

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**TİP-2 BULANIK MANTIK EDITÖRÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ VE
ESNEK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN DENETİMİ**

ETHEM KELEKÇİ

KOCAELİ 2016

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MEKATRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ



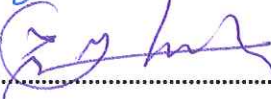
TİP-2 BULANIK MANTIK EDITÖRÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ VE
ESNEK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN DENETİMİ

ETHEM KELEKÇİ

Yrd.Doç.Dr. Selçuk KIZIR
Danışman, Kocaeli Üniv.

Prof.Dr. Zafer BİNGÜL
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniv.

Doç.Dr. Cihan KARAKUZU
Jüri Üyesi, Bilecik Şeyh Edebali Üniv.


.....

.....

.....

Tezin Savunulduğu Tarih: 25.01.2016

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Bulanık mantık denetim sistemi matematiksel modele gereksinim duymadan, insanların düşünme ve karar verme mekanizmasına benzer olarak çalıştığı için 1980'lerden günümüze kadar kontrol temelli akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda sıklıkla kullanılmış ve kullanılmaya devam etmektedir. Bulanık mantık, Zadeh tarafından farklı yapıda bulanık kümelerin ileri sürülmesiyle birlikte Tip-1/Tip-2 olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Bu çalışmada Tip-2 bulanık mantık denetim yapısı ayrıntılı bir şekilde işlenmiş ve tip-2 bulanık mantık editörü geliştirilmiştir. Benzetim ortamında ve gerçek zamanlı esnek eklemli robot kolunun, editörde tasarlanmış tip-2 bulanık mantık denetleyicileri ile kontrolü gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tip-1 bulanık mantık denetleyicileri ile gerçekleştirilen kontrol sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Bu çalışmanın konusunun belirlenmesinden tamamlanmasına kadar olan süreçte bilgi, deneyim ve desteğini esirgemeyen danışman hocam Sn. Yrd. Doç. Dr. Selçuk Kizir'e, çalışmalarına tecrübeleri ile katkıda bulunan Sn. Prof. Dr. Zafer Bingül'e, desteklerini esirgemeyen çalışma arkadaşlarım Cenk Karaman, Haluk Özakayol, Orkun Yılmaz'a ve her konuda yardımcı olan Melih Kuncan ve Kaplan Kaplan'a teşekkür ederim.

Ayrıca hayatım boyunca desteklerini esirgemeyen ve bu günlere gelmemde büyük pay sahibi olan aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Şubat – 2016

Ethem KELEKÇİ

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	iv
TABLolar DİZİNİ.....	viii
SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR.....	ix
ÖZET	xi
ABSTRACT	xii
GİRİŞ.....	1
1. GENEL BİLGİLER.....	3
2. TİP-2 BULANIK MANTIK DENETİM SİSTEMİ.....	7
2.1. Tip-2 Üyelik Fonksiyonları.....	7
2.2. Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyicisinin Yapısı.....	13
2.2.1. Bulanıklaştırma.....	14
2.2.2. Kural tabanı ve çıkarım.....	14
2.2.3. Çıkış işlemleri.....	16
2.2.3.1. Tip-2/Tip-1 indirgemesi	17
2.2.3.2. Durulaştırma	22
3. TİP-2 BULANIK MANTIK EDİTÖR TASARIMI.....	23
3.1. Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici Yöntem Seçimleri	25
3.2. Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı.....	26
4. TİP-2 BULANIK MANTIK EDİTÖR TESTİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	39
4.1. Mobil Robot Kontrolü İçin Tip-2 Denetleyici Tasarımı ve Sonuçların Teorik Olarak Bulunması	39
4.1.1. KM Algoritması ile $cl(L)$ ve $cr(R)$ 'nin elde edilmesi.....	41
4.1.2. KM Algoritması ile $u(l)$ ve $u(r)$ kontrol sinyallerinin elde edilmesi	47
4.1.3. Kontrol sinyalinin elde edilmesi.....	51
4.2. Mobil Robot Kontrolü İçin Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımının Editör Yardımıyla Gerçekleştirilmesi.....	51
5. ESNEK EKLEMLİ ROBOT KOLONUN BENZETİM ORTAMINDA VE GERÇEK ZAMANLI DENETİMİ	57
5.1. Esnek Eklemlili Robot Kolunun Modellenmesi ve T1BMD - T2BMD Kontrol Yapılarının Oluşturulması	57
5.1.1. Esnek eklemlili robot kolunun matematiksel modeli	58
5.1.2. Benzetim ortamında esnek eklemlili robot kolunun kontrolü için T1BMD ve T2BMD ile kontrol yapılarının oluşturulması	68
5.1.3. Esnek eklemlili robot kolunun T1BMD ve T2BMD ile yörünge takibi benzetim sonuçları.....	78
5.2. Esnek Eklemlili Robot Kolunun Gerçek Zamanlı Denetimi	87
5.2.1. Esnek eklemlili robot kolunun T2BMD ile kontrolüne ilişkin deneysel sonuçlar	91
5.2.1.1. Kısa kol için konum kontrolü deneyleri.....	91

5.2.1.2. Uzun kol için konum kontrolü deneyleri.....	96
5.2.2. Esnek eklemlı robot kolunun yük ve gürültü sinyal etkisi altında T1BMD ve T2BMD kontrol performanslarının karşılaştırılması.....	100
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	109
KAYNAKLAR.....	111
EKLER.....	114
KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER.....	118
ÖZGEÇMİŞ.....	119

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1.	Tip-1 üyelik fonksiyonu.....	8
Şekil 2.2.	Tip-2 üyelik fonksiyonu.....	8
Şekil 2.3.	(a) Tip-1 üyelik fonksiyonu (b) bulanıklaştırılmış tip-1 üyelik fonksiyonu (c) tip-2 üyelik fonksiyonu (FOU).....	10
Şekil 2.4.	Tip-2 üyelik fonksiyonu (FOU) ve x1, x2 noktalarındaki ikincil üyelik fonksiyonları.....	11
Şekil 2.5.	Ayrık bir AT2ÜF örneği.....	11
Şekil 2.6.	Ayrık bir AT2ÜF'ye ait 1250 gömülü ayrık T1ÜF içerisinde bir tanesi.....	12
Şekil 2.7.	Tip-1 bulanık mantık denetleyicisi blok diyagramı	13
Şekil 2.8.	Tip-2 bulanık mantık denetleyicisi blok diyagramı	13
Şekil 2.9.	FOU'lar ile bulanıklaştırma işlemi.....	14
Şekil 2.10.	Minimum yöntemi doğrultusunda elde edilen çıkış üyelik fonksiyonu örneği.....	15
Şekil 2.11.	(a), (b) iki kurala göre elde edilmiş çıkış üyelik fonksiyonları ve (c) bunların birleşimi	16
Şekil 2.12.	Bir AT2ÜF için α kesimi	17
Şekil 2.13.	KM algoritması ile bulunan L (sol) ve R (sağ) kesim noktaları	20
Şekil 3.1.	T2BM kontrol akış şeması	24
Şekil 3.2.	T2BM editörü ile denetleyici tasarım sürecinde yapılan işlemler.....	25
Şekil 3.3.	T2BM Denetleyici ayarlama ara yüzü.....	26
Şekil 3.4.	Tasarım arayüzü	26
Şekil 3.5.	Edit menüsü işlem seçenekleri.....	27
Şekil 3.6.	İki giriş-iki çıkışa sahip bir sistem için T2BMD tasarımı	28
Şekil 3.7.	Yeni üyelik fonksiyonu ekleme penceresi	28
Şekil 3.8.	Hata mesajı örnekleri.....	29
Şekil 3.9.	Eklenmiş yeni üyelik fonksiyonunun gösterimi.....	29
Şekil 3.10.	Üyelik fonksiyonlarına ait parametrelerin ayarlanması.....	30
Şekil 3.11.	Alt ve üst üyelik fonksiyonlarına ait parametre hata mesajları.....	31
Şekil 3.12.	Bulanıklık değerlerinin fare yardımıyla değiştirilmesi.....	31
Şekil 3.13.	Kural yazım penceresi	32
Şekil 3.14.	Üyelik fonksiyonlarının ve giriş çıkışların dilsel etiketlerinin değişimi sonrası kuralların güncellenmesi.....	33
Şekil 3.15.	View Menüsü	33
Şekil 3.16.	Tasarlanan denetleyicinin belirtilen giriş değerlerine karşı çıkış değerinin alınması	34
Şekil 3.17.	Sınırlar dışında giriş değerinin girilmesine ilişkin hata mesajları.....	34
Şekil 3.18.	25'er örnek alınarak oluşturulan sonuç yüzey grafiği örneği	35
Şekil 3.19.	İkiden fazla giriş bulunan sistemler için yüzey grafiği oluşturma seçenekleri.....	35
Şekil 3.20.	Üç giriş bulunan bir sistemin yüzey grafiği oluşturma penceresi	36
Şekil 3.21.	'Ref Input' parametrelerine ilişkin hata mesajları.....	36
Şekil 3.22.	Matlab/Simulink ortamında, tasarlanan denetleyicinin kullanımı	37

Şekil 3.23. Matlab/Simulink ortamında, tasarlanan denetleyicinin çözüm kümesi ile kullanımı	38
Şekil 4.1. Sağ ön ve arka mesafe sensörlerine ait üyelik fonksiyonları.....	39
Şekil 4.2. Çıkış üyelik fonksiyonları.....	40
Şekil 4.3. Yöntem seçim penceresi	52
Şekil 4.4. Sağ ön sensöre ait üyelik fonksiyonları.....	53
Şekil 4.5. Sağ arka sensöre ait üyelik fonksiyonları	53
Şekil 4.6 Çıkış üyelik fonksiyonları.....	54
Şekil 4.7. Kuralların yazımı.....	54
Şekil 4.8. 170 cm / 240 cm giriş değerlerinde denetleyicinin çıkış değeri.....	55
Şekil 4.9. Karşılaştırma yapılan sonuç yüzey grafiği.....	55
Şekil 4.10. Tip-2 bulanık mantık editörü sonuç yüzey grafiği	56
Şekil 5.1. Esnek eklemlili robot kol modeli (hareketsiz)	58
Şekil 5.2. Esnek eklemlili robot kol modeli (hareketli)	59
Şekil 5.3. Matlab/Simulink ortamında sistemin doğrusal olmayan modeli	65
Şekil 5.4. $\alpha = 30^\circ$ başlangıç açısında serbest salınım grafiği.....	66
Şekil 5.5. Darbe fonksiyonu girişine karşı θ açısı sistem cevabı.....	67
Şekil 5.6. Darbe fonksiyonu girişine karşı α açısı sistem cevabı	67
Şekil 5.7. Esnek eklemlili robot kolu kontrol blok diyagramı.....	68
Şekil 5.8. Esnek eklemlili robot kolu kontrol blok diyagramı.....	69
Şekil 5.9. Döner tabla açısı (θ) hatasının tip-1 üyelik fonksiyonları.....	70
Şekil 5.10. Döner tabla açısı (θ) hatasının değişiminin tip-1 üyelik fonksiyonları.....	70
Şekil 5.11. Tip-1 çıkış üyelik fonksiyonları	70
Şekil 5.12. Döner tabla açısı (θ) hatasının tip-2 üyelik fonksiyonları.....	71
Şekil 5.13. Döner tabla açısı (θ) hatasının değişiminin tip-2 üyelik fonksiyonları.....	71
Şekil 5.14. Tip-2 çıkış üyelik fonksiyonları	71
Şekil 5.15. Salınım açısı (α) hatasına ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları.....	72
Şekil 5.16. Salınım açısı (α) hatasının değişimine ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları	72
Şekil 5.17. Tip-1 çıkış üyelik fonksiyonları	73
Şekil 5.18. Salınım açısı (α) hatasına ilişkin tip-2 üyelik fonksiyonları.....	73
Şekil 5.19. Salınım açısı (α) hatasının değişimine ilişkin tip-2 üyelik fonksiyonları	73
Şekil 5.20. Tip-2 çıkış üyelik fonksiyonları	74
Şekil 5.21. θ Açısına ait denetleyicinin çıkışına ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları	74
Şekil 5.22. α Açısına ait denetleyicinin çıkışına ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları	75
Şekil 5.23. Tip-1 Motor gerilim üyelik fonksiyonları.....	75
Şekil 5.24. θ Açısına ait denetleyicinin çıkışına ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları	75
Şekil 5.25. α Açısına ait denetleyicinin çıkışına ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları	76
Şekil 5.26. Tip-2 Motor gerilim üyelik fonksiyonları.....	76
Şekil 5.27. Birinci ve ikinci T1BMD yüzey grafiği.....	77
Şekil 5.28. Üçüncü T1BMD yüzey grafiği.....	77
Şekil 5.29. Birinci ve ikinci T2BMD yüzey grafiği	77
Şekil 5.30. Üçüncü T2BMD yüzey grafiği.....	78
Şekil 5.31. Matlab/Simulink kademeli T2BMD kontrol yapısı.....	78

Şekil 5.32. Matlab/Simulink kademeli T1BMD kontrol yapısı.....	79
Şekil 5.33. Birim basamak sistem cevapları.....	80
Şekil 5.34. Birim basamak girişi için α ve θ ve açılı hataları.....	80
Şekil 5.35. Gürültü sinyali etkisi altında birim basamak sistem cevapları	81
Şekil 5.36. Gürültü sinyali.....	81
Şekil 5.37. Gürültü sinyali etkisi altında birim basamak girişi için θ ve α açılı hataları	81
Şekil 5.38. Yüksek gürültü sinyali etkisi altında birim basamak sistem cevapları.....	82
Şekil 5.39. Yüksek gürültü sinyali.....	82
Şekil 5.40. Yüksek gürültü sinyali etkisi altında birim basamak girişi için θ ve α açılı hataları	82
Şekil 5.41. Bozucu giriş karşısında salınım (α) açılı hatası.....	83
Şekil 5.42. Bozucu giriş karşısında θ açılı hatası.....	84
Şekil 5.43. Sinüzoidal yörünge takibi sistem cevapları	84
Şekil 5.44. Sinüzoidal yörünge takibi için θ ve α açılı hataları	85
Şekil 5.45. Gürültü sinyali etkisi altında sinüzoidal yörünge takibi sistem cevapları.....	85
Şekil 5.46. Gürültü sinyali.....	85
Şekil 5.47. Gürültü sinyali etkisi altında sinüzoidal yörünge takibi için θ ve α açılı hataları.....	86
Şekil 5.48. Yüksek gürültü sinyali etkisi altında sinüzoidal yörünge takibi sistem cevapları	86
Şekil 5.49. Yüksek gürültü sinyali.....	86
Şekil 5.50. Yüksek gürültü sinyali etkisi altında sinüzoidal yörünge takibi için θ ve α açılı hataları.....	87
Şekil 5.51. Esnek eklemlili robot kolu test düzeneği	88
Şekil 5.52. Matlab/Simulink ortamında kademeli T2BMD kontrol yapısı.....	89
Şekil 5.53. Matlab/Simulink ortamında kademeli T1BMD kontrol yapısı.....	89
Şekil 5.54. Matlab/Simulink T2BMD ile gerçek zamanlı kontrol modeli.....	90
Şekil 5.55. Matlab/Simulink T1BMD ile gerçek zamanlı kontrol modeli.....	90
Şekil 5.56. Birim basamak sistem cevapları (kol uzunluğu:0,4 m)	91
Şekil 5.57. Birim basamak girişi için α ve $\theta + \alpha$ açılı hataları (kol uzunluğu:0,4 m).....	92
Şekil 5.58. Birim basamak yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu:0,4 m).....	92
Şekil 5.59. Kane fonksiyonu yörünge takibi (kol uzunluğu:0,4 m).....	93
Şekil 5.60. Kane fonksiyonu yörünge takibi α ve $\theta + \alpha$ açılı hataları (kol uzunluğu:0,4 m).....	93
Şekil 5.61. Kane fonksiyonu yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu:0,4 m).....	93
Şekil 5.62. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi (kol uzunluğu:0,4 m).....	94
Şekil 5.63. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi α ve $\theta + \alpha$ açılı hataları (kol uzunluğu:0,4 m)	94
Şekil 5.64. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu:0,4 m).....	95
Şekil 5.65. Birim basamak sistem cevabı (kol uzunluğu:0,58 m)	96
Şekil 5.66. Birim basamak girişi için α ve $\theta + \alpha$ açılı hataları (kol uzunluğu:0,58 m).....	96

Şekil 5.67. Birim basamak yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu:0,58 m).....	97
Şekil 5.68. Kane fonksiyonu yörünge takibi (kol uzunluğu:0,58 m).....	97
Şekil 5.69. Kane fonksiyonu yörünge takibi α ve $\theta + \alpha$ açılı hataları (kol uzunluğu:0,58 m).....	98
Şekil 5.70. Kane fonksiyonu yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu:0,58 m).....	98
Şekil 5.71. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi sistem cevabı (kol uzunluğu:0,58 m).....	98
Şekil 5.72. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi α ve $\theta + \alpha$ açılı hataları (kol uzunluğu:0,58 m).....	99
Şekil 5.73. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu:0,58 m).....	99
Şekil 5.74. Birim basamak girişi sistem cevapları (kol uzunluğu: 0,58 m, yük 50 gr).....	100
Şekil 5.75. Birim basamak girişi için $\theta + \alpha$ açılı hataları.....	101
Şekil 5.76. Birim basamak girişi için α açılı hataları.....	101
Şekil 5.77. Birim basamak yörünge takibi kontrol sinyalleri.....	101
Şekil 5.78. Kane fonksiyonu yörünge takibi sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr).....	102
Şekil 5.79. Kane fonksiyonu yörünge takibi $\theta + \alpha$ açılı hataları.....	102
Şekil 5.80. Kane fonksiyonu yörünge takibi α açılı hataları.....	102
Şekil 5.81. Kane fonksiyonu yörünge takibi kontrol sinyalleri.....	103
Şekil 5.82. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr).....	103
Şekil 5.83. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi α ve $\theta + \alpha$ açılı hataları.....	103
Şekil 5.84. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi α açılı hataları.....	104
Şekil 5.85. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi kontrol sinyalleri.....	104
Şekil 5.86. Kane fonksiyonu yörünge takibi sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr, $-2^\circ - 2^\circ$ gürültü sinyali).....	105
Şekil 5.87. Kane fonksiyonu yörünge takibi gürültü etkisi altında oturma zamanı sistem cevapları.....	105
Şekil 5.88. Kane fonksiyonu yörünge takibi $\theta + \alpha$ açılı hataları.....	106
Şekil 5.89. Gürültü etkisi altında kane fonksiyonu yörünge takibi kontrol sinyalleri.....	106
Şekil 5.90. Birim basamak sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr, $-2^\circ - 2^\circ$ gürültü sinyali).....	106
Şekil 5.91. Birim basamak girişi gürültü etkisi altında oturma zamanı sistem cevapları.....	107
Şekil 5.92. Gürültü etkisi altında birim basamak girişi için $\theta + \alpha$ açılı hataları.....	107
Şekil 5.93. Gürültü etkisi altında birim basamak yörünge takibi kontrol sinyalleri.....	107
Şekil A.1. S-fonksiyon (S-function) blok kodları.....	115
Şekil B.1. Matlab fonksiyon blok kodları.....	116
Şekil C.1. Kane fonksiyonu.....	117

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 4.1. Çıkış üyelik fonksiyonlarını oluşturan gömülü üyelik fonksiyonları içerisinde en büyük ve en küçük ağırlık merkezi değerleri	47
Tablo 5.1. DC motor denklem parametreleri.....	63
Tablo 5.2. Sistem parametrelerin gösterimi.....	64
Tablo 5.3. Esnek eklemli robot kolu sisteminde kullanılan parametre ve değerleri	66
Tablo 5.4. Döner tabla açısına (θ) ilişkin kural tablosu	72
Tablo 5.5. Salınım açısına (α) ilişkin kural tablosu	74
Tablo 5.6. Motor gerilimine ilişkin kural tablosu	76
Tablo 5.7. Birim basamak sistem cevapları (kol uzunluğu:0,4 m)	92
Tablo 5.8. Kısa kol konum kontrolü T1BMD ve T2BMD açısı hatası maliyet fonksiyonları (kol uzunluğu:0,4 m).....	95
Tablo 5.9. Kontrol sinyalleri maliyet fonksiyonları ve maksimum pozitif-negatif gerilim değerleri (kol uzunluğu:0,4 m).....	95
Tablo 5.10. Birim basamak sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m)	97
Tablo 5.11. Uzun kol konum kontrolü T1BMD ve T2BMD açısı hatası maliyet fonksiyonları (kol uzunluğu:0,58 m).....	100
Tablo 5.12. Kontrol sinyalleri maliyet fonksiyonları ve maksimum pozitif-negatif gerilim değerleri (kol uzunluğu:0,58 m).....	100
Tablo 5.13. 50 gr yük altında uzun kol konum kontrolü T1BMD ve T2BMD açısı hatası maliyet fonksiyonları	104
Tablo 5.14. Kontrol sinyalleri maliyet fonksiyonları ve maksimum pozitif-negatif gerilim değerleri (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr)	105
Tablo 5.15. Birim basamak sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr, - 2° - 2° gürültü sinyali)	108
Tablo 5.16. Gürültü sinyali etkisi altında konum kontrolü T1BMD ve T2BMD açısı hatası ve kontrol sinyali maliyet fonksiyonları.....	108
Tablo 5.17. Kontrol sinyalleri maksimum pozitif-negatif gerilim değerleri.....	108

SİMGELER DİZİNİ VE KISALTMALAR

A	: Birinci yayın tabla üzerindeki bağlantı noktası
A	: A tip-1 bulanık küme
\tilde{A}	: A tip-2 bulanık küme
\tilde{A}_e	: İç içe girmiş (gömülü) kümeler toplamı
B	: İkinci yayın tabla üzerindeki bağlantı noktası
B_a	: Rijit çubuk ile tabla arasındaki sürtünme katsayısı
B_m	: Motor sürtünme katsayısı, (Nsn^2/m)
C	: Yayların rijit çubuk üzerindeki bağlantı noktası
$c(l) = a^n$: En küçük ağırlık merkezi
$c(r) = b^n$: En büyük ağırlık merkezi
d_t	: A ve B noktalarının dönme merkezine yatay uzaklığı, (m)
\underline{f}^n	: Çıkarım sonucu alt üyelik derecesi
\overline{f}^n	: Çıkarım sonucu üst üyelik derecesi
$J_{\text{tabla}} = J_t$: Tablanın eylemsizlik momenti, (kgm^2)
$J_{\text{çubuk}} = J_ç$: Çubuk eylemsizlik momenti, (kgm^2)
J_x	: x'in birincil üyelik fonksiyonu
$K.E_{\text{tabla}}$: Döner tablanın kinetik enerjisi
$K.E_{\text{çubuk}}$: Çubuğun kinetik enerjisi
K_g	: Motor dişli verimi
K_m	: Motor dişli oranı, (Nm/A)
K_t	: Tork sabiti, (V/rad/sn)
K_{yay}	: Yay sabiti, (N/m)
L_0	: Gerilmemiş yay uzunluğu, (m)
O	: Rijit çubuğun tabla üzerindeki dönme noktası
$P.E_{\text{yay}}$: Toplam yay potansiyel enerjisi
R_L	: Çubuk üzerindeki yay bağlama noktasının O noktasına uzaklığı, (m)
R_m	: Motor direnci, (Ohm)
r_t	: A ve B noktalarının dönme merkezine dik uzaklığı, (m)
$u(l)$: En küçük ağırlık merkezine ilişkin kontrol sinyali
$u(r)$: En büyük ağırlık merkezine ilişkin kontrol sinyali
τ	: Motor tarafından tablaya uygulanan tork
x_1	: Tablanın dönme açısının durum değişkeni ifadesi
x_2	: Çubuğun salınım açısının durum değişkeni ifadesi
x_3	: Tablanın dönme açısal hızının durum değişkeni ifadesi
x_4	: Çubuğun salınım açısal hızının durum değişkeni ifadesi
\dot{x}_1	: Tablanın dönme açısının durum değişkeni ifadesinin türevi

\dot{x}_2	: Çubuğun salınım açısının durum değişkeni ifadesinin türevi
\dot{x}_3	: Tablanın dönme açısal hızının durum değişkeni ifadesinin türevi
\dot{x}_4	: Çubuğun salınım açısal hızının durum değişkeni ifadesinin türevi
α	: Çubuğun salınım açısı, (derece)
$\dot{\alpha}$: Çubuğun salınım açısal hızı, (rad/sn)
$\ddot{\alpha}$: Çubuğun salınım açısal ivmesi, (rad/ sn ²)
θ_1	: Alt ve üst üyelik derecesi aritmetik ortalaması
θ	: Tablanın dönme açısı, (derece)
$\dot{\theta}$: Tablanın dönme açısal hızı, (rad/sn)
$\ddot{\theta}$: Tablanın dönme açısal ivmesi, (rad/ sn ²)
$\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1, u)$: A bulanık kümesine ait üst üyelik derecesi
$\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1, u)$: A bulanık kümesine ait alt üyelik derecesi
$\mu(x)$: Tip-1 üyelik derecesi
$\tilde{\mu}(x)$: Tip-2 üyelik derecesi
η_m	: Motor verimi
η_g	: Motor dişli verimi

Kısaltmalar

AT2ÜF	: Ayrık Tip-2 Üyelik Fonksiyonu
BLDC	: Brushless Direct Current (Fırçasız Doğru Akım)
FOU	: Footprint of Uncertainty (Belirsizliğin Ayak İzi)
PID	: Proportional-Integral-Derivative (Oransal-İntegral-Türevsel kontrolör)
T1BM	: Tip-1 Bulanık Mantık
T1BMD	: Tip-1 Bulanık Mantık Denetleyicisi
T2BM	: Tip-2 Bulanık Mantık
T2BMD	: Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyicisi
ÜF	: Üyelik Fonksiyonu

TİP-2 BULANIK MANTIK EDITÖRÜNÜN GELİŞTİRİLMESİ VE ESNEK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN DENETİMİ

ÖZET

İnsanın ve doğadaki akıllı canlıların beyin yapısından ve davranış biçiminden esinlenerek ortaya çıkan yapay zekânın alt dallarından birisi olan bulanık mantık kontrol sistemlerinde sıklıkla kullanılmaktadır. Bulanık mantık, doğrusal olmayan, modellenmesi güç ve bilgilerin niteliklerinin belirsiz veya kesin olmadığı zor olan sistemler için oldukça uygun bir denetim sistemidir. Bulanık mantık, üyelik fonksiyonları ve kontrol yapısındaki farklılıklar kapsamında tip-1 ve tip-2 olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Tip-1 bulanık mantık üyelik fonksiyonları klasik mantıktan farklı olarak 0-1 arasında değişen üyelik derecelerine sahip olsa da bir kümenin değişkenine karşılık gelen üyelik derecesi sadece bir değere sahiptir. Bu sebeple tip-1 bulanık mantık, kontrol edilecek sistemdeki gürültüden, sistem modelinden vb. nedenlerden oluşan belirsizlikleri ifade edememektedir. Bu çalışmada belirsizliklerin üyelik fonksiyonları ile ifade edildiği tip-2 bulanık mantık denetim sistemlerinin oluşturulabilmesi için bir editör tasarımı yapılmıştır.

Bu çalışmanın amacı belirsizlikleri de ifade ederek daha iyi kontrol mekanizmalarının oluşturulmasını ve istenilen kontrol performansına ulaşıncaya kadar yapılan çalışmaların hızlı ve kolay bir şekilde geliştirilen editör üzerinde gerçekleştirilmesini sağlamaktır.

Bu çalışma kapsamında geliştirilen editörün öncelikle literatürde yer alan bir kitapta bulunan uygulama ile doğruluk testi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında benzetim ortamında ve gerçek zamanlı esnek eklemli robot kolunun, editörde tasarlanmış tip-2 bulanık mantık denetleyicileri ile kontrolü gerçekleştirilmiş ve sonuçlar tip-1 bulanık mantık denetleyicileri ile gerçekleştirilen kontrol sonuçları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Esnek Eklemli Robot Kolu, Tip-1 Bulanık Mantık, Tip-1 Üyelik Fonksiyonu, Tip-2 Bulanık Mantık, Tip-2 Üyelik Fonksiyonu.

DEVELOPMENT OF INTERVAL TYPE-2 FUZZY LOGIC TOOLBOX AND CONTROL OF FLEXIBLE JOINT ROBOT MANIPULATOR

ABSTRACT

Fuzzy logic, which is one of the subbranch of artificial intelligence that was inspired by human beings and intelligent species' behaviour and brain activities, is used for system controls frequently. The fuzzy logic is effective and convenient controlling method in systems that includes nonlinearity, difficulty in modelling and uncertain, imprecise system information. Fuzzy Logic was divided into two sub section as type-1 and type-2 which in view of differencies between them membership functions and control structure. Different from formal logic, type-1 membership functions has degree of membership rate between 0 and 1, however degree of membership corresponding to one of the variable of a fuzzy set takes one particular value. Therefore type-1 fuzzy logic is not enough ability to define uncertainties that can be caused by noise in controlling system and faults in system modeling. In this study, a toolbox was designed to generate type-2 fuzzy logic controllers that uncertainties can be expressed by membership functions.

The aim of this thesis, to ensure the creation of better control mechanisms also expressed uncertainty and to perform studies fast and easy on the toolbox developed until to reach the desired control performance.

Firstly, the toolbox developed was tested with application in a book in the literature. Afterwards, flexible joint robot manipulator was controlled with type-2 fuzzy logic controllers, which generated on toolbox, in simulation environment and real-time and this control results were compared with type-1 fuzzy logic contollers results.

Keywords: Flexible Joint Robot Manipulator, Type-1 Fuzzy Logic, Type-1 Membership Functions, Type-2 Fuzzy Logic, Type-2 Membership Functions.

GİRİŞ

Bilgiye ve kurala bağılı çalışan bulanık mantık, kontrol sistemlerinde sıkça kullanılmaktadır. Bulanık mantık, üyelik fonksiyonları ve kontrol yapısındaki farklılıklar kapsamında tip-1 ve tip-2 olmak üzere ikiye ayrılmıştır. Tip-1 bulanık mantık üyelik fonksiyonları klasik mantıktan farklı olarak 0-1 arasında değişen üyelik derecelerine sahip olsa da bir kümenin değişkenine karşılık gelen üyelik derecesi sadece bir değere sahiptir. Bu nedenle klasik bulanık mantık, kontrol edilecek sistemdeki belirsizlikleri ifade edememektedir [1]. Bu belirsizlikler ölçümden, gürültüden, sistem modelinden vb. nedenlerden kaynaklanabilmektedir. Bu kapsamda klasik bulanık mantık tarafından hesap edilemeyen belirsizlikleri hesaba katarak daha iyi kontrol olanağı sağlayan, klasik bulanık kümelerin uzantısı olan tip-2 bulanık mantık geliştirilmiştir. Bu fikir ilk kez 1975 yılında Zadeh tarafından ileri sürülmüştür [2].

Bu çalışma kapsamında üyelik derecelerinin net olarak ifade edilemediği, modele bağılı kontrol yapılarının matematiksel modelin tam olarak çıkartılamaması nedeniyle yetersiz kaldığı sistemleri kontrol edebilmek için, içerisinde belirsizliklerin bulunduğu bulanık üyelik fonksiyonlarının oluşturulup, sistemden alınan verilere bağılı olarak oluşturulan kuralların yazılmasıyla birlikte tip-2 bulanık mantık denetleyici tasarımı yapılması amaçlanmıştır. Tip-2 bulanık mantık sistemi tip-1 bulanık mantık sisteminden farklı olarak daha fazla işlem yüküne sahip olduğu için gerçek zamanlı sistemlerde giriş değerlerine karşılık gelen çıkış değerini hesaplamak daha uzun sürebilmektedir. Bu nedenle istenilen durumlarda çözüm kümesi oluşturularak girişlere karşılık gelen sonuçlar, oluşturulan çözüm kümesinden alınarak daha hızlı kontrol sağlanabilmektedir. Bu tezde yapılan çalışmalar genel olarak 5 ana başlık altında incelenmiştir.

Bölüm 1’de tip-1, tip-2 bulanık mantık denetim sistemleri ve üyelik fonksiyonları hakkında genel bilgiler verilmiş ve bunların karşılaştırılması yapılmış, literatürde tip-2 bulanık mantık denetleyicisi ile yapılan kontrol uygulamalarına değinilmiştir.

Bölüm 2’de tip-2 üyelik fonksiyonları hakkında bilgiler verilmiş ve tip-2 bulanık mantık denetim sisteminin yapısı ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir.

Bölüm 3’te tip-2 bulanık mantık editörünün tasarımı, üyelik fonksiyonlarının ve kuralların oluşturulması ayrıntılarıyla anlatılmıştır.

Bölüm 4’de bir kitapta yer alan tip-2 bulanık mantık denetleyicisi ile kontrolü gerçekleştirilen mobil robotun üyelik fonksiyonları ve kuralları kullanılarak editörde tasarlanan denetleyicinin doğruluk testi yapılmıştır.

Bölüm 5’te esnek eklemli robot kolunun kontrolü için editör üzerinde kademeli tip-2 bulanık mantık denetleyicisi (T2BMD) tasarlanmış ve sistemin benzetim ortamında ve gerçek zamanlı kontrolü gerçekleştirilmiştir. İdeal şartlarda ve çeşitli bozucu etkileri altında T1BMD ve T2BMD karşılaştırmaları yapılmıştır.

Bölüm 6’da bu tez çalışması kapsamında elde edilen tüm sonuçlar özet şeklinde anlatılarak genel bir sonuç elde edilmiştir. İlerde yapılabilecek iyileştirmeler ve bu konu ile ilgili yapılabilecek çalışmalar hakkında fikirler sunulmuştur.

1. GENEL BİLGİLER

Geçmişten bugüne insanoğlunun zamanın teknolojik imkânlarına göre kendi kendine çalışan makineler yaptıkları bilinmektedir. İhtiyaç doğrultusunda yapılan bu makineler otomatik kontrol gereksinimini ortaya çıkarmıştır. İlk zamanlarda yapılan makineler mekanik kontrol mekanizmaları ile kontrol edilmekteydi. İlerleyen zamanlarda elektriğin icadı ile birlikte bu kontrol mekanizmaları farklı bir boyut kazanmıştır. Teknolojinin gelişmesiyle birlikte endüstride ve akademik araştırmalarda ‘kontrol’ önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir.

Lotfi A. Zadeh tarafından 1965 tarihinde öne sürülen ve 1970’li yıllardan sonra pratik uygulamalarda sıklıkla kullanılan bulanık mantık, kontrol yöntemlerinden biridir. Zadeh bulanık mantığı şu şekilde ifade etmiştir: “Bulanık mantık, düşünmenin, sonucun ve hesaplamanın kusurlu bilgilerle ilişkili olduğu yerlerde kesin bir kavramsal sistemdir ya da öyle kabul edilir. Kusurlu bilgi ise, bir veya daha fazla açıdan bilginin kesin ve tamamıyla güvenilir olmadığı, belirsiz ya da kısmen doğru olduğu bilgidir ” [3]. Zadeh’in bu ifadesi ile birlikte insanların kesinlik ifade etmeyen bir takım bilgileri kullanarak karar verebilme özelliğinin makinelerden daha iyi olduğu yerlerde, bu özellikler makinelere adapte edilirse daha iyi bir performans alınması gerektiği anlaşılmaktadır. Klasik mantık 0 ve 1 gibi kesin değerlerle sınırlanırken, bulanık mantık farklı olarak 0-1 aralığındaki sonsuz değerleri dikkate almaktadır. Normal gündelik yaşamda ‘doğru-yanlış’ veya ‘var-yok’ gibi kesin ifadelerle karşılaşmak çok mümkün olmamaktadır. Makineler veya kontrol sistemleri de canlıların davranış yapıları temel alınarak tasarlandığı için algı ve aktarımlarının canlılar gibi bulanık değerlerde olması gerekir. Bu doğrultuda bulanık mantık denetim sistemi daha iyi ve gerçekçi kontrollerin gerçekleştirilmesine katkı sağlamıştır. Başlangıçta bulanık mantık bilim adamları tarafından mühendislik alanlarına uygun bir kontrol yöntemi olarak görülmemiştir. Bu nedenle 1965 yılında ortaya çıkmasına rağmen 4-5 yıl kadar sonra endüstriyel uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. İngiltere’de 1974 yılında S. Assilian ve E. Mamdani tarafından [4]

buhar makinesinin kontrolünün gerçekleştirmek için dönemdeki kontrol yöntemlerinin yetersizliği sebebiyle bulanık mantığın denenmesi bulanık mantık ile gerçekleştirilen ilk büyük uygulama olmuştur. Bulanık mantık ile ilk endüstriyel uygulama ise 1976 yılında Danimarka'da geliştirilmiş fakat 6 yıl sonra uygulanabilmiştir. 1979 yılında Hitachi firmasından Seiji Yasunobu bulanık mantıkla Senday Metrosunun otomatik tren kontrol yapısının oluşturulması çalışmasına başlamış ve 1987 yılında Senday Metrosu hizmete sunulmuştur.

Bulanık mantık kontrol yöntemi olarak pratik uygulamalarda kullanılmaya başlanmasından sonra içerisinde ölçümden, gürültüden, sistem modelinden vb. nedenlerden belirsizliklerin olduğu yerlerde istenilen şekilde performans göstermediği gözlemlenmiştir [5]. Bu sebeple Lotfi A. Zadeh tarafından 1975 yılında klasik bulanık mantık çalışmalarının paralelinde belirsizliklerin tanımlanabileceği ikincil bir bulanık mantık denetim sistemi geliştirilmiştir. Yeni bir bulanık mantık denetim sistemiyle birlikte kontrol yöntemlerinde tip-1 (klasik) ve tip-2 bulanık mantık olmak üzere iki ayrı şekilde ifade edilmeye başlanmıştır. Fakat hesaplamaların biraz daha karmaşık ve işlem yükününün biraz daha fazla olması nedeniyle tip-1 bulanık mantık kadar geniş kapsamlı kullanılmamıştır.

Tip-2 bulanık mantık denetleyicileri; DC-DC dönüştürücüler, robot futbol oyunları, iki eksen hareket kontrolü, kablosuz sensör iletişimi, gürültü filtreleme, ters sarkaç kontrolü, örüntü tanıma vb. alanlarda uygulanmıştır [6-12]. T2BMD akademik çalışmalarda özellikle mobil robot kontrollerinde sıklıkla kullanılmıştır. Pisit Phokharatkul ve Supachai Phaiboon [13] bir koridor boyunca önüne çıkan engelleri kızıllötesi mesafe sensörü yardımıyla aşan otonom mobil robot kontrolünü, Hani Hagrass [14] ön ve arkada bulunan mesafe sensörleri yardımıyla farklı çevresel koşullar altında bir yüzeye paralel giden mobil robotun kontrolünü, Min-Chi Kao ve arkadaşları [15] yörünge takibi için hareketini DC motorlardan sağlayan nonholonomik yapıda bir tekerlekli mobil robotun modeli üzerinden kontrolü, John Figueroa ve arkadaşları [16] futbol oynayan bir mobil robotun ve platform içerisinde bulunan topun konumunu görüntü işleme yardımıyla tespit ederek, topun bulunduğu noktaya doğru bir yörüngeyi kullanarak gitmesi için mobil robotun konum kontrolünü tip-2 bulanık mantık denetleyicileri ile gerçekleştirmişler ve başarılı sonuçlar almışlardır. Tufan Kumbasar ve Hani Hagrass [17] kontrol performansının

sınırlı olduğu baskın nonlinear sistemlerde tercih edilen, iç ve dış olmak üzere iki farklı denetim yapısının bulunduğu kademeli kontrol yapısı içerisinde T2BMD kullanarak tekerlekli bir mobil robotun konum kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Majid Moradi Zirkohi ve arkadaşları [18] iki uzuvdan oluşan esnek eklemlili robot kolu mekanizmasının konum kontrolü için T2BMD kullanmıştır. Sistemde iki uzuv bulunmasından dolayı iki eklem içinde ayrı T2BMD tasarlamışlardır. Kontrol performansını geliştirmek için T2BMD'ye ait tip-2 bulanık kümelerin birincil üyelik fonksiyonlarını ortalama karekök hatası kıstasına göre parçacık sürü optimizasyonu (PSO) ile elde etmişlerdir. Doğrusal olmayan ve içerisinde belirsizliklerin bulunduğu sistemlerde T1BMD'nin belirli bir noktadan sonra yeterli olmadığını göstermek için sisteme harici bozucu etkiler ve geri besleme üzerinde farklı gecikme süreleri ekleyerek benzetim ortamında kontrol uygulamaları yapmışlardır. Sonuçlarda T1BMD kontrol sınırları dışına çıkarken T2BMD'nin çok daha iyi kontrol performansı gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Mohammad El-Bardini ve Ahmad M. El-Nagar [19] akademik çalışmalarda sıklıkla kullanılan ters sarkaç sisteminin benzetim ortamında ve gerçek zamanlı olarak T2BM-PID kontrol yapısı ile kontrolünü gerçekleştirmişlerdir. Benzetim ve deneysel sonuçlarını verdikleri çalışmalarında T2BM-PID kontrol yapısının T1BM-PID kontrol yapısına göre özellikle gürültü ve bozucu etkiler altında daha iyi sonuçlar verdiğini gözlemlemişlerdir. Mohit Jha ve Shailja Shukla [20] çok yönlü bir kavşağın araç yoğunluğuna göre trafik lamba süresinin ayarlanması işlemini tip-2 bulanık mantık denetim sistemi ile gerçekleştirmişlerdir. Tip-2 bulanık mantık yapısının akademik çalışmaların yanı sıra endüstriyel çalışmalarda da kullanıldığı görülmektedir. Tiechao Wang ve arkadaşları [21] endüstriyel uygulamalarda uçak, gemi gövdeleri ve bazı büyük değerli makineler gibi ağır yüklere sahip ekipmanların taşınması işleminde kullanılan halat tahrikli paralel robot mekanizmasının kontrolünü T2BMD ile gerçekleştirmişlerdir. Wang ve arkadaşları kontrolü gerçekleştirilen mekanizmada ölçüm hataları, dönme açısı sensörü ve gerilim sensörlerindeki çözünürlük sınırlarından kaynaklanan belirsizlikler ve taşınan yükün değişken ağırlığından ve taşınma sırasında yükte oluşan sarsıntıdan dolayı sensörlerin doğruluğunun etkilenmesi ile oluşan belirsizlikler mevcut olduğu ve matematiksel modele bağlı kontrol yapıları halat tahrikli paralel robotun kontrolünde yeterli olmadığı için T2BMD tercih ettiklerini belirtmişlerdir. Uygulama alanları genişlese de

hesaplamaların biraz daha karmaşık olması, yeterli yazılımsal desteklerin olmaması gibi problemlerden dolayı tip-2 bulanık mantık sistemi yeterli seviyede kullanım alanına sahip olamamıştır. Bu problemler göz önünde bulundurularak tez çalışması kapsamında yapılan çalışma ile farklı kullanım alanlarında hızlı ve kolay bir şekilde daha iyi bir kontrol sistemi oluşturmak amaçlanmıştır.

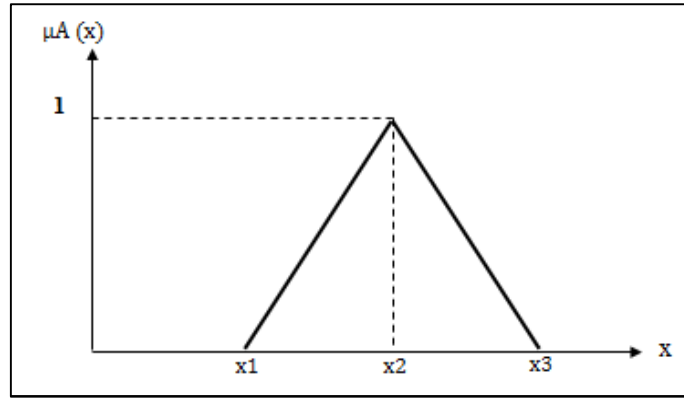
2. TİP-2 BULANIK MANTIK DENETİM SİSTEMİ

Tip-2 bulanık mantık denetim sistemi tip-1 bulanık mantık denetim sisteminin bir uzantısı olarak ortaya çıktığı için genel hatlarıyla iki denetim sistemi birbirlerine benzerlik göstermektedir. Tip-1 bulanık mantık denetim sisteminde sırasıyla bulanıklaştırma, kurala bağlı çıkarım ve durulaştırma işlemleri yapılmaktadır [22]. Bu yapı doğrultusunda iki denetim yapısı arasındaki ilk farklılık bulanıklaştırma kısmında gerçekleşmektedir. Bulanıklaştırma işlemi üyelik fonksiyonları ile gerçekleştiği ve yapısal olarak farklılık gösterdikleri için üyelik fonksiyonları da tip-1 ve tip-2 olmak üzere ikiye ayrılmıştır. İki denetim sistemi içinde kural yazımı ve çıkarım işlemleri aynı çerçevede yapılmaktadır fakat üyelik fonksiyonlardaki farklılıktan dolayı gösterimleri farklı olmaktadır. Tip-1 bulanık mantık denetim sisteminde çıkış değeri kural yazımı ve çıkarım işlemi yapıldıktan sonra sadece durulaştırma işlemi ile elde edilmektedir. Tip-2 denetim sisteminde ise durulaştırma kısmına geçmeden önce tip-2/tip-1 indirgemesi işlemine ihtiyaç duyulmaktadır [23]. İki denetim sistemi arasında diğer önemli farklılık da bu indirgeme işleminin yapılmasıdır. Bu bölümde tip-2 üyelik fonksiyonları ve tip-2 denetim sisteminin yapısı ayrıntılı bir şekilde anlatılmış, farklılık ve benzerliklerini göstermek için de gerekli yerlerde tip-1 üyelik fonksiyonu ve tip-1 denetim sistemine değinilmiştir.

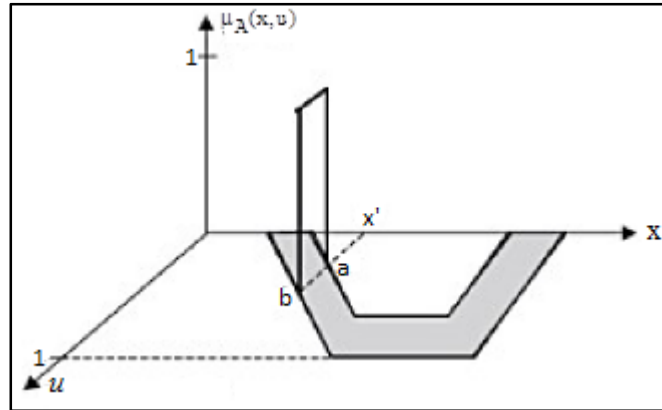
2.1. Tip-2 Üyelik Fonksiyonları

Bulanık mantık insan mantığında olduğu gibi bir duruma ait bilgiyi ‘çok uzak, uzak, orta, yakın, çok yakın’ gibi ara değerlerle ifade etmektedir. Bu ara değerler ise bulanık mantıkta üyelik fonksiyonları olarak isimlendirilen bulanık kümelerle ifade edilmektedir. Her bir üyelik fonksiyonu (bulanık küme) bir ara değeri temsil etmektedir. Bir duruma ilişkin bilginin üyelik fonksiyonu içerisinde hangi oranda üye olduğu $[0,1]$ arasında bir sayısal ifade olan üyelik derecesi ile belirtilmektedir. Üyelik fonksiyonlarının oluşturulması bulanık mantık denetim yapısının ilk adımı olan bulanıklaştırma işlemi içerisinde gerçekleşmektedir.

Tip-1 üyelik fonksiyonları küme değişkeni ve değişkene karşılık gelen üyelik derecesi olmak üzere iki boyutlu düzlemde ifade edilmektedir [24]. Tip-2 üyelik fonksiyonlarında ise bir küme değişkenine aralıklı üyelik derecesi karşılık gelmesinden dolayı o aralığı ifade eden ikincil üyelik fonksiyonları oluşmaktadır. İkincil üyelik fonksiyonu ile birlikte tip-2 üyelik fonksiyonları üç boyutlu olarak ifade edilmektedir [11]. Şekil 2.1 ve 2.2’ de tip-1 üyelik fonksiyonu ve tip-2 üyelik fonksiyonu örneği gösterilmiştir [25].



Şekil 2.1. Tip-1 üyelik fonksiyonu



Şekil 2.2. Tip-2 üyelik fonksiyonu

Şekil 2.1.’de yer alan tek değişkenli ‘A’ tip-1 bulanık kümesi Denklem (2.1)’de olduğu gibi ifade edilmektedir.

$$A = (x, \mu_A(x)) \quad | \quad \forall x \in x \quad (2.1)$$

Burada ‘A’ kümesine ait ‘x’ değişkeninin üyelik derecesini ifade eden $\mu_A(x)$, 0 ile 1 arasında olmalıdır. Her x değişkenine ait 0-1 arasında bir üyelik derecesi mevcut olduğu için herhangi bir belirsizlik ifade edilememektedir [26].

