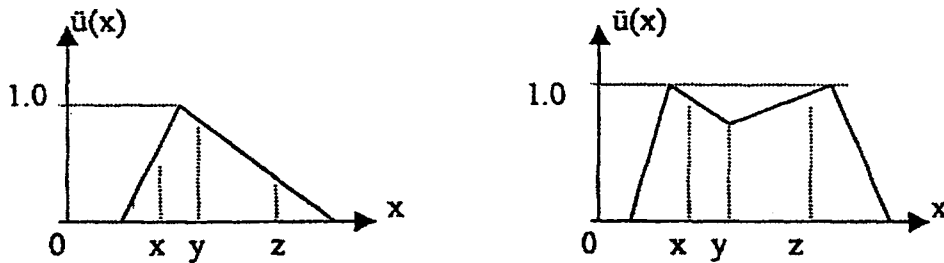
tüm üyelik fonksiyonlarında biri sağda diğeri de solda olmak üzere iki tane geçiş bölgesi vardır. Şekil 2.3'deki en sol ve en sağdaki bulanık kümelerde birer tane geçiş bölgesi vardır.

Yukarıda şekil olarak açıklanan bu üç özelliğe ilave olarak üyelik fonksiyonunun sahip olması gerekli olan iki tane daha özellik bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, bulanık kümenin **normal** olduğunu tespit etmemize yarayan bir kavramdır. Buna göre **normal bulanık** kümede, en azından bir tane üyelik derecesi 1'e eşit olan öge bulunmalıdır. Şekil 2.7 normal ve normal olmayan bulanık kümeleri göstermektedir.



Şekil 2.7. Bulanık kümeler, (a) normal, (b) normal olmayan

İkinci özellik ise bulanık kümenin **dış bükey (konveks)** olmasıdır. Dış bükey olan bulanık kümelerde üyelik fonksiyonu kümenin dayanağı üzerinde, ya sürekli artar veya sürekli azalır veya üçgen üyelik fonksiyonunda olduğu gibi önce sürekli olarak üyelik derecesi bir öğede 1'e eşit oluncaya kadar artar ondan sonraki dayanağa düşen öğeler için sürekli azalır. Bunun aksi durumlarda söz konusudur. Ancak, onlar bulanık kümelere üyelik fonksiyonu olamaz. Şekil 2.8'de dış bükey olan ve olmayan bulanık alt kümelere bazı örnekler gösterilmiştir.

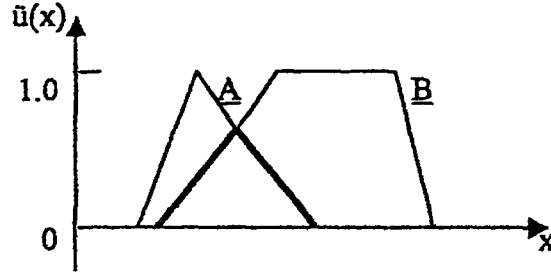


Şekil 2.8. Bulanık kümeler, (a) dış bükey, (b) dış bükey olmayan

Dış bükeyliğin matematik olarak tanımlanmasında, aynı bulanık alt kümeye düşen $x, < y < z$ gibi bir sıra bulunuyor ise, bunlardan ortadakinin üyelik fonksiyonu önceki ve sonrakine göre

$$\bar{u}(y) \geq EK [\bar{u}(x), \bar{u}(z)]$$

bağıntısı daima geçerli olmalıdır. Burada **EK** en küçükleme işlemi demektir. Yani y 'nin üyelik derecesi, x ve z 'nin üyelik derecelerinin en küçüğünden daha büyüktür. İşte bu durumda o kümeye **dış bükey** bulanık küme adı verilir.



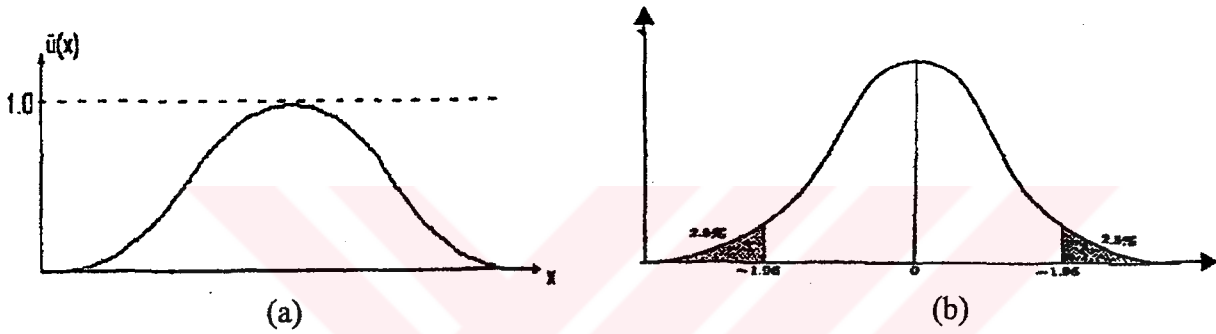
Şekil 2.9. Dış bükey bulanık kümelerin kesişimi

Bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarında üyelik derecesinin 0.5'e eşit olması durumundaki noktaya **geçiş noktası** (cross-over) adı verilir. Yani geçiş noktasında, $\bar{u}(x) = 0.5$ 'dir. Ayrıca, bulanık kümenin **yüksekliği** denilen bir büyüklük ise üyelik derecesinin en büyük olduğu öğelere karşı gelir. Yukarıda söylenenlerden sonra, normal bulanık kümelerde yüksekliğin 1'e eşit olması gerekliliği anlaşılır. Diğer bir ifade ile, yüksekliği 1'e eşit olmayan bulanık kümeler, normal olmadıklarından herhangi bir bulanık küme, mantık ve sistem çalışmasında kullanılamaz. Normal olmayan bulanık kümeleri normal hale dönüştürmek için, kümenin her bir üyelik derecesinin, en büyük üyelik derecesine bölünmesi gereklidir. Böylece normal olmayan bulanık kümelerin **dış bükey** olmaları şartı ile nasıl normal bulanık kümeler haline dönüştürüleceği anlaşılmış olur.

Temel bulanık kümeler normal ve dış bükey olmasına karşılık daha sonraki bölümlerde görüleceği üzere küme işleminin yapılması sonucunda elde edilen kümeler, bulanık normal küme çıkmayabilir. Örneğin, iki normal ve dış bükey bulanık alt kümenin **birleşimi** normal ve dış bükey olmayan bulanık küme çıkabilir (Şekil 2.9).

Üyelik fonksiyonları simetrik olabilir de olmayabilir de. Genel olarak, bir boyutlu uzayda tanımlanan bulanık kümelerin iki veya daha fazla boyutta, az da olsa tanımlanması mümkündür. Şimdiye kadar bu kitapta gösterilen tüm üyelik fonksiyonları bir boyutta tanımlanmıştır. Bir boyutlu uzayda çizgi şeklinde olan üyelik fonksiyonları iki boyutta yüzey şeklinde görülür.

Yukarıda söylenenlerden olasılık teorisi veya istatistikteki dağılım fonksiyonları hakkında bilgisi olanlar, üyelik fonksiyonunun sanki dağılım fonksiyonlarına benzediği sonucunu çıkarabilir. Dağılım fonksiyonlarında tepe noktasının 1'e eşit olması söz konusu değildir. Ancak histogram olarak dağılım fonksiyonunun altındaki alanın 1'e eşit olması gereklidir. Şekil 2.10'da Gauss eğrisi şeklinde dağılım ve üyelik fonksiyonları ayrı ayrı gösterilmiştir. Bunlardan bulanık kümeyi temsil eden Gauss eğrisinde üyelik fonksiyonunun tepe noktasının 1'e eşit olduğuna dikkat ediniz. Bu şekilde $f(x)$, x rastgele değişkeninin olasılık yoğunluk fonksiyonunu gösterir.



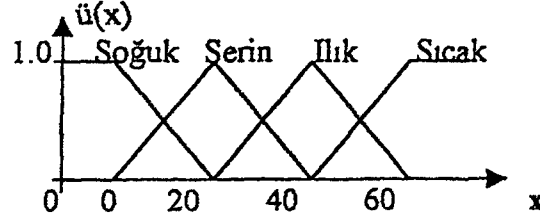
Şekil 2.10. Gauss (a) bulanık kümesi (b) dağılım fonksiyonu

2.5. Üyelik Derecesi Ataması

İhtimaller hesabından bilineceği gibi rastgele bir değişkene değişik ihtimal yoğunluk fonksiyonları uydurabileceğine benzer olarak, bulanık kümelerle daha da fazla şekilde üyelik fonksiyonu uydurmak mümkündür. Bulanık kümelerin gerek üyelik derecelerinin gerekse bunların tümünü temsil edebilecek üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde, ilk başlayanlar tarafından kişisel sezgi, mantık ve tecrübelerin kullanılmasına sıkça rastlanır. Zaten pratikte birçok sorunun üstesinden gelebilmek için bu yaklaşımlar çoğu zaman yeterlidir. Öyle olmasa bile, ilk yaklaşım olarak bu esaslara göre alınmaları faydalıdır. Üyelik fonksiyonlarının belirlenmesinde kullanılan diğer yöntemlerin tümü bu kitapta gösterilmeyecek kadar fazladır ve başlıcaları a) sezgi, b) çıkarım, c) mertebelenme, d) açılı bulanık kümeler, e) yapay sinir ağları, f) genetik algoritmalar, g) çıkarımcı muhakeme gibi değişik yaklaşımlardır.

Bunlardan sezgi fazlaca yöntem bilim bilgisi gerektirmemektedir. Zaten bu bölümün başlarında üyelik derecesi ve fonksiyonlarının sezgi ile elde edilmesi konusunda açıklamalar yapılmıştır (Şekil 2.1 – 2.4). Burada her kişinin kendi anlayış, görüş ve olaya bakışları önemli

rol oynar. Buna en basit örnek herkesin, hemen hergün karşı karşıya kalarak görüş ileriye sürdüğü sıcaklık kelimesinin belirttiği belirsiz alt kümeleri düşünebiliriz. En azından soğuk, serin, ılık ve sıcak gibi dört tane alt küme belirlenebilir. Bu alt kümelerin her biri belirli bir geometrik şekil ile Şekil 2.11’de görüldüğü gibi temsil edilebilir.



Şekil 2.11. Sıcaklık bulanık alt kümeleri

Bu geometrik şekillerin konumları doğal olarak, o yörede yaşayan kişilere göre değişir. Örneğin, kutuplarda yaşayan insanların soğuk kavramı ile tropikal bölgelerde yaşayanlarınki birbirinden oldukça farklıdır.

Çıkarım ile bulanık küme üyelik fonksiyonlarının bulunması için mutlaka incelenen olay hakkında bazı temel bilgilere sahip bulunmak gereklidir. Burada, literatürde sıkça bilinen bir örnek üzerinde durularak izah yapılacaktır. \tilde{U} 'yü üçgenler kümesi olarak düşünelim ve bir üçgenin **A**, **B** ve **C** iç açılarının toplamının 180° olduğunu biliyoruz. İşte bu bilgidен çıkarıma gideceğiz. Üçgenlerin yaklaşıklıkla eşkenar, **E**, İkizkenar, **İ**, dik açılı, **D**, dik açılı ve eşkenar, **DE** ve diğerleri, **Dİ** gibi alt kümelere ayırdığımızı düşünelim. Bunların her biri, üçgenler kümesinin bulanık alt kümelerini temsil eder. Sıra bu alt kümelerin her birine birer üyelik fonksiyonunun atanmasına geldiğinde, bilinen bilgilerden yararlanarak bazı üyelik fonksiyonu çıkarımlarının yapılmasına gidilebilir. Mesela, bulanık bir ikiz kenar üçgende $A > B > C > 0$ olmak üzere $A = B$ veya $B = C$ olması durumunda üyelik değerinin $\tilde{u}_E(x) = 1$ olacağı düşünülerek üyelik fonksiyonunun

$$\tilde{u}_j(A, B, C) = 1 - (1/60) \text{EK}(A - B, B - C)$$

olduğu bulunur. $A = 120^\circ$, $B = 60^\circ$ ve $C = 0$ ise $\tilde{u}_j(x) = 0$ olur. Halbuki bulanık bir dik üçgen için üyelik fonksiyonu

$$\tilde{u}_D(A, B, C) = 1 - (1/90) | A - 90^\circ |$$

şeklinde ifade edilir. Mesela, $A=90^\circ$ için dik üçgenin üyelik derecesi $\ddot{u}_D(x) = 1$, ve $A=180^\circ$ için ise $\ddot{u}_D(x) = 0$ 'dır. Diğer taraftan yaklaşık ikizkenar ve dik üçgen için, bulanık eşkenar üçgen ile bulanık dik üçgenlerin birleşimi olarak yukarıdaki iki üyelik fonksiyonundan en küçükleme (EK) ve en büyükleme (EB) işlemleri ile

$$\ddot{u}_i \cup_D(A,B,C) = EK[\ddot{u}_i(A,B,C), \ddot{u}_D(A,B,C)] = 1 - EB\left[(1/60^\circ)EK(A-B, B-C), (1/90^\circ)\left|A-90^\circ\right|\right]$$

olarak hesaplanabilir. Bulanık eşkenar üçgenin üyelik fonksiyonu ise

$$\ddot{u}_E(A,B,C) = 1 - (1/180^\circ)(A-B)$$

dir. $A=B=C$ olduğunda $\ddot{u}_E(A=B=C) = 1$ ancak $A=180^\circ$ olduğunda $\ddot{u}_E(A=180^\circ) = 0$ olur. Diğer üçgenlerin üyelik fonksiyonu ise yukarıdaki bulanık üçgenlerin üyelik fonksiyonlarının birleşiminin tamamlayıcısı olarak bulunur. Bunun sonucu

$$\begin{aligned} \ddot{u}_{DI}(A,B,C) &= EK\left[1 - \ddot{u}_i(A,B,C), 1 - \ddot{u}_e(A,B,C), 1 - \ddot{u}_D(A,B,C)\right] \\ &= (1/180^\circ)EK\left[3(A-B), 3(B-C), 2\left|A-90^\circ\right|, A-C\right] \end{aligned}$$

Üyelik fonksiyonu atamalarında mertebelenendirme yöntemi de kullanılır. Burada bir bulanık değişken hakkında anketler, soruşturmalar veya seçimler yapılarak üyelik derecelerinin atanmasına çalışılır. Her zaman, verilen iki seçenek arasındaki tercihler sayılır veya bu tercihlere verilen puanlandırmalarla işlemler görülür.

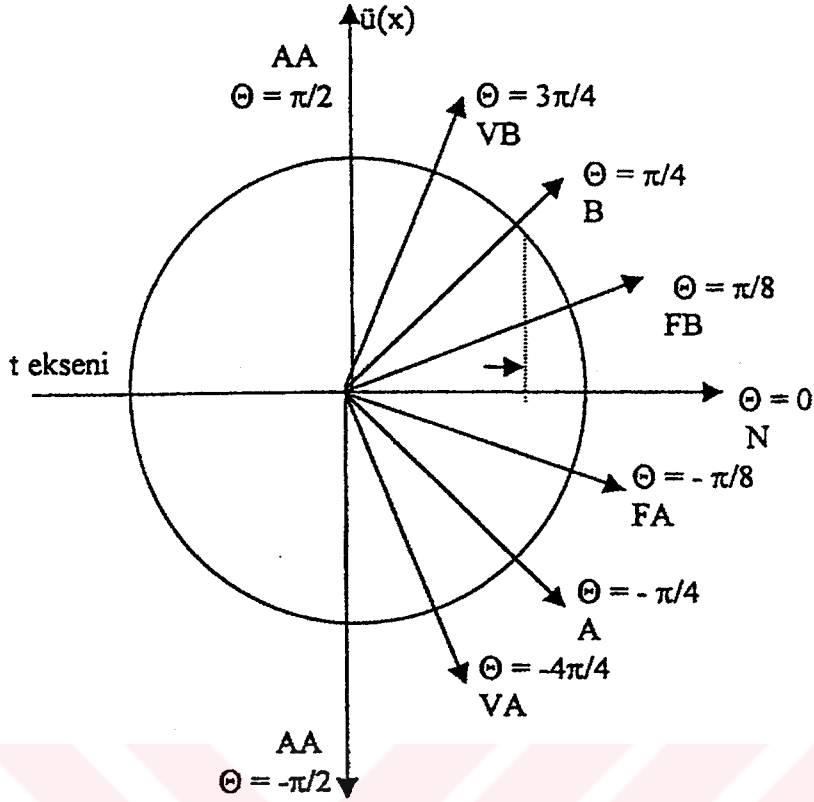
Bazı durumlarda, bulanık kümeler açışal üyelik derecelerinin atanması söz konusudur. Bunlar koordinat bakımından alışlagelmiş bulanık kümelerden farklıdır. Her 2π aralığında kendisini tekrarlar. Bunu izah etmek için, çevre mühendisliği ve su kalitesi çalışmalarında sıkça karşılaştığımız pH değerleri göz önünde tutulacaktır. Toplanmış olan su numunelerine pH okumaları yapılarak sözel "çok bazik", "oldukça asidik", vb. gibi vasıflar verilirse suyun kirliliği hakkında yorumlara gidilebilir. "Nötr" halinde, pH'nın 7'ye eşit

olduğu bilinmektedir. Açı ile sözel pH değerlerine öyle bir karşılık bulunabilir ki, mesela pH=7 yani “nötr” olması (N), açının $\Theta = 0$ radyan olması ile eşleştirilir. “Mutlak bazik” olması (MB) halinde $\Theta = \pi / 2$ radyan ve “mutlak asidik” (MA) durumunda da $\Theta = -\pi / 2$ alınabilir. Ayrıca temel bilgi olarak, pH'nın 14 ile 7 arasındaki değerlerin “çok bazik” (ÇB), “bazik” (B) “oldukça bazik” (OB) vs. olduğu grafik olarak $\Theta = \pi$ radyan ile $0 = \pi / 2$ radyan arasında bulanıklaştırılabilir. Benzer olarak 7 ile 0 arasındaki pH değerleri de “çok asidik” (ÇA), “asidik” (A), “oldukça asidik” (OA) vb. şekilde $\Theta = 0$ ile $\Theta = -\pi / 2$ arasında bulanıklaştırılabilir. Böylece Şekil 2.12’de gösterildiği gibi açısal bir bulanık küme kavramına varılarak sözel değişkenin Θ ile değişimi sağlanmış olur. Sözel değişkenin üyelik derecesi artık

$$\mu_t(\Theta) = t.\tan(\Theta)$$

Şeklinde t radyan yarıçapın yatay eksenindeki izdüşümü olarak düşünülme şartı ile sağlanmış olur. Açısal bulanık küme üyelik derecelerinin atanması yöntemi, değişkenlerin periyodik olması durumu ile karakteri icabı polar koordinatlarda gösterilen değişkenler için kullanılır.

Üyelik fonksiyonlarının atanması ile ilgili olarak özellikle yapay sinir ağları ve genetik algoritmalar gibi yöntemlerin kullanılmasına literatürde sıkça rastlanmaktadır. Ancak bunların izahı bu kitabın sınırları dışında mütalaa edildiğinden okuyucuya bu konular hakkında bilgi verilmemiştir.



Şekil 2.12. Birim dairede açısıl bulanık kümeler.

2.6. Bulanık Küme İşlemleri

2.6.1. Bulanık Küme Birleşmesi

İki veya daha fazla alt kümenin bir temel küme içinde ortak noktalarının bulunması durumunda kümelerin birbirleri ile veya mantığı ile bağlanması sonucunda temel kümenin alt kümelerin en az biri tarafından işgal edilen yerleri anlaşılır. Buradaki sözel işlem veya kelimesinin mantıksal anlamından gelir. Bunun matematik notasyon haline getirilmesi klasik kümeler için U , bulanık kümeler için ise V işareti ile olur. Mesela, A ve B gibi iki kümenin birleşimi

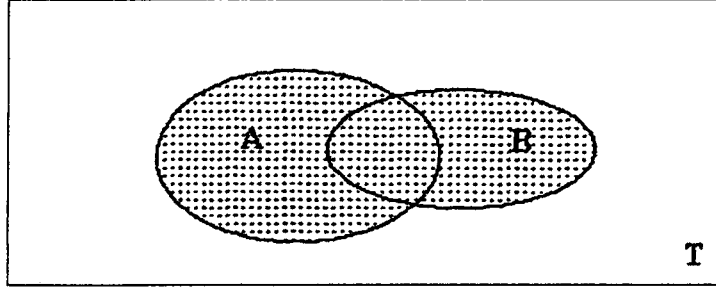
$$A \cup B$$

ve

bulanık alt kümeler \underline{A} ve \underline{B} halinde ise

$$\underline{A} \vee \underline{B}$$

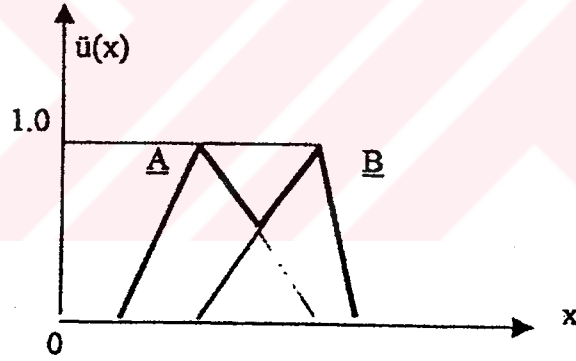
şeklinde ifade edilir. Buradaki U ve v işareti veya anlamına geldiği unutulmamalıdır. T temel kümesinde A ve B alt kümelerinin birleşmesi ile temsil ettikleri alan temsili olarak Şekil 2.13’de gösterilmiştir.



Şekil 2.13. Klasik alt küme bileşimleri

Bir temel kümenin içinde birleşen değişik alt kümeler, o temel kümenin sınırları aşamaz.

İki tane A ve B gibi bulanık alt kümenin birleşimi durumunda her bir kümeye ait öğenin A ve B ’deki üyelik derecelerinin en büyüğü (EB) alınarak Şekil 2.14’de gösterildiği gibi sonuç ortaya çıkar.



Şekil 2.14. A ve B bulanık küme birleşimleri

Kümelerin öğeleri cinsinden de birleşimleri yapılır. Önce klasik kümeler için buna bir örnek teşkil etmesi bakımından

$$A = \{a, b, c, e, h, i\}$$

ve

$$B = \{1, a, 3, z, b, x\}$$

Öğeleri iki alt kümenin birleşimi sonucunda yeni kümenin elemanları

$$A \cup B = \{a, 1, 3, b, c, e, h, i, z, x\}$$

olacağını veya kelimesinin anlamında görmek mümkündür. Burada dikkat edilecek husus, her iki kümede aynı öğenin bulunması halinde birleşik kümede o öğenin iki değil bir defa yazılmasıdır. Önceki örnekte, **a** öğesi **A** ve **B** kümelerinde bulunmaktadır. Alt kümelerin bu şekilde birleşmesi ile daha geniş kapsamlı başka bir alt küme elde edilir. Bulanık kümelerin öğeleri ile verilmesine örnek teşkil etmek üzere yukarıda verilen **A** ve **B** klasik kümelerinin öğelerini esas alan **A** ve **B** bulanık kümeleri

$$\underline{A} = \{0.1/a + 0.3/b + 0.9/c + 1.0/e + 0.6/h + 0.2/i\}$$

ve

$$\underline{B} = \{1.0/1 + 0.8/A + 0.6/3 + 0.4/z + 0.2/b + 0.1/x\}$$

olsun. Bunların birleşiminde klasik kümelerdeki gibi öğeler aynen alınır ama herbirine bir üyelik derecesi tesbit edilir.

$$\underline{A} \vee \underline{B} = \{0.8/a + 1.0/1 + 0.6/3 + 0.3/b + 0.9/c + 1.0/e + 0.6/h + 0.2/i + 0.4/z + 0.1/x\}$$

Burada bir öğe sadece **A** ve **B** bulanık kümelerinden bir tanesinde bulunuyorsa üyelik derecesi bulunduğu alt kümeden olduğu gibi alınır. Örneğin, **c**, **e**, **h**, **i**, **1**, **3**, **b** ve **x** öğeleri sadece **A** veya **B**'de bulunduğundan üyelik dereceleri doğrudan alınır. Halbuki, **a** ve **b** öğeleri hem **A** hemde **B** bulunduğundan; birleşik kümeler için bunların üyelik derecesi, buldukları iki bulanık kümedeki üyelik derecelerinin en büyüğü (EB) alınarak tesbit edilir. Buna göre **a** öğesi üyelik derecesi

$$\bar{u}(a) = EB [0.1, 0.8] = 0.8$$

ve **b** üyesinin üyelik derecesi

$$\bar{u}(b) = EB [0.3, 0.2] = 0.3$$

olarak bulunur. Sonuç olarak \underline{A} ve \underline{B} bulanık alt kümelerinde ortak bulunan bir öğesinin birleşiminin üyelik derecesi

$$\mu_{\underline{A} \vee \underline{B}}(x) = \max[\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(x)]$$

şeklinde yazılır.

Sözel olan veya birleştirilmesine, günlük konuşmalarda dikkat edilmelidir. Böylece ilgilenilen olayın alt olaylarının ortaya çıkarılması mümkün olur.

2.6.2 Bulanık Küme Kesişmesi

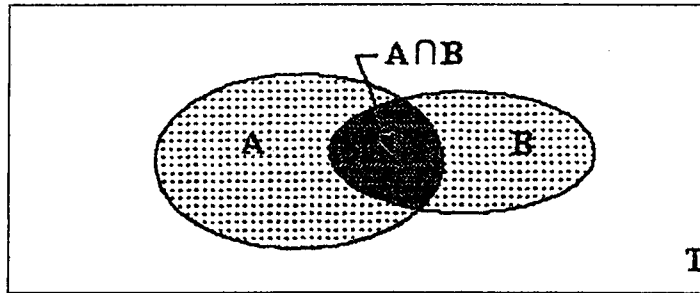
Öncekinden farklı bir işlem olarak iki alt kümenin ve ifadesi ile bir araya getirilmesi söz konusudur. Burada ve ifadesi göz önünde tutulan iki veya daha fazla alt kümelerde bulunan ortak öğelerin teşkil ettikleri küme anlaşılır. Böylece iki alt kümeden daha dar kapsamlı alt bir kümenin elde edileceği anlaşılır. Şekil 2.15'te A ve B gibi iki alt klasik kümenin kesişimini

$$A \cap B$$

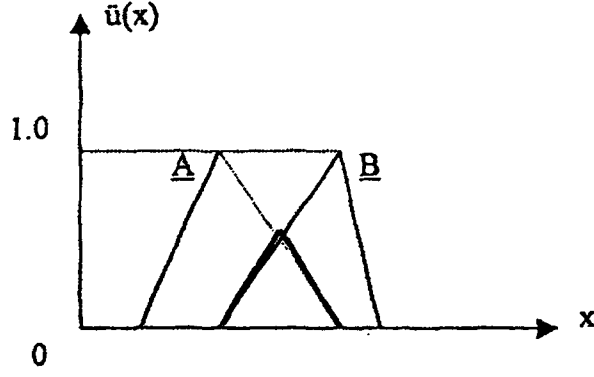
şeklinde bir notasyon ile \underline{A} ve \underline{B} gibi iki bulanık kümenin kesişiminde \wedge işareti kullanılarak

$$\underline{A} \wedge \underline{B}$$

şeklinde gösterilir. İki kümeye ait olan öğelerin üyelik derecelerinin en küçüklenmesi EK işlemi ile o öğenin kesişim kümesindeki üyelik derecesi bulunur. Bu tanıma göre Şekil 2.16 \underline{A} ve \underline{B} gibi iki bulanık alt kümesinin kesişimini gösterir.



Şekil 2.15. Klasik alt kümelerin kesişimi



Şekil 2.16. A ve B bulanık küme kesişimleri

Burada \cap ve \wedge işareti küme işlemi olarak sözel ve anlamına gelir ve kesişimi ifade eder. Önceki kısımda öğeleri ile verilen A ve B kümelerinin kesişimi sonucunda elde edilen yeni alt kümenin

$$A \cap B = \{a, b\}$$

gibi iki elemanın olduğu anlaşılır. Buradan kesişim işleminde iki alt kümenin birbiri ile ne kadarlık bir ortak noktasının veya alanının bulunduğu anlaşılır. Bu ortak alana düşen olasılıklar hem A hem de B olayını temsil eden alt kümeleri sağlar.

Yine önceki kısımda verilen A ve B bulanık alt kümelerinin kesişiminde klasik kümelerin aynısı öğeler bulunur. Ancak bunların herbiri, iki bunların bulanık alt kümede de bulunduğundan üyelik derecelerinin en küçüklenmesi (EK) gerekir. Bunun doğal sonucu olarak a ve b öğelerinin üyelik dereceleri sıra ile

$$\bar{u}(a) = EK [0.1, 0.8] = 0.1$$

ve

$$\bar{u}(b) = EK [0.3, 0.2] = 0.2$$

olarak bulunduğundan sonuç olan bulanık kesişim kümesi

$$\underline{A} \wedge \underline{B} = \{0.1/a + 0.2/b\}$$

Olur.

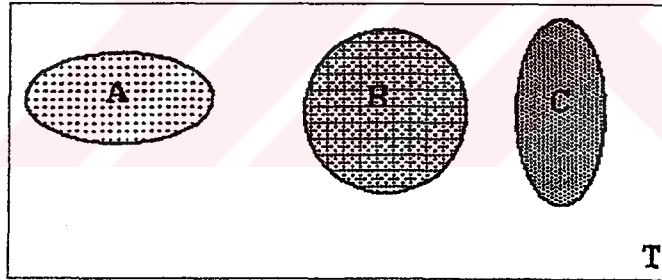
Genel olarak \underline{A} ve \underline{B} bulanık alt kümelerinde ortak bulunan bir ögenin kesişiminin üyelik derecesi

$$\underline{u}_{\underline{A} \wedge \underline{B}}(x) = \text{EK} [\underline{u}_{\underline{A}}(x), \underline{u}_{\underline{B}}(x)]$$

olarak yazılır.

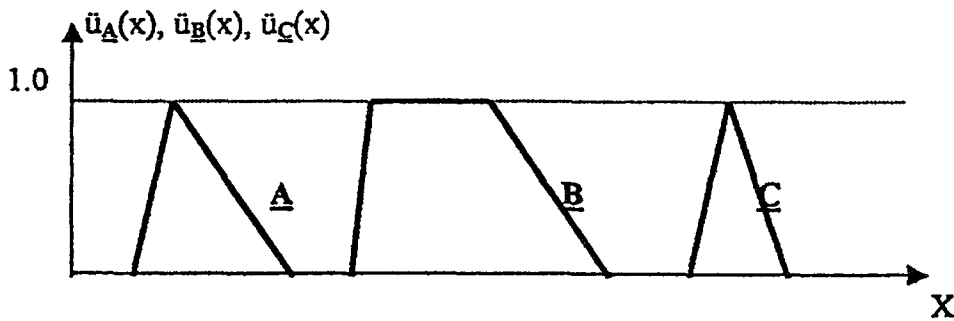
2.6.3. Bağdaşamayan kümeler

İki veya daha fazla kümenin hiç ortak ögesinin bulunmaması halinde bunlara **bağdaşamayan alt kümeler** adı verilir. Klasik kümeler halinde temel küme, dikdörtgen alanı içinde bağdaşamayan kümeler birbirinden tamamen ayırık yani ortak noktası bulunmayacak şekilde temsil edilirler. Şekil 2.17' daki A, B ve C kümeleri birbiri ile bağdaşamayan kümeleri gösterir.



Şekil 2.17. Bağdaşamayan klasik kümeler

Şekil 2.18'de ise A, B ve C gibi birbiri ile bağdaşamayan üç bulanık alt küme gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Bağdaşamayan bulanık kümeler

Yukarıdaki izahlardan bağdaşamayan alt kümelerin kesişmedikleri sonucuna varılır. Diğer bir ifade ile bağdaşamayan alt kümelerin ortak öğeleri yoktur. İşte böyle ögesi olmayan kümelere daha önce tanımlanan **boş küme** adı verilir. Buna göre Şekil 2.17 ve 2.18'den

$$A \cap B = \emptyset \text{ veya } \underline{A} \wedge \underline{B} = \emptyset$$

$$A \cap C = \emptyset \text{ veya } \underline{A} \wedge \underline{C} = \emptyset$$

Ve

$$B \cap C = \emptyset \text{ veya } \underline{B} \wedge \underline{C} = \emptyset$$

Boş kümeleri yazılabilir.

2.6.4. Bağımsız kümeler

Bağımlı alt kümeler birçok kişi tarafından sanki bağdaşamayan kümeler olarak algılanır. Bu tamamen yanlış bir anlaşılmalıdır. Bağımsız alt kümelerin ortak öğeleri bulunabilir. Mesela, A klasik (veya bulanık \underline{A}) alt kümesinde bulunan a gibi bir öğe B kümesinde (veya bulanık \underline{B}) bulunan bir ortak öğe olabilir, ama A'da bulunmasının olabirliği B'de bulunmasının olabirliğinden tamamen bağımsız ise, bu kümelere **bağımsız kümeler** denilir. Bağımsız kümelerin öğelerinin olabirlikleri diğer kümelerde aynı öğeler bulunsan bile birbirine etkisi söz konusu değildir. Bir kişi bilim adamları ve Fenerbahçeliler kümelerinde öğe olarak bulunabilir. Ancak onun bu kümelerden birinden çekilmesi diğerini etkilemez. Türkistan'ın başkenti Aşkabat ve İstanbul'un yağış miktarları yağış kümelerinde benzer olabirliklere sahip olabirler ama buralardaki yağışlar birbirini etkilemez. Bağımsızlık Venn diyagramı veya üyelik fonksiyonları ile gösterilemezler.

2.6.5. İçerilen kümeler

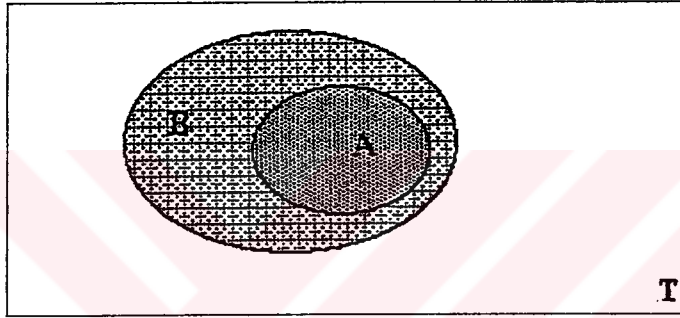
Günlük hayatımızda bazı kümelerin başka kümeler tarafından içerildiğini görürüz. Örneğin, bir üniversitede lisans öğrencileri tüm öğrenci kümesinin bir alt kümesidir. Benzer durum yüksek lisans ve doktora öğrencileri için de geçerlidir. A ve B iki klasik küme ise, eğer A kümesinin her öğesi B kümesinin de öğesi ise, A kümesi B kümesinin bir alt kümesidir. Kümeler arası alt kümelik bağlantısını

$$A \subseteq B$$

Şeklinde bir sembol ile ifade ederiz. Benzer durum bulanık kümeler içinde aşağıdaki gibi yazılabilir.

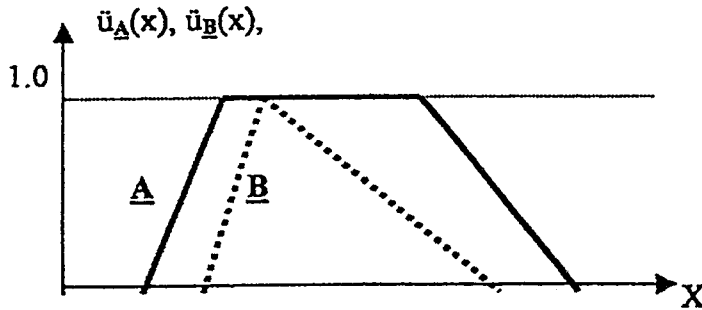
$$\underline{A} \subseteq \underline{B}$$

gibi. Buradan her kümenin kendisinin bir alt kümesi olduğu sonucunu çıkarabiliriz. Şekil 2.19'da Venn diyagramı ile böyle iki klasik kümenin durumu gösterilmiştir.



Şekil 2.19. İçerilen küme

Şekil 2.20'da ise B bulanık kümesinin A bulanık kümesi tarafından içerilmesi üyelik fonksiyonları gösterilmiştir.



Şekil 2.20. İçerilen bulanık B kümesi

Temel küme içindeki tüm A alt kümeleri için $A \subseteq T$ gösterimi geçerlidir. Alt küme kavramına göre $A \subseteq B$ ($\underline{A} \subseteq \underline{B}$) ve $B \subseteq A$ ($\underline{B} \subseteq \underline{A}$) ise bu takdirde A (\underline{A}) ve B (\underline{B}) kümelerinin birbirinin tıpa tıp aynı oldukları çıkarımı yapılabilir. Bunlara eşit kümeler adı verilir ve

$$A = B \text{ veya } \underline{A} = \underline{B}$$

Şeklinde gösterilir. A kümesinin B'ye benzemediğini yani eşit olmadığını da

$$A \neq B \text{ veya } \underline{A} \neq \underline{B}$$

denklemleri ile gösterebiliriz. Buradan, eğer $A \subseteq B$ ($\underline{A} \subseteq \underline{B}$) ve $A \neq B$ ($\underline{A} \neq \underline{B}$) ise buna göre B en azından A'da olmayan bir öğeye sahiptir. Bu durumda A (\underline{A})'ya B (\underline{B}) nin düzgün alt kümesi denir ve

$$A \subset B \text{ veya } \underline{A} \subset \underline{B}$$

olarak gösterilir. Son olarak her alt küme temel küme ile boş küme arasında bulunur

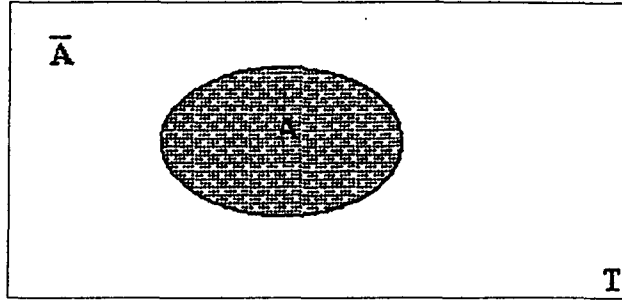
$$\emptyset \subseteq \underline{A} \subseteq T \text{ veya } \emptyset \subseteq \underline{A} \subseteq T$$

2.6.6. Tamamlayıcı kümeler (değillenme)

Bir temel T kümesinin alt kümesi olan A klasik kümesinin tamamlayıcı kümesi A'nın öğelerinin dışında bulunan temel kümenin tüm öğelerini içerek küme olarak tanımlanır ve \overline{A} simgesi ile gösterilir. Bir tamamlayıcı kümenin elde edilmesinde kullanılan sözel kelime "değil" ifadesidir. Tanım olarak "A değil" kümesi A kümesinin tamamlayıcısı ile aynı anlama gelir. Yani

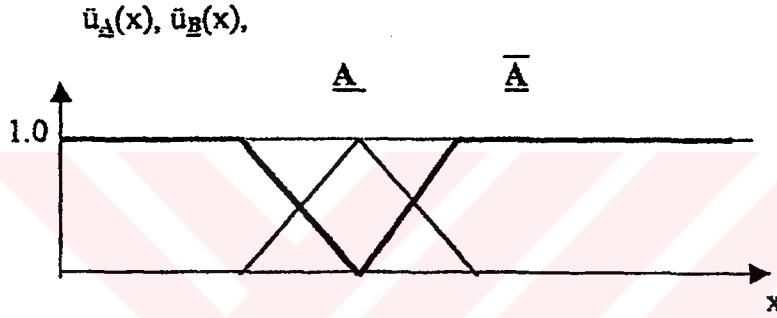
$$\overline{\overline{A}} = A \text{ değil}$$

dir. Bu üç kümenin (T,A,A) durumu Şekil 2.21'deki Venn diyagramında gösterilmiştir. Buradan, bir klasik küme ile onun tamamlayıcısının temel kümeyle bağdaşmayan iki kısma bölüğü anlaşılır.



Şekil 2.21. Tamamlayıcı klasik küme

Diğer taraftan, bir A bulanık kümesinin değil ifadesi ile bulunan tamamlayıcısı \underline{A} ile beraber üyelik fonksiyonları ile gösterimi Şekil 2.22’de verilmiştir.



Şekil 2.22. Bulanık küme ve tamamlayıcısı

Genel olarak, bulanık bir A alt kümesinin tamamlayıcısını (\underline{A}) bulmak için A kümesi öğelerinin üyelik dereceleri 1’den çıkarılmalıdır. Böylece,

$$\underline{u}_{\underline{A}}(x) = 1 - u_A(x)$$

Yazılabilir. O halde tamamlayıcı kümenin tamamlayıcısı o kümenin kendisidir. Yani

$$\overline{\overline{A}} = A \quad \text{veya} \quad \overline{\underline{A}} = \underline{A}$$

dir. Boş kümenin tamamlayıcısı temel kümedir. Bunun anlamı

$$\overline{\emptyset} = T$$

dir. O halde bir klasik küme tamamlayıcısı ile bağdaşmaz.

$$A \cap \bar{A} = \emptyset$$

Aynı durum bulanık küme için geçerli değildir.

$$\underline{A} \cap \bar{\underline{A}} \neq \emptyset$$

Sadece iki klasik kümenin birleşmesi sonucunda temel küme elde edilir. Bu durum bulanık kümeler için geçerli olamaz.

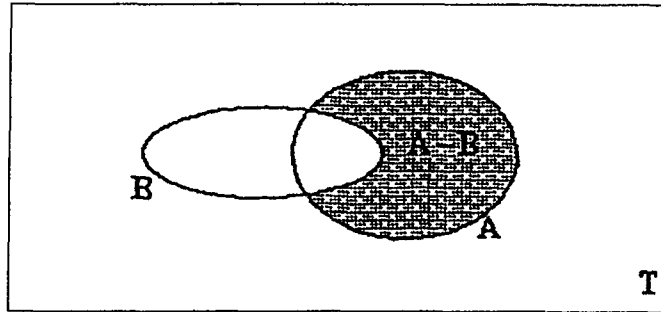
$$\bar{\bar{A}} \cup A = T$$

2.6.7 Çıkarılan kümeler

A klasik kümesinden B kümesinin çıkarılması ile elde edilen kümede, A'ya ait olan ama B'nin ögesi olmayan öğeler bulunur. İki küme arasındaki çıkarma işlemi $A-B$ şeklinde yazılır ve bunun öğeler cinsinden açık yazımı ise

$$A-B = \{x \mid x \in A \text{ and } x \notin B\}$$

dir. Burada dikkat edilmesi gereken nokta cebir veya matematik hesaplamalardaki gibi $A-B = B-A$ eşitliği geçersizdir. Bunun Venn diyagramında gösterilmesi Şekil 2.23'deki gibidir. Burada $A-B$ kümesi taralı olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.23. Çıkarılan kümeler

Yukarıda söylenenlerden temel kümeden onun bir alt kümesinin çıkartılması ile o alt kümenin tamamlayıcısının bulunmasına eşdeğer olduğu anlaşılır. Ancak, bu bulanık kümeler için

geçerli değildir. Klasik kümeler için $T-A = \bar{A}$ 'dir. Ancak $A-T = \emptyset$ olur. Daha genel olarak eğer $A \subseteq B$ ise $A - B = \emptyset$ dir.

2.6.8 Çarpım Kümeleri

Her bir alt kümenin temsil ettiği olabirliklik uzayının başka bir alt küme düşünülmesi durumunda onunla birlikte Kartezyen koordinat takımında temsil edecekleri uzayın belirlenmesi için alt küme öğelerinin tüm olabirliklikleri içerecek şekilde eşleştirilmesi sonucunda elde edilen yeni alt kümeye çarpım kümesi adı verilir. Çarpım alt kümesi öğeleri olarak farklı alt kümelerin mümkün olabilecek ve tekrarlanamayan bütün eşleştirmelerini birer alt küme olarak içerir. Böylece alt küme öğelerinin iki alt küme çarpımı halinde iki öğeli, üç alt küme çarpımı halinde üç öğeli, vb., alt kümelere ortaya çıktığı anlaşılır. Meseleyi daha iyi açıklayabilmek için

$$A = \{ a, b, c \}$$

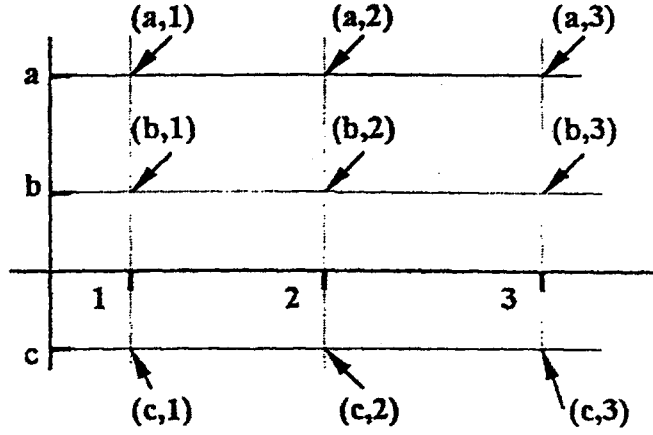
Ve

$$B = \{ 1, 2, 3 \}$$

gibi herbiri 3 öğeli iki alt küme düşünelim. Şekil 2.24'de düşey ekseninde harfler yatay ekseninde de B kümesinin öğelerini gösterirsek bunların eşleşmesi ile ortaya çıkan C çarpım alt kümesi

$$C = A \times B = \{ (a,1) (a,2) (a,3) (b,1) (b,2) (b,3) (c,1) (c,2) (c,3) (d,1) (d,2) (d,3) \}$$

Elde edilir ve burada $3 \times 3 = 9$ tane eşleşmiş alt küme öğesi bulunur.



Şekil 2.24. Çarpım kümesi

Bu kavramın 3 veya daha fazla alt kümenin çarpılması durumuna genişletilmesi mümkündür. Böylece çarpım kümesinde çarpan olarak giren alt kümelerin her birinin diğeri ile eşleşmesi sonunda çıkan öğeler benzer şekilde bulunmalıdır. Bulunan çarpım kümesi de çarpılanların bulunduğu temel küme sınırları içinde kalır.

Yine yukarıda verilen A ve B klasik kümelerindeki öğeleri, öge olarak içeren A ve B bulanık kümeleri üyelik dereceleri ile beraber

$$\underline{A} = \{0.1/a + 1.0/b + 0.3/c\}$$

Ve

$$\underline{B} = \{0.3/1 + 0.7/2 + 1.0/3\}$$

olsun. Bulanık kümelerin Kartezyen çarpımından elde edilen eşleştirme tıpkı klasik kümelerdeki gibidir. Herbir eşleşmeyi temsil edecek üyelik derecesi ise EK işlemi ile bulunur. Böylece,

$$\begin{aligned} \underline{A} \times \underline{B} = & \{0.1/(1,a) + 0.3/(1,b) + 0.3/(1,c) + 0.1/(3,a) + 0.7/(3,b) \\ & + 0.3/(2,c) + 0.1/(3,a) + 1.0/(3,b) + 0.3/(9,c)\} \end{aligned}$$

Bulunur. Genel bir kural olarak, \underline{A} ve \underline{B} gibi iki bulanık kümenin Kartezyen çarpımı üyelik derecelerinin en küçüklenmesi işlemi ile

$$\underline{\mu}_{AXB}(x) = EK [\underline{\mu}_A(x), \underline{\mu}_B(x)]$$

şeklinde yazılabilir.

