



**KTO KARATAY ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ELEKTRİK- ELEKTRONİK ANABİLİM DALI
ELEKTRİK VE BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS
PROGRAMI**

**BÜYÜK PATLAMA BÜYÜK ÇÖKÜŞ OPTİMİZASYON ALGORİTMASI İLE
BULANIK PID KONTROLÖR TASARIMI VE ÇEYREK ARAÇ
SÜSPANSİYON SİSTEMİNE UYGULANMASI**

Gökberk AY

Yüksek Lisans Tezi

**KONYA
Mart 2021**

BÜYÜK PATLAMA BÜYÜK ÇÖKÜŞ OPTİMİZASYON ALGORİTMASI İLE
BULANIK PID KONTROLÖR TASARIMI VE ÇEYREK ARAÇ SÜSPANSİYON
SİSTEMİNE UYGULANMASI

Gökberk AY

KTO Karatay Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Elektrik- Elektronik Anabilim Dalı
Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Barış Samim NESİMİOĞLU

Konya
Mart 2021

KABUL VE ONAY

Gökberk AY tarafından hazırlanan “Büyük Patlama Büyük Çöküş Optimizasyon Algoritması ile Bulanık PID Kontrolör Tasarımı ve Çeyrek Araç Süspansiyon Sistemine Uygulanması” başlıklı bu çalışma, 19 Mart 2021 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Jüri Başkanı: **Doç. Dr. Akif DURDU** _____
Konya Teknik Üniversitesi

Tez Danışmanı: **Dr. Öğr. Üyesi Barış Samim NESİMİOĞLU** _____
KTO Karatay Üniversitesi

Jüri Üyesi: **Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin Oktay ALTUN** _____
KTO Karatay Üniversitesi

Jüri tarafından kabul edilen bu çalışmanın Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

Prof. Dr. Hüseyin Bekir YILDIZ

Enstitü Müdürü

BİLDİRİM

Enstitü tarafından onaylanan Yüksek Lisans/Doktora tezimin tamamını veya herhangi bir kısmını basılı veya dijital biçimde arşivleme ve aşağıda belirtilen koşullar dahilinde erişime açma iznini KTO Karatay Üniversitesine verdiğimi bildiririm. Bu izinle, Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet haklarım bende kalacak ve gelecekteki çalışmalar (makale, kitap, lisans, patent vb.) için tezimin tamamının veya bir bölümünün kullanım hakları yalnızca bana ait olacaktır.

Tezimin bütünüyle kendi çalışmam olduğunu, başkalarının haklarını ihlal etmediğimi ve tezimin tek yetkili sahibi olduğumu beyan ve taahhüt ederim. Telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izinle kullanılması zorunlu olan kaynakları, yazılı izin alarak kullandığımı ve istenildiğinde izinlerin suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederim.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayımlanan “Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge” kapsamında, tezim, aşağıda belirtilen koşullar haricince, YÖK Ulusal Tez Merkezi ve KTO Karatay Üniversitesi Açık Erişim Sisteminde erişime açılır.

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulu kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren 2 yıl ertelenmiştir.¹

Enstitü / Fakülte Yönetim Kurulunun gerekçeli kararı ile tezimin erişime açılması mezuniyet tarihimden itibaren ... ay ertelenmiştir.²

Tezimle ilgili gizlilik kararı verilmiştir.³⁴

19 Mart 2021

Gökberk AY

¹ MADDE 6(1) Lisansüstü teze ilgili patent başvurusu yapılması veya patent alma sürecinin devam etmesi durumunda, tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulu iki yıl süre ile tezin erişime açılmasının ertelenmesine karar verebilir.

² MADDE 6(2) Yeni teknik, materyal ve metotların kullanıldığı, henüz makaleye dönüşmemiş veya patent gibi yöntemlerle korunmamış ve internetten paylaşılması durumunda 3. şahıslara veya kurumlara haksız kazanç imkanı oluşturabilecek bilgi ve bulguları içeren tezler hakkında tez danışmanının önerisi ve enstitü anabilim dalının uygun görüşü üzerine enstitü veya fakülte yönetim kurulunun gerekçeli kararı ile altı ayı aşmamak üzere tezin erişime açılması engellenebilir.

³ MADDE 7(1) Ulusal çıkarları veya güvenliği ilgilendiren, emniyet, istihbarat, savunma ve güvenlik, sağlık vb. konulara ilişkin lisansüstü tezlerle ilgili gizlilik kararı, tezin yapıldığı kurum tarafından verilir. Kurum ve kuruluşlarla yapılan işbirliği protokolü çerçevesinde hazırlanan lisansüstü tezlere ilişkin gizlilik kararı ise, ilgili kurum ve kuruluşun önerisi ile enstitü veya fakültenin uygun görüşü üzerine üniversite yönetim kurulu tarafından verilir. Gizlilik kararı verilen tezler Yükseköğretim Kuruluna bildirilir.

⁴ MADDE 7(2) Gizlilik kararı verilen tezler gizlilik süresince enstitü veya fakülte tarafından gizlilik kuralları çerçevesinde muhafaza edilir, gizlilik kararının kaldırılması halinde Tez Otomasyon Sistemine yüklenir.

ETİK BEYAN

KTO Karatay Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez/Proje Hazırlama ve Yazım Kurallarına uygun olarak Dr. Öğr. Üyesi Barış Samim NESİMİOĞLU danışmanlığında tarafımdan üretilen bu tez çalışmasında; sunduğum tüm veri, enformasyon, bilgi ve belgeleri bilimsel etik kuralları çerçevesinde elde ettiğimi, tüm değerlendirme, analiz, bulgu ve sonuçları bilimsel usullere uygun olarak sunduğumu, tez/proje çalışmasında yararlandığım kaynakların tümüne bilimsel normlara uygun biçimde atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, tezimin/projemin kaynak gösterilen durumlar dışında özgün olduğunu bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

19 Mart 2021

Gökberk AY

Tüm sevdiklerime...

TEŞEKKÜR

Kıymetli fikirlerini ve tecrübelerini gerek hayatımda kritik kararlar almam gereken dönemlerde, gerekse ortaya çıkan bu çalışmanın her kademesinde benimle paylaşmaktan hiçbir koşulda tereddüt etmeden üzerimdeki emeklerini asla esirgemeyen, bana hem ağabey hem yol gösterici olan çok değerli danışmanım, değerli bilim insanı Sayın Doktor Öğretim Üyesi Barış Samim NESİMİOĞLU'na

Süregelen vakitlerde gerçekleştirdiğimiz her diyalogda istisnasız ufkumu açan, bakış açısıyla vizyon katan değerli bilim insanı Sayın Doktor Öğretim Üyesi Şerife ÖZKAN NESİMİOĞLU'na

Hayatımın başlangıcından bugünlerime kadar var olan tüm koşullarda, yanımda sergiledikleri sevgi ve destek ile koşulsuz aile kelimesinin anlamını bana sonuna kadar hissettiren çok değerli annem Fatma AY ve babam Ali AY'a

Birlikte görev yaptığımız, tez süreci boyunca benden bilgilerini esirgemeyen, bana yol gösterip fikirlerini paylaşmaktan imtina etmeyen mesai arkadaşlarım Emre OFLAZ, Erdi GÜLBAHÇE, Sinan İLGEN ve Havva Nur ERDEM İLGEN'e

Hayatım boyunca aldığım kararlarda, yanlış ya da doğruyu uygulasam dahi her daim yanımda varlığını hissettiren tüm sevdiklerime

En içten teşekkürlerimi borç bilirim.

Mart, 2021

Gökberk AY

ÖZET

Gökberk AY

Büyük Patlama Büyük Çöküş Optimizasyon Algoritması ile Bulanık PID Kontrolör
Tasarımı ve Çeyrek Araç Süspansiyon Sistemine Uygulanması
Yüksek Lisans Tezi

Mart, 2021

Bu çalışmada temel amaç çeyrek süspansiyon sistemi üzerinde aktif kontrolör tasarlayarak kullanıcı konforu iyileştirmesi sağlamaktır. Bu kapsamda kapalı çevrim kontrol sistemi için kontrolör olarak direk aksiyon tipi optimize bulanık PID kontrolör ele alınmıştır. Önerilen kontrolör tasarımında, kontrolör bünyesinde bulunan tüm değişkenler için büyük patlama büyük çöküş (BBBC) optimizasyon metodu kullanılmıştır. Bu metot içerisinde kontrolör yapısında bulunan hata katsayısı, hata türevi katsayısı, bulanık üyelik fonksiyonlarının değerleri ve PID kontrolöre ait oransal, türev ve integral katsayıları optimize edilmiştir. BBBC optimizasyon yöntemiyle optimize edilen parametreler sistemde işletilerek integral kare hatası (ISE) ve integral mutlak hatası (IAE) performans kriterleri açısından çeyrek araç pasif süspansiyon sistemi ve geleneksel PID kontrolör ile kıyaslanmıştır.

Bu çalışmanın ilk kısmında giriş yapılan temel bakış açısının ardından ikinci kısımda kontrol kavramı ve bulanık mantık tabanlı kontrolör tasarımında bulunan tüm aşamalar detaylı olarak açıklanmıştır. Üçüncü kısımda bulanık mantık tabanlı kontrolörlerin, literatürde bulunan türlerine göre detaylı sınıflandırılması incelenmiştir. Dördüncü bölümde bu çalışma kapsamında tüm katsayıların optimizasyonunda kullanılan BBBC optimizasyon algoritması teorik olarak tüm detayları ile anlatılmıştır. Beşinci bölümde ise, çeyrek araç süspansiyon modelinin hareket denklemleri çıkarılarak modeli elde edilmiş ve beş farklı tipte yol profiliyle birlikte detaylı olarak açıklanmıştır. Son bölümde ise yapılan çalışma kapsamında BBBC optimizasyon metoduyla elde edilen direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün ve farklı yol türleri üzerinde sistem davranışlarının performans kriterlerine göre pasif süspansiyon sistemi ve geleneksel PID kontrolör ile kıyaslamaları yapılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır.

Anahtar Kelimeler

Çeyrek araç süspansiyon sistemi, optimize bulanık PID kontrolör, büyük patlama büyük çöküş optimizasyonu

ABSTRACT

Gökberk AY

Fuzzy PID Controller Design via Big Bang Big Crunch Optimization Algorithm and
Application to Quarter-car Suspension System.

Master's Thesis

March, 2021

The main purpose of this study is to improve user comfort by designing an active controller on a quarter car suspension system. In this context, a direct action type optimized fuzzy PID controller is considered as a controller for a closed loop control system. In the proposed controller design, the big bang big collapse (BBBC) optimization method is used for all variables within the controller. In this method, the error coefficient, error derivative coefficient, values of fuzzy membership functions and the proportional, derivative and integral coefficients of the PID controller in the controller structure have been optimized. The parameters optimized by the BBBC optimization method were operated in the system and compared with the quarter vehicle passive suspension system and conventional PID controller in terms of integral square error (ISE) and integral absolute error (IAE) performance criteria.

Following the basic point of view in the first part of this study, the concept of control and all stages in fuzzy logic based controller design are explained in detail in the second part. In the third part, the detailed classification of fuzzy logic-based controllers according to their types in the literature is examined. In the fourth chapter, the BBBC optimization algorithm used in the optimization of all coefficients is theoretically explained in all details. In the fifth chapter, the motion equations of the quarter vehicle suspension model are derived and the model is obtained and explained in detail with five different types of road profiles. In the last part, within the scope of the study, the direct action type fuzzy PID controller obtained by the BBBC optimization method and the system behaviors on different road types were compared with the passive suspension system and traditional PID controller according to the performance criteria and the results were interpreted.

Keywords

Quarter-car suspension system, optimized fuzzy PID controller, big bang big crunch optimization

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY	i
BİLDİRİM	ii
ETİK BEYAN.....	iii
TEŞEKKÜR.....	v
ÖZET.....	ii
ABSTRACT.....	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar DİZİNİ	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	vii
SİMGELER DİZİNİ.....	x
KISALTMALAR DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. BULANIK MANTIK VE BULANIK MANTIKLA KONTROL.....	3
2.1. Bulanık Mantık.....	3
2.2. Bulanık Kontrol.....	6
2.2.1. Ölçeklendirme Katsayısı.....	9
2.2.2. Bulanıklaştırma.....	9
2.2.3. Bulanık Çıkarım.....	29
2.2.4. Durulama İşlemi	49
3. BULANIK MANTIK TABANLI KONTROLÖRLER.....	57
3.1. Direk Aksiyon Tipi Bulanık Kontrolörler	58
3.2. Bulanık Kazanç Planlamalı Tip (BKPT) Kontrolörler.....	67
3.3. Hibrit Tip Bulanık (HTB) Kontrolörler.....	71
4. BBBC OPTİMİZASYON YÖNTEMİ.....	77
5. SİSTEM TANIMI, YOL PROFİL TÜRLERİ, PROBLEM VE UYGULANMASI ..	81
5.1. Çeyrek Araç Süspansiyon Modeli.....	81
5.2. Yol Profili Türleri.....	85
5.2.1. Tek Tümsekli Yol Profili.....	85
5.2.2. Çift Tümsekli Yol Profili.....	86
5.2.3. Sinüzoidal Yol Profili	87
5.2.4. Rastgele Yol Profili	88
5.2.5. Tek Tümsek ve Rastgele Yol Profili	88

5.3. Problem ve Uygulama	89
5.4. Ele Alınan Performans Kriterleri	103
5.4.1. Mutlak Hata İntegrali (IAE)	103
5.4.2. Karesel Hata İntegrali (ISE)	103
6. SONUÇLAR	104
7. KAYNAKLAR	121

TABLolar DİZİNİ

Tablo 1. İki değişkenli "ve" operatörü doğruluk tablosu.....	20
Tablo 2. İki değişkenli "veya" operatörü doğruluk tablosu.....	20
Tablo 3. Tek değişkenli "değil" operatörü doğruluk tablosu.....	21
Tablo 4. Çeşitli türler için verilen örnek doğrultusunda operatör hesapları.....	24
Tablo 5. Örnek üç girişli tek çıkışlı sistem için bulanık kural tablosu.....	27
Tablo 6. Örnek araç sistemi için bulanık kural tablosu.....	28
Tablo 7. Mamdani ve TS tip bulanık çıkarım mekanizmalarının temel avantajları.....	30
Tablo 8. Verilen örneğe ait bulanık kural tablosu.....	33
Tablo 9. Ateşlenen bulanık kuralların üyelik fonksiyonlarının en küçük (min.) operatörüne göre seçilimi.....	39
Tablo 10. TS bulanık çıkarımında ateşlenen bulanık kurallar için ilgili değerler tablosu.....	48
Tablo 11. AMDY metodunun işletilebilmesi için gerekli parametre değerleri.....	51
Tablo 12. Çeyrek araç süspansiyon model parametreleri.....	84
Tablo 13. Tez kapsamında kullanılan bulanık kontrolör girişlerine ait bulanık kural değer tablosu.....	91
Tablo 14. Tez kapsamında kullanılan bulanık kontrolör çıkışına ait bulanık kural değer tablosu.....	93
Tablo 15. Tez kapsamında kullanılan bulanık kural tabanı.....	94
Tablo 16. Hata ve hata türevi değişkenleri için katsayı tablosu.....	99
Tablo 17. Üyelik fonksiyonları ile oransal integral ve türev katsayılarının değerler tablosu.....	100
Tablo 18. Tüm yol profilleri için değişkenler ve ISE performans değerleri tablosu.....	111
Tablo 19. Tüm yol profilleri için değişkenler ve IAE performans değerleri tablosu.....	119
Tablo 20. Elde edilen tüm sonuçlar ve diğer kontrolörlerle kıyaslanması.....	120

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. (a) Sıcaklık değişkenine ait bulanık mantık ifadesi, (b) sıcaklık değişkenine ait ikili mantık ifadesi.....	4
Şekil 2. (a) Açık çevrim TGÇÇ sistem gösterimi, (b) Açık çevrim ÇGÇÇ sistem gösterimi.....	7
Şekil 3. Tipik bir bulanık kontrolör yapısı ve kapalı çevrim sistem üzerinde gösterimi....	7
Şekil 4. E, K, A ve B kümelerinin şematik gösterimi.....	11
Şekil 5. (a) Hız değişkeni klasik küme gösterimi, (b) Hız değişkeni bulanık küme gösterimi.....	13
Şekil 6. (a) Üçgen tipi üyelik fonksiyonu, (b) Singleton (tekil) tip üyelik fonksiyonu, (c) Gaussian tipi üyelik fonksiyonu, (d) Çan tipi üyelik fonksiyonu, (f) Trapezoidal tip üyelik fonksiyonu.....	17
Şekil 7. Üç adet trapezoidal tip üyelik fonksiyonlarından oluşturulan örnek bulanık küme.....	18
Şekil 8. Beş adet üçgen tip üyelik fonksiyonlarından oluşturulan örnek bulanık küme..	18
Şekil 9. Yedi adet singleton (tekil) tip üyelik fonksiyonlarından oluşturulan örnek bulanık küme.....	19
Şekil 10. A ve B bulanık küme gösterimleri.....	22
Şekil 11. A ve B bulanık kümelerinin kesişim gösterimi.....	23
Şekil 12. A ve B bulanık kümelerinin birleşim gösterimi.....	23
Şekil 13. A değil bulanık kümesinin gösterimi.....	23
Şekil 14. Kandaki kalsiyum miktarının bulanık küme gösterimi.....	32
Şekil 15. Etki eden kuvvet büyüklüğünün bulanık küme gösterimi.....	32
Şekil 16. Kemik kırılma yüzdesinin bulanık küme gösterimi.....	32
Şekil 17. Kalsiyum değeri 9 mg/dL için üyelik fonksiyonu değerleri.....	34
Şekil 18. Kuvvet büyüklüğü değeri 2.5 N için üyelik fonksiyonu değerleri.....	35
Şekil 19. Verilen örnek için bulanık kuralların gösterimi.....	38
Şekil 20. Verilen örnek için Mamdani tip bulanık çıkarım gösterimi.....	40
Şekil 21. Bir araya getirme işlemi gösterimi.....	42
Şekil 22. TS bulanık çıkarım işleyiş diyagramı.....	44
Şekil 23. Verilen örnek için çıkış singleton (tekil) tip üyelik fonksiyonları.....	45
Şekil 24. Ateşlenen bulanık kurallar için bir araya getirme işlemi.....	50
Şekil 25. MATLAB üzerinde örnek uygulama gösterimi.....	52
Şekil 26. TS tip bulanık çıkarım için AODY ile elde edilen çıkış gösterimi.....	53
Şekil 27. Maksimum değer aralığının ilk değeri durulama işlemi.....	55

Şekil 28. Maksimum değer aralığının orta değeri durulama işlemi.....	56
Şekil 29. Maksimum değer aralığının son değeri durulama işlemi.....	56
Şekil 30. Bulanık kontrolör sınıflandırma şeması.....	58
Şekil 31. Tek girişli PI kontrolör yapısı.....	59
Şekil 32. Bulanık PD+PI kontrolör tipi blok diyagramı.....	60
Şekil 33. Bulanık PD+I kontrolör tipi blok diyagramı.....	60
Şekil 34. İki kademeli bulanık PI kontrolör blok diyagramı.....	61
Şekil 35. İki kademeli bulanık PD kontrolör blok diyagramı.....	61
Şekil 36. İki kademeli bulanık PID kontrolör blok diyagramı.....	61
Şekil 37. Ayrıştırılmış bulanık PID kontrolör blok diyagramı.....	62
Şekil 38. Bulanık PD+I kontrolör blok diyagramı.....	63
Şekil 39. Bulanık anahtarlama BMTK blok diyagramı.....	64
Şekil 40. Çift kademe BMTK kontrolör ilk seviye blok diyagramı.....	64
Şekil 41. Çift kademe BMTK kontrolör ikinci seviye blok diyagramı.....	65
Şekil 42. Sıralı bulanık-PID tip kontrolör kapalı çevrim kontrol diyagramı.....	66
Şekil 43. Geleneksel kazanç planlamalı tip kontrolör kapalı çevrim blok diyagramı.....	67
Şekil 44. BKPT kontrolör kapalı çevrim kontrol sistemi diyagramı.....	69
Şekil 45. BKPT PID kontrolör kapalı çevrim kontrol sistemi diyagramı.....	70
Şekil 46. Önerilen hibrit kontrol kapalı çevrim blok diyagramı.....	72
Şekil 47. Hibrit bulanık PID kontrolör kapalı çevrim blok diyagramı.....	73
Şekil 48. Hibrit kontrolör sistemi algoritma akış diyagramı.....	74
Şekil 49. THBPID kapalı çevrim kontrol diyagramı.....	75
Şekil 50. Hibrit kontrolör kapalı çevrim kontrol diyagramı.....	76
Şekil 51. BBBC optimizasyon algoritması akış diyagramı.....	80
Şekil 52. Çeyrek araç süspansiyon sistemi modeli.....	82
Şekil 53. Tek tümsek yol profil grafiği.....	86
Şekil 54. Çift tümsek yol profil grafiği.....	87
Şekil 55. Sinüzoidal yol profil grafiği.....	87
Şekil 56. Rastgele yol profil grafiği.....	88
Şekil 57. Tek tümsek ve rastgele yol profil grafiği.....	89
Şekil 58. Tez kapsamında kullanılan kapalı çevrim sistem blok diyagramı.....	90
Şekil 59. Hata değişkeni için MATLAB bulanık küme gösterimi.....	92
Şekil 60. Hata türevi değişkeni için MATLAB bulanık küme gösterimi.....	92
Şekil 61. Bulanık kontrolör çıkışı için MATLAB bulanık küme gösterimi.....	94

Şekil 62. Tek tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (ISE).....	105
Şekil 63. Çift tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (ISE).....	106
Şekil 64. Sinüzoidal yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (ISE).....	107
Şekil 65. Rastgele yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (ISE).....	109
Şekil 66. Rastgele ve tek tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (ISE).....	110
Şekil 67. Tek tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (IAE).....	113
Şekil 68. Çift tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (IAE).....	114
Şekil 69. Sinüzoidal yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (IAE).....	115
Şekil 70. Rastgele yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (IAE).....	116
Şekil 71. Rastgele ve tek tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (IAE).....	118

SİMGELER DİZİNİ

Simge	Açıklama
b	Damper elemanı katsayısı
k	Yay sabiti
m	Kütle
z	Düşey yer değıştirme

KISALTMALAR DİZİNİ

Kısaltma	Açıklama
AKO	Arı Kolonisi Optimizasyonu
AMDY	Ağırlık Merkezi Durulama Yöntemi
AODY	Ağırlık Ortalaması Durulama Yöntemi
BBBC	Büyük Patlama Büyük Çöküş
BKPT	Bulanık Kazanç Planlamalı Tip
BMTK	Bulanık Mantık Tabanlı Kontrolör
BPID	Bulanık PID
BSA	Bulanık Seçici Anahtar
BTO	Bakteriyel Toplayıcı Optimizasyon
ÇGÇÇ	Çok Giriş Çok Çıkış
ÇGTÇ	Çok Giriş Tek Çıkış
DA	Direk Akım
EB	En Büyük
EK	En Küçük
GKPT	Geleneksel Kazanç Planlamalı Tip
GO	Genetik Optimizasyon
HPID	Hibrit Bulanık PID
IAE	Mutlak Hata İntegrali
ITAE	Mutlak Hata Zaman İntegrali
ISE	Kare Hata İntegrali
İABPID	İç Ayarlamalı Bulanık PID
İHA	İnsansız Hava Aracı
MDDY	Maksimum Değer Durulama Yöntemi
MR	Manyetoreolojik Damper
N	Popülasyon Sayısı
NB	Negatif Büyük

NM	Negatif Orta
NS	Negatif Küçük
P	Pozitif
PB	Pozitif Büyük
PM	Pozitif Orta
PS	Pozitif Küçük
PSO	Parçacık Sürü Optimizasyonu
SGÇÇ	Sınırlı Giriş Sınırlı Çıkış
TGÇÇ	Tek Giriş Çok Çıkış
TGTÇ	Tek Giriş Tek Çıkış
THBPID	Tümleşik Hibrit Bulanık PID
TS	Takagi-Sugeno
YS	Yükselme Süresi
YZ	Yerleşme Zamanı
Z	Sfır

1. GİRİŞ

Ele alınan bir sistemin kontrol edilebilmesi kavramı kabaca, ilgili sisteme uygulanan giriş işareti neticesinde, dış etken olarak sisteme müdahil olabilecek tüm bozucu koşullar altında sistemden meydana gelen çıkışın kararlı kılınabilmesi olarak tanımlanabilir. Bununla beraber, sistemin belirlenen performans kriterleri çerçevesinde, arzu edilen performansı sergilemesi de iyileştirilmesi için bir gereklilik olarak kabul edilebilir. Bu tanım çerçevesinde kontrol kavramına bakıldığında, kimisi tamamen matematiksel tabanlı, kimisi ise daha uygulamaya odaklı birçok kontrol yöntemi bulunmaktadır. Bu noktada kontrol yönteminden temel beklenti, kontrolörün dış dünyada kaçınılmaz olarak var olan bozucuların etkisinde, bozucunu sistem üzerindeki etkisi ön görülenden daha yüksek olsa dahi, uygulandığı sisteme kabul edilebilir bir performans sergileyebilmesidir.

Yukarıda bahsedilen genel çerçeveye uyumlu olarak, taşıt sistemlerinde araç güvenliği ve yol tutuşu başta olmak üzere, kullanıcı konforu gelişimi hususu da dünya üzerinde bulunan otomotiv sektörü içerisinde rekabete sebep olabilmektedir. Bu firmaların Ar-Ge bütçelerinin ve bünyelerinde bulundurdukları araştırma kapasitelerinin büyük çoğunluğunun bu hususa yöneltmesine imkân tanıyabilmektedir.

Yapılmak istenen türlü gelişmeler için gerçekleştirilen araştırmalara olan eğilimin altındaki temel sebeplerden bir tanesi, hiç kuşkusuz ki yaşadığımız dünya üzerinde var olan çok çeşitli coğrafi koşulların meydana getirdiği yol profili türlerinde araçların güvenli, yol tutuş kabiliyeti yüksek ve konforlu bir şekilde kullanılabilmesi isteğinden kaynaklanmaktadır. İstenen bu niteliklerin geliştirilebilmesi konusunda süspansiyon sistemi de kilit elemanlardan biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Araçlarda bulunan süspansiyon sisteminin bazı temel sayılabilecek görevleri bulunmaktadır. Bunlar başlıca maruz bırakılan her türden yol profili durumu karşısında güvenlikten ödün vermeden iyi bir yol tutuşu sağlamak ve bu bağlamda araç gövdesinin pozisyonunu tüm koşullar için stabil kılarak olabilecek her türlü bozucu etkisinin meydana getirdiği salınımlara karşı sönümleme davranışı sergileyerek akıcı bir kullanım imkânı sunarak araç içerisinde bulunan kişilerin konforunu maksimum seviyede tutabilmektir. Geleneksel pasif süspansiyon sistemlerinde, yol tutuşu kavramı ile kullanıcı konforu kavramı birbiri ile genelde çelişen ifadelerdir. Bunun sebebi, bir kontrolör yapısı barındırmayan ve açık çevrim şeklinde işlev gören pasif süspansiyonların hem fiziksel kanunlar hem de yapısı

gereği, ne şekilde tasarlanırsa tasarlansın sınırlı sayıdaki beklentiyi karşılayabilme yeteneğidir. Bu durumun üstesinden gelerek, süspansiyona çok çeşitli koşullar altında, geniş bir beklentiyi karşılayabilmek için süspansiyon sistemlerine eklenen kontrolörler de tüm bu istenilen kavramların bir arada sağlanmasındaki kuvvet dengesini kompanze edebilmek adına süspansiyon sistemlerinde kilit elaman olarak kabul görmeye başlamıştır. Bununla uyumlu olarak, içinde bulunduğumuz son yüzyılda, taşıtlar için beklenen bu özellikler, kullanılan geleneksel süspansiyon sistemlerinin yerini içinde kapalı çevrim kontrol sistemi bulunan gelişmiş süspansiyon sistemlerine bırakmaya başlamasına sebep olmuştur. Süspansiyon sistemlerinin geliştirilmek istenilmesindeki temel amaç güvenlik, yol tutuşu ve kullanıcı konforu kriterlerinin tamamının optimize edilerek meydana gelebilecek tüm yol koşulları altında kullanıma sunulabilmesidir.

Bu bağlamda, bu tezin temel amacı, dünya üzerindeki coğrafi koşulların getirebileceği çeşitli yol profilleri altında, hızlı tepki veren bir süspansiyon kontrol sistemini tasarlamaktır. Bu amaçla, Büyük Patlama Büyük Çöküş (BBBC) optimizasyon algoritması kullanılarak, çeyrek araç süspansiyon sistemi için direk aksiyon tipi bulanık-PID kontrolör tasarımı tez kapsamında gerçekteşirilmiş, süspansiyon sisteminin etkinliği, sonuçlar pasif süspansiyon ve MATLAB tarafında optimize edilmiş bir PID kontrolör barındıran süspansiyon yapısıyla kıyaslanmıştır.

Bu bağlamda, dünya üzerinde şehir içi ve arazi koşullarında karşılaşılabilecek birçok yol profilini sergileme kapasitesi olan tek tümsek, çift tümsek, sinüzoidal, rastgele ve rastgele ile tek tümsek yol birleşimini içeren beş farklı yol profili ele alınmıştır. Pasif süspansiyon ve klasik PID ile kontrol edilen süspansiyon sistemi ile sağlıklı bir kıyas yapılabilmesi için ise kontrol problemlerinde en çok ele alınan iki performans kriteri olan karesel hata integrali (ISE) ve mutlak hata integrali (IAE) kıyas amacıyla kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, çeyrek araç süspansiyon sisteminde direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün, pasif durum ve geleneksel PID kontrolörden tüm yol profillerinde daha iyi sonuçlar sergilediği gösterilmiştir.

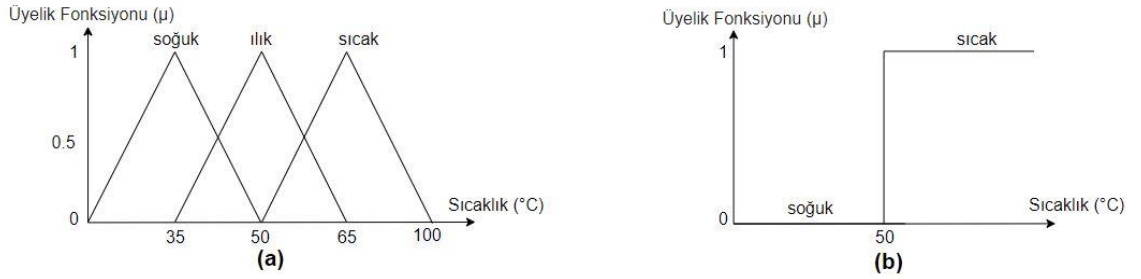
2. BULANIK MANTIK VE BULANIK MANTIKLA KONTROL

2.1. Bulanık Mantık

Bulanık mantık, en temel tanıtmda, ikili mantık sisteminin genişletilmiş halidir. İkili mantık sistemi, sıfır (0) durumunun yok veya yanlış, bir (1) durumunun var veya doğru olarak kabul edildiği temel akıl yürütme türüdür. Bulanık mantık daha detaylı olarak, insan düşünce sisteminden ortaya çıkan dilsel ifadelerin niteliğini artırabilmek için kurulur. Bulanık mantık, klasik ikili mantık sisteminde bulunan kesin ifadelerin arasındaki sözel biçimleri sıfır ile bir aralığındaki değerlerle nitelik derecelerine göre modelleyen mantık yapısıdır. Bulanık mantık kavramı ilk olarak 1965 yılında Azeri matematikçi Lütü Zadeh tarafından ortaya atılmıştır. Zadeh, kavramların ikili mantığın ötesinde, sürekliliği sağlanabilen ve neden-sonuç ilişkili bağlamlarıyla insan düşünce sistemine daha yakın ve daha yumuşak bir biçimde açıklanabileceğini belirtmiştir (Zadeh, 1965). İnsanlar günlük hayatlarında, farkında olmasalar da esas olarak bulanık mantığın kavramsal yapısını çokça kez kullanır. Gün içerisinde insanların bir bilgi edinebilmek veya bir eyleme geçebilmek için sordukları sorulara aldıkları yanıtlar, bulanık mantığın altında yatan temel felsefeyle benzerlik göstermektedir. Bu gündelik cevaplara bir mağazanın müşteri memnuniyet anketinde bulunan bir soru basit bir örnek olarak gösterilebilir. Yöneltilen sorunun amacı ürünün kalitesinden müşterinin memnun kalıp kalmadığını öğrenmek için yöneltildiğinde alınan cevapların içerisinde “yeterince memnun”, “az memnun” vb. ifadelerin görülmesi olasıdır. Bu cevaplar içerisinde yeterince kavramını ve az kavramını anlaşılır çözüme ulaştıran nedir sorusuna cevap arandığında, bulanık mantık felsefesi devreye girecektir. Yaşanılan koşullarda sadece ikili mantık kavramına göre muhakeme yapılırsa, aynı örneğe verilen yanıtlar “kesinlikle memnun” veya “memnun değil” olarak gözlenebilirdi.

İkili mantık kavramının ötesinde bulanık mantığın meydana gelmesinin altındaki temel sebeplerden birisi daha fazla verinin işlenmesidir. Veri, durumlardan elde edinilen bilginin ölçülebilir ve kaydedilebilir miktarı olarak tanımlanabilir. Bulanık mantık kavramının gelişmesindeki temel sebep basitçe şöyle açıklanabilir; düşünce yapısı itibariyle işletilecek bilginin ve buna bağlı verinin miktarı arttıkça, kararlar arasındaki kesin yargı ifadeleri yerini daha yumuşak geçişli yargılara bırakır. Bunun sebebi de veri çokluğundan dolayı daha doğru ve daha açık ifade edebilme ihtiyacıdır. Örnek olarak,

çocukluk çağının erken safhası ile insanın yetişkinlik safhası arasında her türden fiziksel olguya karşı algılanan duyu hassasiyetleri aynı olmasına karşın bu duyuların ifade biçimleri bilgi birikimlerine bağlı olarak değişkenlik gösterir. Bu durum, çocukluğun erken çağlarında bilgi miktarına bağlı olarak daha katı ve kesin çağrışımlar yapmasıyla açıklanırken, yetişkinlik evrelerinde aynı durumların daha geçişi kabul edilebilir tanımları mevcut olabilir şeklinde açıklanabilir. Bir duyu hakkındaki nitelendirme ele alınacak olursa; bir bebek sıcaklık kavramını dokunma duyusu yardımı ile algıladığı zaman sadece sıcak ya da soğuk olarak ifade edebilirken, bir yetişkin bu sıcaklık kavramlarını sürekliliği artırılmış ve kademeli nitelik geçişlerine bölerek, az sıcak, sıcak, ılık, soğuk ya da çok soğuk olarak ifade edebilir. Bunun sebebi, bebek zihninin sahip olduğu bilginin getirisi olan veri, çoklu nitelendirmeye bilgi olarak henüz sahip değildir ve yaklaşık olarak ikili mantıkta işletilebilir düzeydedir. Bebek için belirli bir sıcaklığa erişene kadar her değer sıcak değil algısı yaratırken, bu sıcaklığın eşik değeri geçildikten sonra ise her değer sıcak olarak algılanır. Bunun zıttı yönde yetişkinlerde bu durum bilgi birikiminin artmasına bağlı olarak işlenen veri fazlalığı ile, sıcaklığın miktarına göre ikili mantık yapısının ötesinde daha yumuşak geçişlere sahip dereceden değerlendirme ifadeleri barındırabilir ve sürekliliği bulunan bir biçimde dilsel terimler ile ifade edebilir. Bu ifade biçimlerinin bulanık ve ikili mantık gösterimleri Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. (a) Sıcaklık değişkenine ait bulanık mantık ifadesi, (b) sıcaklık değişkenine ait ikili mantık ifadesi.