Bir kümeye ait değişkenin üyelik derecesi tam olarak belirlenemiyorsa diğer bir ifadeyle bir belirsizlik varsa tip-2 üyelik fonksiyonu kullanmak daha uygun olmaktadır. Şekil 2.1’de yer alan tip-2 bulanık kümesi ise \tilde{A} ile ifade edilir ve $x \in X$, $u \in J_x^u \subseteq [0,1]$ olmak üzere tip-2 üyelik fonksiyonu $\mu_{\tilde{A}}(x, u)$ ve $0 \leq \mu_{\tilde{A}}(x, u) \leq 1$ şeklinde Denklem (2.2) ve ayrıca Denklem (2.3)’te olduğu gibi tanımlanmaktadır.

$$\tilde{A} = \{(x, u, (\mu_{\tilde{A}}(x, u)) \mid \forall x \in X, \forall u \in J_x^u \subset [0,1] \quad (2.2)$$

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

İkincil üyelik fonksiyonlarının tümünün 1’e eşit olduğu aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonları (Interval Type-2 Membership Functions-IT2MF) için Denklem (2.3)’de yer alan ifade Denklem (2.4) eşitliğine dönüşmektedir.

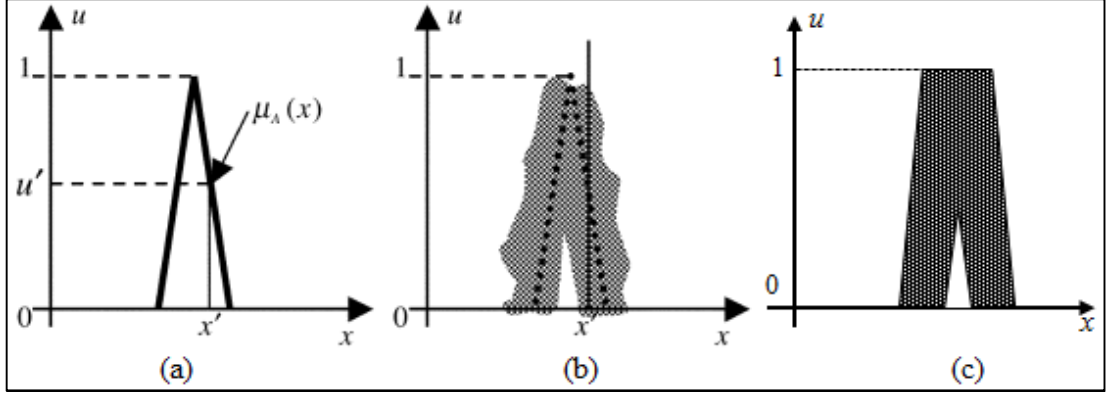
$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \int_{u \in J_x^u} 1 / (x, u) \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (2.4)$$

Tip-1 üyelik fonksiyonlarının bulanıklaştırılması sonucu oluşan aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonlarının aralık değeri kadar oluşan ikincil üyelik fonksiyonları tip-1 bulanık kümedir. Bu sebeple tip-2 bulanık küme, tüm ikincil kümelerin birleşimi olarak Denklem (2.5) ‘te gösterilen şekilde de ifade edilebilmektedir.

$$\tilde{A} = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) / x = \int_{x \in X} \left[\int_{u \in J_x^u} 1 / u \right] / x \quad J_x \subseteq [0,1] \quad (2.5)$$

Bulanıklaştırılmış tip-1 üyelik fonksiyonları düzgün bir geometrik şekle sahip olmamaktadır. Üyelik fonksiyonlarının daha iyi ifade edilmesi ve hesapsal işlemlerin daha iyi yapılabilmesi için belirsizliğin ayak izi (footprint of uncertainty - FOU)

şeklinde isimlendirilen düzgün bir geometrik şekle sahip sınırlı bir bölge oluşturulmaktadır [27]. Şekil 2.3-c'deki tip-2 üyelik fonksiyonu Şekil 2.3-b'deki bulanıklaştırılmış tip-1 üyelik fonksiyonunun, belirsizliğin ayak izinin bulunması sonrası elde edilen şeklidir [27].

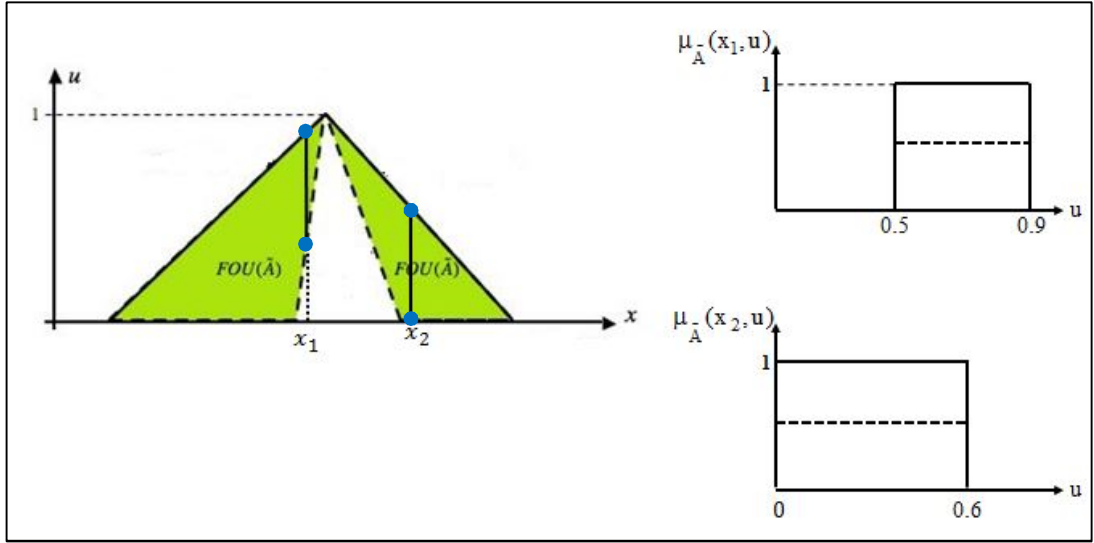


Şekil 2.3. (a) Tip-1 üyelik fonksiyonu (b) bulanıklaştırılmış tip-1 üyelik fonksiyonu (c) tip-2 üyelik fonksiyonu (FOU)

Sonuç olarak elde edilen üyelik fonksiyonu aslında Denklem (2.6)'da görüldüğü gibi alt ve üst üyelik fonksiyonu olmak üzere iki tane tip-1 üyelik fonksiyonu arasında kalan alanı temsil etmektedir [6].

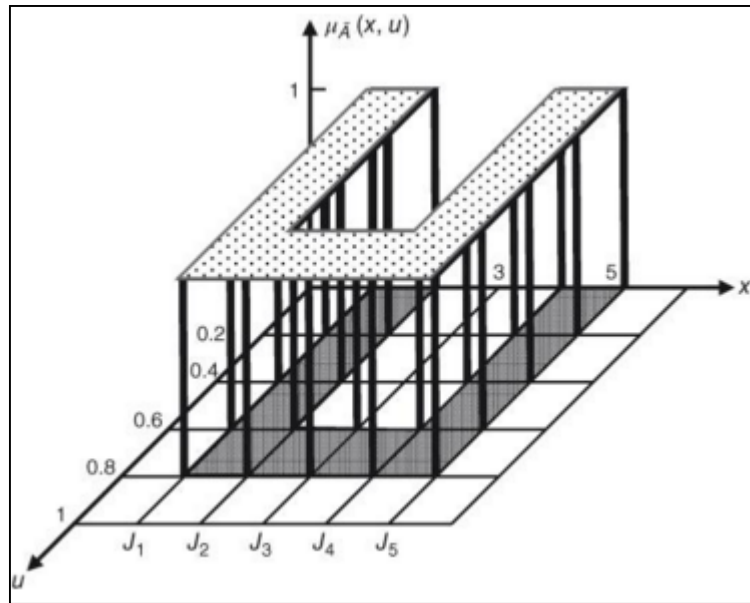
$$\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \overline{\text{FOU}(\tilde{A})} \quad \forall x \in X \quad \text{ve} \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x) = \underline{\text{FOU}(\tilde{A})} \quad \forall x \in X \quad (2.6)$$

FOU çok kullanışlıdır, çünkü FOU sadece tip-2 üyelik fonksiyonuna özgü doğal belirsizliklere dikkat çekmez aynı zamanda tip-2 üyelik fonksiyonunun tüm ikinci dereceleri için çok uygun tanımlama olanağı sağlar [6]. Şekil 2.4'te bir FOU örneği verilmiştir. Burada öncelikle u-x ekseninde birincil bulanık tip-2 üyelik fonksiyonu yer almaktadır. Sonrasında ise x1 ve x2 noktalarında üyelik derecelerindeki aralık değeri kadar ikincil tip-1 üyelik fonksiyonları gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Tip-2 üyelik fonksiyonu (FOU) ve x_1 , x_2 noktalarındaki ikincil üyelik fonksiyonları

Şekil 2.5 'te [27] ikincil üyelik fonksiyonlarının 1'e eşit olduğu bir kümeye ait değişkenin 5 parçaya ($J_1 - J_5$) ayrılmış aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonu gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Ayrık bir AT2ÜF örneği

Belirtilen AT2ÜF için, $X=\{1,2,3,4,5\}$ $U=\{0,0,2,0,4,0,6,0,8,1\}$ $J_1=\{0,0,2,0,4,0,6,0,8\}$ $J_2=J_1$ $J_3=\{0,6,0,8\}$ $J_4=J_1$ $J_5=J_1$ 'dir. Bu veriler doğrultusunda ikincil kümeler Denklem (2.7) ve (2.8)'de verilmiştir. Şekil 2.5'te gösterilen tip-2 üyelik fonksiyonu

(FOU) simetrik olduğu için $x=3$ noktası dışındaki tüm ikincil kümeler $x=1$ noktasındakiye eşit olmaktadır.

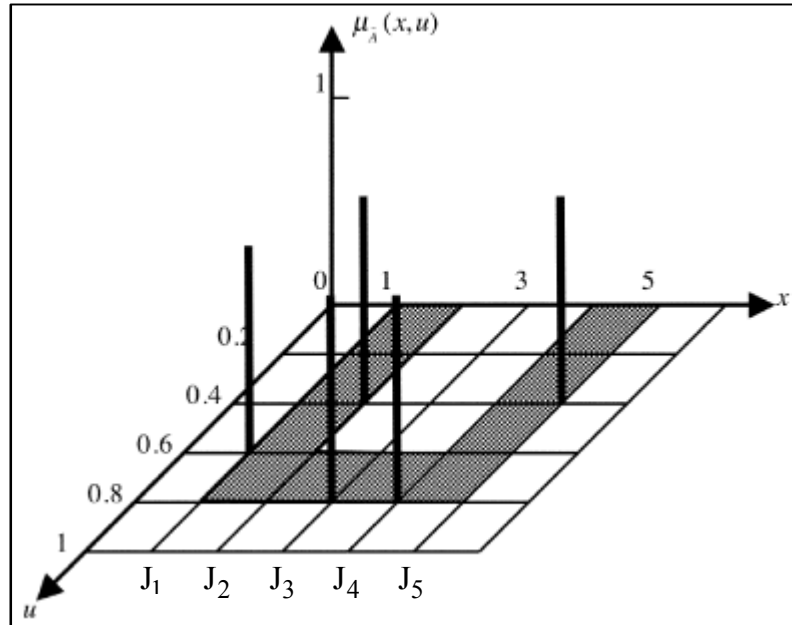
$$\mu_{\tilde{A}}(1) = 1/0 + 1/0,2 + 1/0,4 + 1/0,8 \quad (2.7)$$

$$\mu_{\tilde{A}}(3) = 1/0,6 + 1/0,8 \quad (2.8)$$

Aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonları gömülü (iç-içe girmiş) çok sayıda tip-1 üyelik fonksiyonlarından oluşmaktadır (\tilde{A}_e) ve bu sayı bulanıklık miktarıyla doğrudan ilişkilidir. Burada \tilde{A}_e Denklem (2.9) eşitliğinde görüldüğü gibi tüm gömülü tip-1 üyelik fonksiyonlarının birleşimini ifade etmektedir.

$$\tilde{A}_e = \int_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}(x) / u \quad u \in J_x \subseteq U = [0,1] \quad (2.9)$$

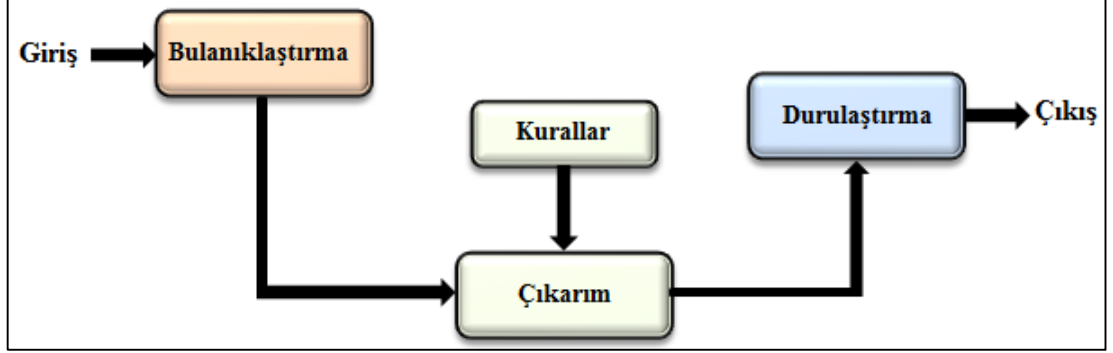
\tilde{A}_e 'ye ait her bir gömülü tip-1 üyelik fonksiyonunda Şekil 2.6'da [25] gösterildiği gibi her küme değişkenine tek bir üyelik derecesi karşılık gelmektedir.



Şekil 2.6. Ayırık bir AT2ÜF'ye ait 1250 gömülü ayırık T1ÜF içerisinden bir tanesi

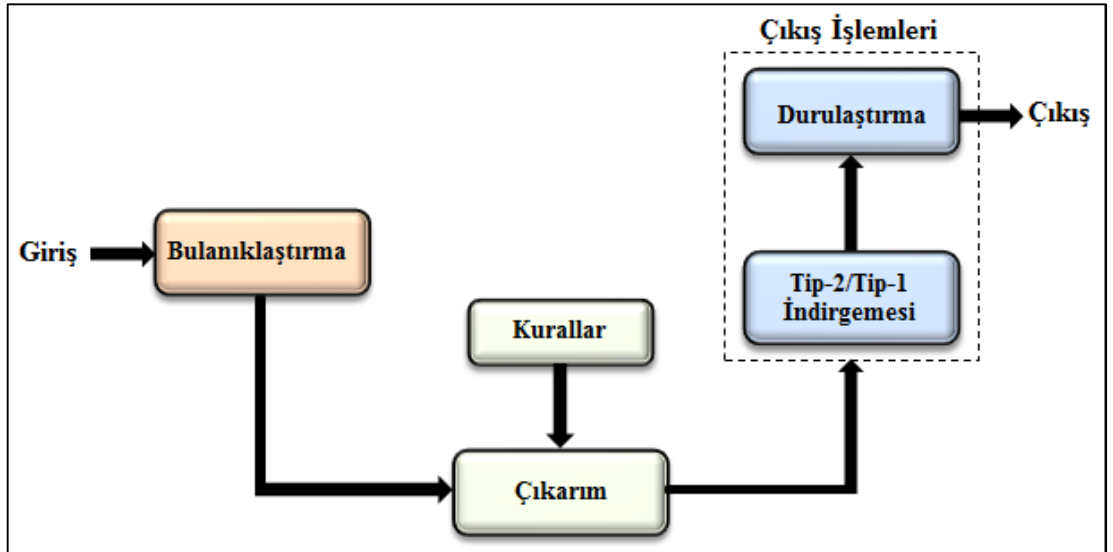
2.2. Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyicisinin Yapısı

Tip-1 bulanık mantık denetim sisteminde sırasıyla üyelik fonksiyonlarının oluşturulduğu bulanıklaştırma, 'Eğer-İse' yapısına göre yazılan kurallar ve bu kurallara bağlı 'minimum veya çarpım' yöntemine göre çıkarım ve çıkış değerinin belirlendiği durulaştırma işlemleri yapılmaktadır.



Şekil 2.7. Tip-1 bulanık mantık denetleyicisi blok diyagramı

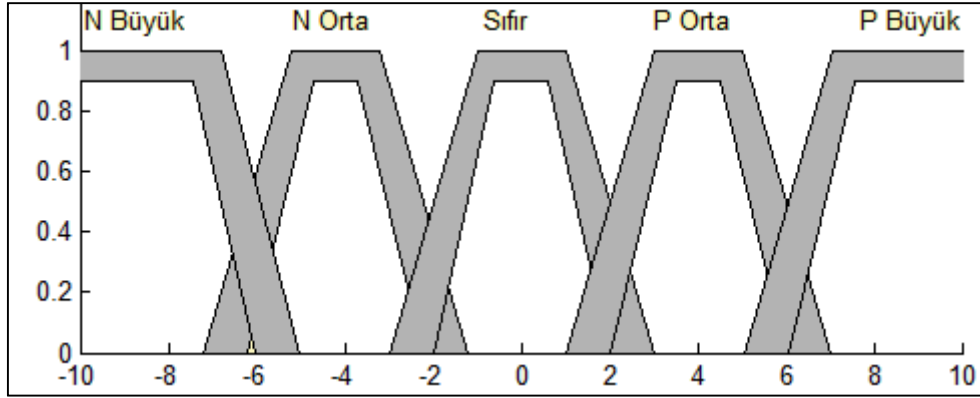
Tip-2 bulanık denetleyicinin yapısı ise genel anlamda tip-1 bulanık mantık denetleyicisi ile benzerlik göstermektedir. Burada farklılık oluşturan kısım üyelik fonksiyonlarının yapısından dolayı çıkarım işleminden sonra tip-2/tip-1 indirgemesinin olmasıdır. Şekil 2.7'de tip-1 Şekil 2.8'de ise bulanık denetleyicisinin yapısı gösterilmiştir.



Şekil 2.8. Tip-2 bulanık mantık denetleyicisi blok diyagramı

2.2.1. Bulanıklaştırma

Tip-2 bulanık mantık denetleyicisinin ilk adımı kontrol edilecek sistemden gelen giriş değerlerini bulanıklaştırma işlemidir. Bu işlem yapılırken giriş değerleri $[0,1]$ aralığında üyelik derecelerine sahip tip-2 üyelik fonksiyonlarına dönüştürülmektedir. Üyelik fonksiyonlarının yerleri ve şekilleri sistemden sisteme farklılık gösterebildiği için standart bir bulanıklaştırma işlemi yapılmamaktadır. Şekil 2.9'da $[-10,10]$ aralığında giriş değerlerine karşılık gelen 5 üyelik fonksiyonu ile bulanıklaştırma örneği gösterilmiştir. Dilsel etiketler denetleyici tasarımı yapan kişi tarafından farklı şekillerde yapılabilmektedir.



Şekil 2.9. FOU'lar ile bulanıklaştırma işlemi

Sonuca doğrudan etki eden bu adımın sistemin iyi kontrol edilmesinde önemli rolü olduğu için yapılan çalışma kullanıcıya esnek ve kolay bir tasarım imkânı sunmaktadır.

2.2.2. Kural tabanı ve çıkarım

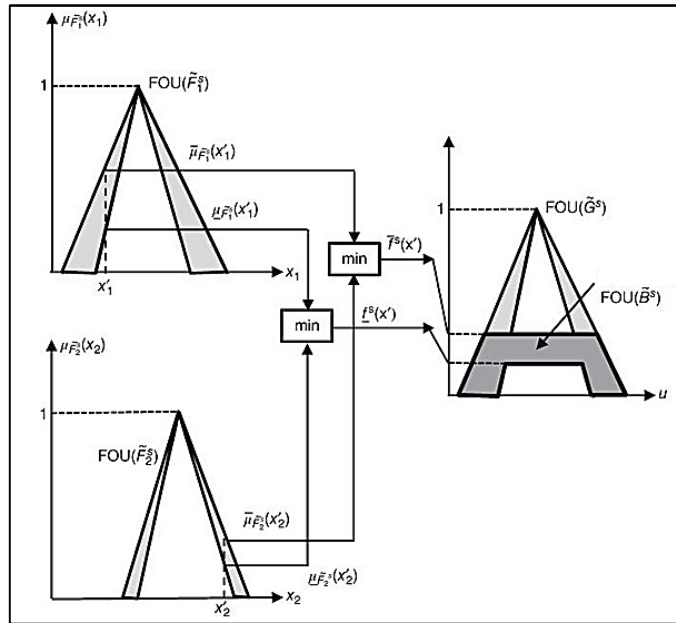
Bulanık mantık, insanların veya akıllı canlıların davranış mekanizmalarına göre karar veren makineler ya da denetleyiciler tasarlamayı hedefler. İnsanlar veya doğadaki canlılar bu tecrübeleri zaman içerisinde yaşayarak kazanmaktadırlar ve bu tecrübelerin makine veya denetleyicilere de öğretilmesi gerekir. Bu öğretme işlemi, bir sistemin çalışma mekanizmasını belirleyecek olan “Kural Kümesi” ile gerçekleşir. Bu kurallar vasıtasıyla, canlılara ait çıkarım şeklinin veya karar verme tarzının sistemlere uygulanması sağlanmaktadır. Kuralların belirlenmesi sistemden alınan bilgiler doğrultusunda veya bir uzmanın bilgi ve deneyimlerine dayanarak

gerçekleştiği için sistemden sisteme farklılık göstermektedir. Bu nedenle belirli bir kural yazım yöntemi bulunmamaktadır [28].

Tip-1 ve tip-2 bulanık mantık denetleyicilerinde kural oluşturma işlemi aynı şekilde ‘EĞER-İSE (IF-THEN)’ yapısı kullanılarak yapılmaktadır. Sistemde yer alan üyelik fonksiyonu sayısı ile doğru orantılı olarak kural sayısı belirlenir. ‘EĞER-İSE’ yapısı arasındaki ‘Ve’, ‘Veya’ ya da ‘Dâhil Değil’ bağlaç seçimi sistemden sisteme farklılık gösterebildiği için bu seçim kuralları oluşturan kişiler tarafından yapılmaktadır. Tez çalışması kapsamında tasarlanan editör kuralların üyelik fonksiyonlarının dilsel etiketleri kullanılarak kolay bir şekilde oluşturulmasına imkân tanımaktadır. Tip-2 üyelik fonksiyonlarının belirlenip, buna bağlı kuralların yazılmasından sonraki önemli adım çıkarım yönteminin belirlenmesidir. Aynı şekilde yöntem seçimi de her sistem için farklılık gösterdiği için burada da standart bir seçimden bahsetmek mümkün olmamaktadır. Denklem (2.10) ve (2.11)’da editör üzerinde seçme imkânı olan ‘minimum’ ve ‘çarpım’ yöntemleri yer almaktadır.

$$R^x \rightarrow [f^x, \bar{f}^x] = [\min(\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1, u), \underline{\mu}_{\tilde{B}}(x_2, u)), \min(\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1, u), \bar{\mu}_{\tilde{B}}(x_2, u))] \quad (2.10)$$

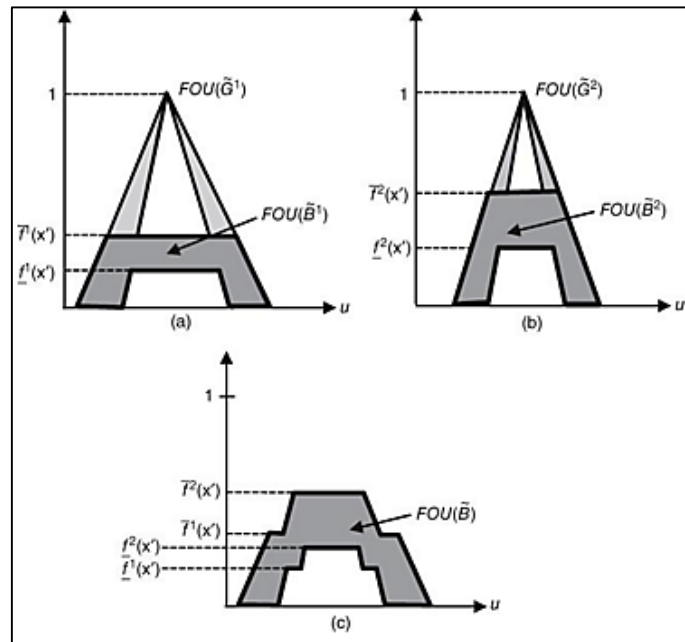
$$R^x \rightarrow [f^x, \bar{f}^x] = [\text{prod}(\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1, u), \underline{\mu}_{\tilde{B}}(x_2, u)), \text{prod}(\bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1, u), \bar{\mu}_{\tilde{B}}(x_2, u))] \quad (2.11)$$



Şekil 2.10. Minimum yöntemi doğrultusunda elde edilen çıkış üyelik fonksiyonu örneği

Her giriş üyelik fonksiyonu için seçilen noktada alt ve üst sınırı ifade eden iki üyelik derecesi olduğu için tip-1 çıkarım yönteminden farklı olarak iki üyelik dereceleri içinde gerekli işlemler ayrı ayrı yapılmaktadır. Şekil 2.10'da [25] minimum yöntemine göre 'If x is \tilde{F}_1 and y is \tilde{F}_2 then z is \tilde{G} ' kuralına bağlı olarak yapılan çıkarım işlemi örnek olarak gösterilmiştir. Şekil 2.10'da gösterilen çıkarım sadece bir kural için yapılmış işlemdir. Sistemde tanımlanmış kural sayısı kadar bu işlem tekrarlanmaktadır. Bu adımdan sonra ise her kurala ait elde edilen çıkış üyelik fonksiyonlarının birleşim işlemi gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.11'de [25] iki kuralla ifade edilmiş bir sistemin minimum yöntemine göre bulunmuş çıkış üyelik fonksiyonlarının Denklem (2.12) eşitliği kullanılarak elde edilmiş birleşim örneği gösterilmiştir.

$$\tilde{B} = \bigcup_{s=1}^2 \tilde{B}^s = [\max(\underline{\mu}_{\tilde{B}^1}(u), \underline{\mu}_{\tilde{B}^2}(u)), \max(\overline{\mu}_{\tilde{B}^1}(u), \overline{\mu}_{\tilde{B}^2}(u))] \quad (2.12)$$



Şekil 2.11. (a), (b) iki kurala göre elde edilmiş çıkış üyelik fonksiyonları ve (c) bunların birleşimi

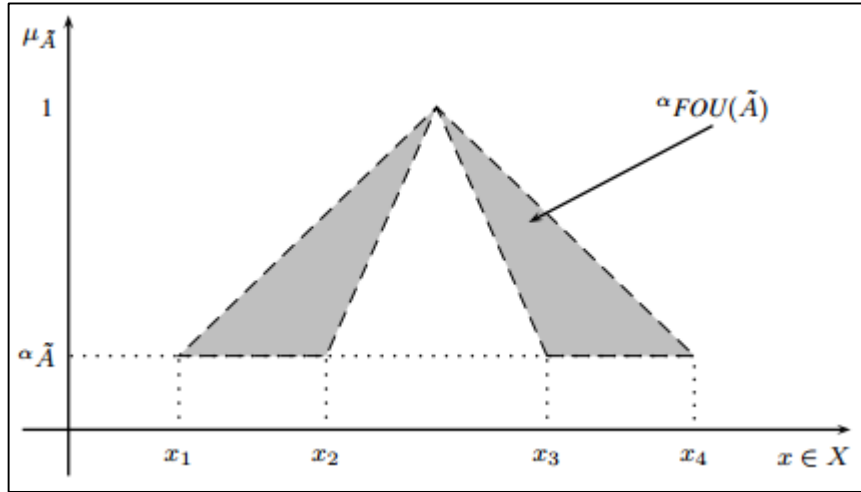
2.2.3. Çıkış işlemleri

Tip-1 bulanık mantık denetim sistemlerinde kural tabanı ve çıkarım işlemlerinden sonra durulaştırma işlemi yapılmaktadır. Tip-2 bulanık mantık denetim sistemlerinde

ise tip-2 üyelik fonksiyonlarının aralıklı değer olmasından dolayı durulaştırma işleminden önce tip-2 / tip-1 indirgemesi işlemine ihtiyaç duyulmaktadır.

2.2.3.1. Tip-2/Tip-1 indirgemesi

Bu tez çalışmasında tip-2/tip-1 indirgemesi, kontrol edilecek sistem için oluşturulan çıkış üyelik fonksiyonlarının ağırlık merkezlerinin bulunması işlemi olarak da ifade edilebilir. Bir AT2ÜF çok sayıda gömülü T1ÜF'ye sahiptir. Bu kapsamda her bir T1ÜF'nin tek tek ağırlık merkezini hesaplanıp sonrasında AT2ÜF 'nin genel ağırlık merkezini bulunması çok fazla hesaplama yükü getirir. Bu nedenle ağırlık merkezini bulunması işlemi sırasında bazı genellemeler yapılmaktadır. Literatürde farklı şekillerde indirgeme algoritmaları yer almaktadır. Miguel Melgarejo [29] 'Mapping of Y' isimli çalışması doğrultusunda \tilde{Y} 'nin alt ve üst üyelik fonksiyonlarının sınırlarını kullanarak ağırlık merkezini yaklaşık olarak bulmuştur. Mendel ve Liu [30] ' α cut' isminde FOU içerisindeki tüm gömülü tip-1 üyelik fonksiyonlarının Şekil 2.12'de [27] olduğu gibi belirtilen α eşik değerine göre elde edilen yeni sınırları kullanarak indirgeme işlemi yapmışlardır.



Şekil 2.12. Bir AT2ÜF için α kesimi

Yapılan tez çalışması içerisinde tasarımı gerçekleştirilen tip-2 bulanık mantık editöründe tip-2/tip-1 indirgeme işlemi Karnik–Mendel [31] tarafından geliştirilen iteratif bir yöntem olan KM algoritması kullanılmıştır. Bir FOU'nun ağırlık merkezi Denklem(2.13)'de gösterildiği gibi tüm gömülü üyelik fonksiyonlarının ayrı ayrı

ağırlık merkezlerinin bulunmasıyla hesaplanmaktadır. Burada $c_1(\tilde{A})$ ve $c_r(\tilde{A})$ Denklem (2.14) ve (2.15)'te belirtilen şekilde ifade edilmektedir.

$$C_{\tilde{A}}(x) = 1 / \bigcup_{\forall A_e} C_{\tilde{A}}(A_e) = 1 / \bigcup_{\forall \tilde{A}_e} \frac{\sum_{i=1}^N x_i u_{A_e}(x_i)}{\sum_{i=1}^N u_{A_e}(x_i)} \quad (2.13)$$

$$= 1 / \{c_1(\tilde{A}), \dots, c_r(\tilde{A})\} \equiv 1 / [c_1(\tilde{A}), c_r(\tilde{A})]$$

$$c_1(\tilde{A}) = \min_{\forall A_e} c_{\tilde{A}}(A_e) = \min_{\forall \theta_i \in [\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i), \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)]} \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i} \quad (2.14)$$

$$c_r(\tilde{A}) = \max_{\forall A_e} c_{\tilde{A}}(A_e) = \max_{\forall \theta_i \in [\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i), \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)]} \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i} \quad (2.15)$$

KM algoritması, iterasyon yöntemi ile tüm gömülü tip-1 üyelik fonksiyonları arasından en küçük ($c_1(\tilde{A})$) ve en büyük ($c_r(\tilde{A})$) ağırlık merkezlerini yaklaşık olarak bulma işlemini gerçekleştirmektedir. Bu işlemi iki ayrı iterasyon içerisinde aşağıda gösterildiği gibi dörder adımda yapmaktadır. İki iterasyon içinde gerekli θ değerleri Denklem (2.16) eşitliğinden sağlanmaktadır. Denklemde belirtilen 'i' değeri X eksenini üzerinde (bir kümeye ait değişkenin sınırları arasında) yapılan ayrıklaştırma sayısını ifade etmektedir. Burada yapılan ayrıklaştırma sayısının (i) fazla olması doğruluk oranını arttırmasının yanında işlem yükünü de arttırdığı için kontrol edilecek sistemin durumuna göre i'nin optimum şekilde belirlenmesi gerekir.

$$\theta_i = [\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)] / 2 \quad (2.16)$$

İterasyon:1 (cl(L) için)

$$1. \text{Adım} : c' = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i} \quad (2.17)$$

2. Adım : $x_k \leq c' \leq x_{k+1}$ eşitliğine göre k bulunur.

$$3.\text{Adım : } c_1(k) = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \underline{\mu}_A^{\sim}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N x_i \underline{\mu}_A^{\sim}(x_i)}{\sum_{i=1}^k \underline{\mu}_A^{\sim}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N \underline{\mu}_A^{\sim}(x_i)} \quad (2.18)$$

4.Adım: Eğer $c_1(k) = c'$ ise iterasyon sonlanır ve $c_1(L) = c_1(k)$ olarak eşitlenir ve L değeri alınır ve iterasyon sonlanır. Eğer eşit değilse $c' = c_1(k)$ olarak eşitlenir ve 2. adıma tekrar dönlür.

İterasyon:2 (cr(R) için)

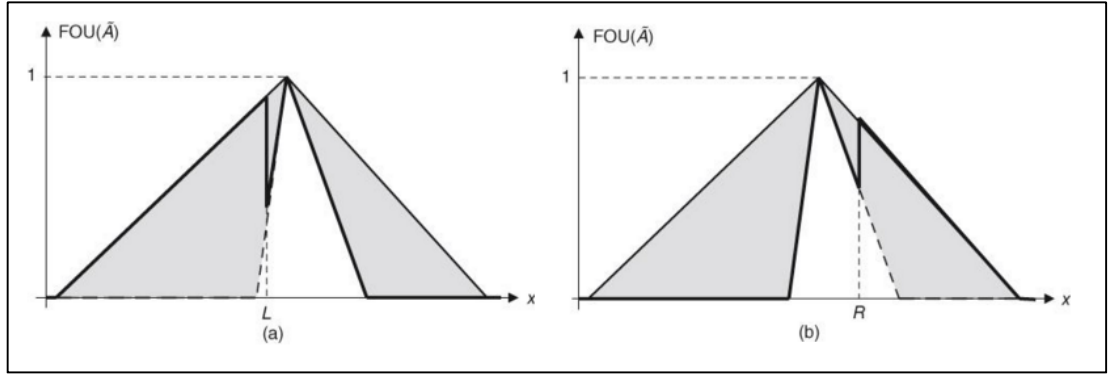
$$1.\text{Adım : } c' = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i} \quad (2.19)$$

2.Adım : $x_k \leq c' \leq x_{k+1}$ eşitliğine göre k bulunur.

$$3.\text{Adım : } c_r(k) = \frac{\sum_{i=1}^k x_i \underline{\mu}_A^{\sim}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N x_i \underline{\mu}_A^{\sim}(x_i)}{\sum_{i=1}^k \underline{\mu}_A^{\sim}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N \underline{\mu}_A^{\sim}(x_i)} \quad (2.20)$$

4.Adım: Eğer $c_r(k) = c'$ ise iterasyon sonlanır ve $c_r(R) = c_r(k)$ olarak eşitlenir ve R değeri alınır ve iterasyon sonlanır. Eğer eşit değilse $c' = c_r(k)$ olarak eşitlenir ve 2. adıma tekrar dönlür.

İki iterasyonun da sonlanması ile birlikte Şekil 2.13 (a) ve (b)'de gösterilen L ve R anahtar noktalar (kesim noktaları) elde edilmektedir. KM algoritması ile elde edilen bu noktalar, Denklem (2.21) ve (2.22) eşitliklerinde kullanılarak bir FOU'ya ait en küçük ve en büyük ağırlık merkezleri yaklaşık olarak bulunması işleminde kullanılmaktadır.



Şekil 2.13. KM algoritması ile bulunan L (sol) ve R (sağ) kesim noktaları

$$c_l(L) \frac{\sum_{n=1}^L x_i \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{n=L+1}^N x_i \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)}{\sum_{n=1}^L \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{n=L+1}^N \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)} \approx cl \quad (2.21)$$

$$c_r(R) \frac{\sum_{n=1}^R x_i \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{n=R+1}^N x_i \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)}{\sum_{n=1}^R \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{n=R+1}^N \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)} \approx cr \quad (2.22)$$

Ağırlık merkezlerinin elde edilmesinden sonraki adım ise KM algoritması ile elde edilen sol ve sağ kesim noktaları kullanılarak u_l ve u_r kontrol sinyallerinin belirlenmesi işlemidir. Tip-2 / tip-1 indirgemesi işlemi kapsamında kontrol sinyalinin belirlenmesine kadar yapılan işlemler sadece çıkış üyelik fonksiyonlarına ilişkindir. Kontrol sinyalinin belirlenmesi ise giriş üyelik fonksiyonlarını, bunlara bağlı yazılan kuralları ve çıkarım yöntemini de kapsamaktadır.

$$u_l = \min_{k \in [1, N-1]} \frac{\sum_{n=1}^k \bar{f}^n a^n \sum_{n=k+1}^N \underline{f}_n a^n}{\sum_{n=1}^k \bar{f}^n + \sum_{n=k+1}^N \underline{f}_n} \equiv \frac{\sum_{n=1}^L \bar{f}^n a^n + \sum_{n=L+1}^N \underline{f}_n a^n}{\sum_{n=1}^L \bar{f}^n + \sum_{n=L+1}^N \underline{f}_n} \quad (2.23)$$

$$u_r = \max_{k \in [1, N-1]} \frac{\sum_{n=1}^k \underline{f}_n b^n \sum_{n=k+1}^N \bar{f}^n b^n}{\sum_{n=1}^k \underline{f}_n + \sum_{n=k+1}^N \bar{f}^n} \equiv \frac{\sum_{n=1}^R \underline{f}_n b^n + \sum_{n=R+1}^N \bar{f}^n b^n}{\sum_{n=1}^R \underline{f}_n + \sum_{n=R+1}^N \bar{f}^n} \quad (2.24)$$

Denklemlerde yer alan a^n ve b^n ifadeleri her çıkış üyelik fonksiyonu için bulunan cl ve cr değerleridir. \underline{f}_n ve \bar{f}^n değerleri ise yazılan her kural için minimum ya da çarpım çıkarım yöntemi sonucu Denklem (2.10) veya (2.11)'da belirtilen alt ve üst üyelik derecesi değerleridir. Denklem (2.23) ve (2.24) eşitliklerinde önemli olan

kısım ‘L’ ve ‘R’ değerlerinin belirlenmesi işlemidir. Bunun için ise tekrardan KM algoritması kullanılmaktadır.

$$f^n = [f_n + \bar{f}^n]/2 \quad (2.25)$$

İterasyon:1 (u_l için)

$$1. \text{Adım : } u' = \frac{\sum_{i=1}^N f^n a^n}{\sum_{i=1}^N f^n} \quad (2.26)$$

2. Adım : $x_k \leq u' \leq x_{k+1}$ eşitliğine göre k bulunur.

$$3. \text{Adım : } u_l(k) = \frac{\sum_{i=1}^k a^n \bar{f}^n + \sum_{i=k+1}^N a^n f_n}{\sum_{i=1}^k \bar{f}^n + \sum_{i=k+1}^N f_n} \quad (2.27)$$

4. Adım: Eğer $u_l(k) = u'$ ise iterasyon sonlanır ve $u_l(L) = u_l(k)$ olarak eşitlenir ve L değeri alınır ve iterasyon sonlanır. Eğer eşit değilse $u' = u_l(k)$ olarak eşitlenir ve 2. adıma tekrar dönlür.

İterasyon:2 (u_r için)

$$1. \text{Adım : } u' = \frac{\sum_{i=1}^N f^n b^n}{\sum_{i=1}^N f^n} \quad (2.28)$$

2. Adım : $x_k \leq u' \leq x_{k+1}$ eşitliğine göre k bulunur.

$$3. \text{Adım : } u_r(k) = \frac{\sum_{i=1}^k b^n f_n + \sum_{i=k+1}^N b^n \bar{f}^n}{\sum_{i=1}^k f_n + \sum_{i=k+1}^N \bar{f}^n} \quad (2.29)$$

4.Adım: Eğer $u_r(k) = u'$ ise iterasyon sonlanır ve $u_r(R) = u_r(k)$ olarak eşitlenir ve R değeri alınır ve iterasyon sonlanır. Eğer eşit değilse $u' = u_r(k)$ olarak eşitlenir ve 2. adıma tekrar dönlür.

u_l ve u_r kontrol sinyallerinin bulunması için kullanılan KM algoritmasında iterasyon içerisinde bulunan 'N' değeri kural sayısını belirtmektedir.

2.2.3.2. Durulaştırma

Tip-2/tip-1 indirgemesi işlemi sonrasında sol ve sağ kesim noktalarına bağlı olarak tasarımı yapılan tip-2 denetim sistemindeki tanımlanan tüm bilgilerin kullanılmasıyla $u(l)$ ve $u(r)$ olmak üzere iki kontrol sinyali elde edilmektedir. Fakat sistemi kontrol etmek için tek bir sinyale ihtiyaç duyulmaktadır. Durulaştırma işlemiyle birlikte elde edilen $u(l)$ ve $u(r)$ değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak sisteme giriş olarak verilecek kontrol sinyali (u) elde edilmektedir.

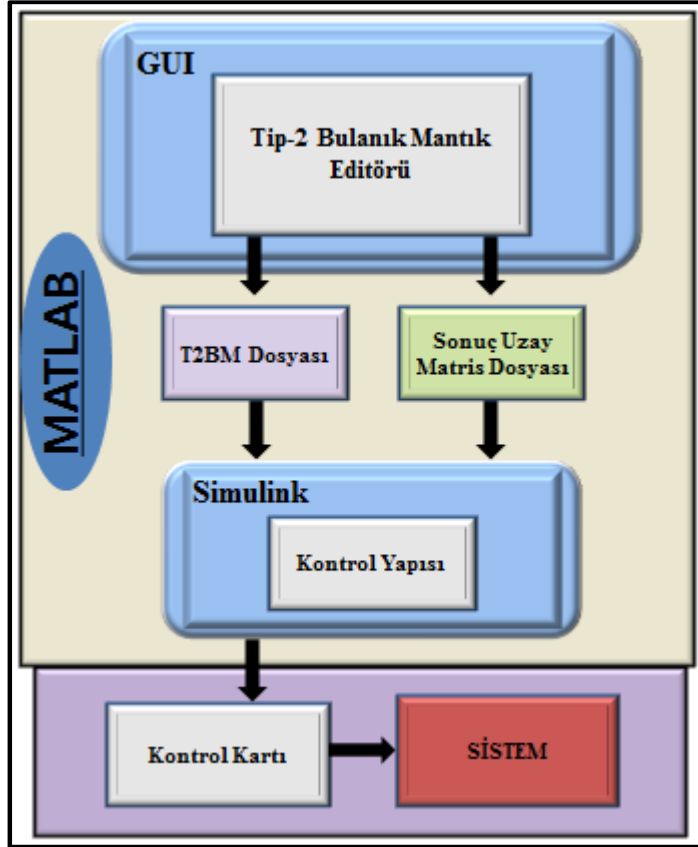
$$u = \frac{u_l + u_r}{2} \quad (2.30)$$

3. TİP-2 BULANIK MANTIK EDİTÖR TASARIMI

Bulanık mantık denetim sistemi matematiksel modele ihtiyaç duymadığı için hedeflenen kontrolün gerçekleşmesi üyelik fonksiyonlarına, yazılan kurallara ve bunlara bağlı yapılan çıkarım işlemlerine bağlıdır. Ancak üyelik fonksiyonlarının şekli ve sayısı, yazılan kurallar sistemden sisteme farklılık göstermektedir. Bununla birlikte bir sisteme ait üyelik fonksiyonları kesin değerlere sahip değildir. Bu nedenle bulanık mantık denetim sistemini oluşturacak uzman kişi, deneyimleri ve sistemden aldığı bilgiler doğrultusunda çeşitli denemeler sonrasında kontrol hedefine ulaşabilmektedir. Tip-1 bulanık mantık üyelik fonksiyonlarının kestirimi ve kurallar çeşitli denemeler sonrasında gerçekleştirilirken, parametre sayısının fazla olmasından dolayı bu işlemlerin tip-2 bulanık mantık denetim sistemi içinde daha da güç olması kaçınılmaz olmaktadır [32].

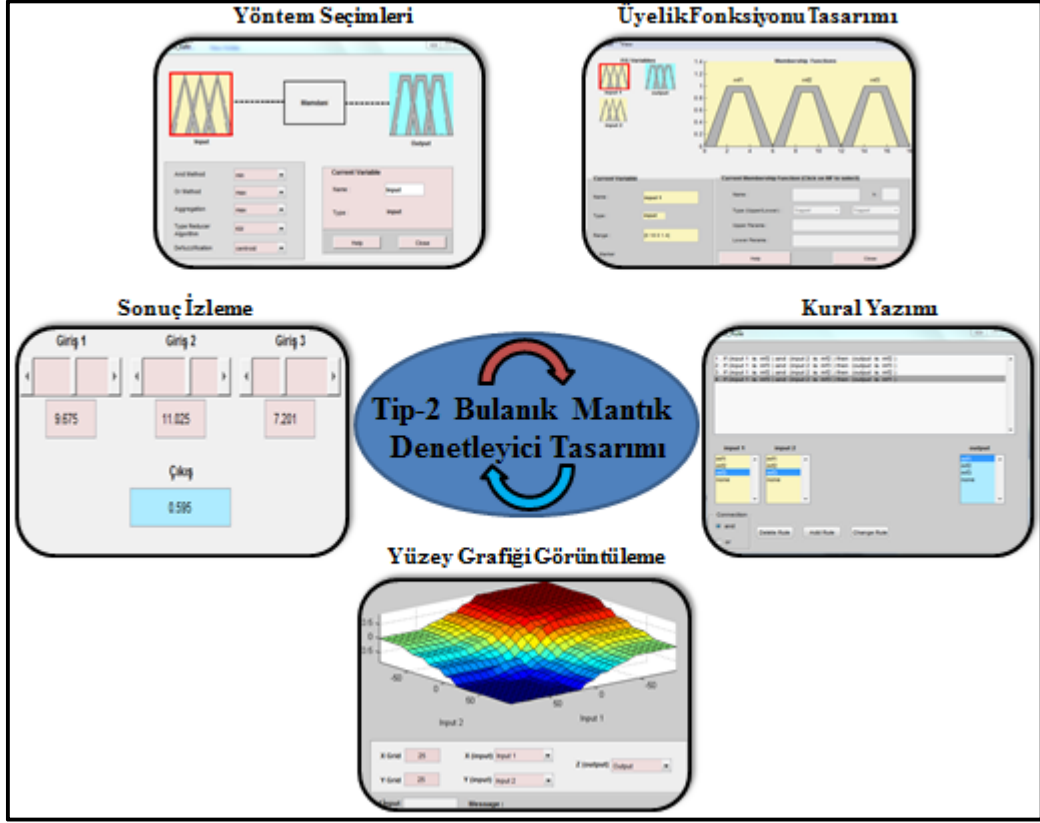
Yapılan tez çalışmasında, bu zorluklar göz önünde bulundurularak sistem için en ideal üyelik fonksiyonlarının elde edilmesini kolaylaştırılarak, hızlı ve iyi bir denetleyici tasarımı yapılması amaçlanmıştır. Editör tasarımı, Matlab programı içerisinde bulanık mantık denetleyici tasarımı için sıklıkla kullanılan tip-1 bulanık mantık editörünün (FIS) genel yapısı, kullanımının anlaşılır ve kolay olması sebebiyle temel alınarak yapılmıştır. Editör tasarımı, Matlab GUI (Grafiksel Kullanıcı Arayüzü) programı kullanılarak yapılmıştır. Editörde oluşturulan tip-2 denetleyicisinin Matlab/Simulink ortamında koşturulması için iki farklı veri dosyası alınmaktadır. Bu veri dosyalarından birincisi oluşturulan üyelik fonksiyonlarına, kurallara ve seçilen yöntemlere ait bilgileri diğeri ise istenilen boyutta çözüm kümesi matrisini içermektedir. Tip-2 bulanık mantıkta (T2BM) işlem yükünün fazla olması, çok sayıda kural ve üyelik fonksiyonu içeren sistemlerin gerçek zamanlı kontrolünde gecikmelere sebep olabileceği için, bu durumlarda belirtilen sayıda örnek alınarak oluşturulan çözüm kümesinin kullanılması daha iyi bir kontrole olanak sağlayabilecektir. Editörden alınan iki dosyada Simulink ortamında fonksiyon blokları içerisinde kullanılmaktadır. Simulink ortamında tip-2 denetleyici ile oluşturulan kontrol yapısı, benzetim uygulamalarında doğrudan kullanılırken, gerçek

zamanlı uygulamalarda bir kontrol kartı üzerinden sisteme aktarılarak kontrol işlemi gerçekleştirilmektedir. Yapılan çalışmada, tip-2 bulanık mantık denetleyici tasarımından, sistemin kontrolünü gerçekleştirilene kadar olan işlemler Şekil 3.1’de gösterilmiştir.