2.6.9 Çoklu Küme İşlemleri

İki alt kümenin kesişim veya birleşim ile işlem görmesi halinde hangi kümenin önce geldiğinin bir önemi yoktur. Buna göre kesişim ve birleşim işlemlerinin değiştirebilir (komütatif) oldukları söylenir yani klasik kümelerin birleşimi için

$$A \cup B = B \cup A \text{ ve } \underline{A} \vee \underline{B} = \underline{B} \vee \underline{A}$$

ve yine bulanık kümelerin kesişiminde

$$A \cap B = B \cap A \text{ ve } \underline{A} \wedge \underline{B} = \underline{B} \wedge \underline{A}$$

dır. Ayrıca kesişim ve birleşim işlemleri beraberlik (asosyatif) özelliğine sahiptir. Bunun anlamı ikiden daha fazla alt kümenin hepsinin kesişimi veya hepsinin birleşimi halinde parantez ile her hangi ikisinin öncelikli işleme tabi tutulmasının sonuç üzerine etkisi yoktur. Kesişim veya birleşim işlemlerinin böyle çoklu işlemler halinde, hangi iki kümenin önce kesişme veya birleşiminin yapılmasında öncelik önemli değildir. Örneğin, A, B ve C gibi üç kümenin bulunması durumunda birleşim

$$(A \cup B) \cup C = A \cup (B \cup C)$$

ve bulanık kümeler için benzer eşitlik geçerlidir.

$$(\underline{A} \vee \underline{B}) \vee \underline{C} = \underline{A} \vee (\underline{B} \vee \underline{C})$$

Aynı klasik kümelerin kesişimini ise

$$(A \cap B) \cap C = A \cap (B \cap C)$$

ve bulanık kümeler içinde

$$(A \wedge B) \wedge C = A \wedge (B \wedge C)$$

olur. Bu özelliği dolayısı ile n tane $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ bulanık kümelerinin sadece kesişimi ve birleşimi işlemleri kolaylaştırır. İşlemlerin yapılması için parantezlere gerek olmadığından birleşim ve kesişim kısaca sırası ile

$$\bigcup_{i=1}^n A_i \text{ veya } \bigvee_{i=1}^n A_i$$

ve

$$\bigcap_{i=1}^n A_i \text{ veya } \bigwedge_{i=1}^n A_i$$

Şeklinde notasyonlarla yazılabilir. Burada dikkat edilecek husus çoklu işlemlerde sadece kesişim veya sadece birleşim olması durumunda beraberlik işlemi geçerlidir. Yoksa

$$A \wedge B \wedge C \wedge D \wedge E \wedge F \wedge G$$

gibi karmaşık işlemleri içeren bir dizide yukarıdaki kısaltmaların hiç biri geçerli değildir.

Çoklu küme işlemleri arasında bir diğeri dağılıbilirlik (distribütif) özelliğidir. Bu, mantığın çok önemli çıkarımlarından biri diğeridir. Burada bir kesişimi, birleşim kümelerine dağıtabildiğimiz gibi, bir birleşimi de kesişim kümelerine dağıtabiliriz. Bunun küme işlemleri ile ifadesi klasik ve bulanık kümeler için

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

Ve

$$A \wedge (B \vee C) = (A \wedge B) \vee (A \wedge C)$$

Olur. Benzer olarak

$$A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$$

Ve

$$A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$$

Yazılabilir.

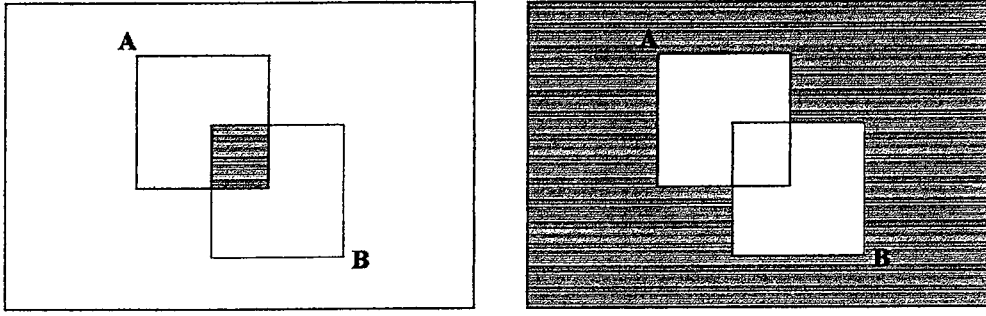
Klasik mantığın ortaya çıkardığı bir başka küme işlemi de De Morgan tarafından verilmiş olan bir kuraldır. Bu kural kümelerin tamamlayıcılarını da göz önünde bulundurmanız halinde, kesişim kümelerinin birleşim, birleşim kümelerinin de kesişim halinde, yazılmasına izin verir. De Morgan kuralı kesişimin (birleşimin) tamamlayıcısının kümelerin tamamlayıcıların birleşimine (kesişimine) eşit olduğunu söyler. A (A) ve B (B) kümelerinin elde olması halinde

$$\overline{A \cap B} = \overline{A} \cup \overline{B}$$

Ve

$$\overline{A \cup B} = \overline{A} \cap \overline{B}$$

geçerlidir. De Morgan kuralları için Venn gösterimleri Şekil 2.25'te verilmiştir. Burada ayırım ve kıyaslamaların rahatlıkla yapılabilmesi için A ve B kümeleri kara ve üçgen şeklinde verilmiştir.



Şekil 2.25. De Morgan kuralları için Venn diyagramı

Bu gösterimlerin kıyaslanması ve yorumlanması ile okuyucu De Morgan kurallarının uygunluğunu anlayabilir (Kaufman, 1991).

2.7. Bulanık Matematik

Bulanık kuralların öncül ve soncul kısımlarında bulunan, mesela, “hız yüksek” gibi bulanık küme kısımları birer yaklaşıklık ifade ederler. Bu bakımdan, “yaklaşık 3”, “yaklaşık 7”, “aşağı –yukarı 9”, “5’den büyük ve yaklaşık” gibi ifadelerin hepsi bir bulanık (yaklaşık) sayıyı ifade eder. Bu yaklaşımların herbiri bir bulanık alt kümeyle karşı gelir. Bu bulanık sayılarla bildiğimiz aritmetik işlemlerin yapılması durumu karşımıza çıkmaz ve bunun ayrıntılı olarak öğrenilmesi gereklidir.

Bulanık sayılar bazı kısıtlamaların altında tanımlanarak işlemler yapılır. Bir bulanık sayının olabilmesi için bunun \underline{A} gibi bulanık kümesinin normal, dış bükey, sınırlı destek ve her üyelik derecesi kesiminde kapalı ve sonlu bir aralığın bulunması gerekir. Bulanık sayıların normal olabilmeleri için bulanık ifadedeki gerçek sayılardan en az birinin üyelik derecesinin 1’e eşit olması gerekir. Yani “yaklaşık 8” ifadesinde $\underline{u}(8) = 1$ ’dir. Anlamlı bulanık aritmetik işlemlerin yapılması için bulanık sayıların mutlaka sınırlı desteği ile dış bükey olmaları gerekir.

Genel olarak pratik uygulamalarda kullanılır üçgen ve yamuk olmak üzere iki tane bulanık sayı söz konusudur. \underline{A} bulanık kümesi ile gösterilen bir üçgen bulanık sayının yukarıda söylenenlere göre matematik ifadesi (Şekil 2.26) .

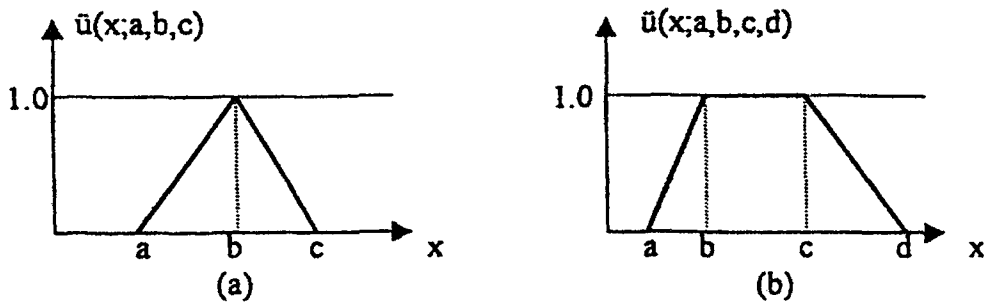
$$\bar{u}_A(x) = \bar{u}_A(x; a, b, c) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & \text{eger } a \leq x < b \\ (c-x)/(c-b) & \text{eger } b \leq x \leq c \\ 0 & \text{eger } x > c \text{ veya } x < a \end{cases}$$

Burada şimdiye kadar alışlagelmiş bir üyelik derecesi gösterimi $\bar{u}_A(x; a; b; c)$ şeklinde karşımıza çıkar.

Burada a ve c bulanık küme desteğinin sırası ile alt ve üst sınır değerlerini, b ise tam üyelikle tek sayıyı gösterir. Benzer olarak yamuk sayılar ise bu defa a, b, c ve d olmak üzere tam dört tane sayı ile temsil edilir. Bunlardan a ve d yamuk bulanık sayının desteğinin sırası ile alt ve üst sınırlarını, b ve c ise bu iki sayı arasında üyelik derecesi tam olan yamuk sayıların kümesinin sınırlarını gösterir. Yamuk sayının matematik gösterimi ise üçgen sayıya benzer olarak

$$\bar{u}_A(x) = \bar{u}_A(x; a, b, c, d) = \begin{cases} (x-a)/(b-a) & \text{eger } a \leq x < b \\ 1 & \text{eger } b \leq x < c \\ (d-x)/(d-c) & \text{eger } c < x \leq d \\ 0 & \text{eger } x > d \text{ veya } x < a \end{cases}$$

Dikkat edilirse $b=c$ olduğu zaman yamuk bulanık sayı üçgen bulanık sayı haline dönüşür. Bu sayıların grafik gösterimleri Şekil 1.26'da verilmiştir.



Şekil 2.26. Bulanık sayılar a) Üçgen, b) Yamuk

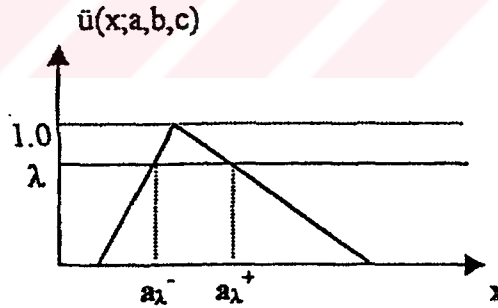
Bulanık sayıların aritmetik işlemlerinde kullanılmak üzere bunların belirli bir λ seviyesinden kesimleri üzerinde durulacaktır. Çünkü $\lambda = 1$ olması durumunda sayı gerçek sayıya, $\lambda = 0$ olmasında ise tam bulanık sayıya dönüşür. $0 < \lambda < 1$ olması durumunda yani bulanık sayının λ seviyesinde kesik bulanık alt kümesi düşünülecektir. Bir \underline{A} bulanık alt kümesinin λ seviyesinde kesilmesi ile ortaya çıkan kesik bulanık küme

$$\underline{A}_\lambda = \{x \in \underline{A} \mid \bar{u}_A(x) \geq \lambda\}$$

şeklinde ifade edilir. Şekil 1.27'de bir bulanık alt kümenin λ seviyesinde kesilmesi ile ortaya çıkan kesilmiş bulanık kümenin a_λ^- ve a_λ^+ gibi bir alt birde üst sınır küme değerleri elde edilir. Notasyon olarak \underline{A} gibi bulanık bir alt kümenin λ seviyesindeki kesim sınırları cinsinden

$$\underline{A}_\lambda = [a_\lambda^-, a_\lambda^+]$$

olarak gösterilecektir.



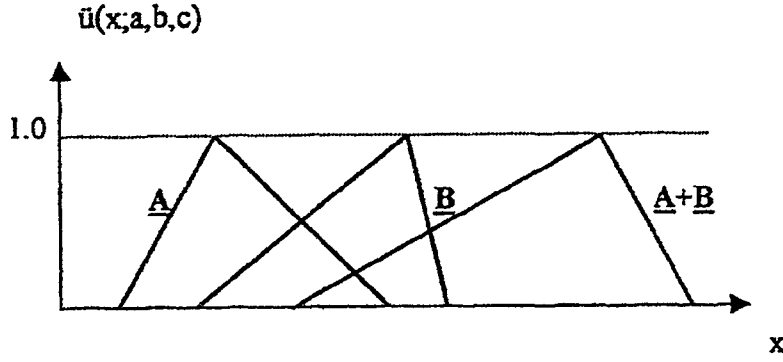
Şekil 2.27. Bulanık sayı kesim seviyeleri

2.7.1. Bulanık Sayıların Toplanması Ve Çıkarılması

Şekil 2.27'de gösterildiği gibi kesimleri λ seviyesinde kesimleri olan \underline{A} ve \underline{B} bulanık alt kümeleri $\underline{A}_\lambda = [a_\lambda^-, a_\lambda^+]$ ve $\underline{B}_\lambda = [b_\lambda^-, b_\lambda^+]$ olsun. Bu iki bulanık alt kümenin $\underline{A} + \underline{B}$ toplam λ kesim seviyesi cinsinden

$$(\underline{A} + \underline{B})_{\lambda} = [a_{\lambda}^{-} + b_{\lambda}^{-}, a_{\lambda}^{+} + b_{\lambda}^{+}]$$

Şeklinde hesap edilir. Bu toplamın grafik gösterilimi aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 2.28. İki bulanık kümenin toplamı

Benzer olarak iki bulanık alt kümenin birbirinden çıkarılması aşağıdaki gibi tanımlar.

$$(\underline{A} - \underline{B})_{\lambda} = [EK(a_{\lambda}^{-} - b_{\lambda}^{-}, a_{\lambda}^{+} - b_{\lambda}^{+}), EB(a_{\lambda}^{-} - b_{\lambda}^{-}, a_{\lambda}^{+} - b_{\lambda}^{+})]$$

Bu işlemler her λ seviyesi için geçerlidir.

ÖRNEK

Aşağıdaki üyelik fonksiyonları ile verilmiş olan A ve B gibi iki üçgen bulanık 5 ve 1 sayılarını toplayınız ve çıkartınız. Bu sayıların üçgen üyelik fonksiyonlarının sayısal değerleri

$$\underline{u}_A(x) = \underline{u}_A(x; -1, 0, 1)$$

$$\underline{u}_B(x) = \underline{u}_B(x; -1, 1, 3)$$

şeklinde verilmiştir. Önce bu yaklaşık sayıların λ seviyesindeki kesilmiş bulanık kümelerini bulalım. Bunlar

$$\underline{A}_{\lambda} = [\lambda - 1, 1 - \lambda]$$

$$\underline{B}_{\lambda} = [2\lambda - 1, 3 - 2\lambda]$$

Olur. Böylece sonuçta

$$(\underline{A} + \underline{B}) \lambda = [3\lambda - 2, 4 - \lambda]$$

elde edilir. Buradan $3\lambda - 2$, $4 - \lambda$ nın doğrusal olmasından, $\underline{A} + \underline{B}$ bulanık toplamında üçgen bulanık sayı olduğu anlaşılır. Kesim seviyesinin $\lambda = 1$ ve $\lambda = 0$ 'a eşit olduğu düşünülürse

$$\ddot{U}_{\underline{A}+\underline{B}}(x) = \ddot{U}_{\underline{A}+\underline{B}}(x; -2, 1, 4)$$

Üçgen sayısı bulunur. Aynı bulanık sayıların çıkarılması işlemlerinin tamamlanması halinde de

$$(\underline{A} - \underline{B}) \lambda = [\lambda - 2, -\lambda]$$

elde edilir. Kesim seviyesinin 1 ve 0 'a eşitlenmesi ile

$$\ddot{U}_{\underline{A}-\underline{B}}(x) = \ddot{U}_{\underline{A}-\underline{B}}(x; -2, -1, 0)$$

bulunur.

2.7.2. Genelleme İlkesi

Genelleme ilkesinin kullanılması ile A ve B gibi iki bulanık alt kümenin toplamını aşağıdaki şekilde ifade edebiliriz.

$$\ddot{U}_{\underline{A}+\underline{B}}(z) = \bigvee_{x+y=z} EB \{ EK [\ddot{u}_{\underline{A}}(x), \ddot{u}_{\underline{B}}(y)] \}$$

Sağ taraftaki EB (En Büyük) işaretinin altındaki $x + y = z$ eşitliği \underline{A} ve \underline{B} bulanık kümelerinde değişkenlerden x ve y'nin toplamının z ettiği tüm durumların bulunması demektir. EK yani en küçükleme de iki bulanık kümede x ve y değerlerinin üyelik derecelerinden küçük olanının alınması anlamına gelir. Bunu sıcağı sıcağına uygulama ile açıklarsak okuyucu daha iyi anlayabilecektir. \underline{A} ve \underline{B} bulanık kümelerinin öğeleri aşağıdaki şekilde verilmiş olsun.

$$\underline{A} = \{0.9/1 + 0.7/2 + 0.5/4 + 0.2/6 + 0.1/9\}$$

Ve

$$\underline{B} = \{1.0/2 + 0.6/3 + 0.3/4\}$$

Bunların toplanması için önce herbir kümedeki öğeler Kartezyen çarpımındaki gibi eşleştirilerek, eşleşen elemanların toplamları alınır. Böylece önce çarpım kümesinin öğeleri elde edilir. Bunlar :

$$\{(1,2),(1,3),(1,4),(2,2),(2,3),(2,4),(4,2),(4,3),(4,4)(6,2),(6,3),(6,4)(9,2),(9,3)(9,4)\}$$
 gibi $5*3=15$

adet öge bulunur. İkinci aşamada bu eşleşmiş değerlerin toplamı alınarak 15 birleşik öğeli küme elde edilir. Bu küme $\{3,4,5,4,5,6,6,7,8,8,9,10,11,12,13\}$ öğelerine sahiptir. Böylece yukarıdaki genelleştirme işlemindeki $x + y = z$ işlemi yapılarak toplam bulanık kümesinin z

öğeleri elde edilmiştir. Şimdi soru bu öğelerin tek olanına toplamdaki $\underline{u}_A(x)$ ve $\underline{u}_B(y)$

üyelerinden küçük olanının atanmasıdır. Mesela, en son kümede 3 öğesi 1 tanedir ve bunun \underline{A}

bulanık kümesinden $\underline{u}_A(1) = 0.9$ üyelik dereceli 1 öğesi ve \underline{B} bulanık kümesinden de $\underline{u}_B(2)$

= 1.0 üyelik dereceli 2 öğesi alındığından bu üyelik derecelerinin EK'ü olan 0.9 toplam

kümenin 3 öğesinin üyelik derecesini verir, yani $\underline{u}_{\underline{A}+\underline{B}}(3) = EK [0.9 , 1.0] = 0.9$ elde edilir. O

halde, toplam bulanık kümenin ilk bulanık öğesi 0.9/2 dir. Diğer taraftan, toplam kümede 4

ögesi 2 tane bulunmaktadır. Bunların öncesi tek öğeye benzer olarak üyelik derecelerinin

hesaplanması ile birinci 4 öğesinin üyelik derecesi $EK=[0.9 , 0.6]= 0.6$ diğerinin ise $EK = [$

$0.7 , 1.0] = 0.7$ elde edilir. Bu iki aynı miktardaki öğenin yani 4 veya 4'ün olması için

önceden elde edilen EK üyelik derecelerinin EB'lenmesi ile $\underline{u}_{\underline{A}+\underline{B}}(z) = EB [0.6 , 0.7] = 0.7$

elde edilir. Toplam bulanık kümesinin teke indirilmiş 4 öğesinin üyelik derecesi 0.7

olduğundan, bu kümenin 4 öğesinin üyelik derecesi $\underline{u}_{\underline{A}+\underline{B}}(4) = 0.7$ olarak gösterilir. Yani 4

bulanık öğesi $0.7/4$ şeklindedir. Diğer öğelerin üyeliklerinin genelleştirme teoremine göre

hesaplanması ile sonuç toplam bulanık küme

$$\underline{u}_{\underline{A}+\underline{B}}(z) = \{0.9/3 + 0.7/4 + 0.5/5 + 0.5/6 + 0.5/7 + 0.3/8 + 0.2/9 + 0.2/10 + 0.1/11 + 0.1/12 + 0.1/13\}$$

bulunur. Benzer olarak çıkarmada aşağıdaki notasyonla tanımlanabilir.

$$\underline{U}_{\underline{A}-\underline{B}}(z) = \bigwedge_{x-y=z} EB \{ EK [\underline{u}_A(x), \underline{u}_B(y)] \}$$

Yukarıda sayısal olarak verilmiş olan A ve B bulanık kümelerinin çıkarılması sonucunda elde edilen çıkarım bulanık kümesi öncesindeki çıkarımın öğeleri $\{-1, -2, -3, 0, -1, -2, 2, 1, 0, 4, 3, 2, 7, 6, 5\}$ olarak bulunur. Bu öğelerin her birinin üyelik derecelerinin yine toplama benzer şekilde EK ve EB'lemelerle elde edilmesi ile çıkarım bulanık kümesinin son şekli

$$\ddot{U}_{A-B}(z) = \{0.3/-3 + 0.6/-2 + 0.9/-1 + 0.7/0 + 0.5/1 + 0.5/2 + 0.2/3 + 0.2/4 + 0.1/5 + 0.1/6 + 0.1/7\}$$

olarak bulunur.

2.7.3. Bulanık Sayıların Çarpılması Ve Bölünmesi

İki bulanık sayının çarpım ve bölüm işlemlerinin anlaşılması için öncelikle aralık sayılarının bu işlemler karşısında nasıl davranacaklarının izah edilmesinde yarar vardır. Bir aralık sayısı sadece alt ve üst sınır değerleri ile belirlenir. Bunu diğer bir anlamı, bu alt ve üst sınırlar arasında bulunan bütün sayıların üyelik derecelerinin 1'e eşit olduğu kabul edilirse, yukarıda söylenen üçgen veya yamuk yaklaşık sayıları yerine dikdörtgen bir sayı elde edilir. Aralık sayılardan iki tanesi $A = [a, b]$ ve $B = [c, d]$ olsun. Bunların çarpımı tanım olarak

$$A.B = [EK(ac, ad, bc, bd), EB(ac, ad, bc, bd)]$$

Şeklinde verilir. Örnek olarak

$$A = [-3, 4]$$

Ve

$$B = [1, 9] \text{ ise}$$

$$A.B = [EK(-3, -27, 4, 36), EB(-3, -27, 4, 36)] = [-27, 36]$$

elde edilir. Kural olarak ilk sayının önce alt sınırı sonraki sayının alt ve üst sınırları ile çarpılarak iki sayı ve benzer olarak ilk sayının üst sınırı ile yine sonraki sayının üst ve alt sınır değerleri çarpılarak elde edilen diğer iki sayı önceki iki sayı ile bir arada düşünülürse, çarpım işleminin sonucunu içeren dört öğeli bir küme elde edilir. İşte bu küme öğelerinin en küçüğü

çarpımın alt sınırını en büyüğü ise üst sınırını gösterir. Buna benzer olarak aynı iki sayının bölmesi

$$A/B = [a, b] / [c, d] = [EK(a/c, a/d, b/c, b/d), EB(a/c, a/d, b/c, b/d)]$$

Şeklinde yapılır ki, buradan bölen sayının sınırlarının sıfıra eşit olmaması gerekliliği çıkar, yani $c \neq 0$ ve $d \neq 0$ olmalıdır. Yine yukarıda sayısal olarak verilen aralık sayılarının bölümünden

$$A/B = [EK(-3/1, -3/9, 4/1, 4/9), EB(-3/1, -3/9, 4/1, 4/9)] = [-3/9, 4/1]$$

elde edilir.

Bulanık sayıların çarpma ve bölmesi aralık sayılarınkine benzer, çünkü bulanık sayıların λ kesimleri zaten yukarıda izah edildiği gibi aralık sayılar gibi gösterilmektedir. λ seviyesinde kesilmiş iki bulanık sayı $\underline{A}_\lambda = [a_\lambda^-, a_\lambda^+]$ ve $\underline{B}_\lambda = [b_\lambda^-, b_\lambda^+]$ ise bunların yine λ seviyesinde geçerli çarpımları

$$(A \cdot B)_\lambda = [EK(a_\lambda^- b_\lambda^-, a_\lambda^- b_\lambda^+, a_\lambda^+ b_\lambda^-, a_\lambda^+ b_\lambda^+), EB(a_\lambda^- b_\lambda^-, a_\lambda^- b_\lambda^+, a_\lambda^+ b_\lambda^-, a_\lambda^+ b_\lambda^+)]$$

Benzer olarak bölme işlemi de

$$(A/B)_\lambda = [EK(a_\lambda^-/b_\lambda^-, a_\lambda^-/b_\lambda^+, a_\lambda^+/b_\lambda^-, a_\lambda^+/b_\lambda^+), EB(a_\lambda^-/b_\lambda^-, a_\lambda^-/b_\lambda^+, a_\lambda^+/b_\lambda^-, a_\lambda^+/b_\lambda^+)]$$

olarak tanımlanır. İki tane üçgen bulanık sayı aşağıdaki gibi tanımlı olsun.

$$\underline{u}_A(x) = \underline{u}_A(x; -1, 0, 1)$$

ve

$$\underline{u}_B(x) = \underline{u}_B(x; 0.5, 1, 3)$$

şeklinde tanımlanmış olsun. Buna göre A.B ile A/B hesaplanmasından önce λ kesim seviyesine göre

$$\underline{A}\lambda = [a_{\lambda}^{\bar{}}, a_{\lambda}^{+}] = [\lambda - 1, 1 - \lambda]$$

Ve

$$\underline{B}\lambda = [b_{\lambda}^{\bar{}}, b_{\lambda}^{+}] = [(\lambda + 1)/2, 3 - 2\lambda]$$

olduğu anlaşılır. Önce

$$EK(a_{\lambda}^{\bar{}} b_{\lambda}^{\bar{}}, a_{\lambda}^{\bar{}} b_{\lambda}^{+}, a_{\lambda}^{+} b_{\lambda}^{\bar{}}, a_{\lambda}^{+} b_{\lambda}^{+}) = a_{\lambda}^{\bar{}} b_{\lambda}^{\bar{}} = -2\lambda^2 + 5\lambda - 3$$

$$EB(a_{\lambda}^{\bar{}} b_{\lambda}^{\bar{}}, a_{\lambda}^{\bar{}} b_{\lambda}^{+}, a_{\lambda}^{+} b_{\lambda}^{\bar{}}, a_{\lambda}^{+} b_{\lambda}^{+}) = a_{\lambda}^{+} b_{\lambda}^{\bar{}} = 2\lambda^2 - 5\lambda + 3$$

Ve sonuç olarak

$$(A.B)\lambda = [-2\lambda^2 + 5\lambda - 3, 2\lambda^2 - 5\lambda + 3]$$

elde edilir. Aynı sayıların bölmesi halinde ise

$$EK(a_{\lambda}^{\bar{}}/b_{\lambda}^{\bar{}}, a_{\lambda}^{\bar{}}/b_{\lambda}^{+}, a_{\lambda}^{+}/b_{\lambda}^{\bar{}}, a_{\lambda}^{+}/b_{\lambda}^{+}) = a_{\lambda}^{\bar{}}/b_{\lambda}^{+} = (\lambda - 1)/(3 - 2\lambda)$$

$$EB(a_{\lambda}^{\bar{}}/b_{\lambda}^{\bar{}}, a_{\lambda}^{\bar{}}/b_{\lambda}^{+}, a_{\lambda}^{+}/b_{\lambda}^{\bar{}}, a_{\lambda}^{+}/b_{\lambda}^{+}) = a_{\lambda}^{+}/b_{\lambda}^{\bar{}} = 2(1 - \lambda)/(1 + \lambda)$$

bulunur. Bunların bir arada gösterilmesi ile

$$(A/B) \lambda = [(\lambda - 1) / (3 - 2\lambda) , 2(1 - \lambda) / (1 + \lambda)]$$

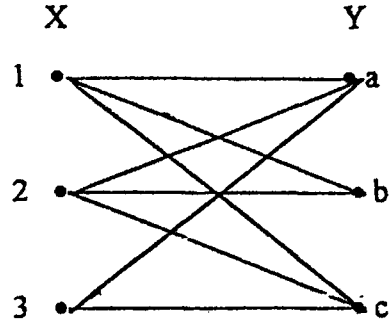
sonucuna varılır.

2.8. Küme İlişkileri

Burada, önceki temel işlemlerinin ne olduğu anlatılan bulanık kümelerle ilgili karşılıklı ilişkilerin neler olabileceği hakkında bilgiler verilecektir. Bu tür ilişkiler matematik, bilim ve mühendislik modellemelerinde çok yararlıdır. İlişkilerin nasıl elde edildiğinin anlaşılması bu kitapta bundan sonra yapılacak bulanık mantık modellemeleri için önemlidir. Özellikle, mantıksal ilişkilerin, yaklaşık muhakemenin, kural tabanlarının geliştirilmesinin, görüntü tanımlamasının sınıflandırma ve kontrollerin yapılmasında büyük faydaları vardır.

Bu bölümde, önce tüm küme ilişkilerinin esasını teşkil eden Kartezyen çarpımın ne olduğunu izah etmekle işe başlanacaktır. Daha sonra klasik ve bulanık kümelerdeki ilişkilendirme işlemleri anlatılacaktır.

Önceki bölümde belirtilen şekilde Kartezyen çarpımları elde edilmiş olan, mesela A ve B gibi iki bulanık kümenin öğelerinin sayısında önceden bilinen bir şartın yerine getirilmesi ile sayı bakımından bir azalma meydana geliyor ise, bu türlü kümelere ilişki kümeleri adı verilir. Buradan ilişki kümelerinin Kartezyen çarpım kümesinin bir alt kümesi olduğu ortaya çıkar. İki kümeden elde edilen ilişkilere ikili ilişki, üç taneden olanlara üçlü, dört taneden olanlara da dördütlü ilişkiler adı verilir. Şarta göre geçerli olan çarpım öğelerini 1, diğerlerini de 0 ile göstermek yolu ile klasik kümelerde ilişki kümesinin kuvveti tabir edilen bir durum elde edilir. Böylece Kartezyen çarpım sonunda elde edilmiş olan ortak öğelerin şartlı üyelik dereceleri Aristo mantığına göre belirlenmiş olur. Kartezyen çarpımı yapılan kümelerdeki öğelerin sayılarının sonlu olması durumunda ilişkiler matris şeklinde de gösterilebilir. Buna küme ilişki matrisi adı verilir. Ayrıca iki kümenin öğelerinin eleştirilmesi ile elde edilen çarpımı göstermek için, bir kümedeki elemanların diğer kümedekilerle nasıl eşleştirildiklerini gösteren Şekil 2.29'da verilen karşılıklı çizgi diyagramına Sagittal diyagram adı verilir. Böyle bir diyagramda küme elemanları temsili olarak noktalar, aralarında ilişki olan noktalar ise çizgilerle gösterilir.



Şekil 2.29. Sagittal diyagramı

İlişki matrisindeki 1'ler ile Sagittal diyagramındaki çizgiler birbirine karşı gelir. Örneğin,

$$X = \{1, 2, 3\}$$

Ve

$Y = \{a, b, c\}$ kümelerinin Kartezyen çarpımlarının ilişkisi matrisi

$$i = \begin{matrix} & a & b & c \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

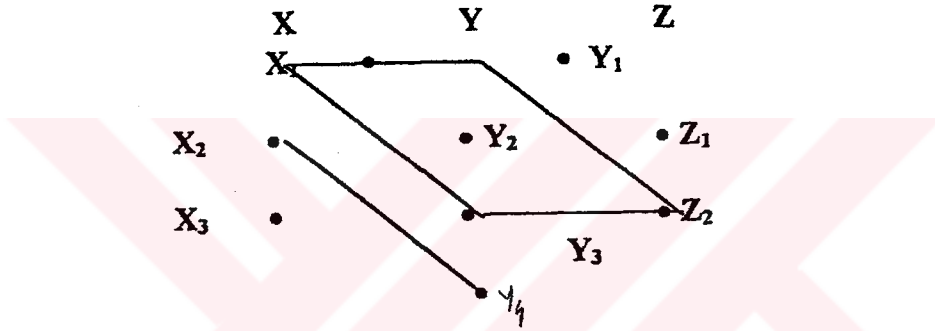
Şeklinde gösterilir. Halbuki aynı iki kümenin Kartezyen çarpımları Sagittal diyagramı olarak Şekil 2.29'da gösterilmiştir. Verilen X ve Y kümelerinin Kartezyen çarpımında daha sınırlayıcı ilişkisi matrisi, belirli bir şartın gözetilmesi ile elde edilir. Mesela, X ve Y kümelerinin Kartezyen çarpımında sayısal kısmı 2'den küçük olan öğeler diye bir kısıtlama olursa bu Kartezyen çarpımdan (3,a), (3,b) ve (3,c) gibi çarpım öğeleri dışlanarak 0, diğerleri ise 1 ile gösterilirse R ilişkisi matrisi

$$R = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Şeklini alır.

2.8.1 İlişki Geçiş Matrisi

R, X uzayında Y uzayına, S ise Y 'den X 'e geçişi temin eden ilişki matrisi olsun. Burada sorulabilecek önemli bir soru şudur? Acaba öyle bir T ilişkisi bulunabilir mi ki bu R 'nin içerdiği aynı X uzayı öğelerini S 'nin içerdiği Z uzayının öğelerine bağlayabilsin. X, Y ve Z uzaylarının öğelerini birbirine ardışık olarak bağlayan Sagittal diyagramı Şekil 2.30'de gösterilmiştir.



Şekil 2.30. Üç uzayın öğelerinin sagittal diyagramı

Bu diyagram X ve Z uzaylarının öğeleri arasındaki mümkün geçişler sadece $X1-Y1-Z2$ ve $X1-Y3-Z2$ olmaktadır. Yine aynı uzayların aralarındaki R ve S ilişkilerini

$$R = \{(x1, y1), (x1, y3), (x2, y4)\}$$

$$S = \{(y1, z2), (y3, z2)\}$$

Şeklinde yazabiliriz. İki ilişki matrisinin birleştirilerek sorulan soruya cevap alabilmek için birbirinden farklı iki küme işlemi yapılabilir. Bunlar en büyük (max) – en küçük (min) (EB-EK) (max-min) veya en büyük (max)-çarpım (EB-Çarpım) (max-product) işlemleridir. Uygulamalarda sıkça kullanılan bu iki klasik küme işlemlerine ilave olarak bulanık mantığın kendisine özel başka işlemleride vardır. İki işlemden en sık kullanılanı EB-EK işlemidir. Bunun neticesinde elde edilen T geçiş ilişkisi matrisinin küme ve öğeler cinsinden notasyon olarak gösterilimi sırası ile

$T = RoS$

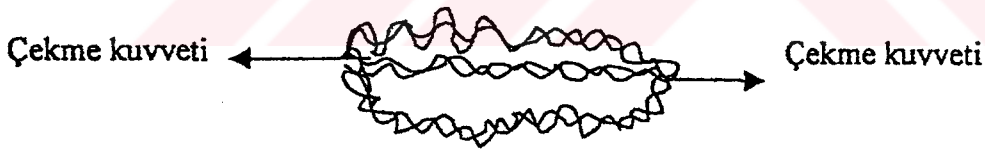
Veya açıkca

$$\ddot{u}_T(x, z) = \bigvee_{y \in Y} [\ddot{u}_R(x, y) \wedge [\ddot{u}_S(y, z)]]$$

Şeklinde yapılır. Ancak EB-EK işlemi yerine EB-Çarpım kuralının kullanılması durumunda açık ifade

$$\ddot{u}_T(x, z) = \bigvee_{y \in Y} [\ddot{u}_R(x, y) \cdot [\ddot{u}_S(y, z)]]$$

Durumuna gelir. Burada \bullet işareti EB-Çarpım işlemi gösterir. EB-Çarpım kuralına için ışık tutacak Şekil 2.31'deki üç tane birbirine paralel bağlı zincirden bir tanesinin alındığı düşünülürse alınan bu zincirin çekme testine tabi tutulması durumunda bunun en zayıf bir şekilde kopacağı anlaşılır. Böylece, bir zincirin en zayıf kopması durumunda sadece bir tane bağlantısının bulunduğu sonucuna varılır.



Şekil 2.31. Üçlü zincir

Halbuki, Şekil 2.31'deki zincirler arasında birden fazla bağlantı vardır. Buradan paralel bağlı zincirlerin bir tanesinin kopma şartının onu teşkil eden zincirler arasında en küçük (EK) (\wedge) çekme gerilmesine sahip olanın gerilmesi ile olacağı anlaşılır. Ancak, bu paralel zincirlerin üçünün birden bağlı olması durumunda çekme sınamasına tabi tutulduğu zaman, bunlardan bir tanesi kopsa bile diğerleri kopuncaya kadar bir miktar daha çekme gerilmesi taşıyacaktır. Bunun anlamı, zayıf olan zincir kuvvetli olan kopuncaya kadar daha büyük bir gerilmeye maruz kalabilecek, ancak sonunda o da kopacaktır. Böylece, tüm zincir sisteminde kopma gerilmelerinin en büyük (EB) (\vee) olanına ulaşıncaya kadar sistem kopmayacaktır. Üçlü bağlantıda her bir zincir, EB-EK işlemine ve böylece üçlü sistemin kopma gerilmesi de EB-EK işleminde EB işlemine karşı gelir.

ÖRNEK:

Şekil 2.30'da verilen Sagittal diyagramının temel iki ilişki matrisleri sırası ile sayısal olarak

$$R = \begin{matrix} & y_1 & y_2 & y_3 & y_4 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} & \text{ve} & S = \begin{matrix} & z_1 & z_2 \\ \begin{matrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Verilebilir. Buradan, X ve Z uzayının değişik öğelerinin üyelik dereceleri EB-EK işlemi esas alınarak yapılacak olursa

$$\bar{u}_T(x_1, x_2) = EB [EK(1,0), EK(0,0), EK(1,0), EK(0,0)]$$

$$\bar{u}_T(x_1, z_2) = EB [EK(1,1), EK(0,0), EK(1,1), EK(0,0)]$$

bulunur. Tüm işlemlerin yapılması sonucunda elde edilmek istenen T geçiş ilişkisi ise

$$T = \begin{matrix} & z_1 & z_2 \\ \begin{matrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

olur. Bu kısmın kapanmasından önce klasik ve bulanık kümeler halinde RoS =SoR eşitsizliğinin geçersiz olduğu okuyucu tarafından gerekli işlemler yapılarak gösterilebilir.

2.8.2. Bulanık İlişkiler

İşlem olarak bulanık küme X'den diğer bulanık küme olan Y'ye Kartezyen çarpım ile birebir ilişkilendirme yapılması mümkündür. Klasik kümelerdeki işlemlerden tek farkı, işlem olarak değilde ancak üyelik derecelerinin 0 ve 1 gibi iki değerli olmayıp, 0 ile 1 aralığında herhangi bir ondalık değeri bile içermesidir. Aynı notasyonlar geçerlidir, ancak bulanık kümeleri temsil eden büyük harflerin altına bir çizgi işareti konur.

$X \times Y$ Kartezyen uzayında, R ve S gibi iki tane bulanık ilişki matrisinin bulunduğunu düşünelim. Bunlar arasında değişik küme işlemleri sırası ile birleşim, kesişim, tamamlayıcı (değil) ve içermeye işlemleri, Bölüm III'deki küme işlemlerine benzer olarak üyelik değerleri gözetilerek aşağıdaki gibi yapılır.

$$\mu_{R \cup S}(x,y) = \text{EB} [\mu_R(x,y), \mu_S(x,y)]$$

$$\mu_{R \cap S}(x,y) = \text{EK} [\mu_R(x,y), \mu_S(x,y)]$$

$$\mu_{\bar{R}}(x,y) = 1 - \mu_R(x,y)$$

$$R \subset S \Rightarrow \mu_R(x,y) \leq \mu_S(x,y)$$

\underline{A} ve \underline{B} bulanık kümelerin X ve Y gibi uzaylarda tanımlandığı düşünelim. Bu iki bulanık kümenin çarpımı ile elde edilen R ilişki kümesi aslında daha önce tanımlanan $X \times Y$ klasik küme çarpımı içinde yer alır. Bunu notasyon olarak şöylece gösterebiliriz.

$$\underline{A} \times \underline{B} = R \subset X \times Y$$

Üyelik derecelerinin esas alınması ile bu ilişki Kartezyen çarpımdan yararlanarak aşağıdaki gibi de yazılabilir.

$$\mu_R(x,y) = \mu_{\underline{A} \times \underline{B}}(x,y) = \text{EK} [\mu_{\underline{A}}(x), \mu_{\underline{B}}(y)]$$

ÖRNEK:

Mühendislik mesleğinde uzlaşma oldukça önemlidir. Kalitenin iyi olması için mühendislik uzlaşması genel olarak sadece paraya bağlıdır. Buna ilave olarak hak tarafından verilen ödüller ve taktirlerde kalitenin iyiliğine katkıda bulunur. Bu Örnekte mühendislik uzlaşması için bulanık kural kullanımı gösterilecektir. Davranış biçimlerinin üç ögeli bulanık bir küme ile ifade edildiğini düşünelim. Davranış bulanık kümesi \underline{D}

$\underline{D} = \{ \text{sıkı çalışma (SÇ), iyi davranışlar (İD), yüksek üretim (YÜ)} \}$

Diğer taraftan işletme kavramlarının iki ögeli bir küme

$\underline{İ} = \{ \text{iş için gezinmek iyidir (İG), patronu memnun etmek (PM)} \}$

ve son olarak ödül yapısında da iki öge olsun

$\underline{Ö} = \{ \text{halk taktirleri (HT), iyi kalkınma (İK)} \}$

Bunlardan davranış biçimleri ile işletme kavramları mühendislik personeli arasında yapılan tartışmalar, anketler ve öznel yargılarının göz önünde tutulması sonucu, ile 0 ile 1 arasında normalleştirilecek biçimde değerlendirilebilir. Ödül aralığı 0 ile 1 arasında bulundurulur ve 1 üyelik derecesi halk taktirlerine karşı gelir. Bunun anlamı o zamana kadar kazanılan sayıca en büyük taktir olup işletmeci olmayan memurlar tarafından verilmelidir. İyi kalkınma için 1 üyelik derecesi %3.5'e karşı gelebilir.

Aşağıda verilen bulanık ilişki matrisi değerleri de yapılan gözlemler elde edilmiştir. İşletme kavramı $\underline{İ}$ ve davranış biçimleri \underline{D} kümeleri arasında

$$R_{İ,D} = \begin{array}{c} \text{İG} \\ \text{PM} \end{array} \begin{array}{ccc} \text{SÇ} & \text{İD} & \text{YÜ} \\ \left[\begin{array}{ccc} 0.2 & 0.8 & 0.7 \\ 0.4 & 0.5 & 0.8 \end{array} \right] \end{array}$$

İlişki matrisi vardır. Bundan başka ödül $\underline{Ö}$ ve kavram \underline{K} kümeleri arasında ilişki matrisi de

$$R_{Ö,K} = \begin{array}{c} \text{HT} \\ \text{İK} \end{array} \begin{array}{cc} \text{İG} & \text{PM} \\ \left[\begin{array}{cc} 0.5 & 0.9 \\ 0.7 & 0.8 \end{array} \right] \end{array}$$

olur. Bunlardan yararlanarak $\underline{Ö}$ ve \underline{D} matrisleri arasındaki ilişki

$$R_{\text{ö,D}} = \begin{array}{c} \text{HT} \\ \text{İK} \end{array} \begin{array}{ccc} \text{SÇ} & \text{İD} & \text{YÜ} \\ \left[\begin{array}{ccc} 0.4 & 0.5 & 0.8 \\ 0.4 & 0.5 & 0.8 \end{array} \right] \end{array}$$

Şeklinde bulunur. Buradan iyi bir kalkınma için halk taktirinin yararlı olduğu anlaşılır.

2.8.3. Bulanık Tolerans ve Eşdeğerlik İlişkileri

Bir bulanık ilişki matrisi olan R matrisi, X uzayından yine aynı uzaya olabilecek bağıntıyı da gösterebilir. Aşağıdaki üç şartın sağlanması halinde buna bulanık eşdeğer ilişki olarak bakılabilir.

Yansıtılabilirlik (reflexivity) $\bar{u}R(x_i, x_i) = 1$

Simetriklik (symmetry) $\bar{u}R(x_i, x_j) = \bar{u}R(x_j, x_i)$

Geçişlilik (transitivity) $\bar{u}R(x_i, x_j) = \lambda_1$ ve $\bar{u}A(x_j, x_k) = \lambda_2 \rightarrow \bar{u}R(x_i, x_k) = \lambda$
Burada $\lambda \geq \text{EK}(\lambda_1, \lambda_2)$ şartı aranır.

2.8.4. Değer Atamaları

İlişki matrisindeki üyelik değerlerinin nereden geldiği sorusu karşımıza çıkmaktadır. Bunu cevap olarak birkaç tane hesap yöntemi vardır. Bunlardan önemli olanları sırası ile şunlardır.

- Kartezyen çarpım : Şimdiye kadar bu kitapta anlatılan ilişki matrisi öğeleri hesaplamasında bu usul kullanıldığından burada ayrıca anlatılmayacaktır.
- Kapalı-şekil ifadeleri : Bu usul ile değerlerin bulunabilmesi için incelenen fiziksel olayın verilen bir girdi kümesi için çıktı kümesinin ne olacağı gözlemlenmelidir. Verilen bir giriş-çıkış çifti için hiç değişme gözlemlenemiyorsa bu sistemin klasik kümelerle modellenmesi yoluna gidilir. Ayrıca hiç değişkenlik bulunmuyor ise bu taktirde ilişkiyi kapalı form olarak $Y = f(X)$ şeklinde gösterebiliriz. Burada X giriş, Y ise çıkış kümesi öğelerinden oluşur.
- Tabloya bakma : Eğer biraz değişkenlik bulunursa 0-1 aralığında üyelik derecelerinin atanması ile bulanık ilişki kurma yönüne gidilir.

d) Sözel bilgi kuralları : Bunun için bulanık sözel bilgilerden yararlanır ve sonuçta EĞER-İSE türünde kurallar bulunur. Böyle bilgiler konunun uzmanları, anketler veya genel mutabakattan (konsensüs) bulanabilir.

e) Sınıflandırma : Verilen sınıflandırılması veya belirgin patternlerin (şekillerin) ortaya çıkması ile ilişki matrisinin öğelerinin tesbit edilmesidir. Bunun için kullanılan birkaç yöntem aşağıda açıklanmıştır.

f) Veri işleminde benzerlik yöntemleri : En fazlaca kullanılan yöntemlerden biri verilerden ilişki matrisinin değerlerinin tesbit edilmesidir. Bunun için kullanılan birkaç yöntem aşağıda açıklanmıştır.