Örneği verilen duyunun ifade biçimi klasik ikili mantıkta genellikle sıcak veya soğuk kümeleri içerisinde yalnızca bir kümeye üye olarak bulunurken (sıcak ya da soğuk), bulanık mantık yapısında sıcaklık, farklı sıcaklık kümelerine genellikle $[0, 1]$ arasında temsil edilen bir üyelik fonksiyonu değeriyle belli düzeyde üye olabilir. Bir başka deyişle, klasik mantık genellikle elemanlar bir kümenin ya elemanıdır ya da değildir prensibine dayandırılır ancak bulanık mantıkta bir eleman kümelerin dereceli elemanları olarak çoklu biçimde bulunabilir (Zadeh, 1975). Bulanık mantık, klasik mantığa kıyasla dilsel

değişkenlerle matematiği birleştirebilme konusundaki üstünlüklerinden dolayı, birçok disiplinde kendine kullanım alanı bulmuştur. Kontrol, biyomedikal, ekonomi, dil bilimi ve psikoloji sahalalarının uygulamaları bulanık mantığın başlıca kullanıldığı alanlardır.

Önceki açıklamalardan da tahmin edilebileceği üzere, geleneksel kontrol metotlarının aksine bulanık mantık kavramı insan düşünce yapısına daha yatkındır. Bu durum bulanık mantık tabanlı kontrolörlerin sistemler üzerinde uygulanabilirliğini artırmıştır. Bulanık mantık yapısı, klasik küme yapısında kabul edilen tekil aitlikten daha esnek bir forma sahiptir. Bunun başlıca sebepleri bulanık mantığın dilsel terimlerle matematiksel ifadeler arasında bir köprü kurabilmesidir. Bu çerçevede, bulanık mantık yapısında kullanılan temel yaklaşımlar sisteme ait uzman görüşü veya dilsel terimlerle ifade edilen verilerin matematiksel düzlemde yorumlanmasıdır. Bu bağlamda, uzman görüşü, ele alınan sistem modeli hakkında bilgi birikimine sahip bir kişinin ifade ettiği görüşlerin aktarılmasıyla gerçekleşir. Ek olarak, sisteme verilen girişlerin sonucunda elde edilen çıkışların arasındaki ilişki, sisteme ait dinamiklerin yorumlanması olarak belirtilebilir. Bahsedilen yaklaşımlar bulanık mantığın dilsel ifade esnekliğinin getirdiği başlıca avantajlardır. Bu yaklaşımların fiziksel uygulamalarda verimliliği aktif olarak geliştirdiği görülmüştür (Ying, 2000).

Kontrol alanında bulanık mantığın yer bulabilmesinin altındaki en önemli sebep bilgiyi hem nitel hem de nicel olarak kullanabilmesidir. Bulanık mantığın kontrol uygulamalarında bilgiyi nitel olarak kullanabilmesi matematik ile ilişkili olan kısım olarak adlandırılırken, nicel olarak kullanılabilmesi ise bilginin sözel ifadelerle gerçekleştirilmesine olanak tanıyabilir. Bu her iki bilgiyi birlikte kullanabilme kabiliyeti, bulanık mantığın kontrol uygulamalarında pratik olarak kullanılmasını kolaylaştırmıştır. Bulanık mantığın sistemler üzerinde kolay uygulanabilmesi ise kontrol perspektifinde kendisine geçmişten bu günlere kadar ulaşabilen geniş bir yer edinmesine olanak sağlamıştır. Bu uygulamaların geçmişte bulunan en derin örneklerinden birisi 1982 yılında çimento fırını üzerinde bulanık kontrolör tasarımında uygulanarak literatürde kendisine yer bulmuştur (Holmblad ve Ostergaard, 1982)

2.2. Bulanık Kontrol

Yaşadığımız dünya üzerinde fiziksel sistemlerin kontrol edilebilmesi için ele alınan sistemin uygun bir şekilde modellenmesi ilk basamak olarak kabul edilebilir. Sistemler, doğrusallık açısından mevzuya yaklaşıldığında, temelde doğrusal ve doğrusal olmayan sistemler olarak iki sınıfa ayrılır. Doğrusal sistemler, sistemdeki dinamikleri ifade eden diferansiyel denklemin doğrusal olduğu sistemlerdir ve bu sistemler, kontrol metotları anlamında oldukça yol kat edilmiş sistemlerdir. Doğrusal olmayan sistemler ise, sistemdeki dinamikleri ifade eden diferansiyel denklemin doğrusal olmadığı ve bazı çeşitleri için etkin yöntemler geliştirilmiş olsa da uygun bir kontrol algoritmasının geliştirilmesinin zor olduğu sistemlerdir. Bu sebeple, doğrusal olmayan sistemler genel olarak belirli varsayımlar yapılmasının ardından doğrusal sistemler olarak modellenir. Modeli uygun ve makul varsayımlar altında doğrusal olarak elde edilen sistemler için uygun, kolay ve etkin kontrol yöntemleri geliştirilebilir. Geleneksel modellemede doğrusal olmayan sistemleri modellemek için mutlak doğru kabul edilmiş bir teori yoktur. Doğrusal olmayan sistemlerin modelinin elde edilmesi için, belirli sistemler üzerinde yaklaşım çalışmaları yapılmıştır (Daniell ve Volterra, 1932). Bu metotlar sisteme uygulanan giriş ve sistemden elde edilen çıkış verilerinin arasındaki ilişkiye yaklaşım yapılması durumuna dayandırılabilir. Sistemler aynı zamanda, giriş çıkış durumlarına göre de sınıflandırılabilir. Bu bağlamda sistemler tek giriş tek çıkış (TGTC), tek giriş çok çıkış (TGÇÇ), çok giriş tek çıkış (ÇGTC) ve çok giriş çok çıkış (ÇGÇÇ) olarak ele alınabilir. Literatürde en yaygın kullanılan çeşitleri tek giriş tek çıkış sistemler ve çok giriş çok çıkış sistemlerdir (Nesimioglu, 2016).

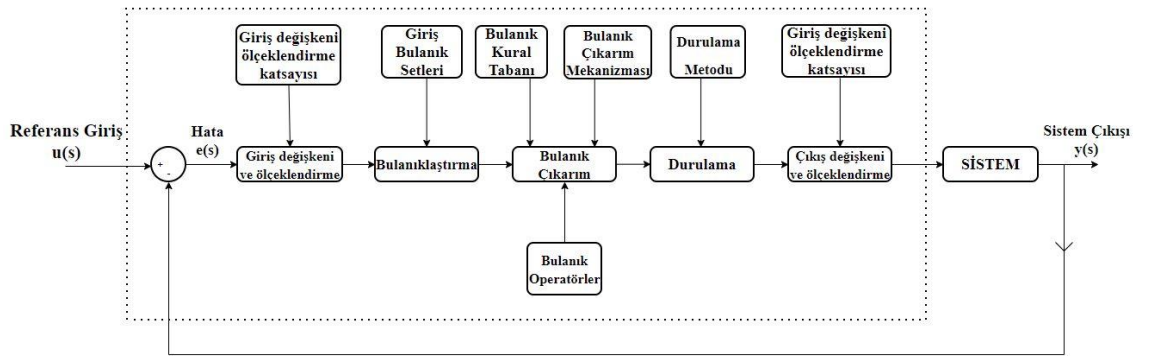
Bu tez kapsamında tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolör yapısının bulanık kontrolör fazında girişleri kapalı çevrim kontrol sisteminin hata ve hata türevi değerleri alınarak bulanık PID tip kontrolör tasarlanacaktır. Tasarlanan bulanık PID kontrolörün kontrol işareti sisteme verilecek ve sistemden alınan çıkışla geri besleme yapılarak döngüyü sağlayacaktır. Tezin ilerleyen bölümlerinde bu kontrolör tipi detaylı olarak açıklanacaktır. Bu sistemlerin temel açık çevrim gösterimleri Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. (a) Açık çevrim TGÇÇ sistem gösterimi, (b) Açık çevrim ÇGÇÇ sistem gösterimi.

Doğrusal sistemlerde model yapısı ve model parametreleri doğru bir biçimde elde edildiğinde kontrol edilebilme kavramının verimliliği artar. Kontrol kavramının bulanık mantık ile ilişkisi ilk olarak E.H. Mamdani tarafından 1974'te geliştirilmiştir (Mamdani, 1974). Bulanık kontrolün en önemli temel iki getirisi ise, bulanık mantığın verinin hem nitelik hem de nicelik özelliklerini kullanmasıdır. En temel anlamıyla veride nicelik kavramı veri miktarıyla ilgili olarak açıklanırken, verinin nitelik kavramı ise işlevinin açıklanmasıdır. Bulanık mantık açısından bakıldığında ise, verinin niteliğini uzman görüşü oluşturur, bu görüş bulanık küme ve bulanık kurallar vasıtasıyla nicel hale getirilir.

Bu bağlamda, nitel verinin nicel hale dönüştürülmesinde en kritik işlevi gören çıkarım mekanizması kapsamında Mamdani ve Takagi-Sugeno (TS) yöntemlerinin bulanık mantıkta yaygın olarak kullanılan temel iki tip bulanık çıkarım yapısı olduğu söylenebilir (Takagi ve Sugeno, 1985). Bu iki bulanık çıkarım mekanizması arasındaki en belirgin farklılık bulanık kuralların ifade edilmiş biçimlerinde bulunan değişikliklerden kaynaklanır. İlerleyen bölümlerde bulanık kural yapılarının farkları tüm detaylarıyla anlatılacaktır. Kapalı çevrim kontrol sisteminde tipik bir bulanık kontrolör yapısının blok diyagramı ve bulanık kontrolörün iç yapısında bulunan aşamaların iç dinamiklerinin detayları Şekil 3 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 3. Tipik bir bulanık kontrolör yapısı ve kapalı çevrim bir sistem üzerinde gösterimi.

Belirtilen blok diyagram üzerinde bulanık mantık tabanlı kontrolörlerin temel aşamaları sırasıyla, bulanıklaştırma, bulanık çıkarım ve durulama işlemleridir. Bulanıklaştırma aşamasından önce ilk olarak giriş verisinin ölçeklendirilmesini sağlayan katsayı kullanılabilir. Bulanıklaştırma aşaması, elde edilen veriyi bulanık veri haline dönüştürme ya da bir başka deyişle uygun üyelik fonksiyonlarıyla ifade etme işlemidir. Bu işlemde, her bir giriş özelindeki tanım kümesinin uygun üyelik fonksiyonlarıyla ifade edilen bulanık kümeleri oluşturulur. Bu durum ifadelerin kesin yargılardan daha uzak ve daha esnek ifade edilebilmesine olanak sağlar.

Bunun ardından bulanık çıkarım mekanizması bulanık mantık operatörleri, bulanık mantık kuralları ve bulanık çıkarım metotlarından beslenir. Bulanık operatörler üyelik fonksiyonlarının çeşitli kombinasyonlarından elde edilecek değerlerin karar verilebilmesi için bir aşama oluşturmaya olanak sağlar. Bu kombinasyonların içeriğinde bulunan ihtimaller de uzman görüşü ile bulanık kurallar biçiminde ifade edilir. Bu operatörler ve kurallar anlamsal bir bütünlük meydana getirir. Bu elde edilen kombinasyonların anlamları da çeşitli bulanık çıkarım metotlarından geçerek karar mekanizmasının hesaplanmasını sağlar. Tamamlanan mekanizma bir sonuç meydana getirir ancak elde edilen bu çıktı bulanıktır. Durulama metotları sayesinde de elde edilen bulanık çıktı, keskin bir sayısal ifadeye dönüştürülür. Durulama neticesinde elde edilen sonuç ise sisteme kontrol işareti olarak verilir. Bu bağlamda, sistem referans girişi $r(s)$, sistem çıkışı $y(s)$, hata $e(s)$ ve kontrol işareti $u(s)$ Şekil 3'te verilen blok diyagram üzerinde gösterilmiştir. Durulama işlemi sonrasında elde edilen bu gerçek çıkış sinyali sisteme verilerek sistemin çıkış cevabı elde edilir. Nihai olarak, kapalı çevrim kontrol sistemlerinde sistemin çıkış cevabı, referans giriş değerinden farkı alınarak hata sinyali üretir ve bu sinyal bir sonraki döngüyü meydana getirmek üzere kontrolör yapısına giriş olarak verilerek yukarıda bahsedilen aşamalardan tekrar geçirilecek biçimde devam eden döngüler halinde işleme devam edilir.

Anlaşılabilirliği artırmak adına özetlemek gerekirse, bir bulanık mantık kontrolörünün gerçek bir uygulamaya geçirilmesi için temel üç adet gereklilik vardır. Bunlar kısaca;

- 1) Bulanıklaştırma: Genellikle dilsel olarak elde edilen verinin bulanık veriye üyelik fonksiyonları vasıtasıyla dönüştürülmesi işlemidir.

- 2) Bulanık Çıkarım: Oluşturulan bulanık kümelerdeki üyelik fonksiyonlarının kurallar ve içeriğinde bulunan operatörlerle birlikte kombinasyonlarının belirlenmesiyle çıkış elde edilmesi için karar verilmesi işlemidir.
- 3) Durulama: İlişkili kombinasyonlardan kararı elde edilmiş çıkışların yapılan uygulamada gerçekliğe uygulanabilmesi için keskin sayısal veri haline geri dönüştürülmesi işlemidir.

Bu kapsamda, bulanık kontrolörler ile ilgili aşamaları, daha ayrıntılı olarak aşağıdaki şekilde açıklamak mümkündür.

2.2.1. Ölçeklendirme Katsayısı

Bulanık kontrol tasarımında temel aşamalar Şekil 3'te de gösterildiği üzere bulanıklaştırma, bulanık çıkarım ve durulama temel aşamalarından oluşur. Bir kontrol sisteminde bulanık girişin tasarımında kolaylık sağlanması ve işin standartlaştırılması açısından hem bulanıklaştırma işleminden önce ve hem de durulama işleminden sonra katsayılar kullanılarak ölçeklendirme yapılabilir. Giriş ölçeklendirme katsayısının bulunma amacı giriş ya da girişlerin bulanıklaştırma aşamasına uygun hale getirilmesi işleminin belli bir standart biçimde yapılabilmesidir. Buna eşdeğer olarak sistemde durulama aşamasından sonra ölçeklendirme yapılmasının amacı durulama işleminin ardından elde edilen çıkış değerlerin sistemle uyumlandırılarak sisteme uygulanabilecek ölçüğe getirilebilmesidir. Çıkışta yapılan ölçeklendirme sonucunda elde edilen işaret, sisteme uygulanır ve sistem cevabı elde edilir.

2.2.2. Bulanıklaştırma

Bulanıklaştırma işlemi en basit haliyle ikili mantıkta daha kesin yargılar belirtebilen giriş değişkenlerinin dilsel ifadeler aracılığıyla daha fazla kümeye bölünerek detaylandırılmasıdır. Kısaca, var olan gerçek verilerin bulanıklaştırılmasıdır. Bunun gerçekleşmesi ise bulanık kümelerin uygun bir şekilde oluşturulmasına bağlıdır. Bulanık küme kavramı, giriş ve çıkış değişkenlerinin her biri için kısımlara ayrılan dilsel ifadelerin üyelik fonksiyonu çeşitlerine göre ifade edilebilmesidir. Klasik mantıkta bir

veri herhangi bir küme ya ait ya da değildir durumuna göre değerlendirilirken, bulanık mantıkta bir veri, bir küme kısmi dereceden üye olabilir.

Bulanıklaştırma işleminin alt aşamaları aşağıdaki şekilde ayrıntılı olarak ele alınabilir.

2.2.2.1. Üyelik Fonksiyonları

En temel haliyle üyelik fonksiyonu, belirlenen kavramdaki miktarın aitlik derecesini ifade eden tanımdır. Üyelik fonksiyonu “ μ (mü)” sembolü ile ifade edilir. Bu fonksiyon tanımına ikili mantıkta çok sık rastlanmaz çünkü ikili mantıkta olgular var veya yok, doğru veya yanlış gibi ifadeler içeren birler ve sıfırların oluşturduğu biçimlerde açıklanır. Ancak bulanık mantıkta bu durum sözel ifadelerin kademelerine göre şekil aldığı için, bu kademeler üyelik fonksiyonları yardımıyla ifade edilir. Üyelik fonksiyonlarını daha detaylı algılayabilmek adına bu durumu içeren detaylı bir örnekle açıklama yapılabilir:

Bir insan popülasyonunun meslek ve yaş kriterlerine göre değerlendirmesi yapılacağı senaryosu ele alınsın. Değerlendirmeye alınan kişi sayısı 7 olarak kabul edilsin. Burada evrensel küme E'nin altında, değerlendirmeye alınan insanlar aşağıda matematiksel ifadesi denklem 1'de gösterildiği gibi bir K kümesi ile ifade edilebilir.

$$K = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7\}, \forall x_i \in E, i=1, 2, \dots, 7 \quad (1)$$

Verilen ibarede her x_i elemanı birden yediye kadar oluşturulan küme elemanları olarak tanımlanır ve temsili senaryoda gerçek bir miktarı ifade etmektedir. Bu durumda her bir eleman bu örnekleme için kişileri temsil etmektedir. Bu oluşturulan küme içerisindeki x_1, x_2, x_3, x_4 ve x_5 elemanlarının mesleklerinin akademisyen olduğu farz edilsin ve bu elemanlar matematiksel ifadesi denklem 2'de gösterilen ve A kümesini ifade eden elemanlar olarak kabul edilsin.

$$A = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}, \forall x_i \in A, i=1, 2, \dots, 5 \quad (2)$$

A kümesine ek olarak x_1, x_2, x_3 elemanları yaşları elliden küçük akademisyenler olduğu farz edilsin ve bu durum matematiksel ifadesi denklem 3'te gösterilen B kümesini oluştursun.

$$B = \{x_1, x_2, x_3\}, \forall x_i \in A, i=1, 2, 3. \quad (3)$$

Bu durumda aşağıda 4 numaralı denklemde gösterildiği şekilde matematiksel küme durumlarının çıkarımları teorik olarak elde edilebilir.

$$\begin{aligned}
 X &\in K \\
 A &= \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\} \in K \\
 B &= \{x_1, x_2, x_3\} \subset A
 \end{aligned} \tag{4}$$

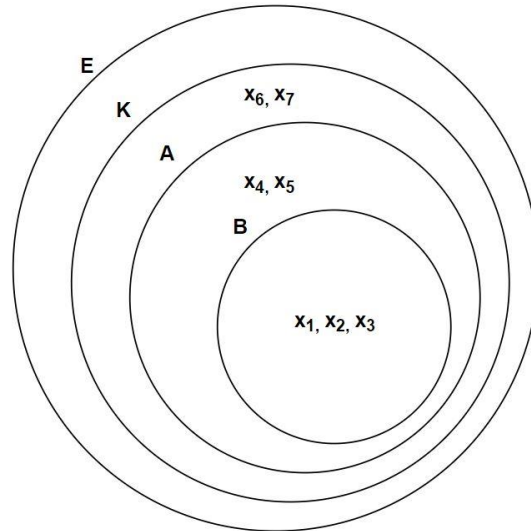
Yukarıda verilen ifadede belirtildiği üzere B kümesi A kümesinin alt kümesidir veya bir diğer deyişle A kümesi B kümesini kapsar. Oluşturulan kümeler arasındaki değil, kesişim ve birleşim işlemlerinin matematiksel ifadeleri 5, 6 ve 7 numaralı denklemlerde gösterilebilir:

$$A \text{ Değil} = \bar{A}(x) = 1 - A(x) \tag{5}$$

$$A \text{ kesişim } B = A(x) \cap B(x) \tag{6}$$

$$A \text{ birleşim } B = A(x) \cup B(x) \tag{7}$$

Verilen örneğe istinaden geleneksel küme teorisinin şematik gösterimi aşağıdaki Şekil 4'te verilmiştir. Burada E, K, A, B kümeleri sırasıyla evrensel, değerlendirmeye alınan insanlar, akademisyenler, yaşı elliden küçük olan akademisyenler kümelerini temsil etmektedir.



Şekil 4. E, K, A ve B kümelerinin şematik gösterimi.

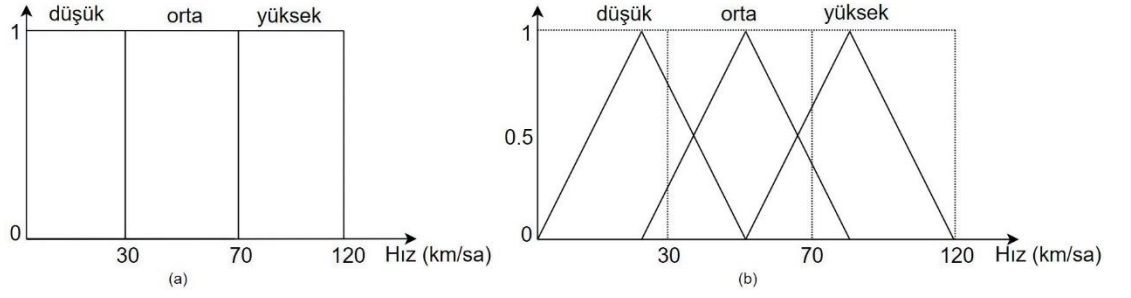
Örneği verilen olan klasik küme teorisi görüldüğü üzere kesin sınırlar içermektedir, yani klasik küme teorisinde bir eleman bir kümenin ya elemanıdır veya değildir. Bunlar geleneksel küme teorisinde daha öncesinde de bahsettiğimiz gibi bir veya sıfırlarla ifade

edilmektedir. Yukarıda verilen örnekte geleneksel küme teorisi bulanık mantıkla ifade edilecek olsaydı, A ile belirtilen akademisyenler kümesinin hepsinin dahil olması durumunda üyelik derecesi bir olarak ifade edilirdi. Buna karşın eğer akademisyenler kümesinde bir eleman dahi bulunmasa ve bu durum üyelik fonksiyonu mantığıyla ifade edilecek olsaydı, bu durum ise herhangi bir elemana ait akademisyen olmaya dair üyelik fonksiyonunun 0 olması biçiminde ifade edilirdi. İkili mantığa uyarlandığında üyelik fonksiyonlarının bir değerini alması tamamıyla içerdiğini, sıfır değerini alması ise hiç içermediğini gösterir. Bu ifadelerin matematiksel gösterimi denklem 8’de verilmiştir:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1, & (x \in A) \\ 0, & (x \notin A) \end{cases} \quad (8)$$

Bu matematiksel ifade, elemanların belirtilen kümeye ait olma durumunu 1, olmama durumunu ise 0 gösterimi ile kesin ve karışıklıktan uzak bir şekilde ifade etmektedir. Bulanık küme teorisini daha iyi anlayabilmek adına fiziksel tanımlamalar içeren bir örnek ele alınabilir:

Günlük hayatta kullanılan otomobillerin hız değerleri ele alınsın. Belirlenen 0-120 km/saat hız aralığı, ikili mantık çerçevesinde düşük hız tanımını 0-30 km/saat, orta hız tanımını 30-70 km/saat ve yüksek hız tanımını 70-120 km/saat olarak belirlenebilir. Buna karşın bulanık mantıkta sözel ifadelerin aktarımları bu kadar keskin sınırlar içeremez. Bu örnek için diğer bir ifade ile, 40 km/saat hız ifadesi kısmi derecede düşük hız ve kısmi derecede orta hız kümelerine dahil olabilir. Yukarıdaki sözel ifadede belirtilen “kısmi” sözcüğünün matematiksel mertebesini belirten terim, bu kümeleri tanımlama için oluşturulacak üyelik fonksiyonu olarak tanımlanabilir. Bir başka deyişle, üyelik fonksiyonları, kümelerde bulunan elemanların ne kadar derecede ve hangi kümeye dahil olduğunu ifade etmek için kullanılır. Bu durum bulanık mantık teorisinin, klasik küme teorisi kadar kesin sınırlarının olmadığını ve karmaşıklığını ifade etmektedir. Verilen örnekteki kavramların oluşturduğu kümelerin, ikili küme ve bulanık küme arasındaki ifade biçimleri Şekil 5’te gösterilmiştir.



Şekil 5. (a) Hız değişkeni klasik küme gösterimi, (b) Hız değişkeni bulanık küme gösterimi.

Belirtildiği üzere, klasik küme gösteriminde belirli bir hız değeri düşük, orta veya yüksek kümelerinden birisine kesin ve açık bir şekilde üye olabilirken, bulanık küme gösteriminde bu durum daha esnek sınırlara ve karmaşıklığa sahiptir. Klasik küme gösteriminde bir değer kesin bir kümeye üye olarak sayılırken, bulanık küme gösteriminde bir değer, eş zamanlı olarak bir veya iki kümeye üye olabilir. Bu durum daha sayısala yakın durumda ifade edilmek istenirse, 40 km/saat hız değeri klasik küme gösteriminde yalnızca orta hız kümesine üyedir ancak bulanık küme gösteriminde az derecede tanımla düşük hız sayılabilirken, eş zamanlı olarak orta derece tanımla orta hız olarak kabul edilebilir.

Bulanık küme tanım itibarıyla E evrensel kümesi içerisinde değer alan A ile tanımlanan üyelik değerleri toplamıdır. Bulanık A kümesi matematiksel ifadesi denklem 9'da verilmiştir:

$$\mu_A(x) \in [0,1], \quad A = \{(x, \mu_A(x)) \mid x \in E\} \quad (9)$$

Burada μ ifadesi her x elemanı için sıfır ile bir arasında değer alan A bulanık kümesinin üyelik fonksiyonu tanımıdır. E ise evrensel küme olarak ifade edilir ve A kümesi evrensel kümenin alt kümesidir, $A \subseteq E$ olarak ifade edilir. Oluşturulan bulanık küme ayrık durumda ve sonlu elemanlara bağlı ise, A bulanık kümesinde bulunan her bir x elemanına ait üyelik fonksiyonları üyelik derecelerinin toplamları şeklinde denklem 10'da gösterildiği gibi ifade edilir:

$$A = \mu_A(x_1)/x_1 + \mu_A(x_2)/x_2 + \dots = \sum_i \mu_A(x_i)/x_i \quad (10)$$

Bir diğer açıdan eğer A kümesi sürekli hal durumunda ve sonsuz ise kendi içerisindeki üyelik fonksiyonlarının toplamı şekilde denklem 11'de gösterildiği gibi ifade edilir.

Burada kullanılan integral sembolü, cebirdeki aritmetik toplam yerine, küme birleşimini ifade etmektedir.

$$A = \int_x \mu_A(x) / x \quad (11)$$

Bulanık kontrolör tasarımında yaygın olarak tek girişe sahip kontrolör yapıları için öncelikli BMTK girişi hata sinyali olarak kabul görürken, birden çok girişli kontrolör yapıları için, ilk giriş olan hata sinyaline ek olarak ikinci BMTK girişi hatanın türevi olarak kabul edilir ve bu iki tip giriş literatürde yaygın olarak kullanılmaktadır (Lee, 1990a). Tek girişli BMTK kontrolörlerde giriş genellikle hata sinyali olurken, hata sinyaline ek olarak ikinci giriş hatanın türevi baz alınarak tasarlanan BMTK tipinde, ilk olarak giriş verilerine uygun üyelik fonksiyonlarından oluşan bulanık kümeler aracılığıyla bulanıklaştırılır. Bulanıklaştırma işleminde değişkene ait olan üyelik fonksiyonları, bulanık küme içerisinde birbiri ile aynı tip ya da birbirinden farklı tip üyelik fonksiyonları içerebilir. Yaygın olarak kullanılan temel üyelik fonksiyonu çeşitleri aşağıda verilmiştir:

a. Üçgen Tip Üyelik Fonksiyonu:

Üçgen tip üyelik fonksiyonu, x parametresi seçili üyelik fonksiyonunun değerini temsil etmek üzere, üçgen tip üyelik fonksiyonu a, b, c olarak sembolize edilen ve kendi içlerinde $a < b < c$ matematiksel sıralama ilişkisi bulunan üç parametrelili ifade biçimine sahip üyelik fonksiyonu çeşididir. Matematiksel ifadesi denklem 12’de gösterilmiştir.

$$\mu_{\text{üçgen}}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (12)$$

Üçgen tip üyelik fonksiyonu, literatürde genel olarak birden çok girişli BMTK tiplerinde giriş bulanık kümelerinin tanımlanma durumunda tercih edilir (Visioli, 2001). Bu üyelik fonksiyonu türünün başlıca avantajı bulanık küme elemanlarının üçgen biçiminde olmasında sıralı farklardan gelen eğim mantığına dayanmasıdır. Bu durum bulanık mantık tabanlı sistemlerde üyelik istenen değerde fonksiyonlara daha doğrusal değerler atanabilmesini sağlar ve tasarım kolaylığı meydana getirir.

b. Singleton (Tekil) Tip Üyelik Fonksiyonu:

Singleton (tekil) tip üyelik fonksiyonu, belirlenen E evrensel kümesi içerisindeki seçili x noktasında yalnızca bir değerini alan, aksi takdirdeki tüm durumlarda değeri sıfır olan üyelik fonksiyonu çeşididir. Seçili x noktasının belirli değerinin gösterimi \bar{x} olmak üzere matematiksel ifadesi denklem 13'te gösterilmiştir.

$$\mu_{tekil}(x) = \begin{cases} 1 & x = \bar{x} \\ 0 & x \neq \bar{x} \end{cases} \quad (13)$$

Singleton üyelik fonksiyonu, literatürde genellikle tek girişli veya birden çok girişli BMTK tiplerinde çıkış değişkeni bulanık kümesi tanımlamak üzere yaygın olarak kullanılır (Jantzen, 1990). Bu yaygın kullanımın başlıca sebebi, çıkışı uzman tarafından bilinen ve bu veriden gelen kesin çıkış değerinin daha doğrusal ve daha açık ifade edilebilmesinden kaynaklanmaktadır.

c. Gaussian Tip Üyelik Fonksiyonu:

Gaussian tip üyelik fonksiyonu, x değişkeni seçili üyelik fonksiyonunun değerini temsil etmek üzere, \bar{x} merkez, σ genişlik olarak kabul edilen ve matematiksel ifadesi denklem 14'te gösterilen bir üyelik fonksiyonu çeşididir.

$$\mu_{gauss}(x) = \exp \left(- \left(\frac{x - \bar{x}}{\sigma} \right)^2 \right) \quad (14)$$

d. Çan Tipi Üyelik Fonksiyonu:

Çan tipi üyelik fonksiyonu, x değişkeni seçili üyelik fonksiyonunun değerini temsil etmek üzere, c merkez, α genişlik ve b eğim olarak kabul edilen, matematiksel ifadesi denklem 15'te gösterilen bir üyelik fonksiyonu çeşididir.

$$\mu_{çan}(x) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{\alpha} \right|^{2b}} \quad (15)$$

e. Sigmoidal Tip Üyelik Fonksiyonu:

Sigmoidal tip üyelik fonksiyonu, x değişkeni seçili üyelik fonksiyonunun değerini temsil etmek üzere, α eğim, $x=c$ eşitliği geçiş noktası olarak kabul edilen, matematiksel ifadesi denklem 16'da gösterilen üyelik fonksiyonu çeşididir.

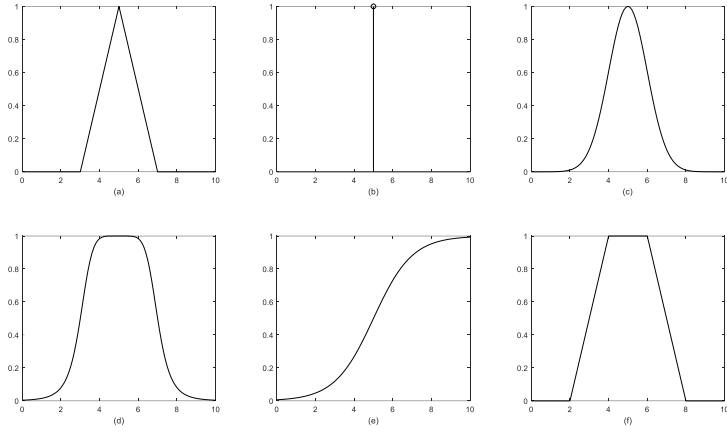
$$\mu_{sigm}(x) = \frac{1}{1 + \exp[-\alpha(x - c)]} \quad (16)$$

f. Trapezoidal Tip Üyelik Fonksiyonu:

Trapezoidal tip üyelik fonksiyonu, x değişkeni seçili üyelik fonksiyonunun değerini temsil etmek üzere, a, b, c, d olarak sembolize edilen ve kendi içlerinde $a < b < c < d$ matematiksel sıralama ilişkisi bulunan dört parametrelili üyelik fonksiyonu çeşididir. Matematiksel ifadesi denklem 17'de gösterilmiştir.

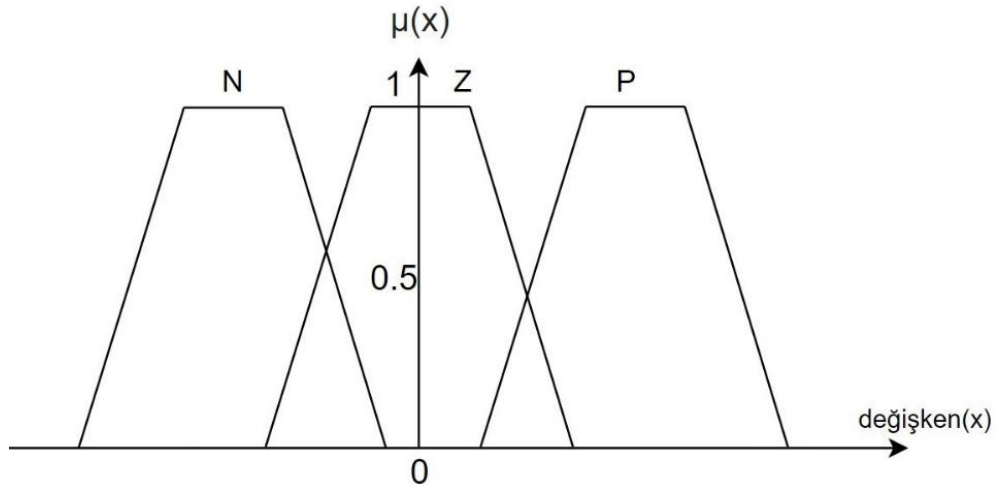
$$\mu_{trap}(x) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x - a}{b - a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d - x}{d - c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (17)$$

Üyelik fonksiyonu çeşitleri, giriş veya çıkış ifadelerinin temsil edildiği bulanık kümelerde bölünen dilsel ifadeleri nitelendirmek için kullanılır. Bir bulanık kümenin içerisinde genelde aynı tip üyelik fonksiyonları kullanılmasına karşın, aynı bulanık küme içerisinde birbirinden farklı tipte üyelik fonksiyonları eş zamanlı olarak da bulunabilir (Gaweda, 2006). Üst kısımda teorik tanımları verilen üyelik fonksiyonlarının şematik ifadeleri Şekil 6 üzerinde gösterilmiştir. Bu gösterimlerde x eksenleri bulanık kümelerin değerlerini, y eksenleri ise sıfır ile bir arasında değer alabilen ilgili parametrelere ait üyelik fonksiyonlarının değerlerini belirtmektedir. Kontrol sistemlerinde genel olarak sistemin girişi ve çıkışı arasındaki durumun tekillik ya da çoğulluğuna bakılmaksızın üyelik fonksiyonlarının meydana getirdiği bulanık kümelerde, üyelik fonksiyonları aynı ya da farklı tip fonksiyonlardan oluşabilir. Bir bulanık küme içerisinde birbirinden farklı türde üyelik fonksiyonlarının kullanılması, teoride mümkün olmasına karşın literatürde çok sık rastlanan bir durum değildir. Kontrolör tasarımında bulanık kümeler genel olarak eş türdeki üyelik fonksiyonları yardımıyla oluşturulur. Bu eş tür kullanımı ise BMTK tasarımını kolaylaştırmaktadır.