Şekil 3.1. T2BM kontrol akış şeması

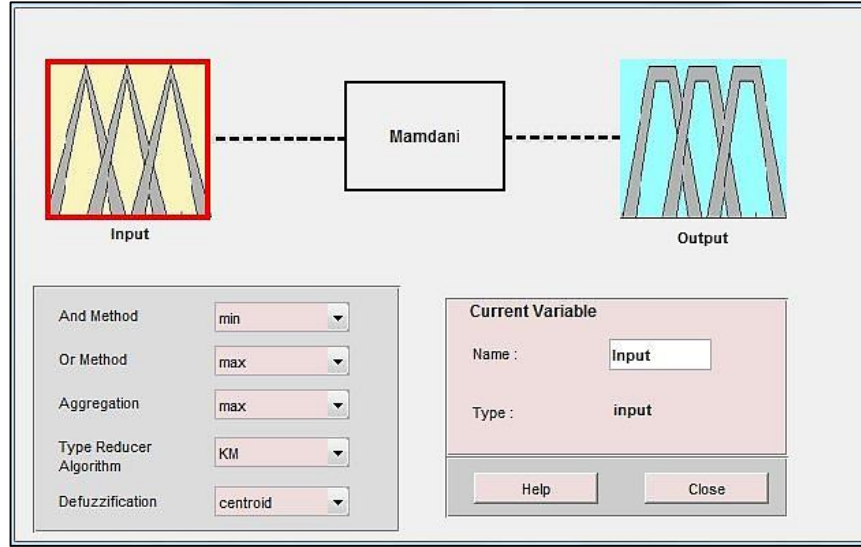
Tip-2 bulanık mantık editörü, tip-2 bulanık denetleyici ile kontrol edilmek istenilen sistemler için hedeflenen kontrole ulaşım gerçekleşene kadar olan süreçte hızlı ve kolay bir çözüm sunmaktadır. Tip-1 ve Tip-2 bulanık mantık çalışmaları birbirlerine yakın tarihte ortaya çıkmasına rağmen akademik çalışmalarda ve endüstriyel uygulamalarda, tip-1 bulanık mantık daha çok tercih edilmiştir. Bunun önemli sebeplerinden birisi tip-2 bulanık mantık denetim sisteminin biraz daha karmaşık ve işlem yükünün fazla olması olurken, diğer önemli sebebi Matlab, LabView gibi yazılım programlarının tip-1 bulanık mantık için geliştirdikleri editörlerin sağladığı kolaylık gösterilebilir. Bu kapsamda yapılan çalışma ile birlikte tip-2 bulanık mantık denetim sistemlerinin kullanımının daha fazla yaygınlaşması amaçlanmıştır. T2BM editöründe yapılan işlemler Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2. T2BM editörü ile denetleyici tasarım sürecinde yapılan işlemler

3.1. Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici Yöntem Seçimleri

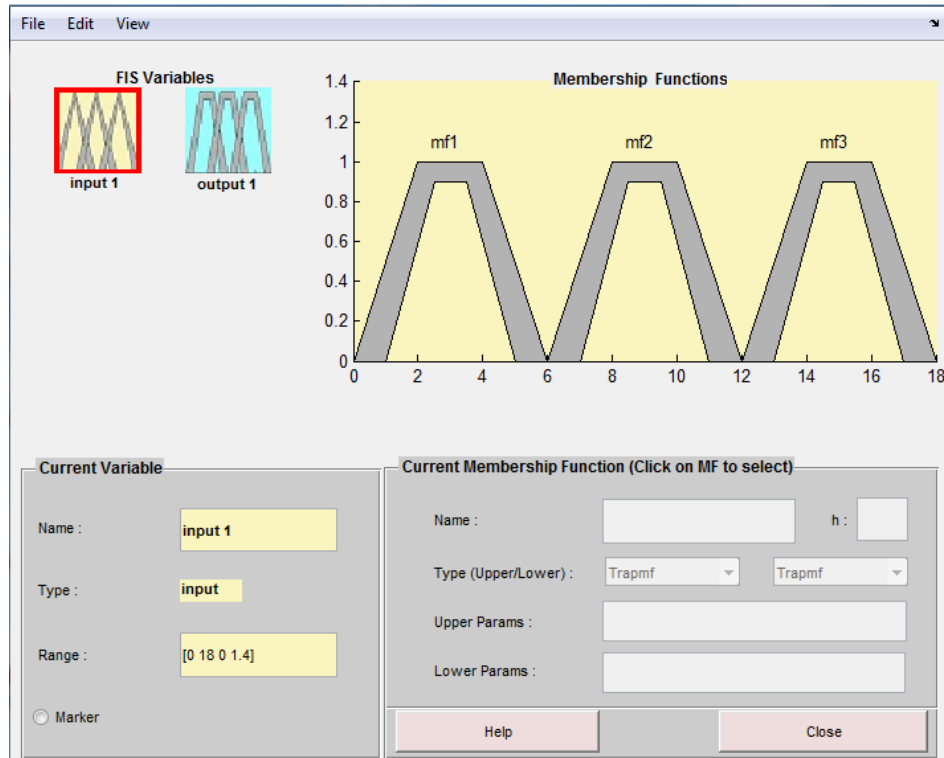
Tip-2 bulanık mantık sistemlerinde kural yazımı, çıkarım yöntemi, küme işlemleri ve tip-2/tip-1 indirgeme algoritmaları her sistemin durumuna göre farklılık gösterebildiği için bu ayarlamaların kullanıcı tarafından belirlenmesi gerekmektedir. Şekil 3.3'te kullanıcı tarafından tip-2 bulanık mantık denetleyicisi için gerekli ayarlamaların yapıldığı ara yüz yer almaktadır. Bu ara yüzde kural yazımında kullanılacak ve-veya bağlaçlarının hangi prensibe (minimum, çarpım, vs.) göre işlem yapacağı, tüm çıkış üyelik fonksiyonlarının toplanmasının hangi yönteme göre olacağı ve tip-2/tip-1 indirgemesi için hangi algoritmanın hangi durulaştırma yöntemine göre yapılacağı seçilmektedir. Seçim işlemleri yapıldıktan sonra sistemin giriş ve çıkış üyelik fonksiyonlarını temsil eden giriş veya çıkış çerçevelerinden birine çift tıklatılmasıyla üyelik fonksiyonlarının oluşturulacağı ikinci bir ara yüz gelmektedir.



Şekil 3.3. T2BM Denetleyici ayarlama arayüzü

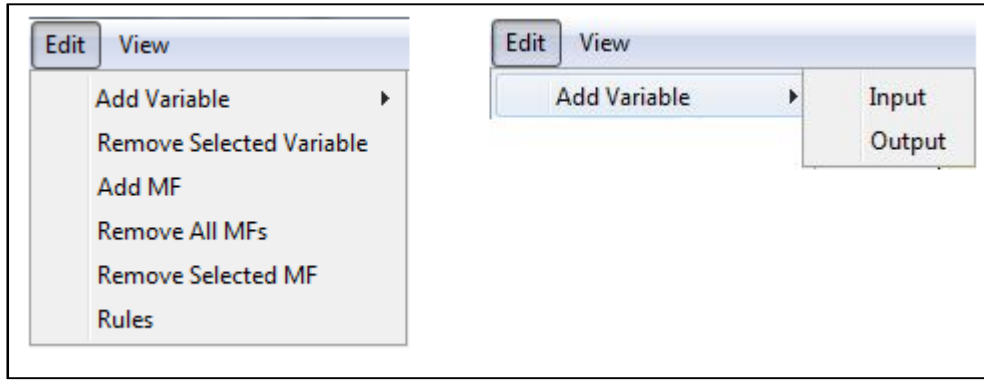
3.2. Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımı

Bulanık mantık denetim sistemlerinde bir kontrolün kalitesini belirleyen en önemli faktörlerden birisi üyelik fonksiyonlarının doğru bir şekilde belirlenmesi işlemidir. Bu nedenle editör üzerinde bu işlemin esnek ve kolay bir şekilde yapılmasına özen gösterilmiştir. Bu tasarımın yapılacağı arayüz Şekil 3.4'te görüldüğü gibidir.



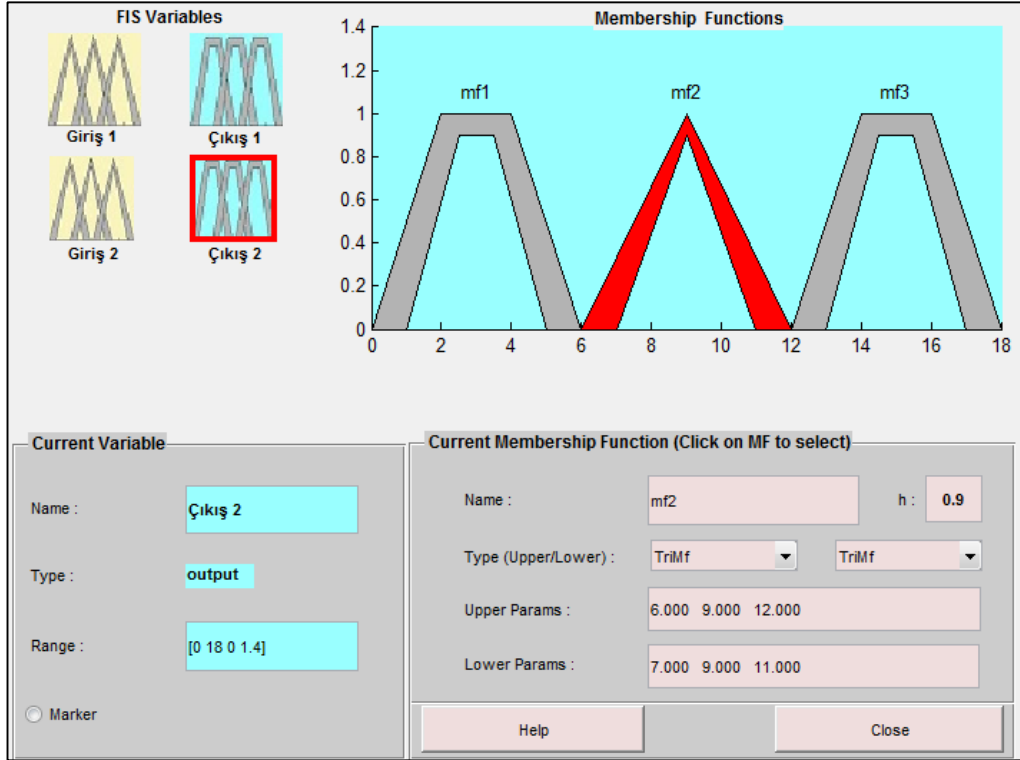
Şekil 3.4. Tasarım arayüzü

Başlangıç olarak tek giriş – tek çıkışlı bir sistem ve bununla beraber giriş ve çıkışa ait alt ve üst üyelik fonksiyonu yamuk olan 3'er FOU doğrudan oluşturulmaktadır. Kontrol edilecek sistemlerin giriş-çıkış ve bunlara ait üyelik fonksiyonu sayıları değişkenlik gösterdiği için başlangıç olarak belirtilen değerlere ekleme ve çıkarma yapmak kullanıcı tarafından yapılmaktadır. Belirtilen bu değişiklikler Şekil 3.2'de gösterilmiş olan arayüzün üst kısmında Şekil 3.5'te görülen 'Edit' menüsü içerisinde yapılmaktadır.



Şekil 3.5. Edit menüsü işlem seçenekleri

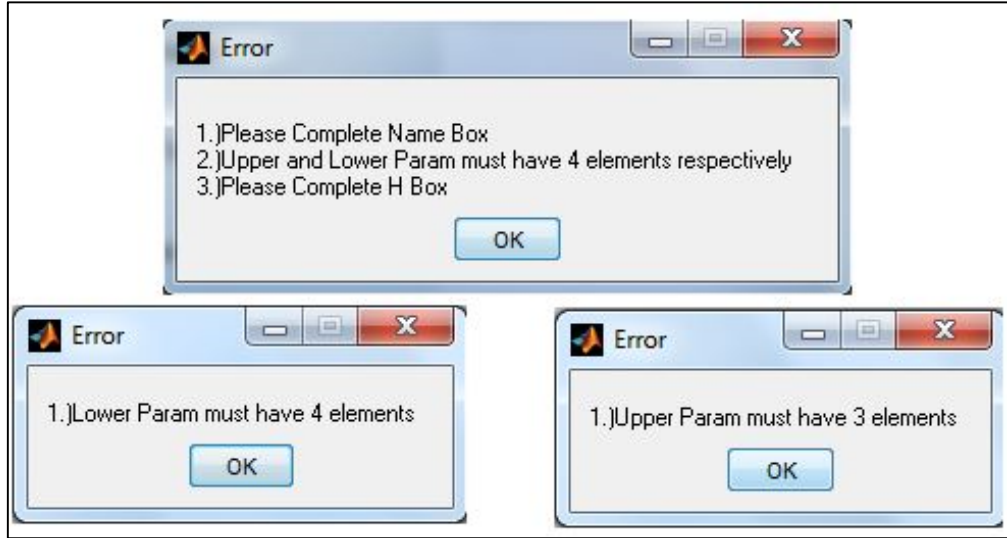
Başlangıç olarak tek giriş – tek çıkışa sahip bir sisteme giriş ve çıkış ekleme işlemi 'Add Variable' içerisinde yapılmaktadır. Bir giriş ve bir çıkış eklenmesi yapılmış yeni bir sistem Şekil 3.6'da örnek olarak gösterilmiştir. Burada yeni eklenen giriş ve çıkışların dilsel etiketleri istenilen şekilde değiştirilebilmektedir. Menü içerisinde giriş ekleme ve çıkartma gibi işlemler doğrudan yapılırken üyelik fonksiyonu ekleme işlemi için kullanıcı tarafından doldurulması gereken yeni bir sayfa açılmaktadır.



Şekil 3.6. İki giriş-iki çıkışa sahip bir sistem için T2BMD tasarımı

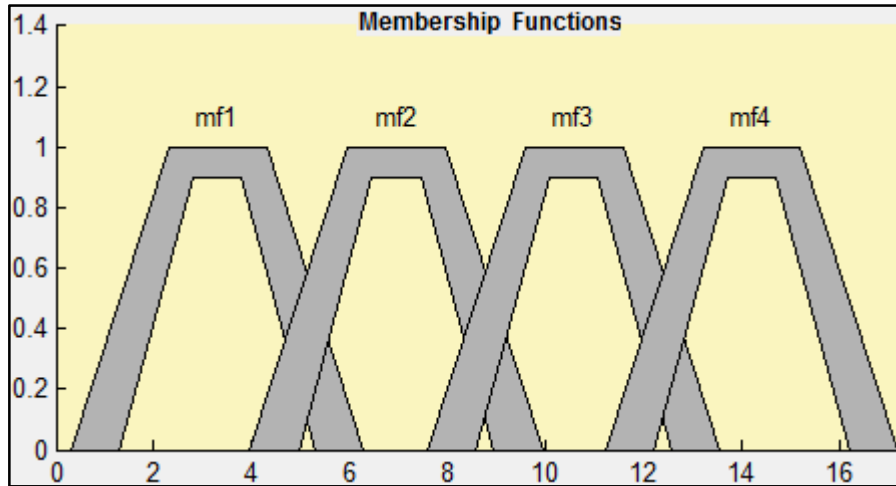
Şekil 3.7'deki pencerede eklenecek üyelik fonksiyonuna ait doğru bir şekilde doldurulmuş bilgiler yer almaktadır. Editör üzerinde yamuk ve üçgensel üyelik fonksiyonları seçilebildiği için bunlara bağlı parametre sayıları doğru yazılmalıdır.

Şekil 3.7. Yeni üyelik fonksiyonu ekleme penceresi



Şekil 3.8. Hata mesajı örnekleri

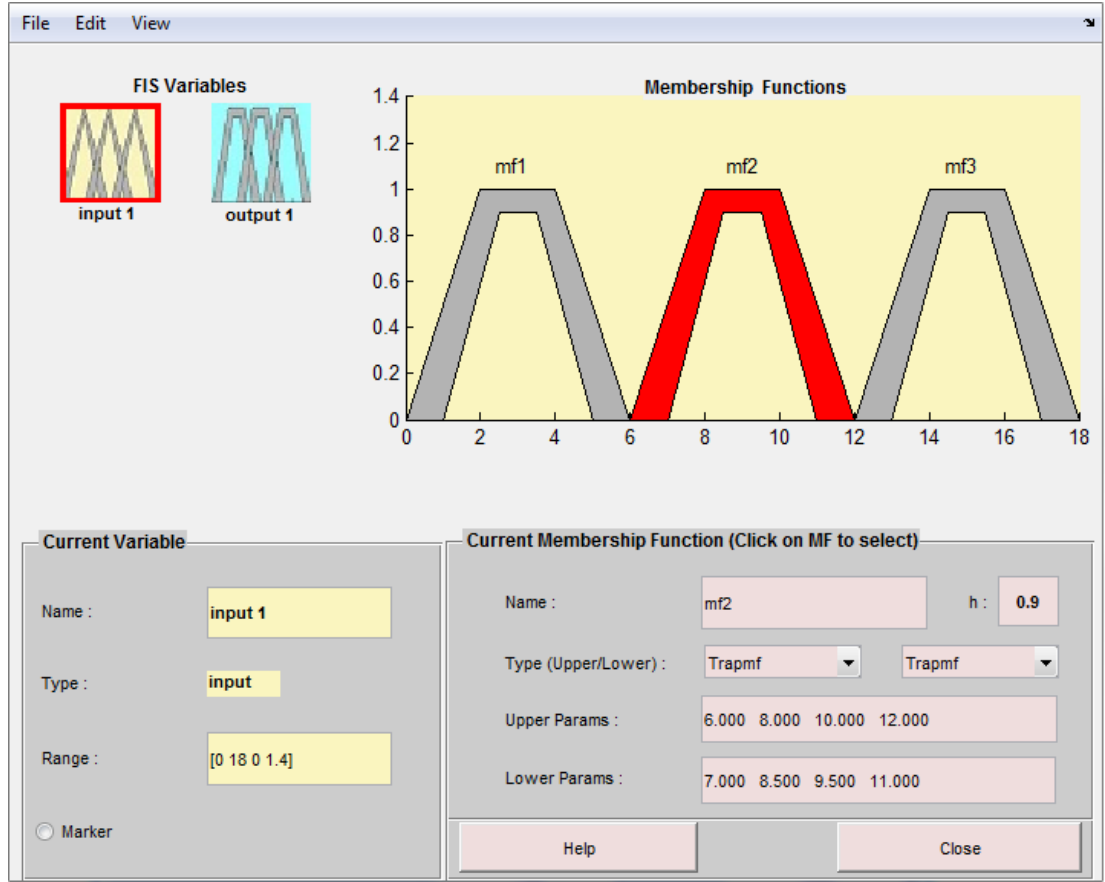
Üyelik fonksiyonu için gerekli bilgiler kullanıcı tarafından her zaman doğru girilemeyebilir. Bu yüzden yapılabilecek hatalar önceden analiz edilmiş ve bunlara karşı uyarı mesajları tanımlanmıştır. Tüm kısımların boş olduğu, yamuk üyelik fonksiyonunun seçilip parametre sayının 4 olmadığı ve üçgen üyelik fonksiyonunun seçilip parametre sayının 3 olmadığı hatalar sırasıyla örnek olarak Şekil 3.8’de gösterilmiştir. Başlangıç olarak 3 üyelik fonksiyonu tanımlandığı için bir üyelik fonksiyonunun eklenmesi sonucu oluşan son durum Şekil 3.9’da yer almaktadır.



Şekil 3.9. Eklenmiş yeni üyelik fonksiyonunun gösterimi

Tip-1 bulanık mantıkta üyelik fonksiyonlarının şekillerinin ve yerlerinin kestirimi kolay olmamaktadır. Aralıklı üyelik fonksiyonlarının bulunduğu tip-2 bulanık

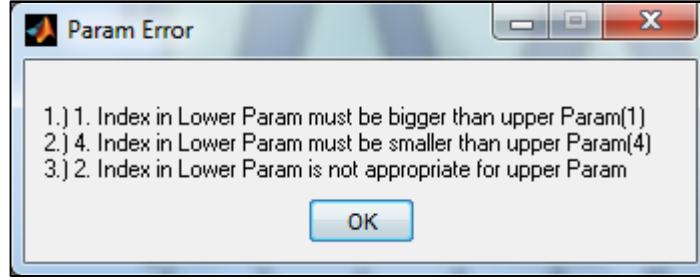
mantıkta ise bu daha zor olmaktadır. Bu nedenle yapılan arayüzün kullanıcıya esnek bir kullanım sunması sağlanarak hızlı ve kolay bir tasarım yapılması amaçlanmıştır.



Şekil 3.10. Üyelik fonksiyonlarına ait parametrelerin ayarlanması

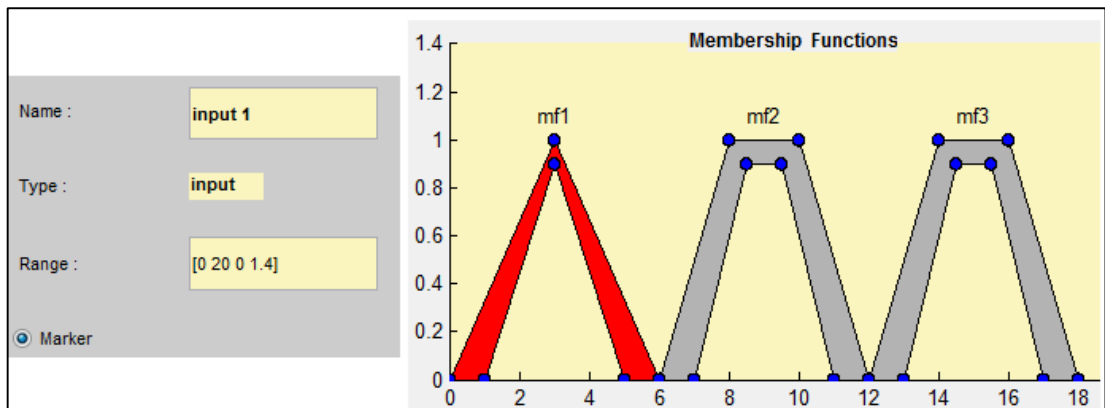
Herhangi bir üyelik fonksiyonu üzerine tıklandığı zaman Şekil 3.10'da görüldüğü gibi alt ve üst üyelik fonksiyonuna arasında kalan alan seçilmiş olduğunu gösteren kırmızı renge dönüşmektedir. Arayüzün alt kısmında seçili üyelik fonksiyonuna ait bilgiler görülmektedir. Bu kısımda üyelik fonksiyonunun dilsel etiketi, alt üyelik fonksiyonunun yüksekliği (h), alt ve üst üyelik fonksiyonlarına ait ayrı ayrı şekil seçimi ve bunlara ilişkin parametre ayarları yapılabilmektedir. Üyelik fonksiyonlarının yerlerini gösteren bu parametreler sayısal olarak değiştirilmesinin yanında, fare yardımıyla sürükleme işlemi yapılarak da kolay bir şekilde değiştirilebilmektedir. Bu sürükleme işlemi sırasında alt kısımdaki parametreler eş zamanlı olarak da değişmektedir. Üyelik fonksiyonlarının şekillerinin değiştirilmesi ise alt ve üst üyelik fonksiyonları birbirinden bağımsız olarak açılır menüler yardımıyla yapılabilmektedir. FOU'lar alt ve üst üyelik fonksiyonları arasında kalan bölgelerden oluştuğu için bu üyelik fonksiyonlarına ait parametrelerin birbirlerine

uygun olması gerekmektedir. Bu nedenle bu parametreler tanımlanırken uyulması gereken bazı kurallar olduğu belirtilmiş ve uyulmadığı takdirde karşılaşılan bazı uyarı mesajları Şekil 3.8’de gösterilmişti. Fakat bunlara ek olarak FOU’lara ilişkin alt ve üst üyelik fonksiyonlarının parametreleri arasında dikkat edilmesi gereken kurallar da vardır. Şekil 3.11’de hatalı parametre girişleri sonucunda alınan bazı uyarı mesajları örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.11. Alt ve üst üyelik fonksiyonlarına ait parametre hata mesajları

Buraya kadar olan kısımda üyelik fonksiyonlarının parametre değişikliklerinin arayüzün alt kısmında yer alan sayısal bilgilerden ya da seçili üyelik fonksiyonunun fare yardımıyla sürüklenmesi sonucu yapılmaktaydı. Bunlardan farklı olarak sadece bulanıklığa bağlı değişiklikte esnek bir şekilde grafik üzerinde yapılabilmektedir. Arayüzün sol alt kısmında bulunan ‘Marker’ seçildiği zaman üyelik fonksiyonlarının değişim noktalarında Şekil 3.12’de görüldüğü gibi mavi daireler çıkmaktadır. Bu noktalardan fare ile tutulup sürüklendiği zaman bulanıklık kolay bir şekilde değiştirilebilmektedir. Değişim yapıldıktan sonra grafik üzerinde çıkan dairelerin bir karmaşıklık oluşturmaması için ‘Marker’ seçimi kaldırılarak dairelerin gizlenmesi mümkündür.



Şekil 3.12. Bulanıklık değerlerinin fare yardımıyla değiştirilmesi

Kontrol edilecek sistemin giriş-çıkış sayıları tanımlanıp bunlara ait üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasından sonraki adım kuralların yazılması işlemidir. Bu işlem Edit menüsü içerisinde bulunan 'Rules' ile yapılmaktadır. Şekil 3.13'de iki giriş tek çıkıştan oluşan bir sistem için açılan bir kural yazım sayfası örnek olarak gösterilmiştir.

The screenshot shows a rule editor interface. At the top, there is a text area containing three rules:

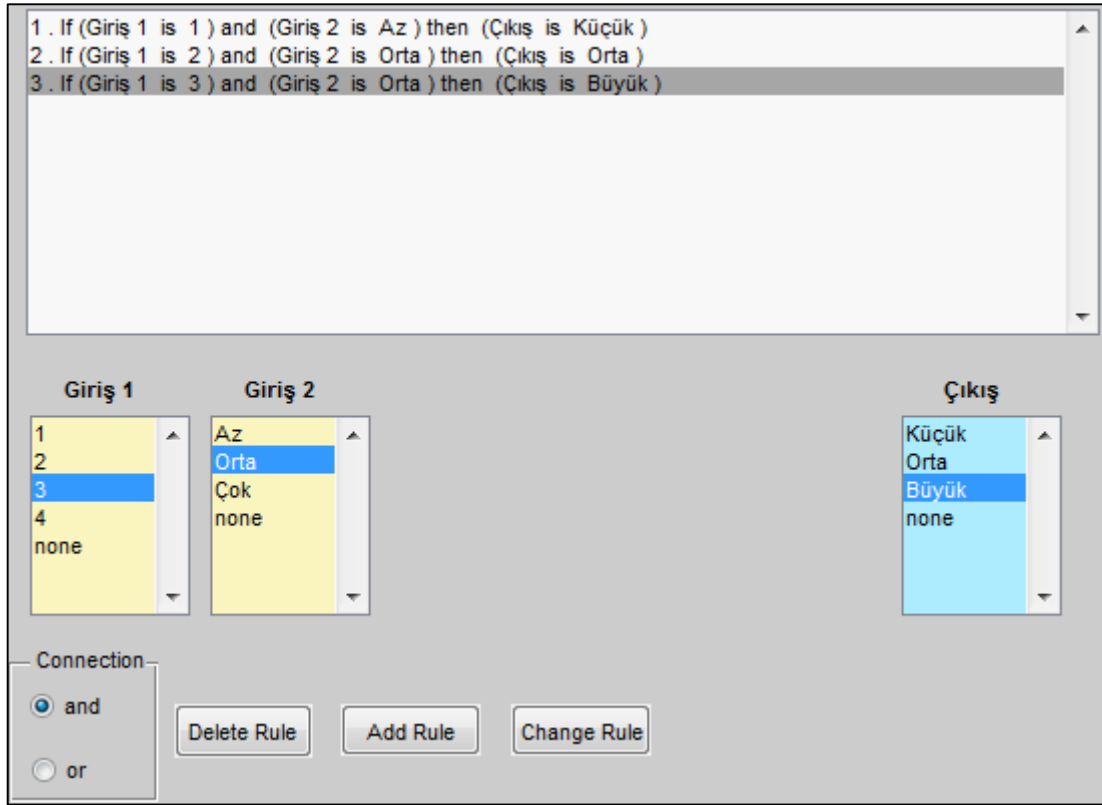
1. If (input 1 is mf1) and (input 2 is mf1) then (output 1 is mf1)
2. If (input 1 is mf2) and (input 2 is mf2) then (output 1 is mf2)
3. If (input 1 is mf3) and (input 2 is mf2) then (output 1 is mf3)

Below the text area, there are three dropdown menus for selecting input and output membership functions (mf1, mf2, mf3, none). The first two are labeled 'input 1' and 'input 2', and the third is labeled 'output 1'. Below these menus, there is a 'Connection' section with two radio buttons: 'and' (selected) and 'or'. At the bottom, there are three buttons: 'Delete Rule', 'Add Rule', and 'Change Rule'.

Şekil 3.13. Kural yazım penceresi

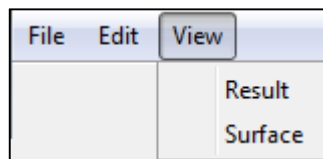
Kullanıcı tarafından oluşturulan kural tablosuna bağlı olarak kurallar bu ara yüzde yazılmaktadır. Kural tablosu herhangi bir yönteme göre değil de tamamen kontrol edilecek sistemin durumuna göre oluşturulduğu için her zaman ilk seferde iyi kontrol imkânı sunmayabilir. Bu nedenle kurallar üzerinde değişiklikler yapmak gerekebilir. Bu değişiklikler 'Delete', 'Add' ve 'Change' butonları sayesinde kullanıcı tarafından gereksinimler doğrultusunda kolay bir şekilde yapılabilmektedir. Kural yazımında EĞER-İSE yapısı arasında 've'-'veya'-'dâhil değil' bağlaçlarından birisi kullanılmaktadır. Bulanık mantık ile yapılan çalışmalarda genel olarak 've' bağlacı tercih edildiğinden dolayı kural ara yüzünde 've' bağlacı varsayılan olarak seçilmiştir. İstenildiği takdirde bağlaç değişimi yapılabilmektedir.

Sistemin giriş – çıkış veya üyelik fonksiyonu sayılarında, bunlara ait dilsel etiketlerde herhangi bir değişiklik yapıldığı zaman kural sayfasında yer alan bilgilerde değişime bağlı olarak güncellenmektedir. Şekil 3.14’te, Şekil 3.13’te gösterilen sistem için yazılmış kurallar sonrası üyelik fonksiyonları üzerinde yapılan değişikliklerin kural sayfasında da güncellendiği görülmektedir.



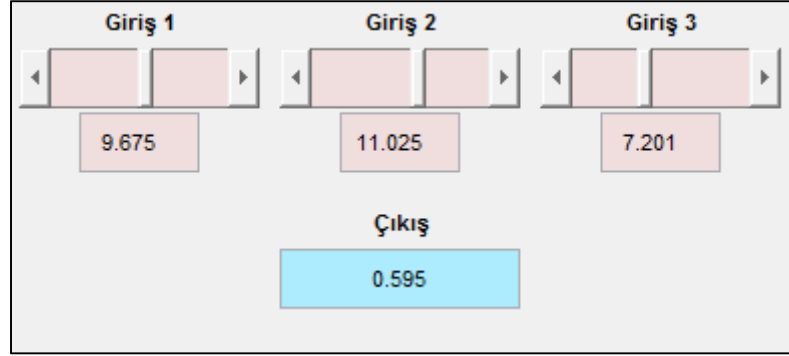
Şekil 3.14. Üyelik fonksiyonlarının ve giriş çıkışların dilsel etiketlerinin değişimi sonrası kuralların güncellenmesi

Tip-2 bulanık mantık denetleyicisinin tasarımı kuralların da yazılmasıyla tamamlanmış olmaktadır. Editör üzerinde tasarımı gerçekleştirilen bu denetleyicinin ürettiği sonuçlar Şekil 3.15’te görüldüğü gibi ‘View’ menüsü içerisinde iki farklı şekilde görülebilmektedir.



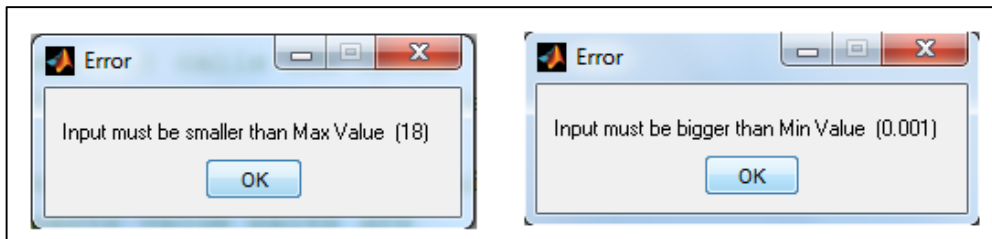
Şekil 3.15. View Menüsü

İlk olarak ‘Result’ içerisinde kullanıcı tarafından istenilen giriş değerlerine karşı elde edilen sonuçlar görülmektedir. Şekil 3.16’da 3 giriş tek çıkışa sahip bir sistemin belirtilen 3 giriş değerine karşın tasarımı yapılan denetleyicinin istenilen kontrolü gerçekleştirebilmesi için sisteme vereceği cevap örnek olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.16. Tasarlanan denetleyicinin belirtilen giriş değerlerine karşı çıkış değerinin alınması

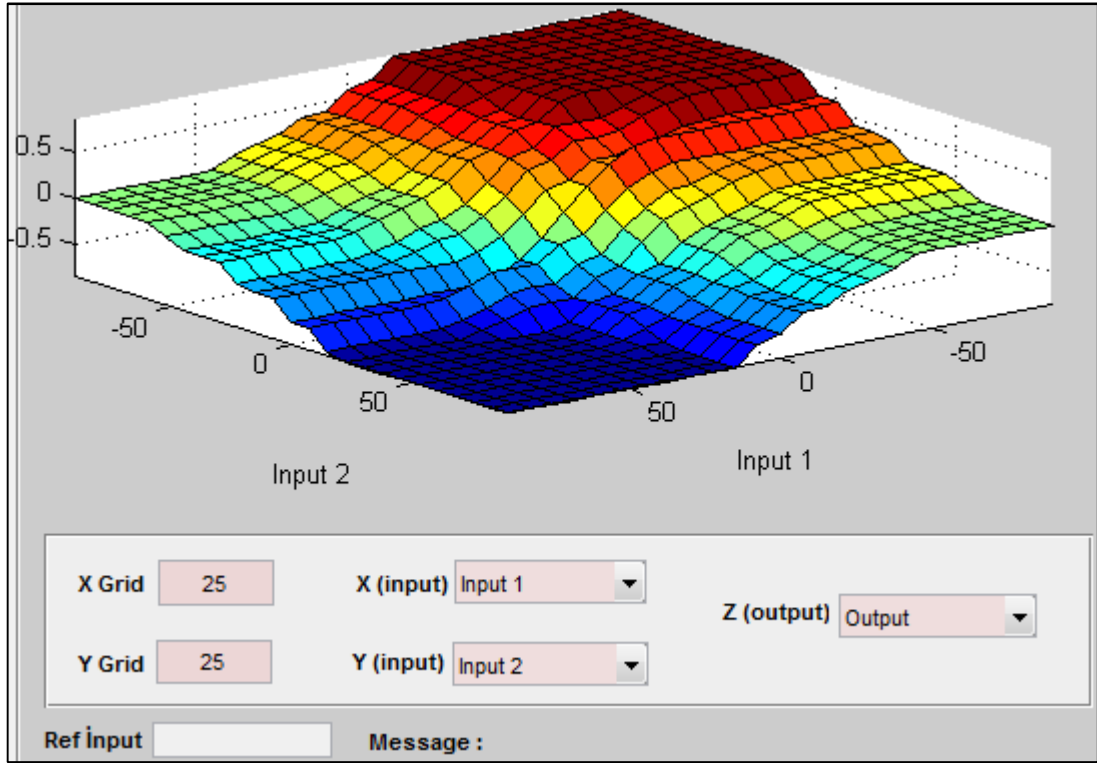
Tasarım ara yüzünde belirtilen giriş-çıkış sayısı ve dilsel etiketler bu pencerede oluşturulmaktadır. Kullanıcı sonucunu görmek istediği giriş değerlerini sayısal olarak iki farklı şekilde belirtilebilmektedir. Fakat denetleyici tasarımı yapılırken oluşturulan her girişe ait üyelik fonksiyonlarının bir maksimum ve minimum değerleri olduğu için burada belirtilen değerler sonsuz aralıkta olmamaktadır. Kaydırmalı giriş değeri otomatik olarak bu sınırlar arasında oluşturulduğu için maksimum ve minimum değerleri dışına çıkma imkânı vermemektedir. Bundan farklı olarak doğrudan sayısal olarak girilen giriş kutularına bu sınır dışında bir değer kullanıcı tarafından girilebilir. Bu durumda Şekil 3.17’de gösterilen uyarı mesajı verilerek kullanıcıya bilgi verilmektedir.



Şekil 3.17. Sınırlar dışında giriş değerinin girilmesine ilişkin hata mesajları

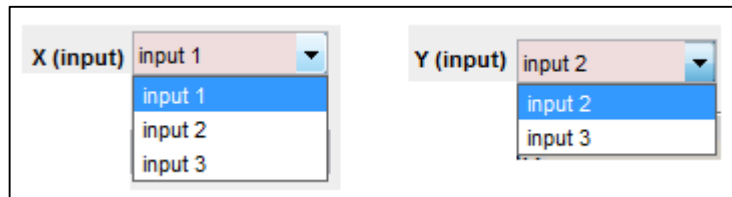
‘View’ menüsü içerisinde bulunan bir diğer seçenek ise giriş değerlerinin belli aralıklarla örneklenmesi sonucu elde edilen yüzey grafiğinin gösterilmesidir. Şekil

3.18’de iki giriş tek çıkışa sahip bir sistemin yüzey grafiği örnek olarak gösterilmiştir.



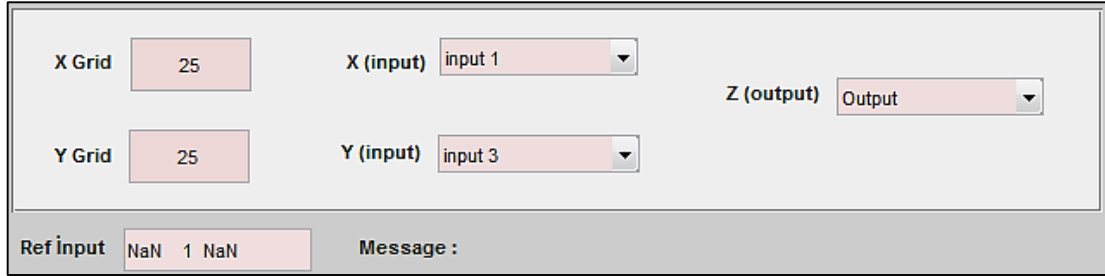
Şekil 3.18. 25’er örnek alınarak oluşturulan sonuç yüzey grafiği örneği

Açılan pencerede başlangıç olarak X eksenine sistemde tanımlanan ilk giriş, Y eksenine ise ikinci giriş atanmış ve bu eksenler üzerinde 25’er örnek alınarak grafik oluşturulmaktadır. Kullanıcı tarafından açılır menü yardımıyla eksen değişiklikleri yapılabilmektedir. Kontrol edilecek sistemde ikiden fazla giriş veya daha fazla çıkış bulunduğu takdirde yüzey grafiği hangi bilgilere göre oluşturulacaksa onlar seçilmelidir. Fakat giriş sayısının ikiden fazla olduğu durumda örneklenecek girişler iki tane olduğu için kalan girişlere sabit bir değer atanmak zorundadır. Böyle bir durumda pencerenin alt kısmında bulunan ‘Ref Input’ kutusu aktif hale gelmekte ve bu sabit değerler burada tanımlanmaktadır.



Şekil 3.19. İki den fazla giriş bulunan sistemler için yüzey grafiği oluşturma seçenekleri

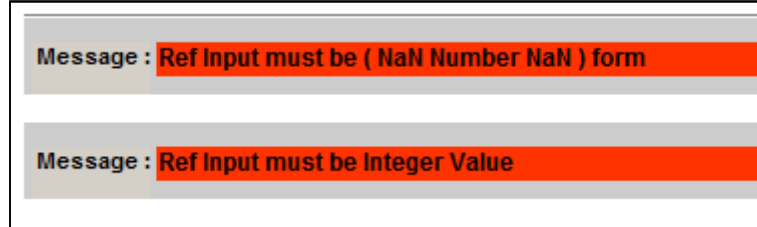
Şekil 3.19’da 3 girişe sahip bir sistemin, yüzey grafiği oluşturma penceresinde X ve Y eksenine açılır menüler aracılığıyla hangi girişlerin nasıl atanacağı gösterilmiştir. 3 girişten seçilen ikisinin dışında kalan giriş değerinin sabit bir sayı olması gerekmektedir. Şekil 3.20’de X ve Y eksenlerine sırasıyla ‘Input 1’ ve ‘Input 3’ girişlerinin atandığı bir yüzey grafik penceresi görülmektedir.



X Grid	25	X (input)	input 1	Z (output)	Output
Y Grid	25	Y (input)	input 3		
Ref Input	NaN 1 NaN		Message :		

Şekil 3.20. Üç giriş bulunan bir sistemin yüzey grafiği oluşturma penceresi

Giriş sayısının 2’yi geçmesiyle birlikte ‘Ref Input’ aktif hale gelmiştir. Burada atanması yapılmış girişlerin değerleri üzerinde herhangi bir değişiklik yapılamamaktadır. Eğer kullanıcı tarafından müdahale edilir veya sayı yerine herhangi bir harfsel ifadeler yazıldığı takdirde Şekil 3.21’de görüldüğü gibi ‘Message’ kısmında hata mesajı ile karşılaşılmaktadır.



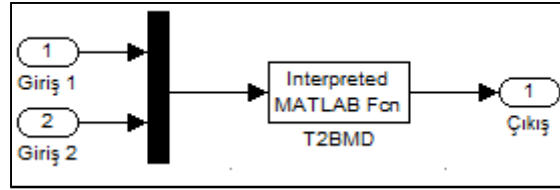
Message :	Ref Input must be (NaN Number NaN) form
Message :	Ref Input must be Integer Value

Şekil 3.21. ‘Ref Input’ parametrelerine ilişkin hata mesajları

Tip-2 bulanık mantık denetim sistemi Tip-1’den farklı olarak daha fazla işlem yüküne sahip olduğu için çok sayıda giriş çıkışa veya kurala sahip sistemlerin gerçek zamanlı uygulamalarında hesaplamaların daha uzun sürmesinden dolayı arzu edilen kontrol sağlanamayabilir. Bu problemin önlenmesi adına yüzey grafiği oluşturma esnasında çözüm kümesi elde edilerek giriş değerlerine karşılık gelen çıkış değerleri hızlı bir şekilde elde edilebilmektedir. Özellikle bulanık mantık denetleyicilerde giriş değerlerindeki küçük değişikliklere bağlı olarak denetleyiciden alınan sonuç değişmediği için çözüm kümesinden çalışmak olumsuz bir etki oluşturmamaktadır.

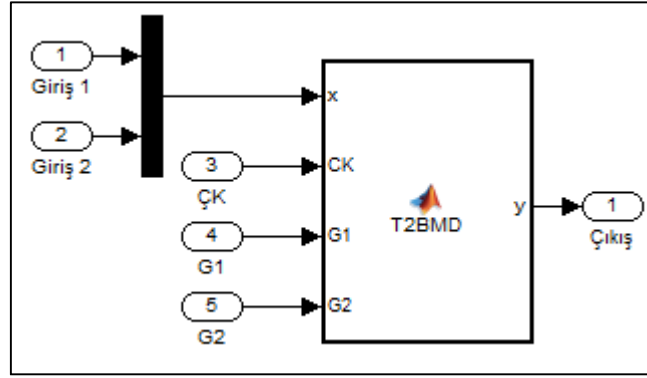
Fakat her girişe ait üyelik fonksiyonlarının maksimum ve minimum değerleri arasındaki farkın çok olduğu durumlarda örnekleme sayısının arttırmak daha uygun olmaktadır.

Editör üzerinde tasarımı yapılan tip-2 bulanık mantık denetleyicisini gerek benzetim gerekse gerçek zamanlı uygulamalarda Matlab-Simulink ortamında fonksiyon bloğu yardımıyla kullanılabilir. Editörden, tasarlanan denetleyiciye ait bilgilerin ve doğrudan örnekleme yapılarak oluşturulan çözüm kümesinin yer aldığı iki farklı dosya alınabildiği için kullanılan fonksiyon blokları da farklılık göstermektedir. Şekil 3.22’de denetleyiciye ait bilgilerin bulunduğu dosyanın kullanıldığı fonksiyon bloğu gösterilmiştir. Bu fonksiyon bloğu içerisinde, kullanılan dosyada yer alan bilgiler işlenmekte ve giriş değerlerine göre denetleyicide bulunan çıkış sayısı kadar sonuç alınmaktadır.



Şekil 3.22. Matlab/Simulink ortamında, tasarlanan denetleyicinin kullanımı

Şekil 3.23’te ise denetleyici içerisinde belirtilen girişlerin örneklemeyle oluşturulan çözüm kümesinin kullanıldığı fonksiyon bloğu yer almaktadır. Fonksiyon bloğunda, örnek gösterilen tip-2 denetleyici 2 giriş 1 çıkışa sahip olduğu için 4 giriş portu bulunmaktadır. İlk giriş (x) kontrol edilecek sistemden alınan giriş vektörü, ikinci giriş (CK) çözüm kümesi, son iki giriş ise (G1, G2) örneklenen giriş değerleridir. Denetleyicide bulunan girişlerin artması fonksiyon bloğunun port sayısını arttıracaktır (G1, G2...). Burada giriş vektöründen alınan değerler kendilerine en yakın örneklenen giriş değerlerine dönüşmekte ve bu değerlere karşılık gelen çıkış değeri çözüm kümesinden tespit edilmektedir. Bu yöntem çok fazla işlem yükü gerektirmediği için daha hızlı sonuçlar alınabilmektedir.



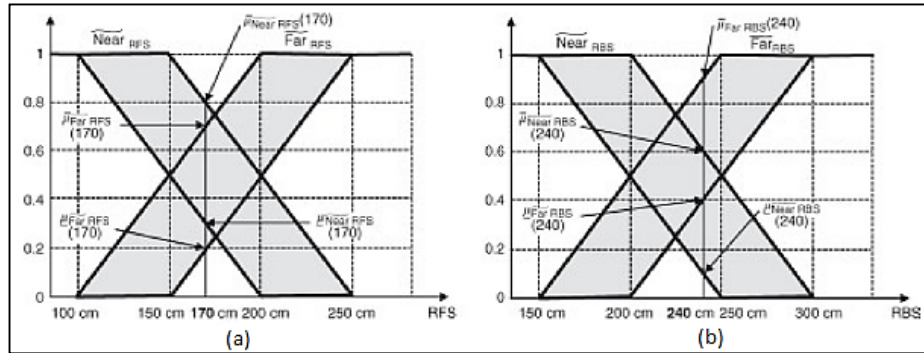
Şekil 3.23. Matlab/Simulink ortamında, tasarlanan denetleyicinin çözüm kümesi ile kullanımı

4. TİP-2 BULANIK MANTIK EDITÖR TESTİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

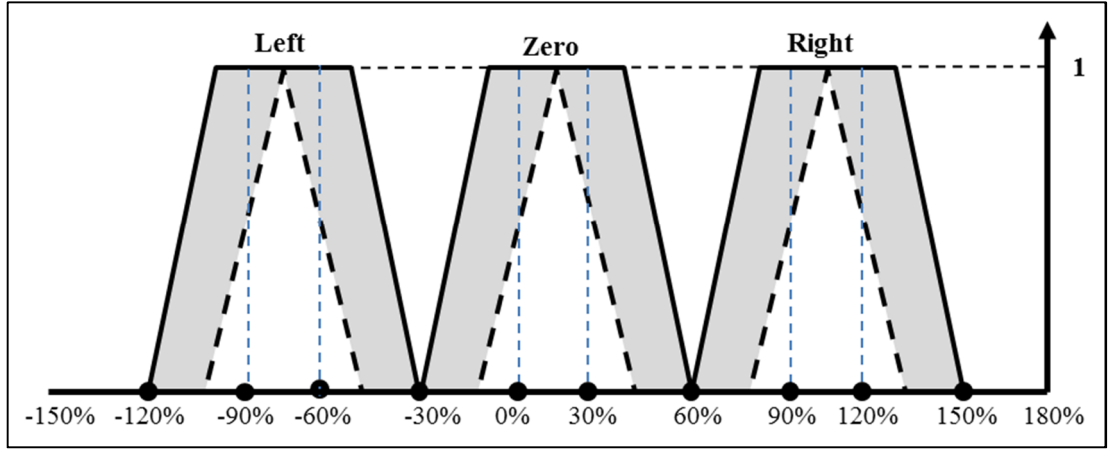
Bir sistemin kontrol edilebilmesi için gerekli üyelik fonksiyonları ve kurallar kesin olarak belirlenememektedir. Uygulanan sistemin istenilen düzeyde çalışmadığı durumda hatanın editörden mi yoksa yanlış üyelik fonksiyonları ve kurallardan mı olduğunu kestirmek kolay olmadığından dolayı yapılan çalışmanın test işlemi herhangi bir sistem için tip-2 bulanık mantık sistemi tasarlayarak, sistemin kontrolünü gerçekleştirmek şeklinde yapılmamıştır. Editör testi Jerry Mendel ve arkadaşları tarafından yazılmış “Introduction To Type-2 Fuzzy Logic Control” isimli kitapta teorik olarak çözülmüş bir mobil robot kontrol uygulaması üzerinden yapılmıştır [25].