Kosinüs Genliği Yöntemi : Kullanışlı olan bu yöntem birçok yöntemin gerektirdiği gibi n tane veriye ihtiyaç duyar. Veriler X kümesinin öğeleri olarak düşünülürse

$$X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$$

dir. Buradaki öğelerin her biri m tane veri içerir. Bu nedenle öğelerden x_i aşağıdaki gibi yine bir küme şeklinde yazılabilir.

$$X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{im}\}$$

Böylece ilişki matrisinin r_{ij} gibi bir öğesi x_i ve x_j verilerinin birer küme olarak düşünülmesi ve üzerinde ortak bazı işlemlerin yapılması ile hesaplanır. Hesaplanan r_{ij} 'ler değerine $u_R(x_i, x_j)$ üyelik derecesi olarak bakılabilir. Kosinüs genliği yönteminde r_{ij} 'ler 0 ile 1 arasında değerler olacak biçimde aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$r_{ij} = \frac{\left| \sum_{k=1}^m x_{ik} \cdot x_{jk} \right|}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^m x_{ik}^2 \right) \left(\sum_{k=1}^m x_{jk}^2 \right)}} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

Aslında bu denklemin payını iki vektörün skalar çarpım teşkil eder. Paydada kök içinde bulunan terimlerin herbiri, bu vektörlerin ayrı ayrı uzunluklarını gösterir. Vektörler birbirine dik oldukları zaman, yani aralarındaki açı 90° ise birbirine benzemez. Böyle bir durumda vektörler birbirinden bağımsız olduğundan denklemin vereceği sonuçta sıfıra eşit olur.

EB-EK Yöntemi : Bu hesaplama açısından, kosinüs genliği yönteminden daha koydur. Her ne kadar isim daha önce izah edilen ikili ilişki matrisinden yararlanarak bir üçüncüsünün bulunmasında kullanılan yöntem benzemekte ise de, buradaki hesaplamalar ondan farklıdır. Bu yöntemin formülasyonu

$$r_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m EK(x_{ik}, x_{jk})}{\sum_{k=1}^m EB(x_{ik}, x_{jk})} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n)$$

şeklindedir (Ross, 1995).

2.9. Bulanık Sistemler

İngilizce'de "fuzzy" kelimesine karşı gelen Türkçe'deki **bulanık** kelimesinin genel olarak puslu, dumanlı, kesinlikle ayırt edilemeyen, kesin olmayan, belirsiz, kafa karıştıran müphem bir dizi anlamı vardır. Bu kitapta teknik açıdan fuzzy'nin tercümesi olarak **bulanık** kelimesi kullanılacaktır. Bulanıklığın anlamı, bir araştırmacının incelediği konunun kendisi tarafından tam kesinlikle bilinmemesi durumunda sahip olduğu eksik ve belirsiz bilgilerin tümüdür. Böylece araştırmacı, klasik analitik yöntemler ve dinamik ve korunum ilkeleri (enerjinin, maddenin, momentumun korunumları gibi) elde ettiği denklemleri, verilerinde ve bilgilerinde belirsizlik yani bulanıklık bulunduğu için doğrudan kullanamaz. Araştırmacının incelediği olay veya mekanizma sadece kesin kurallı ve çıkarımlarında kabul ve varsayımlar olan denklemler yerine, onların tamamlayıcısı olarak mevcut ilgili sözel ve oldukça belirsiz bilgiler de göz önünde tutularak modellenebilir. Bulanık ilkelerin yardımı ile olayların incelenmesinde veri ve bilgi bakımından bir bulanıklık söz konusu ise de, bulanık yöntemlerin işleyişi tamamen belirgindir. Araştırmacıların bulanık sistemleri kullanması için genel olarak iki sebep vardır. Bunlar:

- 1) Gerçek dünya olaylarının çok karmaşık olması dolayısı ile bu olayların belirgin denklemlerle tanımlanarak kesinlikle kontrol altına alınması mümkün olmaz. Bunun doğal sonucu olarak araştırmacı kesin olmasa bile yaklaşık fakat çözünebilirliği olan yöntemlere baş vurmaya her zaman tercih eder. Zaten Einstein'ın da dediği gibi, gerçek

olaylar matematik denklemlerle kesinlikle ifade edilebiliyor denirse, denklemlerin kesinliğinden, yok matematik denklemler gerçeği kesin olarak tasvir edebiliyor sonucuna varılırsa, bu sefer de, gerçek dünya olaylarından söz edilemez. O halde, yapılan bütün çalışmalarda çözümler bir dereceye kadar yaklaşıktır. Aksi takdirde, çok sayıda doğrusal olmayan denklemlerin aynı zamanlı olarak çözülmesi gerekir ki, bunun günümüz bilgilerine göre belirgin olmayan **kaotik** (buhranlı) çözümlere yol açacağı bilinmektedir (Lorenz , 1963). Burada söylenmesinde yarar bulunan bir durum, **kaotik** incelenen olayı temsil ettiği ileriye sürülen denklemlerin hepsinin çözümü sayısal verilere gerek gösterir.

- 2) Mühendislikte bütün teori ve denklemler gerçek dünyayı yaklaşık bir şekilde ifade eder. Birçok gerçek sistem doğrusal olmamasına (nonlineer) rağmen bunların klasik yöntemlerle incelenmesinde doğrusallık kabulünü işin içine koymak için her türlü gayret sarf edilir. Örneğin, mukavemet hesaplarında malzemenin gerilme altında doğrusal şekil değiştirmeler ortaya çıkaracağı, Hooke kanunu ile kesinleştirilmiştir. Halbuki, malzemenin her zaman bu şekilde davranılması beklenemez ve bu sebeple küçükte olsa bazı sapmaların olması beklenir. Zaten bunun doğal sonucu olarak, mukavemet boyutlandırmalarında **emniyet katsayısı** gibi bir büyüklük hesaplara ithal edilerek olabilecek belirsizlikler yine belirgin bir şekilde göz önünde tutulmuştur. Emniyet katsayısının kullanılması bir bakıma belirsizliklerin arka kapıdan çözümün içine katı bir şekilde sokulmasıdır. Halbuki, gerçek olayların davranışlarında emniyet katsayısı gibi bir büyüklüğe gerek kalmadan boyutlandırmaların yapılması durumunda belirsizlik ilkelerine gerek duyulur.
- 3) Günümüzde bilgi çağı ve bunun getirdiği sözel verilere önem verilmektedir. Bunun sebebi, insanların bir cihaz gibi sayısal değil de yaklaşık sözel verilerle konuşarak anlaşmasıdır. Sözel veriler gün geçtikçe önemini artırmaktadır. Bu sözel insan verilerini, bir sistem içinde formüle ederek, cihazların verdiği sayısal bilgilerle beraber mühendislik sistemlerinde göz önünde tutmak gerekmektedir. Bulanık sistemlerin asıl işleyeceği konu bu tür bilgilerin bulunması halinde, çözümlenmelere gitmek için nasıl düşünüleceğidir. İyi bir mühendislik teorisinin incelenen olayın önemli bazı özelliklerini yakalayarak onu yaklaşık bir biçimde modellemesi ve matematik bakımdan karmaşık olmayacak çözümlerle kontrol altına alması beklenir. Aslında bulanık yöntemlerle bir sistemin modellenmesinde de yaklaşıklık ve oldukça kolay çözümlülük bulunur. Bu bakımdan sistemler teorik ve matematik aksiyomlu yaklaşımlardan bağımsız bir çözüm

algoritmasını temsil eder. Mühendislik yaklaşımlarında, elde edilebilen tüm sayısal ve sözel bilgilerin çözüm algoritmasına katılarak bunların kontrolünde anlamlı çözümlere varılabilmelidir. Bu bakımdan bulanık küme, mantık ve sistem ilkeleri, uzman kişilerin de vereceği sözel bilgileri işleyerek toptan çözüme gitmeye yarar. Halbuki, teorik matematik ve diferansiyel hesaplamalarda sadece sayısal değerler kullanılır. Örneğin, taşkın çalışmalarının yapılmasındaki risk hesaplamaları, su toplama havzasının alan, eğim, drenaj yoğunluğu, yağış ve akışın şiddeti, tekerrür süresi gibi sayısal değerlerinin yanında, o bölgede yaşayanlardan elde edilen sözel bilgiler ile arazide geçmiş taşkınların bıraktıkları izlerin düşük, orta veya çok derin debileri geçirdiği şeklindeki sözel bilgiler de hesaplamalara katılmalıdır. Bunun için bulanık sistemlerin iyi bilinmesi gerekir.

İnsanların sunduğu sözel bilgilerin sayısal hale getirilerek bilgisayarlar veya algoritmalar tarafından algılanarak hesaplamaların yapılabilmesi için bulanık sistemlere gerek vardır.

İnsanlar doğal sözel ifadelerle etkileşim içinde bulunduğu zaman bunları incelenerek sorun ile ilgili olabilecekleri kendi aralarında yargılama sonucunda değişik ilişkiler ile ortaya bir takım kurallar çıkarırlar. Bu makul ve mantıksal olan kuralları bugün için matematikte bilenen yöntemler, diferansiyel ve integral hesaplamalarla ifade etmek mümkün değildir. Gerekli çözümlere ulaşabilmek için basit bulanık küme hesaplamaları ile bulanık alt kümeler arasında geçerli ilişkiyi sağlayacak bulanık küme kural yapılarının iyi bilinmesi gereklidir. Doğal diller ne kadar karmaşık, müphem ve belirgin olmasalar bile, insan iletişiminin temelini teşkil etmeleri bakımından çok önemlidir. Bunun için bulanık söz ve ifadeleri, kümelerle işleyebilecek kural ve işlemlere gerek vardır.

Bu bölümde bulanık alt kümelerden oluşan bulanık kural yapıları ve bunlardan elde edilebilecek çıkarımlar hakkında temel bilgiler verilecektir. Bu kuralların kurulmasında ve incelenen olayla ilgili ve geçerli olanlarının belirlenmesinde, ilk adımda olayın işleyiş mekanizmasının mantık kurallarına ihtiyaç duyulacaktır.

2.9.1. Doğal Dil

Temel insan düşüncesi, öncelikle kavramsal şekiller ve akıl görüntüleri şeklinde gelişerek olgunlaşır ve daha ziyade sayısal değildir. Sayısal belirginlikler, bu kavram ve olguların gelişerek olgunlaşmasından sonra ortaya çıkar. Yani, insan düşünce sisteminin ilk aşamaları

oldukça bulanıktır. Zaman içinde berraklaşarak durulabilir ve daha belirgin hale gelir. Makinalara insan düşüncesini anlatabilmek için yaklaşık bile olsa makinalar tarafından algılamaya yarayacak yöntemlerin geliştirilmesi gerekir. Bu konuda, ilk adım bulanık küme mantık ve sistemler olmuştur. Bunun nedenleri arasında, insan iletişimde kullanılan bilgilerin doğasında sıkça müphemlik, belirsizlik, bulutluluk, karmaşıklık, sağlıksızlık gibi durumları bulunması gerekir. İşte bu düşünce öğelerinin kelimelerle ifadesinde bazı bulanık kelimelerin bulanık kümelerle modellenmesi ve bunların kendi aralarındaki ilişkilerle daha karmaşık ifadelerin ortaya çıkararak modellenmesi yoluna gidilir. Bulanık küme kavramları, sözelden sayısal geçiş için bir köprü vazifesi görür. Günlük kullandığımız dilde tıpkı maddenin temel taşları olan atomlar gibi anlam temsil eden en küçük kelimelere de edebiyatta **kelime atomları** denilebilir. İşte herşey, bu kelime atomlarının bulanık olarak modellenmesi ile başlar. Kelime atomları arasında ‘güzel’, ‘orta’, ‘genç’, ‘az’, ‘yavaş’, ‘alçak’ ve daha birçok kelimeler vardır. Bunların başlarına sıfatlar getirilerek daha da bulanık veya göreceli olarak durulaşmış veya bulanıklaşmış başka kelimeler elde edilebilir. Mesela, ‘çok yavaş’, ‘fazla sıcak’, ‘çok çok güzel’, ‘aşağı yukarı genç’ gibi kelimeler temel kelime atomlarından elde edilebilecek değişik bulanık kümeleri temsil eder.

Bulanık kümeler ile kelimelerin ifade edilmesi için özellikle X gibi doğal bir dilin kelimelerini içeren bir toplum kümesini, bu küme içinde α öğelerini, bunların anlam dünyasında A gibi bir bulanık kümesi ve α öğelerine karşı gelen üyelik derecelerini düşünelim. Bundan doğal bir dilin, X toplumdaki kelime atomlarının, Y toplumundaki anlamlarla eleştirilmesi anlaşılır. X toplumdaki her α öğesi Y anlam toplumundaki bir A bulanık kümesinin α öğesine karşılık gelir. Burada ‘genç’ kelime atomuna karşı gelebilecek bir bulanık alt kümeyi tanımlamaya çalışalım. Genç A bulanık kümesinin öğeleri

$$A = \text{'genç'} = \int_0^{25} \frac{1}{g} + \int_{25}^{100} \frac{1}{g} \left(1 + \left(\frac{g-25}{5} \right)^2 \right)^{-1}$$

Veya üyelik fonksiyonu

$$\ddot{u}(\text{genç}, g) = \left\{ \begin{array}{ll} \left(1 + \left(\frac{g-25}{5} \right)^2 \right)^{-1} & g \geq 25 \\ 1 & g \leq 25 \end{array} \right\}$$

Şeklinde yazılabilir. Benzer olarak, ‘yaşlı’ kelime atomunu ise aşağıdaki üyelik fonksiyonu ile sayısal ortama tercüme edilebilir.

$$\ddot{u}(\text{yaşlı}, y) = 1 - \left[1 + \left(\frac{y-50}{5} \right)^2 \right]^{-1} \quad 50 \leq y \leq 100$$

Yukarıdakilere benzer olarak, bir α kelime atomunun nasıl bulanık küme ile sayısal hale getirildiği önceki bölümlerde ve özellikle de Bölüm II’de ayrıntıları ile anlatılmıştır. İşte bu şekilde ifade edilen sözel kelimelerin sayısal değerlerini içeren üyelik fonksiyonlarına, o kelimenin yorumu adı verilir. Bu şekilde ifade edilen kelime atomlarından oluşan cümleleri teşkil edebilmek için ‘ve’, ‘veya’ ve/ya ‘değil’ gibi bağlaçlar kullanılarak küme işlemleri yapılır. Mesela bir toplulukta α ve β gibi iki kelime atomunun bulunduğunu var sayalım. Bunlardan elde edilen birleşik kelimenin bulanık küme işlemleri ile oluşturulmasında aşağıdaki işlemlerden yararlanır.

$$\alpha \text{ veya } \beta \quad : \ddot{u}_{\alpha \text{ veya } \beta}(y) = EB [\ddot{u}_{\alpha}(y), \ddot{u}_{\beta}(y)]$$

$$\alpha \text{ ve } \beta \quad : \ddot{u}_{\alpha \text{ ve } \beta}(y) = EK [\ddot{u}_{\alpha}(y), \ddot{u}_{\beta}(y)]$$

$$\alpha \text{ değil} \quad : \ddot{u}_{\alpha \text{ değil}}(y) = 1 - \ddot{u}_{\alpha}(y)$$

2.9.2. Sözel Eşikler (Linguistic Hedges)

Genel olarak, kelime atomlarının başlarına ilave edilen ön sıfatlarla anlamları biraz daha daraltılır veya genişletilir. Bu ön kelimeler arasında “çok”, “aşağı yukarı”, “takriben”,

“yaklaşık”, “oldukça”, “biraz”, “sıklıkla”, “kabaca ve burada listesinin yapılmayacağı kadar çok kelime bulunur. Ön sıfat kelimelerine sözel eşikler denilir. Bu kelimeler vasıtası ile tekil olan kelime atomunun anlamı değiştirilir. Bu değiştirilmiş anlamların üyelik fonksiyonları temel kelime atomlarının üyelik fonksiyonları üzerinde bazı işlemlerin yapılması ile elde edilir. Sözel eşik işlemleri, verilmiş olan birtek bulanık küme için yapılır. Böylece bu bulanık kümenin öge değerlerinde bir değişim olmaz ama üyelik dereceleri değişir. Zaten sözel eşik ana amacı, sadece üyelik derecelerini değiştirmektir. Mesela, “kırmızı” kelimesinin bir frekans aralığı vardır ki, bunlardan bir tanesinde gerçekten kırmızı, değerlerinde ise kırmızının tonları vardır. Bu durum, “kırmızı” isimli bir bulanık kümenin frekans uzayında üyelik fonksiyonu ile belirlenir. İşte bu üyelik fonksiyonundaki üyelik derecelerinin değiştirilmesi ile frekans uzayındaki kırmızıyı temsil eden frekanslarının bazılarının üyelik dereceleri azaltılır, çoğaltılır veya bir kısmı azaltılarak diğer kısmı da çoğaltılır. Böylece, aynı “kırmızı” için değişik ön kelimeli “kırmızı”lıkları çıkar.

Genel olarak, α gibi bir kelime atomunun eşikleri aşağıdaki ifadelerden biri olur. Eğer α kelime atomunun üyelik fonksiyonu $\alpha = / \ddot{u} \alpha (y) / y$ olarak verilmiş ise

$$\text{'çok'} \quad \alpha = \alpha^2 = / \ddot{u} \alpha^2 (y) / y$$

$$\text{'çok, çok'} \quad \alpha = \alpha^4$$

$$\text{'artı'} \quad \alpha = \alpha^{1.25}$$

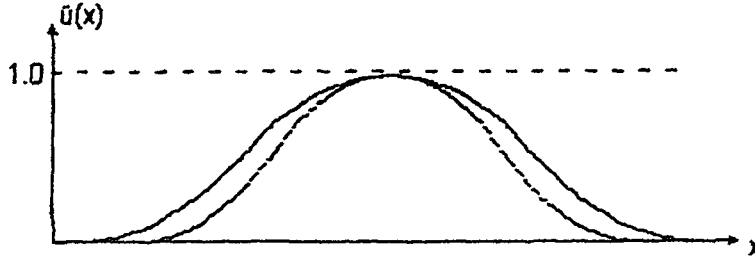
$$\text{'oldukça'} \quad \alpha = \sqrt{\alpha} = / \ddot{u} \alpha^{0.5} (y) / y$$

$$\text{'eksi'} \quad \alpha = \alpha^{0.75}$$

Ve bu ifadeler yazılabilir.

2.9.3. Daraltma (Concentration)

Önceki kısmın sonunda olan 5 eşitlikten, ilk 3 tanesi üyelik fonksiyonunun 1'den büyük kuvvetlerinin alınmış olması ve üyelik derecelerinin sayısal olarak 0 ile 1 arasında olması nedenlerinden dolayı elde edilen yeni üyelik fonksiyonları Şekil 2.32'de gösterildiği gibi bulanık A kümesi daralmış bulanık A_D kümesi haline gelir. Bunun anlamı sözel eşikler daha belirgin hale gelmiştir.

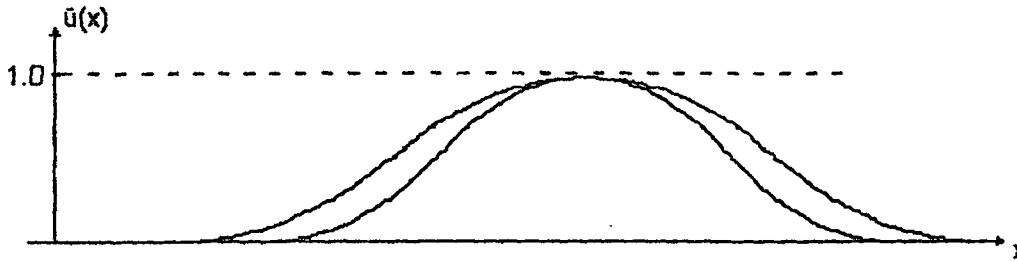


Şekil 2.32. Üyelik fonksiyonu daraltılması

Daraltma işlemi sonucunda bulanık kümede bulunan öğelerin üyelik derecelerinin tümünde azalma olur. Böylece daralmış bulanık küme başlangıç alt kümesi tarafından içerilir. Üyelik derecesi küçük olan bir öğenin daraltma işlemi sonucunda üyelik derecesi daha da küçülür. Mesela, “çok” a işlemi için gerekli olan üyelik fonksiyonunun karesinin alınması sonucunda, üyelik derecesi 0.9 olan bir öğenin yeni bulanık kümedeki üyelik derecesi 0.81’e düşerken yaklaşık % 10 kadar azalır, ama üyelik derecesi 0.1 olan bir öğenin daralmış bulanık kümedeki üyelik derecesi 0.01’e düşerek % 100’e yakın bir biçimde azalır.

2.9.4. Genişletme (Dilation)

Benzer şekilde yukarıda belirlenen 5 eşitliğin son ikisinde, üyelik fonksiyonu işleminin kuvvetinin alınması, 1’den daha küçük kuvvet kullanıldığından yeni üyelik derecesinde bir genişleme ortaya çıkacaktır. Bunun sonucunda A bulanık kümesi A_G gibi genişlemiş bulanık küme haline gelir (Şekil 2.33) .

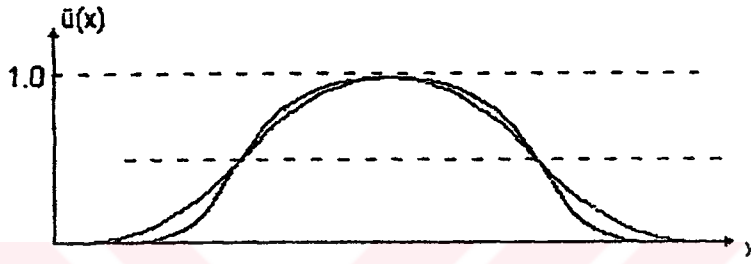


Şekil 2.33. Üyelik fonksiyonu genişletmesi

Böylece verilen bir bulanık kümenin tüm öğelerinin üyelik derecelerinde artma meydana gelir. Bir başka anlamda başlangıç bulanık kümesi genişlemiş bulanık küme tarafından içerilir. Genişleme işlemi sonucunda düşük üyelik dereceleri büyük üyelik derecelerine göre daha fazla artar.

2.9.5 Yoğunlaştırma (Intensification)

Eğer, bir bulanık kümenin bazı öğelerinin üyelik dereceleri azaltmakta ve diğerleri çoğaltmakta ise, bu işleme **yoğunlaştırma** adı verilir. Genel olarak, verilen bir bulanık kümedeki öğelerin üyelik derecelerinin 0,5’den büyük olanlarının üyelik dereceleri genişleyerek artarken, 0,5’den küçük olanların ki daralarak azalır. Böylece yoğunlaştırılmış AY bulanık kümesi elde edilir. Şekil 2.34’de görüldüğü gibi bu işlem verilen bir üyelik fonksiyonunun geçiş bölgelerinin daha dik olmasını temin eder.



Şekil 2.34. Üyelik fonksiyonu yoğunlaşması

Zadeh (1972) tarafından sunulduğu üzere yoğunlaştırma için bir takım matematik işlemleri kullanılır. Bunlar arasında en yaygın olarak aşağıdaki eşitlikler geçerlidir.

$$\text{'yoğunlaştır' } \alpha = \left\{ \begin{array}{ll} 2\bar{u}_{\alpha}^2(y) & 0 \leq \bar{u}_{\alpha}(y) \leq 0.5 \\ 1 - 2[1 - (1 - \bar{u}_{\alpha}(y))]^2 & 0.5 \leq \bar{u}_{\alpha}(y) \leq 1.0 \end{array} \right\}$$

Yoğunlaştırma işlemi sonucunda öğelerden yarısının diğer yarısına göre netliğinde (contrast) bir artış meydana gelir.

Yukarıda izah edilen işlemlerden başka, kelime atomlarına mantık bağlaçları (ve, veya ve değil) ve sözel eşikler katarak daha da karmaşık durumlar elde etmek mümkündür. Mesela, “çok, çok, çok” a ve a’nın “oldukça az” olması durumu gibi. Kelime atomunun üyelik fonksiyonunun şekli bilindiğine göre, gerekli bulanık küme işlemlerinin tamamlanması ile bu karmaşık ifadeler birer birer hesaplanarak istenilen sonuca varılabilir. Bu işlemlerin bir sıra dahilinde yapılması yararlıdır. Mesela “küçük” ve “kırmızı” gibi iki tane kelime atomunun üyelik fonksiyonları verildiği zaman bunlardan üretilen “küçük değil” ve “çok kırmızı” elma ifadesini elde etmek için önce “değil ve “çok” işlemleri yapılır ve daha sonra “ve” bağlaç

kelimesi ile elde edilen üyelik fonksiyonları kesiştirilir. İşlemlerin önceliğini belirtmek için en sağ taraftan başlayarak parantez içindeki ifadeler tıpkı bir bilgisayar yazılımındaki gibi işlenir. Mesela, artı (çok(oldukça(az(küçük)))) İfadesi gibi.

Üyelik fonksiyonunun kullanılması kelime atomlarına ve bunlardan teşkil edilen karmaşık ifadelere bir elastikiyet kazandırır. Bu elastikiyet sayesinde kelimelere kişisellik (sübjektiflik) ve tarafılık gibi özelliklerin de kazandırılması mümkündür. Bunlar sözel değişkenlerin bulanıklaştırılmasından sağlanacak faydalardan sadece birkaçını gösterir. Böylece doğal lisan içindeki ifadelerin bulanıklaştırılarak insan bilgisinin bilgisayarlarda işlenebilir hale gelmesi ile artık yapay zeka yolları açılmıştır. Bilgisayarlara sadece sayısal verileri değil, ilave olarak sözel bilgileri de işleme tabi tutabilen ve böylece insan düşüncesine daha yakın olabilen makinalar gözü ile bakılabilir. Sözel bilgi işlemede sırası ile önce sözel eşikler ve “değil” işlemleri daha sonra “ve” en sonra da “veya” bağlaçları işleme konur.

Kelime atomları ve bunların karışımından ortaya çıkan terimlerin kullanılmasında sözel eşiklerde sözel bazı olabilirlik ifadelerine de yer verilebilir. Bu ifadeler arasında “olabilir”, “çok olabilir”, “fazlaca olabilir”, “olamaz” gibi kelimelere ilave olarak, nitelik belirleyen “gerçek” , oldukça gerçek”, “çok doğru”, “yanlış”, “oldukça yanlış” ve “çok yanlış” gibi kelimeler de kullanılabilir. Aslında benzerlik kelimeleri, ihtimaller teorisinde oldukça yaygın bir biçimde kullanılmıştır. Mesela, X gibi bir küme öğelerinin ihtimal değerlerinden meydana geldiğini kabul edelim.

$$X = \{0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0\}$$

Bundan yararlanarak “yüksekçe olamayan” ifadesini hesaplamaya çalışalım. Bu ifadede “yüksekçe” ve “olamayan” kelimeleri sırası ile

$$\text{“yüksekçe”} = \text{“eksi çok çok”} = (\text{çok çok})^{0.75}$$

ve

$$\text{“olamayan”} = \text{“olabilir değil.”}$$

temel kelimeleri ile ifade edilebilir. Eğer “olabilir” kelimesinin verilen küme üzerindeki bulanık hali,

“olabilir”=

$$\{1/1 + 1/0.9 + 1/0.8 + 0.8/0.7 + 0.6/0.6 + 0.5/0.5 + 0.3/0.4 + 0.2/0.3\}$$

şeklinde tanımlanırsa,

“olamayan”=‘1-olabilir’=

$$\{1/0 + 1/0.1 + 1/0.2 + 0.8/0.3 + 0.7/0.4 + 0.5/0.5 + 0.4/0.6 + 0.2/0.7\}$$

haline gelir. Buradan da ,

$$\text{“çok çok olamayan”} = (\text{olamayan}) = \{1/0 + 1/0.1 + 1/0.2 + 0.4/0.3 + 0.2/0.4\}$$

elde edilir ki bunun elde edilişi sırasında üyelik dereceleri 0.1’den küçük olanlar yazılmamıştır. Son olarakta,

“yüksekçeolmayan”=‘eskiçokçokolmayan’=

$$\{1/0 + 1/0.1 + 1/0.2 + 0.4/0.3 + 0.2/0.4\}^{0.75}$$

bulunur. Günlük dilde kullanılan “evet”, “olabilir” ve “hayır” gibi kelimelerde, sırası ile “çok çok olabilir” , “olabilir “ ve “ çok çok olamaz” ifadelerinin üyelik fonksiyonları ile ifade edilebilirler.

2.10 Bulanık Kuralların Harmanlanması

Bir sistemin modellenmesinde birden fazla kural tabanlı bulanık ifadelere gerek vardır. Tüm sistem için bir sonuca varabilmek için herbir kuralın çıkarım kısmında yani İSE kelimesi sonrasında ortaya çıkan sonuçların bir şekilde harmanlanarak hepsinin katkısı olan bir genel çıkarıma gitmek gereklidir. İşte fazlaca olan kural tabanlı çıkarımların harmanlanması için kullanılan iki yaklaşım vardır. Bunlardan ilki kuralların “ve” bağlacı ile bağlanması sonucunda elde edilir. Burada sistemi temsil eden ve gerçekleşen kuralların tümü “ve”

bağlacı ile birleştirilir. Yani kümeler teorisine göre bunların kesişimleri alınır. Bu takdirde, harmanlanmış çıkarım y , tekil bulanık çıkarımların, y^i , ($i=1, 2, \dots, r$) kesişimi olarak elde edilir. Yani

$$y = y^1 \text{ ve } y^2 \text{ ve } y^3 \text{ ve } \dots \text{ ve } y^r$$

veya

$$y = y^1 \cap y^2 \cap y^3 \cap \dots \cap y^r$$

şeklinde yazılır. Bulanık kümeli çıkarımların bulunması durumunda ise üyelik fonksiyonlarının kullanılması ile harmanlanmış çıkarım

$$\mu_Y(y) = \text{EK} [\mu_{y^1}(y), \mu_{y^2}(y), \dots, \mu_{y^r}(y)]$$

olarak yapılır.

İkinci bir harmanlama usulü ise kural tabanlı tekil çıkarımların birleşimi şeklinde yapılır. Böyle bir harmanlamanın yapılması için kural tabanlı tekil çıkarımlardan en azından bir tanesinin doğru olması gereklidir.

$$y = y^1 \text{ veya } y^2 \text{ veya } y^3 \text{ veya } \dots \text{ veya } y^r$$

veya

$$y = y^1 \cup y^2 \cup y^3 \cup \dots \cup y^r$$

şeklinde yazılır. Bulanık kümeli çıkarımların bulunması durumunda ise üyelik fonksiyonlarının kullanılması ile harmanlanmış çıkarım

$$\mu_Y(y) = \text{EB} [\mu_{y^1}(y), \mu_{y^2}(y), \dots, \mu_{y^r}(y)]$$

bulunur.

2.11 Bulanık Sistem Yapıları

Bulanık sistemlerin çok büyük kısmı EĞER – O HALDE kuralları aracılığıyla tanımlanmıştır. Bu tür sistemler, “kural tabanlı bulanık sistemler” olarak adlandırılır ve tezin geri kalan kısmında bu türden sistemler irdelenecektir. Bulanık sistemler, modelleme, veri çözümlemesi, kestirim ve kontrol gibi farklı amaçlar için kullanılabilirler. Tez içerisinde, amacından bağımsız olarak, kural tabanlı bulanık sistemler kısaca “bulanık model” olarak adlandırılacaktır.

Saf bir bulanık sistem bulanık kural tabanı ve çıkarım mekanizmasından oluşur. Kural tabanında, bulanık EĞER – O HALDE kuralları bulunur. Diğer tüm bulanık sistemler de bu iki yapıya, yani bulanık kural tabanı ve çıkarım mekanizmasına sahiptir. Sistemin giriş ve çıkışlarının bulanık kümeler oluşu, onun mühendislik problemlerinde kullanımını kısıtladığından, bu problemi çözmek amacıyla kural tabanı ve çıkarım mekanizmasından oluşan temel yapıya bulandırıcı ve durulayıcı adı verilen iki birim eklenir. Bulandırıcı gerçel değerli sistem girişini bulanık kümelere dönüştürürken, durulayıcı, tersine, çıkarım mekanizmasının ürettiği bulanık kümeleri gerçel değerli sistem çıkışına dönüştürür. Bu tür bulanık sistemlere ilişkin blok şema Şekil 2.2’de verilmiştir. Çok girişli, tek çıkışlı bir sisteme ait bulanık kural tabanı

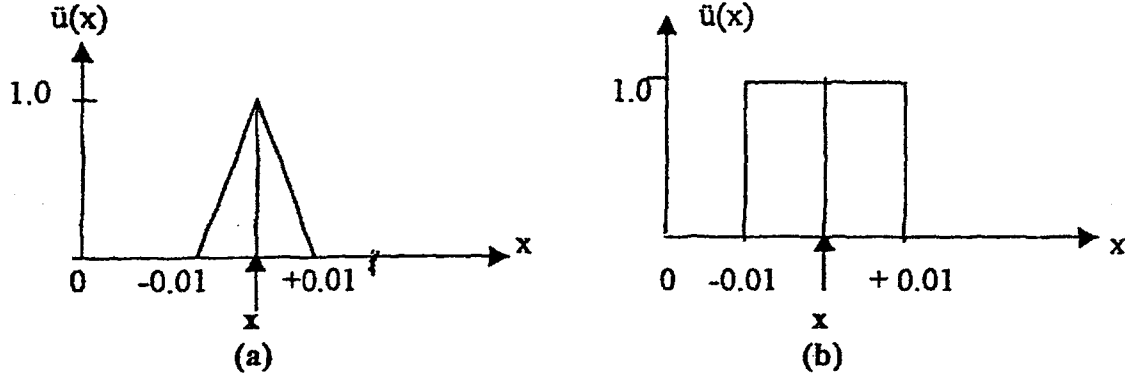
$$K_i = \text{EĞER } x_1, A_{i1} \text{ ve } x_2, A_{i2} \text{ ve } \dots x_p, A_{ip} \text{ ise O HALDE } y B_i, \quad i=1, 2, \dots, r \quad (2.1)$$

Şeklinde verilen kurallardan oluşur. Buralarda $x = (x_1, x_2, \dots, x_p)^T$ girişleri, y çıkışı, A_{ij} ($j = 1, 2, \dots, p$) ve B_i bulanık kümeleri, r ise kural sayısını göstermektedir.

Herhangi bir x girişi için bulanık kural tabanından en az bir kural bulunabiliyorsa ki, buna K_k diyelim,

$$A_{kj}(x_j) \neq 0, \quad \forall j = 1, 2, \dots, p$$

olsun. Bu durumda bulanık EĞER – O HALDE kümesi “tamdır” denir. Bu, herhangi bir giriş için en az bir kuralın değerlendirildiği anlamına gelir.



Şekil 2.36. Hassaslık (a) bulanık (b) klasik

Buradan, bulanık **prezisyonun** pratikte mantıki olarak daha sağlıklı bir tanım olduğu ortaya çıkar. Böylece, **prezisyon** kelimesinden ve değerinden bulanık üyelik fonksiyonunun üçgen şeklinde olması akla ilk gelen durumdur.

Bulandırıcı, gerçel girişleri bulanık kümelere dönüştüren ve böylece bunların bulanık çıkarım mekanizmasında değerlendirilmelerine olanak sağlayan birimdir. Bulandırıcıda gerçel bir giriş değerine bulanık küme karşı düşürüldüğünde, girişin, o bulanık kümedeki üyelik derecesinin en büyük değeri almasına dikkat edilmelidir. Bulandırma işlemi çıkarım mekanizmasındaki hesaplamaları daha da güçleştirecek karmaşıklıktan uzak olmalıdır. Aslında bulandırma işlemi ölçme belirsizliklerinin ya da girişe etkileyen bozucuların bir şekilde temsil edilmesi olarak da düşünülebilir.

Destek bölgesi, nokta olan üyelik fonksiyonlarla ifade edilen bulanık kümelere “singleton” denir. Singleton bulandırıcı ise gerçel giriş büyüklüğüne 1, onun dışındakilere 0 değerini atayan bulandırıcı türüdür. Bu, onun hesap kolaylığı sağlamasına karşın giriş belirsizliklerini ya da giriş bozucu etkilerini iyi temsil etmemesi anlamına gelir. Gauss ya da üçgen bulandırıcılar giriş değerinin Gauss ya da üçgen biçimli üyelik fonksiyonları ile temsil edildiği yapılardır. Eğer bulanık “EĞER – O HALDE” kurallarında yer alan üyelik fonksiyonları bu iki tipten ise bu tür bulandırıcılar hesap zorluğuna neden olmadıkları gibi giriş belirsizliklerini de iyi temsil ederler (Driankov, 1993).

2.11.2. Bulanık Kural Tabanı

Veri tabanındaki girişleri çıkış değişkenlerine bağlayan mantıksal **EĞER –İSE** türünde yazılabilen bütün kuralların tümünü içerir. Bu kuralların yazılmasında sadece girdi verileri ile

çıktılar arasında olabilecek tüm aralık (bulanık küme) bağlantıları düşünülür. Böylece, herbir kural girdi uzayının bir parçasını çıktı uzayına mantıksal olarak bağlar. İşte bu bağlamların tümü kural tabanını oluşturur.

2.11.3 Bulanık Çıkarım Mekanizması

Bulanık çıkarım mekanizması, bulanık kural tabanında bulunan bulanık EĞER – O HALDE kuralları yardımıyla X giriş uzayından seçilen bir A bulanık kümesini Y çıkış uzayında bir B bulanık kümesine dönüştüren birimdir. $R_i : X \times Y$ de bir bulanık bağıntı olsun ve (2.1) ile temsil edilsin. Yani $R_i) : A_{i1} \times A_{i2} \times \dots \times A_{ip} \rightarrow B_i$ olsun. Burada $A_{i1} \times A_{i2} \times \dots \times A_{ip} (x_1, x_2, \dots, x_p) = A_{i1} (x_1) * A_{i2} (x_2) * \dots * A_{ip} (x_p)$ ve $*$ işlemi bir bulanık kesişimi belirtmek üzere $X = X_1 \times X_2 \times \dots \times X_p$ 'de bir bulanık bağıntı olarak ifade edilir. “ \rightarrow ” sembolü ise bir bulanık gerektirme bağlacını temsil etmektedir. Tezin ilerleyen kısımlarında çıkarım mekanizması ve bulanık kural tabanı ile ilgili daha geniş açıklamalar yapılacaktır.

2.11.4. Durulayıcı

Önceki bölümlerde bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarının nasıl bulunacağı hakkında gerekli temel bilgi ve yöntemlerden bahsedilmiştir. Pratik uygulamalarda, özellikle cihaz ve mühendislik plan, proje ve tasarımlarında boyutlandırılmalar için kesin sayısal değerlere gerek duyulmaktadır. İşte bu durumlarda bulanık olarak elde edilmiş veya verilmiş bilgilerden yararlanarak gerekli cevapların verilmesi için bulanık olan bilgilerin durulaştırılması gerekmektedir. İnsanlar için yapay zeka çalışmalarında bulanık değişken, küme, mantık ve sistemler öneme sahip olmasına mukabil bunların bulanık olabilecek çıkarımlarının kesin sayılar haline dönüştürülmesi gerekir. İşte bulanık olan bilgilerin kesin sonuçlar haline dönüştürülmesi için yapılan işlemlerin birden **durulaştırma** işlemleri adı verilir.

2.11.4.1 Bulanık Kümelerin Lamda Kesimleri

Verilen bir A bulanık kümesinin, λ , 0 ile 1 arasında olmak üzere üyelik derecesinin belirli bir değerinde kesilmesi düşünülürse bunun sonucunda A_λ gibi klasik ve öğelerinin üyelik dereceleri sadece 0 veya 1 olan bir klasik küme ortaya çıkar. Burada A_λ notasyonunun

altında yatay çizgi işaretinin bulunmadığına dikkat ediniz. Bunun anlamı λ kesiminde elde edilen kümelerin klasik olmasıdır. Verilen bir bulanık küme sonsuz tane klasik küme çıkarılabilir. Yine A_λ kümesine ait olan bir x ögesi ($x \in A_\lambda$) üyelik derecesi en az λ kadar olan bir öge olarak A bulanık kümesine de aittir.

ÖRNEK:

$A = \{a, b, c, d, e, f\}$ gibi bir toplumun bulanık kümelerinden bir tanesinin

$$A = \{1/a, 0.9/b, 0.6/c, 0.3/d, 0.01/e, 0/f\}$$

Şeklinde verildiğini düşünelim. ;Ayrık olarak bu bulanık küme Şekil 5.1’de gösterilmiştir. Bu bulanık kümenin $\lambda = 1, 0.9, 0.6, 0.3, 0$ seviyelerinde kesilmesi ile ortaya çıkan klasik kümeler şunlardır.

2.11.4.2 Bulanık İlişkilerde Lamda Kesimleri

Beş elemanlı iki bulanık kümenin ortaya çıkaracağı ilişki matrisi, R aşağıdaki şekilde belirlenmiş olsun

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0.8 & 0 & 0.1 & 0.2 \\ 0.8 & 1 & 0.4 & 0 & 0.9 \\ 0 & 0.4 & 1 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0 & 0 & 0.5 & 1 \end{bmatrix}$$

Burada da kümeler için olduğu gibi λ kesimlerinden söz edilerek işlemler yapılabilir. Bu matris ilişkisinin $\lambda = 1.0, 0.9$ ve 0 kesimlerindeki matrisleri

$$\lambda = 1 \text{ için } R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$\lambda = 0.9 \text{ için } R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

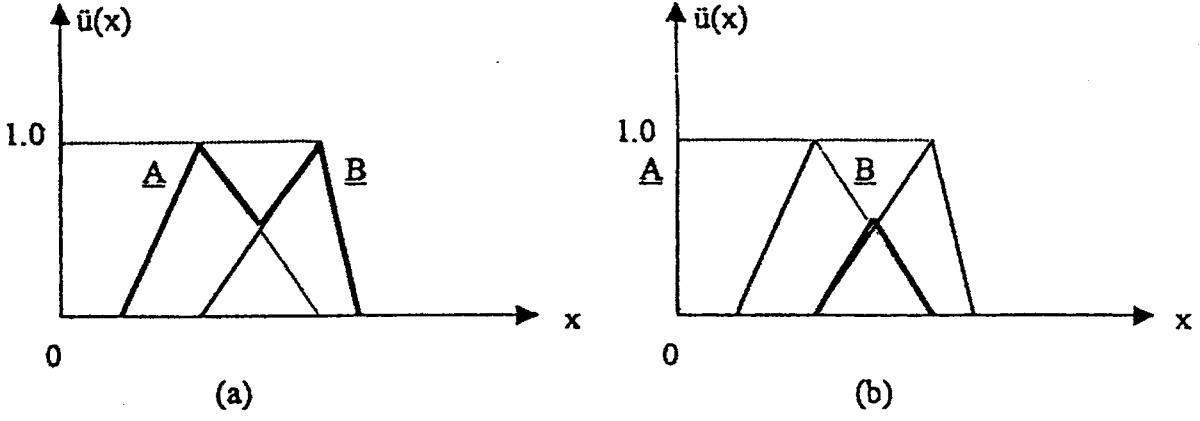
$$\lambda = 0 \text{ için } R = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Bulunur. Bulanık kümeler üzerinde yapılan λ kesimleri bazı kurallara uyar. Bunlar arasında şunlar vardır.

1. $(R \cup S)\lambda = R\lambda \cup S\lambda$
2. $(R \cap S)\lambda = R\lambda \cap S\lambda$
3. Herhangi bir λ değeri için $\lambda \leq \alpha$, $0 \leq \alpha \leq 1$, ise
 $R\alpha \subseteq R\lambda$

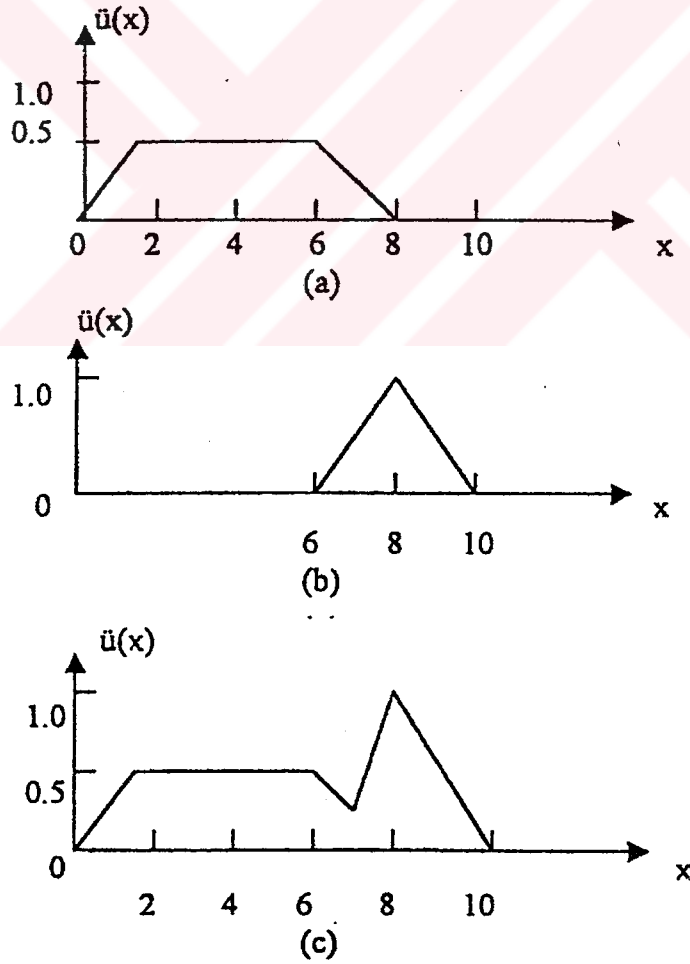
2.11.4.3 Durulaştırma İşlemleri

Daha öncede belirtildiği gibi bir bulanık küme işlemi sonucundaki bulanık kümenin tek sayı haline dönüştürülmesi gerekebilir. Bu bulanıklaştırma işleminin aksi olan durulaştırma işlemi ile yapılır. Yapılan işlemler sonrasında bulanık sonuçlardan bir tanesi Şekil 2.37a'daki gibi yamuk, diğerinin ise Şekil 2.37b'deki gibi üçgen şeklinde olduğunu düşünelim. Bunların ikisinin birleşimi ise yapılan son işlem sonrası bulanık çıkarım olsun. Şimdi bu son dış bükey olmayan bulanık kümeden tek sayılı bir tasarım büyüklüğünün çıkartılması düşünölsün. İşte bunun için durulaştırma işleminin yapılması gerekecektir.



Şekil 2.37. İki bulanık kümenin (a) birleşimi , (b) kesişimi

Tabii olarak şekilde, iki tane bulanık kümenin birleşimi sonucunda elde edilen bulanık çıkarım gösterilmiştir. Halbuki, değişik şekilleri olan çıkarımların iki veya daha fazla sayıdaki temel bulanık kümelerden çıkması mümkündür.



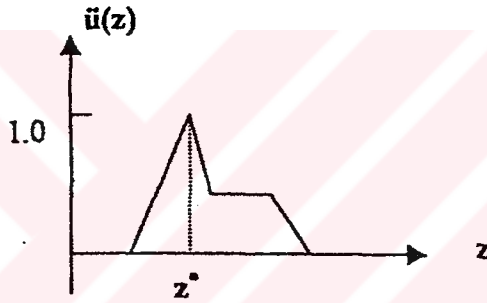
Şekil 2.38. Tipik bulanık küme çıktısı, (a) bulanık girdi ilk kısım, (b) bulanık girdi ikinci kısım, (c) ikisinin birleşimi

Aşağıda yedi tane durulaştırma işleminin esasları verilecektir. Bunların hangisinin kullanılacağına araştırma veya tasarımı yapan mühendis, elindeki sorunun türüne göre karar vermesi gereklidir. Aşağıdaki çıkarım bulanık kümesinin Z , öğelerinin z ve durulaştırılmış değerinin ise z^* ile gösterildiklerine dikkat edilmelidir.