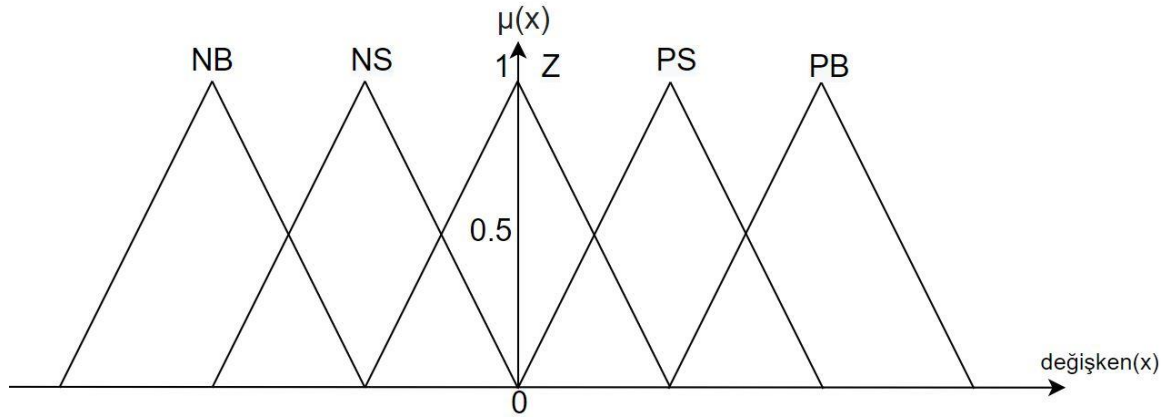
Şekil 6. (a) Üçgen tipi üyelik fonksiyonu, (b) Singleton (Tekil) tip üyelik fonksiyonu, (c) Gaussian tipi üyelik fonksiyonu, (d) Çan tipi üyelik fonksiyonu, (e) Sigmoidal tip üyelik fonksiyonu, (f) Trapezoidal tip üyelik fonksiyonu.

Bu aşamada, bulanık çıkarım mekanizması tamamlanmadan önce giriş ya da çıkış ifadelerinin bulanıklaştırılması işlemi üyelik fonksiyonlarının meydana getirdiği bulanık kümeler aracılığı ile meydana getirilir. Literatürde kabul gören sistemlerin giriş ve çıkışlarının bulanıklaştırılması işlemlerinde kullanılan üyelik fonksiyonları, gerçek hayatta kullanılan dilsel ifadelerin karşılığı olabilecek terimlerle adlandırılırlar. Bunun sebebi üyelik fonksiyonlarının mertebelerin dilsel ifadelerle kademeli hale getirilmesini sağlamak ve tezin ilerleyen bölümlerinde bahsedilecek olan kural tabanını oluşturmada kullanılmasını hedeflemektedir. Yukarıda verilen otomobil hız örneğinde, ele alınan hız değerlerinin dilsel ifade ediliş biçimlerine göre bulanık mantık kümeleri oluşturulurken “yavaş hız”, “orta hız” ve “yüksek hız” ifadelerine yer verilmiştir. Anlaşılabilirliğin artması ve ortak kullanımın yaygınlaştırılması adına bu kümelere verilen dilsel ifadeler literatürde standart kullanıma yöneltilmiştir (Zadeh, 1996). Bu ifadeler genellikle üçe bölünen bulanık kümelere negatif (N), sıfır (Z) ve pozitif (P) olarak yer alır (Tang, Man, Chen ve Kwong, 2001). Gösterim çeşitlerinin anlaşılması amacıyla trapezoidal tip üyelik fonksiyonlarıyla birlikte bulanık kümenin isimlendirilmesi ve gösterilimi Şekil 7’de verilmiştir. Üyelik fonksiyonlarından oluşan tüm bulanık kümeler için x eksenleri değişken evreninin değerlerini belirtirken, y eksenini ise üyelik fonksiyonlarının (μ) derecelerini belirtmektedir.



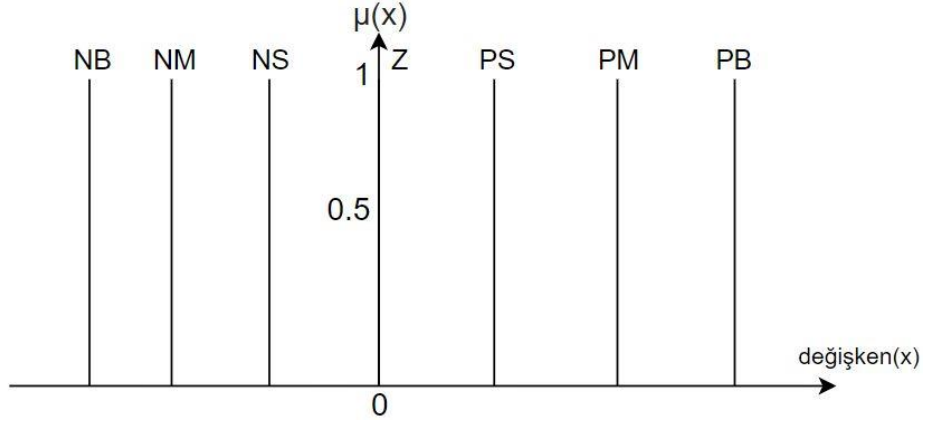
Şekil 7. Üç adet trapezoidal tip üyelik fonksiyonlarından oluşturulan örnek bulanık küme.

Beşe bölünen bulanık kümelerin oluşturduğu kümelerde negatif büyük (NB), negatif küçük (NS), sıfır (Z), pozitif küçük (PS) ve pozitif büyük (PB) ifade biçimlerine de literatürde rastlanmaktadır (Palanisamy ve Karuppan, 2016). Üçgen tip üyelik fonksiyonlarını içeren beş küme ile oluşturulan bulanık küme gösterilimi Şekil 8’de verilmiştir.



Şekil 8. Beş adet üçgen tip üyelik fonksiyonlarından oluşturulan örnek bulanık küme.

Ancak literatürdeki en yaygın kullanım, yedi kümeye bölünmüş bulanık kümeler biçimindedir ve bunlar negatif büyük (NB), negatif orta (NM), negatif küçük (NS), sıfır (Z), pozitif küçük (PS), pozitif orta (PM) ve pozitif büyük (PB) ifadeleri ile adlandırılmaktadır (Rao ve Anusha, 2013; Wang ve diğerleri, 2015). Yaygın kullanımıyla beraber tekil tip üyelik fonksiyonlarının yediye bölünen bulanık kümenin gösterimi Şekil 9’da verilmiştir.



Şekil 9. Yedi adet singleton (tekil) tipi üyelik fonksiyonlarından oluşturulan örnek bulanık küme.

Kontrol sistemlerinde bulunan uygulamalarda yukarıda örneği verilen ve açıklanan tipler için giriş değişkenlerinde üçgen tipi üyelik fonksiyonlarının ve çıkış değişkenlerinde singleton (tekil) tipi üyelik fonksiyonlarının bulanık kümelerde yaygın olarak kullanıldığı gözlenebilir. Bulanık mantık tabanlı kontrol uygulamaları yapılan sistemlerde yer alan üyelik fonksiyonları çeşitli bulanık operatörlerle birlikte, bulanık kural tabanı oluşturulmak üzere kullanılır.

2.2.2.2. Bulanık Operatörler

Bulanık çıkarım mekanizması bulanık operatörler, bulanık kural tabanı ve bulanık çıkarım metotları aşamaları yardımıyla elde edilir. Geleneksel küme teorisinde belirli işlemlerin açıklanması için kullanılan mantık operatörleri bulunur. Bu operatörler aynı zamanda bulanık küme teorisinde de geçerli olmaktadır. Bunlar temel olarak başlıca kesişim (ve), birleşim (veya) ya da tümleyen (değil) işlemlerini üstlenebilir. Kesişim işlemi elemanların kümelerine ortak dahil olma durumunu, birleşim işlemi elemanların kümelerin kesişimi de dahil olmak üzere tüm eleman miktarını ve tümleyen işlemi ise kümelerden herhangi birinde, seçili kümeyle dahil olmayan elemanları ifade etmek için kullanılan operatörlerdir. İkili mantıkta bu operatörler sıfır (0) ve bir (1) rakamlarının kullanıldığı doğruluk tabloları ile ifade edilir. Kesişim ifadesi belirten “VE” operatörü için iki değişkenli doğruluk tablosu aşağıda verilen Tablo 1’deki gibidir.

A	B	A ve B
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

Tablo 1. İki değişkenli "ve" operatörü doğruluk tablosu.

Tablo 1’de görüldüğü üzere “ve” kesişim operatörü, iki değişken için sıfır ve birlerin oluşturduğu dört kombinasyonda yazılabilmektedir. Kesişim operatörü yalnızca, her iki değişkenin de üst değeri alması durumunda sonuç olarak üst değeri vermektedir, harici durumlarda alt değerdedir. Bu mantıksal yaklaşımı netleştirmek için kısa bir yorum eklemek gerekirse, 0 değeri bir elemanın ilişkili kümeye ait olmama durumu, 1 değeri ise ait olma durumunu temsil edecek şekilde, her iki değişken de üst sınır değerinde olmadığı takdirde, bu değerlerin oluşturduğu kesişim sonucunun meydana gelmesi mantıksal olarak beklenemez, yani işlemin sonucu 0 çıkar. Kesişim operatörüne ek olarak, birleşim ifadesi için kullanılan “VEYA” operatörü için iki değişkenli doğruluk tablosu aşağıda verilen Tablo 2’deki gibidir:

A	B	A veya B
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

Tablo 2. İki değişkenli "veya" operatörü doğruluk tablosu.

Tablo 2’de görüldüğü üzere “veya” birleşim operatörü, iki değişken için oluşturulan dört kombinasyonda ifade edilebilir. Birleşim operatörü, kıstas alınan değişkenlerden sadece bir tanesinin üst değeri alması durumunda sonuç olarak üst değeri vermektedir. Bu durumu izah etmek için mantıksal açıdan bakıldığında, kıstas alınan her iki değerden en

az birinde üst değerin bulunması, birleşim işleminde üst değerin görülebilmesi için yeterlidir olarak yorumlanabilir. Son olarak ise, tümleyen olarak ifade edilen değil operatörünün doğruluk tablosu aşağıda gösterilen Tablo 3'te verilmiştir:

A	A değil (1-A)
0	1
1	0

Tablo 3. Tek değişkenli "değil" operatörü doğruluk tablosu.

Tablo 3'te görülen "değil" tümleyen operatörü, bir değişkenin oluşturduğu iki kombinasyon ile rahatlıkla ifade edilebilir. İkili mantık sisteminde değerler yalnızca sıfır ve birlerden ibaret olduğu için, değil operatörü var olan değerin zıt değeri şeklinde yorumlanabilir. Tüm bu örneği verilen operatörler, bulanık mantık kavramı içerisinde de kendisine yer bulmuştur. Bulanık mantık kapsamında tüm bu operatörler için çok sayıda operatör tanımlanabilir; ancak literatürde en yaygın ve temel olarak Zadeh ve Lukasiewicz biçimleri kullanılmaktadır (Gupta ve Qi, 1991). Bu ifadelerin içerisinde kullanılan EK ve EB kısaltmaları sırasıyla en küçük (minimum) ve en büyük (maksimum) terimlerini temsil eder. Kesişim operatörü "VE" ve birleşim operatörü "VEYA" ile ifade edilir. Zadeh türü bulanık "ve" ifadesi, matematiksel olarak denklem 18'de verilmiştir.

$$\mu_{A \cap B}(x) = EK(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (18)$$

Belirtilen Zadeh türünde bulunan kesişim ifadesi, kıyas alınan üyelik fonksiyonlarının mertebelerinin en küçüğünün kabul edilmesi kıstasına göre belirlenmektedir. Buna ek olarak bir de çarpım türü bulanık kesişim ifadesi bulunmaktadır. Bu durumun matematiksel ifadesi denklem 19'da verilmiştir.

$$\mu_{A \cap B}(x) = (\mu_A(x) \times \mu_B(x)) \quad (19)$$

Belirtilen çarpım türü bulanık kesişim ifadesinde üyelik fonksiyonlarının dereceleri çarpılarak kesişim sonucu çarpımın derecesine bağlı olarak hesaplanmaktadır. Kesişim ifadelerinin yanı sıra üyelik fonksiyonlarında birleşimi ifade etmek için "VEYA" operatörü kullanılır. Zadeh türü bulanık birleşim operatörünün matematiksel ifadesi denklem 20'de verilmiştir.

$$\mu_{A \cup B}(x) = EB(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (20)$$

Burada belirtilen Zadeh türü bulanık birleşim ifadesinde, kıyaslanan üyelik fonksiyonlarından derecesi yüksek olan kabul görmektedir. Son olarak ise Lukasiewicz türü bulanık birleşim operatörünün matematiksel ifadesi denklem 21’de verilmiştir.

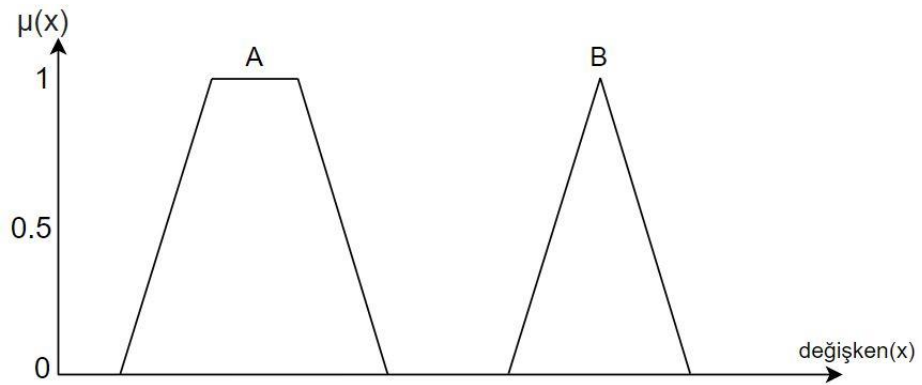
$$\mu_{A \cup B}(x) = EK(\mu_A(x) + \mu_B(x), 1) \quad (21)$$

Lukasiewicz türü birleşim işleminde, üyelik fonksiyonlarının derecelerinin toplamı bir ile mukayese edilir ve en küçük olan kabul görür. Bu tür ile ifade edilen birleşim mantığında, birleşimden elde edilen üyelik değerleri toplamının, en üst üyelik derece olan 1’i geçmesi durumunda, en küçük seçim kistas olacağından dolayı 1 değeri kabul görür. Bu durum da üyelik fonksiyonlarının birleşim derecelerinin en üst nokta olan bir değerini geçemeyeceğini ifade eder.

Herhangi bir üyelik fonksiyonunda o kümeye dahil olmayan kısım ise DEĞİL operatörü ile ifade edilir ve denklem 22’deki gibi ifade edilir.

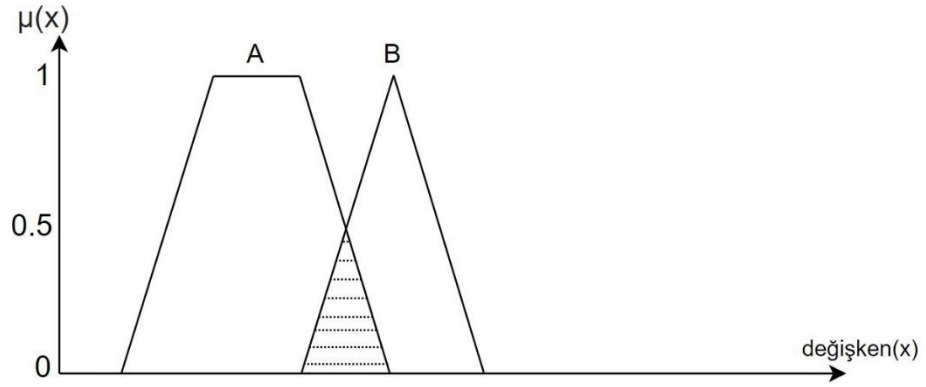
$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (22)$$

Bu operatörlerin bulanık kümeler üzerindeki anlaşılabilirliğinin artması için temel bir örnek vermek gerekirse, A ve B ile adlandırılan iki adet bulanık küme tanımlansın ve bu kümeler sırasıyla trapezoidal ve üçgen tip üyelik fonksiyonlarından oluşturulsun. Bu tanımlamaya ilişkin bulanık kümeler Şekil 10’da gösterilmiştir.



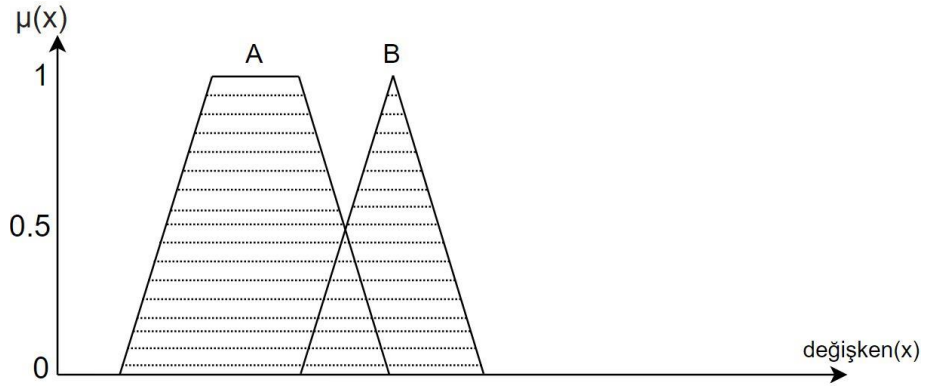
Şekil 10. A ve B bulanık küme gösterimleri.

Gösterimi Şekil 10’da verilen A ve B bulanık kümeleri üzerinde bulanık kesişim işlemi uygulandığında bu ifadenin gösterimi Şekil 11’de belirtilen taranmış bölge ile ifade edilebilir.



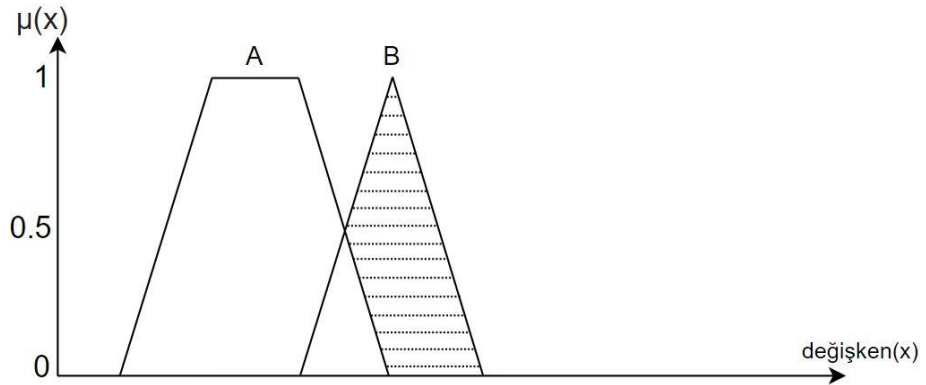
Şekil 11. A ve B bulanık kümelerin kesişim gösterimi.

Gösterimi Şekil 10 üzerinde verilen A ve B bulanık kümeleri üzerinde bulanık birleşim işlemi uygulandığında bu ifadenin gösterimi Şekil 12’de belirtilen taranmış bölge ile ifade edilebilir.



Şekil 12. A ve B bulanık kümelerinin birleşim gösterimi.

Son operatör olarak A değil (\bar{A}) ifadesinin gösterimi Şekil 13’te verilen taranmış bölge ile ifade edilebilir.



Şekil 13. A değil bulanık kümesinin gösterimi

Yukarıda verilen operatörlerin daha net anlaşılması için aşağıdaki örnek verilebilir:

İnsanların boylarının bulanıklaştırıldığı basit bir sistem varsayalım. Bu sistemde, kısa boy ve uzun boy olmak üzere iki adet bulanık küme bulunsun. 1,85 boy bu kümeler içerisindeki uzun boy kümesine 0,7 üyelik derecesi ile dahil olurken, normal boy kümesine 0,3 üyelik derecesi ile dahil olduğunu kabul edelim. Burada belirlenen ifadelerin temsil edilmesinde baz alınan 1,85 boy için ve $\mu_{UZUN}(x) = 0,7$ ve $\mu_{KISA}(x) = 0,3$ olur. Denklem 18, 19, 20, 21 ve 22 için mantık operatörlerinin işletilmesi ve elde edilen sonuçlar, aşağıda verilen Tablo 4'teki gibidir. Bu tabloda tüm işlem tipleri ve bahsi geçen örnek için yapılan işlemler sonuçları alınarak ifade edilmiş ve sonrasında işlemler yorumlanmıştır.

Operatör Türü	Gerçekleştirilen İşlem	Sonuç
Zadeh tipi bulanık VE operatörü	$\mu_{UZUN \cap KISA}(x) = EK(0,7, 0,3)$	0,3
Çarpım tipi bulanık VE operatörü	$\mu_{UZUN \cap KISA}(x) = (0,7 \times 0,3)$	0,21
Zadeh tipi bulanık VEYA operatörü	$\mu_{UZUN \cup KISA}(x) = EB(0,7, 0,3)$	0,7
Lukasiewicz tipi bulanık VEYA operatörü	$\mu_{UZUN \cup KISA}(x) = EK(1, 1)$	1
DEĞİL operatörü	$\mu_{\overline{UZUN}}(x) = 1 - \mu_{UZUN}(x)$	0,3
	$\mu_{\overline{KISA}}(x) = 1 - \mu_{KISA}(x)$	0,7

Tablo 4. Çeşitli türler için verilen örnek doğrultusunda operatör hesapları.

Tablo 4'te de görüldüğü gibi, Zadeh türü bulanık VE operatörü kullanılıyorsa “uzun ve kısa” sözel ifadesinin üyelik sonucu kıyasa giren üyelik fonksiyonlarından en küçüğünün alınması koşuluna göre 0,3 sonucunu vermektedir. Çarpım türü bulanık VE operatörü kullanılıyorsa bu sonuç üyelik fonksiyonlarının çarpımları neticesinde 0,21 olarak elde edilmiştir. Birleşim işlemleri için ise Zadeh türü bulanık VEYA operatörü kullanılıyorsa, “uzun veya kısa” sözel ifadesinin üyelik sonucu kıyasa giren üyelik fonksiyonlarının en

büyükü alınarak 0,7 olarak hesaplanırken, Lukasiewicz türü bulanık VEYA operatöründe bu durum üyelik fonksiyonlarının dereceleri toplamı ile 1 değeri mukayese edilerek sonuç 1 olarak elde edilmiştir. Lukasiewicz türü bulanık VEYA operatöründe, üyelik fonksiyonlarının toplamları 1'den büyük olduğu için, birleşimin gidebileceği en üst noktanın 1 değeri olabileceği sonucu ortaya çıkarılmıştır. Bunlara ek olarak, ele alınan sistemde “uzun değil” sözel ifadesi 0,3 değerini alırken, “kısa değil” sözel ifadesi ise hesaplar sonucunda 0,7 olarak elde edilmiştir. Bulanık operatörler, üyelik fonksiyonlarının meydana getirdiği bulanık kümelerin, kurallar aracılığı ile kombine edilip çıkarım yapılabilmesi için temel teşkil etmektedir.

2.2.2.3. Bulanık Kural Tabanı

Bulanık mantıkta kural terimi temel olarak, sebep-sonuç bağlamında uzman görüş ve tecrübelerinin sözel olarak ifade edilme biçimi olarak tanımlanır. BMTK tasarımında kural tabanı, uzman görüşünün bilgi ve tecrübesinden beslenir. Bulanık kural tekil ya da çoğul olarak bulunabilen giriş veya girişlerin meydana getirdiği koşul kombinasyonlarının, “eğer- o halde” sırasıyla kural formatı çerçevesinde, dilsel ifadeler aracılığıyla ve operatörler yardımıyla bir sonuç ya da neticenin çıkarımının yapılabilmesi için oluşturulur. Bulanık eğer- o halde biçiminde oluşturulan kurallar, dilsel değişkenleri ve bulanık kümeleri kullanarak tanımlanan koşulu bir neticeye bağlamak için araçtır. Bulanık eğer- o halde kural formatının “eğer” kısmı, bulanıklaştırılmış esnek koşullar altındaki bilginin ifade edilmesini sağlayan öncül kısmı olurken, “o halde” kısmı sonucu veya çıkışı dilsel olarak ifade edebilmeyi sağlayan sonuç aşamasını ifade etmektedir. Özetlemek gerekirse, eğer- o halde kural yapısı, giriş verilerinin kural koşulu ile bulanık kümede oluşturulan üyelik fonksiyonu derecelerinin eşleştirilip, çıkarım mekanizmasının hesaplanması amacıyla kullanılan bir aşamadır. Literatürde yaygın olarak kullanılan bu bulanık kural formatı E.H. Mamdani tarafından literatüre kazandırılan bulanık kural biçimidir (Mamdani, 1976). Bu kural biçiminin en temel formatı, X terimi giriş değişkeni, Y terimi çıkış değişkeni, A ve B terimleri sırasıyla bu değişkenlere ait seçili bulanık kümeleri olmak üzere, matematiksel olarak aşağıda belirtilen denklem 23'te verilmiştir.

$$\mathbf{EĞER} X A \text{ ise } \mathbf{O HALDE} Y B' \text{ dir.} \quad (23)$$

Bu tek öncül ve tek sonuç içeren bulanık kurala, sözel ve basit bir örnek vermek gerekirse, “eğer hava çok soğuk ise kalın mont giymek kesinlikle gereklidir” gibi bir kural ortaya çıkarılabilir. Bu örnekte havanın çok soğuk olması hava durumu ile ilgili alınan bir öncül bilgi iken, kalın mont giyilmesinin gerekliliği buna bağlı bir sonuç olarak değerlendirilebilir. Bu nitelendirmede havanın soğukluk durumunun çok ile nitelendirilmesi bulanık öncüldeki mertebeyi desteklerken, giyilecek mont çeşidinin kalın olması bulanık sonuçtaki mertebeyi desteklemektedir. Yukarıdaki örnekte belirtilen TGTÇ kural formatının matematiksel ifadesine ek olarak ÇGTÇ sistemlerde kullanılan kural formatı, Z terimi sisteme atanan bir diğer giriş ve C bu terime ait seçili bulanık kümeleri olarak kabul edilirse, matematiksel ifadesi aşağıda verilen denklem 24 yardımıyla genişletilerek ifade edilebilir.

$$\mathbf{EĞER} X A \text{ ise } VE(VEYA) Z C \text{ ise } \mathbf{O HALDE} Y B' \text{ dir.} \quad (24)$$

Yukarıdaki çoklu kural formatına sözel ve basit bir örnek vermek gerekirse, “eğer hava oldukça sıcak ve çok güneşli ise ince tişört giyilmelidir” gibi bir kural türetilebilir. Bu örnekte havanın sıcaklığı ile ilgili bilginin oldukça sözel ifadesi ile desteklenmesi alınan öncül bilgiyi belirtirken, giyilecek olan tişörtün ince olması sonucu destekleyen bir niteliktir. Burada belirtilen “oldukça” ve “ince” sözcükleri, niteliklerde bulunan özellikleri destekleyen bulanık kümelere belirli mertebelerden mensup sayılmaktadır. BMTK tasarlanan sistemlerde, giriş ve çıkış bulanık kümelerinin sayısının her birinin birbiri ile eşleşeceği kadar adette kural meydana getirir. Kural sayısının hesaplanmasının matematiksel ifadesi, birinci girişin bulanık küme sayısı x, ikinci girişin bulanık küme sayısı y olmak üzere $x*y$ olarak hesaplanır. Bu hesaplama, çıkışın bölüdüğü bulanık küme sayısından bağımsızdır. Çünkü tüm eşleşmeler girişlerin arasında meydana gelir ve netice olarak bir sonuç kümesi ataması yapılır ve bu durum uzman görüşü ile sağlanır. ÇGTÇ sistemlerde oluşturulacak olan kural tabanı aşağıda Tablo 5'te verilen tablolama yöntemi ile ifade edilir.

Giriş 2 Giriş 1	A	B	C
A	D	G	H
B	G	E	J
C	H	J	F

Tablo 5. Örnek üç girişli tek çıkışlı sistem için bulanık kural tablosu.

Bu tabloda ÇGTÇ bir sistem için iki girişli ve her girişi üç bulanık A, B ve C kümesinden oluşan ve tek çıkışı D, E, F, G, H, J bulanık kümelerinden oluşan sistemin kuralları gösterilmiştir. Giriş 1 ve giriş 2 üçer adet bulanık kümeye sahip olduğu için, çıkışın elde edildiği kural sayısı dokuz olarak belirlenir. Bu tablodaki kuralların tüm kombinasyonlarının ifade dilme biçimleri aşağıdaki kural sırasıyla elde edilebilir:

1. EĞER Giriş1 A VE Giriş2 A ise O HALDE Çıkış D'dir.
2. EĞER Giriş1 A VE Giriş2 B ise O HALDE Çıkış G'dir.
3. EĞER Giriş1 A VE Giriş2 C ise O HALDE Çıkış H'dir.
4. EĞER Giriş1 B VE Giriş2 A ise O HALDE Çıkış G'dir.
5. EĞER Giriş1 B VE Giriş2 B ise O HALDE Çıkış E'dir.
6. EĞER Giriş1 B VE Giriş2 C ise O HALDE Çıkış J'dir.
7. EĞER Giriş1 C VE Giriş2 A ise O HALDE Çıkış H'dir.
8. EĞER Giriş1 C VE Giriş2 B ise O HALDE Çıkış J'dir.
9. EĞER Giriş1 C VE Giriş2 C ise O HALDE Çıkış F'dir.

Bulanık kural tabanı oluşumunun daha açık bir şekilde anlaşılabilmesini sağlamak için basit ve kurgusal bir örnek senaryo verilebilir. Bu örnek değerleri itibariyle birebir ele alınan konu bazında net verilere ve literatüre dayandırılmaktan ziyade, konunun anlaşılabilirliğinin artırılması için yazılmıştır.

Bir araç fren testi sistemi üzerinde, fren diski kalitesi ve lastik kalitesi girişler olarak kabul edilsin. Sistemde bulunan her iki giriş için bulanık kümeler düşük, orta ve yüksek olarak üç sınıfta bulanıklaştırılsın. Çıkış ifadesi olarak da aracın durabilme kabiliyeti ele alınsın ve çok düşük, düşük, orta, yüksek, çok yüksek kümelerine bölünsün. Bu koşullar altında girişler ve çıkışa bağlı olarak oluşturulabilecek kural tabanı tablosu, aşağıda verilen Tablo

6'daki gibi kurulabilir. Giriş ifadelerinin her ikisinin de üçer adet bulanık kümeye bölünmesi durumundan dolayı da kural tabanında toplam dokuz kural elde edilecektir.

Fren Disk Kalitesi \ Lastik Kalitesi	Low	Medium	High
	Düşük	Orta	Yüksek
Düşük	Çok Düşük	Düşük	Orta
Orta	Düşük	Orta	Yüksek
Yüksek	Orta	Yüksek	Çok Yüksek

Tablo 6. Örnek araç sistemi için bulanık kural tablosu.

Verilen örnek için kural tablosunun ifadeleri sırasıyla aşağıdaki gibi verilebilir;

1. EĞER Fren Disk Kalitesi Düşük VE Lastik Kalitesi Düşük ise O HALDE Araç Durabilme Kabiliyeti Çok düşüktür.
2. EĞER Fren Disk Kalitesi Düşük VE Lastik Kalitesi Orta ise O HALDE Araç Durabilme Kabiliyeti Düşüktür.
3. EĞER Fren Disk Kalitesi Düşük VE Lastik Kalitesi Yüksek ise O HALDE Araç Durabilme Kabiliyeti Ortadır.
4. EĞER Fren Disk Kalitesi Orta VE Lastik Kalitesi Düşük ise O HALDE Araç Durabilme Kabiliyeti Düşüktür.
5. EĞER Fren Disk Kalitesi Orta VE Lastik Kalitesi Orta ise O HALDE Araç Durabilme Kabiliyeti Ortadır.
6. EĞER Fren Disk Kalitesi Orta VE Lastik Kalitesi Yüksek ise O HALDE Araç Durabilme Kabiliyeti Yüksekler.
7. EĞER Fren Disk Kalitesi Yüksek VE Lastik Kalitesi Düşük ise O HALDE Araç Durabilme Kabiliyeti Ortadır.
8. EĞER Fren Disk Kalitesi Yüksek VE Lastik Kalitesi Orta ise O HALDE Araç Durabilme Kabiliyeti Yüksekler.
9. EĞER Fren Disk Kalitesi Yüksek VE Lastik Kalitesi Yüksek ise O HALDE Araç Durabilme Kabiliyeti Çok Yüksekler.

Oluşturulan bu kural tabanı tamamen örnek bir senaryo üzerinde örnek uzman görüşüne dayandırılarak yapılmış yorumlar olarak, bulanık kural tabanı oluşumuna açıklık getirmek amacı ile verilmiştir. Tablo 6’da ifade edilen fren disk kalitesi ve lastik kalitesi sistemin girişlerini belirtirken, tabloda bu girişlerin olağan bölünmüş ihtimallerinin kesişimi yaklaşım yapılan sonucu ifade etmektedir. Bu yaklaşımlar sebep sonuç ilişkisi bağlamında ve insansı sezgisel düşünce yapısının sözel ifadesi şeklinde eğer-o halde kural formatında belirtilir. Görüldüğü üzere verilen bu örnekte, fren disk kalitesi ve lastik kalitesi girişleri üçer adet bulanık küme içermektedir. Girişlere atfedilen bu bulanık kümelerin daha detaylı bölünmesi ve çözünürlüğünün artırılması, gerçek sistem uygulamaları üzerinde daha yüksek kesinliğe imkân tanınmasına literatürde yer verilmiştir (Langari ve Yen, 2001). Kural tabanının kurulması aşaması, bulanık çıkarım aşamasına imkân verebilmek amacıyla yapılan önemli bir adım sayılabilir.

2.2.3. Bulanık Çıkarım

Bulanık çıkarım aşaması, öncelikli olarak sayısal verilerden bulanıklaştırılan ve bulanık kümeler şeklinde ifade edilen girişlerin, bulanık operatörlerin ve bulanık kuralların yardımıyla oluşturulan karar verme yapısıdır. Literatürde Mamdani ve Takagi-Sugeno (TS) tipi bulanık çıkarım mekanizmalarına yaygın olarak rastlanılmaktadır (Mamdani ve Assilian, 1975; Takagi ve Sugeno, 1985). Bu iki tip çıkarımın da kendilerine birçok uygulama alanında yer bulduğu gözlenmiştir. Bu yaygın kullanımdaki bulanık çıkarım mekanizmalarının en etkin avantajları aşağıda verilen Tablo 7’de gösterilmiştir.

Mamdani Tip Bulanık Çıkarım	Takagi-Sugeno Tip Bulanık Çıkarım
Uygulama alanlarında yaygın kabul görmesi.	Matematiksel analize kolay uyum sağlayabilmesi ve uygunluğu.
Bulanık kural tabanında daha kolay yorumlanabilir olması.	Hesaplama açısından daha verimli olması.
İnsan temelli bilgiye daha uygun olması.	Optimizasyon teknikleriyle iyi çalışabilmesi.
Sezgisel olması.	Doğrusal kontrolör metotlarıyla iyi sonuç vermesi.

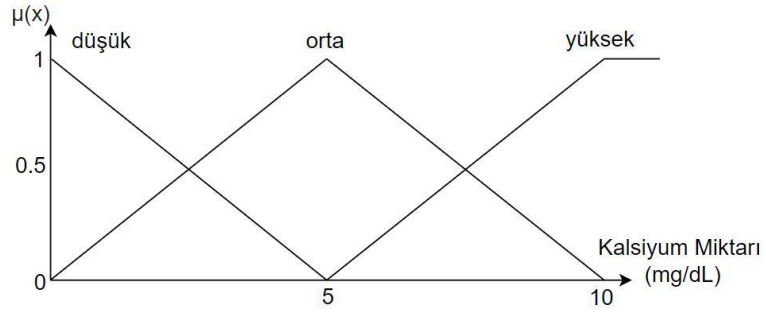
Tablo 7. Mamdani ve TS tip bulanık çıkarım mekanizmalarının temel avantajları. Kaynak: (Hamam ve Georganas, 2008)

Yukarıdaki tabloda özeti belirtilen temel avantajlar ele alındığında, Mamdani tip bulanık çıkarım mekanizmasının sezgilere daha yatkın olması, uzman görüşüne dayalı (insan temelli) bilgiye daha uygun olması ve bu durumun gerçekleştirilmesi esnasında bulanık kural tabanının daha kolay yorumlanabilir olması uygulama alanlarında yaygın kullanıma sebebiyet verebilecek avantajlar bütünü oluşturmuştur. Bu duruma ek olarak, özellikle kontrol uygulamalarında TS tipi bulanık çıkarım mekanizmasının matematiksel model analizlerine daha kolay uyum sağlayabilmesi ve bu adaptasyon uygunluğunun getirisi olan hesaplama verimliliğinin artması, çeşitli bilinen optimizasyon teknikleriyle çalışıldığında iyi sonuçlar elde edilmesini sağlayarak doğrusal kontrolör tasarım metotlarıyla beraber gelişmiş uygulamalardan daha iyi sonuçlar elde edilmesini avantajını karşımıza çıkarmaktadır. Mamdani tipi ve TS tipi bulanık çıkarım mekanizmaları arasındaki en temel fark, Mamdani çıkarımı neticeleri bulanık değerler şeklinde muhakeme ederken, TS tipi bulanık çıkarım mekanizması çıkışı içerisindeki üyelik fonksiyonu ve değer uzayında ele alınan değerlerin değişkenlerine bağlı bir fonksiyon şeklinde vermektedir. Tezin ilerleyen bölümlerinde, bulanık olarak elde edilen çıkışların ele alınan sisteme uygulanabilmesi için çeşitli durulama yöntemlerinden geçmesi ve sonucun elde edilmesi detaylı olarak anlatılacaktır.