4.1. Mobil Robot Kontrolü İçin Tip-2 Denetleyici Tasarımı ve Sonuçların Teorik Olarak Bulunması

Tip-2 bulanık mantık denetleyicisi ile kontrol edilecek sistem sağ ön ve arka tarafında mesafe sensörü bulunan bir mobil robottur. Burada amaçlanan ideal kontrol ise mobil robotun belirlenen bir yüzeye sapma yapmadan paralel gitmesi işlemidir. Bu görevin yerine getirilmesi için gerçekleştirilecek tip-2 denetleyicisinde sensörlerden gelen iki giriş değerine karşın robotun kontrolü için tek çıkış bulunmaktadır. Girişlere ve çıkışa ait üyelik fonksiyonları Şekil 4.1 ve 4.2’de gösterildiği gibidir.



Şekil 4.1. Sağ ön ve arka mesafe sensörlerine ait üyelik fonksiyonları



Şekil 4.2. Çıkış üyelik fonksiyonları

RFS (sağ ön sensör) ve RBS(sağ arka sensör) isimli iki girişe ait ‘Yakın’ ve ‘Uzak’ (near-far) dilsel etiketli ikişer üyelik fonksiyonu olduğu için yazılacak kural sayısı da buna bağlı olarak en fazla dört tane olmaktadır. Steering (dümen kontrolü) isimli çıkış ise ‘Left - Zero - Right’ dilsel etiketli üç tane üyelik fonksiyonuna sahiptir. Kurallar aşağıda gösterildiği şekilde yazılmıştır.

If RFS is Near and RBS is Near then Steering is Left

If RFS is Near and RBS is Far then Steering is Left

If RFS is Far and RBS is Near then Steering is Zero

If RFS is Far and RBS is Far then Steering is Right

Tip-2 üyelik fonksiyonlarının oluşturulup bunlara bağlı kuralların yazılmasıyla birlikte tip-2 bulanık mantık denetleyicisi kontrol için hazır hale gelmiştir. Yapılan çalışmanın test işlemi bu bilgiler doğrultusunda gerçekleştirilecektir. Burada karşılaştırma işlemi Şekil 4.1.’de yer aldığı gibi sağ ön sensörden 170 cm, sağ arka sensörden ise 240 cm bilgisi geldiğinde denetleyicinin kontrol için vereceği çıkış sinyali üzerinden yapılacaktır. Bu bölümde verilen bilgilere göre öncelikle teorik olarak belirtilen giriş değerlerine karşılık kontrol sinyali teorik olarak bulunacak, sonrasında ise editör üzerinde tasarımı gerçekleştirilen denetleyicinin aynı giriş değerlerine karşı üreteceği kontrol sinyali elde edilip iki sonuç karşılaştırılacaktır.

4.1.1. KM Algoritması ile cl(L) ve cr(R)'nin elde edilmesi

Bu kısımda, KM algoritması ile çok sayıda gömülü üyelik fonksiyonları arasında en küçük ve en büyük ağırlık merkezini yaklaşık olarak bulmak için kullanılacaktır. Çıkışa ait üç üyelik fonksiyonu mevcut olduğundan her üyelik fonksiyonunun cl(l) ve cr(R) değerlerini bulmak için ayrı ayrı iterasyon işlemi yapılacaktır.

$$\theta_i = [\underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)] / 2 \quad (4.1)$$

'Left' üyelik fonksiyonu için cl(L)'nin bulunması:

$$i=1 \rightarrow x_1 = -120 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \quad , \quad \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \quad \rightarrow \theta_1 = \frac{0+0}{2} = 0 \quad (4.2)$$

$$i=2 \rightarrow x_2 = -90 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0,4 \quad , \quad \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 1 \quad \rightarrow \theta_2 = \frac{0,4+1}{2} = 0,7 \quad (4.3)$$

$$i=3 \rightarrow x_3 = -60 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0,4 \quad , \quad \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 1 \quad \rightarrow \theta_3 = \frac{0,4+1}{2} = 0,7 \quad (4.4)$$

$$i=4 \rightarrow x_4 = -30 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \quad , \quad \overline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \quad \rightarrow \theta_4 = \frac{0+0}{2} = 0 \quad (4.5)$$

İterasyon 1:

1.Adım:

$$c' = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i} = \frac{(-120.0) + (-90.0,7) + (-60.0,7) + (-30.0)}{0 + 0,7 + 0,7 + 0} = \frac{-105}{1,4} = -75 \quad (4.6)$$

2.Adım : $x_k \leq c' \leq x_{k+1} \rightarrow x_2(-60) \leq -75 \leq x_{2+1}(-90)$ eşitliğine göre k=2 olarak bulunmuştur.

$$\begin{aligned}
3.\text{Adım: } c_1(k) &= \frac{\sum_{i=1}^k x_i \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N x_i \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)}{\sum_{i=1}^k \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)} \\
&= \frac{(-120.0) + (-90.1) + (-60.0,4) + (-30.0)}{0+1+0,4+0} = \frac{-114}{1,4} = -81,43 \quad (4.7)
\end{aligned}$$

4.Adım: $-75 \neq -81.43$ eşitliği sağlanmadığı için $c' = -81.43$ olarak eşitlenir ve 2.Adım'a tekrar dönlür.

İterasyon 2:

2.Adım : $x_k \leq c' \leq x_{k+1} \rightarrow x_2(-60) \leq -81,43 \leq x_{2+1}(-90)$ eşitliğine göre tekrardan $k=2$ olarak bulunmuştur.

3.Adım : k bir önceki iterasyonda da 2 olarak bulunduğu için bu adımda elde edilen sonuç bir önceki iterasyonda bulunan sonuçla aynı olacaktır.

$$c_1(k) = \frac{-114}{1,4} = -81,43 \quad (4.8)$$

4.Adım: $-81,43 = -81,43$ eşitliği sağlandığı için $L=k$ yani $L=2$ olarak bulunmuş ve iterasyon sonlandırılmıştır.

'Left' üyelik fonksiyonu için $c_r(R)$ 'nin bulunması:

1. ve 2. Adım $c_l(L)$ 'nin hesaplanması için kullanılan iterasyon içerisindeki adımlarla aynı şekilde elde edildiği için $c' = -75$ ve $k=2$ olarak devam edilecektir.

$$\begin{aligned}
3.\text{Adım: } c_r(k) &= \frac{\sum_{i=1}^k x_i \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N x_i \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)}{\sum_{i=1}^k \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_i) + \sum_{i=k+1}^N \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_i)} \\
&= \frac{(-120.0) + (-90.0,4) + (-60.1) + (-30*0)}{0+0,4+1+0} = \frac{-96}{1,4} = -68,57 \quad (4.9)
\end{aligned}$$

4.Adım: $-75 \neq -68,57$ eşitliği sağlanmadığı için $c' = -68,57$ olarak eşitlenir ve 2.Adım'a tekrar dönlür.

İterasyon 2 (cr(R) için)

2.Adım : $x_k \leq c' \leq x_{k+1} \rightarrow x_2(-60) \leq -68,57 \leq x_{2+1}(-90)$ eşitliğine göre tekrardan $k=2$ olarak bulunmuştur.

3.Adım : k bir önceki iterasyonda da 2 olarak bulunduğu için bu adımda elde edilen sonuç bir önceki iterasyonda bulunan sonuçla aynı olacaktır.

$$c_r(k) = \frac{-96}{1,4} = -68,57 \quad (4.10)$$

4.Adım: $-68,57 = -68,57$ eşitliği sağlandığı için $R=k$ yani $R=2$ olarak bulunmuş ve iterasyon sonlandırılmıştır.

'Zero' üyelik fonksiyonu için $cl(L)$ 'nin bulunması:

$$i=1 \rightarrow x_1 = -30 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \quad , \quad \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \quad \rightarrow \theta_1 = \frac{0+0}{2} = 0 \quad (4.11)$$

$$i=2 \rightarrow x_2 = 0 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0,4 \quad , \quad \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 1 \quad \rightarrow \theta_2 = \frac{0,4+1}{2} = 0,7 \quad (4.12)$$

$$i=3 \rightarrow x_3 = 30 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0,4 \quad , \quad \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 1 \quad \rightarrow \theta_3 = \frac{0,4+1}{2} = 0,7 \quad (4.13)$$

$$i=4 \rightarrow x_4 = 60 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \quad , \quad \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \quad \rightarrow \theta_4 = \frac{0+0}{2} = 0 \quad (4.14)$$

İterasyon 1:

$$1.Adım: c' = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i} = \frac{(-30.0) + (0.0,7) + (30.0,7) + (60.0)}{0 + 0,7 + 0,7 + 0} = \frac{21}{1,4} = 15 \quad (4.15)$$

2.Adım : $x_k \leq c' \leq x_{k+1} \rightarrow x_2(0) \leq 15 \leq x_{2+1}(30)$ eşitliğine göre $k=2$ olarak bulunmuştur.

$$3.\text{Adım: } c_1(k) = \frac{(-30.0) + (0.1) + (30.0,4) + (60.0)}{0+1+0,4+0} = \frac{12}{1,4} = 8,57 \quad (4.16)$$

4.Adım: $15 \neq 8.57$ eşitliği sağlanmadığı için $c' = 8.57$ olarak eşitlenir ve 2.Adım'a tekrar dönülür.

İterasyon 2:

2.Adım : $x_k \leq c' \leq x_{k+1} \rightarrow x_2(0) \leq 8,57 \leq x_{2+1}(30)$ eşitliğine göre tekrardan $k=2$ olarak bulunmuştur.

3.Adım : k bir önceki iterasyonda da 2 olarak bulunduğu için bu adımda elde edilen sonuç bir önceki iterasyonda bulunan sonuçla aynı olacaktır.

$$c_1(k) = \frac{12}{1.4} = 8,57 \quad (4.17)$$

4.Adım: $8,57 = 8,57$ eşitliği sağlandığı için $L=k$ yani $L=2$ olarak bulunmuş ve iterasyon sonlandırılmıştır.

'Zero' üyelik fonksiyonu için $c_r(R)$ 'nin bulunması:

1. ve 2. Adım $c_l(L)$ 'nin hesaplanması için kullanılan iterasyon içerisindeki adımlarla aynı şekilde elde edildiği için $c' = 15$ ve $k=2$ olarak devam edilecektir.

$$3.\text{Adım : } c_r(k) = \frac{(-30.0) + (0.0,4) + (30.1) + (60.0)}{0+0,4+1+0} = \frac{30}{1,4} = 21,42 \quad (4.18)$$

4.Adım: $15 \neq 21,42$ eşitliği sağlanmadığı için $c' = 21,42$ olarak eşitlenir ve 2.Adım'a tekrar dönülür.

İterasyon 2:

2.Adım : $x_k \leq c' \leq x_{k+1} \rightarrow x_2(0) \leq 21,42 \leq x_{2+1}(30)$ eşitliğine göre tekrardan $k=2$ olarak bulunmuştur.

3.Adım : k bir önceki iterasyonda da 2 olarak bulunduğu için bu adımda elde edilen sonuç bir önceki iterasyonda bulunan sonuçla aynı olacaktır.

$$c_r(k) = \frac{30}{1,4} = 21,42 \quad (4.19)$$

4.Adım: $21.42 = 21.42$ eşitliği sağlandığı için $R=k$ yani $R=2$ olarak bulunmuş ve iterasyon sonlandırılmıştır.

'Right' üyelik fonksiyonu için $cl(L)$ 'nin bulunması:

$$i=1 \rightarrow x_1 = 60 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \quad , \quad \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \rightarrow \theta_1 = \frac{0+0}{2} = 0 \quad (4.20)$$

$$i=2 \rightarrow x_2 = 90 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0,4 \quad , \quad \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 1 \rightarrow \theta_2 = \frac{0,4+1}{2} = 0,7 \quad (4.21)$$

$$i=3 \rightarrow x_3 = 120 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0,4 \quad , \quad \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 1 \rightarrow \theta_3 = \frac{0,4+1}{2} = 0,7 \quad (4.22)$$

$$i=4 \rightarrow x_4 = 150 \quad \underline{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \quad , \quad \bar{\mu}_{\tilde{A}}(x_1) = 0 \rightarrow \theta_4 = \frac{0+0}{2} = 0 \quad (4.23)$$

İterasyon 1:

1.Adım:

$$c' = \frac{\sum_{i=1}^N x_i \theta_i}{\sum_{i=1}^N \theta_i} = \frac{(60.0) + (90.0,7) + (120.0,7) + (150.0)}{0+0,7+0,7+0} = \frac{147}{1,4} = 105 \quad (4.24)$$

2.Adım : $x_k \leq c' \leq x_{k+1} \rightarrow x_2(90) \leq 105 \leq x_{2+1}(120)$ eşitliğine göre $k=2$ olarak bulunmuştur.

$$3.\text{Adım} : c_1(k) = \frac{(60.0) + (90.1) + (120.0.4) + (150.0)}{0+1+0,4+0} = \frac{138}{1,4} = 98,57 \quad (4.25)$$

4.Adım: $105 \neq 98,57$ eşitliği sağlanmadığı için $c' = 98,57$ olarak eşitlenir ve 2.Adım'a tekrar dönülür.

İterasyon 2:

2.Adım : $x_k \leq c' \leq x_{k+1} \rightarrow x_2(90) \leq 98,57 \leq x_{2+1}(120)$ eşitliğine göre tekrardan $k=2$ olarak bulunmuştur.

3.Adım : k bir önceki iterasyonda da 2 olarak bulunduğu için bu adımda elde edilen sonuç bir önceki iterasyonda bulunan sonuçla aynı olacaktır.

$$c_1(k) = \frac{138}{1.4} = 98,57 \quad (4.26)$$

4.Adım: $98,57 = 98,57$ eşitliği sağlandığı için $L=k$ yani $L=2$ olarak bulunmuş ve iterasyon sonlandırılmıştır.

'Right' üyelik fonksiyonu için $cr(R)$ 'nin bulunması:

1. ve 2. Adım $cl(L)$ 'nin hesaplanması için kullanılan iterasyon içerisindeki adımlarla aynı şekilde elde edildiği için $c' = 105$ ve $k=2$ olarak devam edilecektir.

$$3.\text{Adım} : c_r(k) = \frac{(60.0) + (90.0,4) + (120.1) + (150.0)}{0+0,4+1+0} = \frac{156}{1,4} = 111,42 \quad (4.27)$$

4.Adım: $105 \neq 111,42$ eşitliği sağlanmadığı için $c' = 111,42$ olarak eşitlenir ve 2.Adım'a tekrar dönülür.

İterasyon 2 :

2.Adım : $x_k \leq c' \leq x_{k+1} \rightarrow x_2(90) \leq 111,42 \leq x_{2+1}(120)$ eşitliğine göre tekrardan $k=2$ olarak bulunmuştur.

3.Adım : k bir önceki iterasyonda da 2 olarak bulunduğu için bu adımda elde edilen sonuç bir önceki iterasyonda bulunan sonuçla aynı olacaktır.

$$c_r(k) = \frac{156}{1,4} = 111,42 \quad (4.28)$$

4.Adım: $111,42 = 111,42$ eşitliği sağlandığı için $R=k$ yani $R=2$ olarak bulunmuş ve iterasyon sonlandırılmıştır.

Tablo 4.1. Çıkış üyelik fonksiyonlarını oluşturan gömülü üyelik fonksiyonları içerisinde en büyük ve en küçük ağırlık merkezi değerleri

	a^n (cl)	b^n (cr)
Left	-81,43	-68,57
Zero	8,57	21,42
Right	98,57	111,42

4.1.2. KM Algoritması ile $u(l)$ ve $u(r)$ kontrol sinyallerinin elde edilmesi

Çıkış üyelik fonksiyonlarına ait en küçük ve en büyük ağırlık merkezlerinin bulunmasından sonraki işlem sensörlerden 170 ve 240 cm bilgilerine karşın üretilecek kontrol sinyalinin elde edilmesi olacaktır. Bu kontrol sinyali yazılan dört kurala bağlı olarak hesaplanacaktır. Öncelikle minimum yöntemine göre, yazılan her kural için aşağıda görüldüğü gibi çıkarım işlemi yapılacaktır.

$$[f_{-}^1, \bar{f}^1] = [\min(\underline{\mu}_{\text{NearRFS}}(170), \underline{\mu}_{\text{NearRBS}}(240)), \min(\bar{\mu}_{\text{NearRFS}}(170), \bar{\mu}_{\text{NearRBS}}(240))] \quad (4.29)$$

$$[f_{-}^1, \bar{f}^1] = [\min(0,3 \ 0,1), \min(0,8 \ 0,6)] = [0,1 \ 0,6] \quad (4.30)$$

$$[f_{-}^2, \bar{f}^2] = [\min(\underline{\mu}_{\text{NearRFS}}(170), \underline{\mu}_{\text{FarRBS}}(240)), \min(\bar{\mu}_{\text{NearRFS}}(170), \bar{\mu}_{\text{FarRBS}}(240))] \quad (4.31)$$

$$[f_{-}^2, \bar{f}^2] = [\min(0,3 \ 0,4), \min(0,8 \ 0,9)] = [0,3 \ 0,8] \quad (4.32)$$

$$[f_{-}^3, \bar{f}^3] = [\min(\underline{\mu}_{\text{FarRFS}}(170), \underline{\mu}_{\text{NearRBS}}(240)), \min(\bar{\mu}_{\text{FarRFS}}(170), \bar{\mu}_{\text{NearRBS}}(240))] \quad (4.33)$$

$$[\underline{f}^3, \bar{f}^3] = [\min(0,2 \ 0,1), \min(0,7 \ 0,6)] = [0,1 \ 0,6] \quad (4.34)$$

$$[\underline{f}^4, \bar{f}^4] = [\min(\underline{\mu}_{\text{FarRFS}}^{\sim} (170), \underline{\mu}_{\text{FarRBS}}^{\sim} (240)), \min(\bar{\mu}_{\text{FarRFS}}^{\sim} (170), \bar{\mu}_{\text{FarRBS}}^{\sim} (240))] \quad (4.35)$$

$$[\underline{f}^4, \bar{f}^4] = [\min(0,2 \ 0,4), \min(0,7 \ 0,9)] = [0,2 \ 0,7] \quad (4.36)$$

Durulaştırma işlemi öncesi u(l) ve u(r) kontrol sinyallerinin elde edileceği formül Denklem (4.36) ve (4.37) eşitliklerinde yer almaktadır.

$$u_l = \min_{k \in [1, N-1]} \frac{\sum_{n=1}^k \bar{f}^n a^n \sum_{n=k+1}^N \underline{f}_n a^n}{\sum_{n=1}^k \bar{f}^n + \sum_{n=k+1}^N \underline{f}_n} \equiv \frac{\sum_{n=1}^L \bar{f}^n a^n + \sum_{n=L+1}^N \underline{f}_n a^n}{\sum_{n=1}^L \bar{f}^n + \sum_{n=L+1}^N \underline{f}_n} \quad (4.37)$$

$$u_r = \max_{k \in [1, N-1]} \frac{\sum_{n=1}^k \underline{f}^n b^n \sum_{n=k+1}^N \bar{f}^n b^n}{\sum_{n=1}^k \underline{f}^n + \sum_{n=k+1}^N \bar{f}^n} \equiv \frac{\sum_{n=1}^R \underline{f}^n b^n + \sum_{n=R+1}^N \bar{f}^n b^n}{\sum_{n=1}^R \underline{f}^n + \sum_{n=R+1}^N \bar{f}^n} \quad (4.38)$$

Bu formüller için gerekli olan değişkenler yukarıda sırasıyla bulunmuştu. Fakat denklemlerde yer alan ‘L’ ve ‘R’ değerleri için tekrardan KM algoritması kullanılacaktır. Kontrol için dört kural tanımlandığı için u(l) ve u(r) için ayrı ayrı iterasyon işlemi yapılacaktır. KM algoritması kapsamında u(l) ve u(r)’nin hesaplanması için yapılacak iterasyon işlemine başlamadan önce iterasyonda kullanılacak minimum yöntemine göre çıkarım işlemi sonucu elde edilen \underline{f}_n ve \bar{f}^n değerlerinin aritmetik ortalaması alınması gerekmektedir.

$$f^n = [\underline{f}_n + \bar{f}^n] / 2 \quad (4.39)$$

$$n=1 \rightarrow \underline{f}_1 = 0,1 \quad , \quad \bar{f}^1 = 0,6 \quad \rightarrow f^1 = \frac{0,1+0,6}{2} = 0,35 \quad (4.40)$$

$$n=2 \rightarrow \underline{f}_2 = 0,3 \quad , \quad \bar{f}^2 = 0,8 \quad \rightarrow f^2 = \frac{0,3+0,8}{2} = 0,55 \quad (4.41)$$

$$n=3 \rightarrow \underline{f}_3 = 0,1 \quad , \quad \bar{f}^3 = 0,6 \quad \rightarrow f^3 = \frac{0,1+0,6}{2} = 0,35 \quad (4.42)$$

$$n=4 \rightarrow \underline{f}_4 = 0,2 \quad , \quad \bar{f}^4 = 0,7 \quad \rightarrow f^4 = \frac{0,2+0,7}{2} = 0,45 \quad (4.43)$$

İterasyon:1 (u_1 için)

1.Adım :

$$u' = \frac{(0,35 \cdot -81,43) + (0,55 \cdot -81,43) + (0,35 \cdot 8,57) + (0,45 \cdot 98,57)}{0,35 + 0,55 + 0,35 + 0,45} = -15,25 \quad (4.44)$$

2.Adım : $c(l)_k \leq u' \leq c(l)_{k+1} \Rightarrow c(l)_2(-81,43) \leq -15,25 \leq c(l)_{2+1}(8,57)$
eşitliğine göre $k=2$ olarak bulunmuştur.

$$3.Adım: u_1(k) = \frac{\sum_{i=1}^k a^n \bar{f}^n + \sum_{i=k+1}^N a^n \underline{f}_n}{\sum_{i=1}^k \bar{f}^n + \sum_{i=k+1}^N \underline{f}_n}$$

$$= \frac{(-81,43 \cdot 0,6) + (-81,43 \cdot 0,8) + (8,57 \cdot 0,1) + (98,57 \cdot 0,2)}{0,6 + 0,8 + 0,1 + 0,2} = \frac{-93,43}{1,7} = -54,96 \quad (4.45)$$

4.Adım: $-15,25 \neq -54,96$ eşitliği sağlanmadığı için $u' = -54,96$ olarak eşitlenir ve 2.Adım'a tekrar dönlür.

İterasyon:2

2.Adım : $c(l)_k \leq u' \leq c(l)_{k+1} \Rightarrow c(l)_2(-81,43) \leq -54,96 \leq c(l)_{2+1}(8,57)$
eşitliğine göre tekrardan $k=2$ olarak bulunmuştur.

3.Adım : k bir önceki iterasyonda da 2 olarak bulunduğu için bu adımda elde edilen sonuç bir önceki iterasyonda bulunan sonuçla aynı olacaktır.

$$u_1(k) = \frac{-93,43}{1,7} = -54,97 \quad (4.46)$$

4.Adım: $-54,97 = -54,97$ eşitliği sağlandığı için $L=k$ yani $L=2$ olarak bulunmuş ve iterasyon sonlandırılmıştır.

İterasyon:1 (u_r için)

$$1.Adım : u' = \frac{\sum_{i=1}^N f^n b^n}{\sum_{i=1}^N f^n} \quad (4.47)$$

$$u' = \frac{(0,35 \cdot -68,57) + (0,55 \cdot -68,57) + (0,35 \cdot 21,42) + (0,45 \cdot 111,42)}{0,35 + 0,55 + 0,35 + 0,45} = -2,39 \quad (4.48)$$

2.Adım : $c(r)_k \leq u' \leq c(r)_{k+1} \Rightarrow c(r)_2(-68,57) \leq -2,39 \leq c(r)_{2+1}(21,42)$ eşitliğine göre $k=2$ olarak bulunmuştur.

$$3.Adım : u_r(k) = \frac{\sum_{i=1}^k b^n \underline{f}_n + \sum_{i=k+1}^N b^n \bar{f}^n}{\sum_{i=1}^k \underline{f}_n + \sum_{i=k+1}^N \bar{f}^n}$$

$$= \frac{(0,1 \cdot -68,57) + (0,3 \cdot -68,57) + (0,6 \cdot 21,42) + (0,7 \cdot 111,42)}{0,1 + 0,3 + 0,6 + 0,7} = \frac{-63,41}{1,7} = 37,30 \quad (4.49)$$

4.Adım: $-2,39 \neq 37,30$ eşitliği sağlanmadığı için $u' = 37,30$ olarak eşitlenir ve 2.Adım'a tekrar dönlür.

İterasyon:2

2.Adım : $c(r)_k \leq u' \leq c(r)_{k+1} c(r)_3(21,42) \leq 37,30 \leq c(r)_{3+1}(111,42)$ eşitliğine göre $k=3$ olarak bulunmuştur.

3.Adım :

$$u_r(3) = \frac{(0,1 \cdot -68,57) + (0,3 \cdot -68,57) + (0,1 \cdot 21,42) + (0,7 \cdot 111,42)}{0,1 + 0,3 + 0,1 + 0,7} = 43,92 \quad (4.50)$$

4.Adım: $37,30 \neq 43,92$ eşitliği sağlanmadığı için $u' = 43,92$ olarak eşitlenir ve 2.Adım'a tekrar dönülür.

İterasyon:3

2.Adım : $c(r)_k \leq u' \leq c(r)_{k+1} \Rightarrow c(r)_3(21,42) \leq 43,92 \leq c(r)_{3+1}(111,42)$ eşitliğine göre tekrardan $k=3$ olarak bulunmuştur.

3.Adım : k bir önceki iterasyonda da 3 olarak bulunduğu için bu adımda elde edilen sonuç bir önceki iterasyonda bulunan sonuçla aynı olacaktır.

$$u_r(k) = \frac{52,70}{1,2} = 43,92 \quad (4.51)$$

4.Adım: $43,92 = 43,92$ eşitliği sağlandığı için $R=k$ yani $R=3$ olarak bulunmuş ve iterasyon sonlandırılmıştır.

4.1.3. Kontrol sinyalinin elde edilmesi

KM algoritması kapsamında iterasyon işlemleri ile $u(l)$ ve $u(r)$ kontrol sinyalleri elde edilmiştir. Kontrol için sisteme verilecek tek bir kontrol sinyali olması gerektiği için durulaştırma işlemi ismiyle elde edilen $u(l)$ ve $u(r)$ değerlerinin aritmetik ortalaması alınmaktadır. Böylelikle sağ ön ve arka sensörlerden alınan bilgilerin sırasıyla 170 ve 240 cm olduğu durumda mobil robotun arzu edilen şekilde ilerlemesi için tasarlanan tip-2 bulanık mantık denetleyicisinin vereceği kontrol sinyali teorik olarak elde edilmiş olmaktadır.

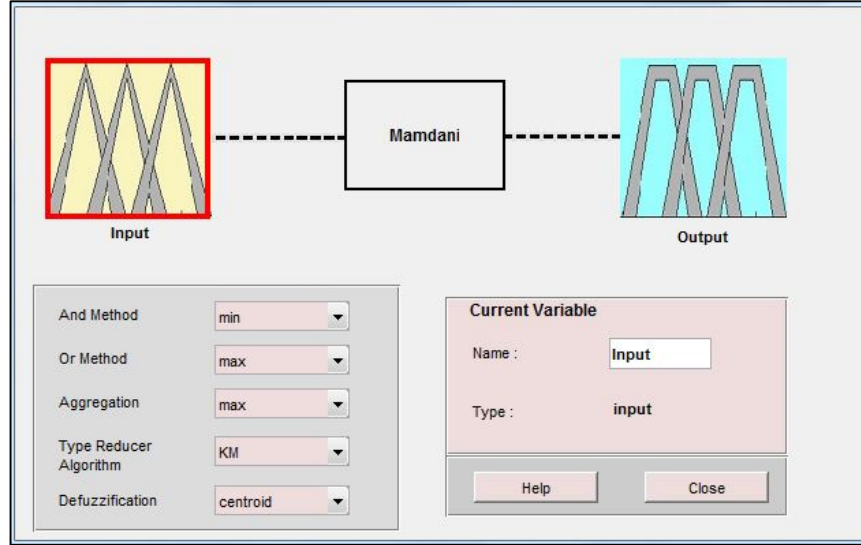
$$u = \frac{-54,97 + 43,92}{2} = -5,52 \quad (4.52)$$

4.2. Mobil Robot Kontrolü İçin Tip-2 Bulanık Mantık Denetleyici Tasarımının Editör Yardımıyla Gerçekleştirilmesi

Bu bölümde, Tip-2 bulanık mantık editörünün test işlemi yapılacaktır. Bir önceki bölümde mobil robotun kontrolünü gerçekleştirmek için iki giriş tek çıkışa sahip bir tip-2 bulanık mantık denetleyicisi tasarlanmış ve belirtilen giriş değerlerine karşı denetleyiciden alınacak sonuç teorik olarak elde edilmişti. Burada da aynı bilgilere

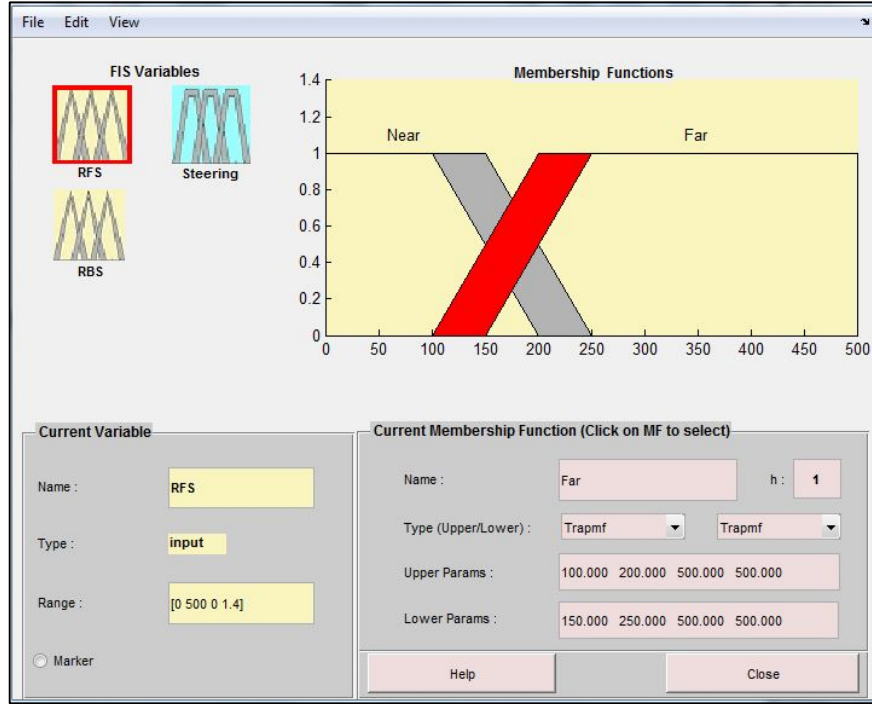
bağlı kalarak editör üzerinde denetleyici tasarlanacak ve aynı girişlere karşı denetleyicinin ürettiği sonuç üzerinden test işlemi yapılacaktır.

Karşılaştırma işleminin yapılabilmesi için aynı üyelik fonksiyonu ve kuralların kullanılacağı belirtilmişti. Fakat sadece bu bilgileri aynı olması yeterli olmamaktadır. Bununla birlikte kullanılacak yöntemlerinde aynı olması gerekmektedir.

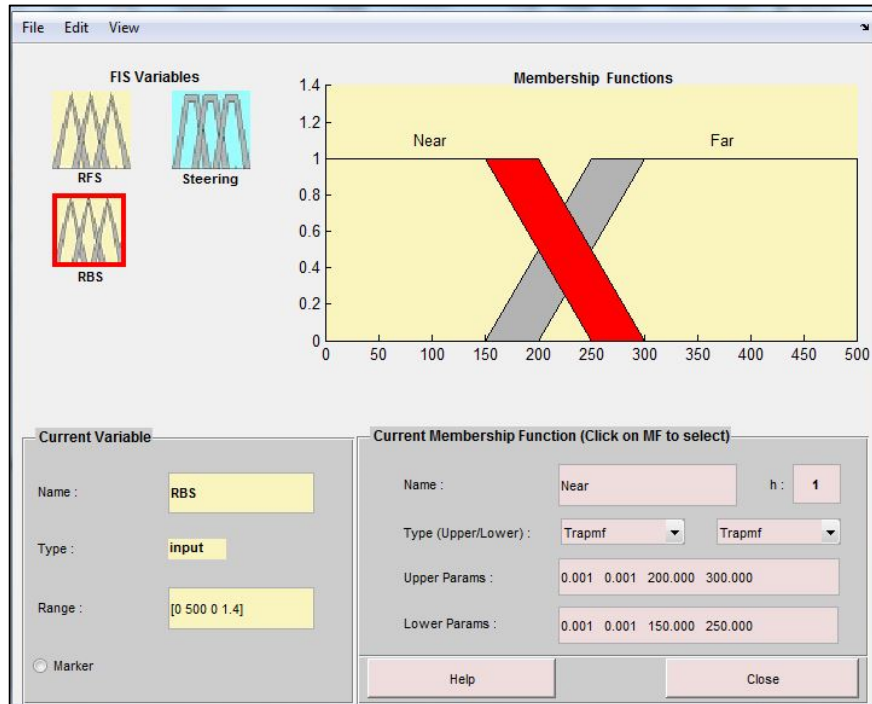


Şekil 4.3. Yöntem seçim penceresi

Teorik çözümde, kural yazımında bağlaç olarak 've', çıkarım yöntemi olarak minimum, tip-2 / tip1 indirgemesinde ise KM algoritması kullanılmıştır. Editör üzerinde de bu seçimler Şekil 4.3'te yer aldığı gibi sırasıyla yapılmaktadır. Bu adımdan sonra ise denetleyici tasarımının yapılacağı ara yüz açılmaktadır. Sistem için iki giriş tek çıkış gerekli olduğu için, başlangıçta tek giriş tek çıkış olan tasarım ara yüzünde 'Edit' menüsünden yeni bir giriş eklemesi yapılmıştır. Başlangıçta her giriş ve çıkışa ait üçer üyelik fonksiyonu tanımlanmıştır. Mobil robotun kontrolü için tasarlanan denetleyicide her iki girişe de ait 'Near-Far' olmak üzere ikişer üyelik fonksiyonu olduğu için her iki girişten birer üyelik fonksiyonu 'Edit' menüsü kullanılarak çıkarılmıştır. Yapılan değişiklikler sonrası elde edilen sistem Şekil 4.4 ve 4.5'te gösterilmiştir.

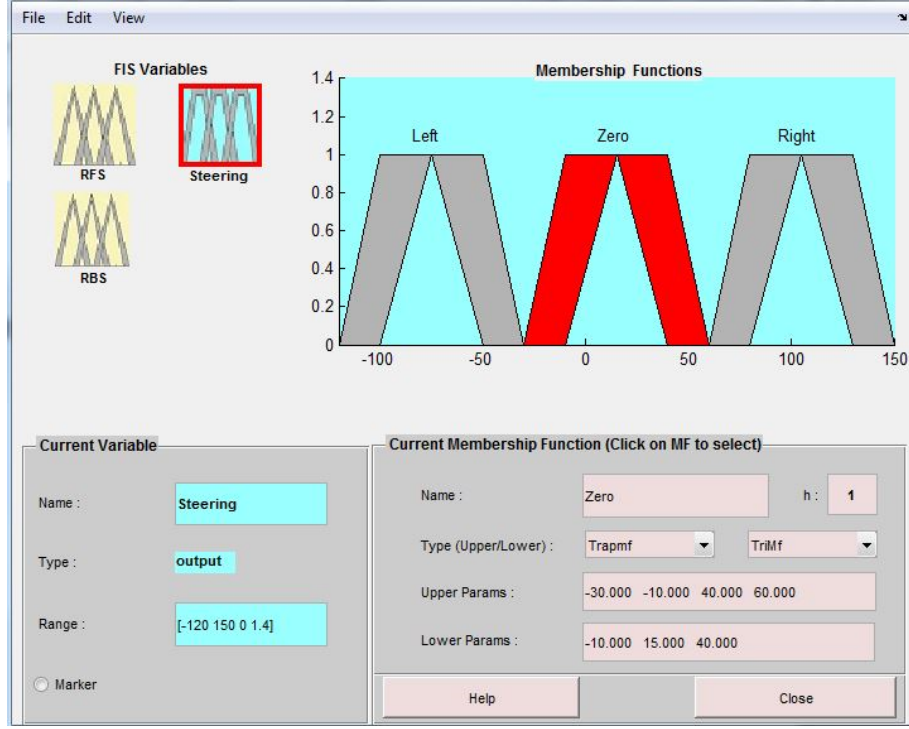


Şekil 4.4. Sağ ön sensöre ait üyelik fonksiyonları



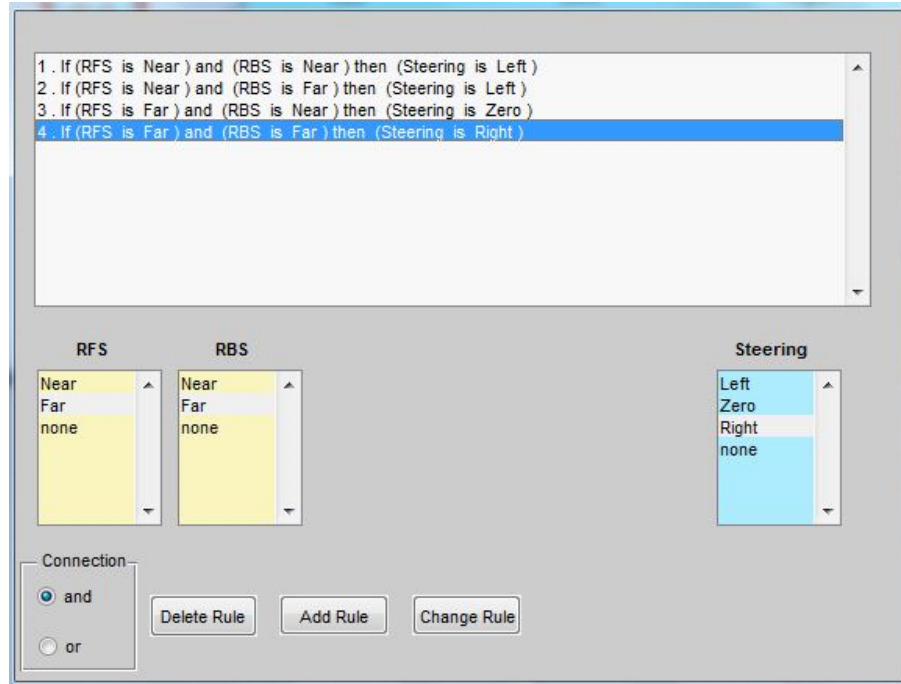
Şekil 4.5. Sağ arka sensöre ait üyelik fonksiyonları

Yapılan değişiklikler sonrası girişlere ait üyelik fonksiyonu bilgileri tamamlanmış olmaktadır. Sistemin çıkışına ait üyelik fonksiyonları ise Şekil 4.6'da görüldüğü gibi oluşturulmuştur.



Şekil 4.6 Çıkış üyelik fonksiyonları

Editör üzerinde giriş ve çıkışların belirlenip bunlara ait üyelik fonksiyonlarının oluşturulmasından sonraki adım kuralların yazılması işlemidir.



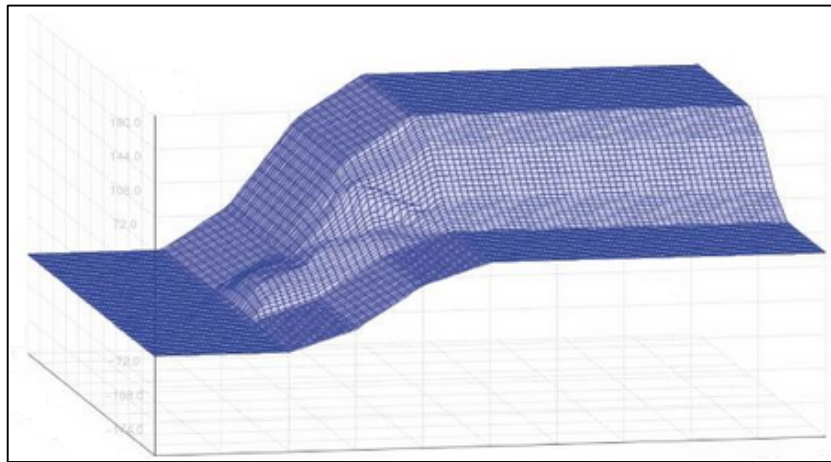
Şekil 4.7. Kuralların yazımı

Kural yazım sayfasında teorik çözümle aynı olarak Şekil 4.7’de görüldüğü gibi dört kural yazılmıştır. Kural yazımı sonrası tasarım işlemi bitmiş olmaktadır. Sonraki adımda ise sensörlerden alınan bilgilerin 170 ve 240 cm olması durumunda editör üzerinde tasarlanmış tip-2 bulanık mantık denetleyicisinin vereceği kontrol sinyalinin teorik çözümle karşılaştırma işlemi yapılmıştır.

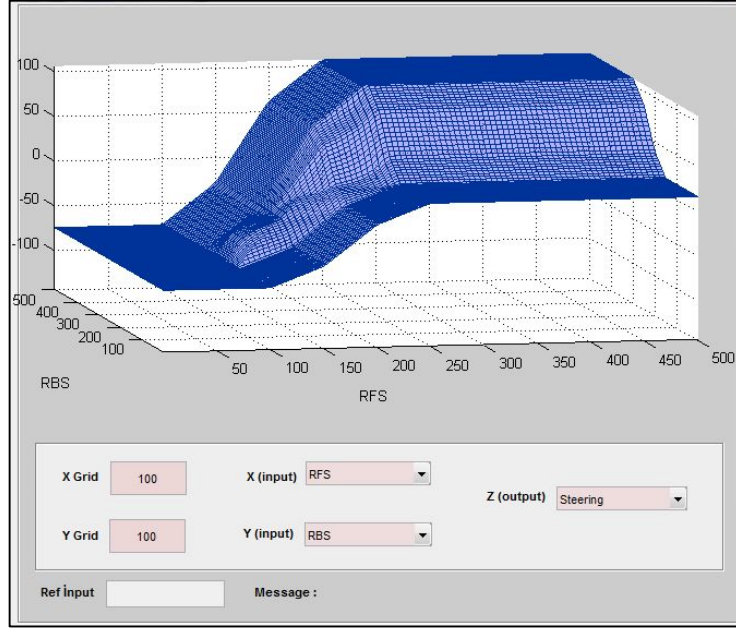


Şekil 4.8. 170 cm / 240 cm giriş değerlerinde denetleyicinin çıkış değeri

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi belirtilen sensör girişlerine karşı mobil robottun kontrolü için sisteme verilecek kontrol sinyali -5,51471 olarak bulunmuştur. Teorik çözümde ise bu sonuç -5,52 şeklinde bulunmuştu. Bu sonuçtan yola çıkarak editör üzerinde tasarımı yapılan tip-2 bulanık mantık denetleyicisinin teorik alt yapısının doğru bir şekilde çalıştığı görülmektedir. Fakat tek bir giriş değeri üzerinden karşılaştırma yapmak yapılan çalışmanın doğruluğunu göstermek için yeterli olmamaktadır. Bu nedenle içerisinde çok sayıda sonuç içeren yüzey grafik karşılaştırması yapılmıştır.



Şekil 4.9. Karşılaştırma yapılan sonuç yüzey grafiği



Şekil 4.10. Tip-2 bulanık mantık editörü sonuç yüzey grafiği

Her iki girişten (RFS-RBS) $[0,500]$ arası değer aralığında 100'er örnek alınarak yüzey grafiği çizdirilmiş ve kitapta yer alan aynı aralık değerinde aynı örnek sayısı ile oluşturulan yüzey grafiği ile karşılaştırması yapılmış sonuçların aynı olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 4.9 [25] ve Şekil 4.10'da karşılaştırma yapılan ve tip-2 bulanık mantık editöründen alınan yüzey grafikleri gösterilmiştir.

5. ESNEK EKLEMLİ ROBOT KOLUNUN BENZETİM ORTAMINDA VE GERÇEK ZAMANLI DENETİMİ

Tasarımı yapılan tip-2 bulanık mantık editörünün test işleminin başarılı bir şekilde yapılmasından sonra bu bölümde benzetim ortamında ve gerçek zamanlı olarak esnek eklemlili robot kolunun tip-2 bulanık mantık denetleyicisi ile kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Sonrasında ise gerçekleştirilen tip-2 denetleyicilerinin aynı şartlar altında tasarlanan tip-1 denetleyicileri ile performans karşılaştırmaları yapılmıştır.

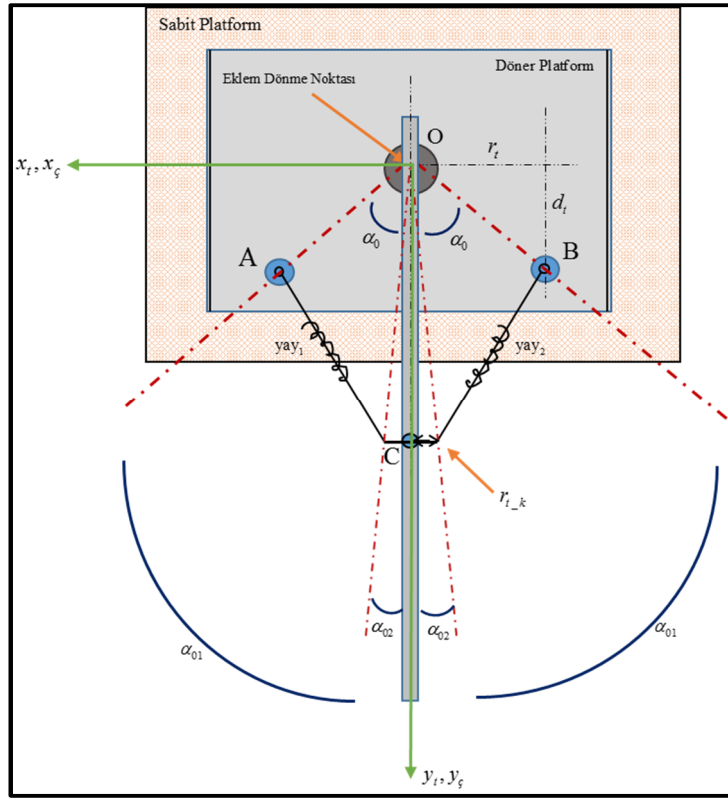
5.1. Esnek Eklemlili Robot Kolunun Modellenmesi ve T1BMD - T2BMD Kontrol Yapılarının Oluşturulması

Günümüzde robot kolları, insan gücünü en aza indirerek, hata payı oranını azaltıp üretim miktarını üst seviyelere getirdiği için endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır. Robot kolları kaynak, montaj, boyama, ölçüm, kesme gibi görevlerde sıklıkla kullanılmaktadır. Bu görevler dikkate alındığında robot kolunun istenilen görev konumuna titreşimsiz ve sapma yapmadan ulaşmasının çok önemli olduğu görülmektedir. Bu gereksinimler doğrultusunda günümüze kadar rijit ve ağır malzemeler ile çok sayıda robot yapılmıştır. Ancak rijit yapılı robotlar görevleri istenilen şekilde yerine getirme yönünden avantaj sağlarken, fazla ağırlıktan dolayı enerji tüketiminin artması ve yavaş olması gibi sebepler dolayısıyla da dezavantaj sağlamaktadır. Ayrıca robotlarda ağırlığın artması malzeme maliyetinin ve ağır malzemelerin hareket ettirecek motorların boyutlarının artması yönünden de olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Bu nedenle hızlı ve titreşimsiz çalışan hafif, esnek yapılı robotlar üzerinde çalışmalara başlanmıştır. Bu esnek yapılı robotlar ise hafif ve hedefe hızlı ulaşması bakımından iyi bir sonuç vermesine rağmen esneklikten doğan titreşimden dolayı kontrol zorluğunu ortaya çıkarmıştır. Kontroldeki bu zorluğun en önemli sebeplerinden birisi sistem dinamiklerinin değişken olmasıdır. Ancak bu zorluklar, kontrol yapılarında yapılan iyileştirmelerle giderilebileceği için esnek yapılı robotlar rijit yapılı robotlara göre genel anlamda daha avantajlı olmuştur.

Bu bölümde esnek eklemli robot kolunun Matlab/Simulink ortamında sistemin matematiksel modeli üzerinden tip-2 bulanık mantık denetleyicisi ile kontrolü gerçekleştirilmiş ve tip-1 denetleyicisi ile performansı karşılaştırılmıştır.

5.1.1. Esnek eklemli robot kolunun matematiksel modeli

Kontrolü gerçekleştirilecek olan esnek eklemli robot kolunun modeli Şekil 5.1’de görüldüğü gibidir. Döner tablaya bağlı rijit çubuğun, tabla üzerinde ‘A’ ve ‘B’ noktalarından bağlı iki yay ile esnek yapıda hareket etmesi sağlanmıştır. Sistemin matematiksel modeli Quanser [33] firmasının ve Cenk Karaman’ın [34] esnek eklemli robot kolu için geliştirdiği model benzetimi ile oluşturulmuştur.