1. **En büyük üyelik ilkesi** : Bunun diğer bir adı da yükseklik yöntemidir. Kullanılması için tepeleri olan çıkarım bulanık kümelerin gerek vardır. Şekil 2.39'da gösterilen bu durulaştırma işleminin aritmetik notasyon şeklinde gösterimi

$$\bar{u}_C(z^*) \geq \bar{u}_C(z) \text{ tüm } z \in Z$$

olur.

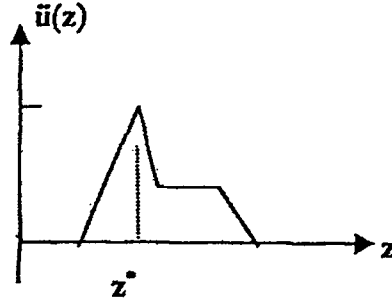


Şekil 2.39. En büyük üyelik derecesi durulaştırması

2. **Sentroid yöntemi** : Bunun diğer adı ağırlık merkezi yöntemidir. Durulaştırma işlemlerinde, belki de en yaygın olarak kullanılan işlem budur. Şekil 2.40'da gösterilmiş olan bu durulaştırmanın matematik işlemi aşağıdaki denklem vasıtası ile yapılır.

$$z^* = \frac{\int \bar{u}_C(z) \cdot z dz}{\int \bar{u}_C(z) dz}$$

burada / integral işaretini gösterir.

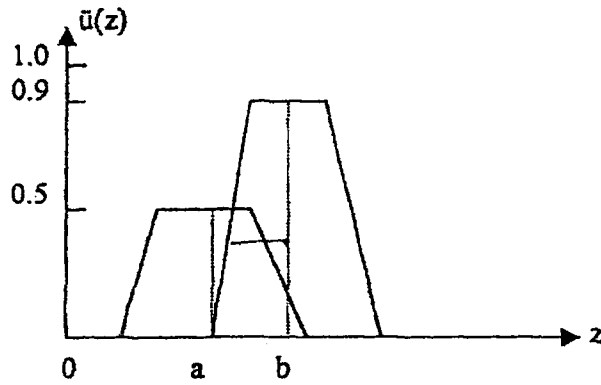


Şekil 2.40. Sentroid yöntemi ile durulaştırma

3. **Ağırlık ortalama yöntemi** : Bunun kullanılabilmesi için simetrik üyelik fonksiyonunun bulunması gereklidir. İşlemler matematik olarak

$$z^* = \frac{\sum \bar{u}_{\zeta}(z) \cdot z}{\sum \bar{u}_{\zeta}(z)}$$

Şeklinde yapılır. Burada \sum işareti cebir anlamında toplamayı gösterir. Bu durulaştırma işlemi Şekil 2.41'da gösterilmiştir. Böylece çıkışı oluşturan bulanık kümelerin üyelik fonksiyonlarının her biri sahip oldukları en büyük üyelik derecesi değeri ile çarpılarak ağırlıklı ortalamaları alınır.



Şekil 2.41. Ağırlıklı ortalama yöntemi ile durulaştırma

Örnek olarak Şekil 2.41'daki iki bulanık kümenin ağırlıklı ortalaması (durulaştırılmış değer)

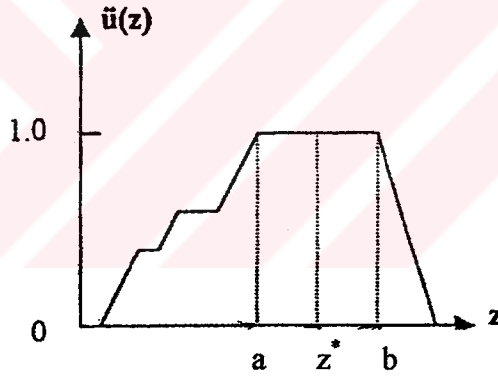
$$z^* = \frac{a(0.6) + b(0.9)}{0.6 + 0.9}$$

Olarak bulunur. Bu durulaştırma işlemi sadece simetrik olan üyelik fonksiyonları için geçerli olduğundan a ve b değerleri temsil ettikleri şekillerin ortalamalarıdır.

4. **Ortalama en büyük üyelik** : Bu yöntem aynı zamanda en büyüklerin ortası diye de bilinir. Bu bakımdan birinci durulaştırma ilkesine çok yakındır. Ancak, en büyük üyeliğin konumu tekil olmayabilir. Bunun anlamı üyelik fonksiyonunda en büyük üyelik derecesine sahip olan $\bar{u}_A(z)$ bir nokta yerine plato gibi düzlük kısmı bulunabilir. Şekil 2.42'de durulaştırma işlemi gösterilmiş olan bu yönteme göre durulaştırılmış değer

$$z^* = \frac{a + b}{2}$$

buradaki a ve b değerleri şekilde gösterilmiştir.

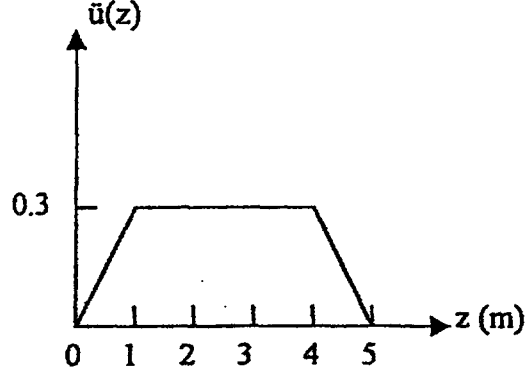


Şekil 2.42. Ortalama en büyük üyelik durulaştırması

5. **Toplamların merkezi** : Kullanılan durulaştırma işlemleri arasında en hızlı olan bu yöntemdir. Bu yöntemde iki bulanık kümenin birleşimi yerine onların cebirsel toplamı kullanılır. Bunun iki mahzuru örtüşen kısımların iki defa toplama girmesidir. Durulaştırılmış değer

$$z^* = \frac{\int_z \sum_{k=1}^n \bar{u}_C(z) dz}{\int_z \sum_{k=1}^n \bar{u}_C(z) dz}$$

Olarak hesap edilebilir. Bir bakıma, bu hesaplama tarzı, ağırlıklı ortalama durulaştırmasına benzer. Ancak toplamların merkezi yönteminde ağırlıklar ilgili üyelik fonksiyonlarının alanlarıdır. Ortalama ağırlıklar yönteminde ise bu herbir üyelik derecesidir. Toplamların merkezi ile durulaştırma işlemleri Şekil 2.43’de gösterilmiştir.

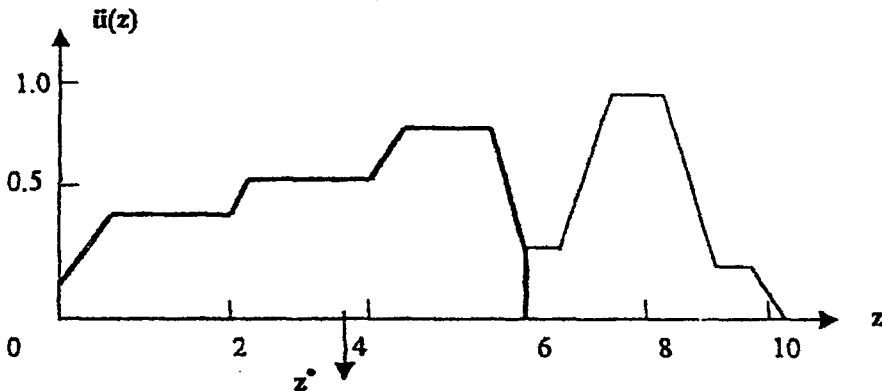


Şekil 2.43. Toplamların merkezi durulaştırması

6. **En büyük alanının merkezi** : Eğer çıkış bulanık kümesi en azından iki tane dış bükey alt bulanık kümeyi içeriyor ise, dış bükey bulanık kümelerin en büyük alanlısının ağırlık merkezi durulaştırma işleminde kullanılır. Şekil 2.44’te gösterilen durulaştırma işleminin matematik hesaplaması

$$Z^* = \frac{\int \bar{u}_{ebC}(z)zdz}{\int \bar{u}_{ebC}(z)dz}$$

Eşitliğine göre yapılır. Burada $\bar{u}_{ebC}(z)$ en büyük alanlı dış bükey bulanık kümenin hakim olduğu alt bölgeyi gösterir.



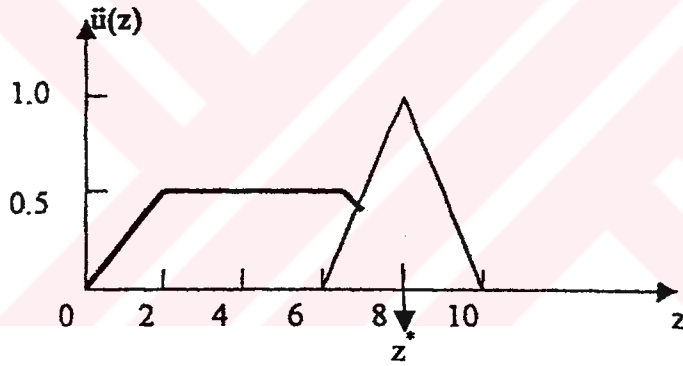
Şekil 2.44. En büyük alan merkezi ile durulaştırma

Bu şart tüm çıkarım bulanık kümesinin dış bükey olmadığı zaman kullanılır, ama tüm çıkarımın dış bükey olması durumunda z^* sentroid yöntemi ile elde edilenin aynısıdır.

7. **En büyük ilk veya son üyelik derecesi :** Bu yöntemde tüm çıktıların birleşimi olarak ortaya çıkan bulanık kümede en büyük üyelik derecesine sahip olan en küçük (veya en büyük) bulanık küme değerini seçmek esasına dayanır. Hesaplamaların vereceği z^* için aşağıdaki denklemler geçerlidir. Önce bulanık küme çıkarımı, B, birleşiminde en büyük yükseklik y_{eb} tespit edilir.

$$Y_{eb}(B) = EB [\bar{u}_B(z)]$$

Bundan sonra birinci en büyük değer, z^* , bulunur. Bu yöntemin bir diğer seçeneği ise ilk yerine son en büyük bulanık küme değerinin, z^* , bulunmasıdır. Bu durumlar Şekil 2.45'de gösterilmiştir.



Şekil 2.45. İlk ve son en büyük üyelik dereceleri ile durulaştırma

3. KURAL TABANLI BULANIK MODELLER

Kural tabanlı bulanık sistemlerde, değişkenler arasındaki ilişki bulanık EĞER-O HALDE kuralları ile ifade edilir. Bunun genel biçimi şu şekildedir:

EĞER öncül önerme ise O HALDE sonuç önerme

Öncül önerme her zaman “x, A” şeklinde bir bulanık önermedir. Burada x dilsel değişken ve A bir dilsel terimdir. Önermenin doğruluk değeri (sıfır ile bir arasında bir gerçel sayı) x ve A arasındaki uyum derecesine bağlıdır. Sonuç önermeye bağlı olarak 2 ana tip kural tabanlı model oluşturulmuştur (Babuska, Verbruggen, Hellendoorn, 1999):

- 1) Mamdani (dilsel) bulanık model: Öncül ve sonuç önermelerin ikisi de bulanık önermelerdir.
- 2) Takagi-Sugeno (T-S) bulanık model: Öncül bulanık önerme, sonuç ise belirgin (kesin) fonksiyondur.

3.1 Mamdani Bulanık Model:

Mamdani bulanık modeli, mevcut nitel bilgiyi EĞER-O HALDE kuralları biçiminde ifade etmek için öne sürülmüştür.

$$K_i : \text{EĞER } x \text{ } A_i \text{ ise O HALDE } y \text{ } B_i \text{ 'dir} \quad i=1,2,3,\dots,r \quad (3.1)$$

Burada x dilsel giriş değişkeni (öncül) ve A_i ler öncül dilsel terimlerdir. Benzer şekilde, y dilsel çıkış değişkeni (sonuç) ve B_i ler sonuç dilsel terimlerdir. A_i ve B_i dilsel terimleri, kendilerine ait temel değişkenlerin değer kümesinde tanımlanmış bulanık kümelerdir. Öncül ve sonuç bulanık kümelerin üyelik fonksiyonları

$$\mu(x): X \rightarrow [0,1] \quad \text{ve} \quad \mu(y): Y \rightarrow [0,1]$$

şekindedir.

A_i bulanık kümeleri, ilişkili sonuç önermenin bulunduğu öncül uzayında içindeki bulanık bölgelerde tanımlanır. A_i ve B_i dilsel terimleri, genellikle, KÜÇÜK, ORTA, BÜYÜK v.s, gibi önceden tanımlanmış terimlerden oluşan kümelerden seçilir. Bu kümeleri sırasıyla A ve B

olarak ifade edersek, $A_i \in A$ ve $B_i \in B$ yazılabilir. Kural tabanı $R = \{K_i \mid i = 1, 2, 3, \dots, r\}$ ve A ve B kümeleri dilsel modelin bilgi tabanını meydana getirirler.

Örnek 3.1:

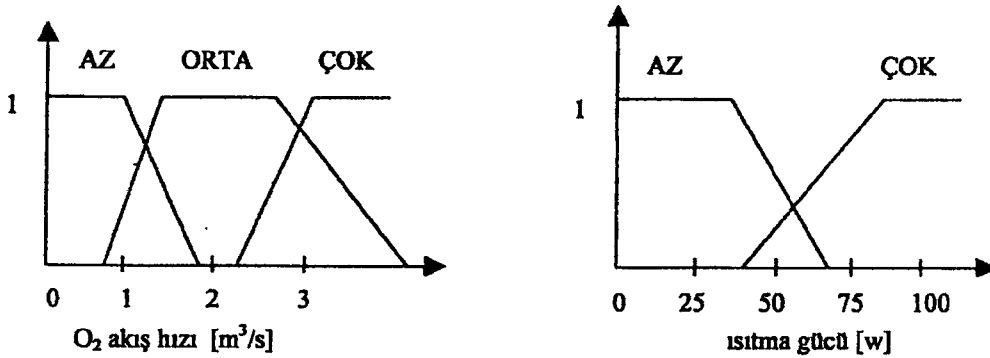
Bir ısıtıcı için sağlanan oksijen miktarının, ısıtma gücüne olan etkisi dilsel olarak tanımlayan basit bir bulanık model ele alalım. Elimizde, skaler giriş olan oksijen akış oranı (x) ve skaler çıkış, ısıtma gücü (y) bulunmaktadır. Öncül dilsel terimler kümesini $A = \{Az, Orta, Çok\}$ ve sonuç dilsel terimler kümesini ise $B = \{Az, Çok\}$ olarak tanımlayalım. Giriş ve çıkış arasındaki nitel ilişkilerden oluşan kurallar

K_1 : EĞER O_2 akış hızı AZ ise O HALDE ısıtma gücü AZ

K_2 : EĞER O_2 akış hızı ORTA ise O HALDE ısıtma gücü ÇOK

K_3 : EĞER O_2 akış hızı ÇOK ise O HALDE ISITMA gücü AZ

Şeklinde tanımlanabilir. Dilsel terimlerin anlamı, Şekil 3.1 de gösterildiği gibi, kendilerine ait üyelik fonksiyonları ile tanımlanır. Görüldüğü gibi dilsel terimlerin kesin bir tanımının yapılması mümkün değildir. Gazın ve ısıtma sisteminin türüne göre değişiklik gösterebilir.



Şekil 3.1. Üyelik fonksiyonları

Mamdani modeli kullanabilmek için, verilen bazı giriş değerlerinden çıkış değerlerini hesaplamamızı sağlayacak bir algoritmaya ihtiyacımız vardır. Bu algoritma, bulanık çıkarım

mekanizması (algoritması) olarak adlandırılmıştır. Dilsel model için, çıkarım mekanizması bir sonraki bölümde anlatılacağı gibi bulanık bağıntısal hesaplardan elde edilebilir.

3.1.1 Mamdani Modelinin Bağıntısal Gösterimi:

(3.1)'deki her bağıntı, bir bulanık bağıntı olarak gösterilebilir: $R_i : (X \times Y) \rightarrow [1, 0]$ Bu bağıntı, bulanık birleşme (Mamdani Metodu) ve bulanık gerektirme (bulanık mantık metodu) ile hesaplanır (Zeng, Singh, 1996). (3.1)'deki EĞER - O HALDE kuralı $A_i \rightarrow B_i$ (A_i gerektirir B_i) şeklinde olduğunda bulanık gerektirme kullanılır. Klasik mantıkta bunun anlamı önermenin doğruluğu için “eğer A olursa, B olmalıdır”dır. Öte yandan A olmadığında B'ye ne olacağı hakkında bir şey söylenemez ve ilişki ters çevrilemez.

Birleşme, $A_i \wedge B_i$, kullanıldığı zaman, EĞER – O HALDE kuralları “A ve B'nin aynı anda sağlandığı (olduğu) doğrudur” şeklinde yorumlanabilir. Bağıntı simetriktir ve ters çevrilebilir. R bağıntısı minimum (\wedge) operatörü ile hesaplanmıştır:

$$R_i = A_i * B_i, \text{ yani } \mu_{R_i}(x, y) = \mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_i}(y) \quad (3.2)$$

Minimum işlemi, X ve Y'nin Kartezyen çarpım uzayında hesaplanmıştır. Örneğin, tüm mümkün x ve y çiftleri (3.1) modelini ifade eden R ilişkisinin birleşimi ile verilmiştir.

$$R = \bigcup_{i=1}^r R_i, \text{ yani } \mu_R(x, y) = \max_{1 \leq i \leq r} [\mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_i}(y)] \quad (3.3)$$

Bu durumda tüm kural tabanı, R bulanık ilişkisi ile ifade edilmiştir. Dilsel modelin çıkışı bağıntısal max-min (o) operasyonu ile elde edilebilir:

$$y = x \circ R \quad (3.4)$$

Örnek 3.2 :

Örnek 3.1'de verilen Mamdani bulanık modeline ait bulanık bağıntıyı hesaplayalım. İlk adım olarak giriş ve çıkış tanım kümesini ayırklaştıralım: $X = \{0, 1, 2, 3\}$ ve $Y = \{0, 25, 50, 75, 100\}$.

Öncül ve sonuç dilsel terimlerine ait ayırık üyelik fonksiyonları Çizelge 3.1'de ve Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Öncül üyelik fonksiyonları

DİLSEL TERİMLER	Tanım kümesi elemanları			
	0	1	2	3
AZ	1.0	0.6	0.0	0.0
ORTA	0.0	0.4	1.0	0.4
ÇOK	0.0	0.0	0.1	1.0

Çizelge 3.2. Sonuç üyelik fonksiyonları

DİLSEL TERİMLER	Tanım kümesi elemanları				
	0	25	50	75	100
AZ	1.0	1.0	0.6	0.0	0.0
ÇOK	0.0	0.0	0.3	0.9	1.0

R_i bulanık bağıntıları, (3.1) denklemini aracılığıyla herbir kural için hesaplanabilir:

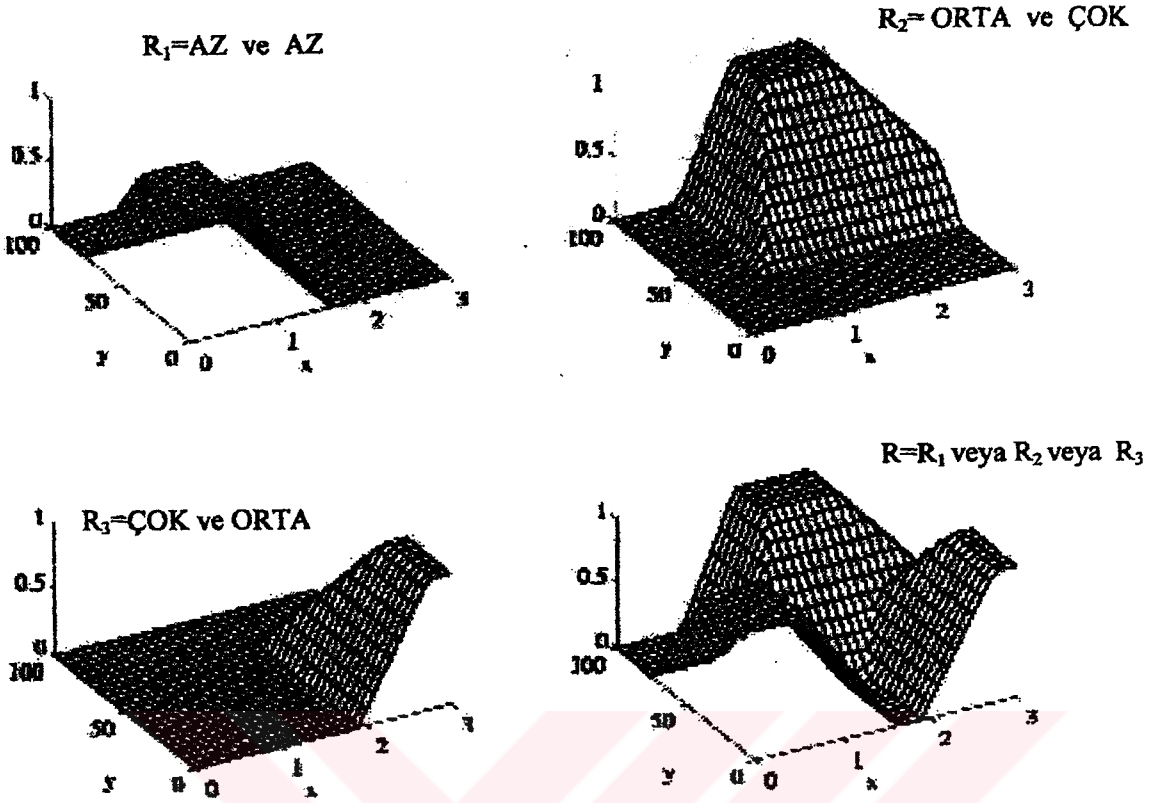
Kural 1 için $R_1 = AZ * AZ$,

Kural 2 için $R_2 = ORTA * ÇOK$ ve

Kural 3 için $R_3 = ÇOK * AZ$.

Tüm kural tabanını ifade eden R bulanık bağıntısı üç bağıntının birleşimidir.

Bu işlemin grafiksel olarak ifadeleri (sürekli üyelik fonksiyonları için) Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. R_1, R_2, R_3 ve R bağıntılarının grafik gösterimleri

Bulanık modele, $A' = [1, 0.6, 0.3, 0]$ gibi bir bulanık giriş uygulansın. Dilsel olarak bu girişi “AZ GİBİ” olarak ifade edebiliriz, yani AZ’a çok yakın ama AZ’a eşit değil. Aşağıda ifade edilen max-min çıkarımı sonucunda $B' = [1, 1, 0.6, 0.4, 0.4]$ bulanık çıkışı elde edilir.

$$\mu_{B'}(y) = \max_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)]$$

Elde edilen B' bulanık çıkışı beklenildiği gibi “YAKLAŞIK AZ” dilsel ifadesinin karşılığıdır.

3.1.2 Max – Min (Mamdani) Çıkarımı :

Bu bölümde, bağıntısal hesap yerine aynı max-min çıkarımı gösterilecektir. Bunun avantajı tanım kümesini ayrıklaştırmadan ve R bağıntısının hesabından kurtulmamızdır. Bu durumu açıklamak amacıyla verilen bağıntısal ifadeyle elde edilen B' değerinin, $x = A'$ giriş bulanık değerinden elde edildiğini kabul edelim.

$$\mu_{B'}(y) = \max_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_R(x, y)] \quad (3.5)$$

$[\mu_R(x, y)]$ yerine (3.3)'ü koyduğumuzda, bir sonraki ifade elde edilir:

$$\mu_{B'}(y) = \max_x \left[\mu_{A'}(x) \wedge \max_{1 \leq i \leq r} [\mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_i}(y)] \right] \quad (3.6)$$

Max ve Min (\wedge) operatörleri farklı tanım kümeleri üzerinde tanımlandığından sıraları değişebilir.

$$\mu_{B'}(y) = \max_{1 \leq i \leq r} \left[\max_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A_i}(x)] \wedge \mu_{B_i}(y) \right] \quad (3.7)$$

Bu ifade de, $\beta_i = \max_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A_i}(x)]$ ile gösterilir ve i'inci kuralın öncül “doğruluk değeri” olarak adlandırılır. Dolayısıyla Mamdani modelin, çıkış bulanık kümesi aşağıdaki gibidir (Babuska, Verbruggen, Hellendoorn, 1999).

$$\mu_{B'}(y) = \max_{1 \leq i \leq r} [\beta_i \wedge \mu_{B_i}(y)], \quad (3.8)$$

Tüm algoritma, “max-min” veya “Mamdani çıkarımı” olarak adlandırılır. Bu algoritma aşağıda özetlenmiş ve Şekil 3.3’de görsel hale getirilmiştir.

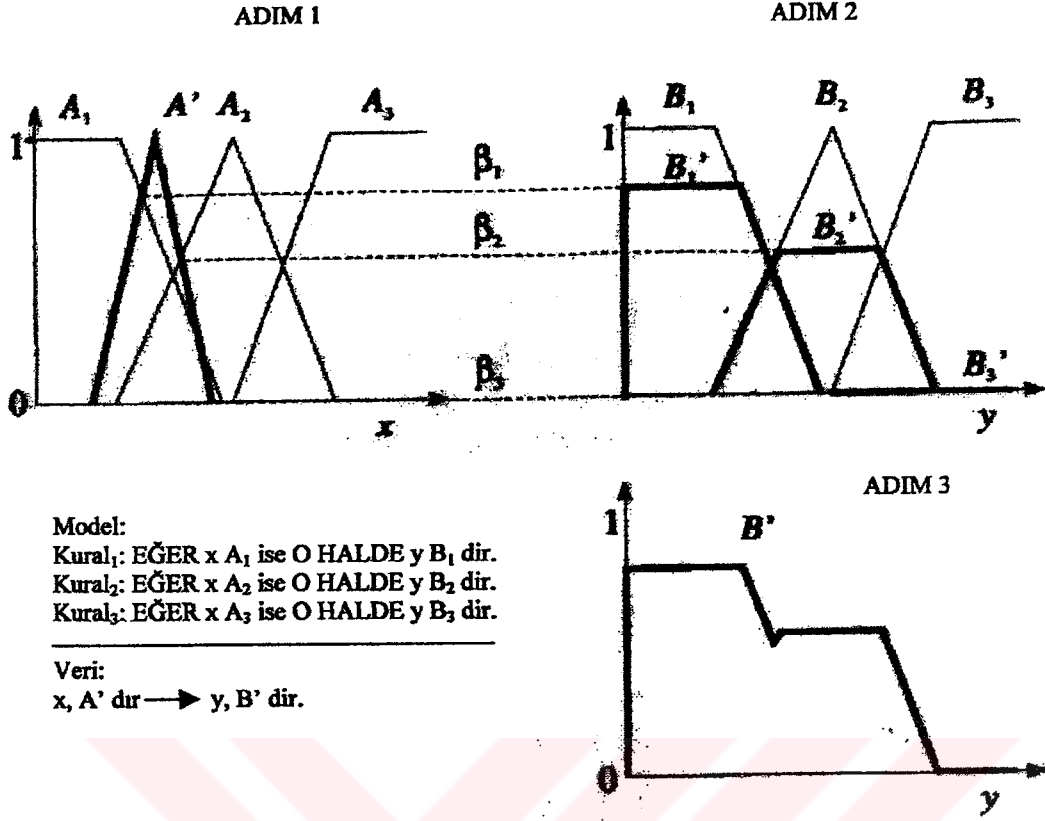
1. ADIM : Doğruluk değeri hesaplanır: $\beta_i = \max_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A_i}(x)]$, $1 \leq i \leq r$.

2. ADIM : B'_i çıkış bulanık kümeleri elde edilir :

$$\mu_{B'_i}(y) = \beta_i \wedge \mu_{B_i}(y), \quad y \in Y, 1 \leq i \leq r.$$

3. ADIM : B'_i çıkış bulanık kümeleri bir araya getirilir :

$$\mu_{B'}(y) = \max_{1 \leq i \leq r} \mu_{B'_i}(y), \quad y \in Y.$$



Şekil 3.3. Mamdani Çıkarımının Şematik Gösterilimi

Örnek 3.3 :

Giriş bulanık kümesi olarak $A' = [1, 0.6, 0.3, 0]$ alalım ve örnek 3.2'deki değerler için Mamdani çıkarım algoritmasını uygulayalım.

Adım 1: Doğruluk değerleri hesaplanır.

$$\beta_1 = \max_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A_1}(x)] = \max ([1, 0.6, 0.3, 0] \wedge [1, 0.6, 0, 0]) = 1$$

$$\beta_2 = \max_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A_2}(x)] = \max ([1, 0.6, 0.3, 0] \wedge [0, 0.4, 1, 0.4]) = 0.4$$

$$\beta_3 = \max_x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A_3}(x)] = \max ([1, 0.6, 0.3, 0] \wedge [0, 0, 0.1, 1]) = 0.1$$

Adım 2 : Her bir sonuç bulanık kümesi elde edilir.

$$B'_1 = \beta_1 \wedge B_1 = 1 \wedge [1, 1, 0.6, 0, 0] = [1, 1, 0.6, 0, 0]$$

$$B'_2 = \beta_2 \wedge B_2 = 0.4 \wedge [0, 0, 0.3, 0.9, 1] = [0, 0, 0.3, 0.4, 0.4]$$

$$B'_3 = \beta_3 \wedge B_3 = 0.1 \wedge [1, 1, 0.6, 0, 0] = [0.1, 0.1, 0.1, 0, 0]$$

Adım 3 : Toptan sonuç bulanık kümesi elde edilir.

$$B = \max_{1 \leq i \leq K} \mu_{B_i}(y) = [1, 1, 0.6, 0.4, 0.4]$$

Görüldüğü gibi elde edilen B' bulanık çıkışı, Örnek 3.2'de elde edilenle aynıdır.

3.1.3 Çok Değişkenli Sistemler :

Şimdiye kadar ki kısımda, Mamdani bulanık modeli, hem bir giriş- bir çıkışlı (SISO) hem de çok giriş-çok çıkışlı (MIMO) durumları için ele alındı. Bir MIMO model, MISO modelleri kümesi olarak yazılabilir. İfade kolaylığı amacıyla, tez içerisinde kurallar MISO sistemler için yazılacaktır.

$$K_i \text{ EĞER } x_1, A_{i1} \text{ ve } x_2, A_{i2} \text{ ve } \dots \text{ ve } x_p, A_{ip} \text{ ise O HALDE } y, B_i \quad i = 1, 2, 3, \dots, r \quad (3.9)$$

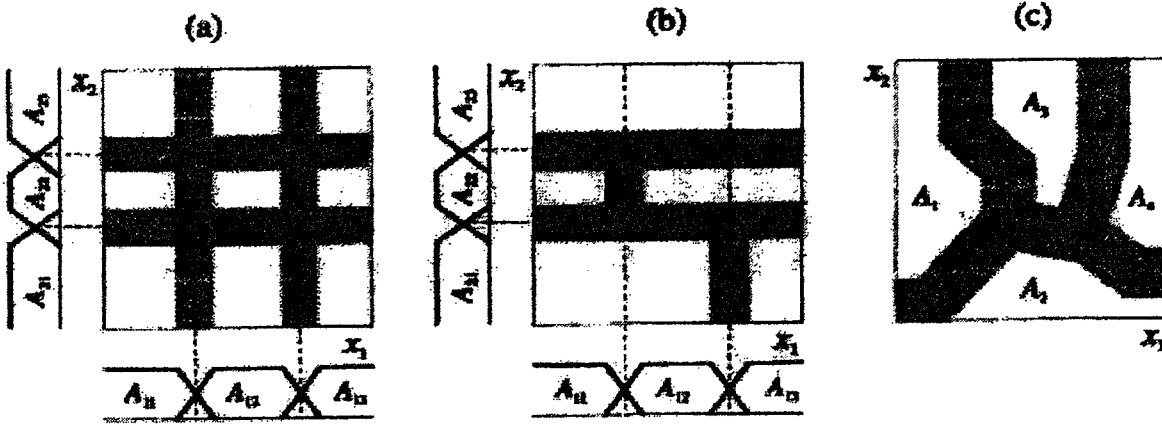
Görüldüğü üzere yukarıdaki model (3.1) ile verilen modelin özel durumudur. (3.1)'deki A_i bulanık kümelerinin Kartezyen çarpımı ile elde edilir: $A_i = A_{i1} * A_{i2} * \dots * A_{ip}$. Böylece, doğruluk değeri aşağıdaki gibi verilebilir:

$$\beta_i = \mu_{A_{i1}}(x_1) \wedge \mu_{A_{i2}}(x_2) \wedge \dots \wedge \mu_{A_{ip}}(x_p) \quad , \quad 1 \leq i \leq r \quad (3.10)$$

(3.10) ifadesinde, çarpım gibi, diğer birleşim operatörleri de kullanılabilir. Öncül kısımdaki birleşimler, giriş tanım kümesini, eksenlere paralel olacak şekilde bulanık kafes yapıya ayırırlar. Her bir kutu, kendisine ait olan, tek değişkenli, bulanık kümenin kartezyen çarpım uzayı kesişimidir. Bu şekil 3.4 (a) da gösterilmiştir. Tüm tanım kümesini kaplayacak birleşim yapısında kural sayısı

$$K = \prod_{i=1}^p N_i$$

ile verilir. Burada p , giriş uzayının boyutu ve N_i ise i 'inci öncül değişkenin dilsel terim sayısıdır [13].



Şekil 3.4. Öncül uzayın farklı bölünüşü

Birleşim, fark ve tersini alma operatörleri birleştirerek öncül uzayın bir çok farklı bölmelenmesi elde edilebilir. Her bir değişkenin bulanık küme tanımından dolayı sınırlar ancak dikdörtgen ızgaralar ile sınırlıdır. Örneğin Şekil 3.4 (b) de sol alt köşedeki öncül uzayı içerecek kural aşağıdaki gibidir :

EĞER x_1, A_{13} ve x_2, A_{21} ise O HALDE

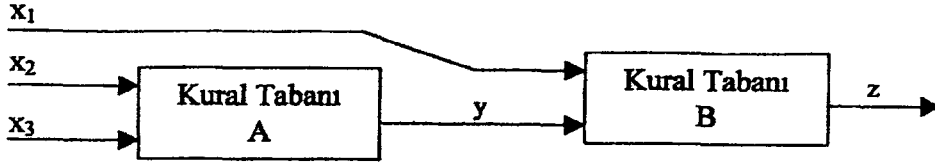
Doğruluk değeri ise ters ve kesişim operatörleri kullanılarak hesaplanır :

$$\beta = [1 - \mu_{A_{13}}(x_1)] \wedge \mu_{A_{21}}(x_2) \quad (3.11)$$

Çok değişkenli üyelik fonksiyonlarıyla oluşan (3.1) ifadesinin öncül kısmı, bulanık bölgelerin şekli hakkında hiçbir sınırlama olmadığından, en genel haldedir. Bu sınırların şekli, Şekil 3.4(c) deki gibi olabilir. Ayrıca tüm öncül uzayı kaplamak için gerekli olan bulanık küme sayısı önceki durumlardan çok daha az olabilir. Dolayısıyla, karmaşık çok değişkenli sistemler için bu tür bir parçalama (bölmelendirme), en etkin ifadeyi sağlayabilir.

Çok değişkenli bulanık sistemlerin karmaşıklığını azaltmanın bir diğer yolu da, her kural tabanı için daha az giriş olacak alt uzaylara ayrıştırmasıdır. Alt uzaylar tek veya çok katlı yapıda birbirine bağlı olabilir. Bu durum, Şekil 3.5 de gösterildiği gibi, bir kural tabanının girişidir. Bu kaskad yapı toplam kural sayısının azalmasına yol açar. Örneğin, her giriş için

beş dilsel terim olduğunu kabul edelim. Birleşim formunu kullanarak, iki alt kural tabanının herbirinin $5^2 = 25$ kuralı olacaktır. Üç girişli bir tek kural tabanının $5^3 = 125$ kuralı olacaktır. Görüldüğü gibi bu, belirgin bir kazançtır.



Şekil 3.5. İki Kural tabanının kaskad bağlantısı

Mamdani modelde, çıkış bulanık kümesi ağırlık merkezi durulaması ve Mamdani çıkarımı aracılığıyla elde edilir.

3.1.4 Tekil (Singleton) Model :

(3.1) ile ifade edilen bulanık sistemde, B_i , sonuç bulanık kümeleri tekil bulanık küme olduğunda, Mamdani bulanık modelin özel hali elde edilir. B_i bulanık kümeler, b_i gerçel sayılar ile aşağıdaki gibi basit şekilde ifade edilebilirler :

$$K_i : \text{EĞER } x, A_i \text{ ise O HALDE } y = b_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, r \quad (3.12)$$

Buna “tekil model” denir. Burada basit bir çıkarım – durulama yöntemi kullanılır:

$$y = \frac{\sum_{i=1}^K \beta_i b_i}{\sum_{i=1}^K \beta_i} \quad (3.13)$$

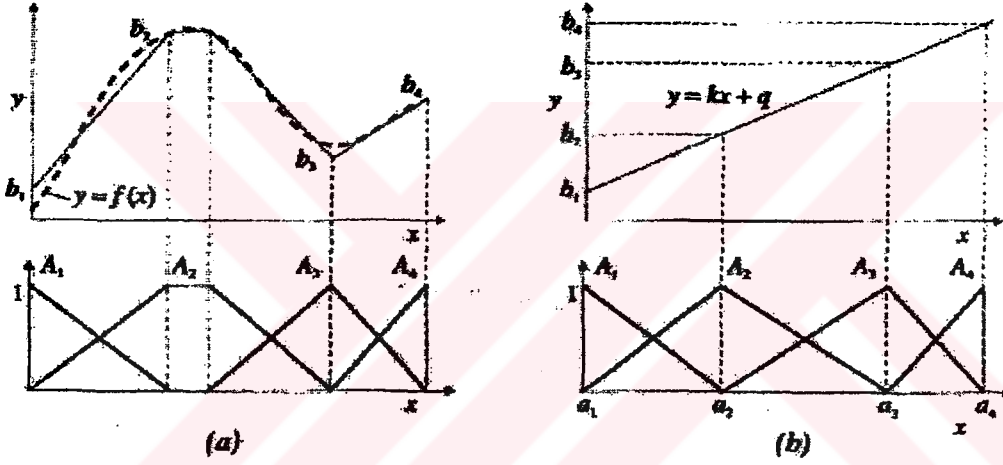
Tekil bulanık model, “genel fonksiyon yaklaşımçı” nın bir sınıfı olan ve aşağıdaki yapıda olan “temel fonksiyonlar büyümesi” nin bir türüdür (Zeng, Singh, 1995; Zeng, Singh, 1996; Kosko, 1994; Wang, Mendel, 1992).

$$y = \sum_{i=1}^K \phi_i(x) b_i \quad (3.14)$$

Doğrusal olmayan sistem tanımında kullanılan çoğu yapılar, bu sınıftan olan sistemlere aittir. Tekil modelde, $\phi_i(x)$ ile gösterilen temel fonksiyonlar, kurallardaki öncüllerin doğruluk değerlerinin normalize edilmiş hali ile verilir. b_i sabitleri ise kuralların sonuçlarıdır. EĞER - O HALDE kurallarının sonuçları arasında bir interpolasyon yapabilmek için aşağıdaki şartlar sağlanmalıdır (Babuska, Verbruggen, Hellendoorn, 1999).

- i) Öncüle ait üyelik fonksiyonları, yamuk, parçalı olarak üst üste binen yapıda olmalıdır. Ek olarak, tanım kümesinde her elemana ait üyelik değerinin toplamı bir olmalıdır.
- ii) Öncüldeki “ve” mantık birleşimi, çarpım operatörünü ifade etmektedir.

Şekil 3.6 (a) da tekil modelin, giriş – çıkış ifadesinin parçalı doğrusal olduğu görülmektedir.



Şekil 3.6. Üçgen veya yamuk üyelik fonksiyonu ile tekil model

Bir tekil (singleton) modelin aşağıdaki yapıda olan herhangi bir doğrusal fonksiyonu ifade edeceği açıktır.

$$y = p^T x + q = \sum_{i=1}^P p_i x_i + q \quad (3.15)$$

Bu durumda, öncüllerin üyelik fonksiyonları üçgen olmalıdır. Sonuç tekil değerleri ise, (3.15) ile verilen fonksiyonda, öncül bulanık kümeler A_{ij} lerin merkezleri olan a_{ij} lerini koyarak hesaplanır.

$$b_i = \sum_{j=1}^p p_j a_{ij} + q \quad (3.16)$$

Bu durumda ise Şekil 3.6(b) de gösterilmiştir. Hakkında yeterli bilgiye sahip olmadığımız bir doğrusal model, ilk başta tekil bulanık model ile modellenip sonra bu model iyileştirilebilir (Babuska, Verbruggen, Hellendoorn, 1999).

3.2 Takagi – Sugeno Modeli :

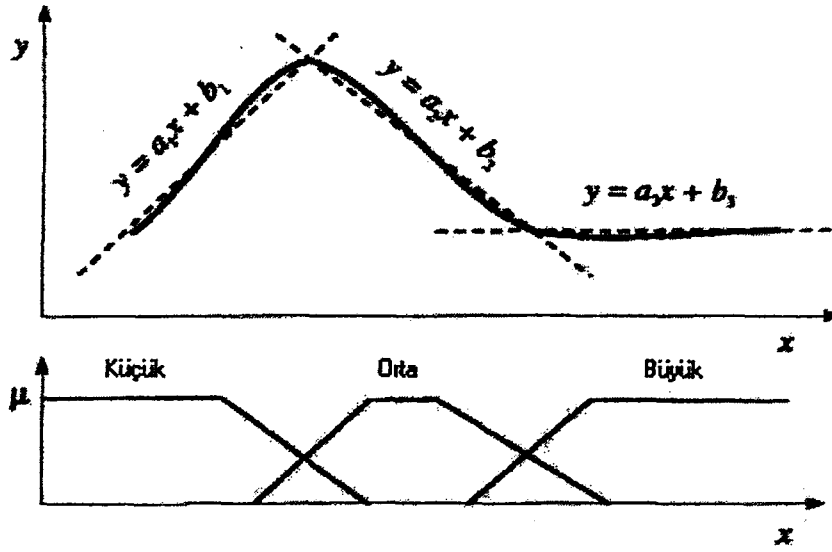
Bir önceki bölümde anlatılan Mamdani bulanık modeli, öncül ve sonuç kısımlarında bulanık önermelerin olduğu EĞER – O HALDE kuralları ile sistemi ifade etmekteydi. Oysa ki, Takagi – Sugeno (T-S) bulanık modelinin sonuç kısmında, belirgin (kesin) bir fonksiyon mevcuttur. Dolayısıyla bu model hem matematiksel, hem de dilsel beslemeli olarak görülebilir. Öncül kısım, sonuç kısmındaki fonksiyonların varolduğu, giriş uzayının bulanık bölgelerini ifade eder. T – S modelinde kurallar aşağıdaki yapıdadır:

$$K_i : \text{EĞER } x, A_i \text{ O HALDE } y_i = f_i(x), \quad i = 1, 2, 3, \dots, r \quad (3.17)$$

Mamdani modelinin aksine, x girişi kesin değerlidir (Cao, Rees, Feng, 1997). Her kuraldaki f_i fonksiyonu aynı tip yapıdadır, yalnızca parametreler değişiktir. Basitlik ve pratiklik açısından, f_i fonksiyonu için doğrusal olan aşağıdaki yapı kullanışlıdır :

$$R_i K : \text{EĞER } x, A_i \text{ O HALDE } y_i = a_i^T x + b_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots, r \quad (3.18)$$

Burada a_i , parametre vektörü, b_i ise scalerdir. Dikkat edilecek olursa, herbir kuralda a_i , sıfır vektörü olarak alınacak olursa tekil model (3.12) elde edilir.



Şekil 3.7. Fonksiyon yaklaşımı olarak Takagi – Sugeno bulanık modeli

T-S modeli, bir fonksiyonun istenilen dereceye ve kesinliğe uygun olarak yaklaşımını yapabilir. Bu durum Şekil 3.7 de gösterilmiştir. Fonksiyon yaklaşımı için, öncül bulanık kümeleri, öncül uzayında ayrı ama üst üste binecek şekilde tanımlanmış ve a_i ve b_i 'lerin de doğrusal olmayan fonksiyonunun yerel doğrusallaştırılmasına ait parametreler olması gereklidir.

T – S modelinin en belirleyici özelliği, her bulanık kuralın öncülündeki değişkenlerin sistemin durumları olması halinde, sisteme ait yerel dinamikleri sistem modeli ile vermesidir. Tüm sisteme ait bulanık model, doğrusal sistem modelinin bulanık olarak “harmanlanmasından” oluşur (Chang, Joo, Park, 1999; Chang, Joo, Park, Chen, 1999). Bu şekilde oluşan T-S bulanık sistemi aşağıdaki yapıdadır :

Sürekli sistem durumu :

Kural i : EĞER $x_1(t) M_{i1}$ ve $x_p(t) M_{ip}$ ise

$$\text{O HALDE } \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \quad \text{ve} \quad y(t) = C_i x(t) \quad (3.19)$$

$$x^T(t) = [x_1(t) \ x_2(t) \ \dots \ x_n(t)]$$

$$u^T(t) = [u_1(t) \ u_2(t) \ \dots \ u_n(t)]$$

$i=1, 2, \dots, r$ ve r ise EĞER-O HALDE kurlarının sayısıdır. Ayrıca, x^T_i bulanık öncül değişkenler, M_{ij} bulanık kümeler ve $\dot{x}(t)=A_i x(t)+B_i u(t)$ ve $y(t)=C_i x(t)$ ise i 'inci kural çıkışıdır.

Ayrık sistem durumu :

Kural i : EĞER $x_1(k) M_{i1} \dots \dots \dots$ ve $x_p(k) M_{ip}$ ise

$$\text{O HALDE } x(k+1)=A_i x(k)+B_i u(k) \quad \text{ve} \quad y(k)=C_i x(k) \quad (3.20)$$

$$x^T(k) = [x_1(k) \ x_2(k) \ \dots \ x_n(k)]$$

$$u^T(k) = [u_1(k) \ u_2(k) \ \dots \ u_n(k)]$$

Verilen $(x(t), u(t))$ çiftleriyle sonuç bulanık sistem modeli,

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(x(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(x(t))} \quad (3.21)$$

$$= \sum_i^r h(x(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\} \quad (3.22)$$

olmak üzere tekil bulandırma, çarpım çıkarım mekanizması ve ağırlık merkezi durulama yöntemi ile bulunur. Burada,

$$w_i(x(t)) = \prod_{j=1}^g M_{ij}(x_j(t)) \quad (3.23)$$

$$h_i(x(t)) = \frac{w_i(x(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(x(t))} \quad (3.24)$$

dır. $M_{ij}(x(t))$, $x_j(t)$ nin M_{ij} de ki üyelik derecesi olup burada her t için

$$w_i(x(t)) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, r$$

$$\sum_{i=1}^r w_i(x(t)) \leq 1$$

olduğu kabul edilmiştir. Böylece her t için

$$h_i(x(t)) \geq 0, \quad i = 1, 2, \dots, r$$

$$\sum_{i=1}^r h_i(x(t)) = 1$$

olur. $h_i(x(t))$, EĞER – O HALDE kurallarının normalize edilmiş ağırlığı olarak görülebilir ve $h_i(x(t))$ lerin sistem durumlarının birer doğrusal olmayan fonksiyonu olduğu unutulmamalıdır (Wang, Tanaka, Griffin, 1996; Ma, Sun, He, 1998; Jadbabaie, 1997).