2.2.3.1. Mamdani Tipi Bulanık Çıkarım

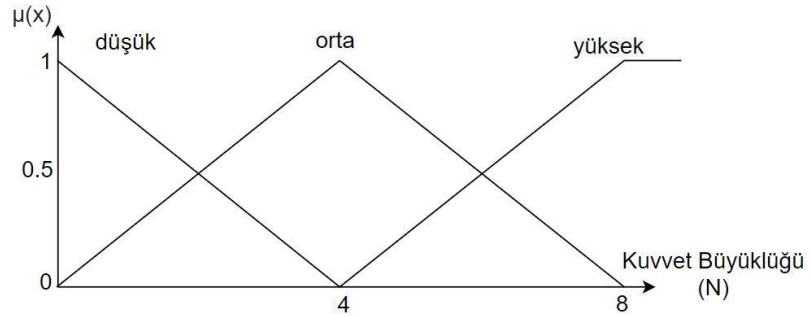
Mamdani tipi bulanık çıkarım metodu ilk kez 1974 yılında, İbrahim Mamdani tarafından temel bir dinamik sisteme uygulanmış ve ortaya atılmıştır (Mamdani, 1974). Yaygın bir çıkarım mekanizması olmasının başlıca sebepleri insan bazlı görüşlere yatkın olmasıdır. Bu yatkınlığın neticesi olarak sözel ifadelerin ve oluşturulan sistemlerin yorumlanabilme kabiliyeti nispeten daha kolay olarak belirtilebilir. Mamdani tipi bulanık çıkarımda, operatörlerin ifade ettiği “ve, veya vb. “mantıksal bağlaç ifadeleri sırasıyla en küçük (EK) ve en büyük (EB) işlemlerine karşılık gelmektedir. Operatörlerde kesişimi ifade etmek için kullanılan “ve” operatörü Mamdani tip bulanık çıkarımda EK atamasına denk kabul edilirken, birleşimi ifade etmek için kullanılan “veya” operatörü Mamdani tip bulanık çıkarımda EB atamasına denk kabul edilir. Bu atamalar, mukayese edilen değerlerin en küçük ya da en büyük değerlerine göre çıkarımı işleme alırlar. Mamdani tipi bulanık çıkarımında bulunan iç dinamiklerin detaylı anlaşılması için aşağıdaki gibi bir kurgu örnek ele alınsın:

Hastanede bulunan belirli sayıda hasta üzerinde, kollarına aldıkları kuvvetin büyüklüğüne göre incelenen kemiğin kırılma yüzdesi ele alınsın. Verilerin oluşumunda etkin parametreler hastaların kandaki desilitre başına kaç miligram kalsiyum taşıdıkları (mg/dL) ve kemiğe alınan kuvvetin büyüklüğü (N) parametrelerine bağlı olacak şekilde ele alınan kemiğin kırılma yüzdesi (%) incelensin. Bu sistemde girişler kalsiyum miktarı ve kuvvet büyüklüğü, çıkış ise kemiğin kırılma yüzdesidir. Giriş değerlerinden ilki olan kanda bulunan desilitre başına kalsiyum miktarı (mg/dL) ele alındığında, 0-5 mg/dL düşük kalsiyum miktarı, 5-10 mg/dL orta kalsiyum miktarı ve 5-10 mg/dL yüksek kalsiyum miktarı olarak kabul edilsin. Kandaki birim desilitrede bulunan kalsiyum miligramı aşağıda verilen Şekil 14’teki gibi üçgen tip üyelik fonksiyonları ile ifade edilsin.



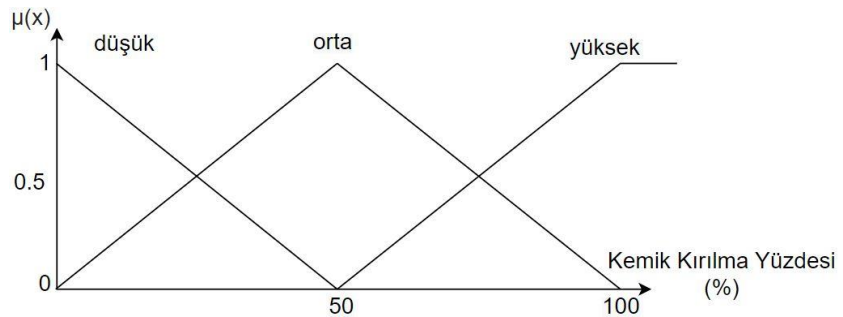
Şekil 14. Kandaki kalsiyum miktarının bulanık küme gösterimi.

İkinci giriş olan kuvvet büyüklüğü kriteri ise, 0-4 N arası düşük kuvvet büyüklüğü, 0-8 N arası orta kuvvet büyüklüğü ve 4-8 N arası ise yüksek kuvvet büyüklüğü olarak kabul edilsin. Kuvvet büyüklüğünün bulanık kümesi ise aşağıda verilen Şekil 15'teki gibi üçgen tip üyelik fonksiyonları ile ifade edilsin.



Şekil 15. Etki eden kuvvet büyüklüğünün bulanık küme gösterimi.

Kalsiyum miktarı ve etki eden kuvvet büyüklüğü giriş olarak kabul edilen sistemin çıkışı olan kemik kırılma yüzdesi ise Şekil 16'daki gibi üçten tipi üyelik fonksiyonları ile bulanıklaştırılma gerçekleştirilsin.



Şekil 16. Kemik kırılma yüzdesinin bulanık küme gösterimi.

Girişler ve çıkış için oluşturulan bulanık kümelerden sonra doktor vasıtasıyla (uzman görüşü) oluşturulan bulanık kural sayısı her iki giriş de üçer bulanık kümeyle bölündüğü için kural sayılarının çarpımları neticesinde dokuz kural olarak elde edilir. Bu bulanık kurallar aşağıdaki sırada verildiği biçimde oluşturulur;

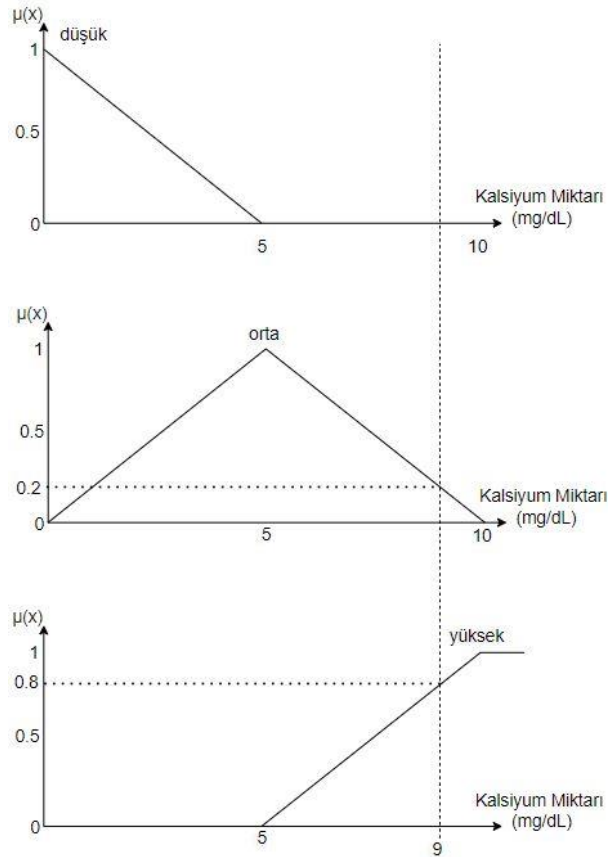
- 1) Eğer kalsiyum miktarı **düşük** ve kuvvet büyüklüğü **düşük** ise o halde kemik kırılma yüzdesi **ortadır**.
- 2) Eğer kalsiyum miktarı **düşük** ve kuvvet büyüklüğü **orta** ise o halde kemik kırılma yüzdesi **ortadır**.
- 3) Eğer kalsiyum miktarı **düşük** ve kuvvet büyüklüğü **yüksek** ise o halde kemik kırılma yüzdesi **yüksektir**.
- 4) Eğer kalsiyum miktarı **orta** ve kuvvet büyüklüğü **düşük** ise o halde kemik kırılma yüzdesi **düşüktür**.
- 5) Eğer kalsiyum miktarı **orta** ve kuvvet büyüklüğü **orta** ise o halde kemik kırılma yüzdesi **ortadır**.
- 6) Eğer kalsiyum miktarı **orta** ve kuvvet büyüklüğü **yüksek** ise o halde kemik kırılma yüzdesi **ortadır**.
- 7) Eğer kalsiyum miktarı **yüksek** ve kuvvet büyüklüğü **düşük** ise o halde kemik kırılma yüzdesi **düşüktür**.
- 8) Eğer kalsiyum miktarı **yüksek** ve kuvvet büyüklüğü **orta** ise o halde kemik kırılma yüzdesi **düşüktür**.
- 9) Eğer kalsiyum miktarı **yüksek** ve kuvvet büyüklüğü **yüksek** ise o halde kemik kırılma yüzdesi **ortadır**.

Oluşturulan bu bulanık kuralların tablo gösterimi aşağıdaki Tablo 8’de gösterildiği gibi oluşturulabilir:

Kalsiyum Miktarı \ Kuvvet Büyüklüğü	Kuvvet Büyüklüğü		
	Düşük	Orta	Yüksek
Düşük	Orta	Orta	Yüksek
Orta	Düşük	Orta	Orta
Yüksek	Düşük	Düşük	Orta

Tablo 8. Verilen örneğe ait bulanık kural tablosu.

Belirtilen bu kurallar çerçevesinde, ele alınacak değerler için en az bir sıfırdan farklı üyelik fonksiyonu değeri varsa, o değer için en az bir kural ateşlenir olarak yorumlanabilir, aksi takdirde kural ateşlenmez anlamına gelir. Verilen örneğin sonucunu elde edebilmek için ele alınan değerlerden ilk giriş için kalsiyum için 9 mg/dL değeri seçilsin. Bu kalsiyum değerine karşılık gelen üyelik fonksiyonu değerleri aşağıda verilen Şekil 17'deki gibi üyelik fonksiyonu derecelerine sahip olduğu kabul edilebilir:



Şekil 17. Kalsiyum değeri 9mg/dL için üyelik fonksiyonu değerleri.

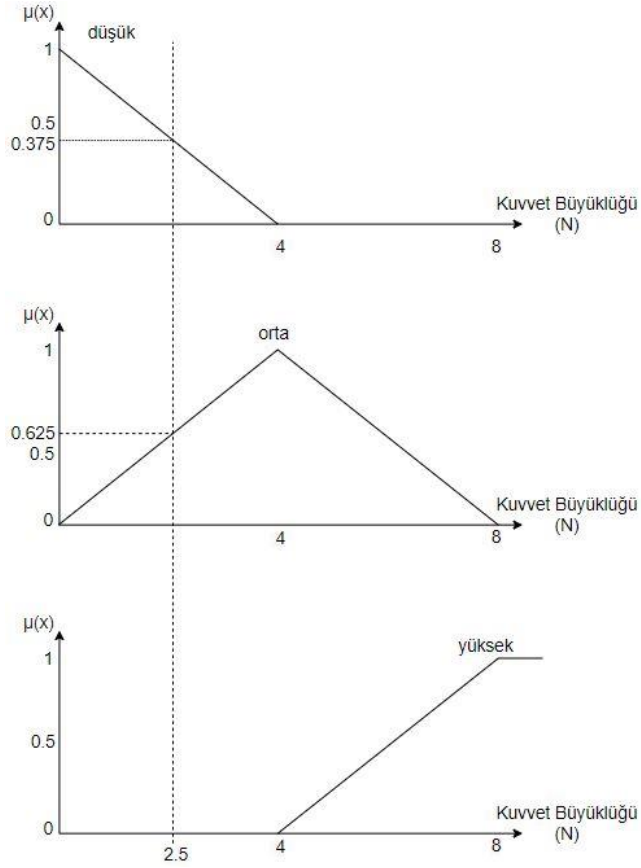
Şekil 17'den gözlendiği üzere kalsiyumun belirlenen 9 mg/dL değerinin düşük, orta ve yüksek kümelerine ait üyelik fonksiyonları aşağıda verilen denklem 25, 26 ve 27'deki üyelik fonksiyonu gösterimleri ile ifade edilebilir:

$$\mu_{kalsiyum_{düşük}}(9) = 0 \quad (25)$$

$$\mu_{kalsiyum_{orta}}(9) = 0,2 \quad (26)$$

$$\mu_{kalsiyum_{yüksek}}(9) = 0,8 \quad (27)$$

Örneğin sonucunu elde edebilmek adına ikinci giriş olarak kabul edilen kuvvet büyüklüğü değeri 2,5 N olarak ele alınsın. Bu kuvvet büyüklüğü değerine karşılık gelen üyelik fonksiyonu değerleri aşağıda verilen Şekil 18'deki gibi üyelik fonksiyonu derecelerine sahip olduğu kabul edilebilir:



Şekil 18. Kuvvet büyüklüğü değeri 2,5 N için üyelik fonksiyonu değerleri.

Şekil 18'den gözlemlendiği üzere kuvvet büyüklüğünün belirlenen 2,5 N değerinin düşük, orta ve yüksek kümelerine ait üyelik fonksiyonları aşağıda verilen denklem 28, 29 ve 30'daki gibi ifade edilebilir:

$$\mu_{kuvvet_{düşük}}(9) = 0,375 \quad (28)$$

$$\mu_{kuvvet_{orta}}(9) = 0,625 \quad (29)$$

$$\mu_{kuvvet_{yüksek}}(9) = 0 \quad (30)$$

Her iki giriş için de değer uzayı bulanık olarak düşük, orta ve yüksek olmak üzere üçer adet bulanık küme bulunması sebebiyle, bulanık kuralların kombinasyonunda çıkışı

belirleyen dokuz kural meydana gelir. Bu kuralların oluşturduğu kombinasyonlarda, en az bir girişte sıfır değerine sahip üyelik fonksiyonu bulunursa bu durumda bahsi geçen bulanık kural ateşlenmeyecektir. Harici durumlarda ise herhangi bir değerde üyelik fonksiyonu değeri barındıran bulanık kurallar ateşlenecektir. Bu açıklama gözetildiğinde 4, 5, 7 ve 8. sırada bulunan bulanık kuralların ateşlendiği görülür. Harici kurallar için 1, 2 ve 3 numaralı kurallar ele alınan 9 mg/dL kalsiyum miktarı değerinin üyelik fonksiyonunun birinci giriş için sıfır olmasından dolayı ateşlenmez. 6. ve 9. bulanık kurallarda ise 2,5 N olarak kabul edilen kuvvet büyüklüğünün üyelik fonksiyonunun ikinci giriş için sıfır olmasından dolayı ateşlenmeyecektir. Ateşlenen kurallar ele alındığında, 4. ve 5. bulanık kurallar için ilk girişteki 9 mg/dL kalsiyum değeri orta kümesinde 0,2 üyelik fonksiyonu değerini verirken, aynı değişken için 7. ve 8. kurallarda bu değer 0,8 olarak hesaplanmıştır. Sistemde meydana getirilen bulanık kurallar ikinci giriş olan kuvvet büyüklüğü (N) bazında ele alındığında, 4. ve 7. bulanık kuralda kuvvet büyüklüğü 2,5 N değeri için düşük bulanık kümesinde 0,375 üyelik fonksiyonu değeri ele alınırken, 5. ve 8. bulanık kurallar için 2,5 N kuvvet büyüklüğü değerinin orta bulanık kümesinde 0,625 değerine sahip olduğu hesaplanabilir. Mamdani tipi çıkarım mekanizması, kıstas alınan bu üyelik fonksiyonlarının değerlerini, kurallarda bağıl olarak bulunan operatörlerin çeşitlerini baz alarak seçim yapmaya dayanmaktadır. Bu seçim mantığı da örneğini verdiğimiz kurallarda bulunan “ve” operatörünün, en küçük (EK) değerlendirmesine iletilerek işlem gördüğünü göstermektedir. Açıklaması yapılan bu bulanık kural ifadelerinden ateşlenen bulanık kurallardan meydana gelen Mamdani tip çıkarım mekanizmasının üyelik fonksiyonu değerlerini içeren matematiksel ifadeleri aşağıda detaylı olarak verilen 31, 32, 33 ve 34 numaralı denklemlerde gösterilmektedir:

$$\begin{aligned} \text{Kural 4: EK } (\mu_{kalsiyum_{orta}}(x), \mu_{kuvvet_{düşük}}(x)) & \quad (31) \\ & = \mu_{kırılma_{ihtimal_{düşük}}}(x) \end{aligned}$$

İfade edilen dördüncü bulanık kural içerisindeki üyelik fonksiyonu değerlerinin belirtilen örnek için yerine yazılmış ve en küçük operatörüne göre yapılan seçimi aşağıda verilen denklem 32’de gösterilmektedir:

$$\text{EK } (0,2, 0,375) = 0,2 \quad (32)$$

Sistemde bulunan beşinci bulanık kural için Mamdani tip çıkarım mekanizmasının matematiksel ifadesi aşağıda verilen denklem 33’teki gibi ifade edilebilir:

$$Kural 5: EK (\mu_{kalsiyum_{orta}}(x), \mu_{kuvvet_{orta}}(x)) = \mu_{kırılma_{ihtimal_{orta}}}(x) \quad (33)$$

İfade edilen beşinci bulanık kural içerisindeki üyelik fonksiyonu değerlerinin belirtilen örnek için yerine yazılmış ve en küçük operatörüne göre yapılan seçimi aşağıda verilen denklem 34'te gösterilmektedir:

$$EK (0,2, 0,625) = 0,2 \quad (34)$$

Söz konusu yedinci bulanık kural için kural için Mamdani tip çıkarım mekanizmasının matematiksel ifadesi aşağıda verilen denklem 35'teki gibi ifade edilebilir:

$$Kural 7: EK (\mu_{kalsiyum_{yüksek}}(x), \mu_{kuvvet_{düşük}}(x)) \quad (35) \\ = \mu_{kırılma_{ihtimal_{düşük}}}(x)$$

Ele alınan yedinci bulanık kural içerisindeki üyelik fonksiyonu değerlerinin belirtilen örnek için yerine yazılmış ve en küçük operatörüne göre yapılan seçimi aşağıda verilen denklem 36'da gösterilmektedir:

$$EK (0,8, 0,375) = 0,375 \quad (36)$$

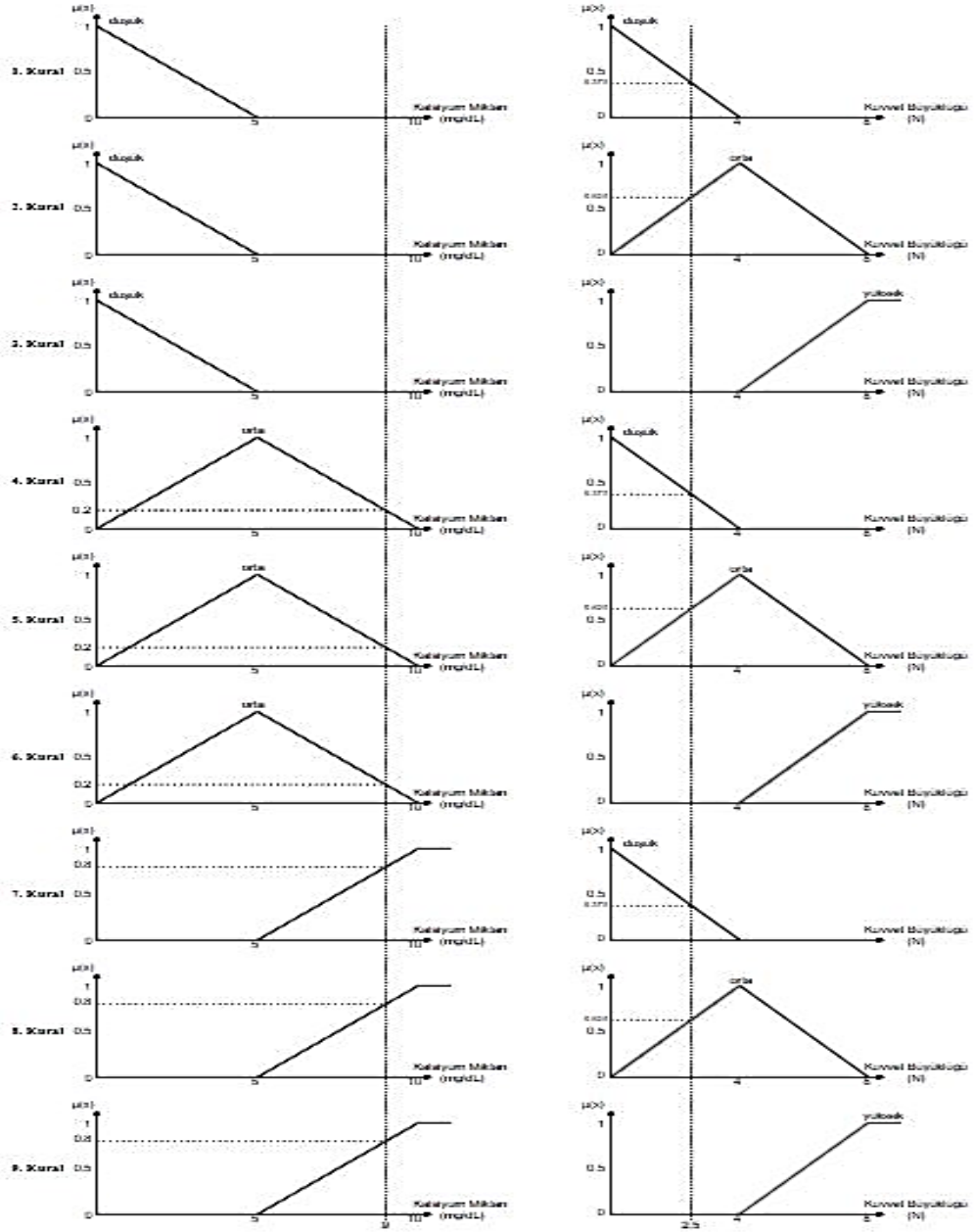
Son olarak ise ateşlenen son bulanık kural olan sekizinci kural ele alındığında Mamdani tip çıkarım mekanizmasının matematiksel ifadesi aşağıda verilen denklem 37'deki gibi ifade edilebilir:

$$Kural 8: EK (\mu_{kalsiyum_{yüksek}}(x), \mu_{kuvvet_{orta}}(x)) \quad (37) \\ = \mu_{kırılma_{ihtimal_{düşük}}}(x)$$

İfade edilen sekizinci bulanık kural içerisindeki üyelik fonksiyonu değerlerinin belirtilen örnek için yerine yazılmış ve en küçük operatörüne göre yapılan seçimi aşağıda verilen denklem 38'de gösterilmektedir:

$$EK (0,8, 0,625) = 0,625 \quad (38)$$

İşlemleri yapılan tüm bu Mamdani tip bulanık çıkarımın bulanık kümeler üzerindeki gösterimi aşağıda verilen Şekil 19'de gösterildiği gibi ifade edilir.



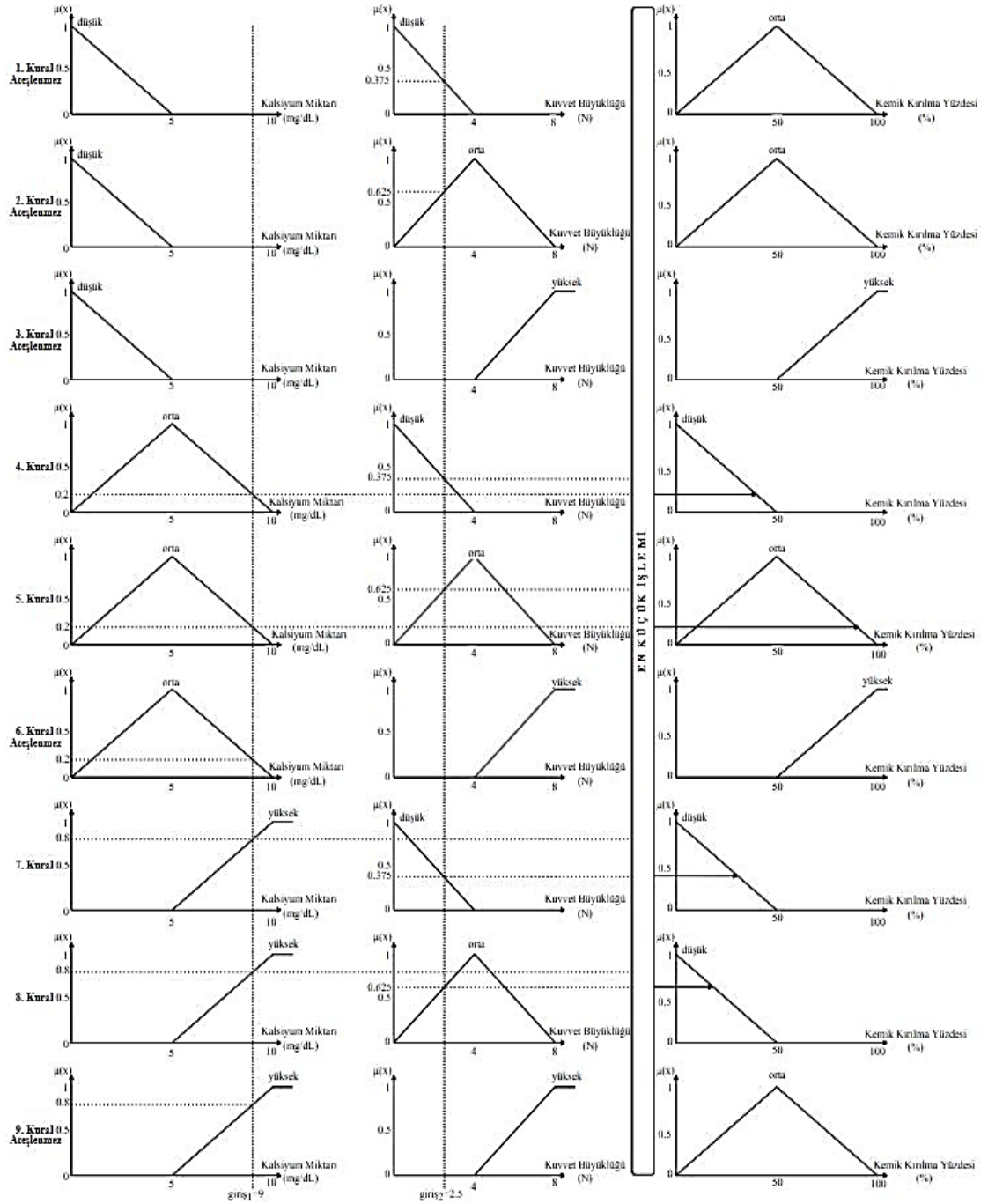
Şekil 19. Verilen örnek için bulanık kuralların gösterimi.

Yapılan işlemin şekil ifadesinde gösterildiği üzere, “ve” operatörünün getirisi olan en küçük işlemine sistemin girişlerinin meydana getirdiği üyelik fonksiyonları kıyaslanmadan önce, dördüncü bulanık kural için ilk girişin üyelik fonksiyon değeri 0,2 ve ikinci girişin üyelik fonksiyon değeri 0,375 olarak hesaplanır. Beşinci bulanık kural için ise bu üyelik fonksiyonu değerleri sırasıyla 0,2 ve 0,625 olarak elde edilirken, yedinci bulanık kural için sırasıyla 0,8 ve 0,375 değerlerine sahip üyelik fonksiyonu seçilime dahil edilecektir. Son olarak ise sekizinci kural için bu üyelik fonksiyonlarının değerlerinin sırasıyla 0,8 ve 0,625 olduğu görülür. Mamdani tip bulanık çıkarımda ise her

bulanık kümeden gelen bu ikili üyelik fonksiyonu çiftleri en küçük (min.) kuralına göre kıyaslanıp seçim gösterecektir. Üyelik fonksiyonu değerlerinin kıyaslanması sonucunda bahsi geçen ateşlenen kurallar için üyelik fonksiyonları sırasıyla 0,2, 0,2, 0,375 ve 0,625 değerlerini alır. Bulanık kurallara ait üyelik fonksiyonu çiftleri ve bunların en küçük (min.) kuralına göre seçilmiş sonuçları aşağıda verilen Tablo 9’da gösterilmiştir.

Ateşlenen kural	İlk girişe ait üyelik fonksiyonu	İkinci girişe ait üyelik fonksiyonu	En küçük (min.) işlemine göre seçilen üyelik fonksiyonu
4	0,2	0,375	0,2
5	0,2	0,625	0,2
7	0,8	0,375	0,375
8	0,8	0,625	0,625

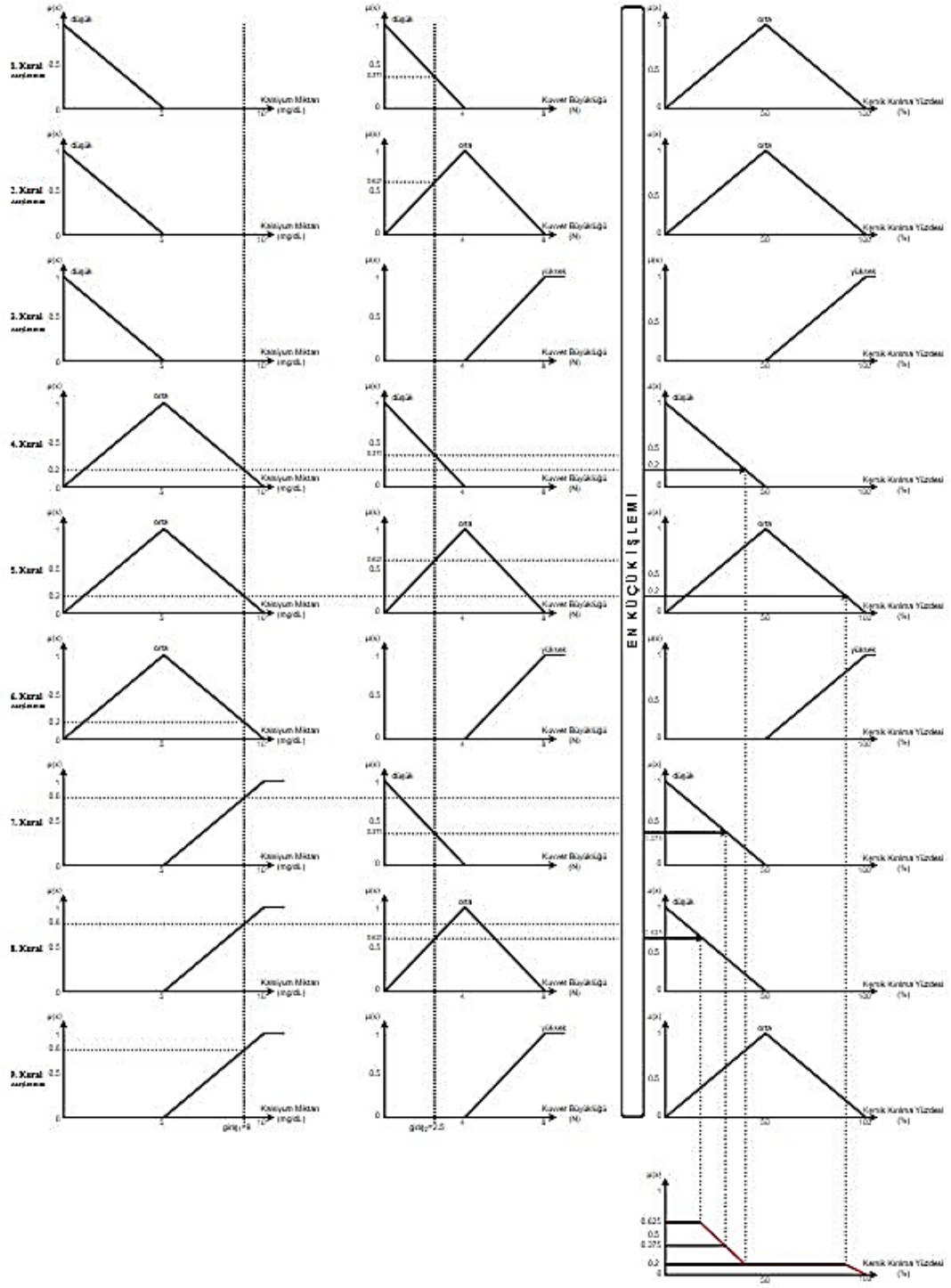
Tablo 9. Ateşlenen bulanık kuralların üyelik fonksiyonlarının en küçük (min.) operatörüne göre seçilimi. Ateşlenen kuralların en küçük işlemi yapılarak elde edilen çıkış bulanık kümelerinin son gösterilimi aşağıda verilen Şekil 20’deki gibi olacaktır.



Şekil 20. Verilen örnek için Mamdani tipi bulanık çıkarım gösterimi.

Şekil 20 üzerinde görüldüğü üzere yapılan çıkarım sonucunda elde edilen ve çıkış ifadesiyle iliştilen sayılar hala birer bulanık çıkış kümesine ait olarak bulanık tabanda bulunmaktadır. Bu kıyaslanmadan en küçük (min.) işlemine göre seçilen üyelik fonksiyonlarının değerleri, bulanık çıkışın elde edilmesinden önce çıkış fonksiyonlarının durulanacak nihai çıkışı elde edebilmek için bir araya getirme işleminin yapılması

gerekir. Bir araya getirme işlemi, ateşlenen bulanık kurallar içerisinde seçim gösteren üyelik fonksiyonun yatay eksenindeki değerlerine kadar olan aralıkta baskın gelmesiyle, diğer bir değiş ile en büyük (EB) işlemi ile gerçekleştirilir. Yatay ekseninde kapsanan aralıklar gözleendiğinde, en kısa aralık 0,625 değerine sahip sekizinci bulanık kurala ait çıkıştır. Bu noktadan sonra ise yedinci bulanık kurala ait 0,375 üyelik fonksiyonu değeri ile devam ederek, dördüncü bulanık kuralın 0,2 üyelik fonksiyonu değerine kadar düşüş gösterecektir. Bu düşüş trend takibinden sonraki aralıklar için ise bu noktadan sonra beşinci bulanık kuralın 0,2 üyelik fonksiyonu değeri devreye girerek devam edecek ve sonlanacaktır. Hesaplanan bulanık çıkış değerleri bir sonraki aşama olan durulama aşamasında gerçek ve uygulanabilir sayılara çeşitli metotlar aracılığı ile dönüştürülecektir. Bulanıklaştırılmadan önce bir araya getirme işleminin yapılmış hali ise aşağıda verilen Şekil 21 üzerinde gözlenebilir.



Şekil 21. Bir araya getirme işlemi gösterimi.