Şekil 5.1. Esnek eklemli robot kol modeli (hareketsiz)

Esnekliği sağlayan yayların uzama miktarları, bağlantı noktaları arasında üçgenel bölge oluşmasından dolayı, geometride üçgen üzerinde iki kenarı ve aralarındaki açının bilinmesi durumunda, bilinmeyen kenarı bulmak amacıyla kullanılan kosinüs teoremi ile elde edilmiştir. Kenarları a, b, c olan ve a, b kenarları arasındaki açı α olan bir üçgenin c kenarı kosinüs teoremine ile Denklem (5.1) eşitliğine göre bulunmaktadır.

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos(\alpha) \quad (5.1)$$

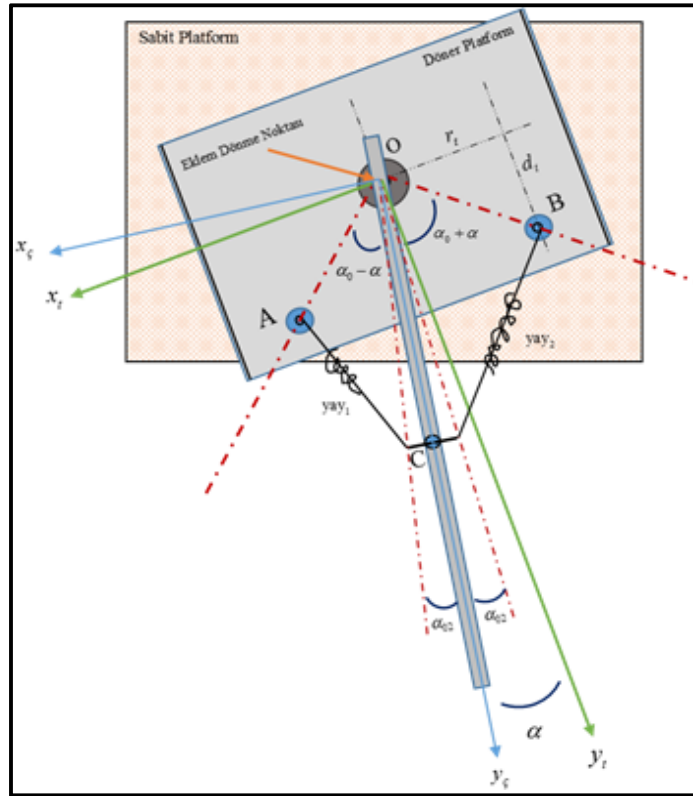
Yayın uzunluğunun kosinüs teoremine göre bulunması için kullanılacak α_0 açısına α_{01}, α_{02} sabitleri kullanılarak ulaşılabacaktır. α_{01} , tabla üzerinde yayların bağlı olduğu 'A' ve 'B' noktaları yatayda (x eksenini) r_t , dikeyde ise (y eksenini) d_t uzaklığında olduğu için, Denklem (5.2)'de görüldüğü gibi tanımlanmıştır.

$$\alpha_{01} = \tan^{-1}(r_t / d_t) \quad (5.2)$$

α_{02} , yayın çubuk üzerindeki bağlantı noktasının yatayda r_{t_k} , dikeyde ise R_L uzaklığında olduğu için Denklem (5.3)'te görüldüğü gibi tanımlanmıştır. α_0 Açısı ise α_{01} ve α_{02} cinsinden Denklem (5.4) eşitliği ile ifade edilmiştir.

$$\alpha_{02} = \tan^{-1}(r_{t_k} / R_L) \quad (5.3)$$

$$\alpha_0 = \alpha_{01} - \alpha_{02} \quad (5.4)$$



Şekil 5.2. Esnek eklemlili robot kol modeli (hareketli)

Sisteme esneklik kazandıran yayların ilk uzunlukları L_0 iken, A-C ve B-C noktaları arasında bağlanmaları sonucu uzunlukları birinci ve ikinci yay için sırasıyla L_1 ve L_2 olmaktadır. L_1 ve L_2 uzunlukları sistem hareket halinde iken sürekli değişim göstermektedirler. Bu uzunluklar, gerilmemiş yay uzunlukları L_0 ve her iki yay içinde mutlak değişimi ifade eden L_{N1} ve L_{N2} ile birlikte Denklem (5.5) ve (5.6) eşitlikleri ile hesaplanmaktadır.

$$L_1 = L_{N1} + L_0 \quad (5.5)$$

$$L_2 = L_{N2} + L_0 \quad (5.6)$$

Yayların uzama esnasındaki L_1 ve L_2 uzunlukları kosinüs teoreminde üçgensel bölgelerin bilinmeyen kenarları olarak hesaplanmış, bilinen kenarlar arasındaki açı ise enkoderden alınan çubuğun salınım açısı (α) ile elde edilmiştir. Kosinüs teoreminden yararlanılarak hesaplanan L_1 ve L_2 uzunlukları Denklem (5.7) ve (5.8) eşitlikleri ile bulunmuştur.

$$L_1^2 = R_L^2 + r_{t_k}^2 + r_t^2 + d_t^2 - 2\sqrt{r_t^2 + d_t^2} \sqrt{r_{t_k}^2 + R_L^2} \cdot \cos(\alpha_0 - \alpha) \quad (5.7)$$

$$L_2^2 = R_L^2 + r_{t_k}^2 + r_t^2 + d_t^2 - 2\sqrt{r_t^2 + d_t^2} \sqrt{r_{t_k}^2 + R_L^2} \cdot \cos(\alpha_0 + \alpha) \quad (5.8)$$

Her iki denklemde de bulunan sabit parametreler işlemlerin daha rahat yapılabilmesi için Denklem (5.9) ve (5.10)'da yer aldığı gibi ifade edilmiştir.

$$C_1 = R_L^2 + r_{t_k}^2 + r_t^2 + d_t^2 \quad (5.9)$$

$$C_2 = -2\sqrt{r_t^2 + d_t^2} \sqrt{r_{t_k}^2 + R_L^2} \quad (5.10)$$

Elde edilen yeni C_1 ve C_2 sabitleri Denklem (5.7) ve (5.8)'de yerine yazıldığında Denklem (5.11) ve (5.12) eşitlikleri elde edilmektedir.

$$L_1 = \sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 - \alpha)} \quad (5.11)$$

$$L_2 = \sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 + \alpha)} \quad (5.12)$$

Kosinüs teoremi yardımıyla bulunan L_1 ve L_2 uzunlukları yayın uzamış son halini ifade etmesinden dolayı mutlak uzama miktarı olan L_{N1} ve L_{N2} , bu uzunluklardan gerilmemiş yay uzunluğu değerinin çıkarılması sonucu Denklem (5.13) ve (5.14)'te görüldüğü gibi hesaplanmıştır.

$$L_{N1} = \sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 - \alpha)} - L_0 \quad (5.13)$$

$$L_{N2} = \sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 + \alpha)} - L_0 \quad (5.14)$$

Korunumlu bir kuvvetin etkisinde hareket eden bir parçacığın hareket denklemleri, Euler-Lagrange denklemleri şeklinde yazılabilir. Bu sistemin de dinamik hareket denklemlerini elde etmek için içerisinde kinetik ve potansiyel enerjilerinin kullanıldığı Lagrange fonksiyonu kullanılmıştır. Lagrange fonksiyonunun genel prensibi sistemin toplam kinetik enerjisi ile potansiyel enerjisi arasındaki farkın sistem değişkenlerine göre kısmi türevlerinin alınmasına dayanmaktadır. Lagrange fonksiyonu Denklem (5.15) ve (5.16)'da görüldüğü gibi yazılmaktadır.

$$L = T - V \quad (5.15)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = F_i \quad (5.16)$$

Esnek eklemlili robot kol sisteminin toplam kinetik enerjisi (T), tablanın ve çubuğun oluşturdukları kinetik enerjilerin toplamına eşittir. Tablanın kinetik enerjisi dönme açısı (θ), çubuğun kinetik enerjisi ise salınım açısı ve dönme açısının toplamı ($\theta + \alpha$) yardımıyla Denklem (5.17)'de olduğu gibi bulunmaktadır.

$$T = K.E_{\text{tabla}} + K.E_{\text{çubuk}} = \frac{1}{2} J_t \dot{\theta}^2 + \frac{1}{2} J_\zeta (\dot{\theta} + \dot{\alpha})^2 \quad (5.17)$$

Sistemin toplam potansiyel enerjisi (V) ise sadece sisteme esneklik sağlayan yaylardan oluşmaktadır. Yaylarda meydana gelen potansiyel enerji Denklem (5.18)'de verilmiştir.

$$V = PE_{yay} = \frac{1}{2}k(L_{N1})^2 + \frac{1}{2}k(L_{N2})^2 \quad (5.18)$$

$$PE = \frac{1}{2}k\left(C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 + \alpha) - 2L_0\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 + \alpha)} + L_0^2\right) + \frac{1}{2}k\left(C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 - \alpha) - 2L_0\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 - \alpha)} + L_0^2\right) \quad (5.19)$$

Esnek eklemli robot kolunun kontrolü θ ve α 'ya bağılı olarak gerçekleştirildiği için iki Langrange eşitliği oluşmaktadır.

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau - B_m \dot{\theta} \quad (5.20)$$

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\alpha}}\right) - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = 0 \quad (5.21)$$

$$\frac{d}{dt}(J_t \dot{\theta} + J_u (\dot{\theta} + \dot{\alpha})) = \tau - B_m \dot{\theta} \quad (5.22)$$

$$\frac{d}{dt}(J_u (\dot{\theta} + \dot{\alpha})) + \frac{1}{2}(\Gamma_{1\alpha} + \Gamma_{2\alpha}) = 0 \quad (5.23)$$

Denklem (5.21)'de eşitliğin sağ tarafı α 'ya ilişkin herhangi bir tahrik elemanı bulunmadığı için '0' olarak alınmıştır. Denklem (5.20)'de ise döner tablaya bağlı motorun oluşturduğu tork ve sürtünmeden kaynaklanan etki eşitlikte yer almaktadır. Denklem (5.22) ve (5.23) eşitliklerinin çözülmesiyle son olarak Denklem (5.26) ve (5.27) elde edilmektedir.

$$\Gamma_{1\alpha} = \left(\sin(\alpha_0 + \alpha) \left(\frac{L_0}{\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 + \alpha)}} - 1 \right) \right) \quad (5.24)$$

$$\Gamma_{2\alpha} = \left(\sin(\alpha_0 - \alpha) \left(1 - \frac{L_0}{\sqrt{C_1 + C_2 \cos(\alpha_0 - \alpha)}} \right) \right) \quad (5.25)$$

$$J_{\text{çubuk}} (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + J_{\text{tabla}} \ddot{\theta} = \tau - B_m \dot{\theta} \quad (5.26)$$

$$J_{\text{çubuk}} (\ddot{\theta} + \ddot{\alpha}) + \frac{1}{2} k (\Gamma_{1\alpha} + \Gamma_{2\alpha}) = 0 \quad (5.27)$$

Lagrange eşitliklerinin yazılmasından sonra eşitliğin sağ tarafında bulunan motorun ürettiği tork sistemin girişi gerilim (V) şeklinde olduğu için tork-gerilim dönüşüm işleminin yapılması gerekmektedir. DC motora ait gerilim ve akım eşitlikleri Denklem (5.28) 'de verilmiştir.

$$v = iR_m + K_m K_g \omega \quad (5.28)$$

$$i_m = \frac{v - K_m K_g \dot{\theta}}{R_m} \quad (5.29)$$

Tablo 5.1. DC motor denklem parametreleri

Sembol	Açıklama
R_m	Motor direnci
K_m	Motor sabiti,
K_g	Motor dişli oranı
$(\dot{\theta}) \omega$	Motor açısal hızı

Ayrıca akım tork arasındaki ilişki Denklem (5.30) ile ifade edilebilmektedir.

$$i_m = \frac{\tau}{K_t K_g} \quad (5.30)$$

Burada Denklem (5.29) ve (5.30) eşitlikleri kullanılarak gerilim – tork ilişkisi motor verimi (η_m) ve planet dişli verim (η_g) ile birlikte Denklem (5.31) eşitliği ile ifade edilmektedir.

$$\tau = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m} v - \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g^2 K_m}{R_m} \dot{\theta} \quad (5.31)$$

Tork değerinin gerilim ve açısal hız cinsinden ifade edilmesiyle birlikte esnek eklemlili robot kolunun modelinin çıkarılması için gerekli bilgiler tamamlanmış olmaktadır. Sistemin doğrusal olmayan modelinin durum değişkenleri cinsinden yazılması için sistem parametreleri Tablo 5.2'de olduğu gibi ifade edilmiştir

Tablo 5.2. Sistem parametrelerin gösterimi

Sistem Parametresi	Model Parametresi
θ	x1
α	x2
$\dot{\theta}$	x3
$\dot{\alpha}$	x4

$$\dot{x}_1 = x_3 \quad (5.32)$$

$$\dot{x}_2 = x_4 \quad (5.33)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{2} \frac{kC_2}{J_{\text{tabla}}} (\Gamma_{x_2} + \Gamma_{x_2}) + \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m J_{\text{tabla}}} v - \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g^2 K_m + B_m R_m}{R_m J_{\text{tabla}}} x_3 \quad (5.34)$$

$$\dot{x}_4 = -\frac{1}{2} kC_2 (\Gamma_{x_2} + \Gamma_{x_2}) \left\{ \frac{J_{\text{çubuk}} + J_{\text{tabla}}}{J_{\text{çubuk}} J_{\text{tabla}}} \right\} - \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m J_{\text{tabla}}} v + \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g^2 K_m + B_m R_m}{R_m J_{\text{tabla}}} x_3 \quad (5.35)$$

Denklem (5.34) ve (5.35)'de yer alan sabit parametreler durum uzay modelinde daha net ve anlaşılabilir ifade edilmesi için Denklem (5.36) ve (5.37)'de kısaltılmıştır.

$$C_{\dot{\theta}} = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g^2 K_m + B_m R_m}{R_m J_{\text{tabla}}} \quad (5.36)$$

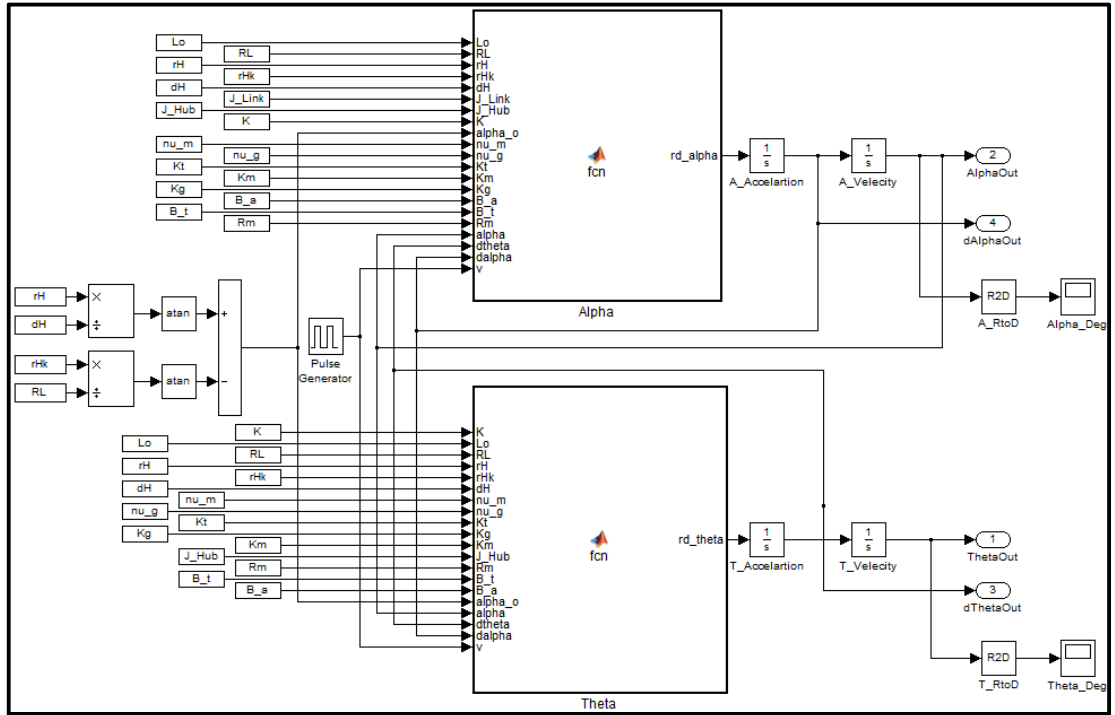
$$C_v = \frac{\eta_m \eta_g K_t K_g}{R_m J_{\text{tabla}}} \quad (5.37)$$

Burada sistem girişi $u = V$, sistem çıkışı tablanın dönme açısı ve çubuğun salınım açısıdır. Buna göre $y = x_1 + x_2$ olarak ifade edilmiştir. Bu durumda sistemin durum uzayı modeli;

$$\dot{x} = f(x) + g(x)u \quad (5.38)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_3 \\ x_4 \\ \frac{1}{2} \frac{kC_2}{J_{tabla}} (\Gamma_{1x_2} + \Gamma_{2x_2}) - C_{\dot{\theta}} x_3 \\ -\frac{1}{2} kC_2 (\Gamma_{1x_2} + \Gamma_{2x_2}) \left\{ \frac{J_{cubuk} + J_{tabla}}{J_{cubuk} J_{tabla}} \right\} + C_{\dot{\theta}} x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ C_v \\ -C_v \end{bmatrix} v \quad (5.39)$$

Sistemin doğrusal olmayan modeline ilişkin elde edilen denklemler Matlab/Simulink ortamına Şekil 5.3'te görüldüğü gibi aktarılmıştır. Modele ilişkin denklemler θ ve α açılara bağlı fonksiyon blokları içerisinde yazılmıştır. Her iki blok çıkışında alınan bilgiler açısal ivme değerleridir.

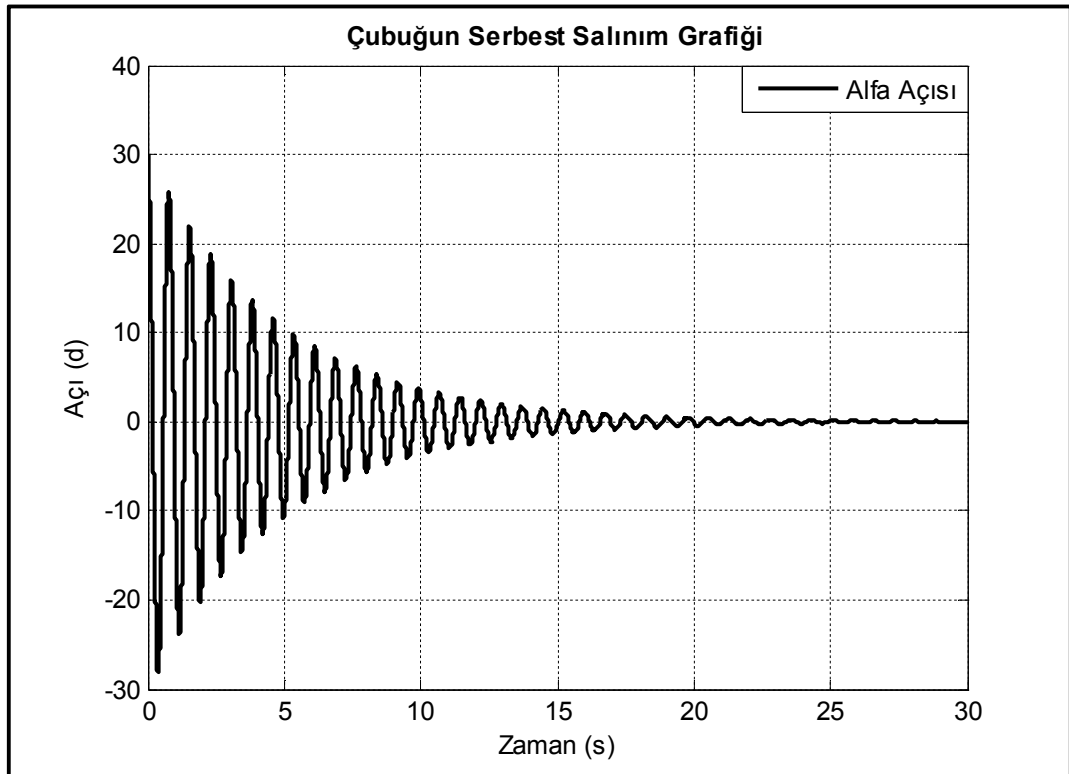


Şekil 5.3. Matlab/Simulink ortamında sistemin doğrusal olmayan modeli

Benzetim ortamında sistemin öncelikle açık çevrim cevapları incelenmiştir. Simulink ortamında sistemin çalışması için öncelikle sistem modelinde yer alan gerekli parametrelerin tanımlanması gerekmektedir. Bu değerler Tablo 5.3'te verilmiştir.

Tablo 5.3. Esnek eklemlı robot kolu sisteminde kullanılan parametre ve değerleri

Sistem Parametreleri	Değer	Birim
α_0	58,731	Derece
J_{tabla}	0,001243	kgm^2
$J_{\text{tablaTop.}}$	0,039	kgm^2
$J_{\text{çubuk}}$	0,0052	kgm^2
k	58,86	N/m
R_m	2,1	Ohm
B_m	0,004	Nsn^2/m
η_m	0,77	-
η_g	0,60	-
K_g	246:1	-
K_m	0,001026	Nm/A
K_t	0,0098	V/rad/sn
L_0	0,0057	m
R_L	0,117	m
r_t	0,015	m
r_{t_k}	0,015	m
d_t	0,02	m
$L_{ubuk}$	0,6	m
$m_{çubuk}$	0,078	kg
m_{tabla}	0,6	kg

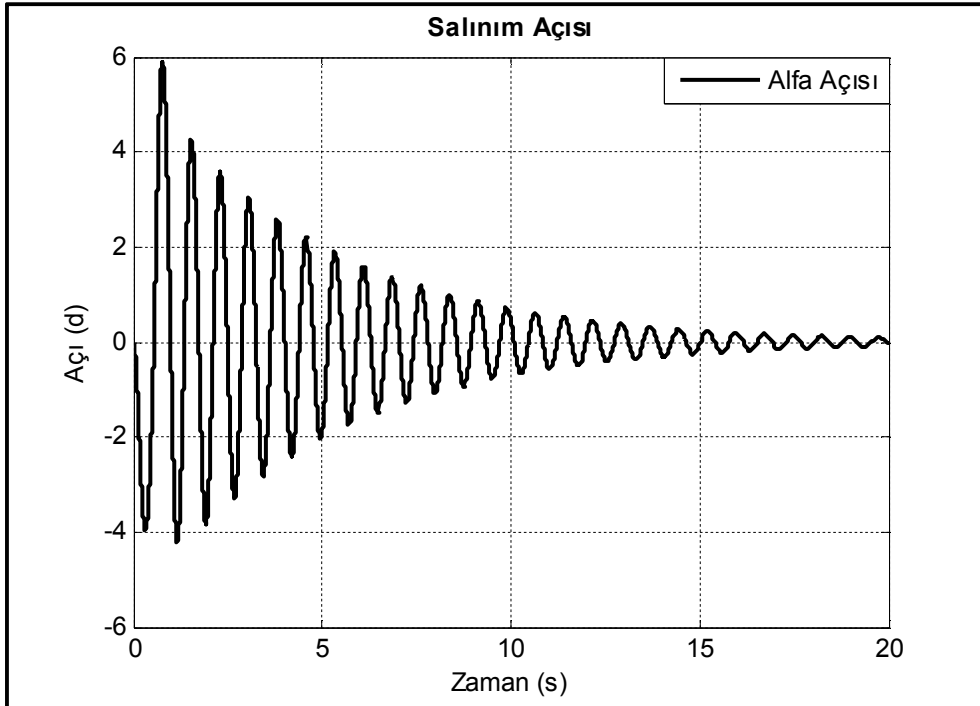


Şekil 5.4. $\alpha = 30^\circ$ başlangıç açısında serbest salınım grafiği

Parametrelerin Simulink ortamında tanımlanmasından sonra sistemin açık çevrim cevapları incelenmiştir. Şekil 5.4'te α açısının başlangıç değerinin 30° olduğu durumda çubuğun serbest salınım grafiği, Şekil 5.5 ve 5.6'da ise darbe fonksiyonu girişine karşı θ ve α açılarının ait sistem cevapları yer almaktadır.



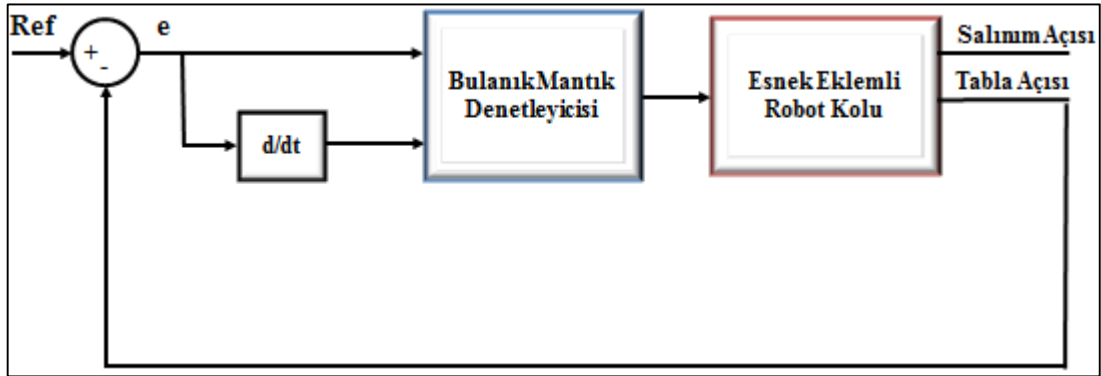
Şekil 5.5. Darbe fonksiyonu girişine karşı θ açısı sistem cevabı



Şekil 5.6. Darbe fonksiyonu girişine karşı α açısı sistem cevabı

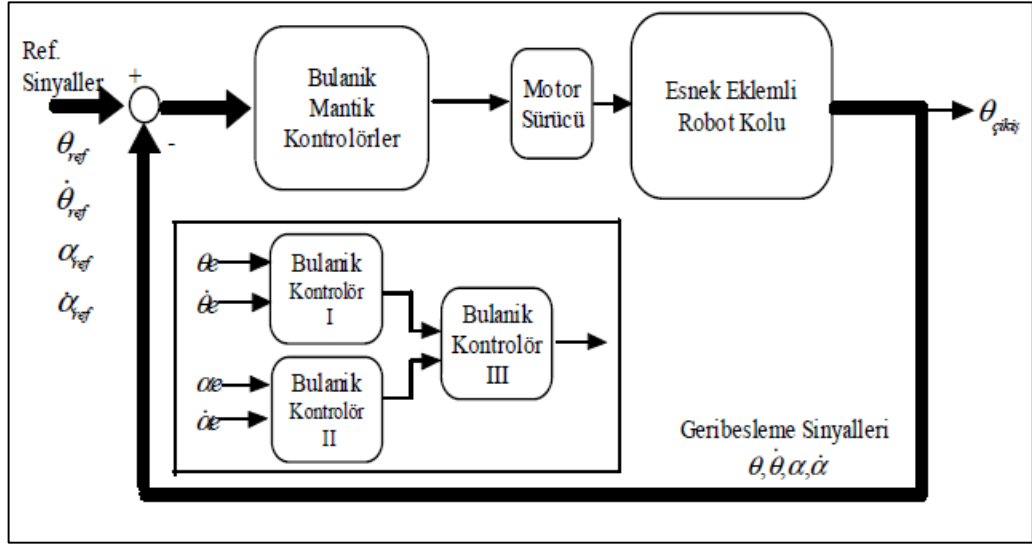
5.1.2. Benzetim ortamında esnek eklemli robot kolunun kontrolü için T1BMD ve T2BMD ile kontrol yapılarının oluşturulması

Kontrol edilecek sistem döner tablanın dönme açısı (θ) ve çubuğun salınım açısı (α) olmak üzere iki girişe, döner tablanın hareketini gerçekleştiren motora gönderilen gerilim sinyali olmak üzere tek çıkışa sahiptir. Ancak editör üzerinde doğrudan iki giriş-tek çıkışa sahip bir denetleyici tasarımı kontrol için yeterli olmayacaktır. Çünkü bu iki giriş değeri de ayrı ayrı kontrol edilmektedir. Döner tablanın açısı verilen referans değerine ulaşmaya çalışırken, salınım açısını da sıfır derecede tutulmaktadır. Esnek eklemli robot kolu kontrolü için farklı tip bulanık mantık denetleyici yapısı oluşturulabilmektedir. Mohd Ashraf Ahmad ve arkadaşları [35] Şekil 5.7’de görüldüğü gibi salınım açısını kullanmadan sadece döner tablanın açısı ve açının türevini kullanarak iki giriş tek çıkış üzerinden esnek eklemli robot kolunun kontrolünü gerçekleştirmiştir.



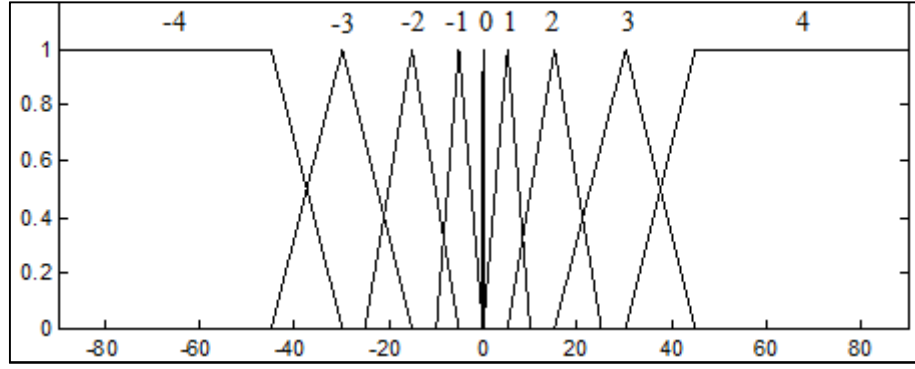
Şekil 5.7. Esnek eklemli robot kolu kontrol blok diyagramı

Yukarıdaki sistemden farklı olarak salınım açısını da kullanarak bir denetleyici yapısı oluşturulduğu zaman iki açı değeri ve bu açı değerinin değişimlerini görmek için türevlerinin alınmasıyla sistem 4 giriş tek çıkışa sahip bir sisteme dönüşmektedir. Döner tablanın açısı ve salınım açısını kullanarak İsmail Hakkı Akyüz [36] Şekil 5.8’de gösterildiği gibi kademeli bulanık mantık denetleyicileri ile sistemin kontrolünü gerçekleştirmiştir.

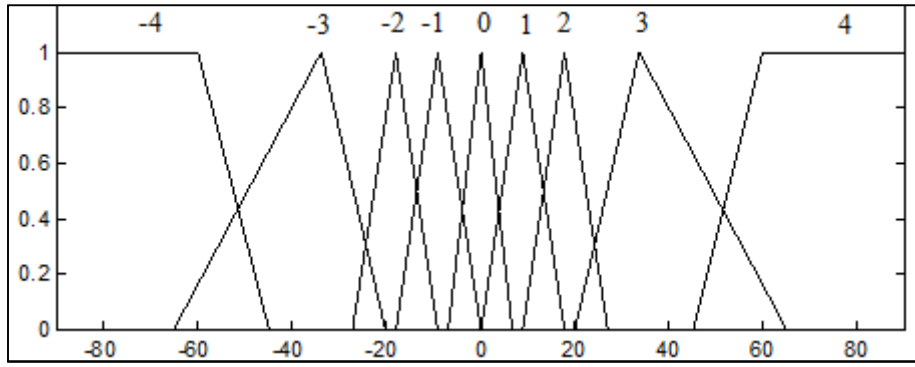


Şekil 5.8. Esnek eklemlı robot kolu kontrol blok diyagramı

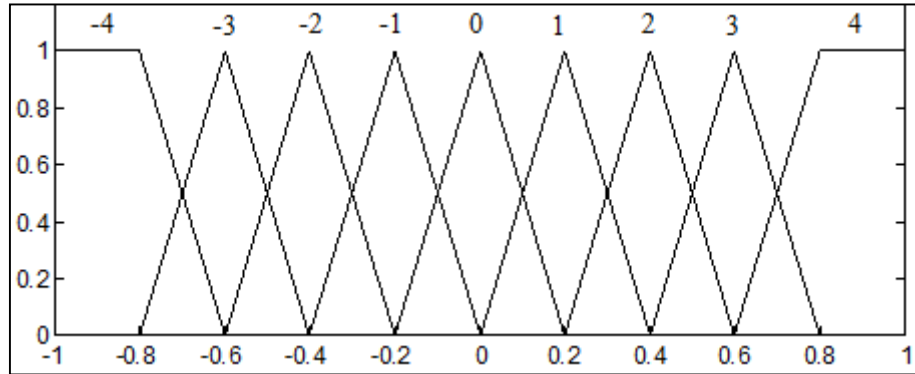
Bu çalışma kapsamında ardışık T2BM denetleyicileri ile Şekil 5.8’de yer alan yapıda bir denetleyici yapısı oluşturulmuş ve sistemin kontrolü gerçekleştirilmiştir. Esnek eklemlı robot kolu sisteminin kontrolünü gerçekleştirmek için editör üzerinde iki giriş tek çıkışa sahip 3 farklı denetleyici tasarlanmıştır. Bu denetleyicilerden ikisi tablanın dönme açısı ve salınım açısı için diğeri ise bu iki denetleyicilerin çıkışlarının giriş olarak bağlandığı motorun hareketi için gerekli gerilim sinyalini belirlemek için kullanılmıştır. Sistemin kontrolünde kullanılan kademeli T2BMD performansı, İsmail Hakkı Akyüz’ün [36] gerçekleştirdiği çalışmada yer alan kademeli T1BMD ile karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın aynı şartlarda olması için tip-2 üyelik fonksiyonlarının bulanıklık aralıkları, tip-1 üyelik fonksiyonlarının sınırları içerisinde oluşturulmuştur. T1BMD tasarımları Matlab/FIS (Fuzzy Inference System) editöründe, T2BMD tasarımları ise tip-2 bulanık mantık editöründe yapılmıştır. Şekil 5.9 - 5.11’de θ açısının hatası ve hatadaki değişimin giriş olarak belirlendiği birinci T1BMD’ye ait üyelik fonksiyonları, Şekil 5.12 - 5.14’te ise birinci T2BMD’ye ait üyelik fonksiyonları yer almaktadır.



Şekil 5.9. Döner tabla açısı (θ) hatasının tip-1 üyelik fonksiyonları



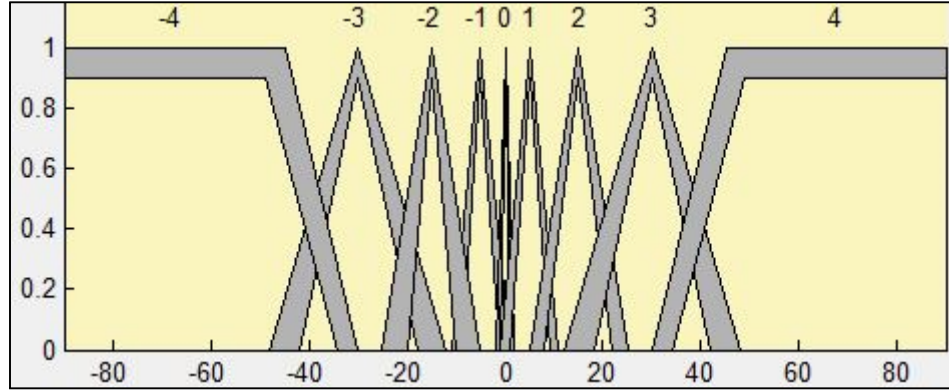
Şekil 5.10. Döner tabla açısı (θ) hatasının değişiminin tip-1 üyelik fonksiyonları



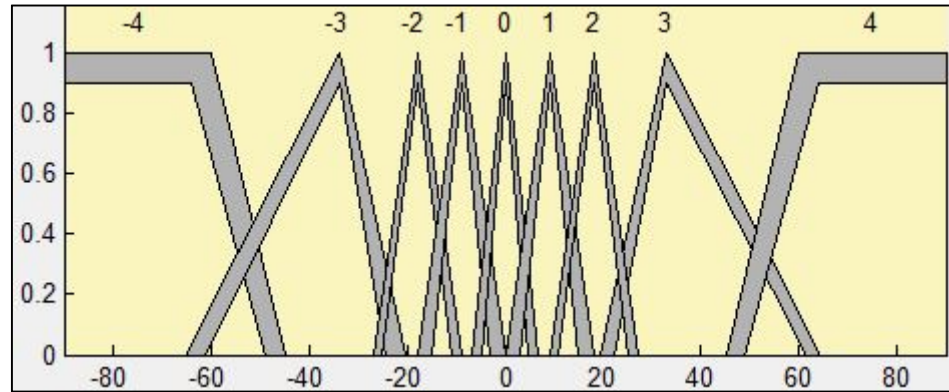
Şekil 5.11. Tip-1 çıkış üyelik fonksiyonları

Burada tip-1 giriş üyelik fonksiyonları $[-90\ 90]$, çıkış üyelik fonksiyonu ise $[-1\ 1]$ değer aralığında $[-4\ -3\ -2\ -1\ 0\ 1\ 2\ 3\ 4]$ dilsel etiketli olarak oluşturulmuştur. Tip-2 giriş üyelik fonksiyonları da aynı şekilde $[-90\ 90]$, çıkış üyelik fonksiyonu ise yine $[-1\ 1]$ değerleri arasında oluşturulmuştur. Fakat tip-1 üyelik fonksiyonlarından farklı olarak tip-2 üyelik fonksiyonları alt ve üst olmak üzere iki üyelik fonksiyonundan oluştuğu için 'h' yüksekliği belirtilmelidir. Alt üyelik fonksiyonlarının 'h' yüksekliği (maksimum üyelik derecesi) bütün üyelik fonksiyonları için 0.9 olarak alınmıştır.

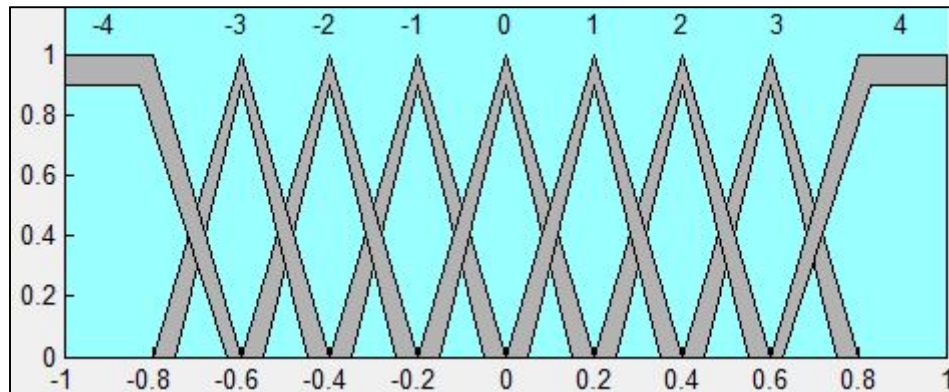
Bulanıklık değerleri ise her üyelik fonksiyonu için farklılık gösterebilmektedir. Sistem girişlerine ait ayrı ayrı dokuzar tane üyelik fonksiyonu mevcut olduğu için buna bağlı olarak 81 kural Tablo 5.4'te gösterilen kural tablosuna göre 've' bağlacı kullanılarak yazılmıştır. Tüm T2BMD ve T1BMD tasarımlarında kurala bağlı çıkarım işlemleri 'minimum' yöntemi ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.12. Döner tabla açısı (θ) hatasının tip-2 üyelik fonksiyonları



Şekil 5.13. Döner tabla açısı (θ) hatasının değişiminin tip-2 üyelik fonksiyonları

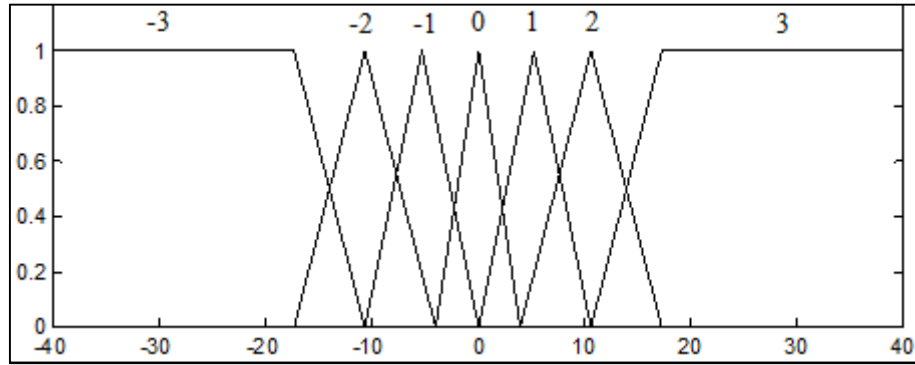


Şekil 5.14. Tip-2 çıkış üyelik fonksiyonları

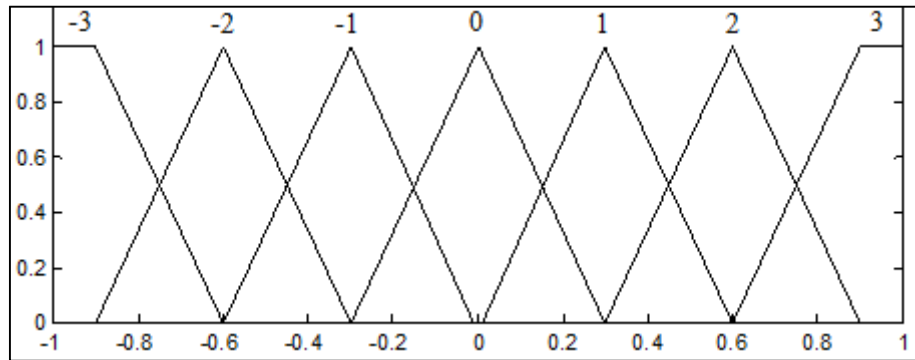
Tablo 5.4. Döner tabla açısına (θ) ilişkin kural tablosu

		θ Açısının Hatası								
		-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4
θ Açısının Hatasının Türevi	-4	4	4	4	3	3	2	2	1	0
	-3	4	4	3	2	3	2	1	0	-1
	-2	4	3	3	2	2	1	0	-1	-2
	-1	3	3	2	1	1	0	-1	-2	-2
	0	3	2	2	1	0	-1	-2	-2	-3
	1	2	2	1	0	-1	-1	-2	-3	-3
	2	2	1	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4
	3	1	0	-1	-2	-3	-2	-3	-4	-4
	4	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-4	-4

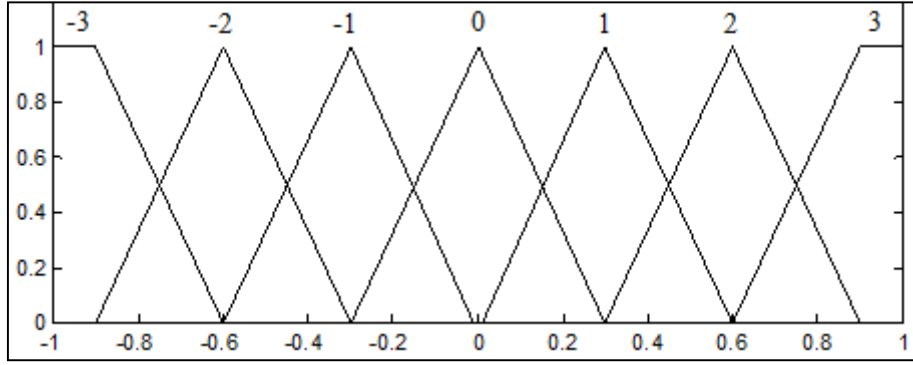
Şekil 5.15 - 5.17'de θ açının hatası ve hatadaki değişimin giriş olarak belirlendiği ikinci T1BMD, Şekil 5.18 - 5.20'de ise ikinci T1BMD'ye ait üyelik fonksiyonları yer almaktadır.



Şekil 5.15. Salınım açısı (α) hatasına ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları

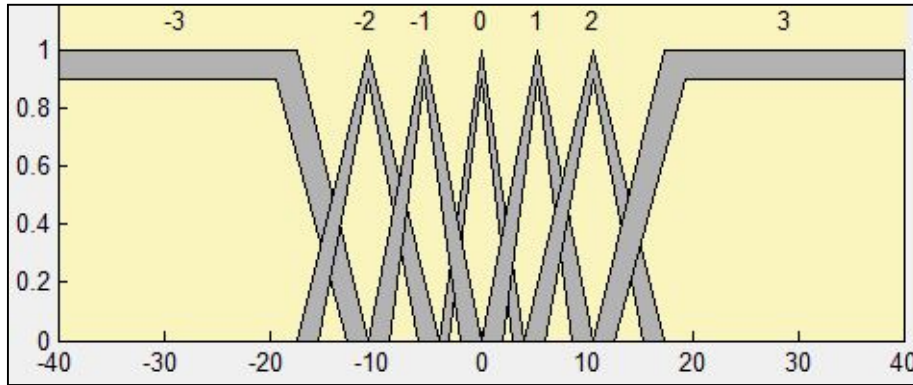


Şekil 5.16. Salınım açısı (α) hatasının değişimine ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları

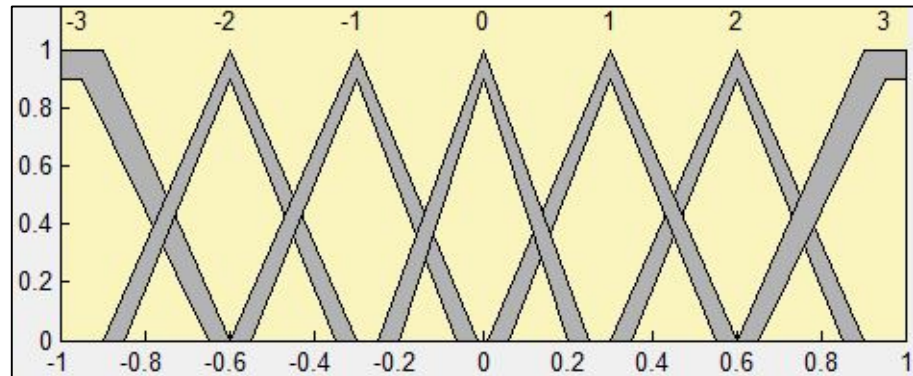


Şekil 5.17. Tip-1 çıkış üyelik fonksiyonları

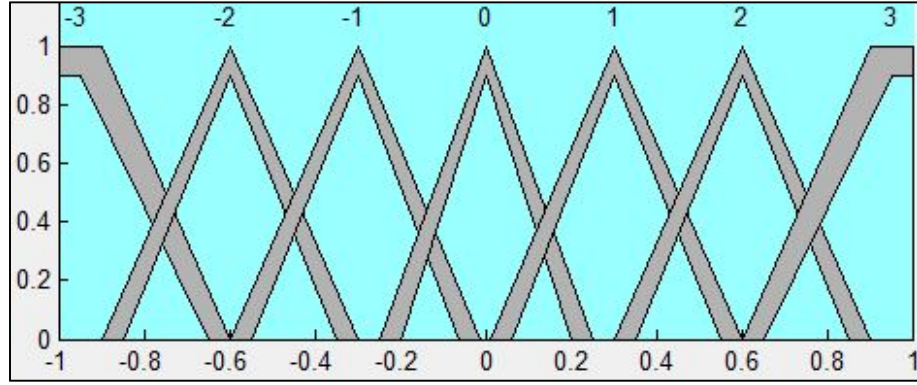
Salınım açısına ilişkin ikinci T1BMD ve T2BMD'ye ait giriş üyelik fonksiyonları salınım açısı $[-40 \ 40]$ ve salınım açısı hatasındaki değişim $[-1 \ 1]$, çıkış üyelik fonksiyonu ise $[-1 \ 1]$ değer aralığında $[-3 \ -2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3]$ dilsel etiketli olarak oluşturulmuştur. Sistem girişlerine ait ayrı ayrı yedişer tane üyelik fonksiyonu mevcut olduğu için buna bağlı olarak 49 kural T1BMD ve T2BMD için de Tablo 5.5'te gösterilen kural tablosuna göre yazılmıştır.