4. PID TİPİ BULANIK MANTIK KONTROLÖRLER

Bu bölümde bulanık kontrolörlerin dinamik davranışı analiz edilmiştir. Öncelikle klasik PID kontrol teorisine bağlı olarak aynı karakteristiğe sahip PID tipi bulanık kontrolör gerçekleştirilmiş, daha sonra ise kontrolörün performansını arttırmak amacıyla PID tipi bulanık kontrolöre on-line haldeyken parametrelerinin ayarlanması metodu uygulanmıştır. Literatürde bu tarz kontrolörler, parametre adaptif (öz uyarlamalı) bulanık kontrolör olarak adlandırılmıştır. Simülasyon sonuçlarıyla da bu tarzdaki bulanık kontrolör yapısının performansı ortaya konmuştur.

Bulanık kontrolörlerde kullanılan çeşitli yapılarıdaki çıkartım metodları içinde (Mamdani, 1977; Muzimoto, 1991; Takagi, Sugeno, 1985; Takagi, Sugeno, 1987) pratikte en çok kullanılan yapı Mamdani ve arkadaşları tarafından geliştirilen Mamdani metodudur (Mamdani, 1977). Bu metotta öncül ve sonuç kısımları arasındaki ilişkiyi kurmak için kontrol kurallarını yorumlama amaçlı çıkarım kuralları bütününde min-max operatörü kullanılmıştır. Muzimoto ise lojik AND (minimum) ve OR (maksimum) hesaplarında bunların yerine çarpım-toplam operatörünü seçmiştir (Muzimoto, 1991; Muzimoto, 1992). Durulama işlemi ise karmaşık yapısı itibarıyla zaman kaybına sebep olmaktadır. Takagi ve Sugeno, bulanık kontrolörün sonuç kısmının belirli bir fonksiyon ya da bilinen keskin değerlikli sayı olduğu bir model geliştirmiştir (Takagi, Sugeno, 1985; Takagi, Sugeno, 1987; Ying, 1998). Keskin sayı çıkışlı bu model sayesinde bulanık küme halindeki sonuç kısım artık ayrık sonlu sayıda noktadan oluşan bir bulanık küme olup durulama algoritmasını bir hayli basitleştirmiştir. Çıkışın keskin değere sahip olduğu modellerde, bahsedilen iki yöntem de uygulanmaktadır.

Klasik kontrol teorisi bir hayli gelişmiş olmasına rağmen literatürde bulanık kontrolörlerin analizine yönelik teorik metodlarla ilgili fazla bir çalışma yoktur. Bu nedenle de araştırmacıların bulanık kontrolörlerin doğrusal olmama problemlerinde doğrusal sistem teorisi başta olmak üzere klasik kontrol teorisini uygulamaları da gayet doğaldır ve bu yönde pek çok çalışma vardır (Buckley, 1990; Buckley, 1993; Kosko, 1992; Zhuang, Min, Wei, 1990). Bu çalışmada, bulanık kontrolörlerin davranışı klasik PID kontrolörlerle ilişkilendirilerek analiz edilmeye çalışılmıştır. Buna göre bilinen klasik PID tipi kontrolör tasarım yöntemleri yardımıyla PID tipi bulanık kontrolör gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Tasarlanan kontrolörün performansını arttırabilmek için sistem on-line olarak çalışırken

kontrolörün parametrelerinin ayarlanması yoluna gidilerek "parametre adaptif bulanık kontrolör" ortaya konmuştur.

4.1 Bulanık Kontrolörlerin Analizi

Bu çalışmada iki girişli tek çıkışlı [MISO] bir kontrolör ele alınmıştır. Burada kontrolörün

girişleri hata (e) ve hatanın değişim oranıdır. (\dot{e}) u, e, \dot{e} nün evrensel kümeleri (univers of

discourses) $E \subset R, \dot{E} \subset R, U \subset R$ dir. e ve \dot{e} 'nin dilsel değerleri

A_i ($i \in I = [-m, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, m]$) ve B_j ($j \in J = [-n, \dots, -2, -1, 0, 1, 2, \dots, n]$) olarak gösterilmiştir. Bulanık kontrol kuralları ise aşağıdaki tarzdadır.

Eğer $e \in A_i$ ve $\dot{e} \in B_j$ ise $u \in u_{ij}$ dir.

$u_{ij} \in U$ ($i \in I, j \in J$) ise artık bulanık değil keskin değerdedir.

u_{ij} değerlerinin birbirinden farklı olma zorunluluğu yoktur. Bu tarz kurallara sahip bulanık kontrolör keskin tipli kontrolör olarak adlandırılmıştır (Takagi, Sugeno, 1985; Takagi, Sugeno, 1987). Kontrolör kural sayısı $I * J$ olduğunda kural tabanı tamamlanmış demektir

(Zhuang, Min, Wei, 1990). A_i ve B_j 'ye ait üyelik fonksiyonları $A_i(e)$ ve $B_j(\dot{e})$ 'dir. Belli bir

t kontrol süresince gözlem yapıldığında hata (e) ve hatanın değişim oranı (\dot{e}) 'na ilişkin

veriler elde edilecektir. Bu değerler $A_i(e)$ ve $B_j(\dot{e})$ olarak gösterilmiştir. Mamdani çıkartım

metodu kullanılarak bulanık kontrol kurallarının öncül kısmınlarına ait değerler

$$f_{ij} = A_i(e)B_j(\dot{e}) \quad (i \in I, j \in J) \quad (4.1)$$

olacaktır.

Öncül kısımdan sonuç kısmına kadar olan çıkarım bölümü sonuç bulanık altkümelerini

meydana getirir. Bu alt küme "C" ile ifade edilmiştir. C sonlu sayıda noktada oluşan ayrık bir bulanık altkümedir.

$$C = \{ f_{ij} / u_{ij} \mid i \in I, j \in J \}$$

Durulayıcı kısmında ise ağırlık merkezi yöntemi uygulandığında kontrolörün gerçek

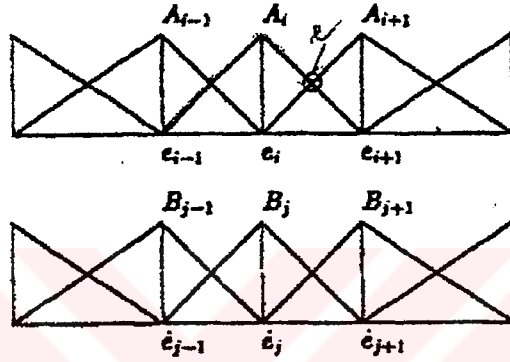
değerlikli çıkışı elde edilir. Bu çıkış u ile gösterilir.

$$u = \frac{\sum_{ij} f_{ij} u_{ij}}{\sum_{ij} f_{ij}} \quad (4.2)$$

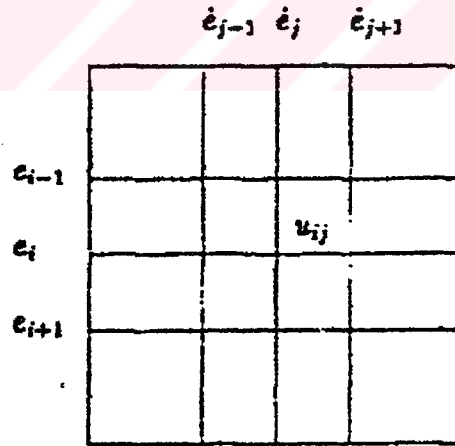
Bu çalışmada hata ve hatanın değişimine ilişkin tüm dilsel ifadeler üçgen üyelik fonksiyonları ile ifade edilmiştir (Şekil 4.1). Üyelik fonksiyonları, A_i bulanık kümesinin çekirdeğini e_i ve

B_j kümesinin çekirdeğini de \dot{e}_j temsil edecek şekilde seçilmiştir. A_i 'nin destek kümesi

$[e_{i-1}, e_{i+1}]$ ve aynı şekilde B_j 'nin destek kümesi $[e_{j-1}, e_{j+1}]$ olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.1. A_i ve B_j ye ait üyelik fonksiyonları



Şekil 4.2. $(e-\dot{e})$ düzlemine ait ağ yapısı

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

$$A_k(e) = 0 \quad (k \neq (i, i+1) \in I), \quad e \in [e, e_{i+1}] \text{ için}$$

$$B_j(\dot{e}) = 1 - \frac{\dot{e} - \dot{e}_j}{e_{j+1} - \dot{e}_j} = \frac{e_{j+1} - \dot{e}}{e_{j+1} - \dot{e}_j}, \quad B_{j+1}(\dot{e}) = \frac{\dot{e} - \dot{e}_j}{e_{j+1} - \dot{e}_j},$$

$$B_t(\dot{e}) = 0 \quad (t \neq (j, j+1) \in J), \quad \dot{e} \in [e_j, e_{j+1}] \text{ için}$$

$e - \dot{e}$ düzlemindeki $\{e, \dot{e} \mid e = e_i, \dot{e} = \dot{e}_j, i \in I, j \in J\}$ kümesi ağı (Kosko, 1994), (e_i, \dot{e}_j) noktası ise ağdaki düğümü oluşturur. Ağ yapısı Şekil 4. 2' de gösterilmiştir.

4.1 ve 4.2 no'lu eşitliklerden yola çıkılarak

$$u = \frac{\sum_{k,t} (A_k(e) B_t(\dot{e})) u_{kt}}{\sum_{k,t} (A_k(e) B_t(\dot{e}))}$$

elde edilir. Bu eşitliğe göre $A_k(e)$ ve $B_t(\dot{e})$ terimlerinden hiçbiri 0 olamaz. Böylelikle herhangi bir anda en fazla iki komşu üyelik fonksiyonunun e ve \dot{e} değerleri 0'dan farklı olacaktır. Bu nedenle yukarıdaki eşitlikte geriye 4 terim kalacak ve en fazla 4 kural ateşlenecektir. Örneğin bulanık kontrolörün girişleri Şekil 4.2'de gösterilmiş olan ağın içerisindeyse

$$A_K(e) = 0 \quad (k \neq (i, i+1) \in I) \text{ ve } B_t(\dot{e}) = 0 \quad (t \neq (j, j+1) \in J) \quad [S = [e_i, e_{i+1}] * [e_j, e_{j+1}]].$$

Buna göre yukarıdaki eşitlik

$$u = \frac{\sum_{t=(j, j+1)} (A_k(e) B_t(\dot{e})) u_{kt}}{\sum_{t=(j, j+1)} (A_k(e) B_t(\dot{e}))}$$

halini alır.

Üyelik fonksiyonlarının tanımlarından

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

$$B_j(\dot{e}) + B_{j+1}(\dot{e}) = 1 \quad (\dot{e} \in [e_j, e_{j+1}])$$

Bu ilişki yardımıyla, eşitliğin sağ tarafındaki payda kısmını irdelersek

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

Buna göre kontrolörün çıkışı da :

$$\begin{aligned} u &= \sum_{\substack{k=(i,i+1) \\ t=(j,j+1)}} (A_k(e) B_t(\dot{e})) u_{kt} \\ &= A_i(e) B_j(\dot{e}) u_{ij} + A_{i+1}(e) B_j(\dot{e}) u_{(i+1)j} + A_i(e) B_{j+1}(\dot{e}) u_{i(j+1)} + A_{i+1}(e) B_{j+1}(\dot{e}) u_{(i+1)(j+1)} \\ &= \left(\frac{e_{i+1} - e}{e_{i+1} - e_i} \right) \left(\frac{e_{j+1} - \dot{e}}{e_{j+1} - e_j} \right) u_{ij} + \left(\frac{e - e_i}{e_{i+1} - e_i} \right) \left(\frac{e_{j+1} - \dot{e}}{e_{j+1} - e_j} \right) u_{(i+1)j} + \\ &\quad \left(\frac{e_{i+1} - e}{e_{i+1} - e_i} \right) \left(\frac{e - \dot{e}_j}{e_{j+1} - e_j} \right) u_{i(j+1)} + \left(\frac{e - e_i}{e_{i+1} - e_i} \right) \left(\frac{e - \dot{e}_j}{e_{j+1} - e_j} \right) u_{(i+1)(j+1)} \quad (4.3) \end{aligned}$$

$$e \in [e_i, e_{(i+1)}] \text{ ve } [\dot{e} \in e_j, e_{j+1}]$$

$e - \dot{e}$ düzleminde seçilecek herhangi bir noktada (4.3 no'lu eşitlik) bulanık kontrolörün çıkışı

e ve \dot{e} 'ne ait argümanların doğrusal olmayan bir fonksiyonudur. Bu tarz doğrusal olmayan bir yapıya getirilebilecek herhangi bir analitik çözüm mevcut değildir. Bununla beraber,

klasik ya da modern kontrol teorisinde başvurulan doğrusallaştırma yöntemine gidilerek nominal değerdeki küçük değişimlerin analizi yapılabilir.

Aşağıda doğrusal olmayan bir modele ait kontrolörün giriş-çıkış ilişkisi verilmiştir.

$$u = f(e, \dot{e}, t) \quad (4.4)$$

$e = e_i$ ve $\dot{e} = \dot{e}_j$ yani ağdaki söz konusu düğüm (e_i, \dot{e}_j) olduğu durumda kontrolörün çıkışı

$$u = u_{ij} \quad (4.5)$$

olacaktır. Buna göre :

$$u = f(e, \dot{e}, t) = u_{ij}$$

olur. Böylelikle doğrusallaştırmak şartıyla bu düğüme ait bir analiz yapılabilir. Nominal değerler arasındaki fark :

$$\delta e = e - e_i$$

$$\delta \dot{e} = \dot{e} - \dot{e}_j$$

$$\delta u = u - u_{ij}$$

yeteri kadar küçük $\delta e, \delta \dot{e}, \delta u$ için (4.4) no'lu eşitlik aşağıdaki doğrusal eşitliğe benzetilebilir.

$$\delta u = \left[\frac{\delta f}{\delta e} \right]_n \delta e + \left[\frac{\delta f}{\delta \dot{e}} \right]_n \delta \dot{e} \quad (4.6)$$

Her düğüme ait komşuluk, o düğümde kesişen ağ çizgileri tarafından 4 farklı büyüklüğe bölünecektir. Basitlik açısından tek bir büyüklüğe ait durum incelenecek olursa yani

$$\delta e \geq 0 \text{ ve } \delta \dot{e} \geq 0 \text{ durumunda } (e_i + \delta e, \dot{e}_j + \delta \dot{e}) \in [e_i, e_{i+1}] * [\dot{e}_j, \dot{e}_{j+1}] .$$

(4.3) no'lu denklemden

$$\left[\frac{\delta f}{\delta e} \right]_{(e_i, \dot{e}_j)} = \frac{u_{(i+1)i} - u_{ij}}{e_{(i+1)} - e_i}$$

$$\left[\frac{\delta f}{\delta \dot{e}} \right]_{(e_i \ e_j)} = \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - e_j},$$

$$\delta u = \left[\frac{\delta f}{\delta e} \right]_n \delta e + \left[\frac{\delta f}{\delta \dot{e}} \right]_n \delta \dot{e} = \frac{u_{(i+1)i} - u_{ij}}{e_{(i+1)} - e_i} \delta e + \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - e_j} \delta \dot{e},$$

$$u - u_{ij} = \frac{u_{(i+1)i} - u_{ij}}{e_{(i+1)} - e_i} (e - e_i) + \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - e_j} (\dot{e} - \dot{e}_j)$$

sonuç olarak :

$$\begin{aligned} u &= \left[u_{ij} - \frac{u_{(i+1)i} - u_{ij}}{e_{(i+1)} - e_i} e_i - \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - e_j} \dot{e}_j \right] + \frac{u_{(i+1)i} - u_{ij}}{e_{(i+1)} - e_i} e + \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - e_j} \dot{e} \\ &= A + P e + D \dot{e} \end{aligned} \quad (4.7)$$

elde edilir. Görüldüğü gibi burada;

$$A = \left[u_{ij} - \frac{u_{(i+1)i} - u_{ij}}{e_{(i+1)} - e_i} e_i - \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - e_j} \dot{e}_j \right] = u_{ij} - P e_i - D \dot{e}_j,$$

$$P = \frac{u_{(i+1)i} - u_{ij}}{e_{(i+1)} - e_i},$$

$$D = \frac{u_{i(j+1)} - u_{ij}}{\dot{e}_{j+1} - e_j}.$$

olarak elde edilir. Buradan da görüldüğü gibi belirli koşullar altında bulanık kontrolörler yaklaşık olarak PD kontrolörler gibi davranır. Eşdeğer oransal ve türev kontrol bileşenleri P ve D olarak ifade edilmiştir. Gerçekte bu tarz bulanık kontrolörler parametreleri zamanla değişen PD tipi kontrolörlerdir. $e - \dot{e}$ düzleminde hata ve hatanın değişim oranı düğümün bir komşuluğundan diğerine değiştiğinde PD parametreleri de bir kümeden diğerine geçiş yapar. Bu tip bulanık kontrolörlere PD tipi bulanık kontrolörler (PDfc) denir.

(4.7) eşitliğinin sonucu klasik PID kontrol teorisine göre bulanık kontrolörün davranışını tahmin etmemizi sağlar. Klasik PID kontrolörün performansını oransal parametre (K_P), integral parametresi (K_I) ve türev parametresi (K_D) belirler. Oransal kontrol kuralı, kontrol sisteminin hızlı cevap vermesini sağlar. İntegral kontrol kuralı, kontrolörün sürekli hal hatasını ortadan kaldırır. Türev kontrol kuralı ise sistemin sönüm oranını arttırarak aşımaları ve salınım süresini kısaltır. İstenilen şekilde sürekli hale geçmesini sağlar.

Anlaşıldığı üzere amaca uygun şekilde tasarlanan bir PID kontrolör hızlı bir şekilde çok küçük bazen de hiç oluşmayan osilasyonlar ve sıfır sürekli hal hatası ile sistemin çalışmasını gerçekleştirebilir.

Kontrol edilen sistemin tipi "0" ise P ve PD tarzında bir kontrolör, sistemin basamak cevabındaki sürekli hal hatasını önleyemeyecektir. Sürekli hal hatası K_P ile ters orantılıdır. Bununla beraber K_P gereğinden büyük seçildiğinde sistemin kararlılığı bundan olumsuz yönde etkilenecektir.

Aynı olay PD tipi kontrolörler için de geçerlidir. Klasik PD kontrolörlerde olduğu gibi tipi "0" olan sistemlerde sürekli hal hatası kaçınılmazdır. Fakat bulanık kontrolöre integral kuralını da dahil edersek kontrolörün performansı artacaktır. Bunun için bir sonraki bölümde PD tipi bulanık kontrolörlerin dezavantajlarını giderecek yöntemler önerilecektir.

4.2. PID Tipi Kontrolörler

Daha önceki bölümde de değinildiği gibi PDfc, parametresi zamanla değişen PD kontrolör gibi davranır. Endüstriyel proseslerde yer alan birçok sistemin tipi genelde "0" olduğu için bu tarz bir kontrole gidildiğinde sürekli hal hatasının oluşması kaçınılmazdır. Sistemdeki sürekli

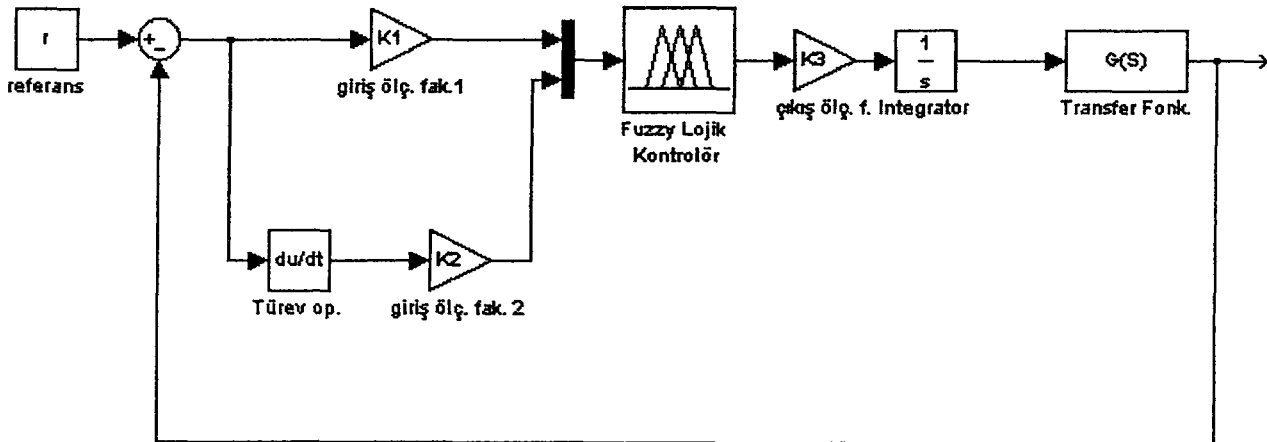
hal hatalarını elimine etmek istersek, hatanın değişim oranı olarak ifade edilen \dot{e} girişini hatanın integrasyonunda kullanabiliriz. Bu tarz bir kontrolör parametresi zamanla değişen PI kontrolör gibi davranacaktır. Fakat PI tipi bir kontrolörün P parametresi küçük seçildiğinde cevabın yükselme hızı yavaş olacaktır. P ya da I parametresi büyük seçildiğinde ise kabul edilemez aşımalar sebebiyet verecektir. Bu gibi durumlarda performansı arttırmak için integral kontrolörün yanı sıra türev kontrolöre de ihtiyaç vardır. Böyle bir kontrolör tasarımında hata, hatanın değişim oranı ve hatanın integrali olmak üzere üç giriş değişkenine

ihtiyaç vardır. Fakat pratikte bulanık kurallar oluşturulurken bu durum bir hayli problem teşkil etmektedir. Genellikle kuralların oluşturulmasında sistemi daha önce başarıyla kontrol etmiş operatörün manuel kontrol deneyimlerinden yararlanır. Operatör, sistem çıkışı ve ayar noktası arasındaki hatayı ve hatanın değişimini gözleyerek sezgisel olarak kontrol işlemini yerine getirir. Fakat hatanın integralini bu şekilde gözlemlemesi sözkonusu değildir. Ayrıca kontrolöre bir giriş daha eklemek kural sayısını bir hayli arttıracaktır [34]. Bu da ek bir hesaplama yükünü ve dolayısıyla zaman kaybını beraberinde getirecektir. Bu nedenle önerilen yöntemde amaç, sadece hata ve hatanın değişim oranı kullanılarak PID kontrol karakteristiğinde bir kontrolör dizayn etmektir.

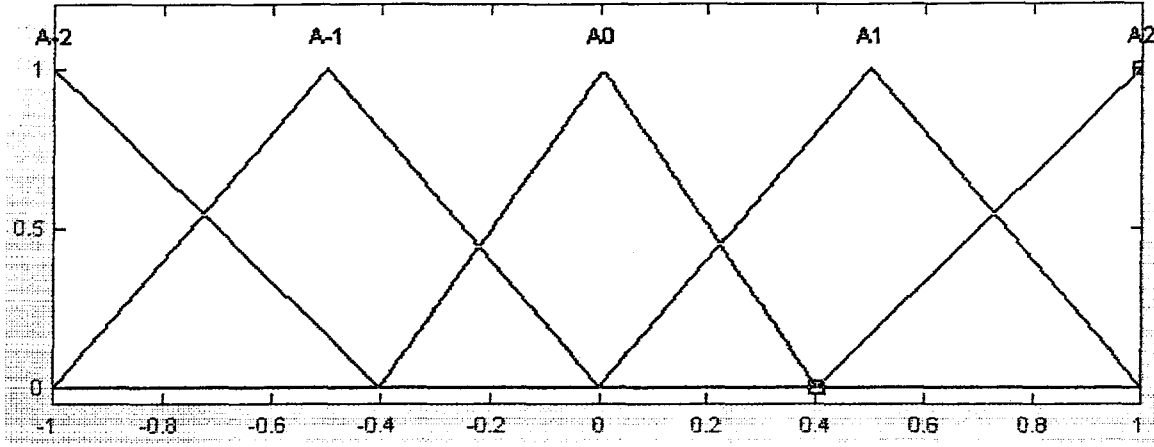
Sözkonusu yöntem Şekil 4.3'de görüldüğü gibi bulanık kontrolörün çıkışına seri olarak bağlanacak bir integratördür. Şekilde K_1 ve K_2 , sırasıyla hata ve hatanın değişim oranının ölçekleme faktörleridir. Şekil 4.4'de $e-\dot{e}$ düzlemine ait değerlerin komşuluk ilişkisi görülmektedir. Kontrolü amaçlanan sistemin girişi ise (4.7) no'lu eşitlikten yararlanılarak:

$$u_c = \beta \int u dt = \beta \int (A + PK_1 e + DK_2 \dot{e}) dt = \beta At + \beta K_2 D e + \beta K_1 P \int e dt \quad (4.8)$$

şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 4.3. PI Tipi bulanık kontrol sistemi



Şekil 4.4. A_i ve B_j 'ye ait üyelik fonksiyonları

Parametresi zamanla değişen PI kontrolör haline gelen bulanık kontrolörde eşdeğer oransal kontrol bileşeni $\beta K_2 D$, integral kontrol bileşeni ise $\beta K_1 P$ olarak ifade edilebilir. Bu tarz kontrolörler PI tipi bulanık kontrolörler (PIfc) olarak adlandırılırlar.

PI tipi bulanık kontrolörlerde sürekli hal hatasının sıfırlanması beklenir. İleriki bölümlerde simülasyon sonuçlarıyla da bu durum ortaya konmuştur.

Şekil 4.4'de $e-e'$ 'ne ait bulanık altkümeleri görülmektedir. Buna göre çekirdek değerleri aşağıda verilmiştir.

$$\{e_i\} = \{e_{-2}, e_{-1}, e_0, e_1, e_2\} = \{-1, -0.4, 0, 0.4, 1\}$$

$$\{e_j\} = \{e_{-2}, e_{-1}, e_0, e_1, e_2\} = \{-1, -0.4, 0, 0.4, 1\}$$

Sisteme ait bulanık kontrolör kuralları aşağıdaki Çizelge 4.1'de verilmiştir.

Çizelge 4.1. Bulanık kural çizelgesi

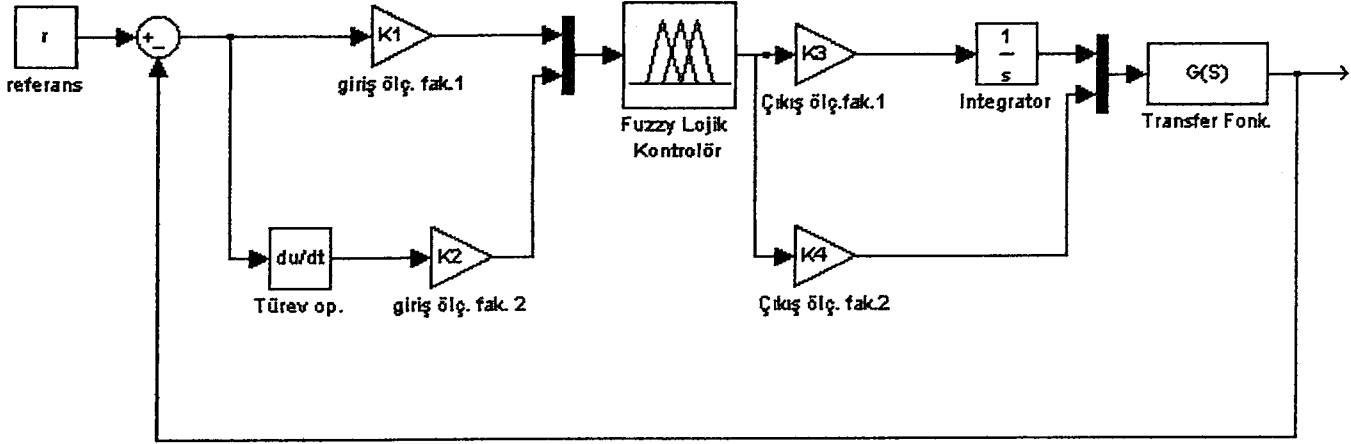
e \ de	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NL	NL	NM	NS	ZR
NM	NL	NL	NL	NM	NS	ZR	PS
NS	NL	NL	NM	NS	ZR	PS	PM
ZR	NL	NM	NS	ZR	PS	PM	PL
PS	NM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL
PM	NS	ZR	PS	PM	PL	PL	PL
PL	ZR	PS	PM	PL	PL	PL	PL

PIfc içeren sistemin sürekli hal hatası “0” a ulaşacaktır fakat integral katsayısı β , değiştiğinde sistem cevabı da değişmektedir. Buna göre sürekli hal hatası 0 olduğu halde, tıpkı klasik PI kontrolde olduğu gibi β küçük seçildiğinde sistem yavaş cevap vermekte, çok büyük seçildiğinde ise aşımara ve ciddi osilasyonlara sebep olmaktadır.

Bu noktada türev kontrolörü devreye girerse meydana gelen aşımara ve osilasyonları engellemek mümkündür. Amaçlanan sistem, PD ve PI tipi kontrolörlerin paralel olarak çalışmasını sağlayacaktır. Sisteme ait eşdeğer yapı Şekil 4.5’de görülmektedir. Burada β ve α sırasıyla PI ve PD tipi bulanık kontrolörlerin ağırlık katsayılarıdır. α/β oranı büyüdükçe türev kontrolün, integral kontrole göre etkisi artmaktadır.

(4.7) denkleminde yararlanılarak bulanık kontrolörün çıkışı aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned}
 u_c &= \alpha u + \beta \int u dt \\
 &= \alpha (A + PK_1 e + DK_2 \dot{e}) + \beta \int (A + PK_1 e + DK_2 \dot{e}) dt \\
 &= \alpha A + \beta A t + (\alpha K_1 P + \beta K_2 D) e + \beta K_1 P \int e dt + \alpha K_2 D \dot{e}
 \end{aligned} \tag{4.9}$$



Şekil 4. 5. PID tipi bulanık kontrol sistemi

Böylelikle artık kontrolör, parametresi zamanla değişen PID tipi kontrolör olarak davranır. Eşdeğer oransal, integral ve türev kontrol bileşenleri sırasıyla $\alpha K_1 P + \beta K_2 D$, $\beta K_1 P$ ve $\alpha K_2 D$ 'dir. Bu kontrolör PID tipi bulanık kontrolör (PIDfc) olarak adlandırılır.

α ve β 'nin sistem performansına etkisi, 7. bölümdeki deneyler ve sonuçlara ilişkin grafiklerden de kolayca görülmektedir. $\alpha > 0$ ve $\beta = 0$ olması kontrolörün PDfc tarzında davranması anlamındadır ki sürekli hal hatası kaçınılmazdır. $\alpha = 0$ ve $\beta > 0$ durumunda kontrolör PIfc gibi davranır ve sürekli hal hatası elimine edilse de aşımalar ve ciddi osilasyonlar önlenemez. $\alpha > 0$ ve $\beta > 0$ olması halinde ise kontrolörün PIDfc olarak davranması sağlanır. α ve β değerleri optimum şekilde seçilerek sistem performansında belirli bir biçimde artış gözlemlenebilir.

4.3. Adaptif Parametre Metodu

Bir önceki bölümde PIDfc tipi kontrolörlerin keskin tipli bulanık kontrolörlerin performansını nasıl arttırdığı ve integral bileşenin buna etkisi incelendi. İntegral bileşeni zayıfsa cevabın yavaş, güçlüyse sistemin kararsızlığa doğru yöneldiği gözlemlendi. Bu olumsuzluğu önlemek için literatürde pek çok yöntemle rastlamak mümkündür (Mudi, Pal, 2000; Chung, Chen, Lin, 1998; Chao, Teng, 1997; Jung, Ham, Lee, 1995). Bu çalışmada ise eşdeğer integral bileşenin zamanla değiştiği düşünülerek sistem cevabının başlarında integral bileşeni daha büyük değerli olarak seçileceği ve zamanla, değerinin yavaşça düşebileceği sonucuna varılmıştır. Böylelikle sistemin sönümü artırılır ve daha kararlı hale getirilir. Bu yolla sistem

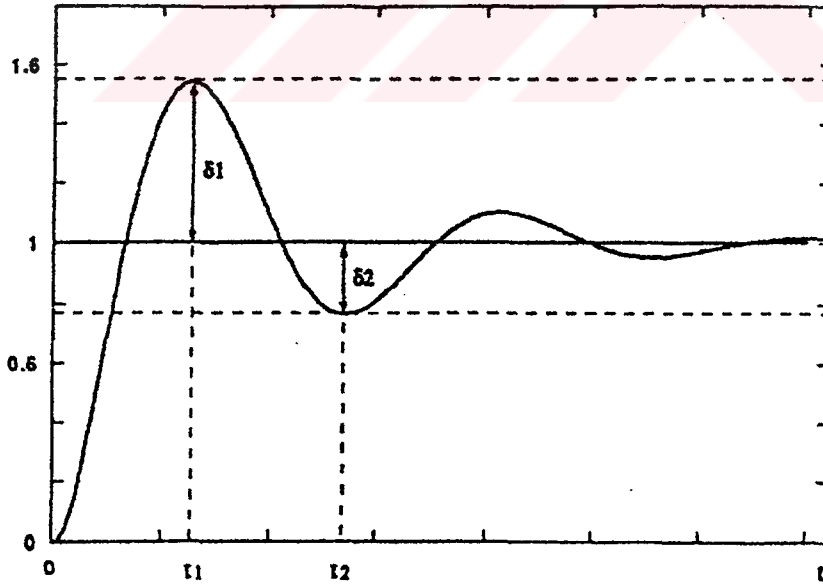
cevabının hızının yüksek, oturma zamanının ise düşük olması sağlanabilir (Qiau, Muzimoto, 1995).

Şekil 4.6'da bir kontrol sistemine ait az sönümlü birim basamak cevabı görülmektedir. Cevabı aşım değerlerinin olduğu zamanlara göre farklı evrelere ayırmak mümkündür. Başlangıç zamanı 0'dan t_1 anına kadar, yani ilk aşımın olduğu ana kadar sistem hatası tüm evrensel kümeyi (univers of discourse) kapsamaktadır. t_1 anından sonra ise hata hiçbir şekilde $[-\delta_1, \delta_1]$ sınırları dışına çıkmayacaktır. Şekilden de görüldüğü gibi δ_1 , t_1 anında oluşan aşımın mutlak değeridir. t_2 anında ise yeni bir aşım oluşmaktadır ve bu aşım değeri bir sonraki aşım değerinden mutlaka daha büyük olacaktır. Sistem cevabı bu şekilde istenilen değere oturacaktır. Cevabı iyileştirmeye yönelik integral bileşenin, her aşım anında ve oluşan aşımın mutlak değerine göre azalabileceği düşünülebilir. Yöntemin daha iyi şekilde algılanabilmesi için kontrol bileşenlerini tek tek incelemek gerekir.

Oransal : $\alpha K_1 P + \beta K_2 D$

İntegral : $\beta K_1 P$

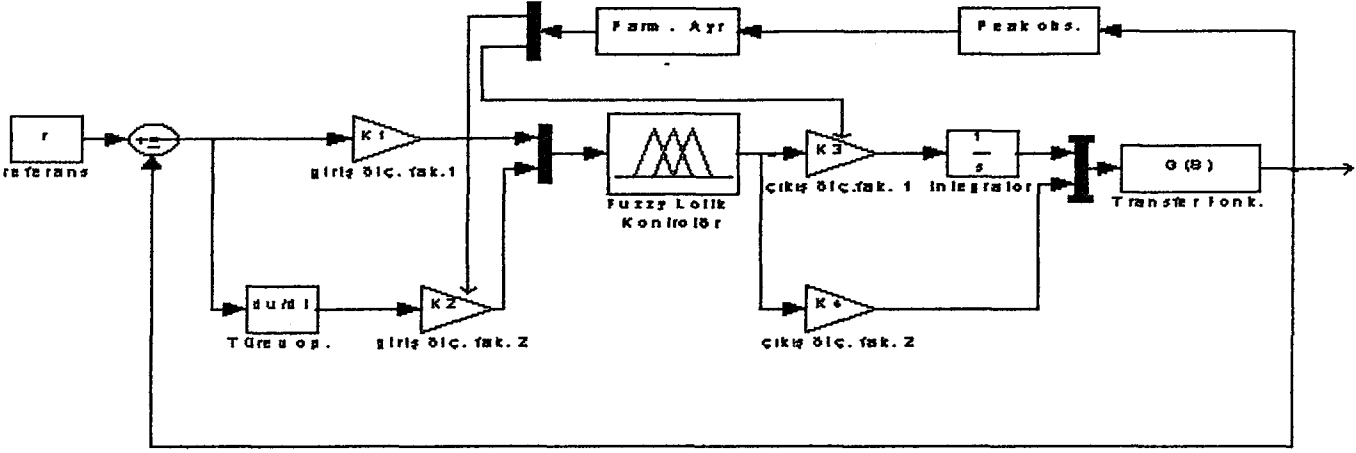
Türev : $\alpha K_2 D$



Şekil 4.6. Bir kontrol sistemine ait basamak cevabının farklı fazları

Görüldüğü gibi β parametresinin değerini yavaşça düşürdüğümüzde, integral bileşeni de düşecek böylelikle sönüm artacak ve sistem daha kararlı hale gelecektir. Oransal bileşen β ve K_2 parametrelerini içerir. β düşürüldükçe oransal sistemin göstereceği reaksiyon da

yavaşlayacaktır. Eğer aynı anda β 'yı düşürdüğümüz oranda K_2 değerini arttıracak olursak oransal kontrol bileşeni değişmeden kalacaktır. K_2 'nin artması aynı zamanda türev bileşenini



de artıracak fakat bu artışın sistem performansına olumsuz yönde etkisi olmayacaktır. Çünkü türev kontrol kuralına göre sistemin osilasyon ve aşımara karşı direnci artmış olacaktır.

Şekil 4.7. Aşım gözlemleyicisi içeren Parametre Adaptif Bulanık Kontrolöre ait blok diyagramı

Bu düşünce ışığı altında parametre adaptif PID (PAPID) tipi bulanık kontrolör gerçekleştirilebilir. Amaçlanan kontrolör PIDfc, aşım gözlemleyicisi ve parametre düzenleyicisinden oluşmaktadır ve eşdeğer blok diyagramı Şekil 4.7'de verilmiştir.

Öngörülen sistemdeki PIDfc yapısı bir önceki bölümde ayrıntılı olarak verilmiştir. Aşım gözlemleyicisi sistemin çıkışını gözlemleyerek her aşım anında bir sinyal işareti göndererek aşımın değerini ölçer. Parametre düzenleyicisi ise her aşım anında ölçülen değere göre K_2 ve β değerlerini ayarlar. Ölçekleme sabitleri ve integral katsayısının ayarlanmasına yönelik algoritma ise aşağıdaki gibidir.

$$K_2 = \frac{K_{2s}}{\delta_k} \quad \beta = \delta_k \beta_s$$

K_{2s} ve β_s , K_2 ve β 'nin başlangıç değerleridir. δ_k ise t_k zamanında meydana gelen aşımın mutlak değeridir. (k=1,2,3)

Ölçekleme faktörlerini değiştirmek için önerilen diğer bir yöntem ise aşağıda verilmiştir.

Buna göre $f(e(t))$ ve $g(e(t))$ olmak üzere iki fonksiyon tanımlanır.

$$f(e(t)) = a_1 \cdot \text{abs}(e(t)) + a_2 \quad (4.10)$$

$$g(e(t)) = b_1 \cdot (1 - \text{abs}(e(t))) + b_2 \quad (4.11)$$

a_1 , a_2 , b_1 ve b_2 terimleri pozitif sabitlerdir ve zamanla değişen ölçekleme faktörlerinin öz uyarlaması da;

$$\beta_s(e(t)) = \beta \cdot f(e(t)) \quad (4.12)$$

$$K_2(e(t)) = K_{2s} \cdot g(e(t)) \quad (4.13)$$

olacaktır. β ve K_2 , ölçekleme faktörlerinin başlangıç değeridir. $f(e(t))$ fonksiyonunun amacı, hatanın değişimi ile birlikte $\beta_s(e(t))$ yi azaltmaktır. Diğer bir deyişle hata 0 olduğunda $f(e(t))$ 'nin değeri a_2 ye eşit olacaktır. Bunun aksine sürekli halde $g(e(t))$ fonksiyonu da $b_1 + b_2$ 'ye eşit olacaktır. Böylelikle $\beta_s(e(t))$ ve K_{2s} değerleri zaman içindeki hata ile birlikte değişebilecektir. Yani artık K_1 , K_2 , α , β gibi ayarlanabilir parametrelere a_1 , a_2 , b_1 , b_2 parametreleri de dahil olmuştur. Aşağıdaki denklem takımı bu yeni parametrelerin önemini çok daha iyi vurgulayacaktır (Woo, Chung, Lin, 2000).

$$\begin{aligned} e = 1 : f(1) &= a_1 + a_2 \\ g(1) &= b_2 \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} e = 0 : f(0) &= a_2 \\ g(0) &= b_1 + b_2 \end{aligned} \quad (4.15)$$

Başlangıçta;

$$\beta_s(e(t)) = (a_1 + a_2) \beta \text{ iken}$$

sürekli halde

$\beta_s(e(t)) = (a_2) \beta$ dir.

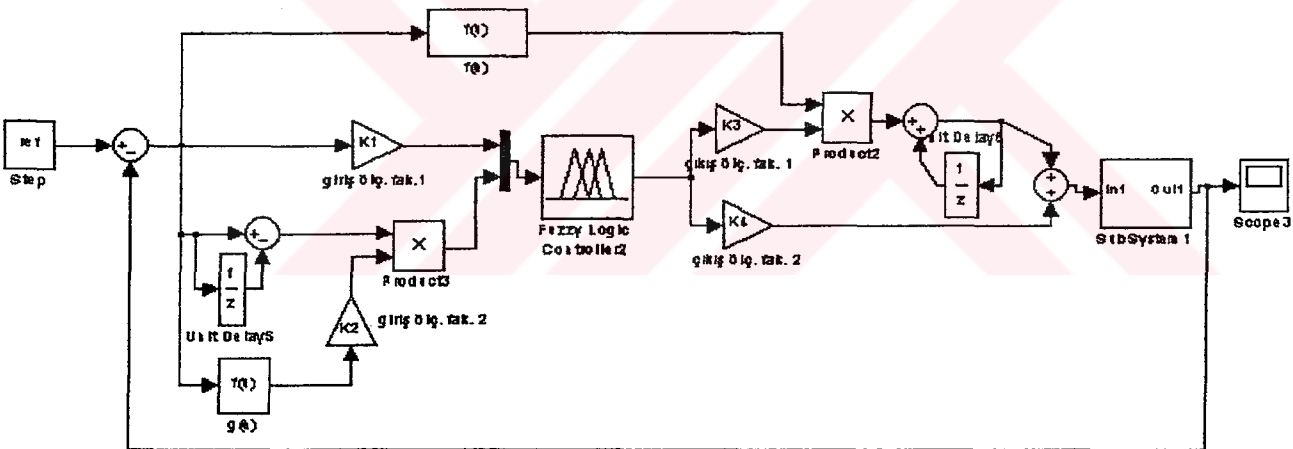
$(a_1 + a_2) \beta$ ve $(a_2) \beta$ değerlerini uyarlamak için a_1 ve a_2 değerleri ayarlanabilir. Böylelikle $\beta_s(e(t))$ nin başlangıç ve son değerleri belirlenebilir.

Sistemin hataya karşı çabuk cevap verebilmesi için $(\alpha K_1 P + \beta K_2 D)$ oransal bileşeninin mümkün olduğunca sabit tutulması gerekmektedir. Bunun için de

$$f(1) \cdot g(1) = f(0) \cdot g(0) \quad (4.16)$$

olmasına çalışılır.

Buna göre a_1 , a_2 , b_1 ve b_2 değerleri belirlenebilir. Yönteme ilişkin simülasyon sonuçları ve kabul edilen değerler deneyler ve sonuçlar kısmında verilmiştir.



Şekil 4.8. Fonksiyon optimizasyonu içeren Parametre Adaptif Bulanık Kontrolöre ait blok diyagramı

5. SİSTEMLERİN BULANIK MODELLENMESİ

5.1. Bulanık Sistem Tanıma

Sistem tanıma, sisteme ait giriş-çıkış verilerine dayanarak dinamik sistemin matematiksel modelinin elde edilmesidir. Dinamik sistemin giriş ve çıkış verileri, t 'inci anda $u(t)$ ve $y(t)$ olsun. Bu durumda veri kümesi

$$Z^t = \{y(1), u(1), \dots, y(t), u(t)\}$$

olarak tanımlanır. Dolayısıyla, sisteme ait model, geçmiş verilere ait bir alt kümeden, $\varphi(t) \in Z^{t-1}$, bir sonraki çıkışa, $y(t)$, bir dönüşüm olarak görülebilir. Bu kestirim modeli

$$\hat{y}(t/\theta) = f(\varphi(t)/\theta)$$

şeklinde gösterilebilir. Burada $\hat{y}(t)$ tahmin edilen çıkışlar, $\varphi(t)$ regresörler ve θ ise parametre vektörüdür (Ljöng, 1995).

5.2 Bulanık Çıkarım Sistemleri

Doğrusal olmayan sistem tanıma problemlerine üç şekilde yaklaşılabilir: Beyaz-kutu, Kara-kutu ve Gri-kutu modelleme. Beyaz-kutu modellemede, sisteme ait denklemler kullanılır. Tam olarak bilinen bu denklemlerden yararlanılarak model inşa edilir. Öte yandan, kara-kutu modellemede sisteme ilişkin giriş-çıkış verilerinden başka hiçbir veri yoktur. Bu veriler işlenerek model kurulur. Örneğin yapay sinir ağları temelli modelleme bu gruba girer. Gerçek dünyada modelleme yaparken sisteme ait tam bir modelin elde edilmesi çok zordur. Çoğu zaman sistemi etkileyen belirsiz faktörler mevcuttur. Bu belirsizlikler yapılan deneylerle giderilmeye çalışılır. Ancak bu tanıma işlemi sırasında, sisteme ait önceki bilgilerimiz devre dışı kalır ve modelleme aşamasında işlemez. Gri-kutu modelleme sırasında modellenecek sisteme ait bilgi sahibi olan uzmanın bilgileri EĞER – O HALDE kuralları aracılığıyla modelleme için de kullanılır. Bu türden sistem tanıma, bulanık sistem tanıma olarak adlandırılır.

Uzman bilgisi yardımıyla elde edilen bulanık kural tabanındaki her bir dilsel değişken bir bulanık küme ile ifade edilir. Öncülde yer alan değişkenler VE veya VEYA operatörleriyle birbirlerine bağlanır. Sonuç ifadesindeki yapı bulanık kural tabanının yapısını belirler. Mamdanin'nin ortaya koyduğu ve kendi adıyla anılan yapıda çıkış yine bir bulanık kümedir. Takagi ve Sugeno'nun 1985 yılında ortaya koymuş oldukları yapıdaki sonuç ifadesi ise bir fonksiyondur. Bu fonksiyon genellikle doğrusaldır ve değişkenleri ölçüldekilerle aynıdır. Eğer sonuç ifadesindeki fonksiyon sıfırcı dereceden, yani bir sabit ise bu "singleton" (tekil) olarak adlandırılır.