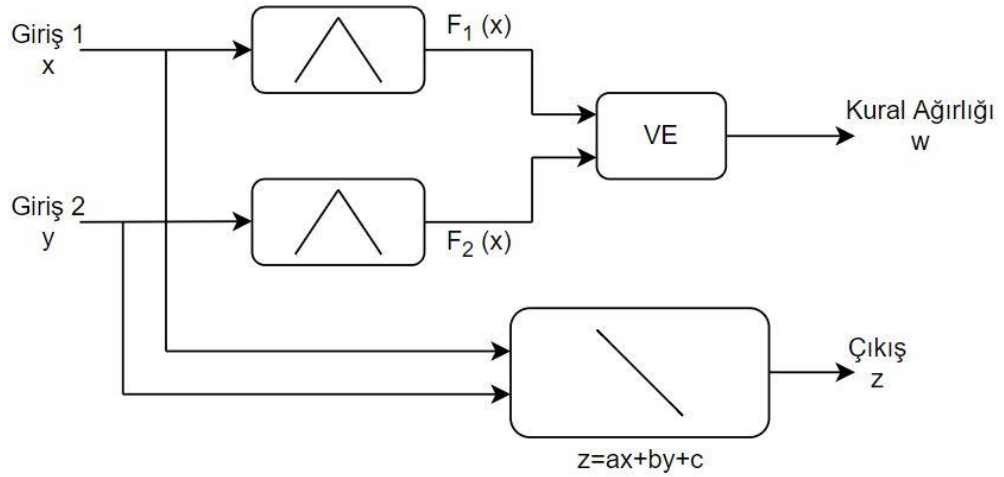
Çıkarım mekanizmasından sonra elde edilen sonuçların çıkış değişkeni üzerindeki yapılacak olan durulama işlemi türleri detaylarıyla birlikte tezin ilerleyen bölümlerinde derinlemesine anlatılacaktır.

2.2.3.2. Takagi-Sugeno (TS) Tipi Bulanık Çıkarım

Takagi – Sugeno tipi bulanık çıkarım mekanizması ilk olarak Takagi T. ve Sugeno M. tarafından 1983 yılında ortaya atılmıştır. Bu çıkarım mekanizmasının amacı işleyiş itibariyle sistemin giriş öncüllerine bağlı meydana gelecek olan sistemin çıkış neticelerinin bulanık mantığa yatkın biçimde elde edilmesini sağlamaktır. Genel olarak bulanık çıkarım mekanizmasına hizmet etmek adına TS tipi bulanık çıkarımın, Mamdani tip bulanık çıkarım mekanizmasından en büyük fark gösteren noktası, çıkış muhakemesinin üyelik fonksiyonlarından türetilen fonksiyonlar biçiminde ifade edilebilirliğine dayanır. Bir sonraki aşama olan durulama aşamasına fonksiyonlardan elde edilen sonuçlar aktarılır ve çeşitli durulama metotları aracılığıyla nihai sonuç elde edilir. Yani Mamdani tipi bulanık çıkarımda kullanılan dilsel ifade bağlaçlarının operatör karşılıklarına göre EK ya da EB seçim işlemleri işletilirken, TS tipi bulanık çıkarımda bu operatör eğilimlerinin yerini çıkışları fonksiyonlar halinde ifade etme durumu alır (Sugeno ve Takagi, 1983). Bu durum da ortaya çıkan sonuçların sabit sayılar ya da doğrusal fonksiyonlar şeklinde elde edilmesine sebebiyet vermektedir. Kontrol alanı uygulamalarında TS tipi bulanık çıkarım mekanizması yaygın olarak kullanılır (Elkinany, Alfidi, Chaibi ve Chalh, 2020; Vrkalovic, Teban ve Borlea, 2017). Bunun temel olarak kabul edilebilecek sebeplerinden ilki, yapılan matematiksel analizlere uyum sağlayabilme uygunluğudur. Bulanık mantık kavramı tabiatı gereği dilsel ifadeler aracılığı ile matematiksel modeller üzerinde işlem gördüğü için halihazırda derin matematiksel teoride genellikle kolaylık sağlayabilmektedir. Bu kolaylığa ek olarak TS tipi bulanık çıkarım mekanizmasında muhakemenin fonksiyonlar yoluyla elde edilmesi de bu matematiksel işlemlere yönelik olan adaptasyon açısından büyük bir avantaj sağlayabilmektedir. İlk avantajın sağlamış olduğu fonksiyonlar aracılığıyla hesaplama durumu da çıkarımın sağlıklı elde edilmesi açısından daha verimli sonuçların elde edilmesine imkân sağlar. TS tipi bulanık çıkarımdan elde edilen sonuçların hesaplanan fonksiyonlar şeklinde elde edilmesinin en büyük avantajlarından birisi de optimizasyon teknikleriyle çok verimli çalışabilmesidir. Kontrol perspektifi ile bakıldığında bu optimizasyon yatkınlığı elde edilen sonuçlardan elde edilen performans kriterlerinin

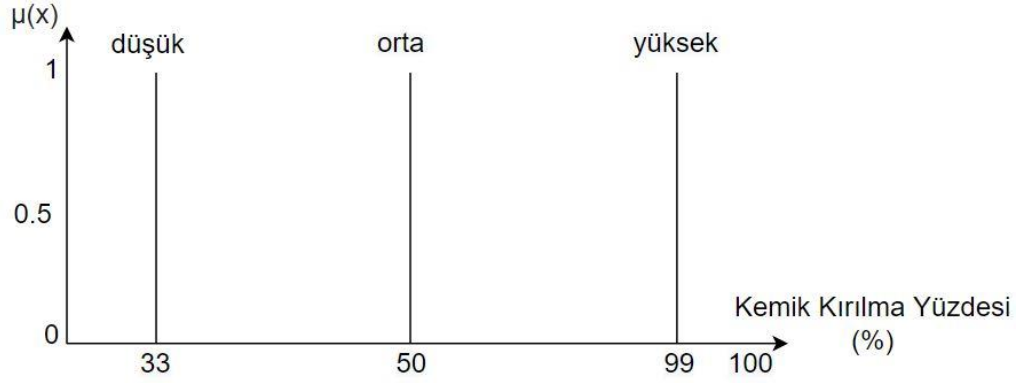
geliştirilebilmesine olanak sağlamaktadır ve doğrusal kontrol metotları ile istenen sonuçların iyi bir şekilde elde edilmesi gerçekleştirilebilir.

TS tipi bulanık çıkarımın kural yapısı Mamdani tipi çıkarımdan farkı çıkışlarının giriş fonksiyonlarına bağlı fonksiyonlar şeklinde ifade edilmesidir. Bu durumda çıkışlar doğrusal bir fonksiyon ya da bir sayı olan tekil üyelik fonksiyonları şeklinde ifade edilir. Buna ek olarak TS tip bulanık çıkarımın bulanık kural ifadesi ufak bir modifikasyon barındırır. Bu modifikasyon giriş öncüllerinin çıkışta fonksiyon biçiminde ifade edilmesini sağlar. Genellikle iki giriş olarak kullanılan bulanık sistemler için TS tip bulanık çıkarım mekanizmasının kural işleyişinin iç diyagramı aşağıda verilen Şekil 22’de gösterilmiştir.



Şekil 22. TS bulanık çıkarım işleyiş diyagramı.

TS tipi bulanık çıkarım mekanizması işletilirken kural ağırlığı ve çıkış olmak üzere iki adet parametre işletilir. Bu tip bulanık çıkarımda bahsi geçen değişkenler kesin sayılar içerdiğinden dolayı Mamdani tip bulanık çıkarım mekanizmasından farklı olarak çıkış değerleri genellikle hesaplama basitliği getirmesinden dolayı singleton (tekil) tip üyelik fonksiyonlarıyla ifade edilir. TS tipi bulanık çıkarım mekanizmasında sembolü “w” ile belirtilen kural ağırlığı giriş değerlerinin atışlediği bulanık kurallara ait olan üyelik fonksiyonlarının EK işleminden geçirilmesi ile belirlenir. Buna ilave olarak sembolü “z” ile ifade edilen çıkış ise, bulanık girişlerin bir fonksiyonu olarak ifade edilir. Mamdani tip bulanık çıkarım mekanizmasının anlatımı için kullanılan örnekte Şekil 16’da verilen ve üçgen tip üyelik fonksiyonlarıyla tanımlanan kemik kırılma yüzdesi çıkış değişkeni, singleton (tekil) üyelik tipleri ile aşağıda verilen Şekil 23’teki gibi ifade edilebilir.



Şekil 23. Verilen örnek için çıkış singleton (tekil) tip üyelik fonksiyonları.

Örneği üzerinden TS tip bulanık çıkarım mekanizmasını açıklamak üzere çıkış singleton (tekil) tip üyelik fonksiyonu değerleri düşük, orta ve yüksek bulanık kümeleri için sırasıyla 33, 50 ve 99 olarak belirlensin. Örneğin devamlılığı açısından ise, Mamdani tip bulanık çıkarımda işletilen ve kural kombinasyonu Tablo 8’de verilen kurallar eşdeğer olarak kabul edilsin. Bu durumda sistemin 9 mg/dL kalsiyum miktarı ve 2,5 N kuvvet girişleri için eşdeğer bulanık kurallar atışlenecektir. TS tipi bulanık çıkarım mekanizmasında, belirtilen bulanık kural yapısı kullanılarak yapılan mantıksal çıkarımın çıkış değeri z aşağıda verilen formül 39’daki gibi hesaplanır:

$$z_i = a_i \cdot x + b_i \cdot y + c_i \quad (39)$$

Ateşlenen her bulanık kural için denklem 39’da verilen bulanık çıkış değerinde a_i, b_i ve c_i değerleri sabitleri ifade etmektedir. Buna ek olarak kural ağırlığı olarak belirtilen w ise ve metodu ile en küçük durum değerlendirilmesine göre aşağıda verilen denklem 40’taki gibi belirlenir.

$$w_i = EK(F_1(x), F_2(x)) \quad (40)$$

Burada N ateşlenen bulanık kural sayısını belirtir. Mamdani tipi bulanık çıkarım mekanizmasında verilen örnek eşdeğer olarak kabul edilerek, ateşlenen dört kural için TS tipi bulanık çıkarımda elde edilen kısmi çıkış fonksiyonları ve karşılık gelen çıkış kümesindeki değerleri aşağıdaki denklemlerde detaylıca anlatılacaktır. Örnekte verilen sistem üzerinde ilk giriş değişkeni kalsiyum miktarı (mg/dL) ve giriş değeri 9 mg/dL olup, ikinci giriş değişkeni ise kuvvet büyüklüğü (N) ve giriş değeri 2,5N’dir. Çıkış ise kemik kırılma yüzdesi (%) ile ifade edilir. Ele alınan sistem için ateşlenen bulanık kurallar üzerinde Şekil 19 üzerinde gösterilmiştir. Bu kurallar için ilk giriş değişkeni x_1 ve ikinci

giriş değişkeni x_2 olmak üzere dördüncü kuralda kalsiyum miktarının üyelik fonksiyonu değeri 0,2 ve kuvvet büyüklüğünün üyelik fonksiyonu değeri 0,375 olarak gözlenebilir. Bu üyelik fonksiyonu değerlerinde kural 4'e göre w_4 ağırlık katsayısı EK (0,2, 0,375) operatörü işletilerek 0,2 olarak elde edilir. Ateşlenen beşinci bulanık kural için, ilk girişin üyelik fonksiyonu değeri 0,2, ikinci girişin üyelik fonksiyonu değeri ise 0,625 olarak bulunduğu için, beşinci bulanık kuralın ağırlık katsayısı w_5 EK (0,2, 0,625) operatörü işletilerek 0,2 olarak elde edilir. Aynı şekilde, sistemde ateşlenen yedinci bulanık kural için, ilk girişin üyelik fonksiyonu değeri 0,8 ve ikinci girişin üyelik fonksiyonu değeri 0,375 olarak bulunduğu için, beşinci bulanık kuralın ağırlık katsayısı w_7 EK (0,8, 0,375) operatörü işletilerek 0,375 olarak elde edilir. Son olarak ise sekizinci bulanık kural için ilk girişin üyelik fonksiyonu değeri 0,8 ve ikinci girişin üyelik fonksiyonu değeri 0,625 olarak bulunduğu için, sekizinci bulanık kuralın ağırlık katsayısı w_8 EK (0,8, 0,625) operatörü işletilerek 0,625 olarak elde edilir. Sistemde ateşlenen tüm bulanık kuralların ağırlık katsayılarını bulmak için yapılan hesaplanmaları belirten işlemler aşağıda verilen denklem 41, 42, 43 ve 44'te gösterilmiştir.

$$\text{Kural 4 için; } w_4 = EK(0,2, 0,375) = 0,2 \quad (41)$$

$$\text{Kural 5 için; } w_5 = EK(0,2, 0,625) = 0,2 \quad (42)$$

$$\text{Kural 7 için; } w_7 = EK(0,8, 0,375) = 0,375 \quad (43)$$

$$\text{Kural 8 için; } w_8 = EK(0,8, 0,625) = 0,625 \quad (44)$$

Ele alınan sistemde TS bulanık çıkarımı yapılabilmesi ve çıkış değerlerinin sabit sayılar olması singleton (tekil) tip üyelik fonksiyonlarının yardımıyla olur. Bu çıkış değerleri sistemin bulanık kümelerinden oluşturulan çıkarımda sabit bir değer aracılığı ile düşük, orta ve büyük çıkış bulanık kümeleri için sırasıyla 33, 50 ve 99 olarak ifade edilir. Bu kısmi çıkışların değerleri ilgili bulanık kümeler için aşağıda verilen formül 45, 46 ve 47 üzerinde gösterilmiştir.

$$z_{düşük} = 33 \quad (45)$$

$$z_{orta} = 50 \quad (46)$$

$$z_{yüksek} = 99 \quad (47)$$

Kısmi çıkış olan z ifadeleri ele alındığında, dördüncü kural için ilk giriş olan kalsiyum miktarı değişkeni 9 mg/dL değeri için orta bulanık kümesinde 0,2 üyelik fonksiyonu değeri alırken, ikinci giriş olan kuvvet büyüklüğü değişkeni ise 2,5 N için düşük bulanık kümesinde 0,375 üyelik fonksiyonu değerine karşılık geldiği Şekil 19 üzerinde belirtilmiştir. Buna istinaden, ateşlenen bulanık kurallardan dördüncü, beşinci ve yedinci kural kombinasyonları için TS tip kısmi çıkış düşük bulanık kural için belirlenen değerde işletildiğinde bulanık kuralın kısmi çıkışları olan z_4 , z_7 ve z_8 değerleri 33'e karşılık gelmektedir. Ek olarak ele alınan sistemde ateşlenen beşinci bulanık kuralda ise çıkış bulanık kümesi orta kümesine mensup olduğu için z_5 değeri 50'ye eşit olacaktır. Aşağıda verilen Tablo 10'da, yukarıda teorisi anlatılan bilgilerin ateşlenen bulanık kural kombinasyonları için düzenlenmiş halleri verilmiştir.

Kural No	İlgili kural için x_1 Bulanık küme ve üyelik fonksiyonu değeri	İlgili kural için x_2 Bulanık küme ve üyelik fonksiyonu değeri	Çıkış Singleton (Tekil) tip üyelik fonksiyonu Değeri / Ait olduğu bulanık kural kümesi	Bulanık Kural Ağırlık Katsayısı
Kural 4	Orta / 0,2	Düşük / 0,375	$z_4 = 33$ / Düşük	w_4 = EK(0,2, 0,375) = 0,2
Kural 5	Orta / 0,2	Orta / 0,625	$z_5 = 50$ / Orta	w_5 = EK(0,2, 0,625) = 0,2
Kural 7	Yüksek / 0,8	Düşük / 0,375	$z_7 = 33$ / Düşük	w_7 = EK(0,8, 0,375) = 0,375
Kural 8	Yüksek / 0,8	Orta / 0,625	$z_8 = 50$ / Düşük	w_8 = EK(0,8, 0,625) = 0,625

Tablo 10. TS bulanık çıkarımında ateşlenen bulanık kurallar için ilgili değerler tablosu.

Sistem için bahsedilen kavramlara ait ateşlenen bulanık kural kombinasyonlarının oluşturacağı çıkışı elde edebilmek adına yapılacak durulama işlemi, tezin ilerleyen bölümünde detaylı olarak açıklanacaktır.

2.2.4. Durulama İşlemi

Bulanık mantık yapısı, doğası gereği kendisini besleyen giriş değişkenlerinin üyelik fonksiyonları ve bulanık kural kombinasyonları vasıtasıyla bulanık mantık sistemine dahil edildikten sonra, sistem için seçilen bulanık çıkarım mekanizmasında da bünyesinde bulunan bulanık değerler üzerinden işlem görür. Bulanık mantık sürecine başlandığında verilen girişlerin bulanıklaştırılmasından çıkarım mekanizması sonuçlanana kadar geçen tüm süreçler bulanık yapı içerisinde ilerler. Teorik olarak tasarlanan BMTK çeşitlerinin fiziksel olarak yapılacak olan uygulamalarında, çıkarım mekanizmasından elde edilen sonucun cebirsel anlam ifade eden sayılara dönüştürülmesi işlemine durulama adı verilir. Literatürde kullanılan çeşitli durulama metotları olmasına karşın, yaygın olarak ağırlık merkezi durulama yöntemi (AMDY), ağırlık ortalaması durulama yöntemi (AODY) ve maksimum değer durulama yöntemi (MDDY) yöntemleri kullanılır (Van Leekwijck ve Kerre, 1999).

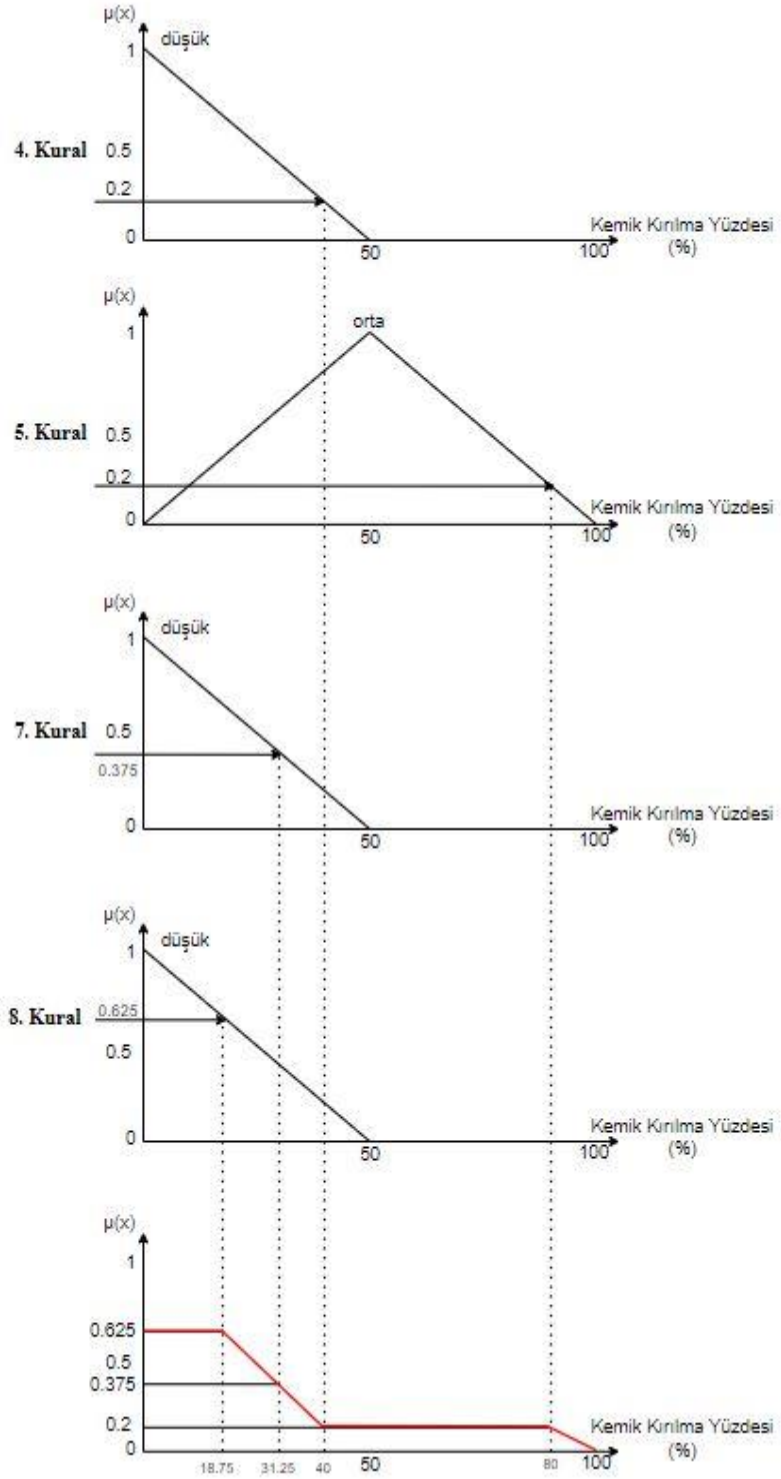
2.2.4.1. Ağırlık Merkezi Durulama Yöntemi (AMDY)

Sistem için tasarlanan bulanık kontrolör, sırasıyla bulanıklaştırma ve bulanık çıkarım işlemlerinden geçtikten sonra elde edilen değerlerin oluşturduğu alanın ağırlık merkezi hesaplanarak oluşturulan durulama yöntemine ağırlık merkezi durulama yöntemi (AMDY) adı verilir. Ağırlık merkezi durulama yönteminin hesaplanması aşağıda verilen denklem 48'deki gibi hesaplanır.

$$Z_{AMDY} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \cdot \mu(x_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(x_i)} \quad (48)$$

Durulama denkleminde belirtilen x_i değerleri çıkarım yapılan bir araya getirme işleminin çıkışı için yatay eksenindeki sayısal karşılıklarını her ateşlenen bulanık kural için belirtirken, $\mu(x_i)$ değerleri ise bu dizi için sırasıyla üyelik fonksiyonu derecelerini belirtmektedir.

Bu durulama metodunun daha iyi anlaşılması için tezin geçmiş kısımlarında Şekil 21 üzerinde yapılan çıkarımlardan yola çıkılırsa, burada ateşlenen bulanık dördüncü, beşinci, yedinci ve sekizinci kuralların oluşturduğu bir araya getirme işlemi için x_i ve $\mu(x_i)$ değerleri aşağıda verilen Şekil 24 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 24. Ateşlenen bulanık kurallar için bir araya getirme işlemi.

AMDY durulama metodunun teorik işlem hesaplamalarını gösterebilmek adına x_i ve $\mu(x_i)$ değerleri de aşağıda verilen Tablo 11'deki gibi olacaktır.

Ateşlenen Bulanık Kural Numarası	x_i Değeri	$\mu(x_i)$ Değeri
4	40	0,2
5	80	0,2
7	31,25	0,375
8	18,75	0,625

Tablo 11. AMDY metodunun işletilebilmesi için gerekli parametre değerleri.

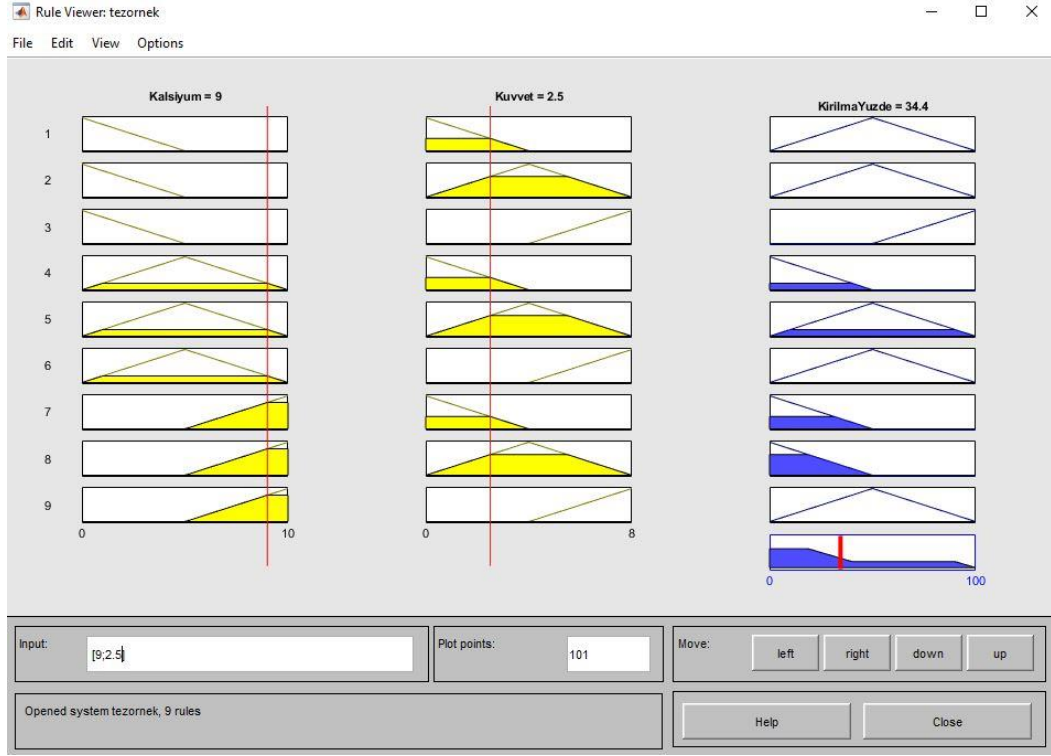
Tablo üzerinde gösterilen değerler ile denklem (48) hesaplanırsa, çıkış değerimiz aşağıda verilen denklem 49'daki sonuç verecektir.

$$z_{sonuç} = \frac{40 \times 0,2 + 80 \times 0,2 + 31,25 \times 0,375 + 18,75 \times 0,625}{0,2 + 0,2 + 0,375 + 0,625} \quad (49)$$

$$= \frac{47,44}{1,4}$$

$$= 34,40$$

Yapılan AMDY durulama işleminin tutarlılığını göstermek adına, MATLAB üzerinde girişler kalsiyum miktarı (mg/dL) ve kuvvet büyüklüğü (N), tezin geçmiş kısımlarında belirtilen üyelik fonksiyonu ve gerekli değerlere tabi kalarak Mamdani tip bulanık çıkarım ile kurulmuş, AMDY durulama metodu hesaplanarak örnekte verilen 9 mg/dL ve 2,5 N girişler için bulanık sistem işletilmiştir. Yapılan uygulamanın çıkışı aşağıda verilen Şekil 25'te gösterilmiştir ve yapılan teorik işlemle tutarlı olduğu ispatlanmıştır.



Şekil 25. MATLAB üzerinde örnek uygulama gösterimi.

Yapılan örnek uygulaması yorumlandığında sonuç olarak, girişleri sırasıyla kalsiyum miktarı 9 mg/dL ve kuvvet büyüklüğü değeri 2,5 N için, kemik kırılma yüzdesi AMDY durulama işlemi ile çıkış kemik kırılma yüzdesi %34,4 çıkış elde edilecektir.

2.2.4.2. Ağırlık Ortalaması Durulama Yöntemi (AODY)

Sistem için tasarlanan bulanık kontrolör, sırasıyla bulanıklaştırma ve bulanık çıkarım işlemlerinden geçtikten sonra elde edilen değerlerin oluşturduğu alanın ağırlık ortalaması hesaplanarak oluşturulan durulama yöntemine ağırlık ortalaması durulama yöntemi (AODY) adı verilir. Ağırlık merkezi durulama yönteminin hesaplanması aşağıda verilen formül 50'deki gibi hesaplanır. Bu formülde w_i ateşlenen bulanık kuralların derecesini, z_i ise ilgili bulanık kural için kısmi çıkış değerini ifade etmektedir.

$$z_{AODY} = \frac{\sum_{i=1}^N w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (50)$$

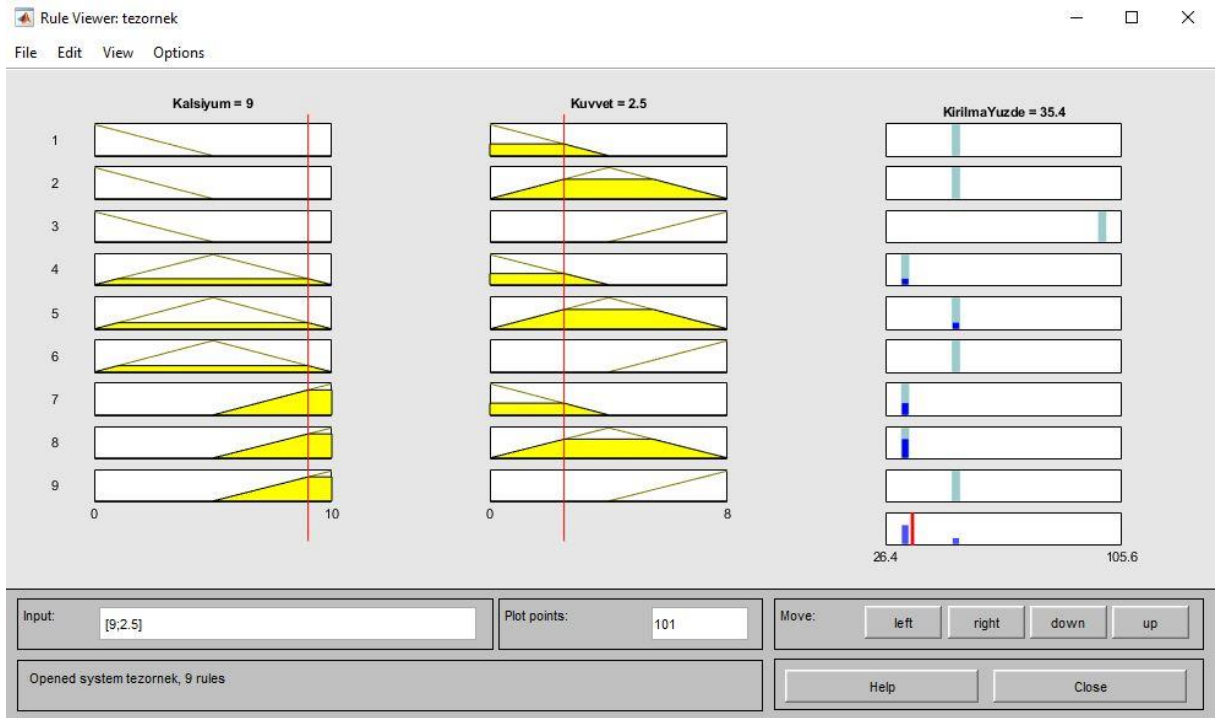
Belirtilen sonuç çıkış değeri hesaplanmasıyla ilişkili durulama formülünde, her kurala ait çıkışın, meydana gelen ateşlenme derecesinin katsayısı ile çarpılması yardımıyla elde edildiğini göstermektedir. Elde edilen tüm sonuçlar ise, tüm ateşlenen bulanık kurallar

için oluşturulan ateşlenme derecelerinin toplamına bölümü ile elde edilir. Tablo 10 üzerinde gösterilen ve TS tipi bulanık çıkarım yapılarak elde edilen bütün kısmi singleton tip çıkış değerleri ve ilgili kuralların ateşlenme dereceleri neticesinde sonuç, aşağıda verilen denklem 51'deki gibi hesaplanabilir.

$$Z_{sonuç} = \frac{0,2 \times 33 + 0,2 \times 50 + 0,375 \times 33 + 0,625 \times 33}{0,2 + 0,2 + 0,375 + 0,625} = \frac{49,6}{1,4} = 35,4 \quad (51)$$

Gerekli hesaplamaların sonrasında elde edilen bu çıkış değeri kemik kırılma yüzdesinin geçerli bulanık kurallar için bulunan değerine karşılık gelir ve kemik kırılma yüzdesinin sonucu %35,4 olarak elde edilir.

Örnek sistem ele alındığında ateşlenen bulanık kurallar için, örnekte verilen girişler 9 mg/dL kalsiyum miktarı ve 2,5 N kuvvet değeri olmak üzere, oluşturulan kural tabanı dahilinde elde edilen çıkış kırılma yüzdesinin pratik uygulama sonucu aşağıda verilen Şekil 26 üzerinde MATLAB bulanık mantık aracında uygulanarak gösterilmiştir. Teorik hesaplamalar ile uygulamada elde edilen sonuç tutarlıdır.



Şekil 26. TS Tip bulanık çıkarım için AODY ile elde edilen çıkış gösterimi.

Yapılan örnek uygulaması yorumlandığında sonuç olarak, girişleri sırasıyla kalsiyum miktarı 9 mg/dL ve kuvvet büyüklüğü değeri 2,5 N için, kemik kırılma yüzdesi AODY durulama işlemi ile çıkış kemik kırılma yüzdesi %35,4 olarak elde edilecektir.

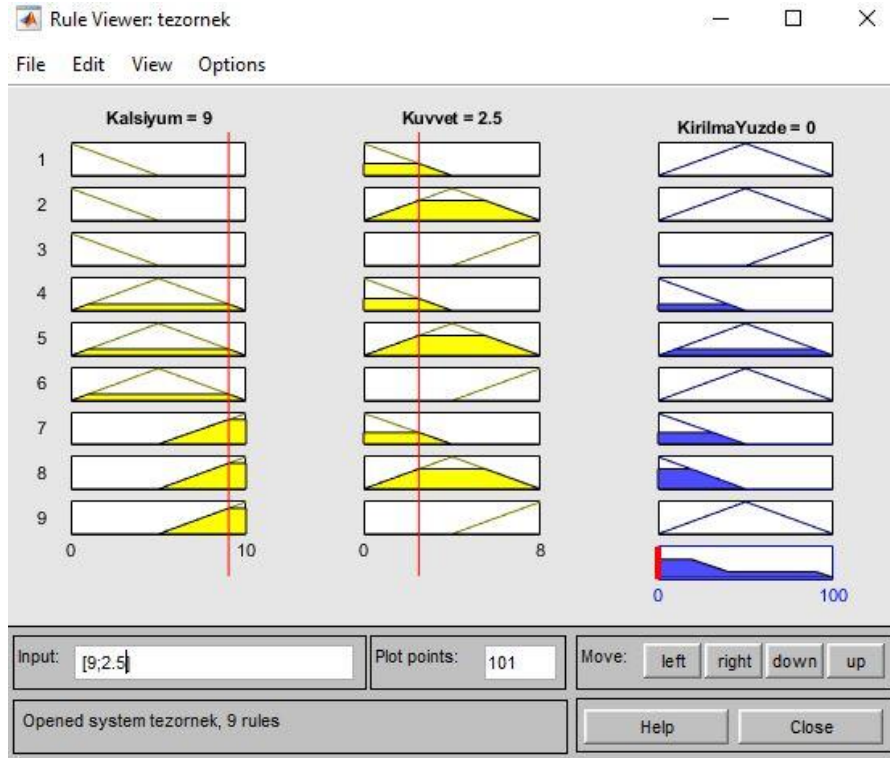
2.2.4.3. Maksimum Değer Durulama Yöntemi

Sistem için tasarlanan bulanık kontrolör, sırasıyla bulanıklaştırma ve bulanık çıkarım işlemlerinden geçtikten sonra elde edilen değerlerin oluşturduğu bir araya getirme işleminin maksimum (en büyük) değer aralığının belirlenmesi yoluyla seçilmesi yöntemine dayanarak durulanması işlemine maksimum değer durulama yöntemi (MDDY) adı verilir. MDDY durulama yöntemi kendi içerisinde üç farklı seçim gösterebilir (Morim ve diğerleri, 2017). Bu seçimler şu şekildedir;

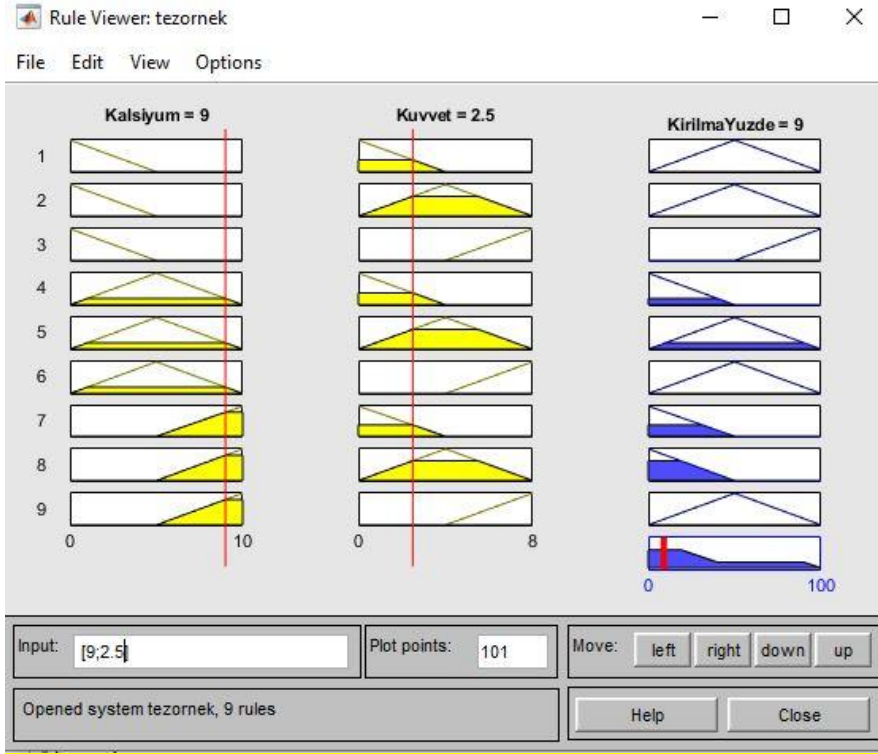
- i. Maksimum Değer Aralığının İlk Değeri: Bu yöntem, seçili en büyük değer aralığının ilk değerinin çıkış olarak seçilmesi ile oluşturulur.
- ii. Maksimum Değer Aralığının Ortalama Değeri: Bu yöntem, seçili en büyük değer aralığının ilk ve orta değerinin aritmetik ortalamasını çıkış olarak seçilmesi ile oluşturulur.
- iii. Maksimum Değer Aralığının Son Değeri: Bu yöntem, seçili en büyük değer aralığının son değerinin çıkış olarak seçilmesi ile oluşturulur.