Şekil 5.18. Salınım açısı (α) hatasına ilişkin tip-2 üyelik fonksiyonları



Şekil 5.19. Salınım açısı (α) hatasının değişimine ilişkin tip-2 üyelik fonksiyonları

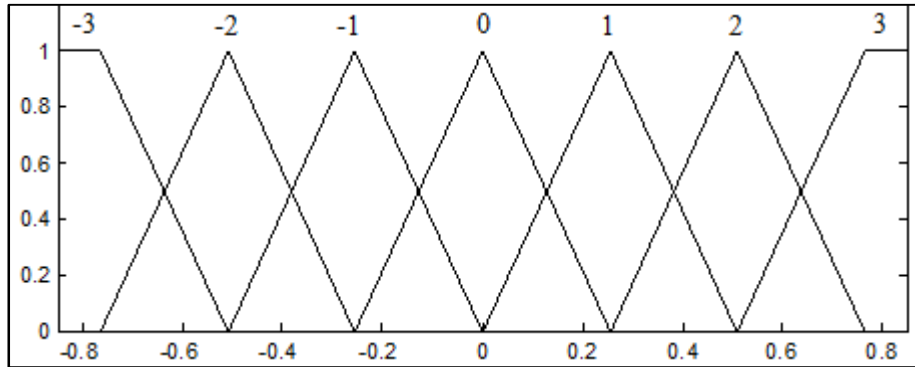


Şekil 5.20. Tip-2 çıkış üyelik fonksiyonları

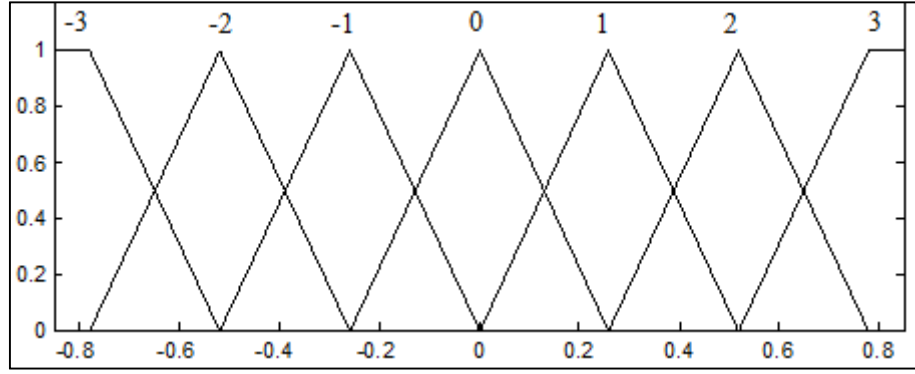
Tablo 5.5. Salınım açısına (α) ilişkin kural tablosu

		α Açısının hatası						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
α Açısının hatasının türevi	-3	3	3	2	2	1	1	0
	-2	3	2	2	1	1	0	-1
	-1	2	2	1	1	0	-1	-1
	0	2	1	1	0	-1	-1	-2
	1	1	1	0	-1	-1	-2	-2
	2	1	0	-1	-1	-2	-2	-3
	3	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3

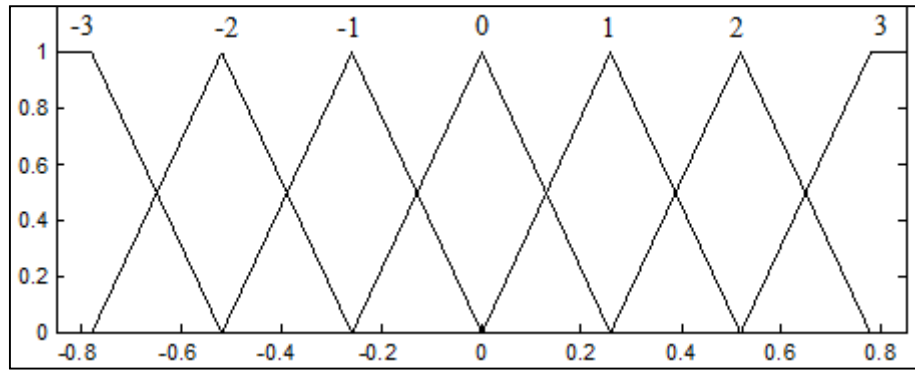
Şekil 5.21 - 5.23'te θ açısına ait T1BMD ve α açısına ait T1BMD'nin çıkışının giriş olarak belirlendiği üçüncü T1BMD, Şekil 5.24 - 5.26'da ise θ açısına ait T2BMD ve α açısına ait T2BMD'nin çıkışının giriş olarak belirlendiği üçüncü T2BMD'ye ait üyelik fonksiyonları yer almaktadır.



Şekil 5.21. θ Açısına ait denetleyicinin çıkışına ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları

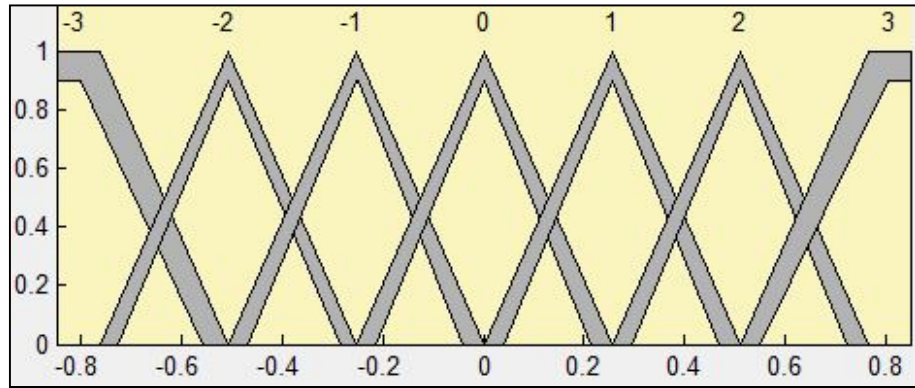


Şekil 5.22. α Açısına ait denetleyicinin çıkışına ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları

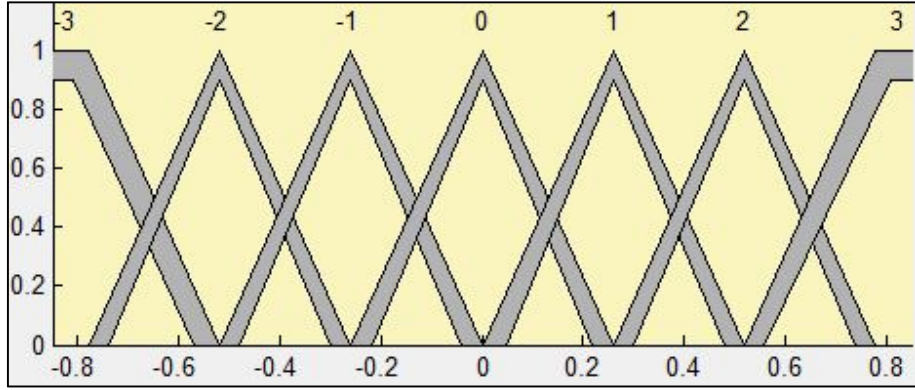


Şekil 5.23. Tip-1 Motor gerilim üyelik fonksiyonları

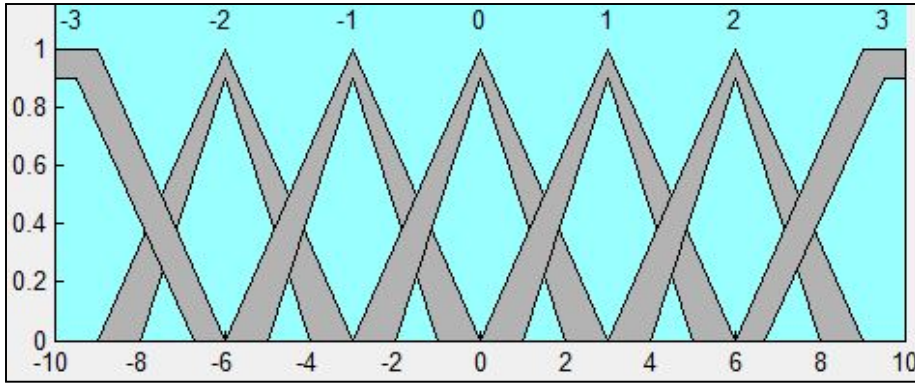
Motor geriliminin belirleneceği üçüncü T1BMD ve T2BMD'ye ait giriş üyelik fonksiyonları $[-1 \ 1]$, çıkış üyelik fonksiyonu ise $[-10 \ 10]$ değer aralığında $[-3 \ -2 \ -1 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3]$ dilsel etiketli olarak oluşturulmuştur. Sistem girişlerine ait ayrı ayrı yedişer tane üyelik fonksiyonu mevcut olduğu için buna bağlı olarak 49 kural her iki denetleyici için de Tablo 5.6'da gösterilen kural tablosuna göre yazılmıştır.



Şekil 5.24. θ Açısına ait denetleyicinin çıkışına ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları



Şekil 5.25. α Açısına ait denetleyicinin çıkışına ilişkin tip-1 üyelik fonksiyonları

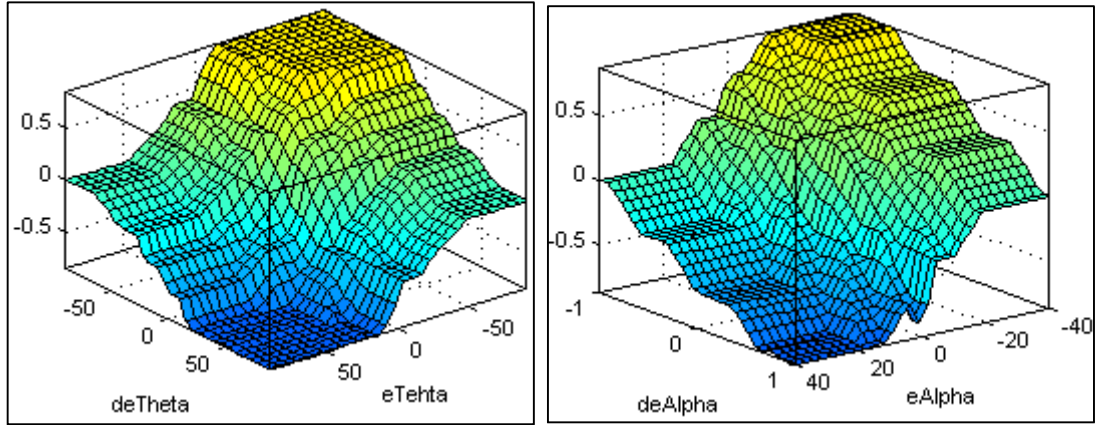


Şekil 5.26. Tip-2 Motor gerilim üyelik fonksiyonları

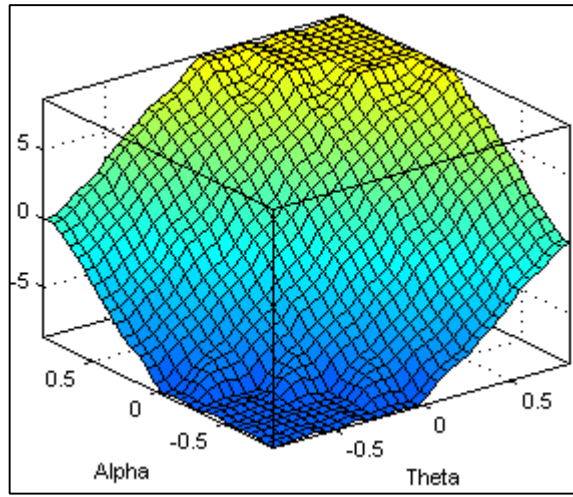
Tablo 5.6. Motor gerilimine ilişkin kural tablosu

		α						
		-3	-2	-1	0	1	2	3
α Açısının hatasının türü	-3	-3	-3	-3	-2	-2	-1	0
	-2	-3	-3	-2	-2	-1	0	1
	-1	-3	-2	-2	-1	0	1	2
	0	-2	-1	0	0	0	1	2
	1	-2	-1	0	1	2	2	3
	2	-1	0	1	2	2	3	3
	3	0	1	2	2	3	3	3

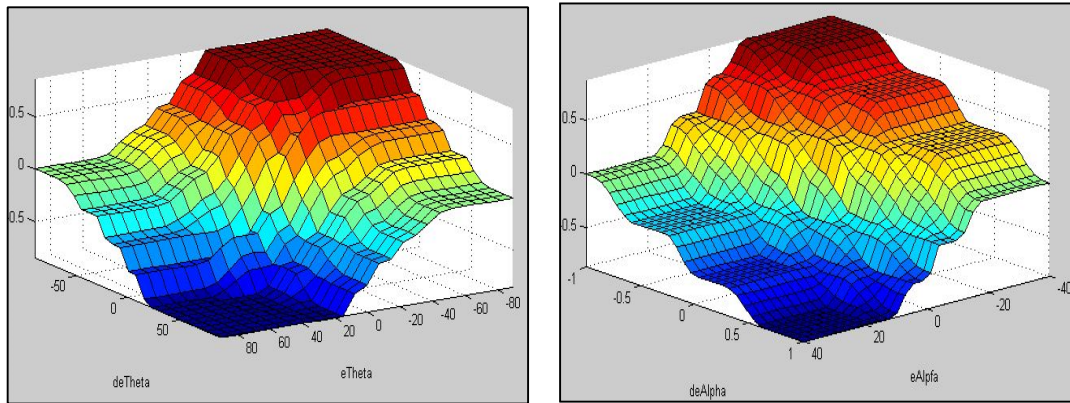
T1BMD ve T2BMD için oluşturulan tip-1 / tip-2 üyelik fonksiyonları ve kurallar doğrultusunda her giriş değerinden 30'ar örnek alınarak elde edilen yüzey grafikleri sırasıyla Şekil 5.27-5.28 ve Şekil 5.29-5.30'da gösterilmiştir.



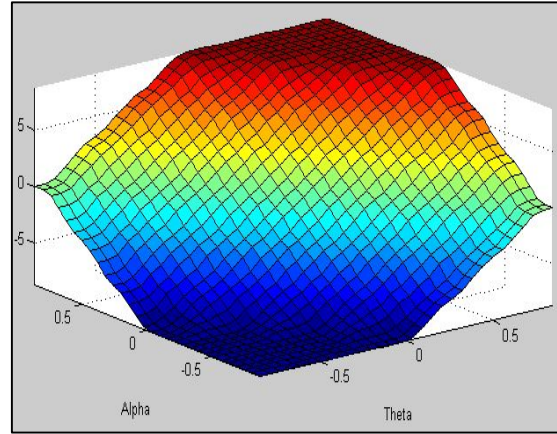
Şekil 5.27. Birinci ve ikinci T1BMD yüzey grafiği



Şekil 5.28. Üçüncü T1BMD yüzey grafiği



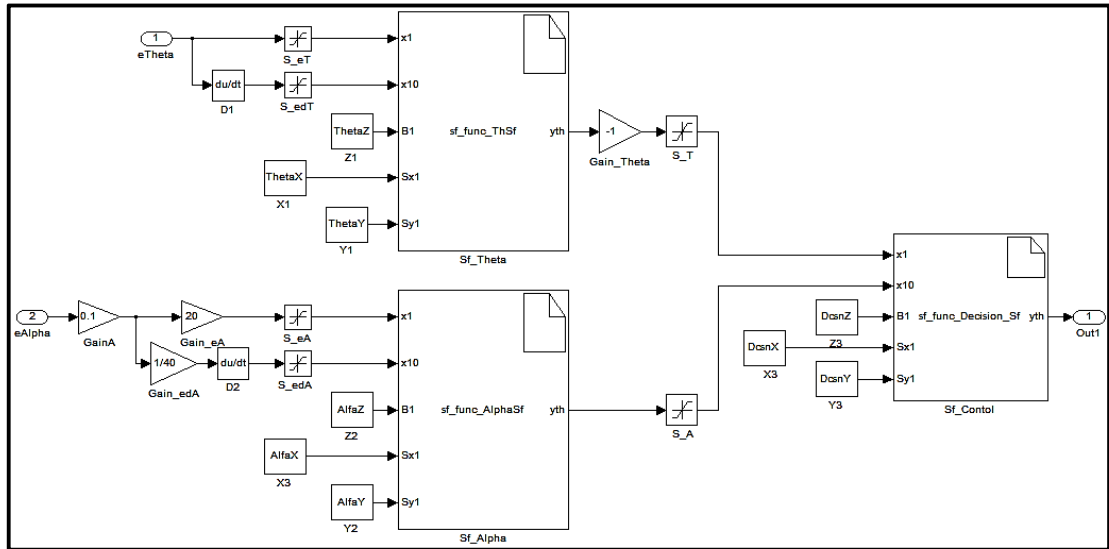
Şekil 5.29. Birinci ve ikinci T2BMD yüzey grafiği



Şekil 5.30. Üçüncü T2BMD yüzey grafiği

5.1.3. Esnek eklemlı robot kolunun T1BMD ve T2BMD ile yörünge takibi benzetim sonuçları

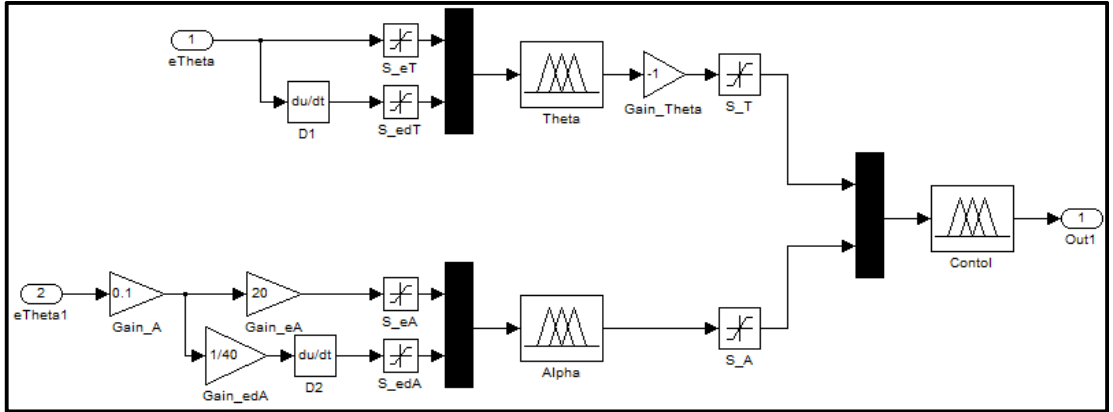
Bu bölümde, tip-2 bulanık mantık ve Matlab/FIS editöründe tasarımları gerçekleştirilen her iki denetleyicinin Simulink ortamında farklı yörünge takipleri için kontrol performansları karşılaştırılmıştır. Simulink'te her iki denetleyici ile oluşturulan kontrol yapıları Şekil 5.31 ve 5.32'de verilmiştir.



Şekil 5.31. Matlab/Simulink kademeli T2BMD kontrol yapısı

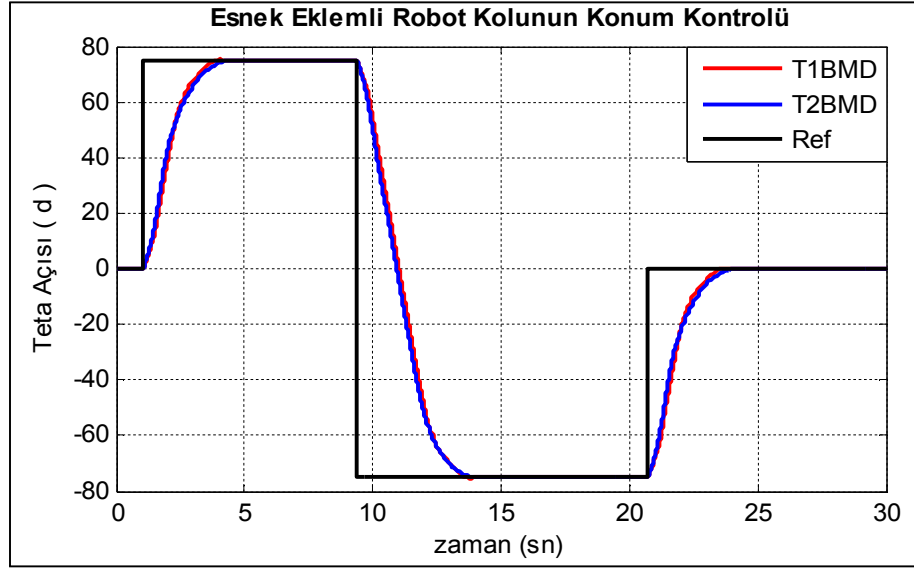
Tip-2 bulanık mantık sisteminde işlem yükünün fazla olması nedeniyle esnek eklemlı robot kolunun kontrolü editörden her giriş değeri için 1000'er örnek alınarak oluşturulan çözüm kümesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simulink ortamında kademeli T2BMD kontrol yapısı içerisinde üç denetleyici içinde S-fonksiyon (S-

function) bloğu oluşturulmuştur. Matlab kodları ile yazılan fonksiyon blokları benzetim esnasında daha yavaş çalışmasından dolayı C++ tabanlı S-fonksiyon blokları kullanılmıştır. S-function içerisinde yer alan kodlar Ek-A'da verilmiştir. Bloklarda 5 giriş - 1 çıkış portu bulunmaktadır. İlk iki giriş (x_1, x_{10}) sistemden alınan giriş değerleri, diğer 3 giriş (B_1, S_{x1}, S_{y1}) ise editörde 2 giriş tek çıkış olarak oluşturulan sistemler için girişlerden 1000'er örnek alınarak elde edilen çözüm kümesine ait dosyalardır. Bloкта B_1 portu çözüm kümesi, S_{x1} ve S_{y1} portu ise editörde örneklenmiş giriş değerleridir. S-Fonksiyon blokları içerisinde, sistemden alınan giriş ifadelerinin editörde oluşturulan örneklenmiş giriş değerleri içerisinde hangi değerlere karşılık geldiği tespit edilmekte ve sonrasında bu değerler kullanılarak çözüm kümesinden çıkış alınmaktadır.

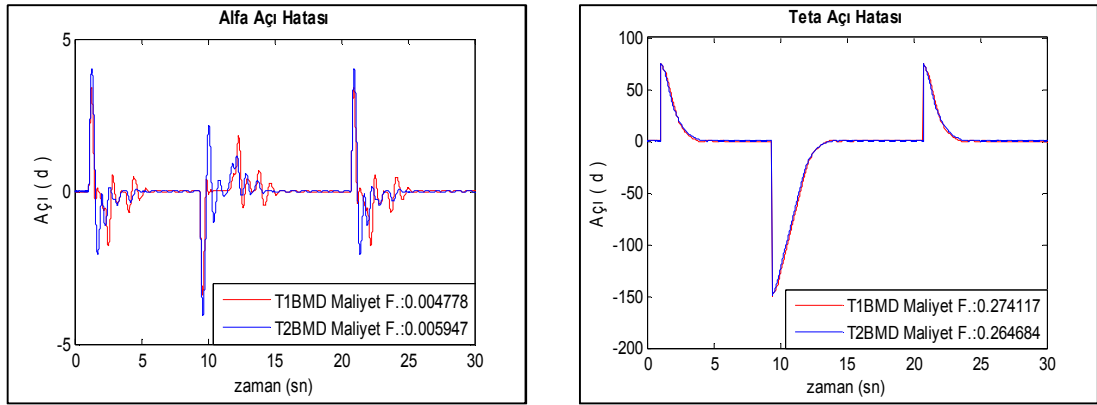


Şekil 5.32. Matlab/Simulink kademeli T1BMD kontrol yapısı

Kademeli tip-1 kontrol yapısı için ise Simulink ortamında FIS editöründe tasarlanan denetleyiciler Şekil 5.32'de yer aldığı gibi bulanık mantık blokları ile çağrılmıştır. Esnek eklemli robot kolunun matematiksel modeli çıkarılmış, sistem parametreleri tanımlanmış ve denetim yapıları oluşturulmuştur. Benzetim (Simulink) ortamında sisteme ideal şartlar ve bozucu etkiler altında farklı girişler (birim basamak, sinüzoidal) uygulanarak kademeli T1BMD ve T2BMD kontrol yapılarının performansları karşılaştırılmıştır.

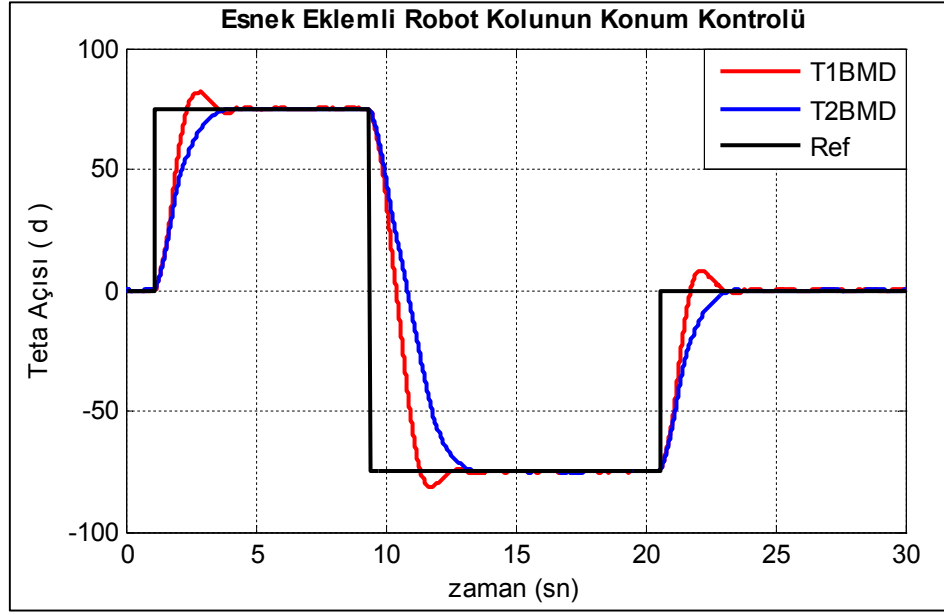


Şekil 5.33. Birim basamak sistem cevapları

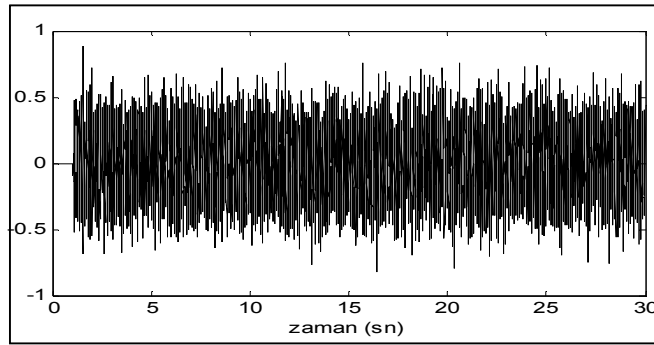


Şekil 5.34. Birim basamak girişi için α ve θ ve açı hataları

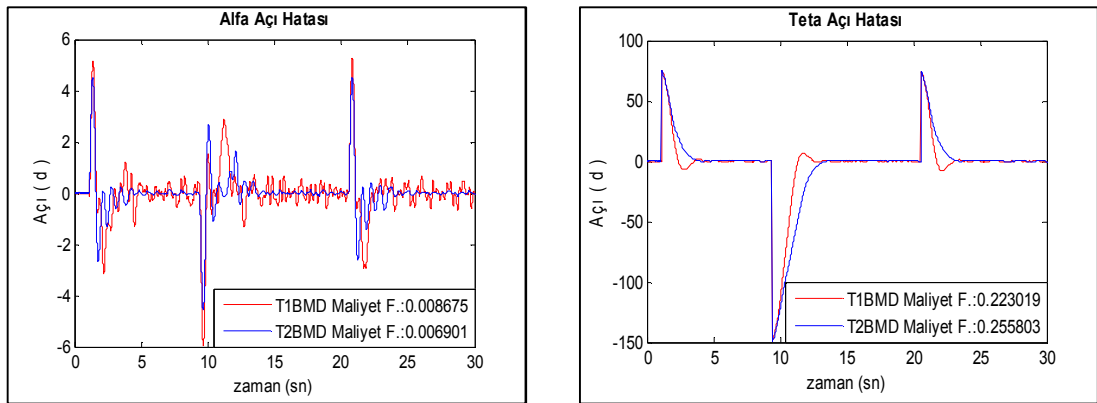
Yapılan birim basamak yörünge takibi benzetim sonucunda T1BMD ve T2BMD kontrol yapılarının performanslarının Şekil 5.35-5.36'da görüldüğü gibi birbirlerine çok yakın olduğu görülmüştür. Benzetim sonuçlarına ilişkin grafiklerde yer alan maliyet fonksiyonu değerleri $\sqrt{\sum (xe)^2} / N$ kistasına göre hesaplanmıştır. Tip-2 bulanık mantık denetim yapısının gürültü ve bozucu etkiler altında daha tip-1 bulanık mantık denetim yapısına göre daha iyi sonuçlar verdiği literatürde tip-2/tip-1 karşılaştırmalarının yer aldığı çalışmalarda görülmüştür. Bu kapsamda esnek eklemlili robot kolunun benzetim ortamında gürültü sinyali ve bozucu etki altında T1BMD ve T2BMD kontrol performansları karşılaştırılmıştır.



Şekil 5.35. Gürültü sinyali etkisi altında birim basamak sistem cevapları

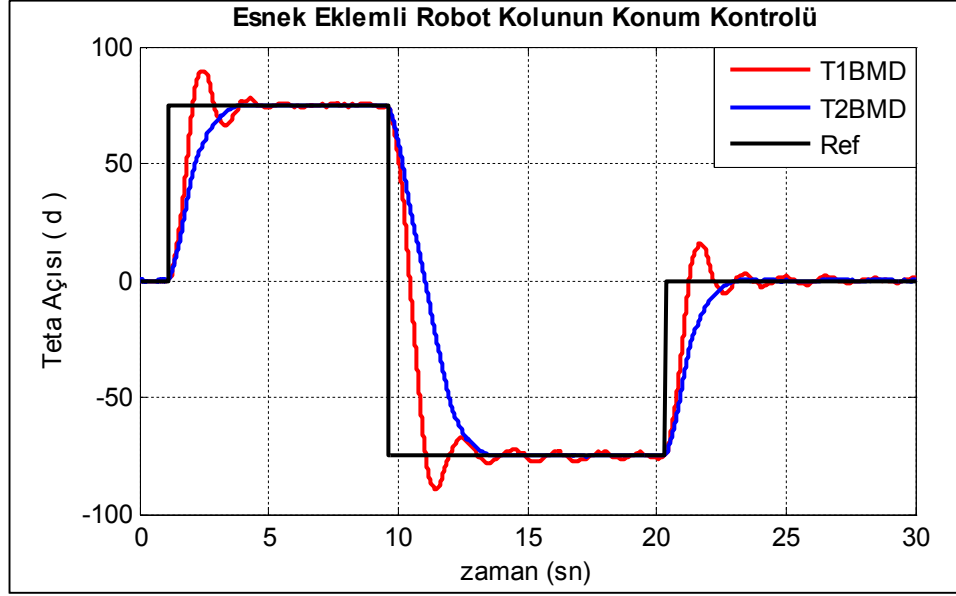


Şekil 5.36. Gürültü sinyali

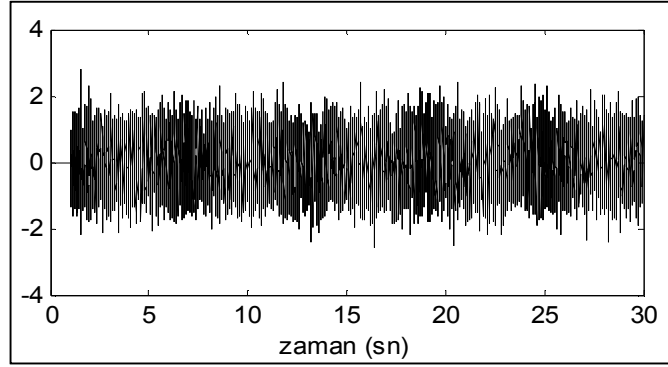


Şekil 5.37. Gürültü sinyali etkisi altında birim basamak girişi için θ ve α açı hataları

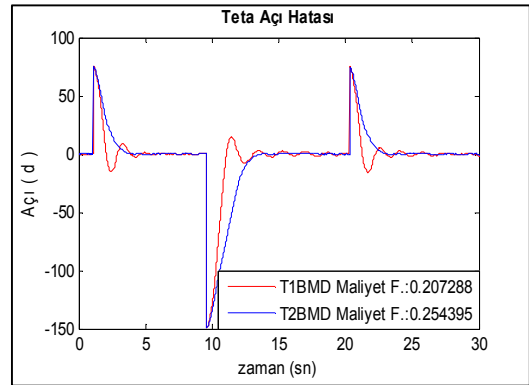
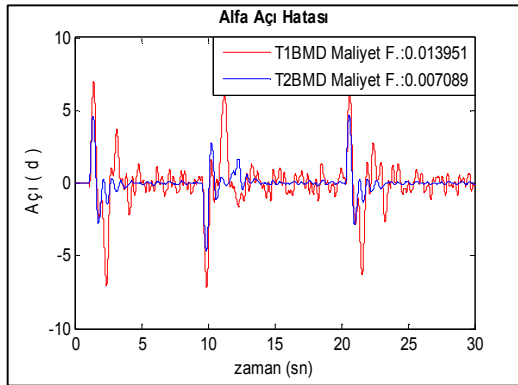
Gürültü sinyali etkisi altında birim basamak yörünge takibi sonuçları Şekil 5.35-5.37'de verilmiştir. Gürültü sinyalinin etkisinin artırılması sonucunda elde edilen sonuçlar ise Şekil 5.38-5.40'ta görüldüğü gibidir.



Şekil 5.38. Yüksek gürültü sinyali etkisi altında birim basamak sistem cevapları



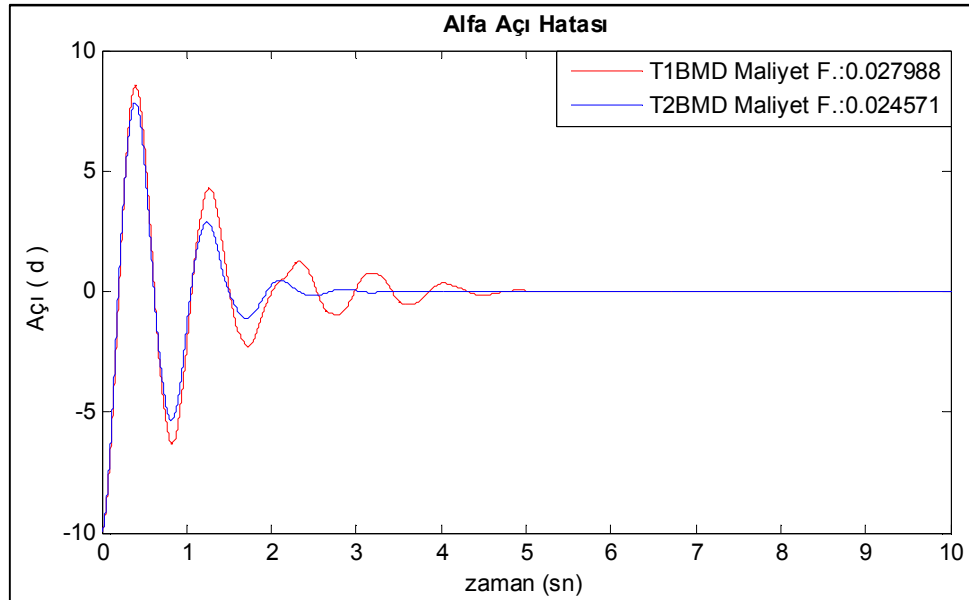
Şekil 5.39. Yüksek gürültü sinyali



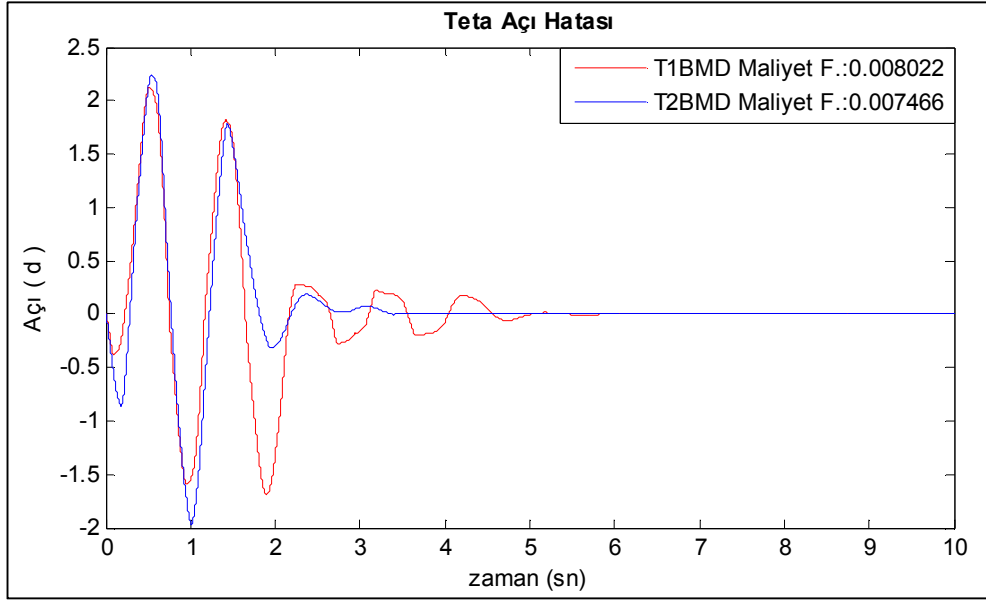
Şekil 5.40. Yüksek gürültü sinyali etkisi altında birim basamak girişi için θ ve α açı hataları

Gürültü sinyali etkisi altında elde edilen sonuçlar incelendiğinde tip-2 bulanık mantık denetleyicisinin daha kararlı sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Konum kontrolündeki bu kararlılık salınım açısının daha az olmasına da sağlamıştır. Gürültü sinyali etkisi ile tip-1 denetleyici daha hızlı sonuç vermiş ama hedeflenen konumu da aşmıştır. Aşımdan sonra hedefe ulaşmak için ters yönde kontrol sağlamaya çalıştığı içinde salınım daha fazla olmuştur. Tip-2 denetleyicisinde ise yükselme zamanı tip-1'e göre daha fazla olmuş fakat her iki gürültü etkisinde de hedeflenen konumu geçmediği görülmüştür. Tip-2 denetleyicide yükselme zamanının daha fazla olması θ açısı hatası maliyet fonksiyonunun tip-1'e göre biraz fazla olmasına sebep olmuştur ancak sonuçlar incelendiğinde aşım ve oturma zamanı sürelerinin daha iyi olduğu görülmektedir. Bununla birlikte tip-2 denetleyici hedeflenen konum ve salınım açısına daha uygun sonuçlar vermiştir.

Gürültü sinyali dışında sisteme bozucu etki uygulanmıştır. Benzetim ortamında bu etki α açısına 10° başlangıç durumu vererek sağlanmıştır. Bu etki esnek eklemlili robot kolu sıfır konumunda dururken bir anda dışarıdan çubuğa 10° 'lik salınım yapıtacak bir kuvvet uygulanması anlamına gelmektedir. Bu bozucu etki sonucunda elde edilen sonuçlar Şekil 5.43 ve 5.44'te yer almaktadır.

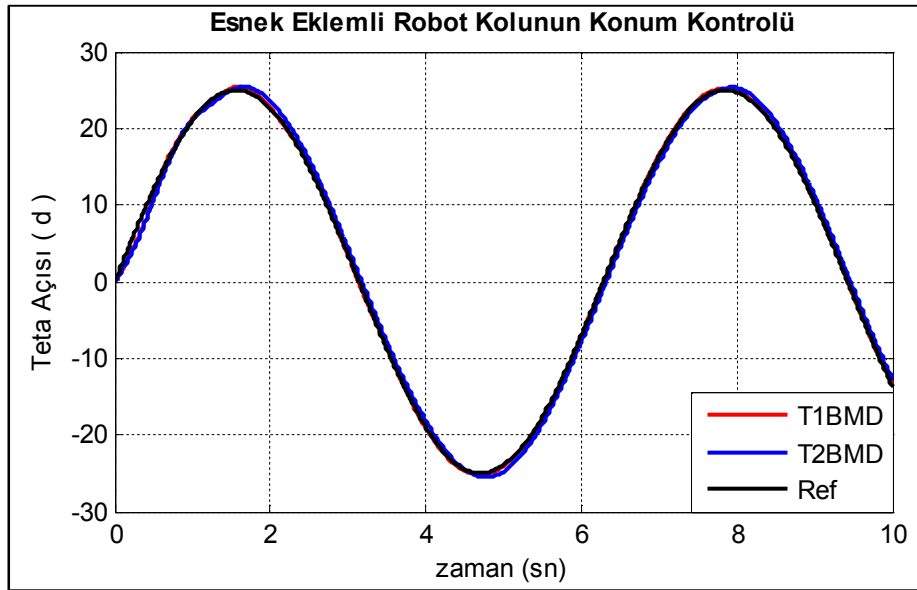


Şekil 5.41. Bozucu giriş karşısında salınım (α) açısı hatası

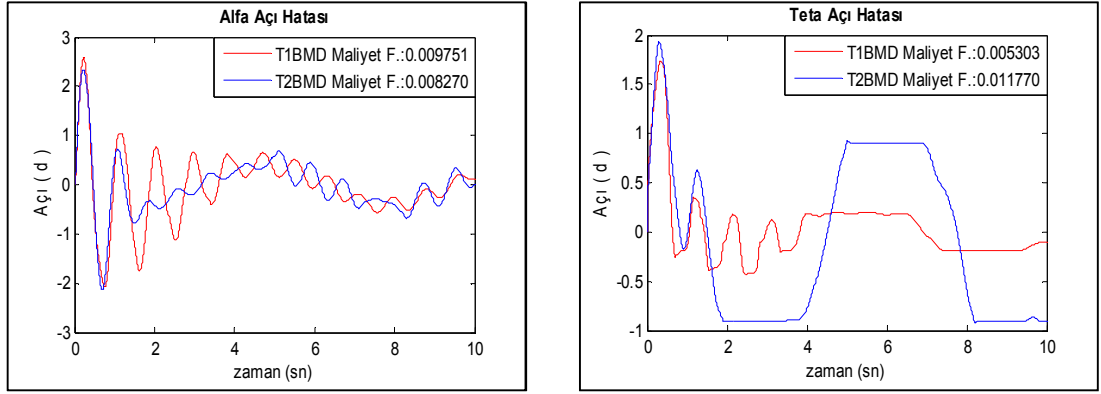


Şekil 5.42. Bozucu giriş karşısında θ açısı hatası

Bozucu etki altında alınan sonuçlar incelendiğinde tip-1 denetleyicinin tip-2 denetleyiciye göre salınım açısını daha yavaş sönümlendiği görülmektedir. Salınımı azaltmak için çubuğun bağlı olduğu tablayı daha uygun hareket ettirmesinden dolayı tip-2 denetleyicinin daha hızlı sonuç verdiği sonucuna θ 'nın hata grafiğinden varılabilmektedir. Birim basamak yörünge takibine ek olarak sinüzoidal yörünge takibi için tip-1 / tip-2 kontrol performans karşılaştırmaları yapılmıştır.

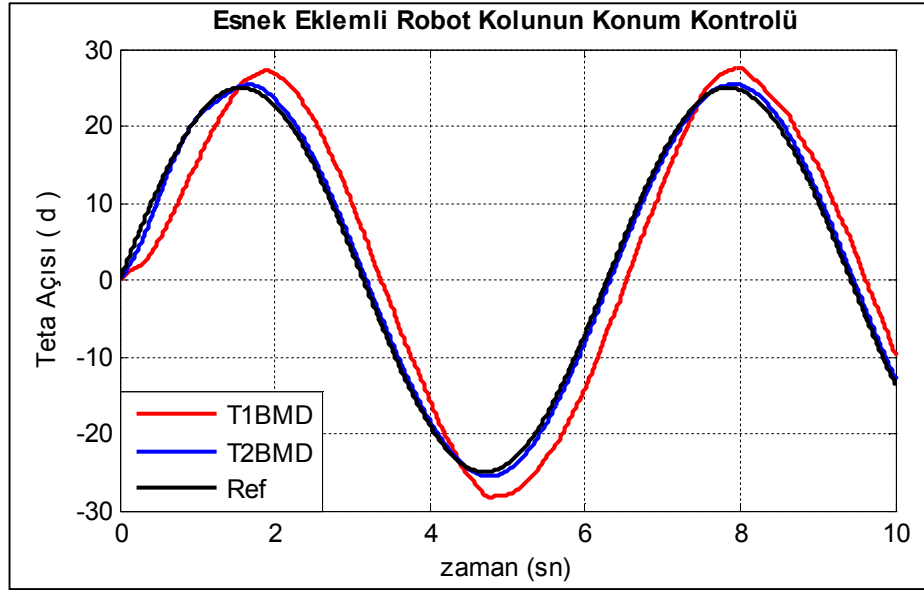


Şekil 5.43. Sinüzoidal yörünge takibi sistem cevapları

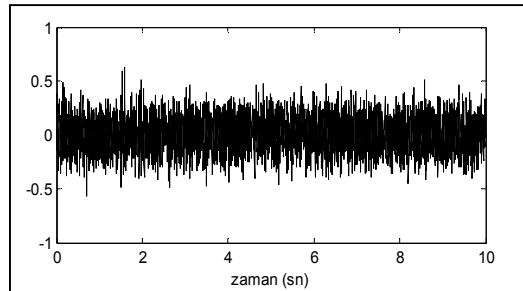


Şekil 5.44. Sinüzoidal yörünge takibi için θ ve α açı hataları

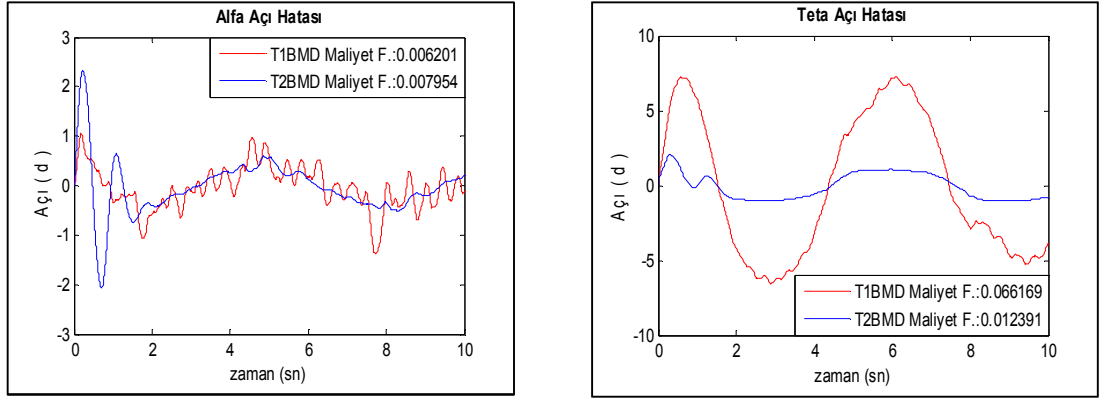
İdeal şartlardaki birim basamak sistem cevaplarında olduğu gibi sinüzoidal yörünge takibi benzetim sonuçlarında da her iki denetleyici benzer sonuçlar vermiştir. Bozucu etkiler altında sinüzoidal yörünge takibi sonuçlarını görmek için gürültü eklenmiş ve denetleyicilerin performansları karşılaştırılmıştır.