Bulanık sistem tanıma için birçok parametre vardır. Bu kadar çok parametrenin varlığı bulanık sistem tanımayı esnek hale getirirken, karmaşıklaştırır da. Bu sebepten bazı değişkenlerin başlangıçta belirlenmesi gerekir. Örneğin bu çalışmada *kara kutu* olarak ele alınan sistemi modellerken, Takagi – Sugeno bulanık modelleme ilkesine dayanan Anfis mimarisi ele alınmıştır ve aşağıda açıklanmış olan yapılardan "Narx modeli" tercih edilmiştir. Ayrıca kurallarda yer alan değişkenler yalnızca VE operatörü ile birleştirilmiştir. VE operatörü olarak min veya çarpım kullanılabilir. Çarpım operatörü, min operatörüne göre daha yumuşak bir geçiş sağlar. Ayrıca türev almaya da uygundur. Bulandırma yöntemi olarak singleton, ve durulayıcı olarak da ağırlıklı ortalama yöntemi kullanılmıştır (Ying, 1998).

5.3. Model Yapıları

Bulanık çıkarım sistemlerinin birer evrensel yaklaşımçı olduğu Wang tarafından 1992 yılında ortaya konmuştur ve buna göre büyük bir sınıf doğrusal olmayan siteme ait bulanık model istenilen yaklaşıklıkla elde edilebilir (Wang, Mendel, 1992).

Doğrusal sistem tanıma teknikleri, doğrusal olmayan metotlara göre daha basit olduklarından, bulanık sistem tanımada ilk adım olarak sisteme ait uygun bir doğrusal modelin elde edilmesi önerilir. En iyi doğrusal modele ait yapı, bulanık sistem tanımada başlangıç noktası olarak kullanılır.

Doğrusal modellemedeki mevcut model yapıları, doğrusal olmayan sistemler için de aşağıdaki gibi tanımlanmıştır.

- NFIR modeller : Regresyon vektörü yalnızca geçmiş girişlerden oluşur.

$$\varphi = [u(t-k), \dots, u(t-n)]$$

- NARX modeller : Regresyon vektörü geçmiş girişlerden ve geçmiş çıkışlardan oluşur.

$$\varphi = [u(t-k), \dots, u(t-n), y(t-k), \dots, y(t-m)]$$

- NOE modeller : Regresyon vektörü geçmiş girişlerden ve kestirilen geçmiş çıkışlardan oluşur.

$$\varphi = [u(t-k), \dots, u(t-n), \hat{y}(t-k/\theta), \dots, \hat{y}(t-m/\theta)]$$

- NARMAX modeller : Regresyon vektörü geçmiş girişlerden, geçmiş çıkışlardan ve tahmin hatalarından oluşur.

$$\varphi = [u(t-k), \dots, u(t-n), y(t-k), \dots, y(t-m), \varepsilon(t-k/\theta), \dots, \varepsilon(t-l/\theta)]$$

- NBJ modeller : Regresyon vektörü geçmiş girişlerden, tahmin edilen geçmiş çıkışlardan, geçmiş çıkışları kullanarak tahmin edilen hatalardan geçmiş tahmin edilen çıkışları kullanarak tahmin edilen hatalardan oluşur.

$$\varphi = [u(t-k), \dots, u(t-n), \hat{y}(t-k/\theta), \dots, \hat{y}(t-m/\theta), \varepsilon(t-k/\theta), \dots, \varepsilon(t-l/\theta), \varepsilon_u(t-k/\theta), \dots, \varepsilon_u(t-p/\theta)]$$

- Durum Uzayı modelleri : Stokastik durumda model

$$\hat{x}(t-1) = f(\hat{x}(t), u(t), \varepsilon(t))$$

$$\hat{y}(t) = g(\hat{x}(t), u(t))$$

şeklinde. Deterministik durum hata terimini içermez.

NFIR modeli basit olmasına ve kararlılık hakkında güzel özelliklere sahip olmasına rağmen, anlamlı sayıda geçmiş giriş gereksinim duyar. Dolayısıyla bulanık sistem tanımada tercih edilmez. NARX modeli ise basitliği ve sağladığı modelin doğruluğu açısından sistem tanıma probleminde en çok kullanılan yapıdır (Ljöng, 1995).

5.4 ANFIS

Bu bölümde gerçekleştirdiği fonksiyon bakımından bulanık çıkarım sistemine denk bir adaptif ağ yapısı üzerinde durulmuştur. ANFIS (Adaptif Network Based Fuzzy Inference System) olarak adlandırılan bu yapıda hibrid öğrenme kuralının uygulanabilmesi için parametre kümesinin ayrıştırılması gerekmektedir (Jang, 1995; Jang, 1993). Buna göre öncelikle Anfis mimarisi tanımlanacak ve Sugeno modeline göre öğrenme algoritması verilecektir.

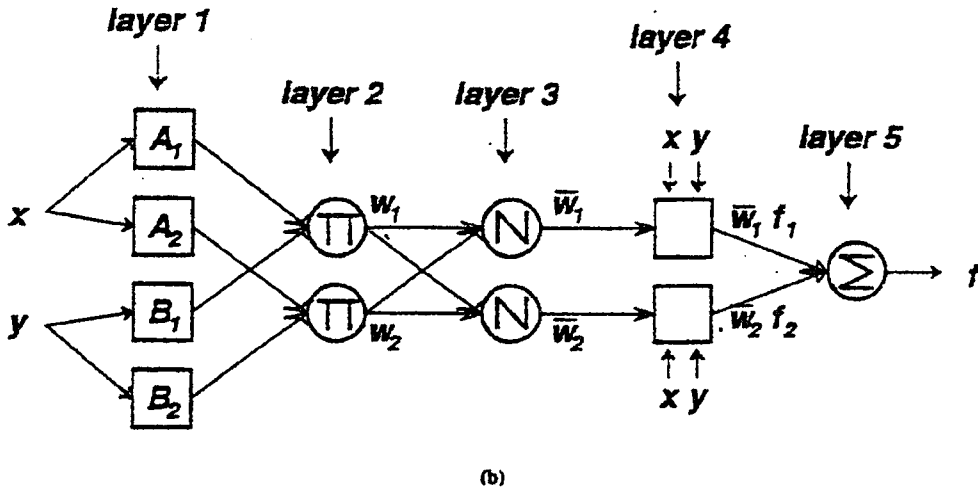
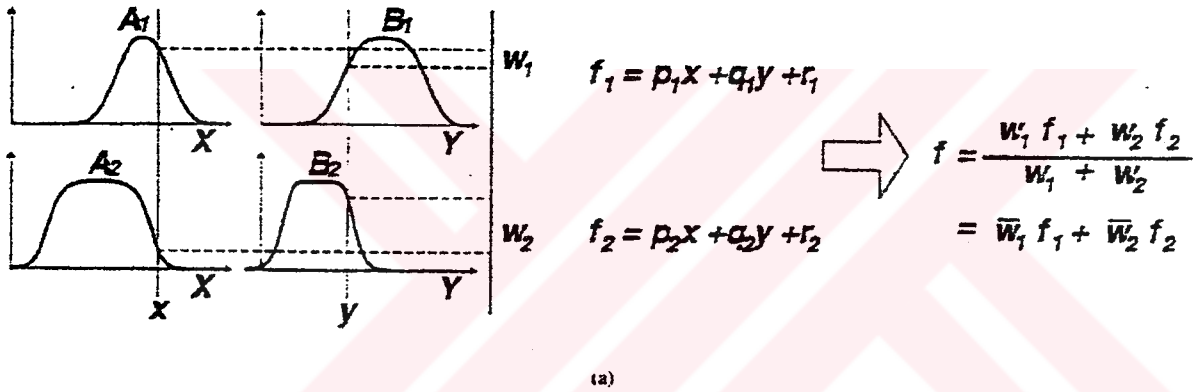
5.4.1 Anfis Mimarisi :

Basitlik açısından bulanık çıkarım sistemi iki girişli (x,y) ve tek çıkışlı (z) [MISO] olarak ele alınmıştır. Birinci mertebeden bir Sugeno modeli (Jang, 1991) iki bulanık kuralla aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

Kural 1 EĞER x A_1 ve y B_1 ise O HALDE $f_1 = p_1x + q_1y + r_1$

Kural 2 EĞER x A_2 ve y B_2 ise O HALDE $f_2 = p_2x + q_2y + r_2$

Şekil 5.1(a) Sugeno modelinin çıkarım mekanizmasını ifade etmektedir. Karşılık düşen Anfis mimarisi ise Şekil 5.1(b)'de gösterilmiştir. Buna göre katmanların fonksiyonları aşağıda tek tek ele alınmıştır. (1 katmanındaki i . düğüm Q_{li} olarak ifade edilmiştir).



Şekil 5.1. (a) iki giriş ve iki kurala sahip birinci dereceden Sugeno bulanık modeli

(b) eşdeğer ANFIS mimarisi

Katman 1: Bu katmandaki her i düğüm çıkışı aşağıda görüldüğü gibi adaptif bir düğümdür.

$$Q_{1i} = \mu A_i(x) \quad i = 1, 2 \quad \text{ya da}$$

$$Q_{1i} = \mu B_{i-2}(y) \quad i = 3, 4$$

Burada x (ya da y) düğümüne giriş, A_i (ya da B_{i-2}) bu düğümle birleşmiş bulanık bir kümedir. Diğer bir deyişle bu katmanın çıkışı öncül kısmın üyelik değerlerini oluşturmaktadır. Burada A_i ve B_i 'ye ait üyelik fonksiyonları parametrize edilmiş halde olabilirler. Örneğin A_i genelleştirilmiş bell (çan eğrisi) fonksiyonu olarak karakterize edilmiş olabilir. ($\max=1$, $\min=0$) Buna göre:

$$\mu A_i(x) = \frac{1}{1 + \left[\left(\frac{x+c_i}{a_i} \right)^2 \right]^{b_i}}$$

ya da bir Gauss fonksiyonu olabilir.

$$\mu A_i(x) = \exp \left[- \left(\frac{x-c_i}{a_i} \right)^2 \right]$$

burada $\{a_i, b_i, c_i\}$ parametre kümesidir. Bu katmandaki parametreler öncül parametreler olarak adlandırılır ve değerleri değiştiğinde çan fonksiyonu (ya da Gauss fonksiyonu) da buna bağlı olarak değişir. Genelde kullanılan trapezoidal ve üçgen tipi üyelik fonksiyonları da bu katmanda kullanılabilen yapılardır.

Katman 2: Bu katmandaki her düğüm sabittir ve Π operatörü olarak işlem görür. Yani gelen sinyalleri çarpar ve çarpım

$$Q_{2i} = w_i = \mu A_i(x) * \mu B_i(y) \quad i = 1, 2$$

olur. Her düğümün çıkışı bir kuralın ateşleme derecesini temsil eder. Gerçekte bu düğümde bulanık AND işlemini yapan her türlü T norm operatörü de kullanılabilir.

Katman 3: Bu katmandaki düğümler de sabittir ve "N" olarak adlandırılmıştır. Buna göre i 'inci düğümün ateşleme derecesinin tüm kuralların ateşleme derecesi toplamına oranı hesaplanır.

$$Q_{3i} = \bar{w}_i = \frac{w_i}{w_1 + w_2}, \quad i = 1, 2$$

Elverişlilik açısından bu katmanın çıkışları normalize edilmiş ateşleme dereceleri olarak da adlandırılır.

Katman 4: Bu katmandaki her i düğümü aşağıdaki fonksiyona sahip adaptif bir düğümdür.

$$Q_{4i} = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (p_i x + q_i y + r_i)$$

\bar{w}_i : 3. katmanın çıkışı

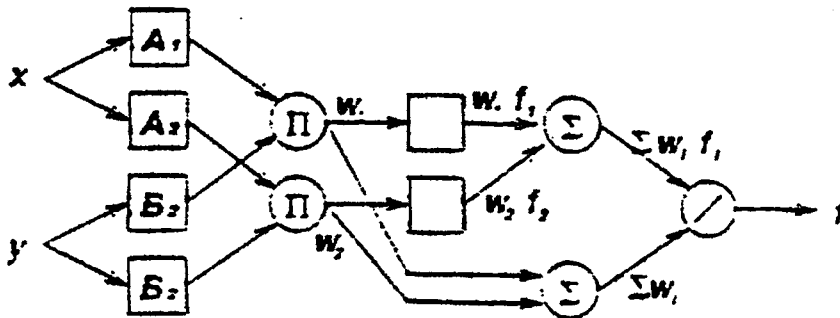
$\{p_i, q_i, r_i\}$: parametre kümesi

Bu katmandaki parametreler sonuç parametreleri olarak sunulmuştur.

Katman 5: Bu katmanda tek bir parametre vardır ve sabittir. Toplama işlemi yapar (Σ). Tüm giriş sinyallerinin toplamını hesaplayarak çıkış olarak verir.

$$Q_{5i} = \text{tüm çıkışlar} = \sum_i \bar{w}_i f_i = \frac{\sum_i w_i f_i}{\sum_i w_i}$$

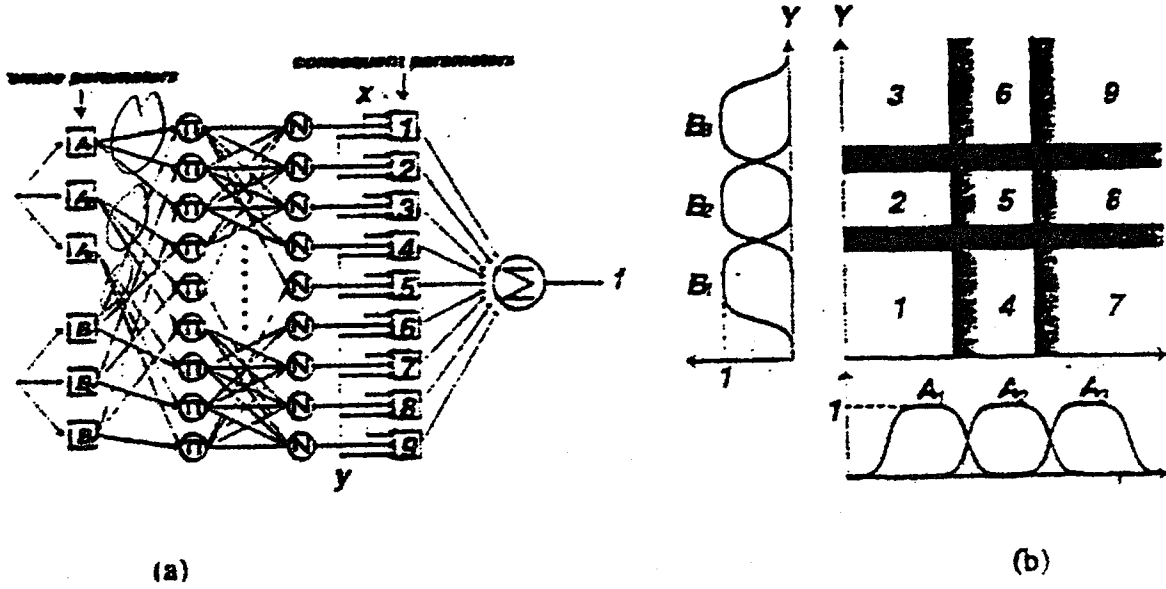
Burada Sugeno modeline ait adaptif bir ağ yapısı oluşturulmasına karşın aynı işlevi görecektir farklı yapılar da oluşturulabilir. Buna göre 3. ve 4. Katmanlar birleştirilerek 4 katmanlı eşdeğer bir ağ yapısı olarak da ifade edilebilir. Şekil 5.2 bu tarz bir Anfis yapısını göstermektedir. Ya da Lin-Lee (Wang, Mendel, 1992) ve Wang-Mendel (Mannie, 1998) modelleri de aynı işlevi yerine getirmek için kullanılabilir.



Şekil 5.2. İki giriş ve iki kurala sahip Sugeno Bulanık modeli için farklı bir Anfis yapısı

Şekil 5.3(a)'da birinci mertebeden iki girişli 9 kurallı bir Sugeno bulanık modelinin Anfis eşdeğer mimarisi gösterilmiştir. Her girişe ait 3'er üyelik fonksiyonu mevcuttur.

Şekil 5.3(b)' de ise EĞER-O HALDE kuralları çerçevesinde 9 bulanık bölgeye ayrılmış 2 boyutlu giriş uzayı görülmektedir.



Şekil 5.3. (a) Birinci mertebeden iki girişli 9 kurallı bir Sugeno bulanık modelinin Anfis eşdeğer mimarisi (b) 9 bulanık bölgeye ayrılmış 2 boyutlu giriş uzayı.

Diğer bir deyişle kuralın öncül kısmı bulanık bölgeyi tanımlarken sonuç kısmı da bu alan içinden seçilecek olan uygun çıkışı belirler.

Mamdani modeline ait Anfis mimarisi (Jang, 1993) ise uzun hesaplama algoritmasından doğan zaman kaybindan dolayı tercih edilmemiştir.

5.4.2 Hibrid Öğrenme Algoritması :

Şekil 5.1(b)'de gösterilen Anfis mimarisi incelenecek olursa öncül parametre değerleri sabit tutulduğunda çıkışın, sonuç parametrelerin doğrusal bir kombinasyonu olduğu görülecektir.

Matematiksel olarak ifade edilecek olursa :

$$f = \frac{w_1}{w_1 + w_2} f_1 + \frac{w_2}{w_1 + w_2} f_2$$

$$= \bar{w}_1 f_1 + \bar{w}_2 f_2$$

$$= (\bar{w}_1 x) p_1 + (\bar{w}_1 y) q_1 + (\bar{w}_1) r_1 + (\bar{w}_2 x) p_2 + (\bar{w}_2 y) q_2 + (\bar{w}_2) r_2$$

Buna göre hibrid öğrenme algoritmasının direkt olarak uygulanması söz konusudur. Hibrid öğrenme algoritmasının ileri yönde yayılımında çıkış kuralları 4 katmana kadar ilerler ve sonuç parametreleri en küçük kareler metoduna göre belirlenir. Geri yönde yayılımda ise hata

sinyali geriye doğru yayılır ve öncül parametreler eğim düşüm metoduna göre yenilenir. Çizelge 5.1 her iki yayılım prosedürünü de içermektedir.

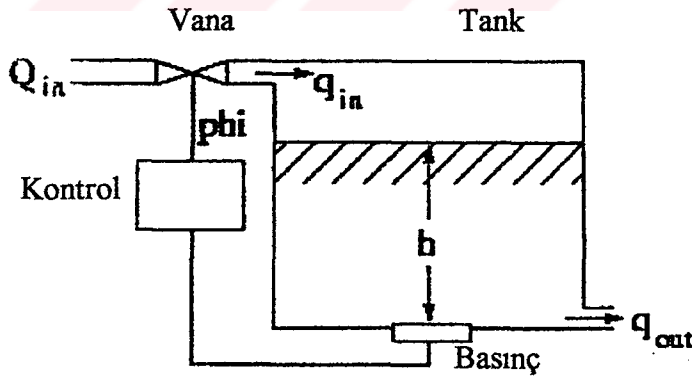
Çizelge 5.1. Hibrid Öğrenme Kuralının içerdiği yayılım prosedürü

	İleri Yayılım	Geri Yayılım
Öncül Parametreler	Sabit	Eğim Düşüm
Soncul Parametreler	En Küçük Kareler	Sabit
İşaretler	Düğüm Çıktıları	Hata İşaretleri

Anfis fonksiyonel olarak RBF ile eşdeğer bir yapı arzeder. Anfis'in içerdiği hibrid yaklaşım ise orijinal geri yayılma metoduna göre çok daha kısa zamanda cevaba yakınsar. Çünkü burada arama uzayının boyutları düşürülmektedir.

5.4.3 Doğrusal Olmayan Bir Tank Sisteminin Anfis ile Modellenmesi

Bu bölümde doğrusal yapı arz etmeyen bir tank sisteminin ANFIS ile bulanık modeli elde edilecektir. Şekil 5.4 basit bir tank sistemini göstermektedir (Mannie, 1998).



Şekil 5.4. Basit bir tank sistemi

Bu sisteme ait:

- Tankın dolmasını sağlayan açılabilir vananın kontrolü,
- Tankın tahliye sistemi,
- Sistem modelini doğrusal olmayan hale getiren çıkış ifadesi

aşağıda matematiksel olarak ifade edilmiştir.

SIMULINK aracılığıyla

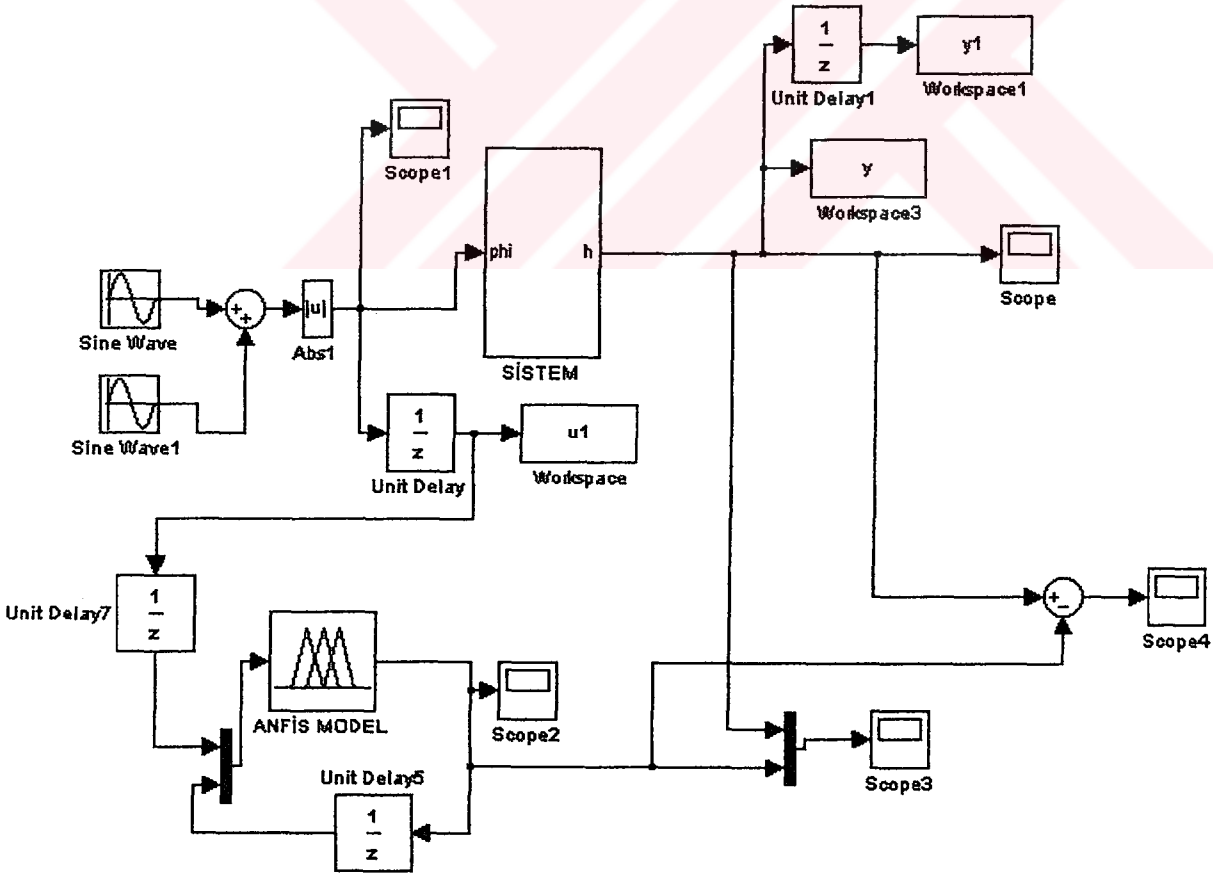
$$q_{in} = Q_{in} \cdot \sin(\varphi(t)) \quad \varphi(t) \in [0, \pi/2]$$

$$q_{out} = a_{out} \sqrt{2gh(t)} \quad g = 9.81 \text{ ms}^{-2}$$

$$h(t) = h(0) + \frac{1}{A} \int_0^t (q_{in}(\tau) - q_{out}(\tau)) d\tau$$

denklemleriyle ifade edilen sistemin modeli oluşturulmuştur.

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



Şekil 5.5. Modellemeye ilişkin blok diyagram

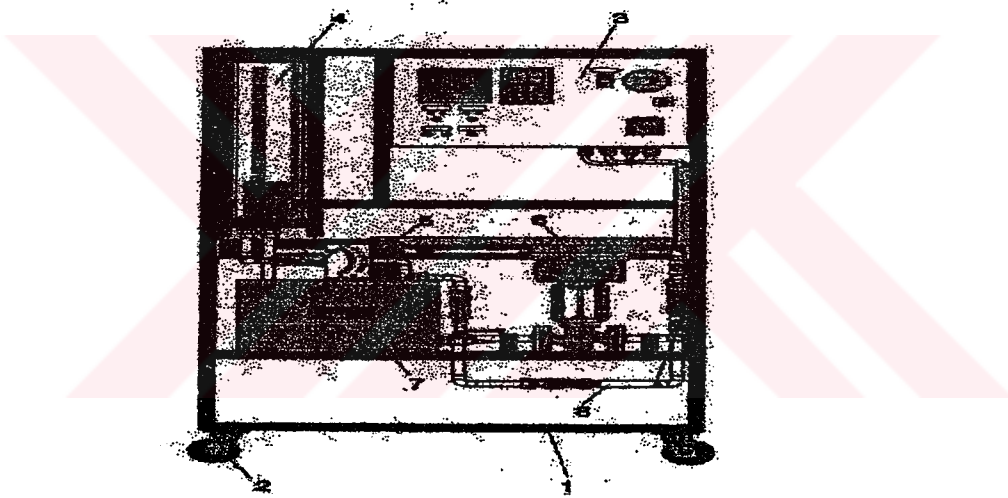
6. GUNT RT512 SIVI SEVİYE ÜNİTESİ

6.1 Giriş

Bu bölümde, bulanık kontrolörün uygulandığı Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Laboratuvarında bulunan GUNT RT512 sıvı seviye ünitesinin genel yapısı, çalışması ve teknik özellikleri anlatılacaktır.

6.2 Sistemin Genel Yapısı

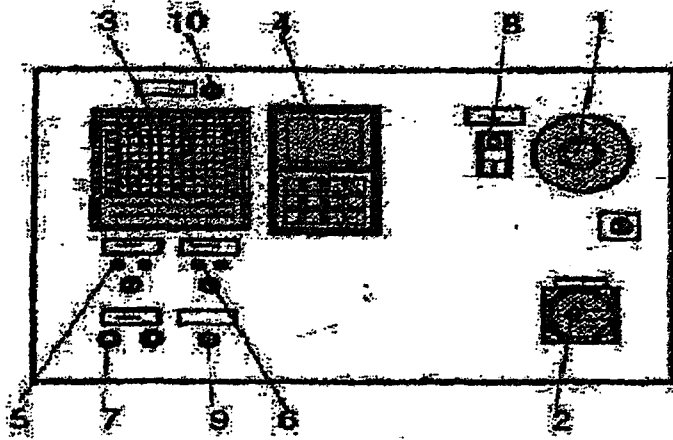
GUNT RT512 sıvı seviye ünitesi, sıvı tüpündeki sıvının yüksekliğinin kontrol edildiği, eğitim amaçlı bir sistemdir. Genel yapısı Şekil 6.1'de görülmektedir.



1. Tüm sistemin monte edildiği hareketleri çerçeve
2. Hareketi kolaylaştıran tekerlekler
3. Ölçme ve elektrik malzemelerin bulunduğu kabin
4. Seviye tankı (Plastik Tüp)
5. Elektrik su pompası(1fazlıASM)
6. Kontrol devresinde kullanılan pnömomatik valf
7. Su tankı
8. Kaskad kontrol kullanım için vana
9. Basınç ayar filtresi
10. Basınç transdüseri

Şekil 6.1. Sistemin genel yapısı

Şekil-6. 2’de GUNT RT512 sıvı seviye sisteminin ana panel görüntüsü verilmektedir (.



1. Acil kapama düğmesi
2. Ana şalter
3. Sürekli hat kaydedici
4. Kontrolör
5. Gerçek (x) değerinin (4-20mA)'lik giriş sinyali için ölçme soketleri
6. 4-20 mA'lik ani sinyaller için ölçme soketleri
7. Kontrolör DMCS bağlantısı
8. Su pompasının açma kapama anahtarı
9. Kaskat bağlantı kontrol anahtarı
10. Sürekli hat kaydedicisi için açma-kapama anahtarı

Şekil 6.2. GUNT Sıvı seviye ünitesinin ana panel görüntüsü

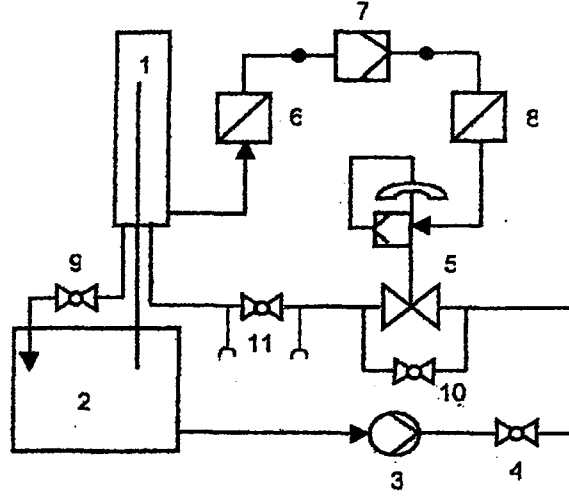
6-3 Sistemin Teknik Özellikleri

Sistemin genel ölçüleri ve sistemde kullanılan elemanların özellikleri aşağıda verilmiştir.

Tüm Boyutlar	
WxIxh	1000*700*1735mm ³
Ağırlık	110 kg
Besleme Kaynağı	
Kompresör hava	2. 5 bar
Gerilim	220V/50Hz
Sıvı Tankı	
Kapasitesi	28 litre
Sıvı pompası	
Max. akış oranı	110 litre/dk
Max. pompa	6. 5 m
Sıvı Seviye Tüpü	
Max sıvı kapasitesi	7 litre
Yükseklik	0-60 cm

6. 4 Sistemin Çalışması

Sistemin işlem diyagramı, Şekil 6-3' de görülmektedir. Sistemdeki amaç; sıvı seviye tüpü (1) içerisindeki sıvı seviyesinin istenilen referans değerde tutulmasıdır.



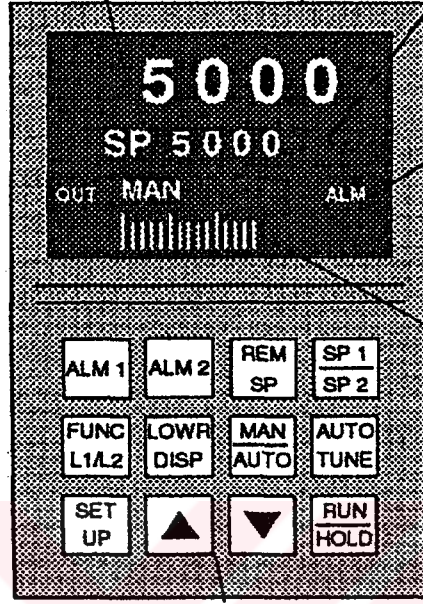
1. Seviye silindiri
2. Sıvı Tankı
3. Sıvı pompa
4. Konik valf
5. Kontrol valfi
6. Basınç sensörü
7. Kontrolör
8. Akım/Basınç sensörü
9. Çıkış valfi
10. Kaskat için Bypass
11. Kaskat için hortum bağlantısı

Şekil 6.3. Sıvı Seviye ünitesinin çalışma diyagramı

Referans sıvı değeri, UDC5000 kontrolör (7) üzerinden girilmektedir. Kontrolör basınç transdüserinden (6) gelen bilgi ile sıvının o andaki değerini algılar ve referans değeri ile karşılaştırarak gerekli olan kontrol işaretini akım/basınç transdüserine (8) buradan da pnömatik kontrol valfine (5) gönderir. Sıvı tankındaki (2) sıvı, sıvı pompası (3) tarafından sistemin çalışmasıyla birlikte sürekli olarak pnömatik kontrol valfinin girişine gönderilmektedir. Pnömatik kontrol valfi kontrolörden gelen sinyale göre girişinde bulunan sıvıyı sıvı seviye tüpüne gönderir. Bu arada sıvı seviye tüpünün alt kısmındaki çıkış valfi (9) daima sıvının tekrar sıvı tankına akışını sağlar. Yaptığımız çalışmada bu çıkış valfinden devamlı bir sıvı akışı olacaktır. Bu sebepten dolayı sıvı seviyesi referans değere ulaştığında dahi pnömatik kontrol valfi tam kapalı duruma getirilmeyecektir. Gelen sıvı ile giden sıvı dengede tutan bir açıklıkta kalacaktır. Bulanık kontrol aşamasında UDC5000 kontrolör (7) devre dışı bırakılarak kontrolör olarak bilgisayar kullanılacaktır [49].

6.5. UDC5000 Kontrolör

Sistemde kontrolör olarak Honeywell marka UDC5000 (Universal Digital Controller) kullanılmıştır. Kontrolörün yapısı Şekil 6. 4'te görülmektedir.

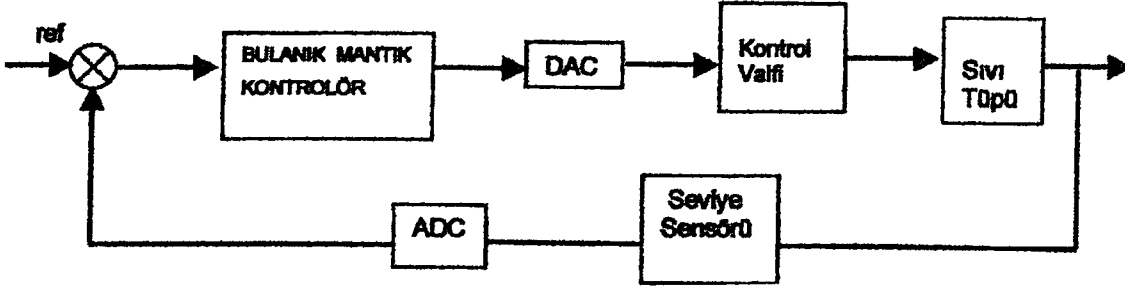


Şekil 6.4. UDC 5000 kontrolörün yapısı

UDC5000 kontrolöründe PID ve ON-OFF kontrol yöntemleri bulunmaktadır. Sıvı seviyesinden ölçülen değişkenler UDC5000 tarafından sayısal bilgiye çevrilir. Sayısal bilgiler kontrolörde değerlendirilerek sisteme analog bilgiye çevrilerek gönderilir. İşlem seçimi fonksiyon tuşları üzerinden yapılır. Kontrolörde, fonksiyon tuşlarının yanısıra yapılan işlemlerin görüntülediği bir ekran bulunmaktadır. Kontrolör, çoklu kontrol yapısına sahiptir. Üzerinde bulunan fonksiyon tuşlarından yararlanarak istenilen kontrol metodu ve bu metoda ait parametreler seçilebilir. Ayrıca referans bilgisi, uyarı alarm programları da fonksiyon tuşlarından ayarlanabilir [50].

6.6. Önerilen Kontrol Sistemi

Bu çalışmada GUNT sıvı seviyesi için önerilen kontrol sistemi Şekil 6. 5'de görülmektedir.

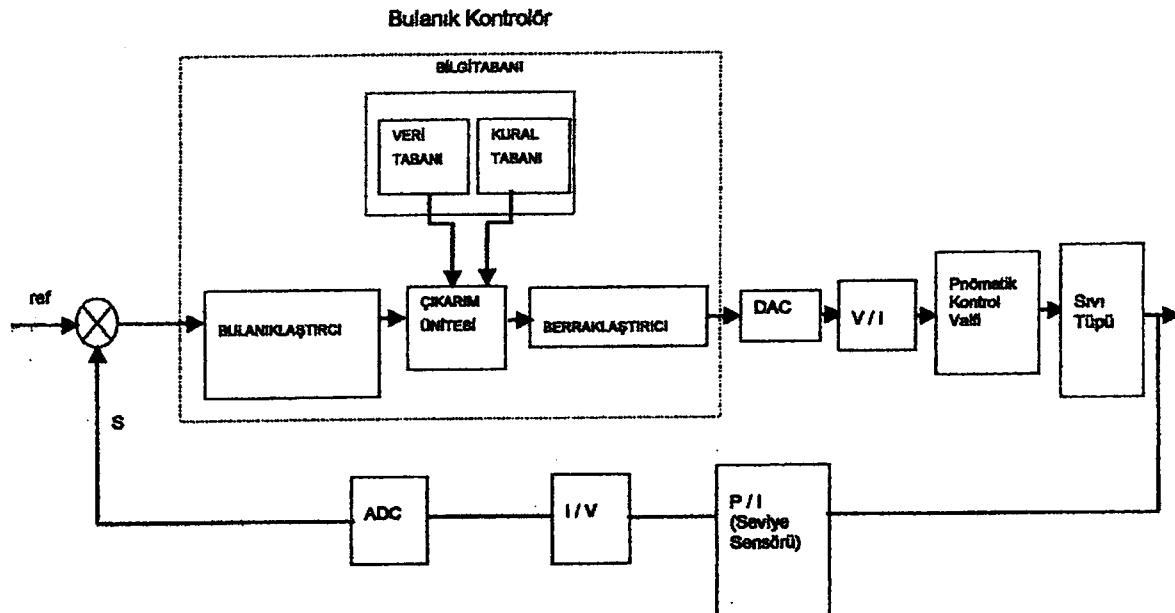


Şekil 6.5. Önerilen kontrol sisteminin blok diyagramı

Sıvı tüpündeki seviye sensöründen alınan seviye bilgisi analog-dijital çevirici yardımıyla dijital işarete çevrilerek bulanık kontrolöre uygulanmaktadır. Bulanık kontrolörde elde edilen kontrol sinyali dijital-analog çeviriciye buradan da kontrol valfine gönderilir. Gelecek bölümlerde bu kontrol birimleri ele alınacaktır.

6.7. Sistem üzerinde yapılan değişiklikler

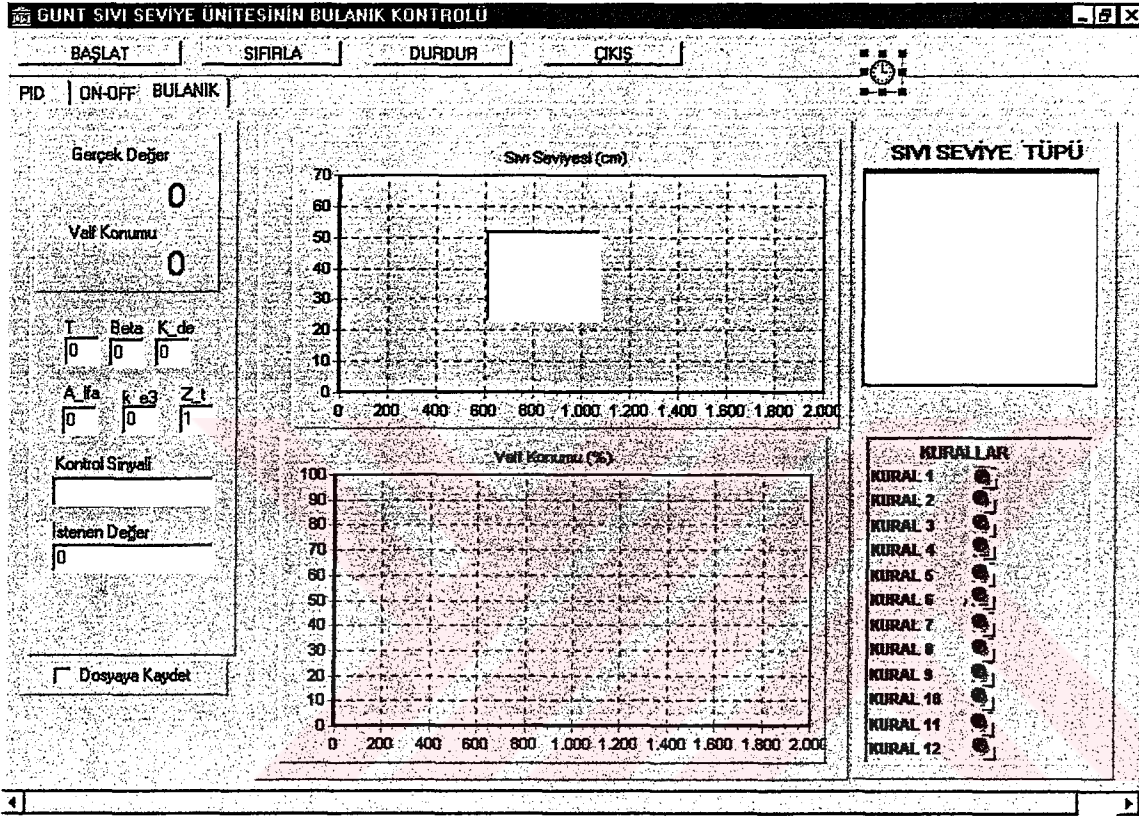
Sıvı seviye sisteminin bulanık kontrolü için sistemde bazı değişiklikler yapılmıştır. Bu değişiklikler sistemin temel yapısını değiştirmemektedir. Sadece kontrolörün çalışmasını düzenlemektedir. Sistemde bulunan UDC5000 kontrolör devre dışı bırakılmıştır. sistemin seviye bilgisi basınç/akım transdüserinden akım bilgisi olarak alınmaktadır, ADC (Analog Digital Converter) kartına giriş bilgisi gerilim olması gerektiğinden transdüserden alınan akım bilgisini gerilim bilgisine dönüştüren devre eklenmiştir. Ayrıca pnömatik kontrol valfi akım sinyalli olduğu kontrolör çıkışındaki DAC (Digital Analog Converter)'tan gelen gerilim bilgisinin akım bilgisine dönüştüren devre de sisteme eklenmiştir.



Şekil 6.6. Tasarlanan kontrolörün temel blok diyagramı

6.8. Bilgisayar Yazılımı

Kontrolör yazılımı Delphi 3.0 programlama diliyle yazılmıştır. Delphi 3.0 programlama dili görsel niteliklere sahip olan bir dil olduğu için grafiksel görünüm programın alt kısımları ile birlikte bir form oluşturmaktadır. Tasarlanan bulanık kontrolörün temel blok diyagramı Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6.7. Yazılımın ekran görüntüsü

7. DENEYLER VE SONUÇLAR

7.1. Simülasyon Sonuçları

Bu bölümde öncelikle bilgisayar ortamında PCWIN-MATLAB programı aracılığıyla gerçekleştirilen PID ve PAPID (Parametre Adaptif PID) tipi bulanık kontrolörlerin davranışlarını analiz etmeye yönelik sistem cevapları, daha sonra ANFIS yardımıyla modeli elde edilen sistemin yine PID ve PAPID bulanık kontrolleriyle kontrolünden elde edilen sonuçlar ve son olarak GUNT RT512 sıvı seviye sisteminin gerçek zamanda PID tipli bulanık kontrolörle kontrolünden elde edilen sonuçlar verilmiştir.

Simülasyona geçmeden önce kontrol edilecek sistemin tanımlaması yapılmıştır. Buna göre şekil 4.3’de verilen model ikinci dereceden tipi “0” olan bir sistemdir. Transfer fonksiyonu ise aşağıdaki gibidir.

$$G(s) = \frac{K}{(T_1s + 1)(T_2s + 1)}$$

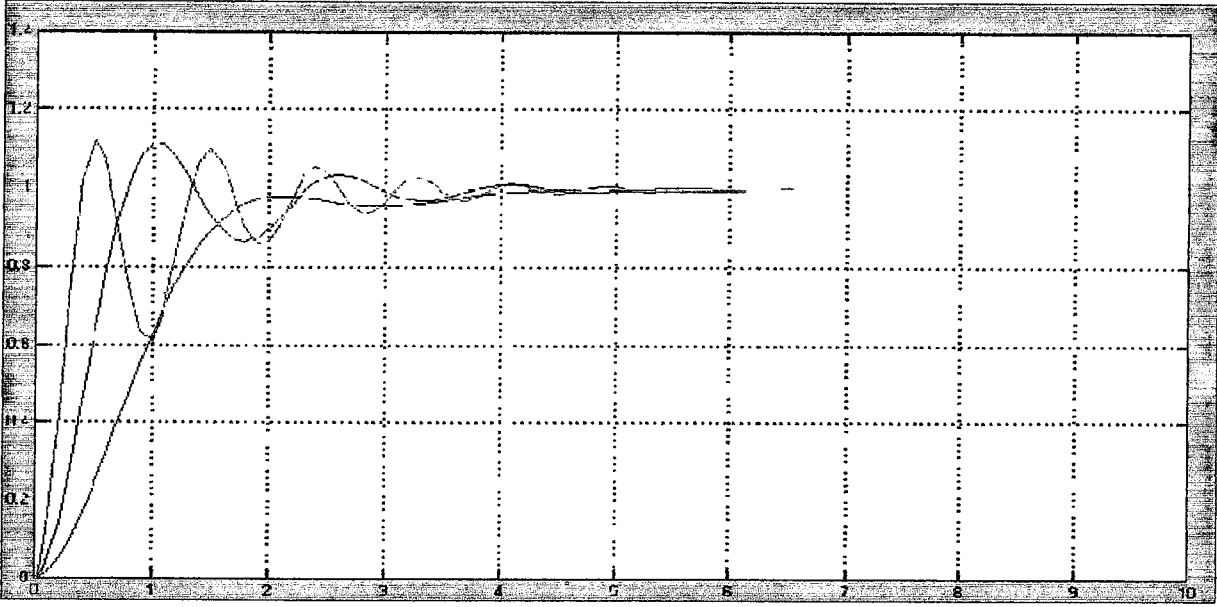
$$K = 16$$

$$T_1 = 1$$

$$T_2 = 0.5$$

Simülasyonda kontrol işlemi gerçekleştirilmede ayrık yöntem kullanılmıştır. Bu nedenle süreklilik arzeden gerçek sistemle arasında az da olsa farklar bulunması kaçınılmazdır. Örnekleme zamanı ise 0.1 olarak seçilmiştir.

Şekil 7.1’de Pİfc içeren sistemin basamak cevabına ilişkin simülasyon sonuçları verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere sistemin sürekli hal hatası "0" a ulaşmıştır. İntegral katsayısı β (Simülasyonda β değerine K_3 atanmıştır) değiştiğinde sistem cevabı da değişmektedir. Buna göre β küçük seçildiğinde sistem yavaş cevap vermekte, çok büyük seçildiğinde ise aşım ve osilasyonlara sebep olmaktadır.