Tez kapsamında Şekil 24 üzerinde gösterilmiş olan bir araya getirme işlemi incelendiğinde, MDDY durulama yöntemi kullanılması için en yüksek üyelik derecesi değerinin ateşlenen sekizinci bulanık kuralda bulunan 0,625 değerine ait olduğu görülmektedir. Belirtilen üyelik fonksiyonu değerinin ait olduğu sekizinci bulanık kural, kemik kırılma yüzdesinde azalan fonksiyon grafiği her 0,125 üyelik değeri için 50/8 değerinde azalma göstereceğinden dolayı, 0,625 üyelik fonksiyonu değeri için %18,75 kemik kırılma yüzdesi değerine karşılık gelir. Bu durumda en yüksek üyelik dereceli bulanık kural olduğu için bir alt üyelik fonksiyonu değerine kadar kemik kırılma yüzdesi çıkışı için 0 ile 18,75 değerleri arasında devam eder. MDDY için en yüksek üyelik fonksiyonu değeri baz alındığı için ateşlenen diğer bulanık kuralların değerleri kıstasa alınan 0,625 üyelik fonksiyonu değerinden daha büyük olmadığı için değerlendirmeye alınmaz. Ancak yukarıda detaylı hesaplanması açıklanan sekizinci bulanık kurala benzer şekilde hesaplamalar gerçekleşirse, ateşlenen dördüncü bulanık kural için 0,2 üyelik

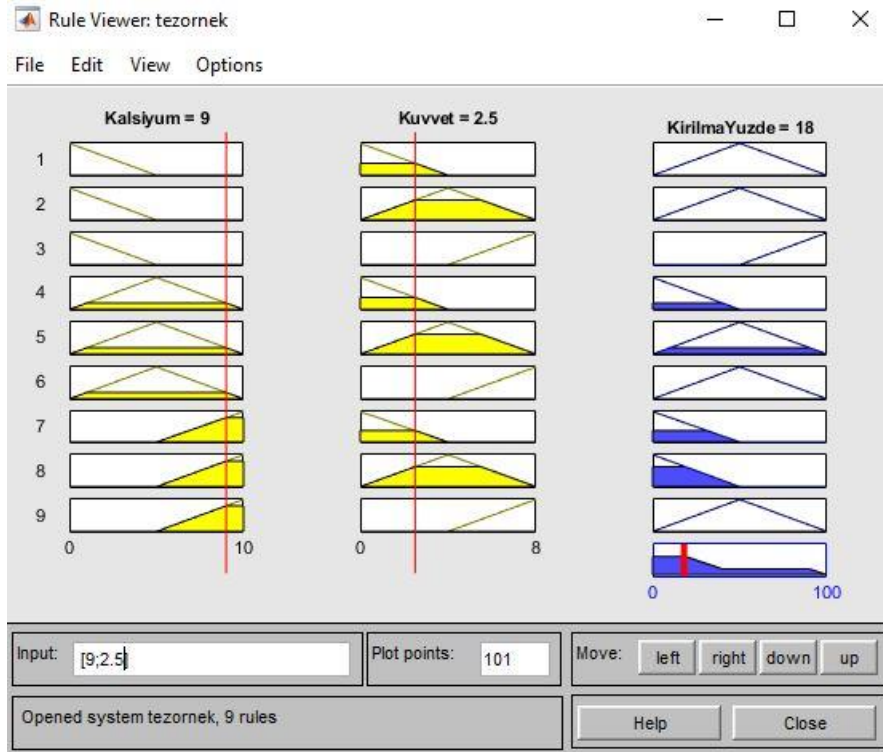
fonksiyonu değerine karşılık gelen kemik kırılma yüzdesi değeri % 40, ateşlenen beşinci bulanık kural için 0,2 üyelik fonksiyonu değerine karşılık gelen kemik kırılma yüzdesi değeri %80 ve ateşlenen yedinci bulanık kural için 0,375 üyelik fonksiyonu değerine karşılık gelen kemik kırılma yüzdesi değeri %31,25 olarak elde edilecektir. Bu belirlenen aralık için MDDY durulama yöntemi ile en yüksek üyelik fonksiyonu değerine ait seçim gerçekleştiğinde, süre gelen en büyük değer aralığı 0 ile 18,75 arasında olacağı için, maksimum değer aralığının ilk değeri 0, maksimum değer aralığının ortalama değeri yaklaşık 9 ve maksimum değer aralığının son değeri ise 18,75 olarak bulunacaktır. Bahsedilen örnek için ilk, orta ve son değere göre MDDY durulama yöntemine göre yapılan seçimler aşağıda verilen Şekil 27, 28 ve 29 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 27. Maksimum değer aralığının ilk değeri durulama işlemi.



Şekil 28. Maksimum değer aralığının orta değeri durulama işlemi.

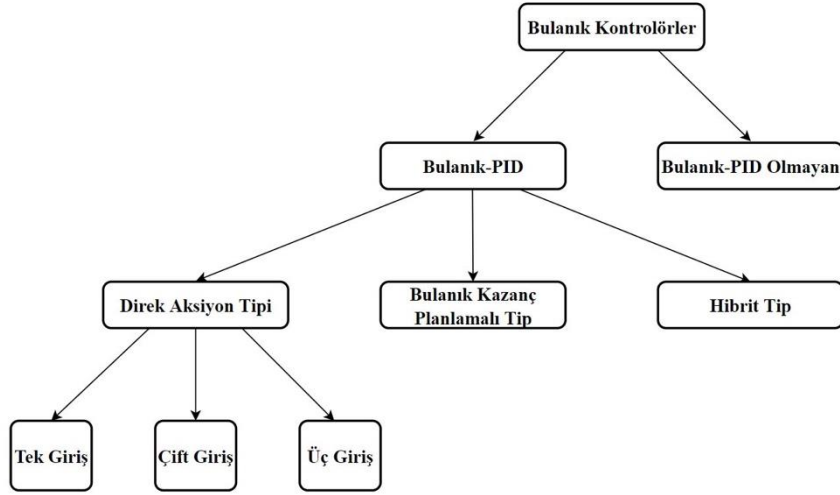


Şekil 29. Maksimum değer aralığının son değeri durulama işlemi.

3. BULANIK MANTIK TABANLI KONTROLÖRLER

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinde kontrolörler tek girişli ya da birden çok girişli olabilir. Literatürde tek girişli bulanık kontrolörler bulunmasına karşın birden çok girişli bulanık kontrolörler de barındırdığı bir takım avantajlardan dolayı yaygın olarak uygulanmaktadır (Q. Chen, Zhu ve Liu, 2021; Mohd Tumari ve diğerleri, 2019; Saleem, Shami ve Mahmood-ul-Hasan, 2019). Hata sinyali, tek giriş kontrolörlerde kabul gören en yaygın kullanımlı kontrolör girişi türü olarak kabul görünürken, bunun yanı sıra birden çok girişli olacak şekilde çift girişli bulanık tabanlı kontrolörde girişlerin, kapalı çevrim sistemde hata ve hatanın türevi olarak kabul edildiği çalışmalar da yaygın olarak bulunmaktadır (C. H. Chen, Wang, Wang ve Wang, 2017; Feng, Lv ve Cheng, 2013; Márquez-Vera ve diğerleri, 2016).

Bulanık kontrolörler genel olarak çok genel bir ifadeyi temsil etmektedir. Bu yapıdaki kontrolörler ele alındığında, klasik halinin popülerliğinden dolayı, bulanık PID kontrolörler de literatürde sıkça kendine araştırma ve uygulama alanı bulmuştur. Bu bağlamda, bulanık-PID kontrolörler kendi içerisinde direk aksiyon tipi, bulanık kazanç planlamalı tip ve hibrit tip olarak üç ana kısma ayrılabilir (Yesil, Guzelkaya ve Eksin, 2003). Direk aksiyon tipi bulanık kontrolör, çıkışı sisteme direkt olarak etki eden kontrolör çeşidi olarak tanımlanmaktadır. Diğer yandan bulanık kazanç planlamalı tip kontrolör PID katsayılarının kural tabanı ve bulanık çıkarım aracılığı ile çevrimiçi ayarlanması mantığına dayandırılan kontrolör çeşidi olarak kabul görmektedir. Son olarak hibrit tip bulanık-PID kontrolör ise, bulanık kontrolör ile PID kontrolörün, kapalı çevrim kontrol sistemi akışı içerisinde genellikle bir koşula bağlı seçici anahtar yardımıyla ile hangi kontrolörün kullanılacağına karar verme mekanizması aracılığıyla her iki yapının da uygulanan proseste kullanılabilmesine imkân tanıyan kontrolör çeşididir. Buna ek olarak da hibrit bulanık-PID tip kontrolörler tek, iki ve üç girişli olabilir ancak yapılan araştırmalarda üç girişli hibrit tip bulanık-PID kontrolör çok tercih edilmemiştir. Bunun nedeni, üç girişli hibrit bulanık-PID kontrolörün tasarım aşamasında meydana gelen kural tabanının çoklu boyutunda oluşturduğu güçlülüdür. Bulanık kontrolör türlerinin temel sınıflandırılma şeması aşağıda verilen Şekil 30 üzerinde gösterilmiştir.



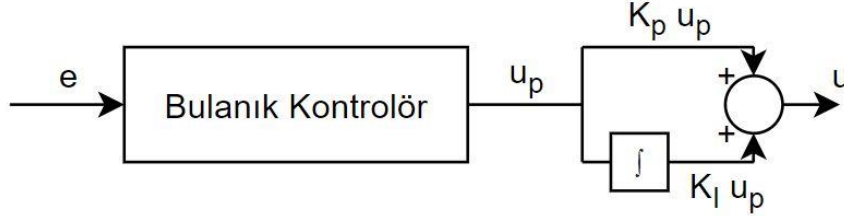
Şekil 30. Bulanık kontrolör sınıflandırma şeması. Kaynak: (Yesil ve diğerleri, 2003)

3.1. Direk Aksiyon Tipi Bulanık Kontrolörler

Bir sistemin kapalı çevrim yapısına bağlı kontrol edilebilmesi prensibi, sisteme kontrolör tarafından verilen kontrol işareti neticesinde çıkış cevabından elde edilen sonucun referans girişi ile kıyaslanarak değerlendirilme süreci olarak tanımlanabilir. Bulanık kontrolörler, bu çıkış cevabı ile referans giriş arasındaki farktan meydana gelen hata, bu hatanın türevi ya da bu hatanın integrali veya hepsinin birlikte kullanılabilirdiği kombinasyonlara bağlı olarak tasarlanabilir. Bulanık kontrolör açısından bakıldığında giriş ya da girişlerin tayini gerçekleştirildikten sonra kontrolör yapısının kendine özgü iç dinamikleri işletilerek kontrol işareti elde edilir. Direk aksiyon tipi kontrolörler kontrol işaretinin sisteme doğrudan verildiği yapıya sahip olan kontrolör türleri olarak tanımlanabilir.

Direk aksiyon tipi kontrolörlerin PID kontrolörle birlikte kullanıldığı birleşik kontrolör tipleri de kendisine yer bulmuştur. Bu tip kontrolörlerde, gerekli bulanık giriş bileşenlerine karar verildikten sonra bulanık kontrolör mekanizması kendi iç dinamiklerinde ilerletilen çeşitli işlemlere tabi kılınır. Bu durumdan sonra bulanık kontrolörden alınan ilk kontrol işareti, PID kontrolörün getirisi olan oransal integral ve türevsel operatörlerden geçirilerek tüm bu kısımların toplanması vasıtasıyla nihai kontrol işareti olan PID kontrolör çıkışı meydana getirilebilir.

Hu, Mann ve Gosine, bir çalışmada hata sinyalinin tek kontrolör girişi olarak kabul eden, tek girişli, PI yapıda bir kontrolör tasarlamıştır. Kontrolör yapısı aşağıda verilen Şekil 31'deki gibidir.



Şekil 31. Tek girişli PI kontrolör yapısı

Bu tasarlanan kontrolörün en büyük avantajı kolay tasarlanabilir olması ve bulanık kontrolörün kural tabanında yalnızca üç kural içermesidir. Çalışmada bulanık kontrol yapısında sadece dört parametre kullanılmıştır. Çalışma sonucunda tasarlanan kontrolör, geleneksel tasarım yöntemleri ile elde edilen PI kontrolör ile birinci mertebeli sistem üzerinde uygulanarak belirlenen performans kriterlerine göre kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslama neticesinde önerilen bulanık kontrolör geleneksel PI kontrolöre göre istenilen kriterlerde daha iyi performans göstermiştir (Hu, Mann ve Gosine, 1997).

Yapılan bir başka çalışmada ise, Kwok, Tam, Li ve Wang geleneksel PID kontrolörlerin bulanık mantık yapısı ile birleştirilerek 6 farklı varyasyonda kontrolör yapısı oluşturularak birinci derece kapalı çevrim bir ısıtma süreci sistemine uygulamışlardır. Farklı türlerde tasarlanan bu bulanık kontrolör yapılarının girişleri sistem hatası ve hatanın türevi olacak şekilde çift giriş olarak kabul edilmiştir. Bunun neticesinde bulanık PID tasarımlarının, geleneksel PID kontrolöre göre kapalı çevrim birinci derece sistem için daha kısa yerleşme zamanı ve daha çok tasarım esnekliği sağladığını raporlamışlardır. Bu türlerin içerisinde performans artışı gösteren ilk yapı bulanık PD ile bulanık PI kontrolör yapılarının birleşimi şeklinde tasarlanmıştır ve kontrolör yapısı aşağıda verilen Şekil 32 üzerinde gösterilmiştir.



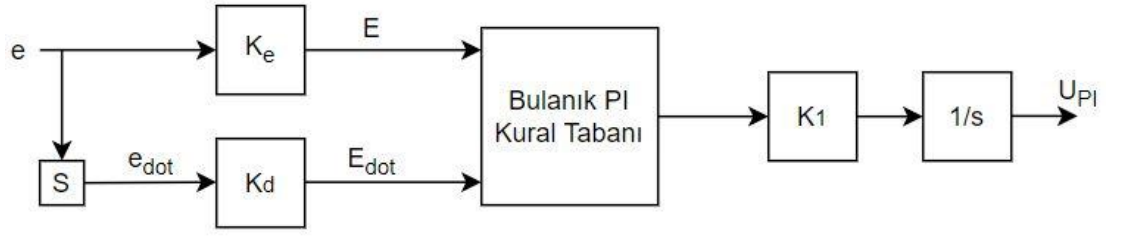
Şekil 32. Bulanık PD+PI kontrolör tipi blok diyagramı.

Aynı çalışmada bulunan bir diğer bulanık PID varyasyonu ise, yukarıdaki kontrolöre benzer şekilde sistemin hata ve hata türevini giriş olarak kabul eden çift girişli PD+I bulanık kontrolör türüdür. Bu bulanık kontrolör tipinde ise bulanık PD kontrolöre ek olarak hata üzerinden tek hata girişine sahip bulanık I tip kontrolör eklenerek elde edilmiştir. Bu kontrolör yapısı aşağıda verilen Şekil 33 üzerinde gösterilmiştir (Kwok, Tam, Li ve Wang, 1991).



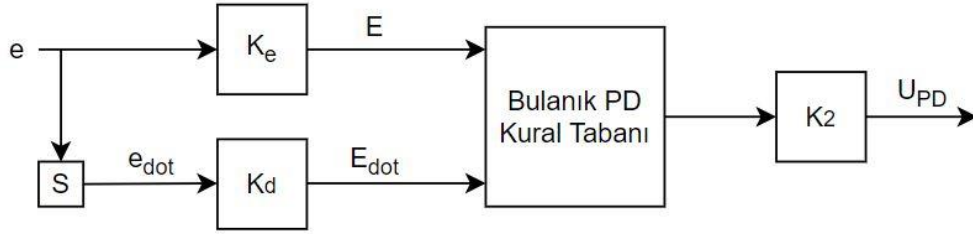
Şekil 33. Bulanık PD+I kontrolör tipi blok diyagramı.

Bir çalışmada, Li ve Gatland sistemdeki hata ve hatanın türevini çift giriş kabul ederek iki kademeli bulanık PID kontrolör tasarlamışlardır. Bu kontrolör tipini iki kademeli olarak adlandırılmasının sebebi, hata ve hatanın türevi girişlerinin kendilerine özgü katsayılarından geçerek bulanık kontrolör tasarlanmasıdır. İlk aşamada girişlerden beslenerek aşağıda Şekil 34 üzerinde gösterilen bulanık PI kontrolör tasarlanmıştır.



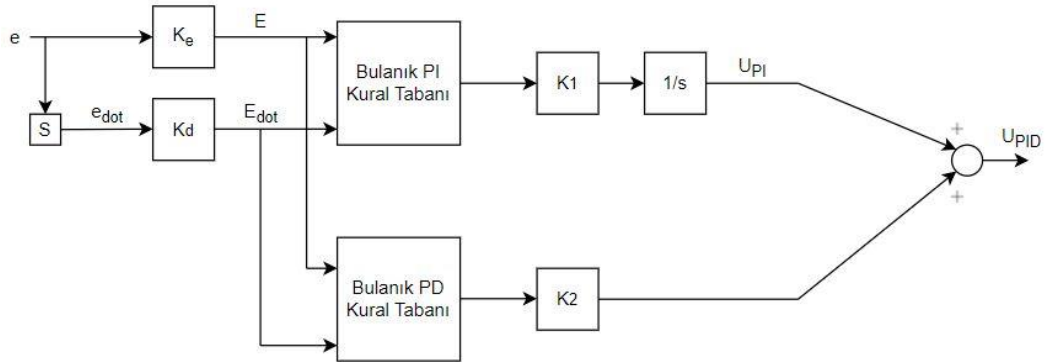
Şekil 34. İki kademeli bulanık PI kontrolör blok diyagramı.

İki kademeli bulanık PID kontrolörün tasarımının tamamlanması için yukarıda bahsedilen bulanık PI kontrolöre ek olarak bir de iki kademeli bulanık PD kontrolör Şekil 35 üzerinde gösterildiği üzere tasarlanmıştır.



Şekil 35. İki kademeli Bulanık PD kontrolör blok diyagramı.

Bahsi geçen çalışmada bulanık PID tasarımın gerçekleştirilebilmesi için son olarak Şekil 34 ve Şekil 35'te gösterilen bulanık PI ve PD kontrolör tipleri birleştirilmiş ve tasarım tamamlanmıştır. Bulanık PID yapısının blok diyagramı aşağıda verilen Şekil 36 üzerinde gösterilmiştir.

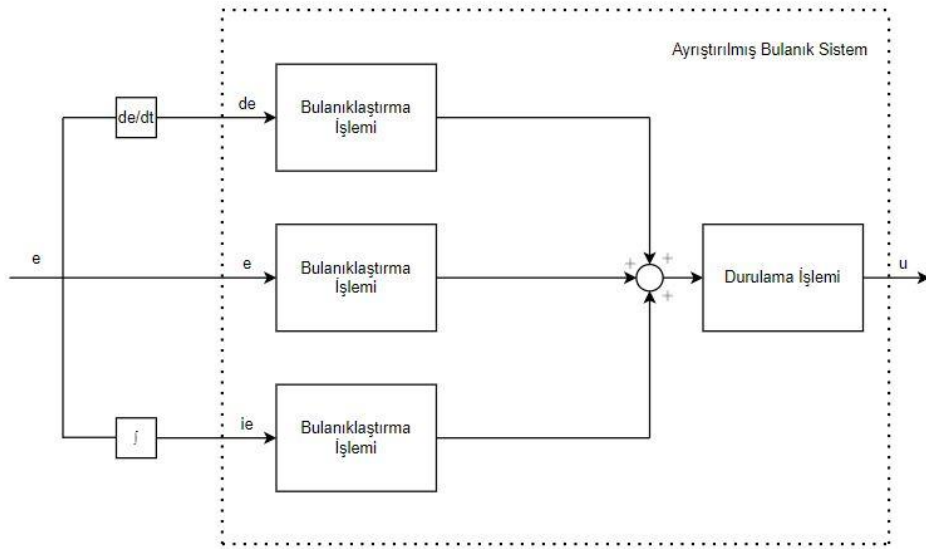


Şekil 36. İki kademeli Bulanık PID kontrolör blok diyagramı.

Bu tasarlanan bulanık PID kontrolör üçüncü derece kapalı çevrim kontrol sistemine uygulanmıştır. Tasarımın neticesinde kıstasa alınan performans kriterleri sırasıyla mutlak hata integrali (IAE) ve mutlak hata zaman integrali (ITAE) olarak baz alınmış ve

geleneksel kontrolöre göre daha iyi performans gösterdiği gözlenmiştir (Li ve Gatland, 1996).

Bir çalışmada Golob M. ayrıştırılmış bulanık PID kontrolör yapısı önermiş ve kapalı çevrim kontrol sistemine uygulamıştır. Bahsi geçen ayrıştırılmış bulanık kontrolör, hata, hatanın türevi ve hatanın integrali olmak üzere üç giriş kullanılarak tasarlanmıştır. Bu bulanık PID kontrolörü muadillerinden ayıran nokta, her özgün girişin bulanıklaştırılmasında kendilerine özgü kural tabanı ve bulanık kuralların tasarlanması olmuştur. Ayrıştırılmış bulanık PID kontrolör yapısı aşağıda verilen Şekil 37’de gösterilmiştir.

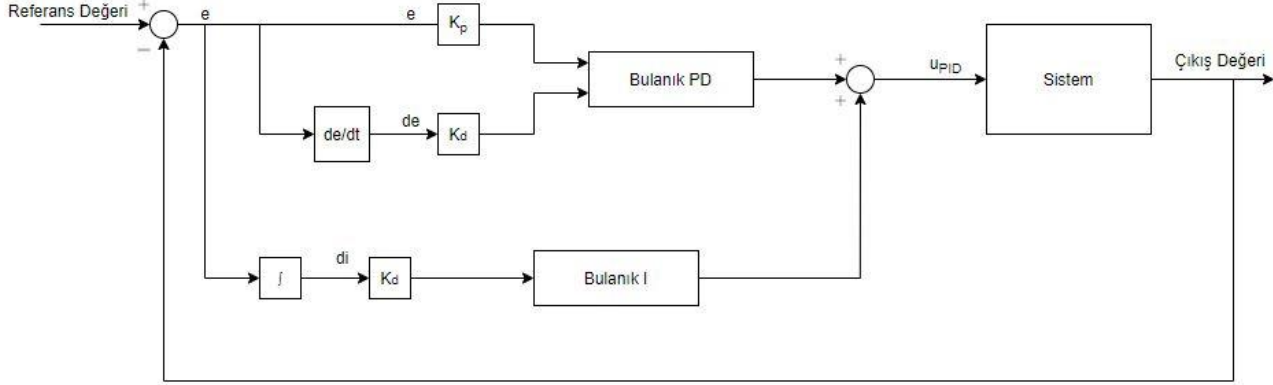


Şekil 37. Ayrıştırılmış bulanık PID kontrolör blok diyagramı.

Tasarlanan bu kontrolör bir basit elektromanyetik süspansiyon sistemine uygulanmıştır. Tasarlanan bulanık kontrolör tipinin ayrıştırılmış bulanık kuralının bulunması sebebiyle, işlem hesap kabiliyetinde hız artışı ve kontrol edilecek sistem ile bulanık kontrolör arasında direkt bağlantı bulunmasından dolayı da kolay bağlantı kurulabilme avantajları raporlanmıştır (Golob, 2001).

Bir çalışmada Malki A.H, Misir D., Feigen span D. ve Chen G. bulanık PD+I varyasyonunda bir bulanık PID kontrolör tasarlamış ve esnek eklemlı robot kol mekanizması hareketini gözlemek için bir direk-akım (DA) motor vasıtasıyla kapalı çevrim kontrol sistemi üzerinde uygulamışlardır. Kullanılan robot kol mekanizmasında deneysel karmaşıklığı basite indirgemek için damper sistemden çıkarılmıştır. Uygulanan

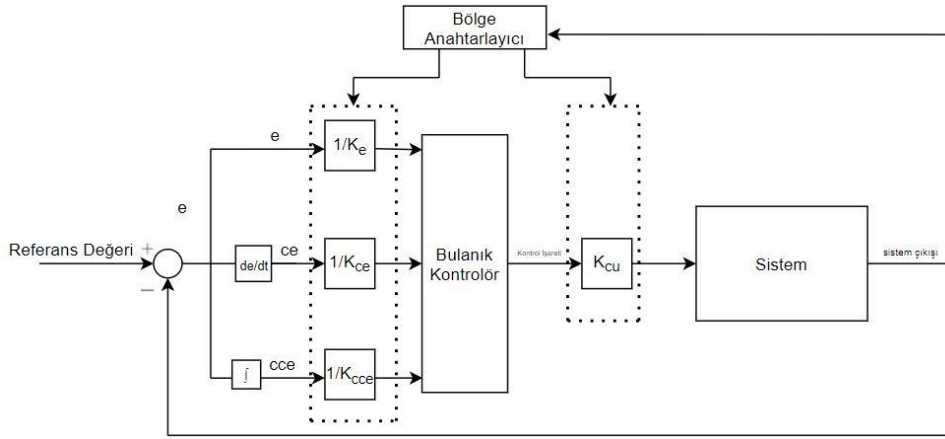
bu bulanık PID kontrolör, geleneksel metotlarla elde edilen kendi eşdeğeri olan kontrolör ile aynı koşullar altında sistem üzerinde farklı yükler üzerinde kıyaslanmıştır. Tasarlanan bulanık PD+I kontrolör aşağıda verilen Şekil 38 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 38. Bulanık PD+I kontrolör blok diyagramı.

Tasarlanan PD+I bulanık kontrolörde hem PD hem I bileşenlerinin her giriş için (PD kısmı 2 giriş, I kısmı tek giriş) 2 adet üçgen tip üyelik fonksiyonuna sahip olurken, çıkışları 3 adet üçgen tip üyelik fonksiyonuna sahiptir. Giriş ve çıkış ifadelerinde bulunan bu kural adeti azlığı, kontrolör tasarımındaki bulanık kural kombinasyonunu kolaylaştırmıştır. Uygulanan robot kol sisteminin çıkışında baz alınan performans kriterleri değerlendirildiğinde, önerilen bulanık PD+I kontrolörün, geleneksel kontrolöre nazaran daha stabil bir çıkış cevabı ve yüzdelerik aşım sergilediği raporlanmıştır (Malki, Misir, Feigenpan ve Chen, 1997).

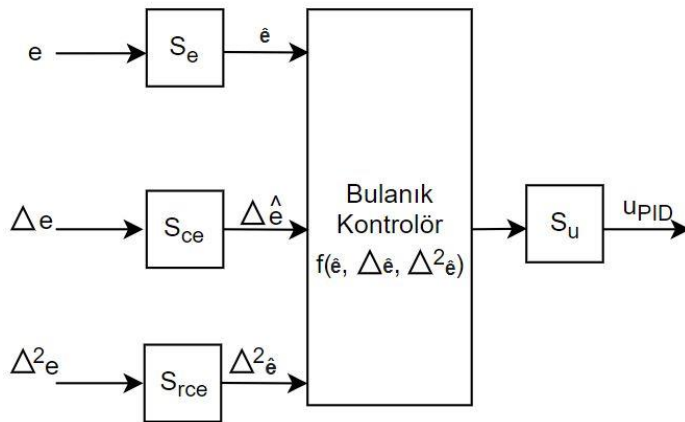
Bir çalışmada Wong C.C. ve Feng S.M. sistemin çıkışından elde edilen cevaplara göre anahtarlamaya sahip direk aksiyon tipi bir bulanık kontrolör tasarlamışlardır. Buradaki anahtarlamamanın amacı, hem çıkış cevabından elde edilen değere göre bölgeleri bulanık olarak tanımlamak, hem de tanımlı bölge içerisinde kontrol aksiyonunu BMTK ile gerçekleştirmek olmuştur. Bu kontrolör tipinde bulanık kontrolörde hata, hata türevi ve hata integrali olmak üzere üç adet giriş verilmiştir. Tasarlanan bulanık kontrolörün blok diyagramı aşağıda Şekil 39 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 39. Bulanık anahtarlamalı BMTK blok diyagramı.

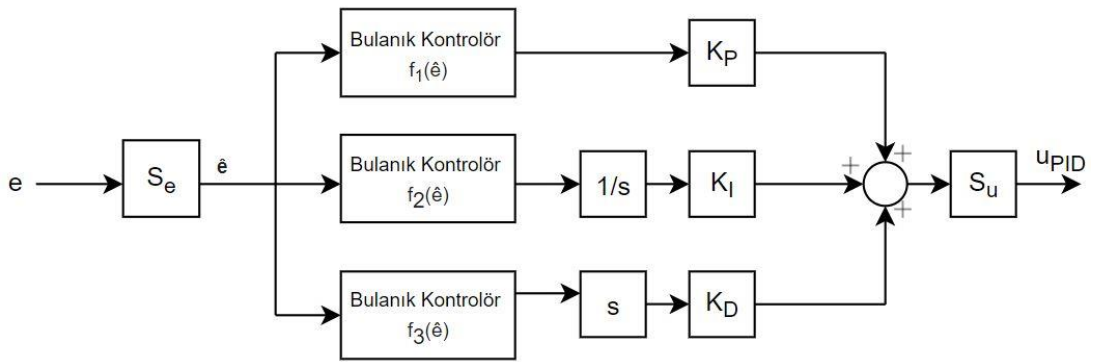
Tasarlanan bu anahtarlamaya sahip BMTK üçüncü derece sistem üzerinde test edilmiştir. Yapılan testler sonucunda sisteme ait yüzdelerik aşım, yükselme zamanı ve kalıcı durum hatasında iyileştirme gözlemlendiği raporlanmıştır (Ching-Chang Wong ve Shyuan-Ming Feng, 2002).

Bir çalışmada, Mann G. K. I, Hu B. G. ve Gosine R. G. çift kademe ayarlamalı bulanık PID kontrolör önermişlerdir. Bu kontrolörün başlıca amacı, ilk kademe olan düşük seviye ayarlamasını takip eden ikinci kademe yüksek seviye ayarlaması yaparak, kapalı çevrim kontrol sistemi için direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolör tasarlamaktır. Bu bulanık kontrolör tipinde hata, hata türevi ve hata integrali olmak üzere üç girişe sahip bir kontrolör yapısı mevcuttur. Birinci kademe için öncelikle alınan girişler için bir BMTK tasarımı yapılmıştır. İlk kademe için oluşturulan kontrolörün blok diyagramı aşağıda verilen Şekil 40 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 40. Çift kademe BMTK kontrolör ilk seviye blok diyagramı.

Burada görüldüğü üzere tüm girişler, eş bulanık kural kombinasyonunda tek bir BMTK içerisinde bulunmaktadır. Ele alınan metotta bulunan ikinci kademe olan yüksek seviye tasarım ise, hata girişinin tüm diğer tüm girişlere evriminden önce bulanıklaştırılarak, girişlerin kendine özgü bulanık kontrolörlerinin tasarlanıp, bulanık kural kombinasyonlarının bağımsız halde oluşturularak meydana getirilmesiyle sisteme direk olarak uygulanması ile meydana getirilir. Yüksek seviye tasarım için oluşturulan kontrolörün blok diyagramı aşağıda Şekil 41 üzerinde gösterilmiştir.



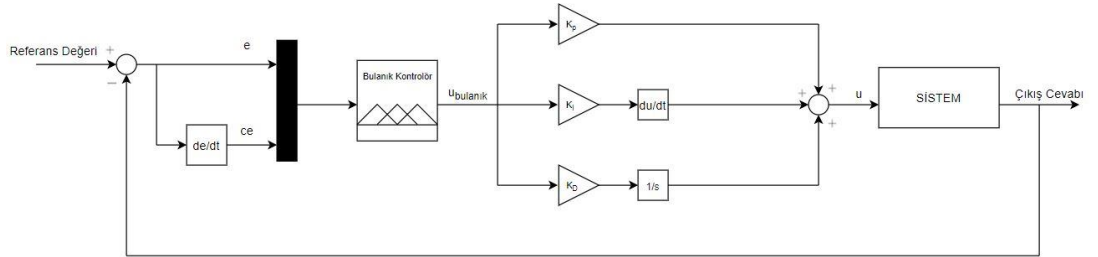
Şekil 41. Çift kademe BMTK kontrolör ikinci seviye blok diyagramı.

Tasarlanan bu iki kademeli BMTK hem ikinci derece hem de üçüncü derece sistem üzerinde test edilmiştir. Yapılan testlerin neticesinde geleneksel PID metotlarına göre tasarlanan kontrolörler ile önerilen BMTK yapısı kıyaslandığında zayıf modellemekten kaynaklanan belirsizliklerin BMTK ile telafi edilebilmesi ve etkin şekilde kullanılabilmesi, doğrusal olmayan sistemlerde daha kolay ayar yapabilme kabiliyeti oluşturması ve istenen geleneksel PID konfigürasyonları için genişletilebilmesi avantajları raporlanmıştır (Mann, Hu ve Gosine, 2001).

Bir çalışmada, Carjaval J., Chen G. ve Ogmen H. bulanık PID tasarımını geleneksel PID tasarım metodu ile kıyaslamışlardır. Bu kıyaslamaları yapmalarındaki ana amaç, yüksek dereceden sistemlerin sınırlı giriş sınırlı çıkış (SGSÇ) anlamında kararlılığını incelemek olmuştur. Bu çalışma kapsamında bulanık PID kapalı çevrim sistemden elde edilen hata, hata türevi ve hata integrali olmak üzere üç giriş barındırmıştır. Ele alınan bulanık PID kontrolörde girişlerin bulanıklaştırılmasında üçgen ve trapezoidal tip üyelik fonksiyonları tasarımda esas alınmıştır. Tasarlanan bulanık PID, geleneksel PID kontrolör ile üçüncü derece kapalı çevrim sistem üzerinde test edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde özellikle

doğrusal olmayan sistemlerde, sistemin iç dinamiklerinde öngörülemeyen çeşitli durumlardan dolayı SGSÇ altında birçok geleneksel PID kontrolörün kararsızlık gösterdiği sonuçlarda, bulanık PID kontrolörün sistemi kararlı kıldığı raporlanmıştır. Uygulamalı sektörlerde var olan doğrusal olmayan sistemlerdeki iç dinamik etkilerinin meydana getirdiği faktörlerde bulanık PID kontrolörün bu etkileri göz ardı edebilme yeteneği önemli bir kazanç olarak belirtilmiştir (Carvajal, Chen ve Ogmen, 2000).