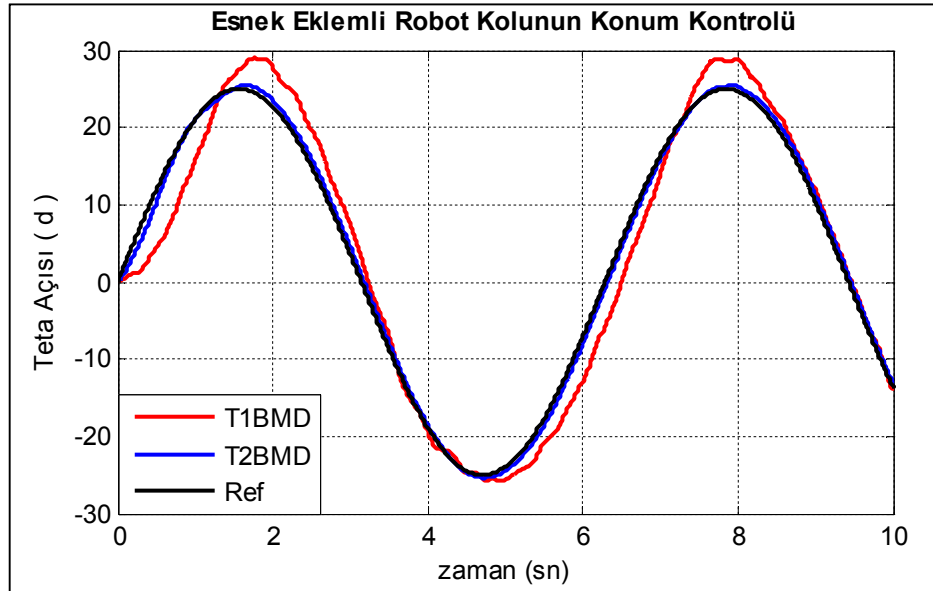
Şekil 5.45. Gürültü sinyali etkisi altında sinüzoidal yörünge takibi sistem cevapları



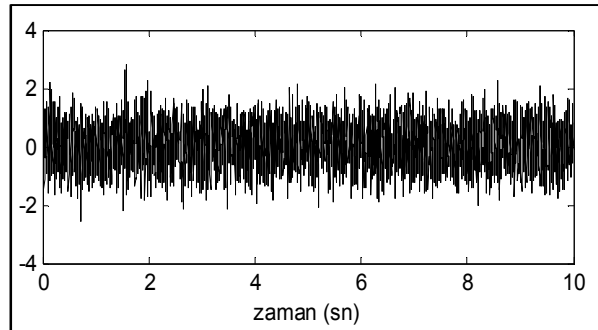
Şekil 5.46. Gürültü sinyali



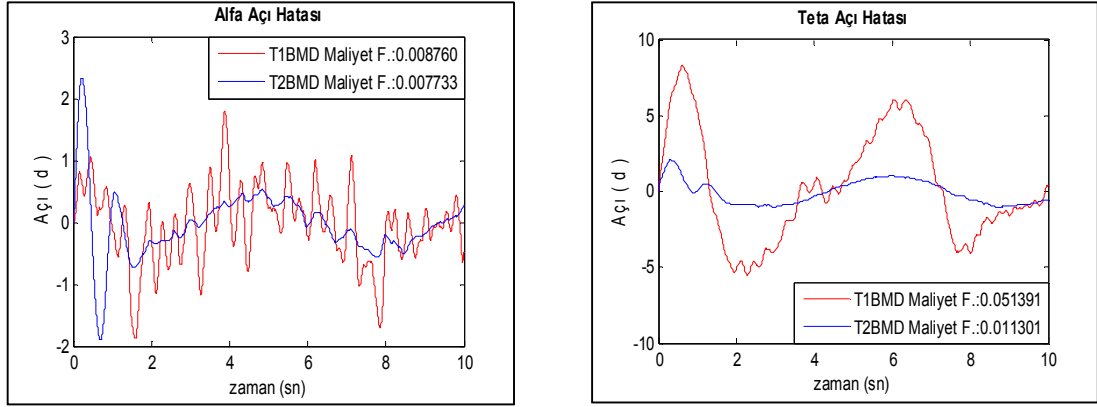
Şekil 5.47. Gürültü sinyali etkisi altında sinüzoidal yörünge takibi için θ ve α açı hataları



Şekil 5.48. Yüksek gürültü sinyali etkisi altında sinüzoidal yörünge takibi sistem cevapları



Şekil 5.49. Yüksek gürültü sinyali



Şekil 5.50. Yüksek gürültü sinyali etkisi altında sinüzoidal yörünge takibi için θ ve α açı hataları

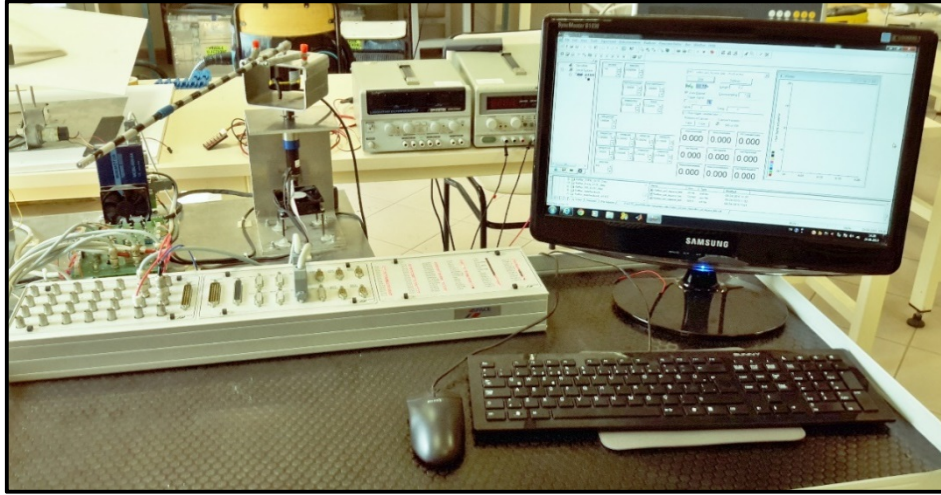
Sinüzoidal yörünge takibi sonuçları incelendiğinde Şekil 5.43 ve 5.44'te görüldüğü gibi ideal şartlar sağlandığında birbirine yakın sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Fakat farklı gürültü sinyalleri etkisi ile Şekil 5.45-5.50'de görüldüğü gibi tip-1 denetleyicisinin hedeflenen yörünge dışında kaldığı görülmektedir. Tip-2 denetleyicinin ise gürültü sinyali etkisi karşısında daha kararlı sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

Gerçek zamanlı kontrollerde sistem, harici veya dâhili etkenlerden dolayı gürültü ve bozucu etkilere maruz kalabilmektedir. Bu nedenle Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilen benzetimlerde, esnek eklemli robot kolunun kontrolü sırasında gürültü sinyali ve bozucu etkiler eklenmiş ve tip-1 / tip-2 bulanık mantık denetleyici kontrol performansları karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma sonuçları incelendiğinde birim basamak ve sinüzoidal yörünge takipleri için ideal şartlarda her iki denetleyici de benzer sonuçlar verirken, gürültü ve bozucu etkiler altında tip-2 denetleyicinin daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

5.2. Esnek Eklemli Robot Kolunun Gerçek Zamanlı Denetimi

Bir önceki bölümde rijit bir çubuğun döner tabla üstünde, çubuk ve tabla arasına iki adet yayın bağlanmasıyla eklemde esnekliğin sağlandığı bir sistem olan esnek eklemli robot kolunun benzetim ortamında kontrolü gerçekleştirilmiştir. Bu bölümde ise gerçek zamanlı olarak sistemin kontrolü esnek eklemli robot kolu test düzeneği üzerinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.53'te gösterilen sistem üzerinde döner tablanın hareketini sağlayan FAULHABER firmasına ait 36W gücünde, tutma momenti 111

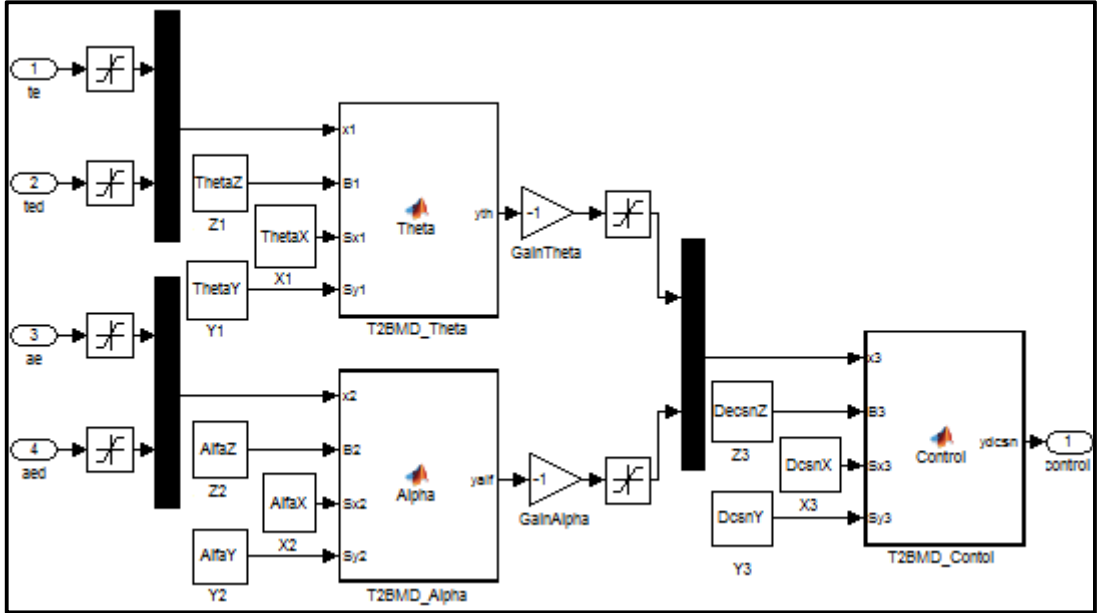
nNm ve motor verimi %77 olan 2444S serisi fırçasız doğru akım motoru ve FAULHABER MCBL 5004 serisi fırçasız doğru akım motor sürücüsü, motorun dönme açısını ve çubuğun salınım açısını ölçen enkoderler, tasarlanan kontrolörün sisteme uygulanması ve sistemden geri besleme olarak alınan sinyallerin işlenmesi için dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartı yer almaktadır



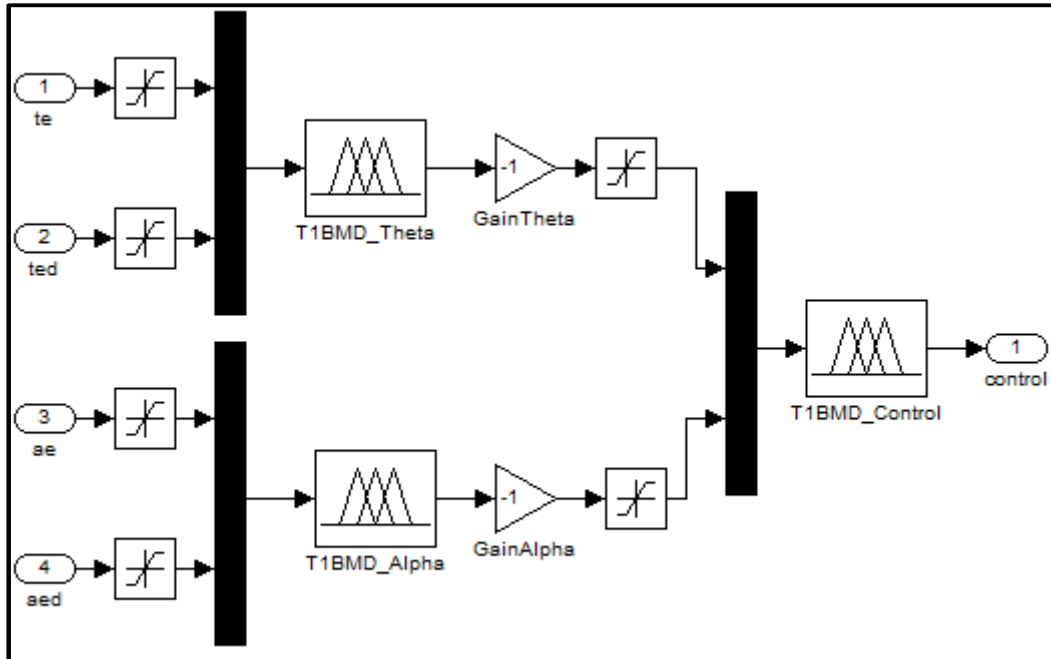
Şekil 5.51. Esnek eklemli robot kolu test düzeneği

Döner tablanın dönme açısı; hareketi gerçekleştiren motorunun hemen arkasına eklenmiş 512 darbe/tur oranına sahip enkoder ile ölçülmektedir, motora eklenen 246:1 planet dişliden dolayı döner tablanın dönme açısı için bir turda elde edilen darbe sayısı 125952 darbeye yükselmiştir. Salınım açısı ise 2000 darbe/tur enkoder tarafından 0.18° hassasiyetle ölçülmektedir. Sistemde esnek olarak bağlanmış kol iki parçadan oluşmaktadır. Kısa kol boyu 40 cm ve ağırlığı 52 g, ikinci parçanın eklenmesiyle yeni kol boyu 58 cm ve ağırlığı 72 g olmaktadır. Esnek eklemli robot kolunun kontrolü için FIS ve tip-2 bulanık mantık editöründe tasarlanan T1BMD ve T2BMD Matlab/Simulink ortamına aktarılarak dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartı aracılığı ile sisteme uygulanmıştır. dSPACE kontrol kartı; DS817 bağlantı kartı, CLP1103 giriş / çıkış arabiriminden oluşmaktadır. CLP1103 giriş/çıkış biriminde 20 adet ADC girişi, 8 adet DAC çıkışı, 7 adet enkoder arabirimi, seri haberleşme portu ve dijital giriş / çıkış portu bulunmaktadır. Benzetim ortamında sistemin kontrolü için kullanılan kademeli T1BMD ve T2BMD kontrol yapıları gerçek zamanlı kontrolde de üyelik fonksiyonları ve kurallarda bir değişiklik yapılmadan aynı şekilde kullanılmıştır. Oluşturulan kademeli T1BMD ve T2BMD ile sistemin kontrolünü gerçekleştirmek için öncelikle Matlab/Simulink ortamında Şekil

5.52 ve 5.53'te görüldüğü gibi kontrol yapıları oluşturulmuştur. Kademeli T2BMD kontrol yapısında yer alan Matlab fonksiyon blokları içerisinde bulunan kodlar Ek-B'de verilmiştir. Matlab/FIS editöründe tasarlanan tip-1 denetleyiciler ise Simulink ortamında bulanık mantık blokları ile kullanılmıştır.



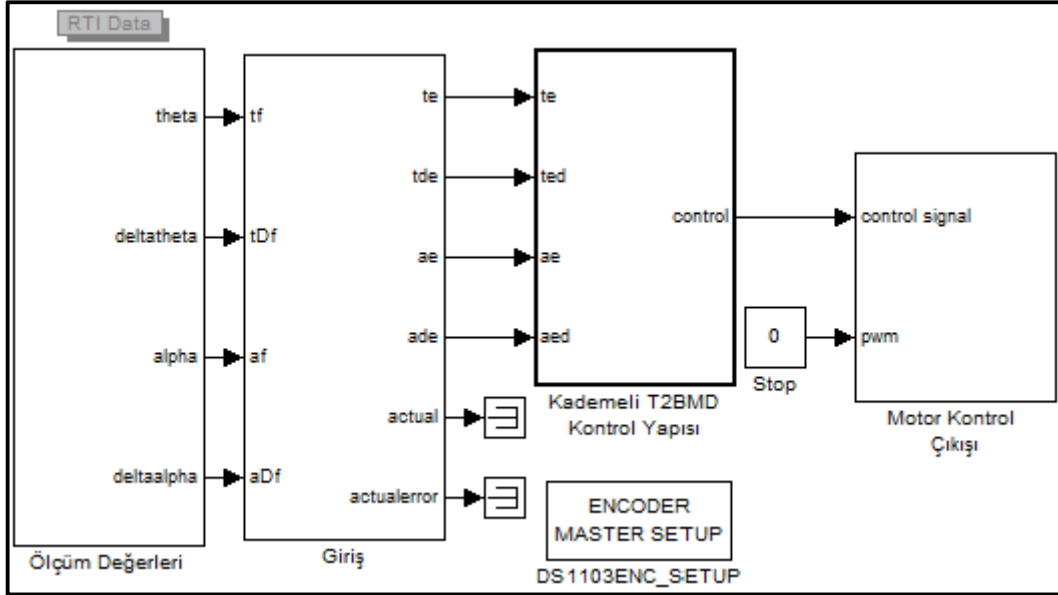
Şekil 5.52. Matlab/Simulink ortamında kademeli T2BMD kontrol yapısı



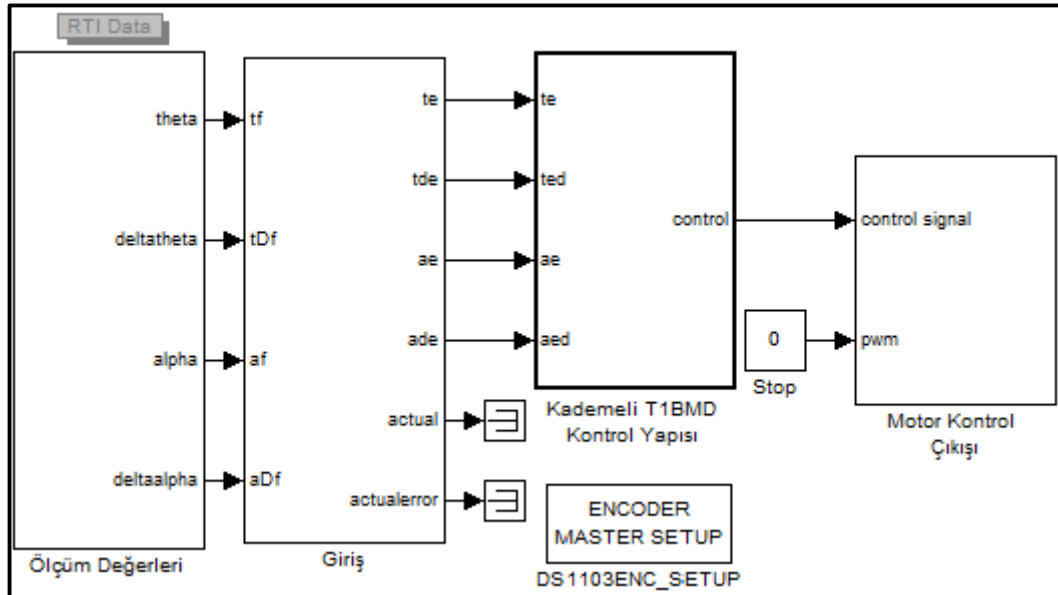
Şekil 5.53. Matlab/Simulink ortamında kademeli T1BMD kontrol yapısı

Oluşturulan kontrol yapıları dSpace kontrol kartı üzerinden sistemin kontrolünü gerçekleştireceklerdir. Bu nedenle Simulink ortamında sistem çıkışlarının alınıp

tablanın hareketi sağlayan motora gerekli gerilimin gönderilmesi için dSpace'e ait giriş çıkış bloklarının eklenmesi gerekmektedir. Sistemin gerçek zamanlı kontrolü için dSpace bloklarının da yer aldığı Simulink modelleri Şekil 5.54 ve 5.55'te verilmiştir.



Şekil 5.54. Matlab/Simulink T2BMD ile gerçek zamanlı kontrol modeli



Şekil 5.55. Matlab/Simulink T1BMD ile gerçek zamanlı kontrol modeli

Ölçüm bloğu içinde bulunan ve her iki enkoderden alınan açı ve açısal hız bilgileri, Giriş sinyali bloğu içinde bulunan referans sinyallerden çıkarılarak oluşturulan hata

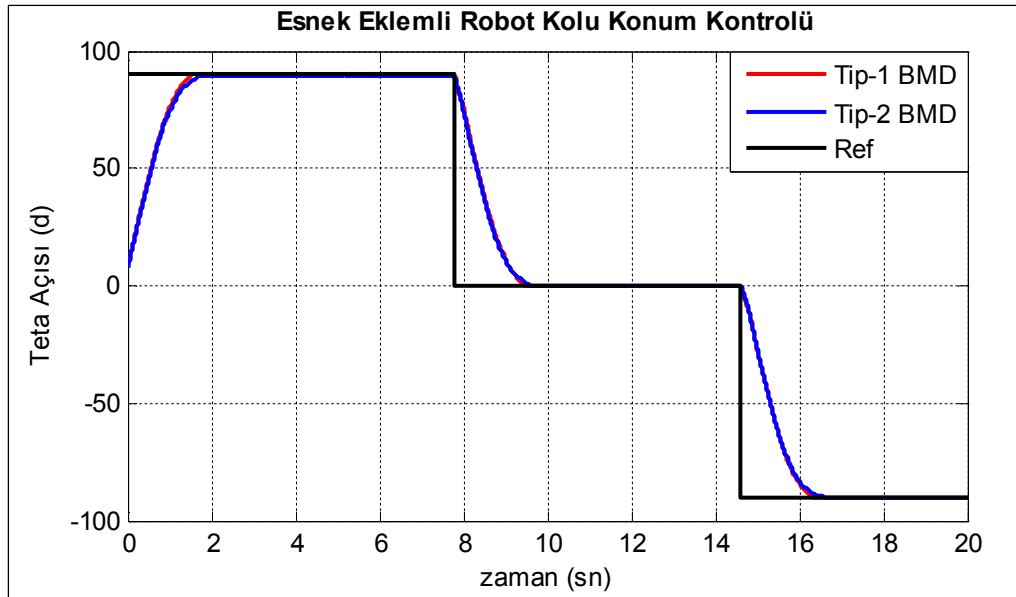
sinyalleri, Kontrol Yapı blokları içerisinde işlenerek tablanın hareketini gerçekleştiren motora gönderilecek gerilim belirlenmektedir.

5.2.1. Esnek eklemlı robot kolunun T2BMD ile kontrolüne ilişkin deneysel sonuçlar

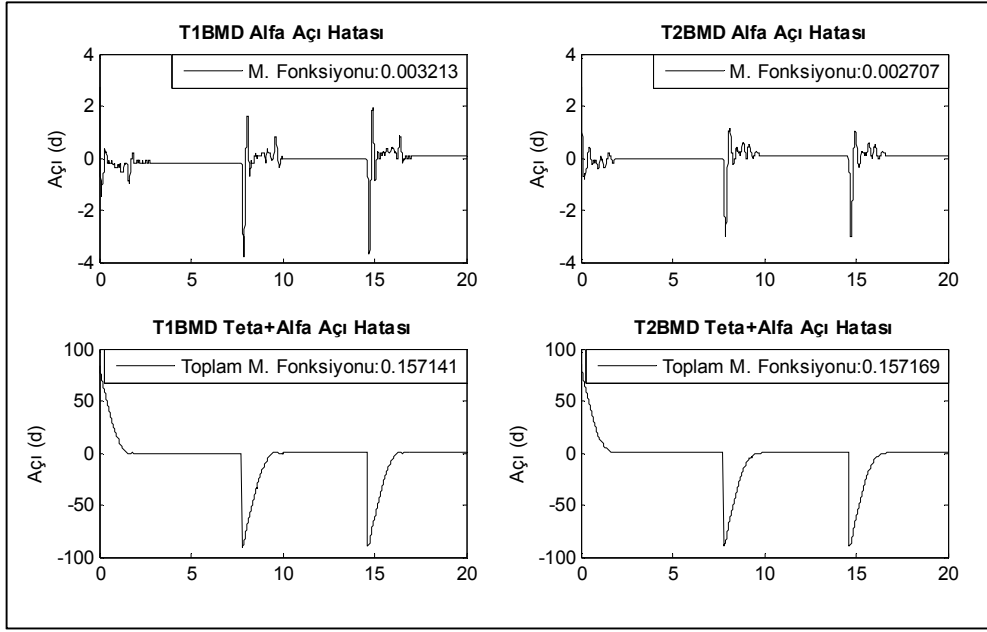
Bu bölümde esnek eklemlı robot kolunun tip-2 bulanık mantık kontrol yöntemiyle kontrol edilmesi sırasında elde edilen deneysel sonuçlar verilmiştir. Editör üzerinde tasarlanan denetleyicilerle oluşturulan kontrol yapısının performansının (kararlılığının ve gürbüzlüğünün) test edilmesi için farklı kol uzunluklarında (0,4 ve 0,58 m) birim basamak, kane fonksiyonu [36] ve sinüzoidal yörünge takibi deneyleri yapılmıştır. Uygulanan kane fonksiyonu yörüngesi için kullanılan fonksiyon Ek-C'de verilmiştir.

5.2.1.1. Kısa kol için konum kontrolü deneyleri

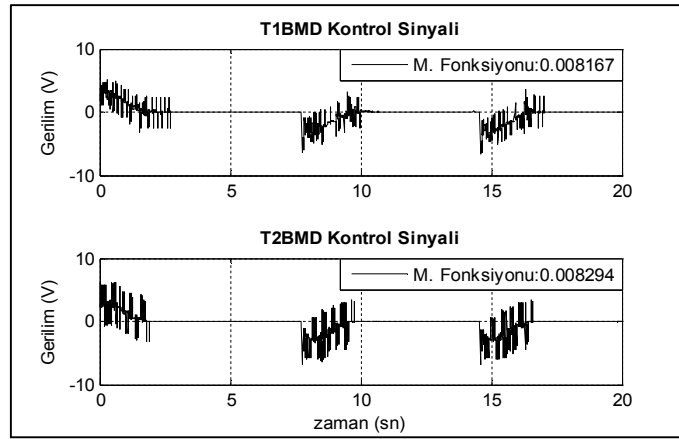
Bu kısımda esnek eklemlı test düzeneğinde robot kol uzunluğunun 0,4 m olarak alındığı konum kontrol deneylerinin sonuçları yer almaktadır. Sisteme birim basamak, kane fonksiyonu ve sinüzoidal girişleri ayrı ayrı uygulanarak sistem cevapları incelenmiştir.



Şekil 5.56. Birim basamak sistem cevapları (kol uzunluğu:0,4 m)



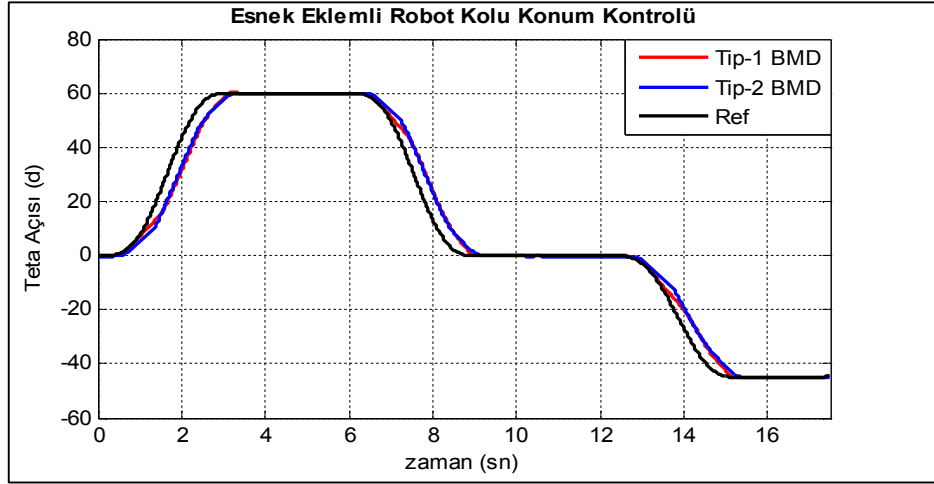
Şekil 5.57. Birim basamak girişi için α ve $\theta + \alpha$ açı hataları (kol uzunluğu: 0,4 m)



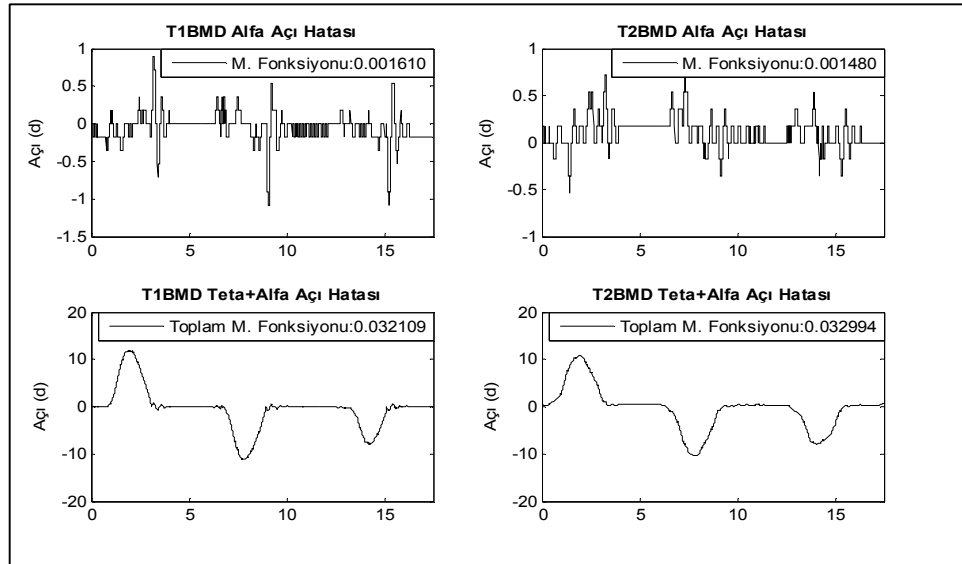
Şekil 5.58. Birim basamak yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu: 0,4 m)

Tablo 5.7. Birim basamak sistem cevapları (kol uzunluğu: 0,4 m)

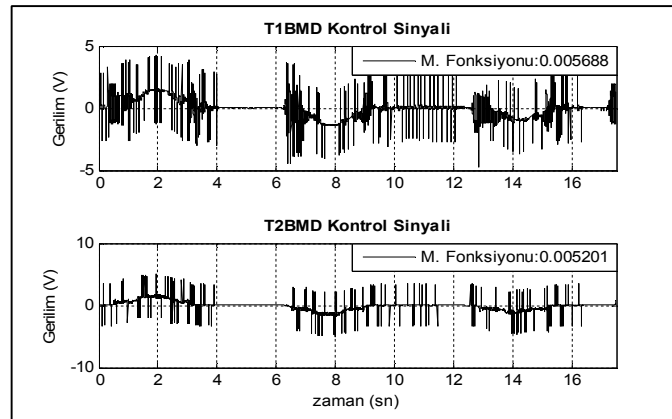
	T1BMD						T2BMD					
	Oturma Zamanı (sn)		En Büyük Hata (derece)		Kalıcı Durum Hal Hatası		Oturma Zamanı (sn)		En Büyük Hata (derece)		Kalıcı Durum Hal Hatası	
	θ	α	θ	α	θ	α	θ	α	θ	α	θ	α
(0° / 90°)	1,72	2,067	0	3,779	0	0	1,905	2,062	0	2,988	0	0
(90° / 0°)	1,74	2,238	0	-3,78	0	0	1,903	1,978	0	-2,99	0	0
(0° / -90°)	1,7	2,08	0	-3,7	0	0	1,91	2	0	-2,99	0	0



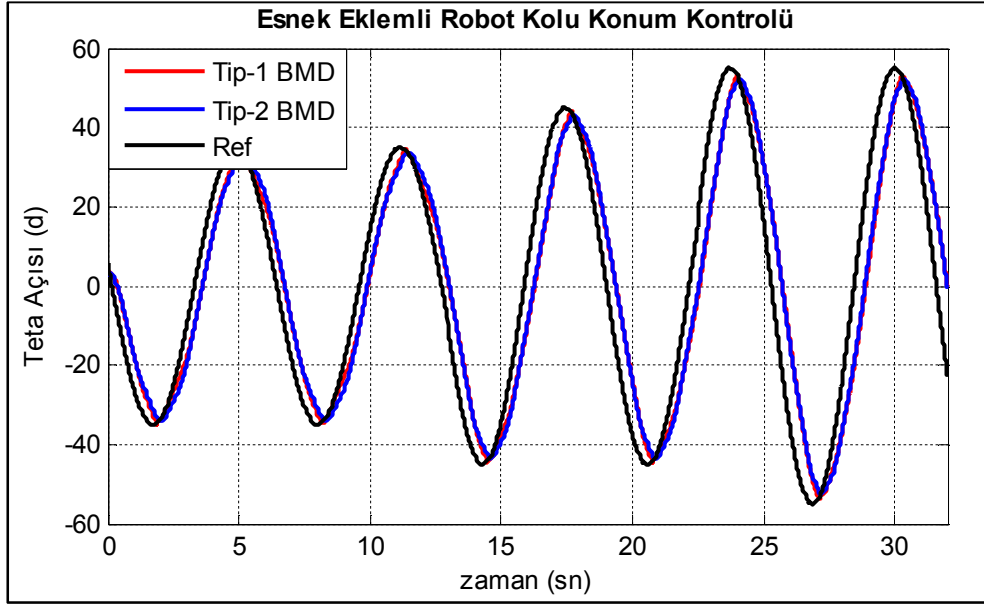
Şekil 5.59. Kane fonksiyonu yörünge takibi (kol uzunluğu:0,4 m)



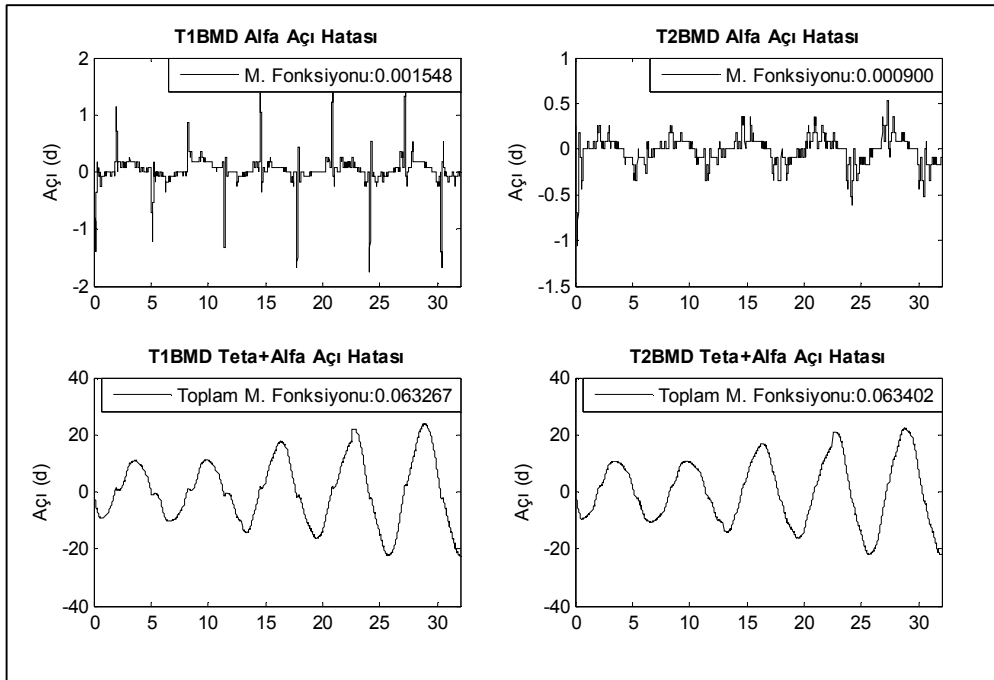
Şekil 5.60. Kane fonksiyonu yörünge takibi α ve $\theta+\alpha$ açı hataları (kol uzunluğu:0,4 m)



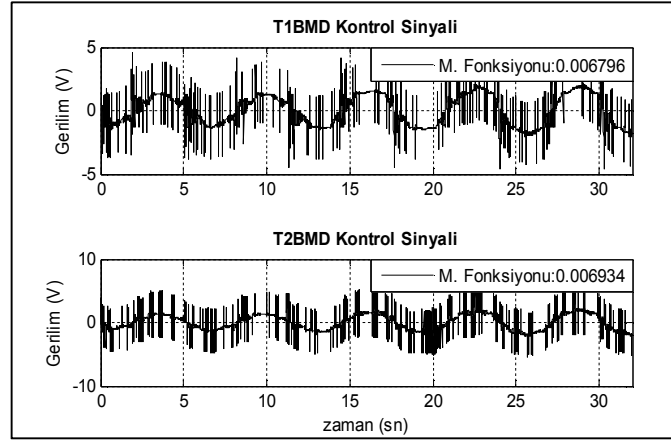
Şekil 5.61. Kane fonksiyonu yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu:0,4 m)



Şekil 5.62. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi (kol uzunluğu:0,4 m)



Şekil 5.63. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi α ve $\theta+\alpha$ açı hataları (kol uzunluğu:0,4 m)



Şekil 5.64. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu:0,4 m)

Kısa kol için Şekil 5.56-5.58’de birim basamak, Şekil 5.59-5.61’de kane fonksiyonu Şekil 5.62-5.64’te ise sinüzoidal fonksiyonuna ait yörünge takibi deney sonuçları yer almaktadır. Tablo 5.8’de kısa kol birim basamak cevaplarına ilişkin grafiklerinden alınan hata maliyet fonksiyonu bilgileri, Tablo 5.9’da ise kontrol sinyaline ilişkin maliyet fonksiyonu bilgileri ve pozitif, negatif en büyük sinyal değerleri yer almaktadır.

Tablo 5.8. Kısa kol konum kontrolü T1BMD ve T2BMD açı hatası maliyet fonksiyonları (kol uzunluğu:0,4 m)

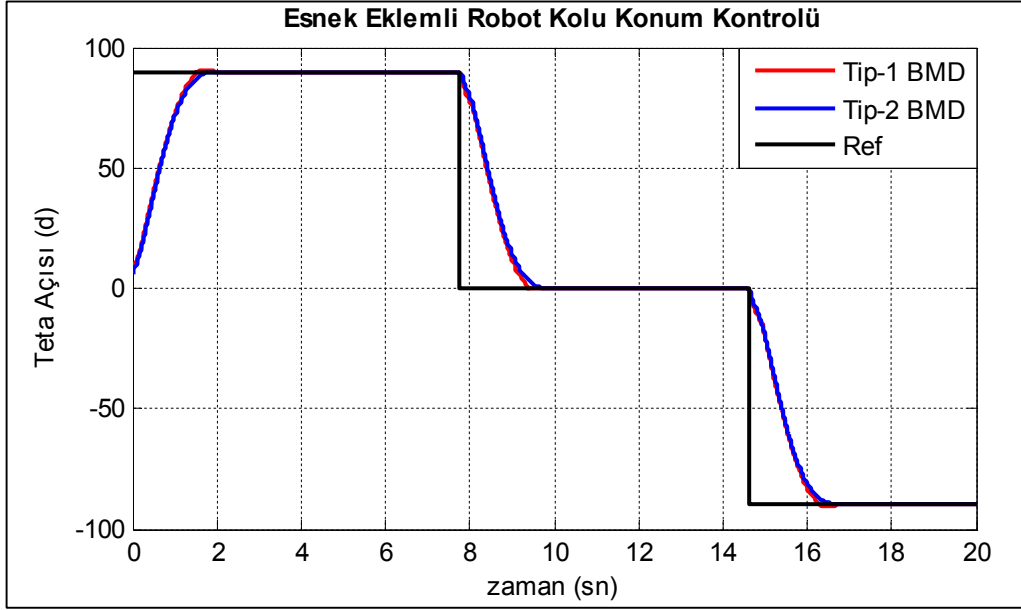
Açı Hatası Maliyet Fonk.	T1BMD			T2BMD		
	Birim B.	Kane	Sinüzoidal	Birim B.	Kane	Sinüzoidal
Alfa+Teta	0,157141	0,032109	0,063267	0,157169	0,032994	0,063402
Alfa	0,003213	0,001610	0,001548	0,002707	0,001480	0,000900

Tablo 5.9. Kontrol sinyalleri maliyet fonksiyonları ve maksimum pozitif-negatif gerilim değerleri (kol uzunluğu:0,4 m)

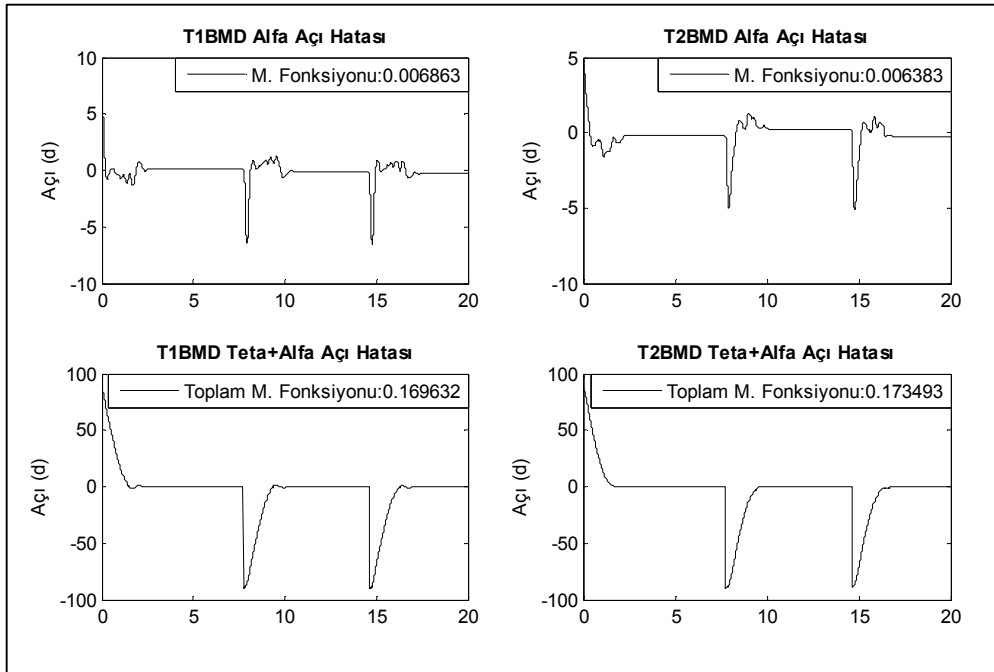
	T1BMD			T2BMD		
	Birim B.	Kane	Sinüzoidal	Birim B.	Kane	Sinüzoidal
Kontrol Sinyali	0,008167	0,005688	0,006796	0,008294	0,005201	0,006934
Maksimum P.	4,2672	4,2845	4,927	4,717	5,0309	5,473
Maksimum N.	-4,7531	-4,7846	-4,128	-5,540	-5,1227	-4,785

5.2.1.2. Uzun kol için konum kontrolü deneyleri

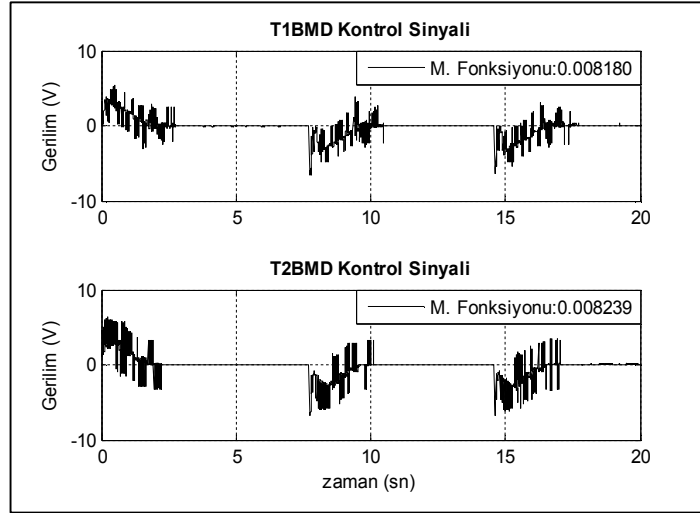
Tip-2 bulanık mantık denetleyicileri ile oluşturulan kontrol yapısının uzun ve kısa koldaki performanslarını karşılaştırabilmek için kısa kol ile gerçekleştirilen deneylerde referans olarak sisteme girilen sinyaller kullanılarak uzun kol ile konum kontrol deneyleri yapılmıştır.



Şekil 5.65. Birim basamak sistem cevabı (kol uzunluğu:0,58 m)



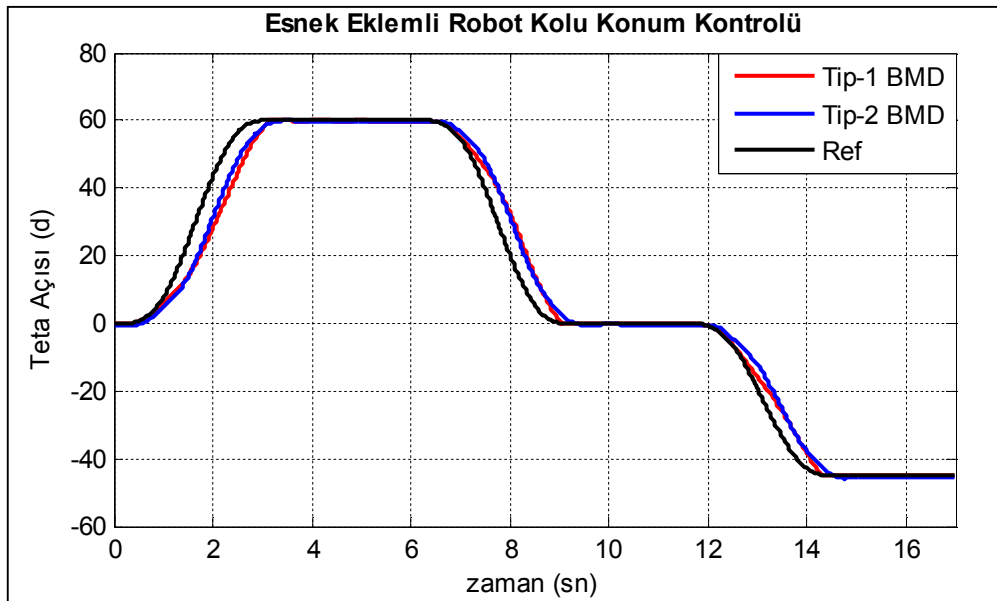
Şekil 5.66. Birim basamak girişi için α ve $\theta+\alpha$ açı hataları (kol uzunluğu:0,58 m)



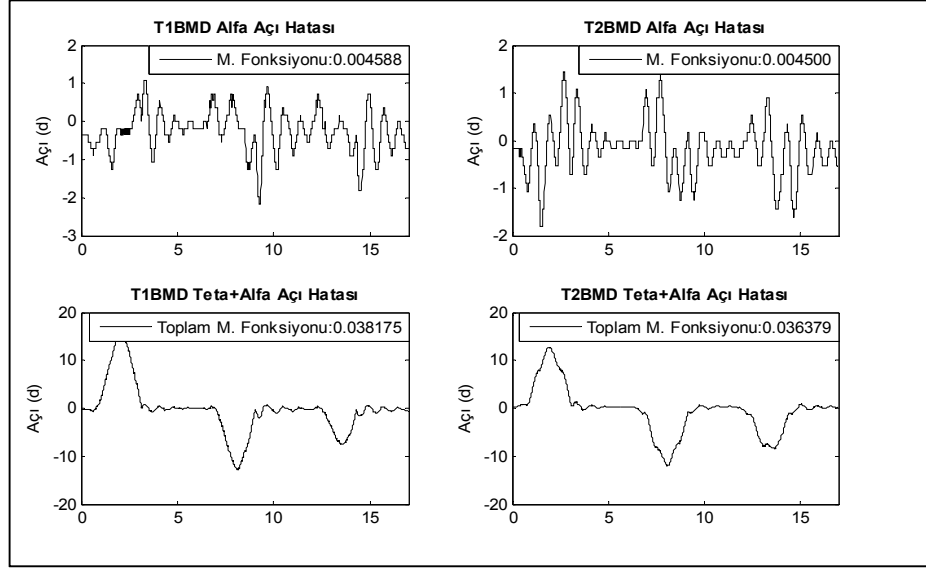
Şekil 5.67. Birim basamak yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu:0,58 m)

Tablo 5.10. Birim basamak sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m)

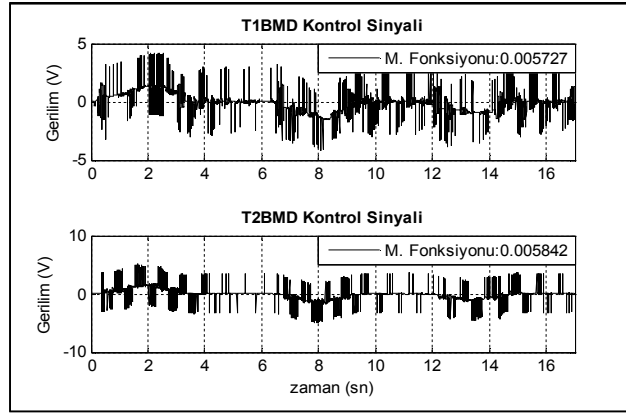
	T1BMD						T2BMD					
	Oturma Zamanı (sn)		En Büyük Hata (derece)		Kalıcı Durum Hal Hatası		Oturma Zamanı (sn)		En Büyük Hata (derece)		Kalıcı Durum Hal Hatası	
	θ	α	θ	α	θ	α	θ	α	θ	α	θ	α
(0° / 90°)	1,74	2,719	0	6,416	0	0	1,95	2,388	0	4,57	0	0
(90° / 0°)	1,65	2,539	0	-6,42	0	0	1,90	2,329	0	-5,01	0	0
(0° / -90°)	1,7	2,5	0	-6,51	0	0	2,01	2,22	0	-5,09	0	0



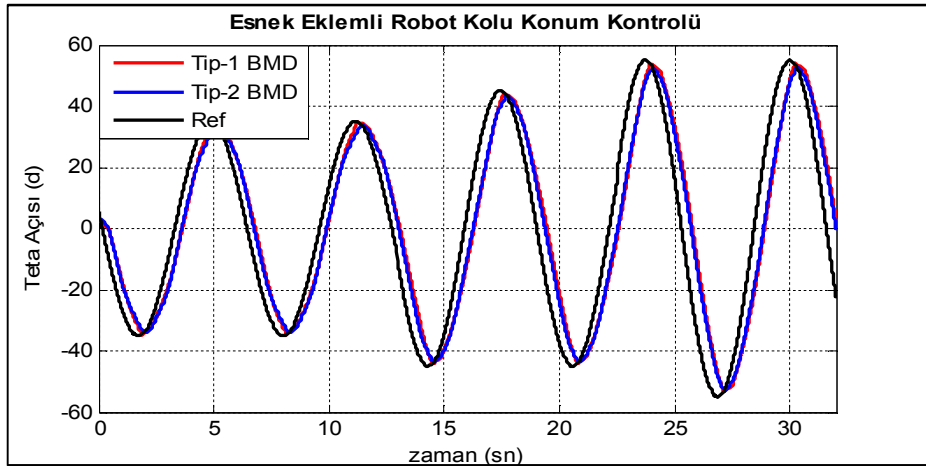
Şekil 5.68. Kane fonksiyonu yörünge takibi (kol uzunluğu:0,58 m)