Şekil 7.1. PI tipi bulanık kontrol sisteminin basamak cevabı

Mavi : $K_1 = 0.12$, $K_2 = 1$, $K_3 = 0.1$

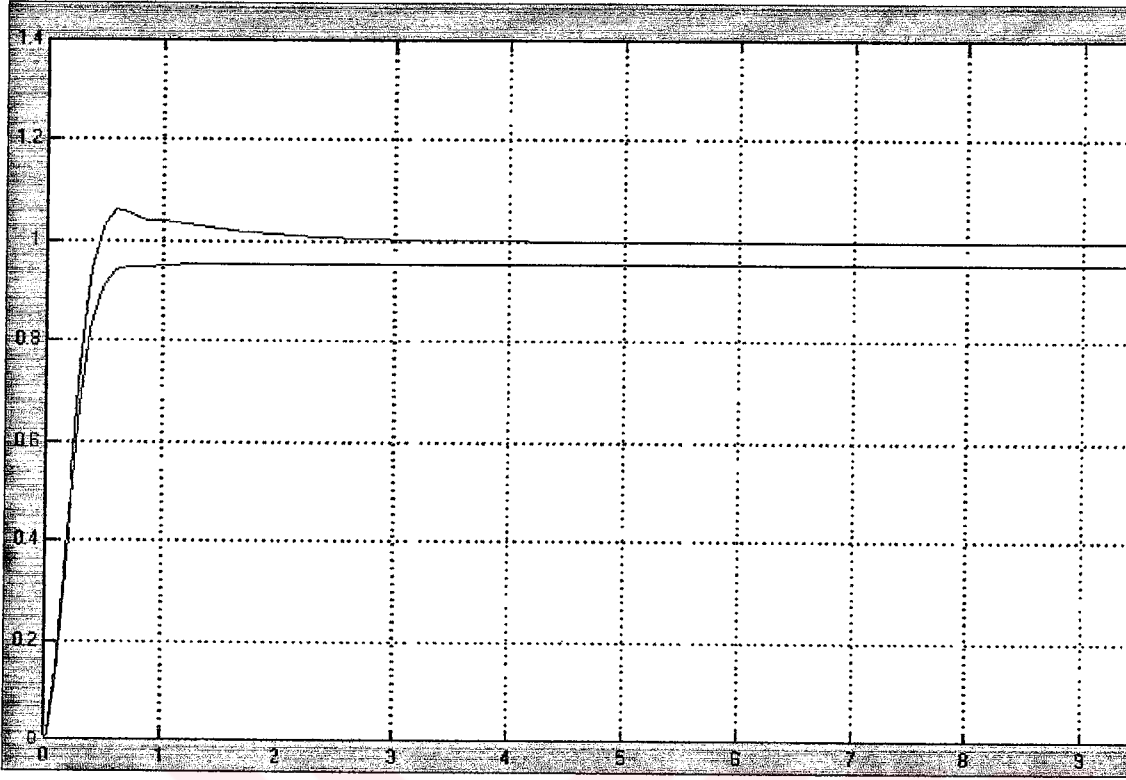
Yeşil : $K_1 = 0.12$, $K_2 = 1$, $K_3 = 0.31$

Kırmızı : $K_1 = 0.12$, $K_2 = 1$, $K_3 = 1$

Şekil 7.2'de PD tipli kontrolörün basamak cevabı verilmiştir. Görüldüğü gibi bu tarz bir kontrolör ile sürekli hal hatasını elimine etmek söz konusu değildir. Uygulanan katsayılara bağlı olarak sistem cevabı her zaman referanstan farklı olacaktır.

Şekil 7.3'te ise PI tipli kontrolörün daha önce olduğu gibi burada da aşımara engel olamadığı görülmektedir.

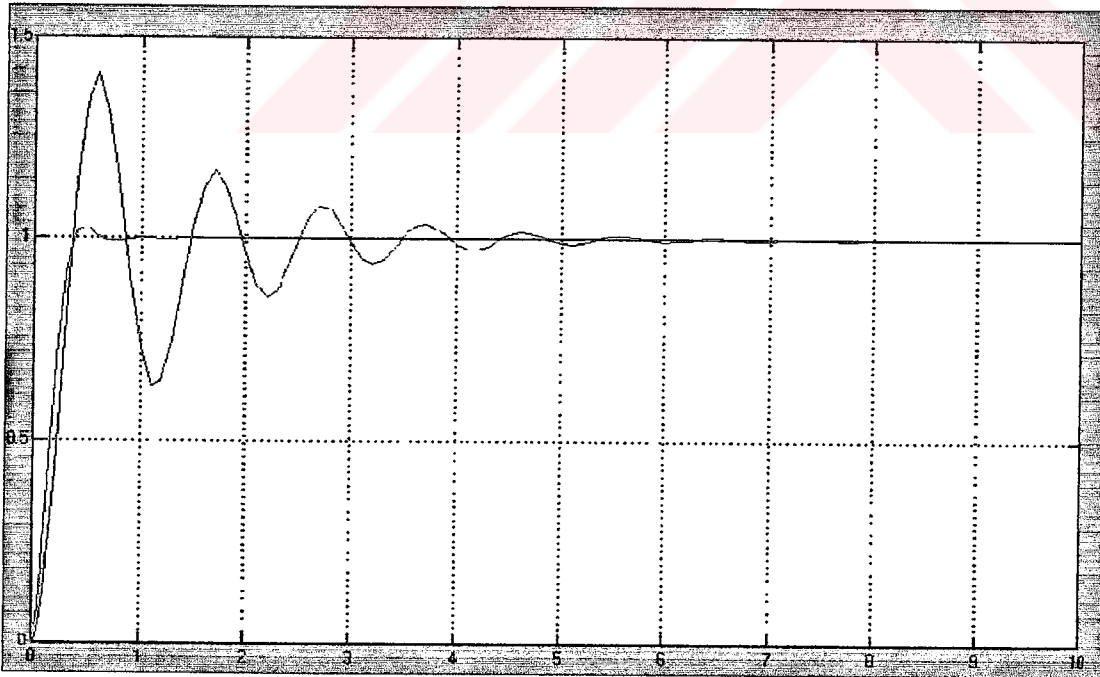
Bununla birlikte simülasyon sonuçları PID tipli kontrolörün cevaplarıyla birlikte verildiğinden karşılaştırma ve yorum yapmak kolaylaşmıştır.



Mavi : PD tipi $K_1 = 1, K_2 = 1, K_3 = 0, K_4 = 1$

Yeşil : PID tipi $K_1 = 1, K_2 = 1, K_3 = 0.1, K_4 = 1$

Şekil 7.2. PD ve PID tipi bulanık kontrol sistemlerine ait karşılaştırmalı basamak cevapları



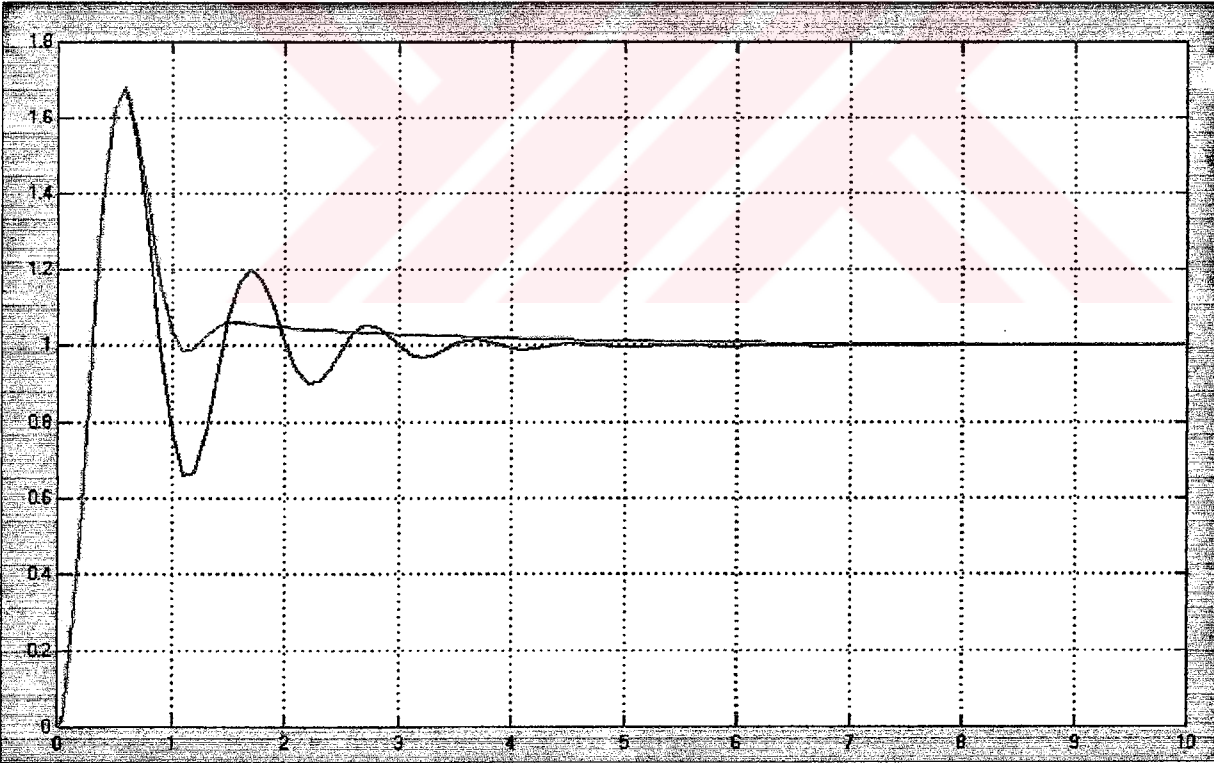
Mavi : PID tipi : $K_1 = 0.1, K_2 = 1, K_3 = 1, K_4 = 1$

Yeşil : PI tipi : $K_1 = 0.1, K_2 = 1, K_3 = 1, K_4 = 0$

Şekil 7.3. PI ve PID tipi kontrol sistemlerine ait karşılaştırmalı basamak cevapları

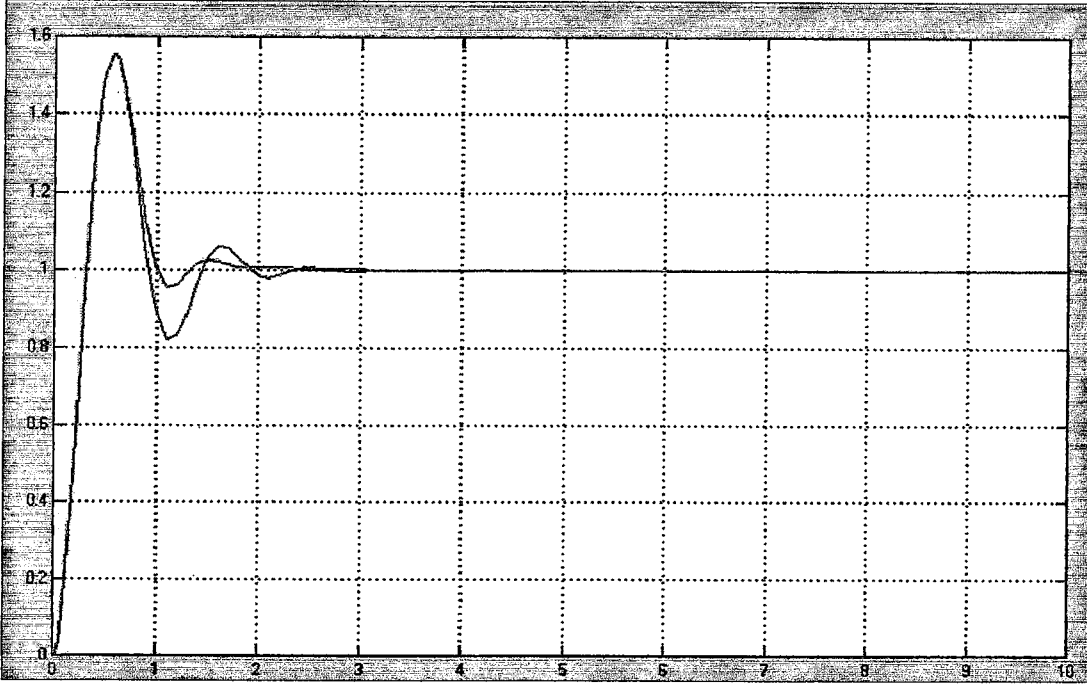
Sistem cevabında ciddi aşımalar sözkonusu ise (klasik kontrol teorisine benzer olarak kazanç arttıkça aşımın da artması beklenir) aşım gözlemleyicisi ve parametre düzenleyicisi içeren PAPID 1 tipi yapı, kontrolörün performansını bir hayli arttıracaktır.

Şekil 7.4, Şekil 7.5 ve Şekil 7.6'da ölçekleme parametreleri ve çıkış katsayısının farklı başlangıç değerleri söz konusu olduğundaki adaptif mekanizmanın dahil olduğu ve olmadığı sistemlere ait simülasyon sonuçları verilmiştir. Görüldüğü gibi adaptif mekanizmanın olmadığı sistemlerde osilasyonlar sözkonusudur. Şekil 7.6'da ise daha yumuşak bir osilasyon olmasına karşın adaptif mekanizmayla birlikte osilasyonsuz bir cevap elde edilmiştir. Genel olarak simülasyon sonuçlarına bakıldığında PAPID1fc yapısının osilasyon süresini azaltırken oturma zamanını da kısaltarak kontrolörün performansını bir hayli iyileştirdiği görülmektedir. Böylelikle pratikte β 'nın başlangıç değeri sistemde kararsızlığa yol açmayacak şekilde büyük seçilerek yükselme hızı arttırılabilir.



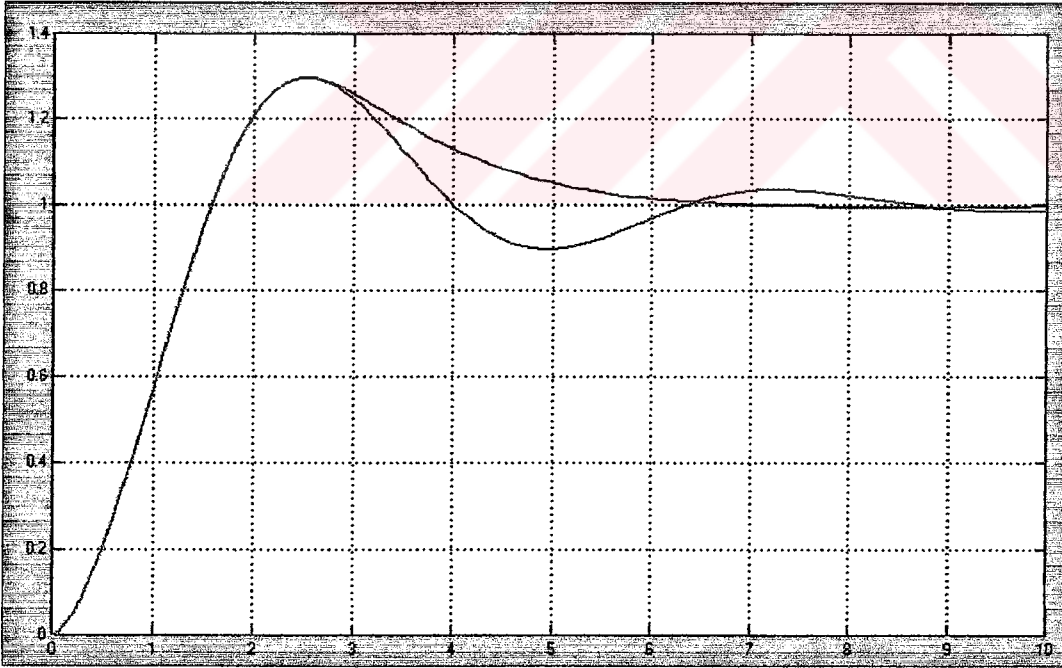
Mavi : PID tipi bulanık kontrolör : $K_1 = 1$, $K_2 = 0.5$, $K_3 = 0.2$, $K_4 = 1$
 Yeşil : PAPID 1 tipi bulanık kontrolör : $K_1 = 1$, $K_2 = 0.5$, $K_3 = 0.2$, $K_4 = 1$

Şekil 7.4. Farklı katsayılar için adaptif mekanizma içeren sistemle içermeyen sistemin karşılaştırılması (1)



Mavi : PID tipi bulanık kontrolör : $K_1=1$, $K_2=0.3$, $K_3=0.2$, $K_4=1$
 Yeşil : PAPID 1 tipi bulanık kontrolör : $K_1=1$, $K_2=0.3$, $K_3=0.2$, $K_4=1$

Şekil 7.5. Farklı katsayılar için adaptif mekanizma içeren sistemle içermeyen sistemin karşılaştırılması (2)



Mavi : PID tipi bulanık kontrolör : $K_1=0.1$, $K_2=0.1$, $K_3=0.1$, $K_4=0.3$
 Yeşil : PAPID 1 tipi bulanık kontrolör : $K_1=0.1$, $K_2=0.1$, $K_3=0.1$, $K_4=0.3$

Şekil 7.6. Farklı katsayılar için adaptif mekanizma içeren sistemle içermeyen sistemin karşılaştırılması (3)

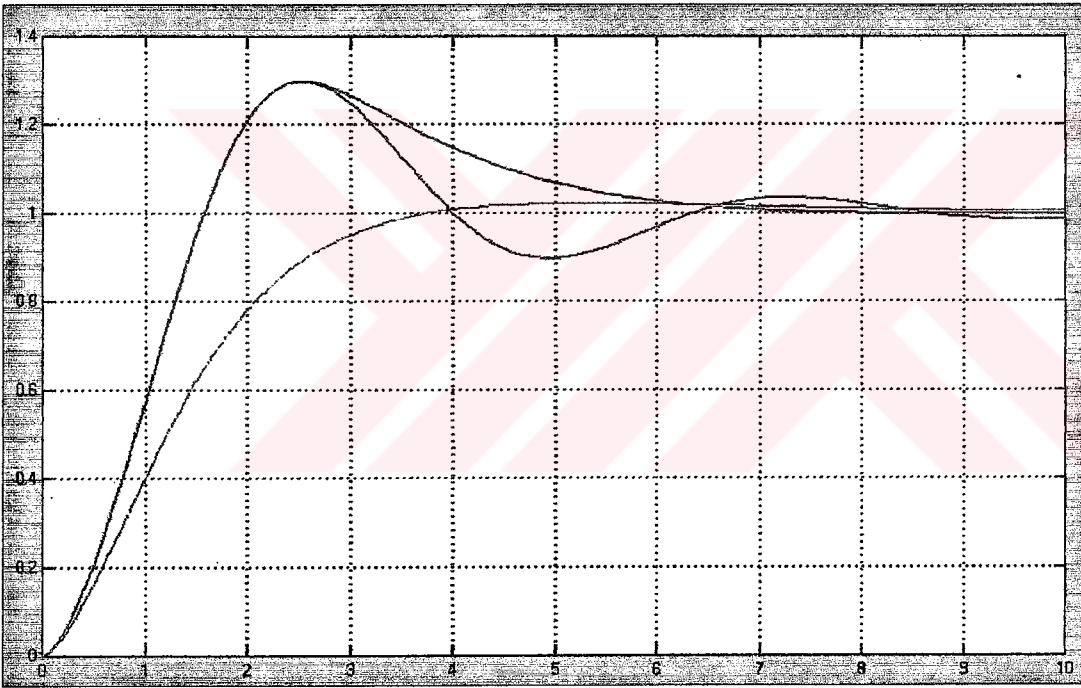
Bölüm 4.3'te ikinci yöntem olarak fonksiyon optimizasyonu ile parametrelerin ayarlanması metodu önerilmiştir (PAPID 2). Şekil 7.7'de bu yönteme ilişkin basamak cevabı daha önce gerçekleştirilmiş olan cevaplarla karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

Şekil 7.7'de ise bir önceki çalışmaya fonksiyon optimizasyon yöntemi ile parametrelerin ayarlanması yönteminde önerilen kontrol yapısı eklenmiştir. Buna göre

$$a_1 = 0.3 \quad a_2 = 0,25$$

$$b_1 = 4.3 \quad b_2 = 1$$

olarak seçilmiştir.



Mavi : PID tipi bulanık kontrolör : $K_1 = 0.1$, $K_2 = 0.1$, $K_3 = 0.1$, $K_4 = 0.3$

Yeşil : PAPID 1 tipi bulanık kontrolör : $K_1 = 0.1$, $K_2 = 0.1$, $K_3 = 0.1$, $K_4 = 0.3$

Kırmızı: PAPID 2 tipi bulanık kontrolör : $K_1 = 0.1$, $K_2 = 0.1$, $K_3 = 0.1$, $K_4 = 0.3$

Şekil 7.7. Farklı katsayılar için adaptif mekanizma içeren sistemle içermeyen sistemin karşılaştırılması (4)

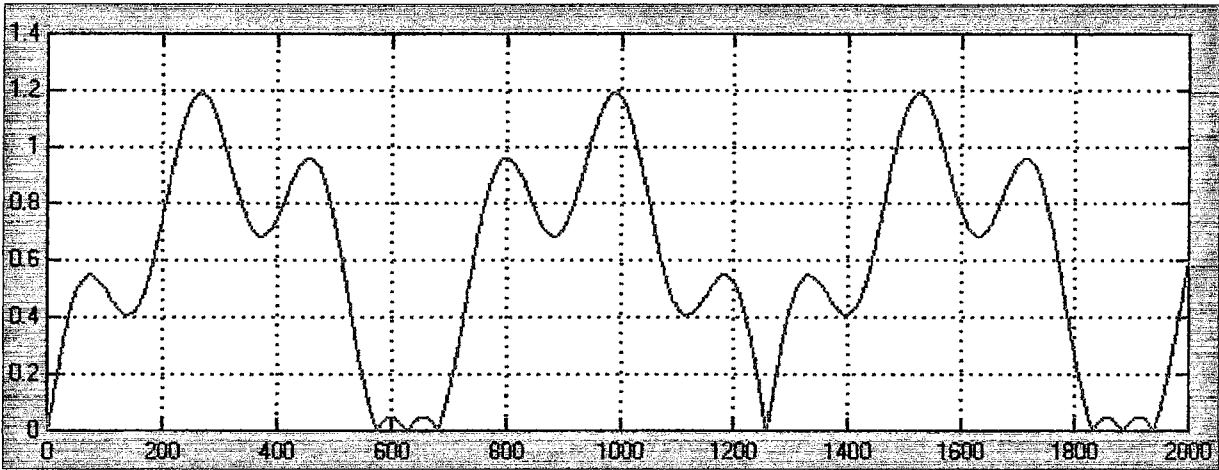
Çizelge 7.1. Önerilen kontrol yöntemlerine ait sonuçların çizelge halinde sunumu

Kontrol türü	T_s	%ÜA	T_p
PID tipi bulanık kontrolör	>10	30	2,5
PAPID 1 tipi bulanık kontrolör	7	30	2,5
PAPID 2 tipi bulanık kontrolör	4	-	-

Çizelge 7.1'den de görüldüğü gibi PID tipi bulanık kontrolörün oturma zamanı diğer kontrolörlere göre oldukça uzun, aşım ise %30 mertebesindedir. Bu durumda sistem aşım gözlemleyicisi içeren PAPID 1 tarzı bir kontrolörle kontrol edilirse oturma zamanı 10 saniyeden 7 saniyeye düşmektedir. aşım gözlemleyicisinin çalışma prensibi gereği meydana gelecek ilk aşımı elimine etmek mümkün değilse de şekilden de görüldüğü gibi oturma zamanı kısalmış daha yumuşak bir cevap vermiştir. Fonksiyon optimizasyonuna yönelik son çalışma (PAPID 2) ise gerek oturma zamanı gerekse aşımları önlemesi açısından en iyi cevabı vermiştir. Fakat bu tarz bir kontrolörün dezavantajı, kontrol edilmek istenen her sistem için yeni bir fonksiyon optimizasyonu işlemi gerektirmesidir. Tasarlanan diğer kontrolörlerde ise bulanık kural tabanlı olarak Sugeno modeli yerine Mamdani modelinin seçilmesi ile kontrolör, belli bir sisteme ait değil, genelleştirilmiş bir kontrolör yapısı arzeder.

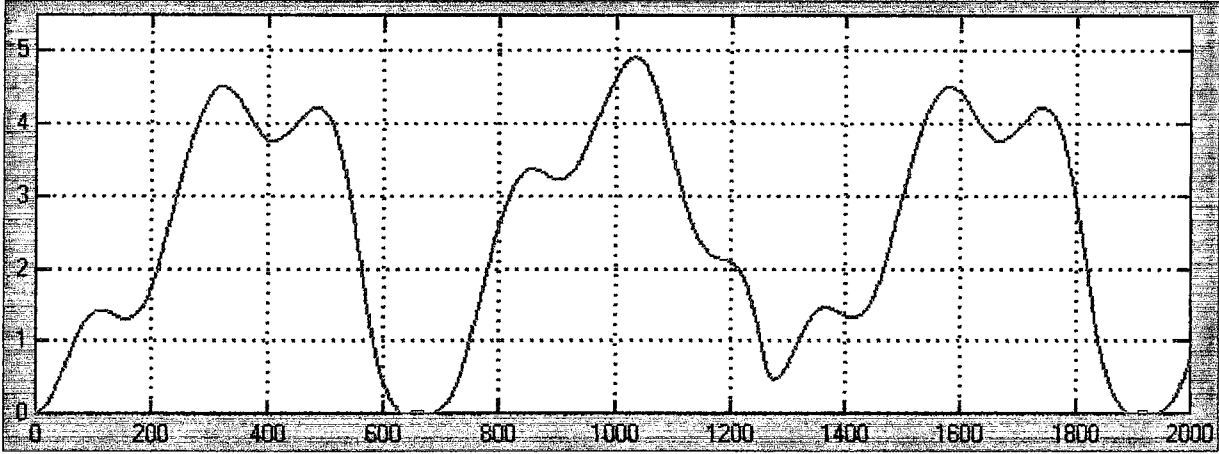
7.2. Tank Sisteminin Modellenmesi ve Kontrolü

5. bölümde sözü edilen Tank Sisteminin modellenmesi ile ilgili sonuçlar aşağıdaki gibidir. Simülasyon sırasında örnekleme zamanı olarak 1 sn. alınmıştır.



Şekil 7.8. Sistem tanıma için uygulanan giriş işareti

Sisteme Şekil 7.8 de gösterilen giriş işareti uygulanmış ve Şekil 7.9'daki gibi çıkış verileri elde edilmiştir.



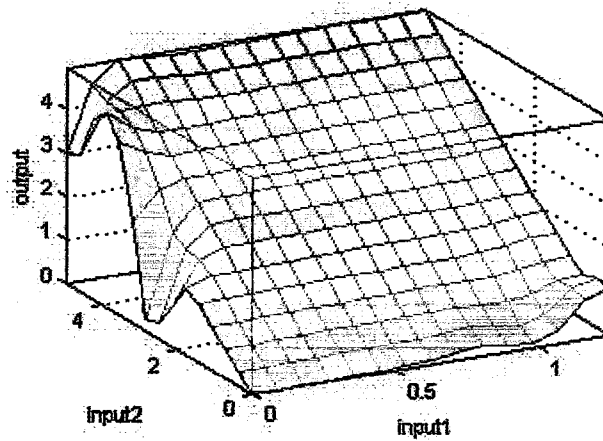
Şekil 7.9. Giriş işareti aracılığıyla elde edilen çıkış işareti

Regresyon vektörü olarak

$$\phi = [u(t-1) \ y(t-1)]$$

seçilmiş ve bu iki girişe ait uzay beşer bulanık küme ile bulanık olarak parçalanmıştır. Kullanılan üyelik fonksiyonu ise çan fonksiyonu olarak seçilmiştir.

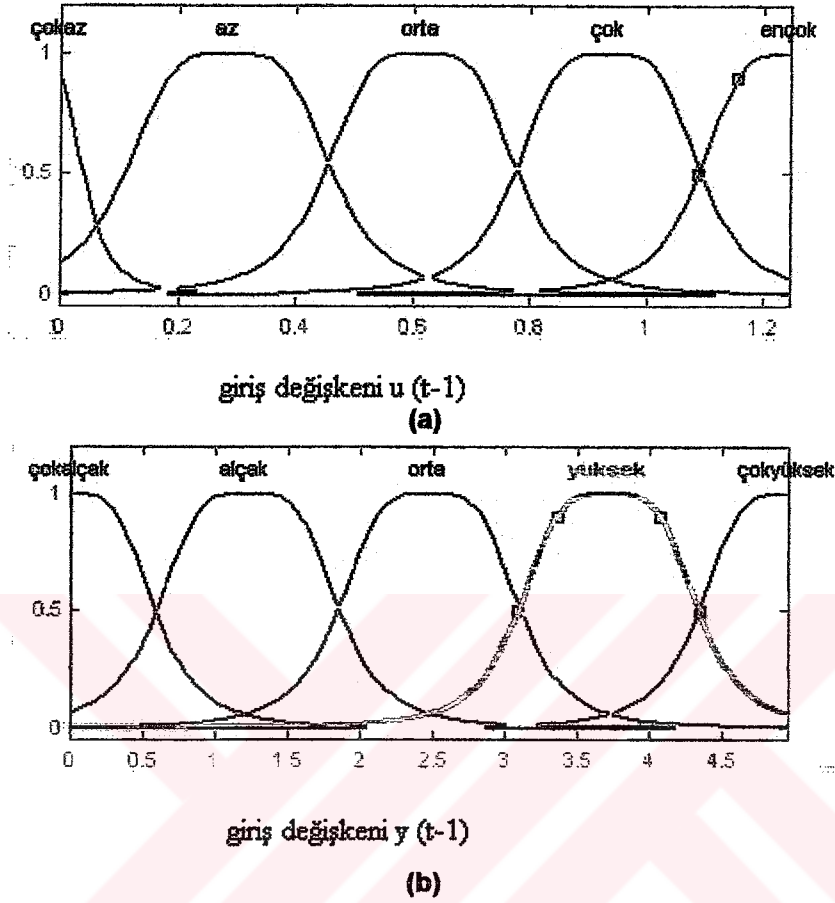
Sisteme ait T-S bulanık model yirmibeş kuralla ifade edilmiştir. ANFIS yardımıyla giriş-çıkış verileri işlenmiş ve buna ilişkin T-S bulanık model elde edilmiştir.



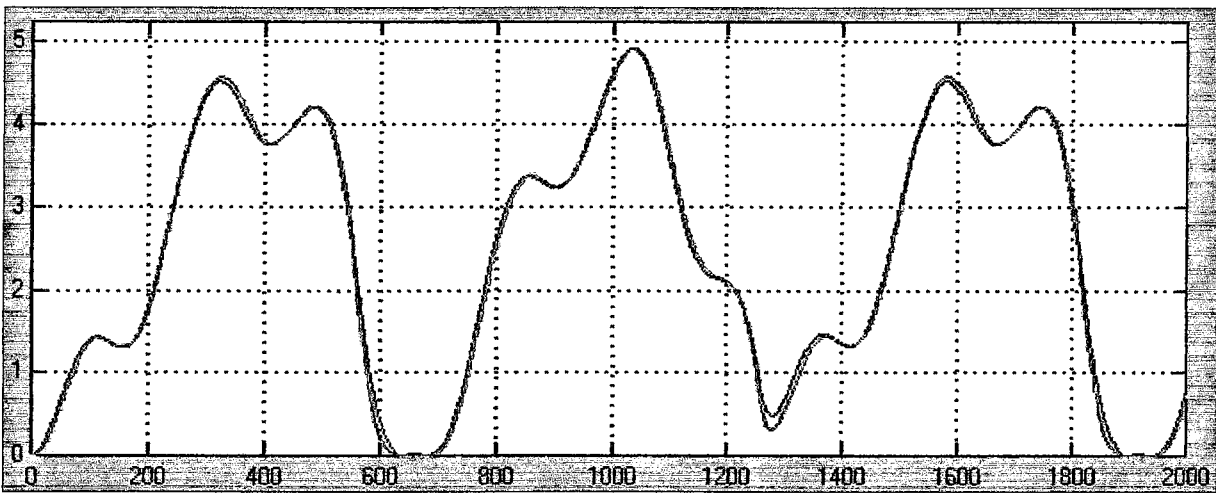
Şekil 7.10. T-S bulanık modele ait yüzey

Kuralların oluşturduğu yüzey Şekil 7.10'da verilmiştir. Sistem tanıma sonucunda yer alan üyelik fonksiyonlarının parametreleri de Anfis aracılığıyla otomatik olarak ayarlanmıştır.

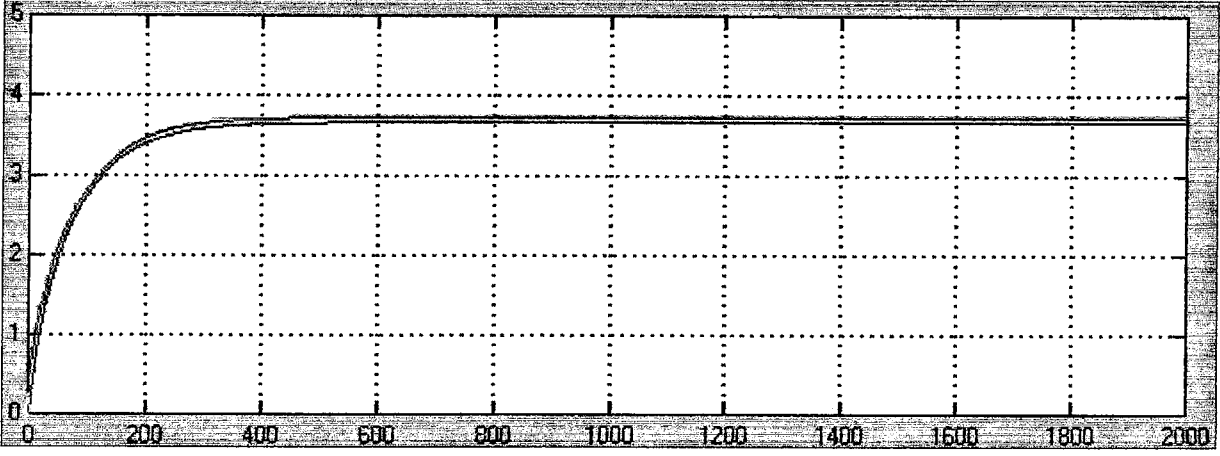
Yeni üyelik fonksiyonları Şekil 7.11'de verilmiştir. Şekil 7.12'de sistem ve modelin giriş şartına verdiği cevap, Şekil 7.13'te ise gerçek sistemin ve sistem tanıma sonucunda elde edilen bulanık sistemin basamak cevabı görülmektedir.



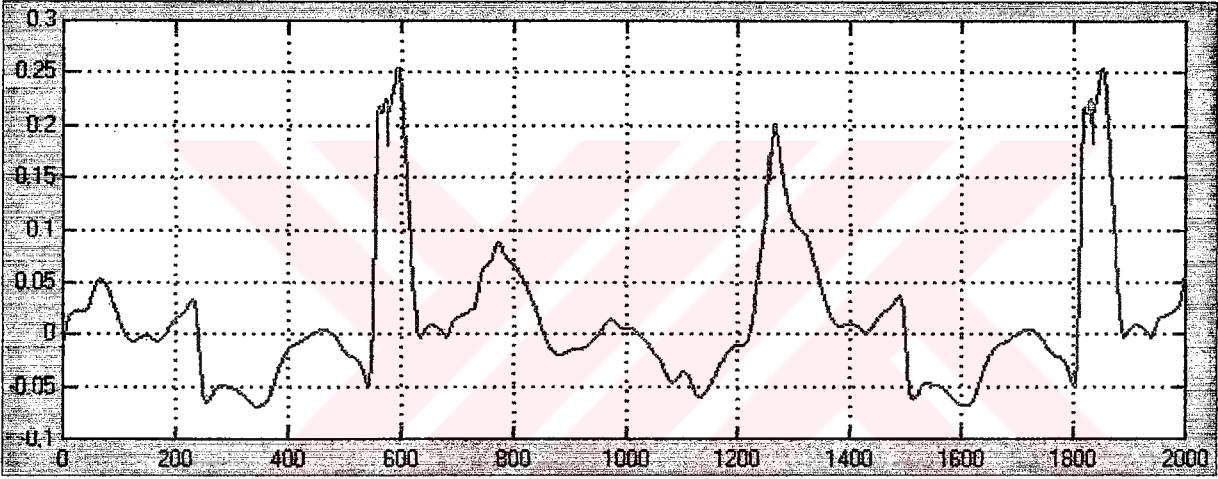
Şekil 7.11. Bulanık kuralların ; (a) $u(t-1)$ girişine ilişkin üyelik fonksiyonları, (b) $y(t-1)$ girişine ilişkin üyelik fonksiyonları.



7.12. Sistem ve sistem tanıma sonucu elde edilen anfis modelinin giriş işaretine verdiği cevap

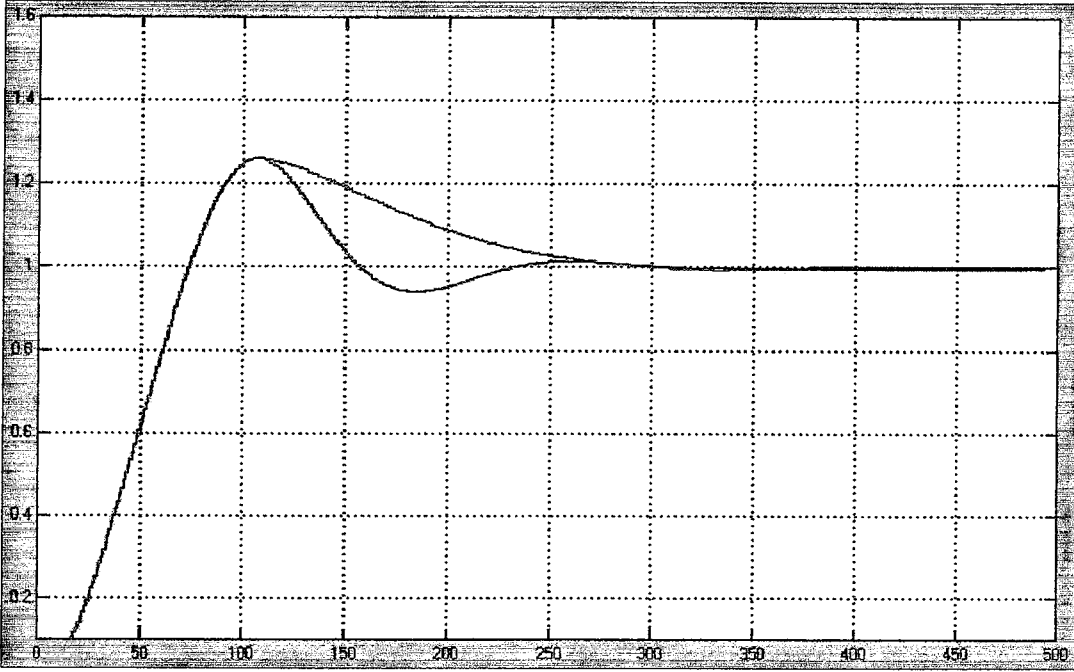


Şekil 7.13. Sistemin ve sistem tanıma sonucu elde edilen bulanık sistemin karşılaştırmalı basamak cevabı



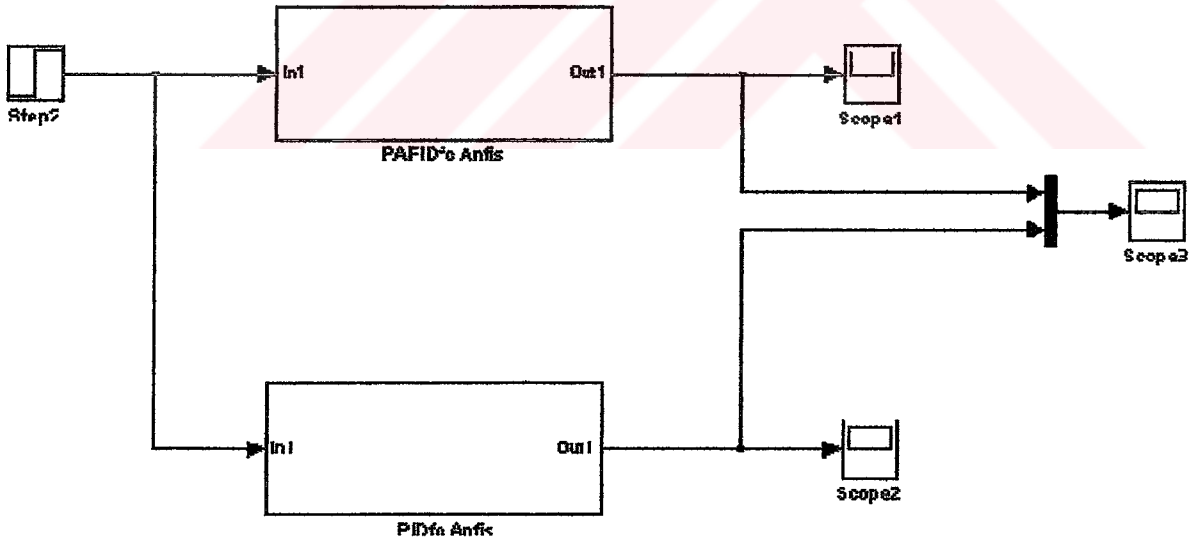
Şekil 7.14. Sistem ve sistem tanıma sonucu elde edilen bulanık model arasındaki hata

Aşağıda ise matematiksel modelini bildiğimiz sistem ve aynı sisteme ait Anfis modelinin klasik PID bulanık kontrolör ve PAPID 1 bulanık kontrolör ile yapılan kontrol çalışmasının karşılaştırmalı cevapları verilmiştir.

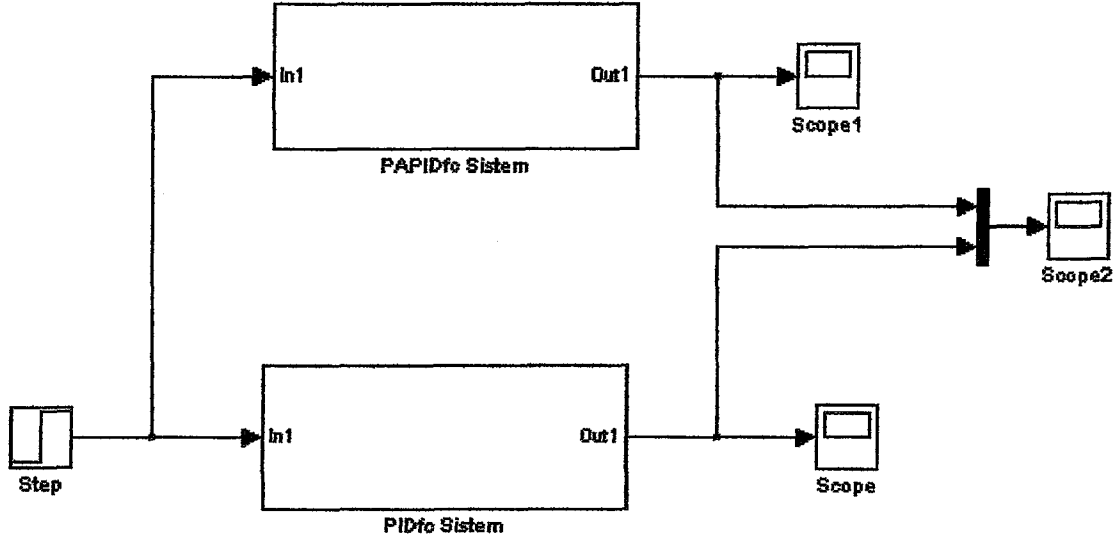


Yeşil : PID tipi bulanık kontrolör : $K_1 = 0.1$, $K_2 = 0.1$, $K_3 = 0.1$, $K_4 = 0.1$
 Mavi : PAFID 1 tipi bulanık kontrolör : $K_1 = 0.1$, $K_2 = 0.1$, $K_3 = 0.1$, $K_4 = 0.1$

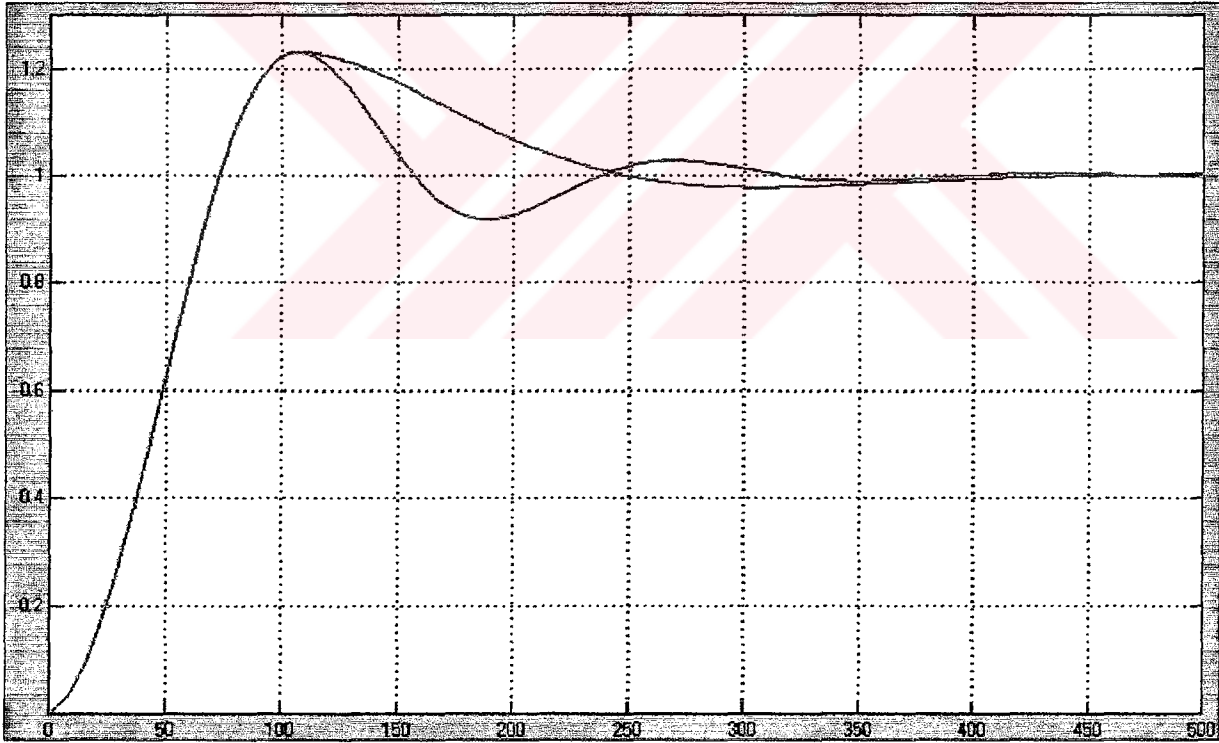
Şekil 7.15. Anfis modelinin PID ve PAFID 1 kontrole verdiği basamak cevabı



Şekil 7.16. Anfis modeline ait blok diyagram



Şekil 7.17. Sistemin matematiksel modeline ait blok diyagram

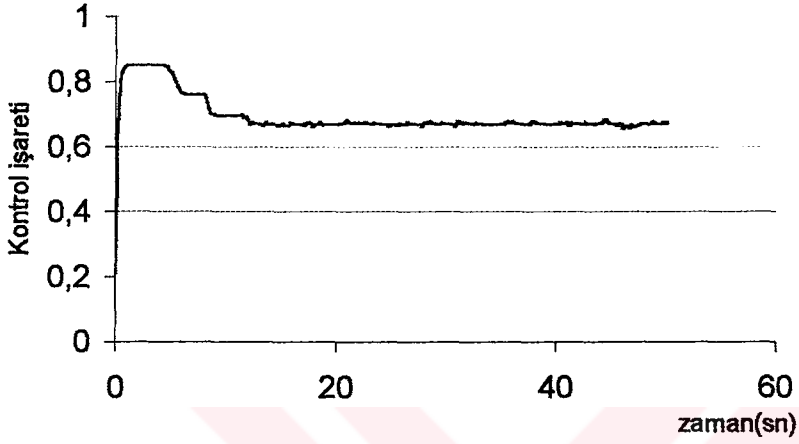


Şekil 7.18. sistemin matematiksel modelinin PID ve PAPID 1 kontrole verdiği basamak cevabı

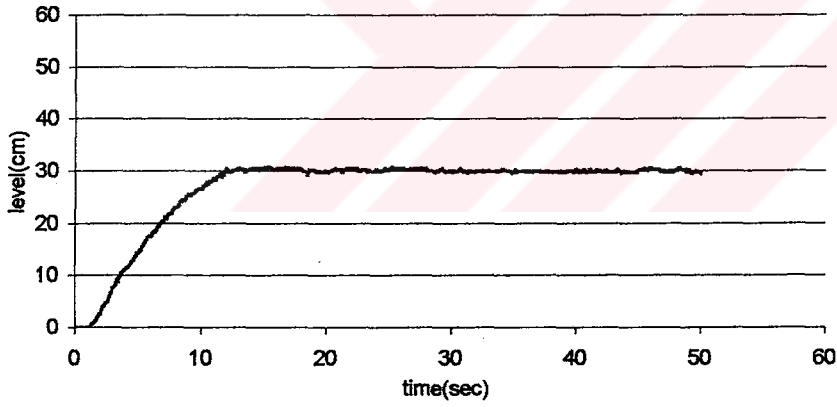
Elde edilen cevaplardan da görüldüğü gibi sistem çok küçük bir hata ile modellenmiştir. Modellenen sistem ile modele ait basamak cevapları büyük bir benzerlik göstermiş, buna göre ANFIS mimarisi işlevini başarı ile gerçekleştirmiştir.