Bir çalışmada, Pappachen A. ve Fathima A.P. direkt aksiyon tipi bulanık PID kontrolör tasarlamış ve altı alanlı kapasitif enerji depolama sisteminde uygulamışlardır. Bu çalışmada tasarlanan bulanık-PID kontrolör çeşidi sıralı direkt aksiyon tip kontrolör olarak işlem görmüştür. Tasarlanan kontrolör yapısında, ilk olarak girişleri kapalı çevrim sistemin hata ve hata türevinden beslenen iki girişli bulanık kontrolör tasarlanır. İkinci aşamada ise, tasarlanan bulanık kontrolörün çıkışının PID kontrolörün ilgili katsayılarına dağıtımını ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan kontrolör yapısı ve kapalı çevrim kontrol diyagramı aşağıda verilen Şekil 42 üzerinde gösterilmiştir.

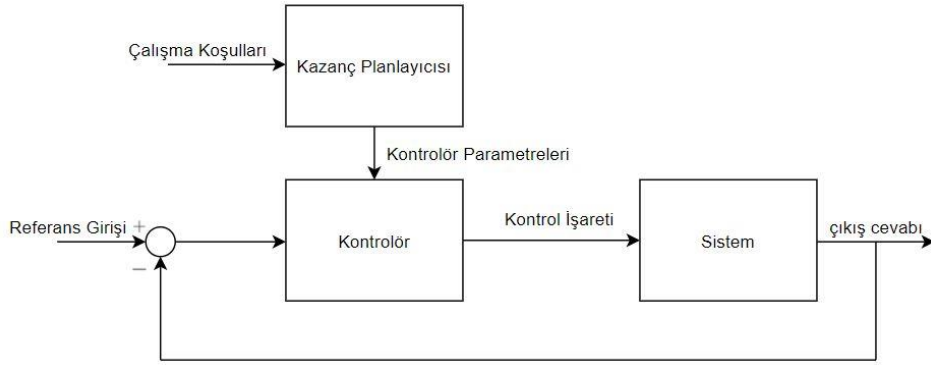


Şekil 42. Sıralı Bulanık-PID tip kontrolör kapalı çevrim kontrol diyagramı.

Bu çalışmada, bulanık kontrolörün tasarımında hem girişleri hem de çıkışı için beşer adet üçgen tip üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Sistemde istenen performans kriterinin elde edilmesinde iyileştirmeye gidilebilmesi için de bakteriyel toplayıcı optimizasyon (BTO) algoritması kullanılmıştır. Yapılan çalışma, geleneksel PID kontrolör ve geleneksel bulanık kontrolör ile kıyaslanmış ve BTO algoritması ile optimize edilen bulanık-PID kontrolörün diğer tasarlanan geleneksel tiplere göre daha iyi performans gösterdiği raporlanmıştır (Pappachen ve Peer Fathima, 2015).

3.2. Bulanık Kazanç Planlamalı Tip (BKPT) Kontrolörler

Bulanık kazanç planlamalı tip (BKPT) kontrolör, iç dinamiklerinin bulunduğu çalışma koşullarına göre değişen sistemler için kontrol uygulaması yapmanın etkili yollarından birisidir. Ayrıca genellikle, doğrusal zamanla değişmeyen ve tek bir modelin yetersiz olduğu sistemlerin kontrol uygulamalarında kullanılır. Geleneksel kazanç planlamalı tip kontrolörün kapalı çevrim kontrol sistemi için blok diyagramı aşağıda Şekil 43 üzerinde verilmiştir.



Şekil 43. Geleneksel kazanç planlamalı tip kontrolör kapalı çevrim blok diyagramı

Geleneksel yaklaşımda çalışma koşulları sisteme açık çevrim olacak şekilde entegre edilir. Bu tip kontrolörde temel alınan esas amaç, sistem dinamiklerinde girişe bağlı olarak edinilmesi gereken kontrol işaretlerinin çok hızlı bir şekilde değiştirilebilmesidir. Ek olarak gerçek sistemlere uygulanabilirliğinin göreceli olarak daha kolay olması Tan S., Hang C.C. ve Chai J. S. tarafından literatüre kazandırılmıştır (Tan, Hang ve Chai, 1997). Literatürde geleneksel kazanç planlamalı tip (GKPT) kontrolörlerde yaşanan bazı endüstriyel uygulamalara yönelik problemlerden dolayı bulanık kazanç planlamalı tip (BKPT) kontrolör ihtiyacı öne çıkmıştır (Ling ve Edgar, 1992). Spesifik olarak ele alınırsa BKPT kontrolör çeşitlerinde bulunan bulanık kuralların, uzman bilgisine dayanan dilsel verilere sahip olması ve çıkarım mekanizması yapılırken dilsel ifadelerle yer verilmesi ile kontrolör tasarımı gerçekleştirilir. Bu durum göreceli olarak endüstriyel uygulamalarda elde edilmesi zor ve hatta imkânsız durumlar arz ettiğinde, uzman bilgisi ve operatör deneyimi sistem hakkındaki en kritik bilgilerden birisi olarak kabul edildiği için BKPT kontrolör tasarımları, GKPT kontrolör çeşitlerine göre daha değerli hale gelmiştir. Temel mantık açısından bakıldığında BKPT kontrolör tasarımı GKPT kontrolör ile aynı şekilde uygulanır. Bahsi geçen iki kontrolör çeşidi arasındaki en temel farklardan

bir tanesi GKPT kontrolör uygulamalarında kazanç planlama şeması kesin sayısal aralıklarla belirlenirken, bulanık uygulamalarında tasarlanan BKPT kontrolörün kazanç planlama şeması bulanık kümeler ve bulanık kurallar aracılığı ile kurulur. Bu durumdan dolayı bulanık kümelerin ve dilsel ifade geçişlerinin yardımıyla kurulan kontrolör sisteminin, geleneksel metoda göre daha yumuşak geçişlere sahip olması daha olasıdır. Sistemin kontrolünün yapılması adına tasarlanan kontrolörler açısından bakıldığında hem GKPT kontrolör için hem de BKPT kontrolör için her iki durumda da gerekli parametre ayarlarının yapılması modele bağlı olduğu için, geleneksele nazaran bulanık yapı bu durumda bulunan karmaşıklık sorunlarını önler. Bu sorunu önlemedeki başlıca sebep ise geleneksel metotlarda kullanılan matematiksel model karmaşıklığından ziyade dilsel ifade ve bulanık kuralların kombinasyonları ile uzman bilgisine dayanmasıdır (Lee, 1990a, 1990b). Temel olarak bir GKPT kontrolörün tasarımında özet olarak aşağıda belirtilen beş temel aşama vardır:

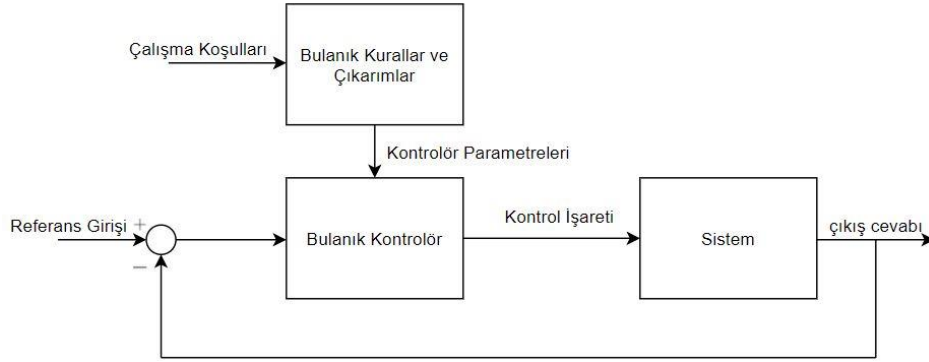
- i. İlk olarak planlanması hedef alınan ve sistem dinamikleri ile iyi bir şekilde ilişkilendirilen değişkenler tanımlanır.
- ii. Daha sonra planlama yapmak adına sistem dinamiklerine dayalı olarak çalışma koşulları belirlenir.
- iii. Daha sonra doğrusal zamanla değişmeyen model oluşturulur.
- iv. Daha sonra oluşturulan model için doğrusal bir kompensatör (dengeleyici) tasarımı yapılır.
- v. Son olarak ise, kazanç planlama şeması oluşturulur.

BKPT kontrolörlerin yukarıda geleneksel metot için tanımlanan beş basamaklı özet tasarım prosedüründen en temel farkı, son aşamada gerçekleştirilen kazanç planlama şemasında bulanık kuralların ve bulanık çıkarımların kullanılmasıdır (Rugh, 1991).

Bir çalışmada, Ling C. Ve Edgar T. F. model tabanlı bir BKPT kontrolör tasarımı önermişlerdir. Yapılan bu BKPT kontrolör tasarımı hem deneysel laboratuvar ortamında bir su-gaz geçiş reaktörüne uygulanmış hem de simülasyon ortamında ele alınan diğer kontrolör tipleri ile performans kıyaslamaları yapılmıştır. Elde edilen sonuçlarda görülen en önemli bulguların başında, kıyaslanan diğer kontrolörler çalışma koşullarının yalnızca belirli kısıtlı aralıklarında iyi sonuçlar gösterirken, BKPT kontrolörün arzu edilen çalışma

koşullarının tamamı üzerinde güzel sonuçlar veren bir kontrol davranışı sergilediği raporlanmıştır (Ling ve Edgar, 1997).

Bir çalışmada, Chang C. S. ve Weihui Fu düşük frekans kontrolü problemini incelemek üzere bir BKPT kontrolör tasarımı önermişlerdir. Bu kontrolör birbirine bağlı dört bölgeye güç sistemi için tasarlanmıştır. Burada önerilen BKPT kontrolör çeşidinin iki girişi bulunmaktadır ve bu girişler alan kontrol hatası ve alan kontrol hatasının türevi olarak alınmıştır. Elde edilen sonuçlar içerisinde de tasarlanan kontrolörün sabit durum hatasını sıfır için garanti ettiği raporlanmıştır. Tasarlanan BKPT kontrolörün kapalı çevrim kontrol sistemi diyagramı aşağıda verilen Şekil 44 üzerinde gösterilmiştir.

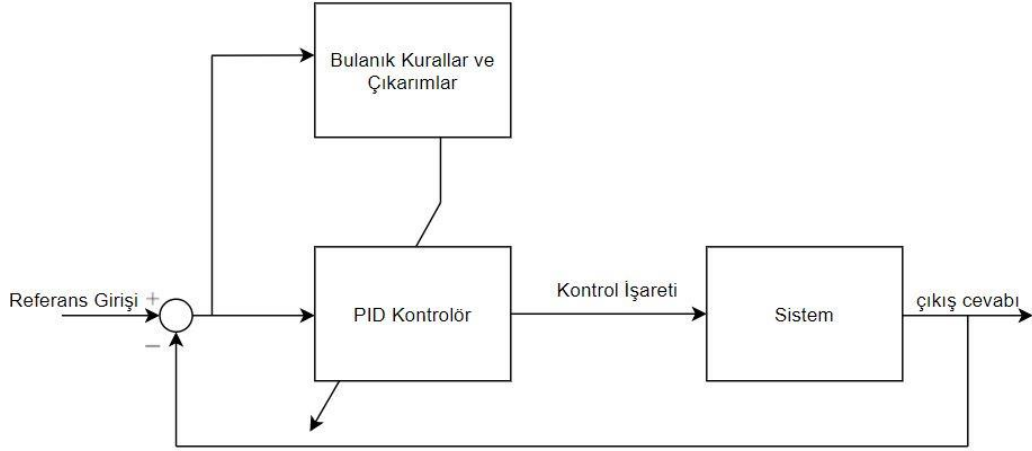


Şekil 44. BKPT kontrolör kapalı çevrim kontrol sistemi diyagramı.

Tasarlanan bulanık kontrolörde her iki giriş de üçgen tip üyelik fonksiyonları biçiminde yedişer bulanık küme olarak tanımlanmıştır. Sistem çıkışları ise ilgili kontrol katsayıları için Sigmoidal tip üyelik fonksiyonları biçiminde küçük ve büyük olmak üzere ikişer bulanık küme olarak tanımlanmıştır. Yapılan testler neticesinde, önerilen kontrolör yapısının geleneksel kontrolör yapılarından tüm çalışma koşulları için daha iyi bir kontrol performansı sergilediği belirtilmiştir. Ek olarak tasarlanan bu kontrolörün yapılabilecek uygulamalara etkili ve basit bir şekilde entegre edilebileceği de belirtilmiştir (Chang ve Fu, 1997).

Bir çalışmada, Zhao Z. Y., Tomizuka M. ve Isaka S. tarafından PID kontrolörün kazanç çizelgeleme şeması bulanık mantık eklenerek geliştirilmiştir. Bu tasarımda bulanık kurallar ve muhakeme, girişleri kapalı çevrim kontrol sisteminin hata ve hata türevine dayandırılan iki girişli bulanık sistem olarak meydana getirilmiştir. Bu durumun başlıca amacı kontrolör parametrelerini belirlemek için çevrimiçi kullanımı sağlamaktır.

Tasarlanan kontrolörün kapalı çevrim kontrol blok diyagramı aşağıda Şekil 45 üzerinde verilmiştir.



Şekil 45. BKPT PID kontrolör kapalı çevrim kontrol sistemi diyagramı.

Yapılan çalışmada kontrolör parametrelerini çevrimiçi ayarlayabilmek adına, sistem hatası ve hatanın türevi katsayıları üçgen tip üyelik fonksiyonları ile yedişer bulanık kümeye bölünmüşlerdir. Kontrolör katsayılarını ayarlamak için elde edilecek çıkış katsayıları ise Sigmoidal tip üyelik fonksiyonları ile ikişer bulanık kümeye bölünmüşlerdir. Çalışma sonucunda tasarlanan kontrolör tipi, geleneksel PID kontrolör metotları arasında yaygın bilinen Ziegler-Nichols ve Kitamori tasarım metotları ile kıyaslanmış ve önerilen kontrolörün daha iyi performans sergilediği raporlanmıştır (Zhao, Tomizuka ve Isaka, 1993).

Bir çalışmada, Blanchett T. P., Kember G. C. ve Dubay R. geleneksel PID kontrolöre alternatif olarak bir BKPT kontrolör geliştirmişlerdir. Tasarlanan bu kontrolörde PID kazanç planlaması bulanık bir şekilde yapılmıştır. Yapılan bu bulanık tasarımın başlıca avantajı, tasarlanan PID kontrolörde elde edilen performansı sağlayan katsayıların çevrimiçi olarak iyileştirilmesine olanak sağlamaktır. Bu sayede tasarlanan PID kontrolörde bulunan katsayılar korunarak, matematiksel karmaşıklık içerisinde yalnızca iki adet bağımsız değişken ayarlaması sayesinde değişken test koşullarına kolaylıkla adaptasyonu sağlanmıştır. Ek olarak, bu tasarlanan kontrolör yapısının endüstriyel birinci derece ısı süreç sistemi üzerinde uygulaması yapılmıştır. Tasarlanan kontrolörün getirdiği bulanık mantık dilsel ifade avantajı sayesinde de yapılan uygulamada bulanık mantığa aşina olmayan kullanıcının bile rahatlıkla kullanabileceği raporlanmıştır.

Yapılan uygulamanın neticesinde model tahmin kontrolörü ile önerilen PID katsayıları önerilen kontrolör yapısı ile geliştirilmiş ve karmaşık koşullar altında önerilen kontrolörün endüstriyel uygulamalarda daha kolay adapte edilebilir ve daha iyi performans gösterdiğini raporlanmıştır (Blanchett, Kember ve Dubay, 2000).

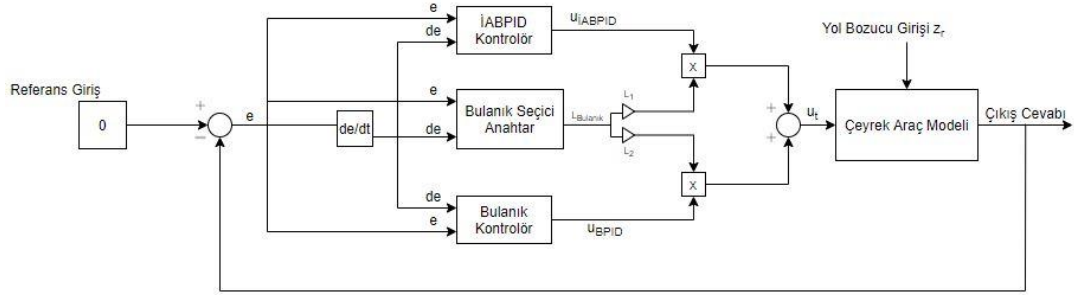
3.3. Hibrit Tip Bulanık (HTB) Kontrolörler

Kontrol alanında yapılan çalışmalarda farklı biçimlerde ele alınan ve gerek teoride gerek uygulamada çalışmaları bulunan temel kontrolör türleri için erişilebilen bilgiler, tek başlarına katma değer sağlayan bilgiler açısından ele alındığında doygunluğa ulaştığı söylenebilir. Yani geleneksel metotlar olarak kabul edilen tasarımı yapılan kontrol yöntemlerinde erişilen bilgiler günümüzde gayet iyi durumdadır denilebilir. Kontrolörler açısından oluşan bu bilgi doygunluğu ve aynı zamanda çok çeşitli şekilde türetilen gerek doğrusal gerekse doğrusal olmayan sistemler üzerinde hem teorik hem de pratik olarak erişilmek istenen performans düzeylerinde iyileştirilmeye gidilmesi ihtiyacının, hibrit kontrolör tasarımı gereksinimine olan talebi artırdığı söylenebilir. Hibrit kontrolör tipi, genel olarak bir karar verme mekanizması aracılığıyla, ele alınan bir kapalı çevrim kontrol sistemi için, değerlendirilmeye alınan karar niteliğine göre kontrolörler arasında geçiş yapmaya izin veren bir kompleks kontrolör sistemi olarak değerlendirilebilir.

Hibrit tip bulanık (HTB) kontrolör yapılarında, bu karar verme mekanizması genel olarak bir seçici anahtar yardımı ile sağlanabilir. Bir arada çalışması planlanan kontrolör türleri arasında, seçici anahtarın işlev göreceği karar verme niteliği belirlenerek bu değerler matematiksel aralıklarına göre hangi kontrolör tipinin görev alacağı belirlenebilir. Bu yapının getirmiş olduğu kendine özgü tasarım metotlarına sahip olan kontrolörlerin ortaklaşa tek kapalı çevrim kontrol sistemi içerisinde çalışması durumu da, arzulanan performans kriterlerinde iyiye olan gelişimi destekleyebilir.

Bir çalışmada, Bashir A. O., Rui X., Zhang J. kullanıcı konforunu artırmak amacıyla çeyrek araç süspansiyonunda manyetoreolojik damper (MR) kullanarak üç serbestlik dereceli model elde ederek istenen performansları elde edebilmek adına, iç-ayarlamalı bulanık PID (İABPID) kontrolör ile geleneksel bulanık kontrolörü bir araya getirerek hibrit bulanık-PID (BPID) kontrolör tasarlamışlardır. Ortaya çıkarılan hibrit kontrolör tipinde, tasarlanan kontrolörler arası geçişi yapabilmek için ise bulanık seçici anahtar

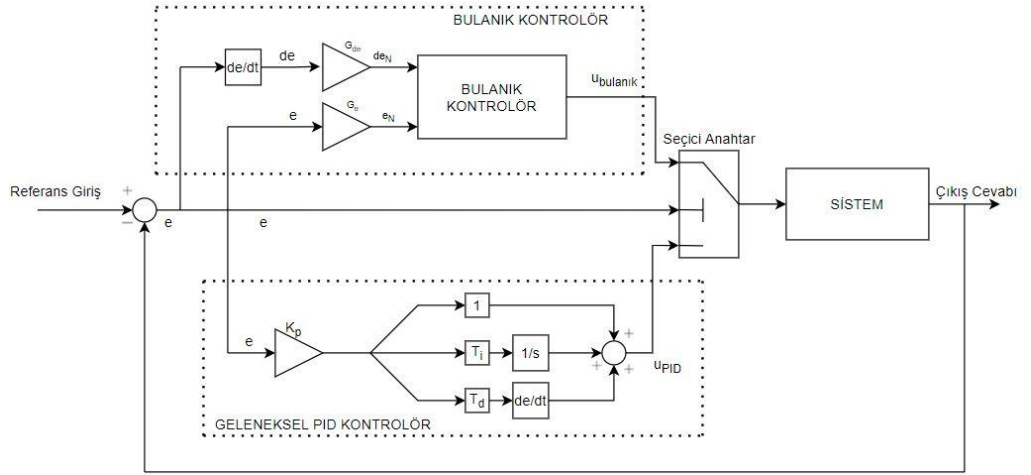
(BSA) kullanılmıştır. Tasarlanan hibrit kontrolörün kapalı çevrim kontrol diyagramı aşağıda verilen Şekil 46 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 46. Önerilen hibrit kontrolör kapalı çevrim blok diyagramı.

Önerilen hibrit kontrolörde kullanılan seçici anahtar yapısı da bulanık olarak tasarlanmıştır. Bu tasarlanan hibrit kontrolörde girişler kapalı çevrim kontrol sisteminin hata ve hata türevi olmak üzere, bulanık kontrolör yedi, İABPID beş ve bulanık seçici anahtar ise üç adet ve hepsi üçgen tip üyelik fonksiyonlarından oluşan girişlere sahiptir. Ek olarak bulanık kontrolör yedi, İABPID üç ve bulanık seçici anahtar ise iki adet üçgen tipte üyelik fonksiyonlarından oluşan çıkışlara sahip olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan hibrit kontrolör tek tümsek ve rastgele girişli yol profillerinde test edilmiştir. Yapılan çalışma neticesinde, gövde ivmesi, süspansiyon çalışma alanı performans kriterleri çerçevesinde önerilen hibrit kontrolörün geleneksel metotlara kıyasla daha iyi sonuçlar verdiği raporlanmıştır (Bashir, Rui ve Zhang, 2019).

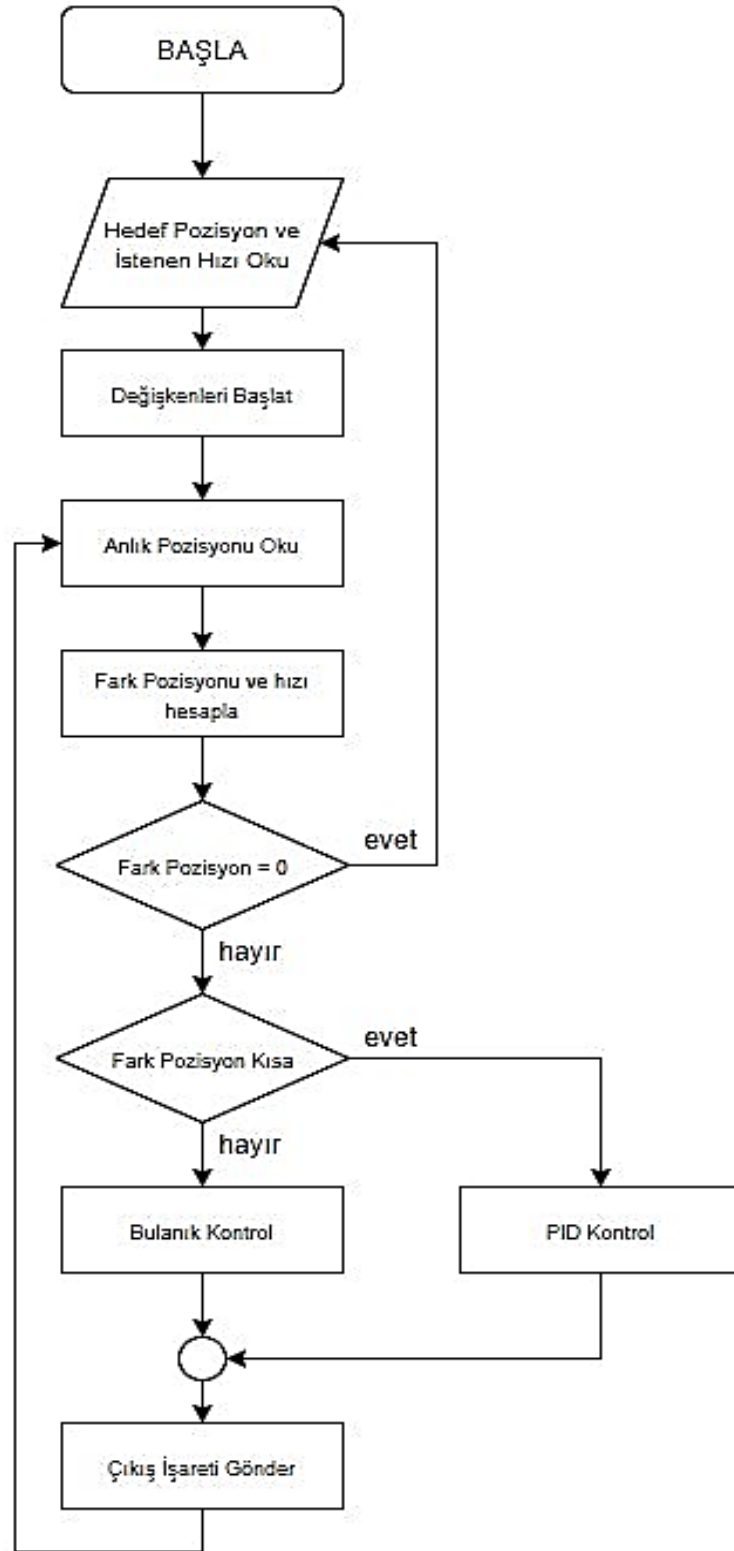
Bir çalışmada, Çetin Ş. ve Akkaya V. A. üç pozisyonlu hidrolik sistem konum kontrolü yapabilmek amacıyla hibrit bulanık PID kontrolör tasarımı gerçekleştirmişlerdir. Önerilen bu kontrolör çeşidinde kontrolörler arası geçiş yapabilmek amacıyla anahtar geçiş yapısı kullanmışlardır. Bu anahtar, kapalı çevrim kontrol sisteminden elde edilen hata değişkeninin değerine göre kontrolörler arasında geçişi sağlamaktadır. Tasarlanan hibrit bulanık PID kontrolör aşağıda verilen Şekil 47 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 47. Hibrit bulanık PID kontrolör kapalı çevrim blok diyagramı.

Önerilen kontrolörün bulanık kısmında hem kapalı çevrim sistemin hata ve hata türevi değerlerinin baz alındığı girişler hem de çıkış kontrol işareti yedişer adet üçgen tip üyelik fonksiyonları ile bulanık kümelerle ayrılarak kontrolör tasarlanmıştır. Konum kontrolü elde edilmek istenen hidrolik sistem üzerinde kontrolör performansını ölçmek üzere MHI, MHZI, yükselme süresi (YS) ve yerleşme zamanı (YZ) performans kriterleri baz alınmıştır. Geleneksel kontrolör tipleri ile gerçekleştirilen simülasyonlar neticesinde önerilen hibrit kontrolörün daha iyi performans gösterdiği raporlanmıştır (Çetin ve Akkaya, 2010).

Bir çalışmada Parnichkun M. ve Ngaechoenkul C. tarafından hibrit bulanık PID kontrolör yapısı kullanılarak, endüstriyel pnömatik bir sistemin kinematik kontrol uygulaması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, endüstriyel bir kayar metal profil sistemi üzerinde, önerilen kontrolör yapısını işleterek hız ve pozisyon kontrolü yapmışlardır. Bu kontrolü gerçekleştirebilmek için şarta bağlı anahtar seçim mekanizması kullanmışlardır. Bu anahtarda sistemde bulunan kontrolör çeşidinin aktifleşmesi mesafe değerine bağlıdır. Sistem hareketi mesafe sensörü tarafından ölçüldükten sonra, eğer istenen pozisyon için mesafe fazla ise bulanık kontrolör, mesafe yakın ise PID kontrolörü aktifleşmektedir. Hibrit kontrolörün tasarlandığı sistem için algoritma akış diyagramı aşağıda verilen Şekil 48 üzerinde gösterilmiştir.

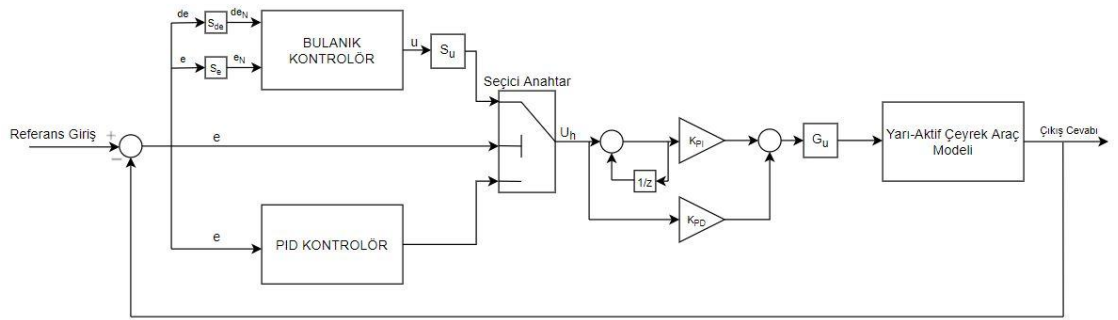


Şekil 48. Hibrit kontrolör sistemi algoritma akış diyagramı

Ek olarak, önerilen hibrit kontrolör sisteminde bulunan bulanık kontrolör kapalı çevrim kontrol sisteminin meydana getirdiği hata baz alınarak tek girişli olarak tasarlanıp, altı

adet üçgen tip üyelik fonksiyonu barındıran bulanık kümelerle bölünmüştür. Çalışmada tasarlanan kontrolörün, geleneksel PID metotları ile kıyaslandığında, hem uygulamada hem de simülasyon sonuçlarında YS ve YZ performans kriterleri açısından daha iyi performans gösterdiği raporlanmıştır (Parnichkun ve Ngaecharoenkul, 2001).

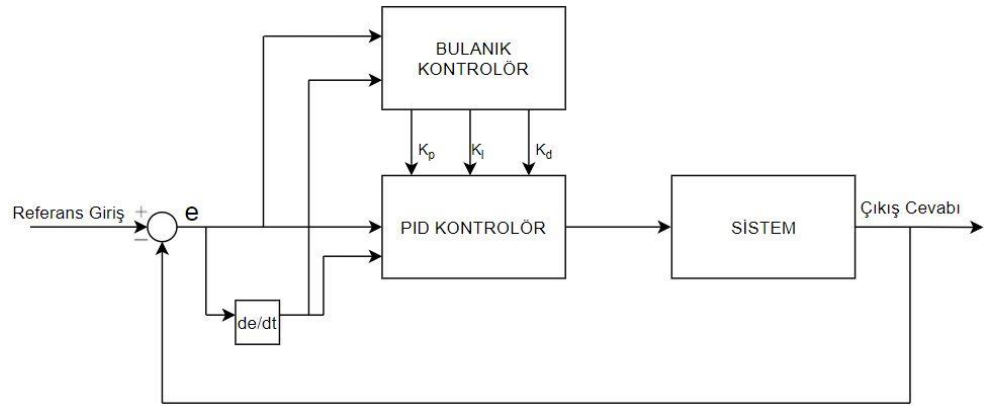
Bir çalışmada, Singh D. ve Aggarwal M.L. hibrit bulanık-PID yaklaşımını üç serbestlik dereceli yarı-aktif MR damperli çeyrek araç modeline uygulamışlardır. Yapılan bu çalışmada amaç, yolcu koltuğu titreşimine ait hız ve pozisyon kontrollerini gerçekleştirmektir. Tasarlanan hibrit kontrolörün kapalı çevrim kontrol sisteminin hata değerinin belirlenen eşik değerinden yüksek ya da düşük olma durumuna göre karar veren bir seçici anahtar yapısı kullanılmıştır. Bu anahtar yapısı PID kontrolör ile bulanık kontrolörün arasındaki karar geçişini sağlamaktadır. Ek olarak önerilen hibrit kontrolörün literatürdeki eşdeğer kontrolör çeşitlerinden farkı bulanık kontrolör ile PD+PI kontrolör yapısının tümleşik olarak tasarlanmasıdır. Tümleşik kontrolör yapısı, kontrolörden elde edilerek anahtar kararı ile iletilen kontrol işareti çıkışının, PD ve PI kontrolör kombinasyonunun toplamından geçirilerek ilgili sisteme uygulanması ile elde edilir. Tümleşik hibrit bulanık PID (THBPID) kontrolörün kapalı çevrim kontrol diyagramı aşağıda verilen Şekil 49 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 49. THBPID kapalı çevrim kontrol diyagramı.

Yapılan çalışmada, tasarlanan THBPID kontrolör ile kurulan modelin pasif durumu, geleneksel PID kontrolör ve geleneksel bulanık kontrolörün tek tümsek bozucu yol profili üzerinde 40 km/h değeri için ivme, pozisyon ve süspansiyon sapması kriterleri açısından ortalama kök değer ve YZ kıstasları gözetilerek kıyaslanmıştır. Yapılan çalışmada, kıstasa alınan tüm tipler içerisinde THBPID kontrolör ile en iyi performans sonuçlarının elde edildiği raporlanmıştır (Singh ve Aggarwal, 2017).

Bir çalışmada, Chen Y. ve diğerleri tarafından PID ve bulanık kontrolör tiplerinin kombinasyonundan oluşturulan bir hibrit kontrolör tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu hibrit kontrolör tasarımı bir insansız hava aracı (İHA)'ya uygulanmıştır. Gerçekleştirilen bu uygulamada amaç İHA'ya hedef olarak verilen pozisyon için hız ve irtifa kontrolünü sağlamak olmuştur. Tasarlanan kontrolörde ilk giriş kapalı çevrim kontrol sisteminin hatası ve ikinci giriş hata türevi olacak şekilde ve bulanık tasarımın etken olduğu PID kontrolör katsayılarının her biri için çıkış olarak üçgen tip üyelik fonksiyonları ile 7'şer adet bulanık kümeye bölünerek giriş ve çıkışlar oluşturulmuştur. Tasarlanan hibrit kontrolörün kapalı çevrim kontrol diyagramı aşağıda verilen Şekil 50 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 50. Hibrit kontrolör kapalı çevrim kontrol diyagramı.

Yapılan çalışma neticesinde tasarlanan hibrit kontrolörün geleneksel PID kontrolör ile istenen pozisyon için hız ve irtifa değerleri için daha iyi performans sergilediği raporlanmıştır (Tao ve diğerleri, 2016).

Günümüze yakın yıllarda yapılan çalışmalar gözlemlendiğinde gerek bulanık gerekse geleneksel kontrolör metotlarının kombine edilerek hibrit bir şekilde bir arada kullanımının gerçekleşmesi hem gerçekleştirilen teorik bazlı simülasyonlarda hem de pratik uygulamalarda performans iyileştirmesi göstermiştir.

4. BBBC OPTİMİZASYON YÖNTEMİ

Üzerinde çalışılan bir sistem için nihai ve anlamlı bir sonuç elde edilmeye çalışılırken o sonuca bağıllık gösteren en iyi giriş ya da girişlerin değerini elde etmek adına, yapılan işlemde sonucun oluşmasında etken olan donelerin matematiksel olarak her zaman en yüksek ya da en düşük miktarlarda seçilmesi, istenilen sonucun en iyi düzeyde elde edilebileceği anlamı taşımayabilir. Optimizasyon, bir işlem gerektiren sürecin veya bir fonksiyonun sonucunu elde edebilmek için, bu fonksiyona bağlı etken giriş parametrelerinin istenilen sonuca ulaşabilmek için en iyi değer ya da değerlerin soruşturulma metotları olarak tanımlanabilir (Kirkpatrick, Gelatt ve Vecchi, 1983). Bir diğer açıdan bakıldığında ise, optimizasyon metotları konularındaki araştırmalar, tabiat ve doğa olaylarından esinlenerek ya da insanın etken özelliklerinde söz sahibi olan genetik olgu vb. durumlarından esinlenilerek ortaya çıkabilmektedir. Bu optimizasyon metotlarının amacı, evrensel değer kümesi içerisinde, istenen performansa ulaşılacak herhangi bir lokal değer bölgesine takılmadan, global düzeyde sonucu sağlayabilecek değerlerin araştırılabilmesi kabiliyetidir. Literatürde, bu türden optimizasyon metotlarına dair çokça örnek bulunmaktadır, bunlara parçacık sürü optimizasyonu (PSO) (Kennedy ve Eberhart, 1995), arı kolonisi optimizasyonu (AKO) (Dorigo, Maniezzo ve Colorni, 1996) gibi metotlar örnek olarak verilebilir. Ek olarak, bu optimizasyon metotlarından bir tanesi fizik alanı perspektifinden ortaya atılan Erol K. O. ve Eksin İ. tarafından evrenin oluşumu ile ilişkilendirilen büyük patlama teorisinden (big bang-big crunch theory) esinlenilerek literatüre kazandırılmıştır (Erol ve Eksin, 2006). Buna ek olarak, literatürde çok çeşitte teori ve uygulaması bulunan başlıca genetik optimizasyon (GO) algoritmaları da bulunmaktadır (Back, Hammel ve Schwefel, 1997; Conroy, 1991; Goldberg, 1989; Holland, 1975).