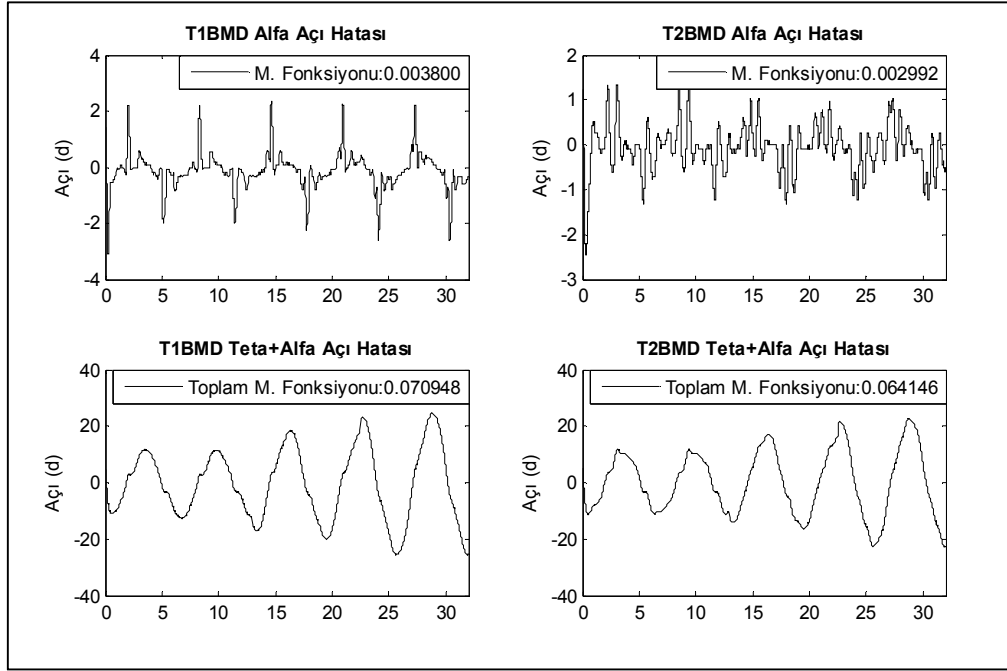
Şekil 5.69. Kane fonksiyonu yörünge takibi α ve $\theta + \alpha$ açı hataları (kol uzunluğu:0,58 m)



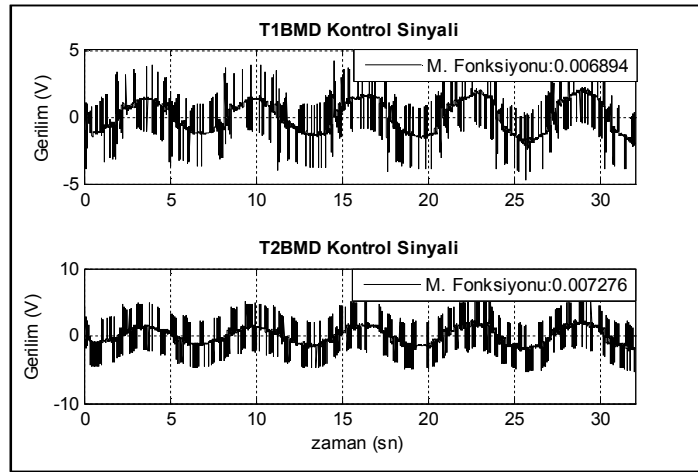
Şekil 5.70. Kane fonksiyonu yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu:0,58 m)



Şekil 5.71. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi sistem cevabı (kol uzunluğu:0,58 m)



Şekil 5.72. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi α ve $\theta+\alpha$ açı hataları (kol uzunluğu:0,58 m)



Şekil 5.73. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi kontrol sinyalleri (kol uzunluğu:0,58 m)

Uzun kol için Şekil 5.65-5.67’de birim basamak, Şekil 5.68-5.70’te kane fonksiyonu Şekil 5.71-5.73’te ise sinüzoidal fonksiyonuna ait yörünge takibi deney sonuçları yer almaktadır. Kol uzunluğunun artması sistemin esnekliğini de arttıracığı için döner tabla açısı ve salınım açı hatalarının maliyet fonksiyonları uzun kol (0,58 m) ile yapılan deneylerde daha fazla çıkmıştır. Ancak her iki kol uzunluğu ile yapılan birim basamak ve kane fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde de bir aşım gerçekleşmemiştir. Tablo 5.11’de uzun kol birim basamak cevaplarına ilişkin

grafiklerinden alınan hata maliyet fonksiyonu bilgileri, Tablo 5.12’de ise kontrol sinyaline ilişkin maliyet fonksiyonu bilgileri ve pozitif, negatif en büyük sinyal değerleri yer almaktadır

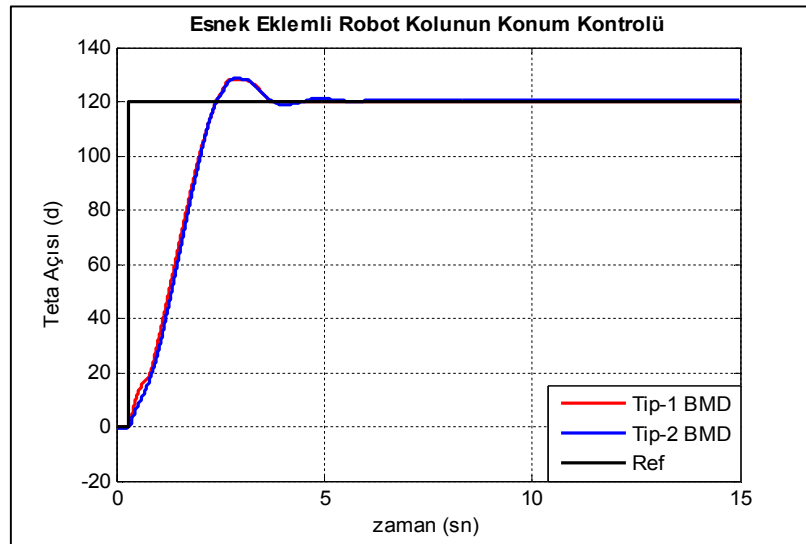
Tablo 5.11. Uzun kol konum kontrolü T1BMD ve T2BMD açılı hatası maliyet fonksiyonları (kol uzunluğu:0,58 m)

Açılı Hatası Maliyet Fonk.	T1BMD			T2BMD		
	Birim B.	Kane	Sinüzoidal	Birim B.	Kane	Sinüzoidal
Alfa+Teta	0.169632	0,038175	0,070948	0.173493	0,036379	0,064146
Alfa	0,006863	0,004588	0,003800	0,006383	0,004500	0,002992

Tablo 5.12. Kontrol sinyalleri maliyet fonksiyonları ve maksimum pozitif-negatif gerilim değerleri (kol uzunluğu:0,58 m)

	T1BMD			T2BMD		
	Birim B.	Kane	Sinüzoidal	Birim B.	Kane	Sinüzoidal
Kontrol Sinyali	0,008180	0,005727	0,008239	0,006894	0,005842	0,007276
Maksimum P.	4,9073	4,2017	4,6974	5,8792	5,2938	4,9768
Maksimum N.	-6,1332	-4,1684	-4,1372	-6,3895	-5,0821	-4,3032

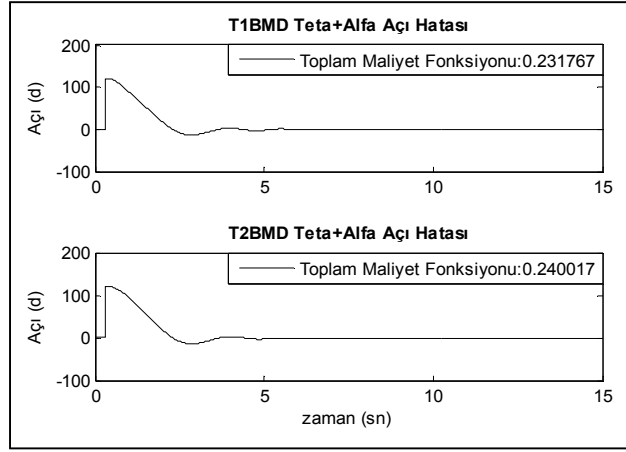
5.2.2. Esnek eklemlili robot kolunun yük ve gürültü sinyali etkisi altında T1BMD ve T2BMD kontrol performanslarının karşılaştırılması



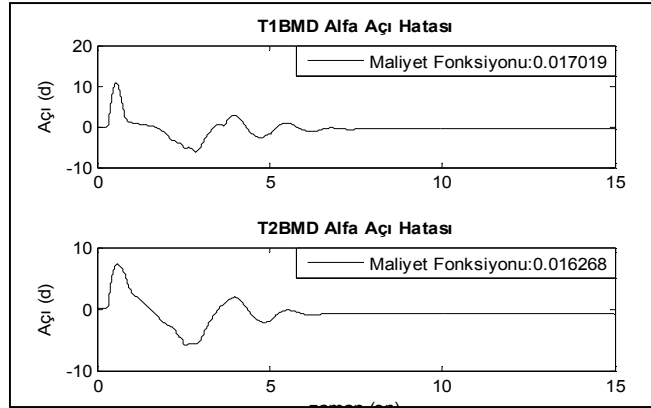
Şekil 5.74 Birim basamak girişi sistem cevapları (kol uzunluğu: 0,58 m, yük 50 gr)

Bu bölümde esnek eklemlili robot kolunun uç kısmına bağlanan 50 gr yük ve $[2^{\circ}, -2^{\circ}]$ değerleri arasında değişen gürültü sinyali etkisi altında yörünge takibi deneyleri yer

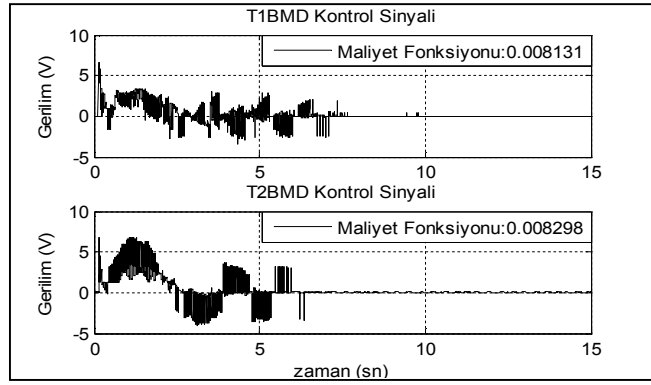
almaktadır. Yalnız 50 gr yük etkisiyle, Şekil 5.74- 5.77’de birim basamak, Şekil 5.78- 5.81’de kane fonksiyonu ve Şekil 5.82- 5.85’te sinüzoidal fonksiyonu yörünge takibi deney sonuçları gösterilmiştir.



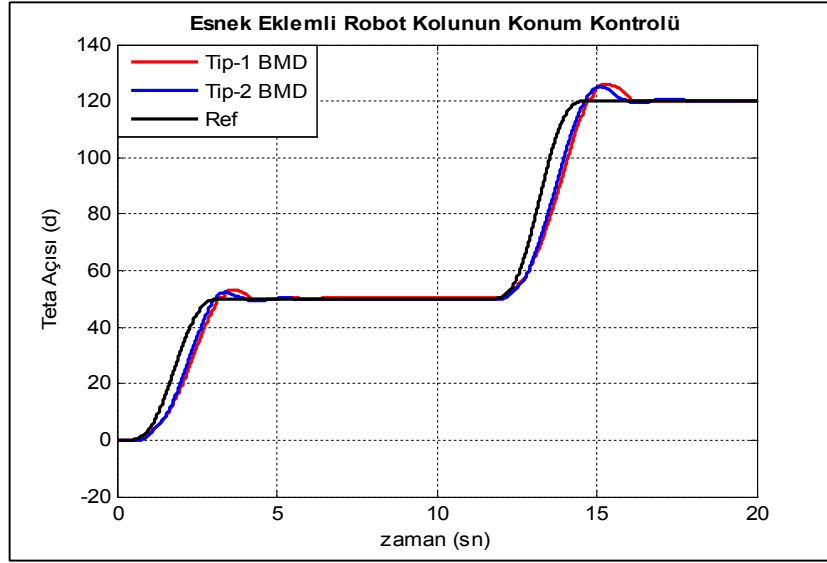
Şekil 5.75. Birim basamak girişi için $\theta + \alpha$ açı hataları



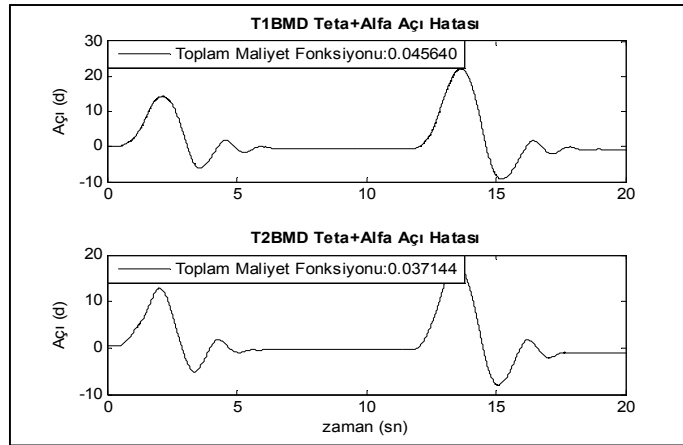
Şekil 5.76. Birim basamak girişi için α açı hataları



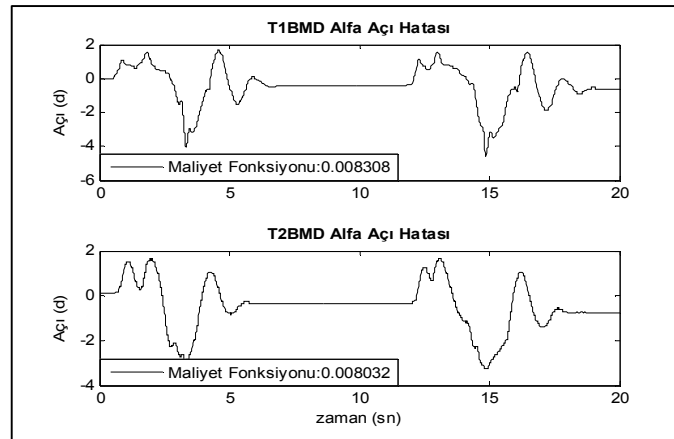
Şekil 5.77. Birim basamak yörünge takibi kontrol sinyalleri



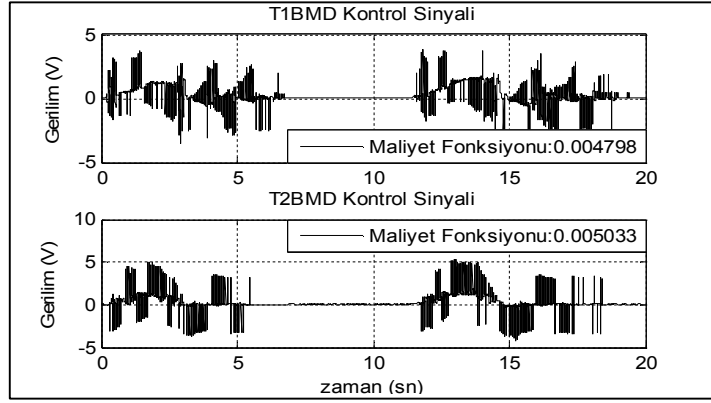
Şekil 5.78. Kane fonksiyonu yörünge takibi sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr)



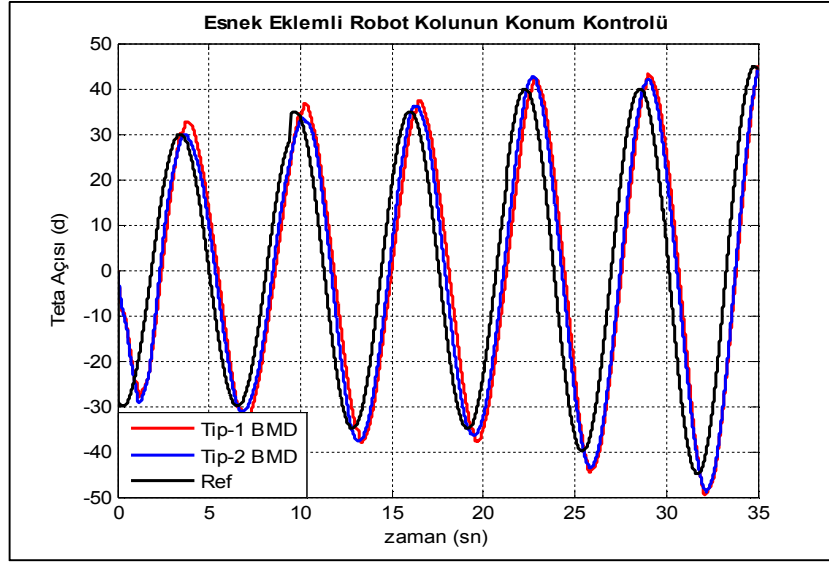
Şekil 5.79. Kane fonksiyonu yörünge takibi $\theta + \alpha$ açı hataları



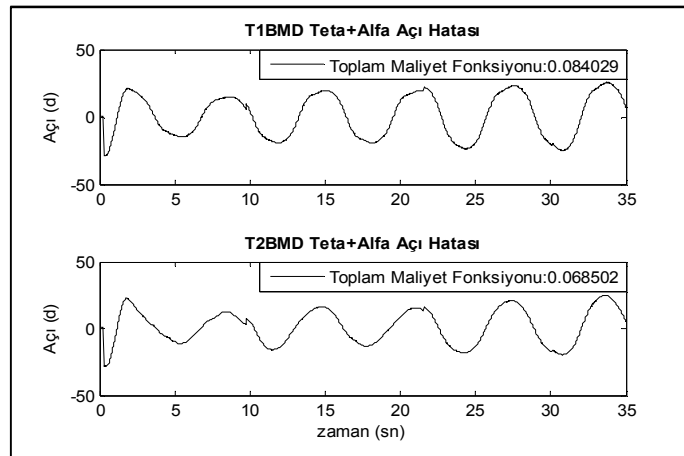
Şekil 5.80. Kane fonksiyonu yörünge takibi α açı hataları



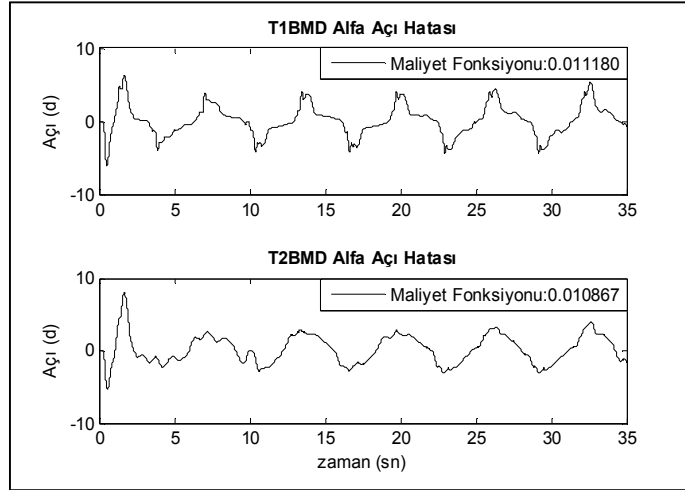
Şekil 5.81. Kane fonksiyonu yörünge takibi kontrol sinyalleri



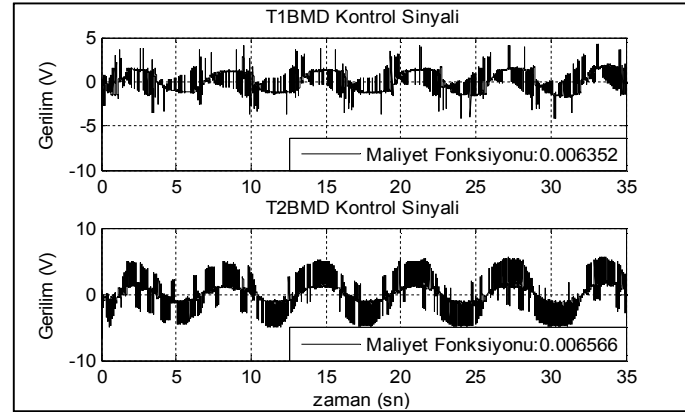
Şekil 5.82. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr)



Şekil 5.83. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi α ve $\theta + \alpha$ açı hataları



Şekil 5.84. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi α açı hataları



Şekil 5.85. Farklı genliklerde sinüzoidal yörünge takibi kontrol sinyalleri

50 gr yük etkisi altında gerçekleştirilen deney sonuçlarına ilişkin hata maliyet fonksiyonları Tablo 5.13'te, her iki kontrol yapısının, esnek eklemlili robot kolunun hareketini gerçekleştiren motor için ürettiği gerilim değerleri içerisinde en büyük pozitif ve negatif gerilimler ise Tablo 5.14'te gösterilmiştir.

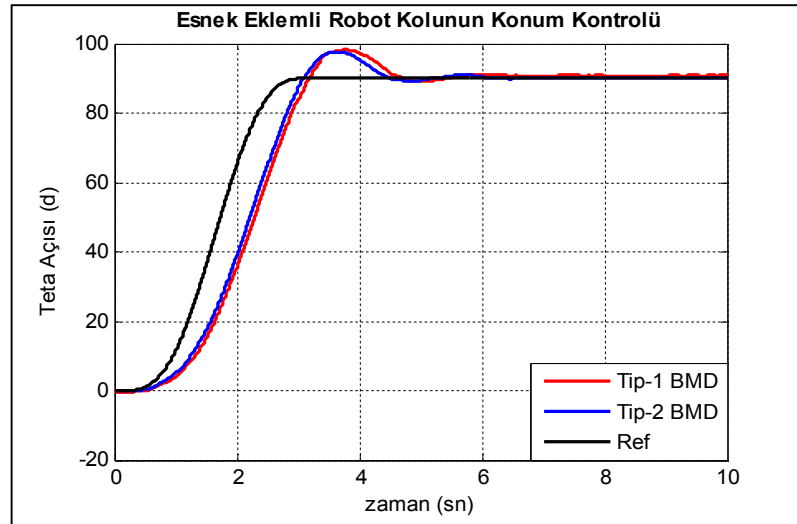
Tablo 5.13. 50 gr yük altında uzun kol konum kontrolü T1BMD ve T2BMD açı hatası maliyet fonksiyonları

Açı Hatası Maliyet Fonk.	T1BMD			T2BMD		
	Birim B.	Kane	Sinüzoidal	Birim B.	Kane	Sinüzoidal
Alfa+Teta	0,231767	0,045640	0,084029	0.240016	0,037144	0,068502
Alfa	0,017019	0,008308	0,011180	0,016268	0,008032	0,010867

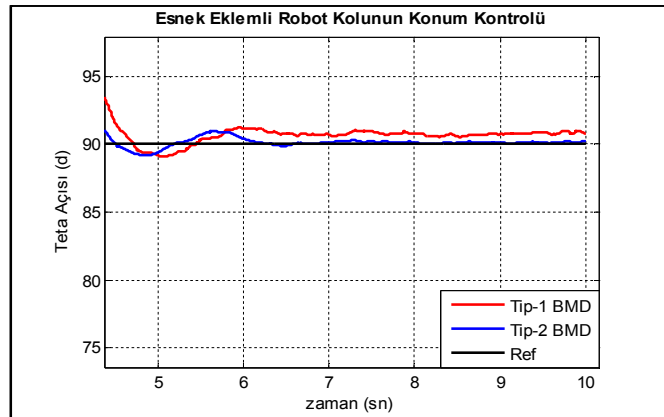
Tablo 5.14. Kontrol sinyalleri maliyet fonksiyonları ve maksimum pozitif-negatif gerilim değerleri (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr)

	T1BMD			T2BMD		
	Birim B.	Kane	Sinüzoidal	Birim B.	Kane	Sinüzoidal
Kontrol Sinyali	0,008131	0,004798	0,006352	0,008298	0,005033	0,006566
Maksimum P.	6,5863	3,8801	4,2366	6,8095	5,3420	5,6798
Maksimum N.	-3,4706	-3,5512	-5,8125	-4,0588	-4,2529	-6,7750

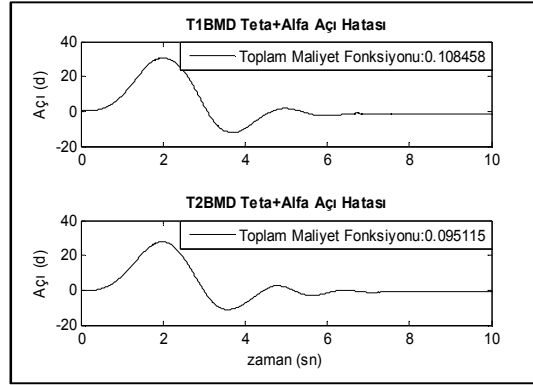
Bu kısımda, 50 gr yük ve $[2^\circ, -2^\circ]$ değerleri arasında değişen gürültü sinyali etkisiyle, Şekil 5.86- 5.89'da kane fonksiyonu, Şekil 5.90- 5.93'te ise birim basamak yörünge takibi deney sonuçları verilmiştir.



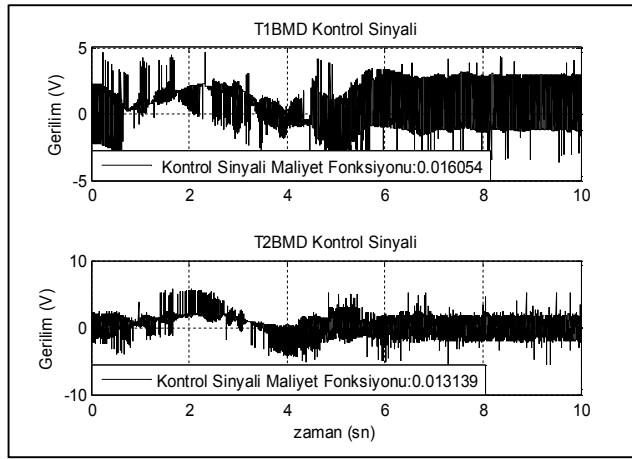
Şekil 5.86. Kane fonksiyonu yörünge takibi sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr, $-2^\circ - 2^\circ$ gürültü sinyali)



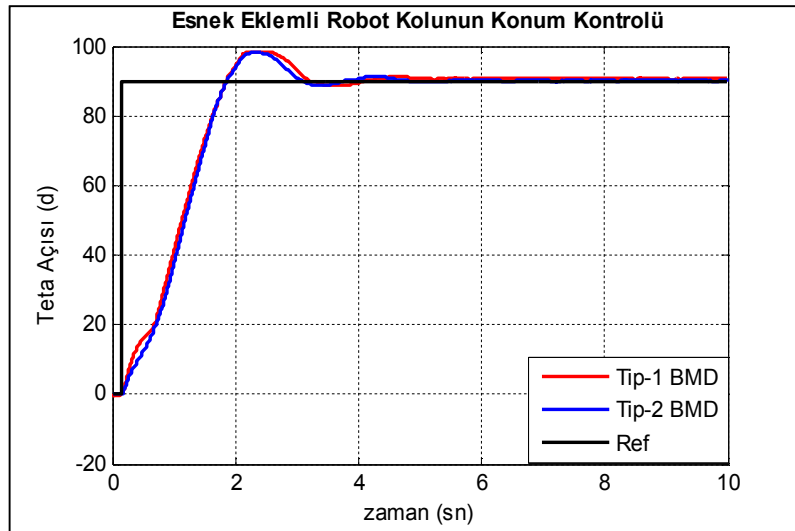
Şekil 5.87. Kane fonksiyonu yörünge takibi gürültü etkisi altında oturma zamanı sistem cevapları



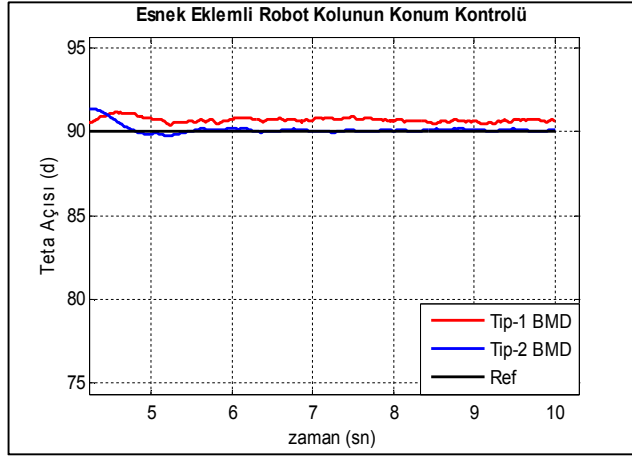
Şekil 5.88. Kane fonksiyonu yörünge takibi $\theta + \alpha$ açı hataları



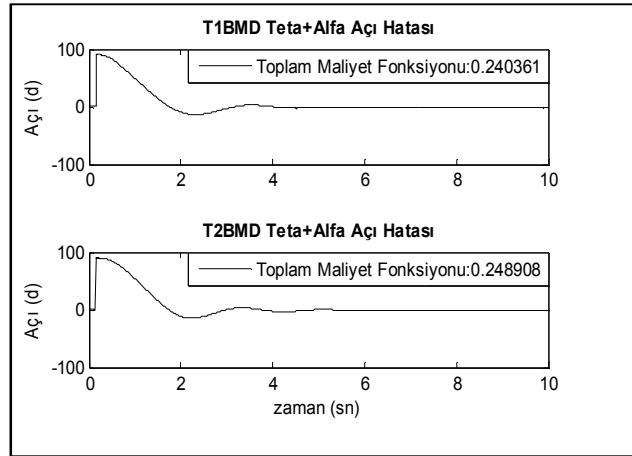
Şekil 5.89. Gürültü etkisi altında kane fonksiyonu yörünge takibi kontrol sinyalleri



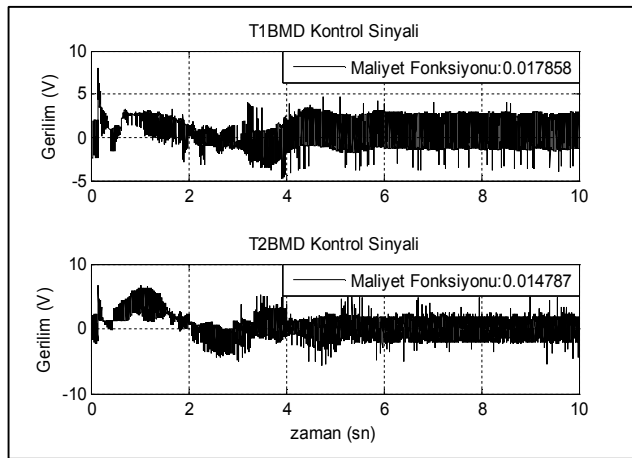
Şekil 5.90. Birim basamak sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr, $-2^\circ - 2^\circ$ gürültü sinyali)



Şekil 5.91. Birim basamak girişi gürültü etkisi altında oturma zamanı sistem cevapları



Şekil 5.92. Gürültü etkisi altında birim basamak girişi için $\theta + \alpha$ açı hataları



Şekil 5.93. Gürültü etkisi altında birim basamak yörünge takibi kontrol sinyalleri

Tablo 5.15. Birim basamak sistem cevapları (kol uzunluğu:0,58 m, yük 50 gr, -2° - 2° gürültü sinyali)

	Oturma Zamanı (sn)		En Büyük Hata (derece)		Kalıcı Durum Hal Hatası	
	θ	α	θ	α	θ	α
T1BMD	5,08	5,92	8,5	10,81	0,8	0
T2BMD	4,676	5,99	8,18	7,295	0	0

Elde edilen deney sonuçlarına ilişkin Alfa+Teta Açılı Hatası ve kontrol sinyali maliyet fonksiyonları Tablo 5.20’de yer almaktadır. Her iki kontrol yapısının, esnek eklemlili robot kolunun hareketini gerçekleştiren motor için ürettiği gerilim değerleri içerisinde en büyük pozitif ve negatif gerilimler ise Tablo 5.21’de gösterilmiştir.

Tablo 5.16. Gürültü sinyali etkisi altında konum kontrolü T1BMD ve T2BMD açılı hatası ve kontrol sinyali maliyet fonksiyonları

Maliyet Fonksiyonu	T1BMD		T2BMD	
	Birim B.	Kane	Birim B.	Kane
Alfa+Teta Açılı Hatası	0,240361	0,108458	0,248908	0,095115
Kontrol sinyali	0,017858	0,016054	0,014787	0,013139

Tablo 5.17. Kontrol sinyalleri maksimum pozitif-negatif gerilim değerleri

Kontrol Sinyali	T1BMD		T2BMD	
	Birim B.	Kane	Birim B.	Kane
Maksimum P.	7,9509	4,6116	6,8038	5,7194
Maksimum N.	-4,7846	-4,7846	-5,6304	-5,6124

Deney sonuçları incelendiğinde, 50 gr yük ve gürültü sinyali etkisiyle gerçekleştirilen birim basamak yörünge takibinde yükselme ve oturma zamanlarının her iki kontrol yapısı içinde çok yakın olduğu gözlenmiştir. Ancak kademeli tip-2 bulanık mantık kontrol yapısı gürültü sinyaline karşı kararlı bir sonuç verirken, kademeli tip-1 bulanık mantık kontrol yapısında, gürültü sinyali kalıcı durum hal hatasına neden olmuştur. 50 gr yük ve gürültü sinyali etkisiyle gerçekleştirilen kane ve sinüzoidal fonksiyonu yörünge takibi deneylerinde ise kademeli tip-2 bulanık mantık kontrol yapısının daha iyi sonuçlar verdiği gözlenmiştir.

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bulanık mantık matematiksel modelden bağımsız olarak çalıştığı için kontrolün istenilen şekilde olması kontrol edilecek sistemden alınan veriler doğrultusunda oluşturulan üyelik fonksiyonları ve deneyimler çerçevesinde yazılan kurallara bağlı olmaktadır. İdeal üyelik fonksiyonlarının elde edilmesinde herhangi bir yöntem bulunmadığı için, çeşitli denemeler yapılmaktadır. Giriş ve çıkışlara ait üyelik fonksiyonlarından birinin yer değiştirmesi, tekrar hesaplama yapılmasını gerektirdiği için sonucu doğrudan etkilemektedir. İstenilen kontrol performansına ulaşıncaya kadar her değişimde kişi tarafından ayrı ayrı hesap yapmak çok fazla işlem yüküne sebep olmaktadır. Sistem kontrolünde her ne kadar iyi şartlar sağlansa da gürültüden, sistem modelinden, ölçümlerden vb. nedenlerden dolayı bir belirsizlik oluşabilmektedir. Sıklıkla kullanılan tip-1 (klasik) bulanık mantık denetim sistemlerinde hesaba katılmayan bu belirsizlikleri bulanık üyelik fonksiyonları ile ifade edebilen tip-2 bulanık mantık denetim sistemlerinde parametre sayısının ve buna bağlı işlem yükünün fazla olmasından dolayı hesaplama sürecinin daha da uzun sürmesi kaçınılmaz olmaktadır. Bu süreci hızlı ve kolay bir şekilde geçerek ideal bir tip-2 bulanık denetleyicisi oluşturmak için bu çalışma kapsamında Matlab/GUI ile esnek kullanımlı tip-2 bulanık mantık editörü geliştirilmiştir. Editör içerisinde üçgen ve yamuk tip-2 üyelik fonksiyonları ile istenilen sayıda giriş çıkışa sahip bir sistemin kontrolü için tip-2 bulanık mantık denetleyici tasarımı yapılabilmektedir. Yapılan editörün test işlemi Jerry Mendel ve arkadaşları tarafından yazılmış “Introduction To Type-2 Fuzzy Logic Control “ isimli kitapta teorik olarak çözülmüş bir mobil robot kontrol uygulaması ile gerçekleştirilmiştir. Kitap içerisinde tek bir giriş değerine göre çözüm yer almasından dolayı bunun test işleminde yeterli olmayacağı düşünülmüş ve yine kitap içerisinde giriş değerlerinden 100’er örnek alınarak oluşturulmuş yüzey grafiği, editörden alınan grafiklerle karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde editörün matematiksel alt yapısının doğru bir şekilde çalıştığı gözlenmiştir. Çalışma kapsamında geliştirilen tip-2 bulanık mantık editöründe oluşturulan denetleyicilerin performanslarını görmek için benzetim ortamında ve gerçek zamanlı esnek eklemlerli robot kolunun kontrolleri gerçekleştirilmiştir.

Esnek eklemlı robot kolu kontrolü için kademeli tip-2 bulanık mantık denetim yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan denetim yapısı Matlab/Simulink ortamında geliştirilip, bu ortamla uyumlu çalışabilen dSPACE DS1103 gerçek zamanlı kontrol kartıyla robot koluna uygulanmıştır. Test düzeneğinde farklı kol uzunluklarında (0,4 m, 0,58 m) farklı referans girişleri (birim basamak, kane, sinüzoidal fonksiyonları) ile deneyler yapılmıştır. Deneylerde elde edilen sonuçlar incelendiğinde rijit uzvun uzunluğunun artması hesaplanan hata maliyet fonksiyonlarını arttırdığı gözlenmiştir. Ancak her iki uzuv uzunluğu içinde birim basamak ve kane fonksiyonu yörünge takibinde aşım gerçekleşmemiştir. Normal şartlarda T1BMD ve T2BMD birbirine benzer sonuçlar vermesinden dolayı, esnek eklemlı robot kolu sistemine yük ve gürültü sinyali eklenmiş ve kademeli T2BMD ve T1BMD denetim yapılarının sonuçları karşılaştırılmıştır. Her iki etki altında birim basamak yörünge takibi deneylerinde iki denetim yapısının da benzer sonuçlar verdiği gözlenmiştir. Ancak gürültü sinyali T1BMD denetim yapısında belirgin bir kalıcı durum hal hatasına sebep olurken, T2BMD denetim yapısında hatanın kabul edilebilir seviyede olduğu gözlenmiştir. Kane ve sinüzoidal fonksiyonları yörünge takibi deneylerinde ise T2BMD denetim yapısının daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.

Bundan sonra yapılacak çalışmalarda editördeki üyelik fonksiyonu çeşitliliği arttırılacak ve editöre tip-2 bulanık mantık denetim yapısı için önemli olan tip-2/tip-1 indirgeme yöntemlerinden KM algoritmasının dışında literatürde kullanılan farklı yöntemler eklenecektir. Ayrıca bir sistemin kontrolü için gerekli ideal üyelik fonksiyonlarının elde edilmesi için Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) veya Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) gibi yöntemler kullanılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Hagraş H., A Hierarchical Type-2 Fuzzy Logic Control Architecture For Autonomous Mobile Robots, *IEEE Trans. on Fuzzy Systems*, DOI: 10.1109/TFUZZ.2004.832538.
- [2] Zadeh L. A., The Concept Of A Linguistic Variable And Its Application To Approximate Reasoning, *Information Sciences*, 1975, **8**, 199-249.
- [3] Kayacan E., Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems: Theory And Design, Ph.D Thesis, Boğaziçi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2011, 297870.
- [4] Mamdani E. H., Assilian S., An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller, *International Journal Man-Machine Studies*, 1975, **7**, 1-13.
- [5] Tushir M., Srivastava S., Type-2 fuzzy logic controller Implementation for tracking control of DC motor, *International Journal of Computer Network and Security (IJCNS)*, **3**(1).
- [6] Özek M. B., Akpolat Z. H., Bulanık Mantık İçin Yeni Bir Yaklaşım: Tip-2 Bulanık Mantık, *e-Journal of New World Sciences Academy*, 2010, **5**(3).
- [7] Liang Q., Mendel J. M., Modeling MPEG VBR Video Traffic Using Type-2 Fuzzy Logic Systems, *In Granular Computing: An Emerging Paradigm*, Springer Verlag, Berlin, Almanya 2000.
- [8] Lin F. J., Chou P. H., Adaptive Control of Two-axis Motion Control System Using Interval Type-2 Fuzzy Neural Network, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, **56**(1), 178-193.
- [9] Liang Q., Wang L., Sensed Signal Strength Forecasting For Wireless Sensors Using Interval Type-2 Fuzzy Logic System, *Proceedings IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Reno, NV, 22-25 May 2005.
- [10] Karaköse M., Akın E., Tip-2 Bulanık Filtre, *Elektrik -Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi*, İstanbul, 18-21 Eylül 2003.
- [11] Abuelenin S. M., Decomposed Interval Type-2 Fuzzy Systems With Application To Inverted Pendulum, <http://arxiv.org/abs/1407.1809/> (Ziyaret tarihi: 16 Mayıs 2015).
- [12] Zeng J., Liu Z. Q., Type- 2 Fuzzy Sets For Handling Uncertainty In Pattern Recognition, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Vancouver, Canada, 16-21 July 2006.

- [13] Phokharatkul P., Phaiboon S., Mobile Robot Control Using Type-2 Fuzzy Logic System, *Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, Singapore, 1-3 December 2004.
- [14] Hagra H., A Type-2 Fuzzy Logic Controller For Autonomous Mobile Robots, *Proceedings IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Budapest, Hungary, 25-29 July 2004.
- [15] Kao M. C., Lin C. J., Feng C. L., Li T. H. S., Yen H. M., Adaptive Type-2 Fuzzy Tracking Control of Wheeled Mobile Robots, *Proceedings of 2013 International Conference on Fuzzy Theory and Its Application*, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan, 6-8 December 2013.
- [16] Figueroa J., Posada J., Soriano J., Melgarejo M., Rojas S., A Type-2 Fuzzy Logic Controller For Tracking Mobile Objects In The Context Of Robotic Soccer Games, *IEEE International Conference on Fuzzy Systems*, Reno, NV, 22-25 May 2005.
- [17] Kumbasar T., Hagra H., A Type-2 Fuzzy Cascade Control Architecture for Mobile Robots, *IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics*, TBD Manchester, United Kingdom, 13-16 October 2013.
- [18] Zirkohi M. M., Fateh M. M., Shoorehdeli M. A., Type-2 Fuzzy Control for a Flexible-joint Robot Using Voltage Control Strategy, *International Journal of Automation and Computing*, DOI: 10.1007/s11633-013-0717-x.
- [19] El-Bardini M., El-Nagar A. M., Interval Type-2 Fuzzy PID Controller For Uncertain Nonlinear Inverted Pendulum System, *ISA Transactions*, 53(2014)732–743, journal homepage: www.elsevier.com/locate/isatrans/ (Ziyaret tarihi: 16 Mayıs 2015).
- [20] Jha M., Shukla S., Design Of Interval Type-2 Fuzzy Logic Traffic Controller For Multilane Intersections With Emergency Vehicle Priority System Using Matlab Simulation, *Mohit Jha Int. Journal of Engineering Research and Applications*, 2014, 4(6), 37-47.
- [21] Wang T., Tong S., Yi J., Li H., Adaptive Inverse Control of Cable-Driven Parallel System Based on Type-2 Fuzzy Logic Systems, *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, 2015, 23(5).
- [22] Mendel J. M., Wu H., Type-2 Fuzzistics for Symmetric Interval Type-2 Fuzzy Sets: Part 1, Forward Problems, *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, 2006, 14(6).
- [23] Karnik N. N., Mendel J. M., Liang Q ., Type-2 Fuzzy Logic Systems, *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, 1999, 7(6).
- [24] Dongrui Wu D., Mendel J. M., Enhanced Karnik–Mendel Algorithms, *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, 2009, 17(4).

- [25] Mendel J. M., Hagrass H., Tan W.W., Melek W.W, Ying H., *Introduction To Type-2 Fuzzy Logic Control: Theory and Applications*, John Wiley & Sons, Southern California, 2014.
- [26] Coupland S., John R., Geometric Type-1 and Type-2 Fuzzy Logic Systems, *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, 2007, **15**(1).
- [27] Mendel J. M., John R. I., Liu F., Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems Made Simple, *IEEE Transactions On Fuzzy Systems*, 2006, **14**(6).
- [28] Dumanay A. B., Pid, Bulanık Mantık Ve Kayan Kip Kontrol Yöntemleri İle İnternet Üzerinden Dc Motor Hız Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir, 2009, 245723.
- [29] Garcia J. C. F., An approximation method for Type Reduction of an Interval Type-2 fuzzy set based on α -cuts, *Proceedings of the Federated Conference on Computer Science and Information Systems*, Wroclaw, Poland, 9-12 September 2012.
- [30] Hamrawi H., Coupland S., Type-2 Fuzzy Arithmetic using Alpha-planes, *IFSA-EUSFLAT*, Lisbon, Portugal, 20-24 July 2009.
- [31] Liu X., A Survey of Continuous Karnik–Mendel Algorithms and Their Generalizations, <http://www.springer.com/978-1-4614-6665-9/> (Ziyaret tarihi: 23 Mart 2015).
- [32] Kelekçi E., Kızır S., *Matlab GUI ile Tip 2 Bulanık Mantık Editör Tasarımı, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2015*, Denizli, 10-12 Ekim 2015.
- [33] Quanser, *Rotary Flexible Joint User Manual*, Quanser Incorporated, Markham, Canada, 2008.
- [34] Karaman C., Esnek Eklemlı Manipülatör Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2015, 10091335.
- [35] Ahmad M. A., Tumari M. Z. M., Nasir A. N. K., Composite Fuzzy Logic Control Approach to a Flexible Joint Manipulator, *International Journal of Advanced Robotic Systems*, DOI: 10.5772/52562.
- [36] Akyüz İ. H., Esnek Bağlı ve Esnek Eklemlı Robot Kolu Kontrolü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 2011, 301625.

EKLER

EK-A

```
real_T Thf[1000];
real_T Phf[1000];
real_T ath=1.0;
real_T bth=0.0;
real_T slth;
real_T s2th;
real_T ellth=*x10;
int_T nlth;
int_T n2th;
int_T i;
int_T ith=-1;
int_T tth=0;
for (i=0;i<=999;i++)
{
    Thf[i]=Sx1[i];
}

for (i=0;i<=999;i++)
{
    Phf[i]=Syl[i*1000];
}

while(ath>=bth)
{
    ith=ith+1;
    if(ith==999)
    {
        slth=Thf[999];
        ath=0.0;
        bth=1.0;
    }
    else
    {
        ath=Thf[ith]-*x1;
        if(ath<0)
        {
            ath=ath*-1;
        }

        bth=Thf[ith+1]-*x1;
        if(bth<0)
        {
            bth=bth*-1;
        }

        slth=Thf[ith];
    }

    while(slth!=Thf[tth])
    {
        tth=tth+1;
    }

    nlth=tth+1;
    ath=1.0;
    bth=0.0;
    ith=-1;

    while(ath>=bth)
    {
        ith=ith+1;
        if(ith==999)
        {
            s2th=Phf[999];
            ath=0.0;
            bth=1.0;
        }
        else
        {
            ath=Phf[ith]-*x10;
            if(ath<0)
            {
                ath=ath*-1;
            }

            bth=Phf[ith+1]-*x10;
            if(bth<0)
            {
                bth=bth*-1;
            }
            s2th=Phf[ith];
        }
    }

    tth=0;

    while(s2th!=Phf[tth])
    {
        tth=tth+1;
    }

    n2th=tth+1;

    *yth=B1[(n2th-1)*1000+nlth-1];
}
}
```

Şekil A.1. S-fonksiyon (S-function) blok kodları

EK-B

```
function yth = Theta(xl,Bl,Sx1,Sy1)
slth=0;
s2th=0;
Tth=Sx1(:,1);
Pth=Sy1(1,:);
xth=xl';
ith=0;
ath=1;
bth=0;
el1th=xth(1);
el2th=xth(2);
while(ath>bth)
    ith=ith+1;
    ath=abs(Tth(ith)-el1th);
    bth=abs(Tth(ith+1)-el1th);
    slth=Tth(ith);
end

tth=1;
while(slth~=Tth(tth))
    tth=tth+1;
end
nlth=tth;
ath=1;
bth=0;
ith=0;
while(ath>bth)
    ith=ith+1;
    ath=abs(Pth(ith)-el2th);
    bth=abs(Pth(ith+1)-el2th);
    s2th=Pth(ith);
end

tth=1;
while(s2th~=Pth(tth))
    tth=tth+1;
end
n2th=tth;
yth=Bl(nlth,n2th);
```

Şekil B.1. Matlab fonksiyon blok kodları

EK-C

$$y(t) = y_0 + (y_f - y_0) \frac{t - t_0}{t_f - t_0} - \frac{y_f - y_0}{2\pi} \sin\left(2\pi \frac{t - t_0}{t_f - t_0}\right)$$

$y(t)$: Pozisyon fonksiyonu
 y_0 : Başlangıç pozisyonu
 y_f : Bitiş pozisyonu
 t : Zaman
 t_f : Bitiş zamanı

Şekil C.1. Kane fonksiyonu

KİŞİSEL YAYIN VE ESERLER

- [1] **Kelekçi E.**, Kizir S., Matlab GUI ile Tip 2 Bulanık Mantık Editör Tasarımı, *Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı - TOK2015*, Denizli, Türkiye, 10-12 Ekim 2015.

ÖZGEÇMİŞ

Mart 1991 Bolvadin/Afyonkarahisar doğumludur. İlkokul eğitiminin 4 yılını Alanya/Antalya'da ilkokul son ve ortaokul eğitimini Bolvadin/Afyonkarahisar'da tamamlamıştır. 2005 yılında Meram Anadolu Teknik Lisesi'nde eğitime başlamış ve 2009 yılında mezun olmuştur. 2009 yılında girdiği üniversite sınavında Marmara Üniversitesi Mekatronik Eğitimi bölümünü kazanmış ve 2013 yılında Mekatronik Öğretmeni olarak mezun olmuştur. 2012 yılı Temmuz ayında stajyer olarak başladığı EOC firmasının yazılım bölümünde 2012-2013 eğitim yılında yarı zamanlı, 2013 yılı Haziran ayında mezun olduktan sonra tam zamanlı çalışmıştır. 2013 yılı Eylül ayında Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans eğitimine başlamıştır. 2014 yılı Şubat ayında, Celal Bayar Üniversitesi Hasan Ferdi Turgutlu Teknoloji Fakültesi Mekatronik Mühendisliği bölümü'nde ÖYP araştırma görevlisi olarak göreve başlamıştır. 2014 yılı Ocak ayında yüksek lisans eğitimi aldığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Anabilim Dalı'na görevlendirilmiştir ve halen görevine devam etmektedir.