7.3. GUNT RT512 Sıvı Seviye Sisteminden Alınan Sonuçlar

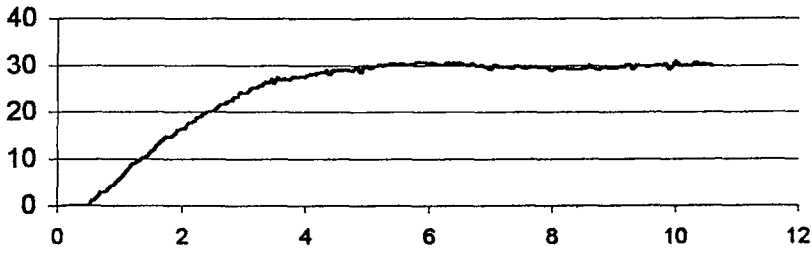
Aşağıda GUNT sıvı seviye sisteminin kontrolü için tasarlanan PID tipli bulanık kontrolöre ait deney sonuçları verilmiştir. Daha sonra sistem sadece bulanık kontrolör ve sistemin üzerinde bulunan UDC 5000 kontrolör ile Klasik PID yöntemi ile kontrol edilmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.



(a)



(b)



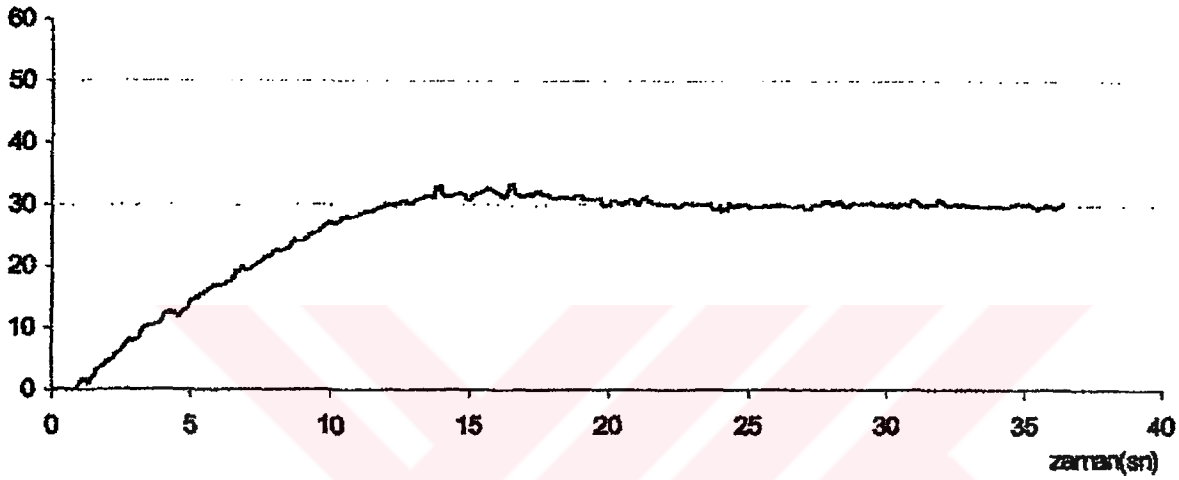
(c)

Şekil 7.19. Referans 30 cm için

- (a) kontrol işareti
 (b) Bulanık kontrol cevabı
 (c) PID tipli bulanık kontrolör cevabı

Şekil 7.19'da görüldüğü üzere sadece bulanık kontrolörle sistem kontrol edildiğinde sistem 13. saniyede oturmaktadır. PID tipli bulanık kontrolör uygulandığında ise oturma zamanının 5 saniyeye düştüğü, böylelikle kontrolör performansının oldukça iyileştiği görülmektedir.

Bu uygulamada GUNT RT512 sıvı seviye ünitesi üzerinde bulunan UDC 5000 kontrolörde bulunan PID kontrol yöntemiyle kontrol edilmiştir. PID katsayıları sisteme en uygun şekilde hesaplanan katsayılardır (4, 5, 25). Sistemin PID ile kontrolüne ait çalışma Şekil-7.20'de verilmiştir.



Şekil 7.20. Sıvı seviye sisteminin PID ile Kontrolü

Şekil 7.20 incelendiğinde sıvı seviyesinin İstenen değere 2 cm'lik bir aşım ile 19 sn'de ulaştığı görülmektedir. Sıvı seviyesi referansa oturduğu andan itibaren 0,5 cm'lik kararlı hal hatası oluşmuştur.

Çizelge 7.2. Gerçek zamanda kontrole ait sonuçların çizelge halinde sunumu

Kontrol türü	T_s	%ÜA	T_p	ess
Klasik bulanık kontrol	13	-	-	-
PID tipli bulanık kontrol	5	-	-	-
Klasik PID kontrol	19	6	14	0,5

Çizelge 7.2'den de görüldüğü gibi PID tipli bulanık kontrol diğer iki kontrol yöntemine göre sistemin çok daha kısa bir sürede istenen değere oturmasını sağlamıştır. Buna karşın klasik PID kontrolör, değerleri çok küçük olsa da sürekli hal hatasını ve aşımın oluşmasını önleyememiştir.

8. SONUÇ

Bu çalışmada bulanık kontrolörlerin giriş-çıkış davranışları incelenmiştir. Temelde parametresi zamanla değişen PD tipi kontrolörlerle aynı karakterde olduğu görülmüştür. PID kontrol teorisine göre bu kontrolörün performansını arttırmaya yönelik bir çalışma yapılmıştır.

Tipi "0" olan sitemlerde PD tarzı kontrolörlerin sürekli hal hatasını önleyemediği, PI tipi kontrolörlerin ise bu hatayı elimine ettikleri gerçeği deneysel olarak gözlenmiştir. Bu nedenle her iki kontrolörün de avantajlarını birleştirecek PID tipi bulanık bir kontrolör elde edilmiştir. Böylelikle sistem hızlı cevap verirken aşım azalmış, oturma zamanı kısalmıştır.

Performansı daha da arttırabilmek için adaptif parametrelili bir kontrolör geliştirilmiştir. Eşdeğer integral bileşeni yavaşça azaltılarak ve sönüm oranı arttırılarak sistemin oturması sağlanmıştır. Bu arada oransal kontrol bileşeni değişmezken, osilasyonlara karşı direnimsizlik artmış ve oturma zamanı kısalmıştır.

Daha sonra ele alınan kara-kutu tarzındaki sistem, Anfis mimarisiyle modellenerek, hakkında yeterli bilgiye sahip olmadığımız durumlarda dahi giriş-çıkış bilgisiyle sistemin kabul edilebilir bir hata oranıyla modellenebileceği gösterilmiştir.

Çalışmanın sonunda ise GUNT RT 512 sıvı seviye ünitesinin gerçek zamanda bulanık ve PID tipi bulanık kontrolü yapılarak klasik PID kontrol ile karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara dayanarak PID tipi bulanık kontrolörün üstünlüğü ortaya konulmuştur.

Bu konuda yapılacak daha çok çalışmanın olduğu açıktır. Bunlardan bazıları bulanık gözleyici tasarımı, bulanık modellenen ve kontrol edilen sistemlerin kararlılık analizi, bulanık optimal kontrol gibi başlıklar altında sıralanabilir.

KAYNAKLAR

- Babuska, R., Verbruggen, H. B., Hellendoorn, H., 1999. Promising fuzzy modeling and control methodologies for industrial applications, Delft University of Technology, Faculty of Information Technology and System Control Engineering Laboratory internal report, Delft, Netherlands.
- Buckley, J.J., 1990 "Fuzzy controllers : further limit theorems for linear control rules", *Fuzzy Sets and Systems* 36 pp. 225-233
- Buckley, J.J., 1993 "Sugeno type controllers are universal controllers", *Fuzzy Sets and Systems* 53 pp. 299-303
- Cao, S. G., Rees, N. W. and Feng, G., 1997. "Analysis and Design for a class of complex control systems Part I: Fuzzy modelling and identification", *Automatica*, vol. 33, no. 6, pp. 1017-1028
- Cao, S. G., Rees, N. W., and Feng, G., 1996. "Quadratic stability analysis and design of continuous-time fuzzy control systems", *Int. J. Syst. Sci.*, vol. 27, no. 2, pp. 193-203
- Chang, W., Joo, Y. H., Park, J. B., 1999. "Stability analysis of fuzzy-model-based controller by piecewise quadratic lyapunov functions", *Proceedings of the 14th KACC*, October 1999, 169-172
- Chang, W., Joo, Y. H., Park, J. B., Chen, G., 1999. "Robust fuzzy-model-based controller for uncertain systems", *IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings* , Seoul, Korea, August 22-25 1999.
- Chao, C. and Teng, C., 1997 "A PD-like self tuning fuzzy controller without steady state error", *Fuzzy Sets and Systems* 87. pp. 141-154
- Chung, H. and Chen, B. and Lin J., 1998 "A PI type fuzzy controller with self tuning scaling factors", *Fuzzy Sets and Systems* 93. pp. 23-28
- Driankov, D., 1993. *An Introduction to Fuzzy Control*. Berlin, DGR: Springer-Verlag.
- Feng, G.Cao, S. G., Rees, N. W., and, Chak C. K., 1997. "Design of fuzzy control systems with guaranteed stability", *Fuzzy Sets Sysys*. vol. 85, pp. 1-10
- Friedland, B., *Advanced Control System Design*. Englewood Cliffs, NJ: Printice-Hall, 1996.
- GUNT RT512 Process Trainer Level Student Manuel
- GUNT RT512 Process Trainer Level Technical Description
- Hampel, R. and Chaker N., 1998 "Minimizing the number of variable parameters for optimizing the fuzzy controller", *Fuzzy Sets and Systems* 100. pp 131-142

HONEYWELL, UDC5000 Universal digital Controller Product Manual, USA-1995.

Jadbabaie, A., 1997. Robust, non-fragile controller synthesis using model based fuzzy systems: A linear matrix inequality approach, *M.S. Thesis*, The University of New Mexico, Albuquerque, New Mexico.

Jang, J., 1991 "Neural – Network based fuzzy logic control and decision system", *IEEE Trans. Comp.* Vol. 40 pp. 1320-1336

Jang, J., 1993 "ANFIS: Adaptive-Network Based Fuzzy Inference System", *IEEE Trans. on Systems, Man and Cybernetics*, Vol. 23. No. 3 pp. 665-685

Jang, J., 1995 "Neuro-Fuzzy modeling and control", *Proc. of the IEEE* Vol. 83. No. 3. March

Jung, C. and Ham, C. and Lee, K., 1995 "A real time self tuning fuzzy controller through scaling factor adjustment for the steam generator of NPP", *Fuzzy Sets and Systems* 74. pp. 53-60

Kaufman, A. and Gupta, M., *Introduction to Fuzzy Arithmetic*. Van NostrandReinhold, 1991.

Kosko, B., 1992 "Fuzzy systems as universal approximators", *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems*. San Diego pp. 1153-1162

Kosko, B., 1994. "Fuzzy systems as universal approximators", *IEEE Trans. Comput.*, vol. 43, pp. 1329-1333.

Ljög. L., 1995 *System Identification Department of Electrical Engineering* , Linköping Universit. Sweden

Ma, X., Sun, Z. and He, Y., 1998. "Analysis and design of fuzzy controller and fuzzy observer", *Trans. Fuzzy Syst.* Vol. 6, no. 1.

Mamdani, E. H., 1977 "Application of Fuzzy Logic to Approximate reasoning using linguistic systems", *Fuzzy Sets and Systems*, pp. 1182-1191

Mannie. M., 1998 "FTMS – Fast Takagi – Sugeno Fuzzy Modeling", *Ins. of Comp. Design and Fault Tolerance*. University of Karlsruhe, Germany (internet)

Mudi, P. and Pal, N., 2000 "A self tuning fuzzy PI controller", *Fuzzy Sets and Systems* 115. pp . 327-338

Muzimoto, M., 1991 "Min – Max gravity method versus product-sum method for controls", *Proc. IV IFSA Congress, Brussels, Part E* pp. 127-130

Muzimoto, M., 1991 "Min – Max gravity method versus product-sum method for controls", *Proc. IV IFSA Congress, Brussels, Part E* pp. 127-130

Muzimoto, M., 1992 "Realization of PID controls by fuzzy control methods, Proc. IEEE Int. Conf. On Fuzzy Systems", San Diego pp. 709-715

Qiau, W. and Muzimoto, M. 1995 "PID type fuzzy controller and parameter adaptive method", *Fuzzy Sets and Systems*, 78. pp 23-35

Ross, T., *Fuzzy Logic with Engineering Applications*. McGraw – Hill, 1995.

Sugeno, M., and Kang, G. T., 1988. "Structure identification of fuzzy model", *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 28, pp. 15-33.

Takagi, S. and Sugeno, M., 1985 "Fuzzy identification of fuzzy systems and it's application to modelling and control", *IEEE Trans. Systems Man Cybernet.* 15 pp 116-132

Takagi, S. and Sugeno, M., 1987 "Derivation of fuzzy control rules from human operator's control actions", *Proc. of the IFAC Conf. on Fuzzy Information Vol. 1 Marseille, France* pp 55-60

Takagi, T. and Sugeno, M. , 1985. "Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control", *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. SMC-15, pp. 116-132.

Tanaka, K., 1995. "Stability and stabilizability of fuzzy-neural-linear control systems", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.* vol. 3, pp. 438-447.

Tanaka, K., and Sugeno, M., 1992. "Stability analysis and design of fuzzy control systems", *Fuzzy Sets Syst.*, vol. 45, pp. 136-156.

Üstoglu, T., 1999. Bulanık kontrol sistemlerinde kararlılık, *Yüksek Lisans Tezi*, I.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Wang, H., Tanaka, K., and Griffin, M., 1996. "An approach to fuzzy control of nonlinear systems: Stability and design issues", *Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 4, pp 14-23

Wang, L. X., and Mendel, J. M. , 1992. "Fuzzy basic functions, universal approximation, and orthogonal least-squares learning", *IEEE Trans. Neural Net.* vol. 3, pp. 807-814.

Wang. L. and Mendel. J., 1992 "Back-propagation fuzzy systems as nonlinear dynamic system identifiers," *Proc. IEEE Int. Conf. on Fuzzy Sets*. San Diego.

Woo. Z. and Chung. H. and Lin, J., 2000 "A PID type fuzzy controller with self tuning scaling factors", *Fuzzy Sets and Systems* 115. pp . 321-326

Ying, H., 1998 "An analytical study on structure, stability and desigb of general nonlinear Takagi – Sugeno fuzzy control systems", *Automatica*, Vol 34. No 2. pp 1617-1623

Ying. H., 1998 "The Takagi – Sugeno fuzzy controllers using the simplified linear control rules are nonlinear variable gain controllers", *Automatica*, Vol. 34. pp. 157-167

Zeng, X. J. and Singh, M. G., 1995. "Approximation theory of fuzzy systems -- MISO case", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 3, pp. 219-235.

Zeng, X. J. and Singh, M. G., 1996. "Approximation accuracy of fuzzy systems as function approximators", *IEEE Trans. Fuzzy Syst.*, vol. 4, pp. 44-63.

Zhuang, W. and Min, Z. and Wei, X., 1990 "Pad analysis of stability of fuzzy control systems. *Fuzzy Sets and Systems*", 38. pp 27-42

EK**DELPHI PROGRAM KODU LİSTESİ**

unit graf;

interface

uses

Windows, Messages, SysUtils, Classes, Graphics, Controls, Forms, Dialogs,
StdCtrls, Driver, Global, ExtCtrls, TeEngine, Series, TeeProcs, Chart,
ComCtrls, Buttons;

type

Tfrmstart = class(TForm)
 labSelDev: TLabel;
 lstDevice: TListBox;
 labModule: TLabel;
 lstModule: TListBox;
 cmdRun: TButton;
 labChannel: TLabel;
 lstChannel: TListBox;
 lstVoltageRange: TListBox;
 labVoltageRange: TLabel;
 cmdExit: TButton;
 Timer1: TTimer;
 Edit1: TEdit;
 Panel1: TPanel;
 BitBtn1: TBitBtn;
 BitBtn2: TBitBtn;
 PageControl1: TPageControl;
 TabSheet1: TTabSheet;
 Panel2: TPanel;
 Label1: TLabel;
 Label2: TLabel;
 Label3: TLabel;
 Label4: TLabel;
 Label5: TLabel;
 Edit2: TEdit;
 Edit3: TEdit;
 Edit4: TEdit;
 Edit5: TEdit;
 Edit6: TEdit;
 TabSheet2: TTabSheet;
 Label9: TLabel;
 Panel6: TPanel;
 Edit9: TEdit;
 TabSheet3: TTabSheet;
 Panel7: TPanel;
 Label10: TLabel;

Panel8: TPanel;
Edit10: TEdit;
BitBtn3: TBitBtn;
BitBtn4: TBitBtn;
Label14: TLabel;
Label15: TLabel;
Label16: TLabel;
Label17: TLabel;
Panel3: TPanel;
Chart1: TChart;
Chart2: TChart;
Series2: TLineSeries;
Panel4: TPanel;
Label7: TLabel;
Label12: TLabel;
Label13: TLabel;
Label8: TLabel;
Edit7: TEdit;
lstChannel2: TListBox;
lstVoltageRange2: TListBox;
Memo1: TMemo;
SaveDialog1: TSaveDialog;
Panel9: TPanel;
Shape1: TShape;
Shape2: TShape;
Panel5: TPanel;
CheckBox1: TCheckBox;
Panel10: TPanel;
Label20: TLabel;
Label21: TLabel;
Label22: TLabel;
Label23: TLabel;
Label24: TLabel;
Label25: TLabel;
Label26: TLabel;
Label27: TLabel;
Label28: TLabel;
Label29: TLabel;
Label30: TLabel;
Label31: TLabel;
Label32: TLabel;
Image1: TImage;
Image2: TImage;
Image3: TImage;
Image4: TImage;
Image5: TImage;
Image6: TImage;
Image7: TImage;
Image8: TImage;
Image9: TImage;

```
Image10: TImage;  
Image11: TImage;  
Image12: TImage;  
Image13: TImage;  
Label6: TLabel;  
Image38: TImage;  
Image39: TImage;  
Image26: TImage;  
Image27: TImage;  
Image28: TImage;  
Image29: TImage;  
Image30: TImage;  
Image31: TImage;  
Image32: TImage;  
Image33: TImage;  
Image34: TImage;  
Image35: TImage;  
Image36: TImage;  
Image37: TImage;  
Image14: TImage;  
Image15: TImage;  
Image16: TImage;  
Image17: TImage;  
Image18: TImage;  
Image19: TImage;  
Image20: TImage;  
Image21: TImage;  
Image22: TImage;  
Image23: TImage;  
Image24: TImage;  
Image25: TImage;  
Label18: TLabel;  
Label19: TLabel;  
Series1: TLineSeries;  
Edit8: TEdit;  
T: TLabel;  
Edit11: TEdit;  
Edit12: TEdit;  
Label11: TLabel;  
Label33: TLabel;  
Label34: TLabel;  
Edit13: TEdit;  
Label35: TLabel;  
Edit14: TEdit;  
Edit15: TEdit;  
Label36: TLabel;  
Label37: TLabel;  
procedure cmdExitClick(Sender: TObject);  
procedure cmdRunClick(Sender: TObject);  
procedure FormCreate(Sender: TObject);
```

```

procedure lstDeviceClick(Sender: TObject);
procedure lstModuleClick(Sender: TObject);
procedure Timer1Timer(Sender: TObject);
procedure BitBtn3Click(Sender: TObject);
procedure BitBtn4Click(Sender: TObject);
procedure PageControl1Change(Sender: TObject);
procedure CheckBox1Click(Sender: TObject);
procedure FormKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);
private
  { Private declarations }
public
  { Public declarations }
end;

var
  frmstart: Tfrmstart;

implementation

const
  ALFA=0.75;
  numrules=40;
  {*****sivi seviye degerleri uyelik fonksiyonun sinir degerleri***}
  dk1=-1;   ort1=-0.66;   yk1=-0.33;   nr1=0 ;   ys1=0.33;
  dk2=-0.66;   ort2=-0.33;   yk2=0;   nr2=0.33;   ys2=0.66;
  dk3=-0.66;   ort3=-0.33;   yk3=0;   nr3=0.33;   ys3=0.66;
  dk4=-0.33;   ort4=0;   yk4= 0.33;   nr4=0.66 ;   ys4=1;

  {*****seviye deisimi*****}
  nl1=-1;   zr1=-0.5;   pl1=0;   ph1=0.33;
  nl2=-0.5;   zr2=0;   pl2=0.33;   ph2=0.66;
  nl3=-0.5;   zr3=0;   pl3=0.33;   ph3=0.66;
  nl4=0;   zr4=0.33;   pl4=0.66;   ph4=1;

  action : array [1..20] of real = (1,0.99,0.95,0.91,0.908,0.906,0.906,0.901,
0.901,0.7,0.8,0.9,0.9,1,0.95,0.920,0.89,0.891,0.854,0.836);

var
  lpDevFeatures : DEVFEATURES;
  lpDevConfig_AI : DEVCONFIG_AI;
  gnNumOfSubdevices : Smallint;
  Response : Integer;
  saniye : integer;
  ilkokuma : boolean;
  HHH,De1,De2 : real;
  fzArr1,dArr1 : array[0..7] of real;
  fz1,fa,fc,dz1,da,dc: integer;
{$R *.DFM}

```

```

{***** FUZZY BÖLÜMÜ *****}
f, DOF          : Array [1..500] of Real;
d,d1,d2,d_nl,d_zr,d_pl,d_ph : real;
s_dk,s_ort,s_yk,s_nr,s_ys : real;
u1,u2, sumACDOF,sumDOF,u22,u21,u211,uc      :real;
s, s_okun,s_okun2,ss1,ss2,s_old,S_ref,T1,B_eta,K_de,K_e4,A_lfa,K_e3,Z_t :real;
i          :integer;

```

```

Function DGRY(h,bi,bf:real):real; {seçilen üçüncü dereceden üyelik
fonksiyonunun yükselen kısmının denklemi}

```

```

begin
  DGRY:=((h-bf)/(bi-bf));
end;

```

```

Function DGRI(h,bi,bf:real):real; {seçilen üçüncü dereceden üyelik
fonksiyonunun inen kısmının denklemi}

```

```

begin
  DGRI:=((bf-h)/(bf-bi));
end;

```

```

Function f_AND2(r1,r2:real):real; {iki degerden kucugunun secilmesi}

```

```

begin
  if r1 < r2 then
    f_AND2:=r1
  else
    f_AND2:=r2
end;

```

```

Function f_AND3(r1,r2,r3:real):real; {uc degerden kucugunun secilmesi}

```

```

begin
  f_AND3:=f_AND2(f_AND2(r1,r2),r3);
end;

```

```

Function f_OR2(r1,r2:real):real; {iki degerden buyugunun secilmesi}

```

```

begin
  if r1 > r2 then
    f_OR2:=r1
  else
    f_OR2:=r2
end;

```

```

Function f_OR3(a,b,c:real):real; {uc degerden buyugunun secilmesi}

```

```

begin
  f_OR3:=f_OR2(f_OR2(a,b),c);
end;

```

```

{***** sivi seviyesi UYELIK FONKSIYONLARININ TANIMLANMASI}

```

```

Function dk(s:real):real;

```

```

begin

```

```

if (s>dk1) And (s<dk2)then
  dk:=DGRY(s,dk1,dk2)
else
  if (s>=dk2) And (s<=dk3)then
    dk:=1
  else
    if (s>dk3) And (s<dk4) then
      dk:=DGRI(s,dk3,dk4)
    else
      dk:=0
end;
Function ort(s:real):real;
begin
  if (s>ort1) And (s<ort2)then
    ort:=DGRY(s,ort1,ort2)
  else
    if (s>=ort2) And (s<=ort3)then
      ort:=1
    else
      if (s>ort3) And (s<ort4) then
        ort:=DGRI(s,ort3,ort4)
      else
        ort:=0
end;
Function yk(s:real):real;
begin
  if (s>yk1) And (s<yk2)then
    yk:=DGRY(s,yk1,yk2)
  else
    if (s>=yk2) And (s<=yk3)then
      yk:=1
    else
      if (s>yk3) And (s<yk4) then
        yk:=DGRI(s,yk3,yk4)
      else
        yk:=0
end;
Function nr(s:real):real;
begin
  if (s>nr1) And (s<nr2)then
    nr:=DGRY(s,nr1,nr2)
  else
    if (s>=nr2) And (s<=nr3)then
      nr:=1
    else
      if (s>nr3) And (s<nr4) then
        nr:=DGRI(s,nr3,nr4)
      else
        nr:=0

```

```

end;
Function ys(s:real):real;
begin
  if (s>ys1) And (s<ys2)then
    ys:=DGRY(s,ys1,ys2)
  else
    if (s>=ys2) And (s<=ys3)then
      ys:=1
    else
      if (s>ys3) And (s<ys4) then
        ys:=DGRI(s,ys3,ys4)
      else
        ys:=0
    end;
  end;
  {*/*****sivi degisimi uyelik fonksiyonlarinin tanimlanmasi}
  Function nl(d:real):real;
  begin
    if (d>nl1) And (d<nl2)then
      nl:=DGRY(d,nl1,nl2)
    else
      if (d>=nl2) And (d<=nl3)then
        nl:=1
      else
        if (d>nl3) And (d<nl4) then
          nl:=DGRI(d,nl3,nl4)
        else
          nl:=0
        end;
      end;
    end;

  Function zr(d:real):real;
  begin
    if (d>zr1) And (d<zr2)then
      zr:=DGRY(d,zr1,zr2)
    else
      if (d>=zr2) And (d<=zr3)then
        zr:=1
      else
        if (d>zr3) And (d<zr4) then
          zr:=DGRI(d,zr3,zr4)
        else
          zr:=0
        end;
      end;
    end;

  Function pl(d:real):real;
  begin
    if (d>pl1) And (d<pl2)then
      pl:=DGRY(d,pl1,pl2)
    else
      if (d>=pl2) And (d<=pl3)then

```

```

    pl:=1
  else
    if (d>pl3) And (d<pl4) then
      pl:=DGRI(d,pl3,pl4)
    else
      pl:=0
  end;

```

```

Function ph(d:real):real;
begin
  if (d>ph1) And (d<ph2) then
    ph:=DGRY(d,ph1,ph2)
  else
    if (d>=ph2) And (d<=ph3) then
      ph:=1
    else
      if (d>ph3) And (d<ph4) then
        ph:=DGRI(d,ph3,ph4)
      else
        ph:=0
    end;

```

```

end;
{*/*****sivi referansı uyelik fonksiyonlarinin tanimlanmasi}

```

```

Procedure CalculateFuzzySets; {seviye ve seviyedegi_imi fonk.
                               degerlerinin hesabi}

```

```

begin
  s_dk:=dk(s);
  s_ort:=ort(s);  d_nl:=nl(d);
  s_yk:=yk(s);   d_zr:=zr(d);
  s_nr:=nr(s);   d_pl:=pl(d);
  s_ys:=ys(s);   d_ph:=ph(d);
end;

```

```

procedure FuzzyController;

```

```

begin
  DOF[1]:=f_AND2(s_dk,f_OR3(d_ph,d_zr,d_pl));
  DOF[2]:=f_AND2(f_OR2(s_dk,s_ort),f_OR3(d_pl,d_zr,d_ph));
  DOF[3]:=f_AND2(f_OR2(s_ort,s_yk),f_OR3(d_pl,d_zr,d_ph));
  DOF[4]:=f_AND2(s_yk,f_OR2(d_zr,d_pl));
  DOF[5]:=f_AND2(f_OR2(s_nr,s_yk),d_zr);
  DOF[6]:=f_AND2(s_nr,d_zr);
  DOF[7]:=f_AND2(s_ys,d_zr);
  DOF[8]:=f_AND2(f_OR2(s_nr,s_ys),d_ph);
  DOF[9]:=f_AND2(f_OR2(s_yk,s_nr),d_nl);
  DOF[10]:=f_AND2(s_ys,d_pl);
  DOF[11]:=f_AND2(s_ys,d_nl);
  DOF[12]:=f_AND2(s_ys,d_ph);

```

end;

Procedure Sifirla;

```
begin
  s:=0;    d:=0;
  s_dk:=0; d_nl:=0;
  s_ort:=0; d_zr:=0;
  s_yk:=0;  d_pl:=0;
  s_nr:=0;  d_ph:=0;
  s_ys:=0;
  for i:=1 to numrules do
    DOF[i]:=0;
  end;
```

{*****action degerleri*****}

Procedure SetAction;

```
begin
  ACTION[1]:=0.685;  ACTION[2]:=0.661;  ACTION[3]:=0.659;
  ACTION[4]:=0.64;  ACTION[5]:=0.645;  ACTION[6]:=0.645;
  ACTION[7]:=0.645; ACTION[8]:=0.6413; ACTION[9]:=0.673;
  ACTION[10]:=0.63; ACTION[11]:=0.62;  ACTION[12]:=0.58;

  end ;
```

procedure fuzzyproceduru(voltaj:real);

```
begin
  if ilkokuma then begin
    s_old := voltaj;
    S_okun:= voltaj;
    S_okun:=trunc(S_okun*10000)/10000;
    DE2 := 0;
    ilkokuma := false;
  end
  else
    s_okun := (6*s_okun+(10-6)*voltaj)/10.0 ;
    {fzArr1[fz1] := voltaj;
    fz1 := (fz1+1) mod 5;
    s_okun := 0;
    for fa := 0 to fc do
      s_okun := s_okun + fzArr1[fa];
    if fc < 4 then fc := fc + 1;
    s_okun := s_okun / (fc+1);
    //s_okun:=voltaj; }
    K_e4:=K_de/T1;
    ss1:=de2 *K_e4;
    ss2:=K_e3*S_okun;
    s:= ss1 + ss2;
```

```

    {(s_ref-s_okun)}
DE1 := dE2;
de2:=(s_okun-s_old);
DArr1[dz1] := DE2+de1;
dz1 := (dz1+1) mod 3;
d := 0;
for da := 0 to dc do
    d := d + dArr1[da];
if dc < 2 then dc := dc + 1;
d := d / (dc+1);
    {d:=(s_okun-s_old);}
sumDOF:= 0.0;
sumACDOF:= 0.0;
CalculateFuzzysets;
FuzzyController;
for i:=1 to numrules do begin
    sumDOF:=sumDOF+DOF[i];
    sumACDOF:=sumACDOF+ACTION[i]*DOF[i];
end;
u1:=u2;
if sumDOF <> 0 then u2:=sumACDOF/sumDOF;
u2:=ALFA*u1+(1-ALFA)*u2 ;
u21:= u2*B_eta*T1;
u211:= u21+ u211 ;
u22:=u2*A_lfa;
uc:= u211+u22;
{U2:= DigitalAnalog; }
s_old:=s_okun;
end;

```

```

{***** FUZZY BÖLÜMÜ SONU *****}
{***** FUZZY BÖLÜMÜ SONU *****}
{***** FUZZY BÖLÜMÜ SONU *****}

```

```

procedure Tfrmstart.cmdExitClick(Sender: TObject);
begin
    { if bRun then
        DRV_DeviceClose(DeviceHandle);}
    Timer1.Enabled := false;
    Series1.Clear;
    Series2.Clear;
    uc := 0;
    Timer1.Timer(Edit1);
end;

```

```

procedure Tfrmstart.cmdRunClick(Sender: TObject);
begin
    AiCtrMode := lpDevConfig_AI.usGainCtrMode;
    ptAIConfig.DasChan := 0;

```

```

ptAIConfig.DasGain := IpDevFeatures.gIGainList[0].usGainCde;
ErrCde := DRV_AIConfig(DeviceHandle, ptAIConfig);
If (ErrCde <> 0) Then
begin
    DRV_GetErrorMessage(ErrCde, pszErrMsg);
    Response := Application.MessageBox(pszErrMsg, 'Error!!', MB_OK);
    Exit;
end;
Timer1.Enabled := true;
saniye := 0;
end;

```

```

procedure Tfrmstart.FormCreate(Sender: TObject);

```

```

var
    MaxEntries, OutEntries : Smallint;
    i, j                    : Integer;
    tempStr                : String;
    testRes                : boolean;
    tempNum, { i, } ii     : Integer;
    nOutEntries            : Smallint;
    dwDeviceNum            : Longint;
    lpAIGetConfig          : PT_AIGetConfig;
    lpDEVCONFIG_AI        : DEVCONFIG_AI;

```

```

begin
    bRun := False;
    { Add type of PC Laboratory Card }
    ErrCde := DRV_DeviceGetList(DeviceList[0], MaxEntries, OutEntries);
    If (ErrCde <> 0) Then
    begin
        DRV_GetErrorMessage(ErrCde, pszErrMsg);
        Response := Application.MessageBox(pszErrMsg, 'Error!!', MB_OK);
        Exit;
    end;

```

```

    { Here MaxEntries = OutEntries }
    ErrCde := DRV_DeviceGetNumOfList(MaxEntries);
    If (ErrCde <> 0) Then
    begin
        DRV_GetErrorMessage(ErrCde, pszErrMsg);
        Response := Application.MessageBox(pszErrMsg, 'Error!!', MB_OK);
        Exit;
    end;

```

```

For i := 0 To (MaxEntries - 1) do
begin
    tempStr := "";
    For j := 0 To MaxDevNameLen do
        tempStr := tempStr + DeviceList[i].szDeviceName[j];

```

```

    lstDevice.Items.Add(tempStr);
end;

lstModule.Enabled := False;
labModule.Enabled := False;
labChannel.Enabled := False;
lstChannel.Enabled := False;
lstVoltageRange.Enabled := False;
labVoltageRange.Enabled := False;
cmdRun.Enabled := False;
lstDeviceClick(cmdRun);
// ptAOConfig.chan := 0;

HHH := 0;
setaction ;
Memo1.Clear;
fc := 0;
fz1 := 0;
for fa := 0 to 3 do
    fzArr1[fa] := 0;
ilkokuma := true;
end;

procedure Tfrmstart.lstDeviceClick(Sender: TObject);
var
    tempNum, i, ii      : Integer;
    nOutEntries        : Smallint;
    TestRes             : Boolean;
    TempStr             : String;
    dwDeviceNum        : Longint;
    lpAIGetConfig       : PT_AIGetConfig;
    lpDEVCONFIG_AI     : DEVCONFIG_AI;
begin
    lstModule.Items.Clear;
    lstChannel.Items.Clear;
    lstVoltageRange.Items.Clear;
    {lstExpChl.Clear;}

    tempNum := Pos('DEMO', lstDevice.Items[0]);
    if (tempNum <> 0) then
        TestRes := True
    else
        TestRes := False;

    { Avoid to open Advantech Demo Card }
    If (TestRes) Then
    begin
        labModule.Enabled := False;
        lstModule.Enabled := False;
        labChannel.Enabled := False;
    end;
end;

```

```

lstChannel.Enabled := False;
labVoltageRange.Enabled := False;
lstVoltageRange.Enabled := False;
lstChannel.Items.Add('No Use');
cmdRun.Enabled := False;
end;

If (Not TestRes) Then
begin
  { Check if there is any device attached on this COM or CAN }
  gnNumOfSubdevices := DeviceList[lstDevice.ItemIndex].nNumOfSubdevices;
  if (gnNumOfSubdevices > MaxDev) then
    gnNumOfSubdevices := MaxDev;

  dwDeviceNum := DeviceList[lstDevice.ItemIndex].dwDeviceNum;

  { COM and CAN bus }
  if (gnNumOfSubdevices <> 0) then
  begin
    ErrCde := DRV_DeviceGetSubList(dwDeviceNum, SubDeviceList[0],
gnNumOfSubdevices, nOutEntries);
    If (ErrCde <> 0) Then
    begin
      DRV_GetErrorMessage(ErrCde, pszErrMsg);
      Response := Application.MessageBox(pszErrMsg, 'Error!!', MB_OK);
      Exit;
    end;
    For i := 0 To (gnNumOfSubdevices - 1) do
    begin
      tempStr := "";
      For ii := 0 To MaxDevNameLen do
        tempStr := tempStr + SubDevicelist[i].szDeviceName[ii];
      lstModule.Items.Add(tempStr);
    end;
    lstModule.Enabled := True;
    labModule.Enabled := True;
    labChannel.Enabled := True;
    lstChannel.Enabled := True;
    labVoltageRange.Enabled := True;
    lstVoltageRange.Enabled := True;
    cmdRun.Enabled := True;
  end;

  { PCL DAS & DIO card }
  if (gnNumOfSubdevices = 0) then
  begin
    ErrCde := DRV_DeviceOpen(dwDeviceNum, DeviceHandle);
    If (ErrCde <> 0) Then
    begin
      DRV_GetErrorMessage(ErrCde, pszErrMsg);

```

```

    Response := Application.MessageBox(pszErrMsg, 'Error!!', MB_OK);
    Exit;
end
else
    bRun := True;

ptDevGetFeatures.buffer := @lpDevFeatures;
ErrCde := DRV_DeviceGetFeatures(DeviceHandle, ptDevGetFeatures);

{ Add analog input channel item }
lpAIGetConfig.buffer := @lpDevConfig_AI;
ErrCde := DRV_AIGetConfig(DeviceHandle, lpAIGetConfig);
If (ErrCde <> 0) Then
begin
    DRV_GetErrorMessage(ErrCde, pszErrMsg);
    Response := Application.MessageBox(pszErrMsg, 'Error!!', MB_OK);
    DRV_DeviceClose(DeviceHandle);
    Exit;
end;

If (lpDevConfig_AI.usChanConfig = 0) Then
    tempNum := lpDevFeatures.usMaxAISiglChl
Else
    tempNum := lpDevFeatures.usMaxAIDiffChl;
if (tempNum > 0) then
begin
    For i := 0 To (tempNum - 1) do
    begin
        tempStr := 'Chan#' + IntToStr(i);
        lstChannel.Items.Add(tempStr);
    end;
    labChannel.Enabled := True;
    lstChannel.Enabled := True;
    {lstChannel.Text := lstChannel.Items[0];}
end;

if (lpDevFeatures.usNumGain > 0) then
begin
    For i := 0 To (lpDevFeatures.usNumGain - 1) do
    begin
        tempStr := "";
        For ii := 0 To 15 do
            tempStr := tempStr + lpDevFeatures.glGainList[i].szGainStr[ii];
        lstVoltageRange.Items.Add(tempStr);
    end;
    labVoltageRange.Enabled := True;
    lstVoltageRange.Enabled := True;
    lstVoltageRange.Items[0];
end;
end;

```

```

    { Since you have selected a PC-Lab Card, you can choose the channel and gain code as
you want }

```

```

    cmdRun.Enabled := True;
end;
end;
end;

```

```

procedure Tfrmstart.lstModuleClick(Sender: TObject);

```

```

var

```

```

    tempNum, i, ii      : Integer;
    dwDeviceNum        : Longint;
    TempStr            : String;

```

```

begin

```

```

    lstChannel.Items.Clear;
    lstVoltageRange.Items.Clear;
    {lstExpChl.Clear;}

```

```

    { open COM device or CAN device }

```

```

    dwDeviceNum := SubDeviceList[lstModule.ItemIndex].dwDeviceNum;
    ErrCde := DRV_DeviceOpen(dwDeviceNum, DeviceHandle);

```

```

    If (ErrCde <> 0) Then

```

```

    begin

```

```

        DRV_GetErrorMessage(ErrCde, pszErrMsg);
        Response := Application.MessageBox(pszErrMsg, 'Error!!', MB_OK);
        Exit;

```

```

    end

```

```

    Else

```

```

        bRun := True;

```

```

    ptDevGetFeatures.buffer := @lpDevFeatures;

```

```

    ErrCde := DRV_DeviceGetFeatures(DeviceHandle, ptDevGetFeatures);

```

```

    If (ErrCde <> 0) Then

```

```

    begin

```

```

        DRV_GetErrorMessage(ErrCde, pszErrMsg);
        Response := Application.MessageBox(pszErrMsg, 'Error!!', MB_OK);
        Exit;

```

```

    end;

```

```

    ptAIGetConfig.buffer := @lpDevConfig_AI;

```

```

    ErrCde := DRV_AIGetConfig(DeviceHandle, ptAIGetConfig);

```

```

    If (ErrCde <> 0) Then

```

```

    begin

```

```

        DRV_GetErrorMessage(ErrCde, pszErrMsg);
        Response := Application.MessageBox(pszErrMsg, 'Error!!', MB_OK);
        DRV_DeviceClose(DeviceHandle);
        Exit;

```

```

    end;

```

```

    { Add analog input channel item }

```

```

    If (lpDevConfig_AI.usChanConfig = 0) Then

```

```

        tempNum := lpDevFeatures.usMaxAISigIChl

```

```

Else
  tempNum := lpDevFeatures.usMaxAIDiffChl;

  For i := 0 To (tempNum - 1) do
  begin
    tempStr := 'Chan#' + IntToStr(i);
    lstChannel.Items.Add(tempStr);
  end;
  cmdRun.enabled := True;

  { WARNING : No gain code list for ADAM series }
end;

procedure Tfrmstart.Timer1Timer(Sender: TObject);
var
  lpAOVoltageOut : PT_AOVoltageOut;
  aa,bb,cc, errcount : integer;
  Voltage, Volt2: Single;
  R,C : Real;
  onofout : byte;
begin
  sifirla;
  try
    s_ref := strtofloat(edit10.text);
    T1 := strtofloat(edit8.text);
    B_eta := strtofloat( edit11.text);
    K_de := strtofloat( edit12.text);
    A_lfa := strtofloat( edit13.text);
    K_e3:= strtofloat( edit14.text);
    Z_t:= strtofloat( edit15.text);
  except
    s_ref := 0;
    T1:= 0.1;
    B_eta := 5;
    K_de :=0.1;
    K_e3:= 1 ;
    A_lfa := 20;
    Z_t :=1;
  end;
  // timer1.Enabled := true;
  shape2.Top := Panel9.Height - trunc(Panel9.Height*s_ref/70);
  saniye := saniye + 1;
  AiVolIn.chan := 0;
  AiVolIn.gain := ptAIConfig.DasGain;
  AiVolIn.TrigMode := AiCtrMode;
  AiVolIn.voltage := @Voltage;
  ErrCde := DRV_AIVoltageIn(DeviceHandle, AiVolIn);
  If (ErrCde <> 0) Then
  begin
    ErrCount := ErrCount + 1;
  end;
end;

```

```

if (ErrCount > 2) then
  close
else
  begin
    DRV_GetErrorMessage(ErrCde, pszErrMsg);
    Response := Application.MessageBox(pszErrMsg, 'Error!!', MB_OK);
    Exit;
  end;
end;
voltage := voltage-0.25;
if voltage<0 then voltage := 0;
voltage := voltage * 60;
shape1.Top := Panel9.Height - trunc(Panel9.Height*(s_okun{voltage})/70);
if voltage<0 then voltage := 0;
label6.caption := FloatToStrF({Voltage}s_okun, ffFixed, 5, 1);
Chart1.Series[0].AddY({voltage}s_okun,inttostr(saniye),clBlue);
// Timer2.Enabled := true;
{ You can also use AiVolIn.voltage^ instead of Voltage here. }
case PageControl1.ActivePage.PageIndex of
  1 : begin
    if voltage < strtoint(edit9.text) then uc := 1 else uc := 0;
    Chart2.Series[0].AddY(uc*100,inttostr(saniye),clred);
    lpAOVoltageOut.chan := 0;
    lpAOVoltageOut.OutputValue := uc*5;
    ErrCde := DRV_AOVoltageOut(DeviceHandle, lpAOVoltageOut);

  end;
  2 : begin
    if s_ref>0 then fuzzyProceduru(voltage);
    lpAOVoltageOut.chan := 0;
    lpAOVoltageOut.OutputValue := 5*uc;
    ErrCde := DRV_AOVoltageOut(DeviceHandle, lpAOVoltageOut);
    Edit7.Text := floattostr(uc);
    Chart2.Series[0].AddY(uc*100{d},inttostr(saniye),clred);
    label12.caption := FloatToStrF(uc*100, ffFixed, 10, 1);
    bb := 40;
    for cc := 1 to 36 do
      if dof[cc]<> 0 then
        (FindComponent('Image'+inttostr(cc+1)) as TImage).visible := true
        else (FindComponent('Image'+inttostr(cc+1)) as TImage).visible := false;
    end;
  end;
end;
// ilkokuma := true;
if CheckBox1.Checked then begin
  memol.Lines.Add(inttostr(saniye)+' '+floattostr({voltage}s_okun
)+ ' '+floattostr({d}uc));
  memol.Lines.SaveToFile(SaveDialog1.FileName);
end;
end;

```

```
procedure Tfrmstart.BitBtn3Click(Sender: TObject);  
begin  
  cmdExitClick(BitBtn3);  
  close;  
end;
```

```
procedure Tfrmstart.BitBtn4Click(Sender: TObject);  
begin  
  Timer1.Enabled := not Timer1.Enabled;  
end;
```

```
procedure Tfrmstart.PageControl1Change(Sender: TObject);  
begin  
  cmdExitClick(BitBtn1);  
end;
```

```
procedure Tfrmstart.CheckBox1Click(Sender: TObject);  
begin  
  if CheckBox1.Checked then if not SaveDialog1.Execute then CheckBox1.Checked := false;  
end;
```

```
procedure Tfrmstart.FormKeyPress(Sender: TObject; var Key: Char);  
begin  
  if key = 's' then cmdExitClick(nil);  
end;
```

```
end.
```

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	27.06.1978	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1991-1995	İstek Vakfı Özel Atanur Oğuz Lisesi
Lisans	1996-2000	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2000-2002	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Müh. Anabilim Dalı, Elektrik Müh. Programı
Çalıştığı Kurumlar	2000-Devam ediyor	YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Araştırma Görevlisi