Evrimsel algoritmalarda optimizasyon problemi özet olarak, ele alınan işlevin amaca uygun hale getirilmesine bağlı kalınarak, bu işlevi minimuma indirmek olarak tanımlanabilir. Lokal optimizasyon istenen sonuca ulaşmak için taranan giriş değeri evreni içerisinde yer alan kısmi bölgede en iyi değeri bulma yanılması ile karşılaşılırken, global optimizasyon ise değer evreni içerisinde meydana getirdiği tüm değerleri, en iyi sonucu elde edebilmek adına tarayabilen algoritma biçimi olarak ifade edilebilir. Evrimsel algoritmalar bahsi geçen global optimize durumunu sağlayabilmek adına genetik ve evrim teorisinin temel taşlarını ve iç dinamiklerini benimseyebilir.

Genetik optimizasyon ile geleneksel optimizasyon metotlarının yaklaşımları arasındaki en temel farklardan bir tanesi, genetik optimizasyon algoritmasının gerekli araştırmayı yapabilmesi için değer evreni içerisinde popülasyon adı verilen değerleri üreterek optimizasyon metodunun global çerçevede sürdürülebilirliğini sağlamak olarak belirtilebilir (Chellapilla, 1998; Fogel, 1993; Rudolph, 1997).

Tez kapsamında büyük patlama optimizasyonu (BBBC) algoritması ele alınacaktır. Bu bağlamda BBBC optimizasyon metodunun algoritması sırasıyla aşağıdaki adımları takip etmelidir:

1. **Adım:** BBBC optimizasyonunda işlem görecektüm değişkenler için bu değişkenlere özgü değer aralıkları belirlenerek değer evrenleri elde edilir. Ek olarak elde edilmek istenen sonuç için durma kriteri oluşturulur. Kontrol perspektifinden bakıldığında durma kriteri, ele alınan performans olgusuna kıyasla bu olgunun kaç kat iyileştirilmesi istendiğini ifade edebilir.
2. **Adım:** Her değer evreni için belirlenen alt ve üst sınırlar içerisinde popülasyon sayısı (N) kadar aday, ilk aday jenerasyonu olarak rastgele biçimde üretilir.
3. **Adım:** Popülasyonda bulunan aday jenerasyonunun tüm üyeleri için amaç fonksiyonu değerleri hesaplanır. Amaç fonksiyonu, kontrol açısından ele alındığında elde edilmek istenen performans kriteri olarak seçilebilir.
4. **Adım:** Aşağıda verilen denklem 59 kullanılarak kütle merkezi belirlenir.

$$\vec{x}^c = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f^i} \cdot \vec{x}^i}{\sum_{i=1}^N \frac{1}{f^i}} \quad (59)$$

Bu denklem üzerindeki sembolik ifadelerin açıklamaları aşağıda verildiği şekilde tanımlanabilir;

N: popülasyon sayısı,

\vec{x}^c : kütle merkezi,

\vec{x}^i : aday nokta,

f^i : aday noktaya ait amaç fonksiyonu değeri.

Verilen bu ifadelerden, kütle merkezi ve aday nokta parametreleri vektör gösterimi ile ifade edilmiştir. Bunun sebebi, sistem içerisinde optimize edilecek

değerlerin tekil skaler değişkenlerden ziyade çoklu boyutlarda vektör formu biçiminde de bulunabilmesidir. Vektör formu durumunda da optimizasyon aşamasının sürdürülebileceği ifade edilmek istenmiştir. Kütle merkezinin denklem 59 üzerinde belirtilen matematiksel hesaplamasına ek olarak, kontrol performans kriterlerinin en iyi değerlerini bulabilmek için en iyi seçim (best-fit) yöntemi de dördüncü adımda kütle merkezi hesaplamasına muadil olarak kullanılabilir.

5. **Adım:** Kütle merkezi değerinin etrafında popülasyon sayısı kadar yeni aday denklem 60 doğrultusunda oluşturulur;

$$x^{yeni_aday} = x^c + l \cdot r / k \quad (60)$$

Bu denklem üzerinde verilen sembolik ifadeler aşağıdaki gibi tanımlanabilir;

x^{yeni_aday} : Yeni jenerasyon üyesi,

x^c : Kütle merkezi değeri,

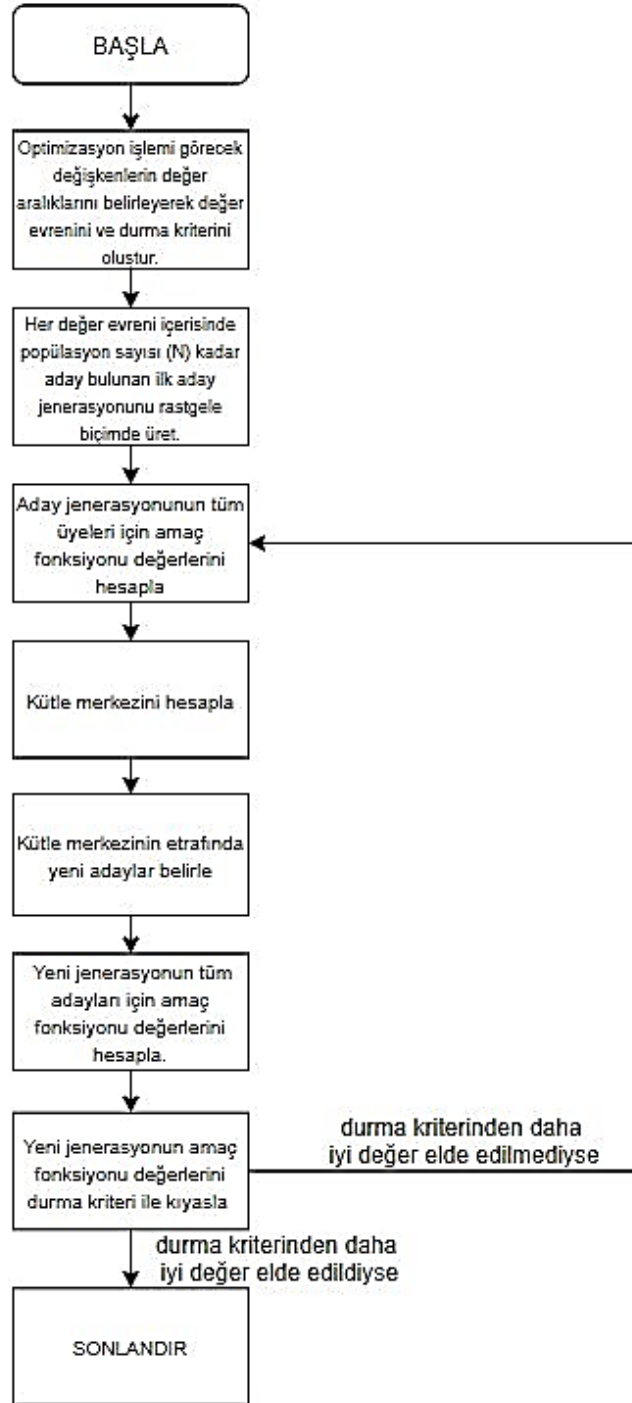
l : Tanımlanan üst sınır değeri

r : Rastgele normal sayı

k : Iterasyon adım sayısı.

6. **Adım:** Yeni aday oluşumuyla meydana gelen yeni jenerasyonun tüm adaylar için amaç fonksiyonu değeri hesaplanır. Bu amaç fonksiyonu değeri, belirlenen durma kriteri ile kıyaslanır. Yeni jenerasyon üyelerinden hesaplanan amaç fonksiyonu, durma kriterinden daha iyi performans sergilediyse, algoritma sonlanır ve en iyi performansı sergileyen popülasyon üyesi elde edilir. Eğer yeni jenerasyon üyelerinden hesaplanan amaç fonksiyonu durma kriterinden daha kötü performans sergilediyse, algoritma sonlanma şartının (daha iyi performans gösterme durumu) geçerli olacağı duruma kadar, üçüncü adıma geri dönülerek prosedür sırasıyla işletilmeye devam edilir.

BBBC optimizasyon algoritmasının akış diyagramı aşağıda verilen Şekil 51 vasıtasıyla gösterilebilir.



Şekil 51. BBBC Optimizasyon algoritması akış diyagramı.

BBBC optimizasyon algoritması aynı zamanda, küre, Rosenbrock, birim basamak, elipsoit, Rastrigin ve Ackley fonksiyonları üzerinde GO algoritmaları ile kıyaslanmıştır. Bu kıyaslamamanın sonucunda BBBC optimizasyon algoritmasının, GO algoritmalarına göre hızlı yakınsadığı ve daha iyi performans sergilediği raporlanmıştır (Erol ve Eksin, 2006).

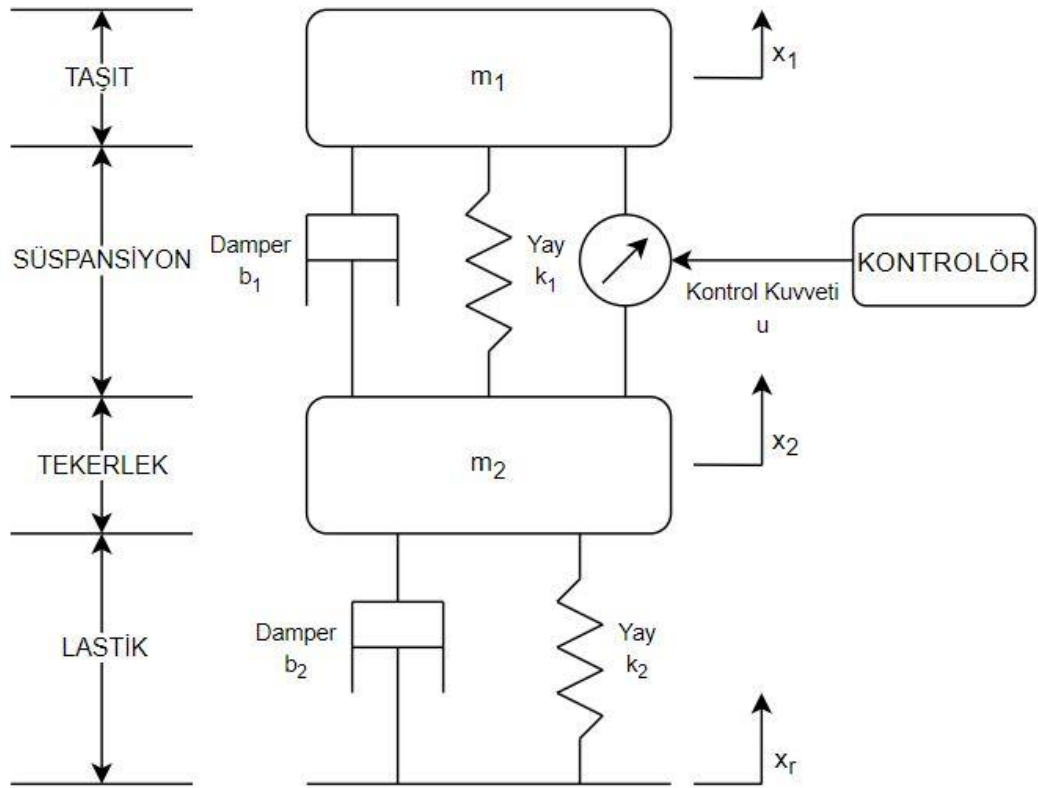
5. SİSTEM TANIMI, YOL PROFİL TÜRLERİ, PROBLEM VE UYGULANMASI

5.1. Çeyrek Araç Süspansiyon Modeli

Günümüz dünyasında kara taşıtlarının kullanımının artık bir lüks olmaktan ziyade ihtiyaç haline geldiği insanlığın çoğunluğu tarafından kabul edilebilir. Kullanılan araçlar bünyesinde mekanik, elektronik, yazılım ve kontrol temel alanlarını ve genellikle bu temel alanların kompleks birleşimlerini barındırdığı çok çeşitli bakış açılarına hitap eden sistemler bütünü olarak görülebilir. Otomotiv sistemlerinde bulunan en temel mekanizmalardan bir tanesinin süspansiyon sistemi olduğu söylenebilir (Ghafouri ve Daneshmand, 2017). Süspansiyon mekanizmasının temel görevleri başlıca, her türden gelebilecek bozucu yol profilleri karşısında kullanıcı konforunu, araç stabilizasyonunu ve yol tutuşunu gerekli güvenliği sağlayarak ve bu hedeflenen parametreler çerçevesinde arzulan düzeylerin altına düşürmemek olarak kabul edilebilir. İstenen düzeylerin geliştirilmeleri hususundaki konular da üzerinde uğraş verilen alanlar olarak adlandırılabilir. Tüm bu kriterlerin icra edilebilmesinin altında bulunan temel mantık, süspansiyon gövdesinin, bozucu yol profillerinin meydana getirdiği titreşimleri olabildiğince ekarte ederek taşıt kabine yolcu konforunu da optimize ederek olabildiğince az düzeyde aktarması kabiliyeti olarak tanımlanabilir. Taşıtlardaki süspansiyon sistemleri mekanik olarak temel düzeyde kütle, damper ve yay bileşenlerinden yola çıkılarak modellenilebilir (Bashir ve diğerleri, 2019). Buna ek olarak süspansiyon sistemleri biçimsel olarak ele alındığında iki temel sınıftan bahsedilebilir (Ghafouri ve Daneshmand, 2017). Bunlardan ilki pasif süspansiyon sistemi olarak ele alınırken, diğer ise aktif süspansiyon sistemi olarak adlandırılır. Pasif yapının aktif yapıdan en belirgin farkı, süspansiyon tasarımının yalnızca damper ve yay elemanlarının katsayılarına bağlı olarak tasarlanmasıdır, aktif süspansiyon yapısında ise bu elemanlara ek olarak aktif bir kontrolörün de görev alması olarak ifade edilebilir. Pasif süspansiyon sisteminde konforlu ve güvenli bir sürüş elde etmek adına damper ve yay elemanlarının sönüm katsayısını ve yay sabitini ayarlamak majör öncelik taşımaktadır. Öte yandan aktif süspansiyon sistemi ise, konfor ve güvenli sürüş elde etmek için yapısında barındırdığı kontrolör sisteminden dolayı daha masraflı ve kompleks bir yapıya sahiptir.

Kontrol perspektifinden bakıldığında, çeşitli performans kriterleri esas alınarak, bu kriterlerin iyileştirilmesi kapsamında literatürde çok çeşitli süspansiyon modellerinin ve çok çeşitli kontrolör türlerinin ele alındığı rahatlıkla görülebilir. Çeşitli açılardan performans iyileştirmeleri türlü kontrol metotları ile sağlatılmaya çalışılan ve alanında çok fazla çalışmaya sahip olan süspansiyon modelleri başlıca, tüm araç süspansiyon modeli (Assahubulkahfi, Sam, Maselena ve Huda, 2018; Choi, Choi ve Park, 2000; Khan, Qamar ve Khan, 2016; Sun, Gao ve Yao, 2013), yarım araç süspansiyon modeli (Gandhi, Adarsh ve Ramachandran, 2017; Khodadadi ve Ghadiri, 2018; Wang, Song, Chen ve Shi, 2018) ve çeyrek araç süspansiyon modeli (Divekar ve Mahajan, 2017; Ghafouri ve Daneshmand, 2017; Nagarkar, Bhalerao, Vikhe Patil ve Zaware Patil, 2018; Palanisamy ve Karuppan, 2016; Wang ve diğerleri, 2015) olarak kendilerine yer bulmuşlardır.

Bu tez kapsamında, çeyrek araç süspansiyon sistemi modeli kullanılmıştır. Çeyrek araç süspansiyon modeli taşıt, süspansiyon, tekerlek ve lastik kısımları detaylı bir biçimde gösterilerek kütle, damper ve yay mekanik elemanları yardımıyla aşağıda verilen Şekil 52'deki gibi modellenenabilir.



Şekil 52. Çeyrek araç süspansiyon sistemi modeli. Kaynak: (Sun, W., Gao, H., Kaynak, O., 2010).

Şekil üzerinde gösterilen çeyrek araç süspansiyon modeli üzerinde, m_1 çeyrek taşıt kütlelerini, b_1 süspansiyon sönümlenme elamanını (damper), k_1 süspansiyon yayını, m_2 tekerlek kütlelerini, b_2 ve k_2 sönümlenme elemanı (damper) ve yay gösterimi ise lastik modellemesini temsil etmektedir. Buna ek olarak x_1 taşıt pozisyonunu, x_2 teker pozisyonunu ve x_r yol pozisyonunu belirtmektedir. Belirtilen sistemin hareket denklemleri taşıt ve teker pozisyonu için aşağıda verilen denklem 61 ve 62 üzerinde çıkarılmıştır.

$$m_1 \cdot \ddot{x}_1(t) = -b_1(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) - k_1(x_1(t) - x_2(t)) + u(t) \quad (61)$$

$$m_2 \cdot \ddot{x}_2(t) = b_1(\dot{x}_1(t) - \dot{x}_2(t)) + k_1(x_1(t) - x_2(t)) + k_2(\dot{x}_r(t) - \dot{x}_2(t)) - u(t) \quad (62)$$

Çıkarılan hareket denklemleri doğrultusunda, tez kapsamında sistem kontrolü için taşıt ve teker pozisyonu arasındaki fark baz alınacaktır. Bu bağlamda, taşıt pozisyonunun, kontrol işaretine göre transfer fonksiyonu aşağıda verilen denklem 63'teki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{x_1(s)}{u(s)} = \frac{m_2 s^2 + b_2 s + k_2}{\Delta} \quad (63)$$

İlaveten taşıt pozisyonunun, yol pozisyonuna göre transfer fonksiyonu aşağıda verilen denklem 64'teki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{x_1(s)}{x_r(s)} = \frac{b_1 b_2 s^2 + (b_1 k_2 + k_1 b_2) s + k_1 k_2}{\Delta} \quad (64)$$

Ek olarak, teker pozisyonunun, kontrol işaretine göre transfer fonksiyonu aşağıda verilen denklem 65'teki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{x_2(s)}{u(s)} = \frac{-m_1 s^2}{\Delta} \quad (65)$$

Tezde kullanılacak kontrol sistemini oluşturan fark transfer fonksiyonları kurulmadan önce, son olarak, teker pozisyonunun yol pozisyonuna göre transfer fonksiyonu ise aşağıda verilen denklem 66'daki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{x_2(s)}{x_r(s)} = \frac{m_1 b_2 s^3 + (m_1 k_2 + b_1 b_2) s^2 + (b_1 k_2 + k_1 b_2) s + (k_1 k_2)}{\Delta} \quad (66)$$

Tezde kullanılacak pozisyon farkı için, taşıt pozisyonu ile teker pozisyonu arasındaki farkın, kontrol işaretine göre transfer fonksiyonu, denklem 63'ten denklem 65'in farkı alınarak aşağıda verilen denklem 67'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{x_1(s) - x_2(s)}{u(s)} = \frac{(m_1 + m_2)s^2 + b_2s + k_2}{\Delta} \quad (67)$$

Aynı şekilde, taşıt pozisyonu ile teker pozisyonu arasındaki farkın, yol pozisyonuna göre transfer fonksiyonu ise, denklem 64'ten denklem 66'nın farkı alınarak aşağıda verilen denklem 68'deki gibi ifade edilebilir.

$$\frac{x_1(s) - x_2(s)}{x_r(s)} = \frac{(-m_1b_2)s^3 - (m_1k_2)s^2}{\Delta} \quad (68)$$

Hareket denklemleri denklem 61 ve 62'de verilen sistem için, denklem 63-68 arasında türetilen tüm transfer fonksiyonlarının ortak paydası delta (Δ) ise, aşağıda verilen denklem 69'deki gibi ifade edilebilir.

$$\begin{aligned} \Delta = & m_1m_2s^4 + (m_1b_1 + m_1b_2 + m_2b_1)s^3 \\ & + (m_1k_1 + m_1k_2 + b_1b_2 + k_1m_2)s^2 + (b_1k_2 + k_1b_2)s \\ & + k_1k_2 \end{aligned} \quad (69)$$

Son olarak ise verilen denklemler için tezde kullanılacak olan değişkenlerin parametreleri aşağıdaki Tablo 12 üzerinde gösterilmiştir.

Değişken	Parametre (Birim)
m_1	320 (kg)
m_2	40 (kg)
b_1	1 (kNs/m)
b_2	10 (Ns/m)
k_1	18 (kN/m)
k_2	200 (kN/m)

Tablo 12. Çeyrek araç süspansiyon model parametreleri (Sun, W., Gao, H., Kaynak, O., 2010) .

Tezin bu kısmı takip eden kısmında ise, süspansiyon sisteminin modelinin test edildiği bozucu yol profilleri detaylı olarak anlatılacaktır.

5.2. Yol Profili Türleri

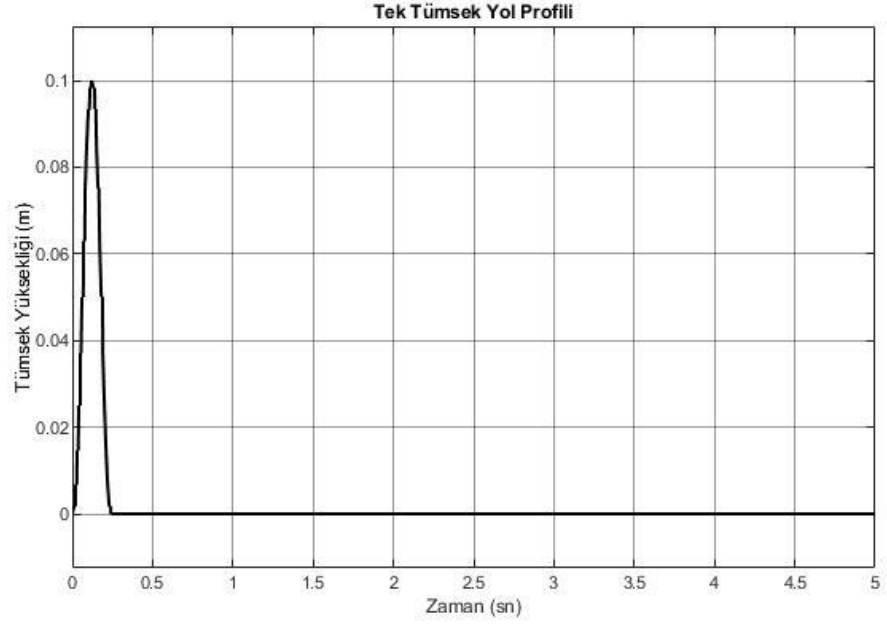
Araçlarda bulunan süspansiyon sistemlerinin, farklı yol dinamikleri durumlarında, başlıca; yol tutuşu, konfor ve araç stabilizasyonunu sağlaması gerekliliklerinden tez kapsamında önceki bölümlerde bahsedilmiştir. Süspansiyon sistemlerinin temel olarak değerlendirmeye alındığı çok çeşitli yol profilleri bulunmaktadır. Bu yol çeşitleri başlıca beş tipte incelenebilir (Rajendiran ve Lakshmi, 2016). Bunlar, tek tümsek, çift tümsek, sinüzoidal, rastgele yol ve tek tümsek ile rastgele yol profillerinin kombinasyonları olarak ele alınabilir. Bu kısmın alt başlıklarında, bahsi geçen yol profilleri incelenecektir.

5.2.1. Tek Tümsekli Yol Profili

Günlük yaşantımızda, özellikle şehir içinde taşıt kullanımındaki en yaygın karşılaşılan yol argümanlarından bir tanesi tümsekler olarak adlandırılabilir. Özellikle araç hızlarının dengelenmesi gereken yol kıvrımlarında veya kritik öneme sahip (okul, hastane önleri vb.) yollarda çevresel durumlara bağlı olarak yaya güvenliğini sağlamak için tekli veya ikili tümsekler kullanılabilir. Aşağıda verilen denklem 70 üzerinde tek tümsek yol profili için denklem belirtilmiştir.

$$Z_{r(\text{tek tümsek})} = \begin{cases} \frac{a}{2} (1 - \cos(\frac{2\pi v_0}{l}))t, & 0 \leq t \leq l/v_0 \\ 0, & t \geq l/v_0 \end{cases} \quad (70)$$

Ele alınan bu yol profilinde a tümsek yüksekliği (m), l uzunluk (m) ve v_0 hız değeri 30 (km/saat) olarak kabul edilmiştir. Kabul edilen ve birimleri ile belirtilen bu değerler doğrultusunda oluşturulan tek tümsek 0 ile 0,25 saniyeleri arasında 0,1 m yüksekliğinde elde edilir. Tek tümsek gösterimi aşağıda verilen Şekil 53 üzerinde gösterilmiştir (Du, Li ve Zhang, 2012).



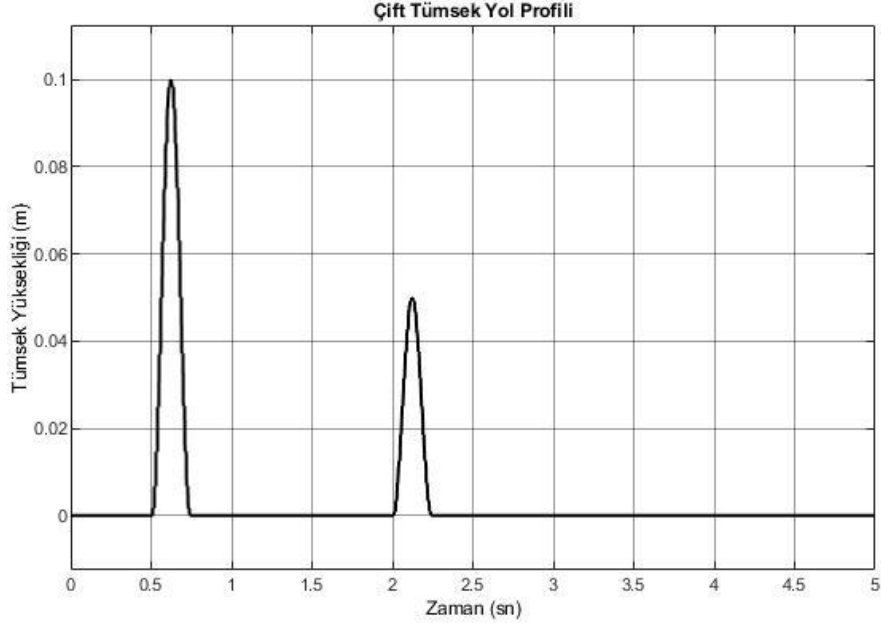
Şekil 53. Tek tümsek yol profil grafiği.

5.2.2. Çift Tümsekli Yol Profili

Bir önceki bölümde verilen tek tümseğe ek olarak çift tümsek yol profilinin matematiksel ifadesi, aşağıda verilen denklem 71'deki gibi elde edilebilir.

$$Z_{r(\text{çift tümsek})} = \begin{cases} a(1 - \cos(8\pi t)), & 0,5 \leq t \leq 0,75 \\ \frac{a}{2}(1 - \cos(8\pi t)), & 2 \leq t \leq 2,25 \\ 0, & \text{harici} \\ & \text{zamanlarda} \end{cases} \quad (71)$$

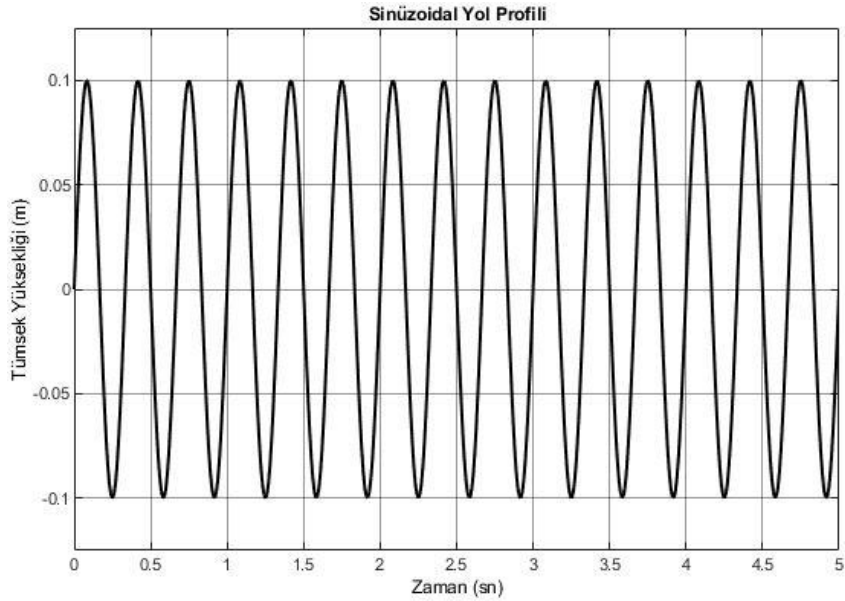
Denklem 70 üzerinde verilen çift tümsek yol profili fonksiyonunda, tek tümsek yol profilinde belirtilen a değeri 0,1 m tümsek yüksekliği olmak üzere, çift tümsek fonksiyonu test edilecek süspansiyon için 0,5 ile 0,75. saniyeler arasında 10 cm, 2 ile 2,25. saniyeler arasında ise 5 cm yüksekliğinde tümsek oluşturmaktadır. Çift tümsek bozucu yol profilinin grafiği aşağıda verilen Şekil 54 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 54. Çift tümsek yol profil grafiği.

5.2.3. Sinüzoidal Yol Profili

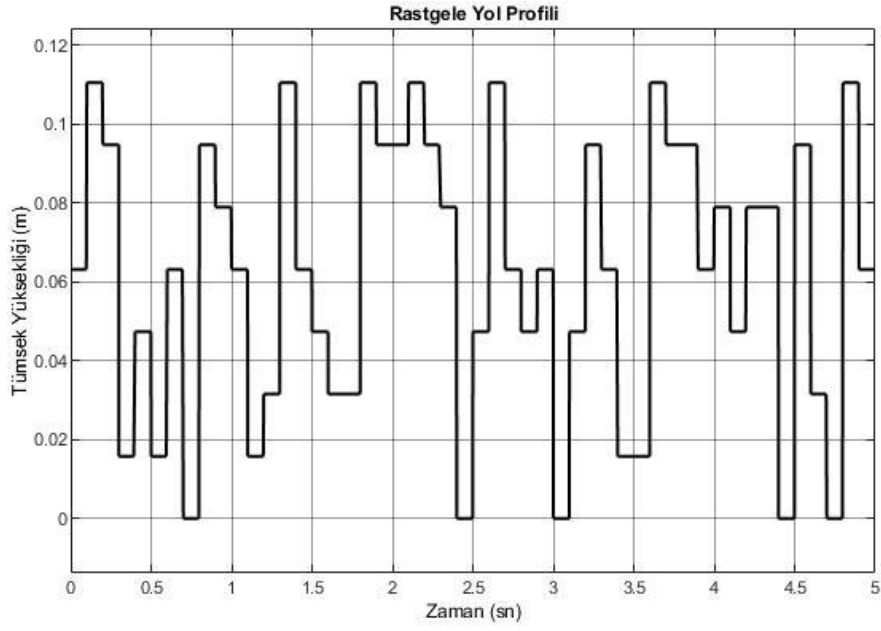
Sinüzoidal yol profili, gerçek hayatta yer yer düşüş ve inişlerin birlikte bulunduğu dalgalı yol profilini sembolize etmek için kullanılır. Tez kapsamında kullanılan sinüzoidal yol profili 3 hertz (18,85 rad/s) frekansa sahip 0,1 m yükseklik ve derinlik değerleri içeren sinüzoidal sinyal üretici yardımı ile modellenmiştir. Sinüzoidal yol profili aşağıda verilen Şekil 55 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 55. Sinüzoidal yol profil grafiği.

5.2.4. Rastgele Yol Profili

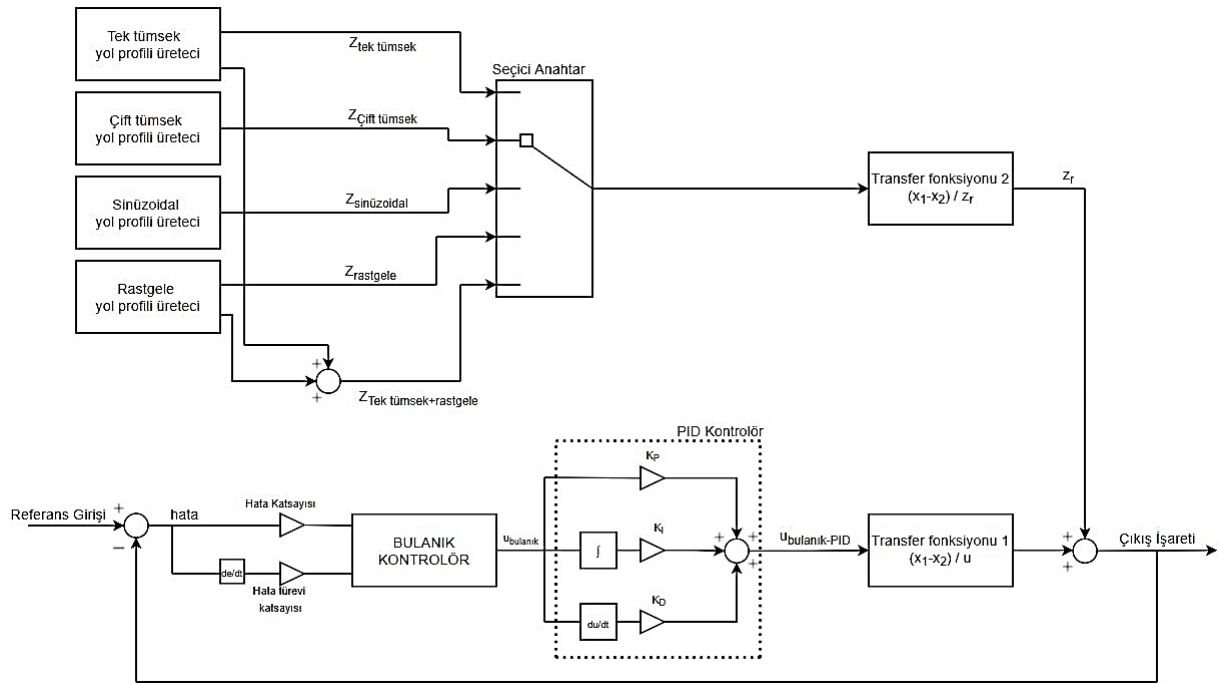
Rastgele yol profili grafiği, zemin sıfır ve en yüksek çıkış değeri 0,11 m kabul edilecek şekilde, üzerindeki dağınık iniş ve çıkışları temsilen MATLAB/SIMULINK üzerinde rastgele sayı üretici ile meydana getirilmiştir. Bu yol profili, bilhassa arazi koşullarındaki yol profilini yansıtabilmek açısından uygun bir yol profilidir. Rastgele yol profili aşağıda verilen Şekil 56 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 56. Rastgele yol profili grafiği.

5.2.5. Tek Tümsek ve Rastgele Yol Profili

Son olarak ise, bir kombine yol olarak meydana gelebilecek rastgele bir yol üzerinde, bir tekli tümseğin bulunması durumu, yukarıda verilen tek tümsek ve rastgele yol profillerinin toplamları şeklinde elde edilebilir. Tek tümsek ve rastgele yol profili aşağıda verilen Şekil 57 üzerinde gösterilmiştir.



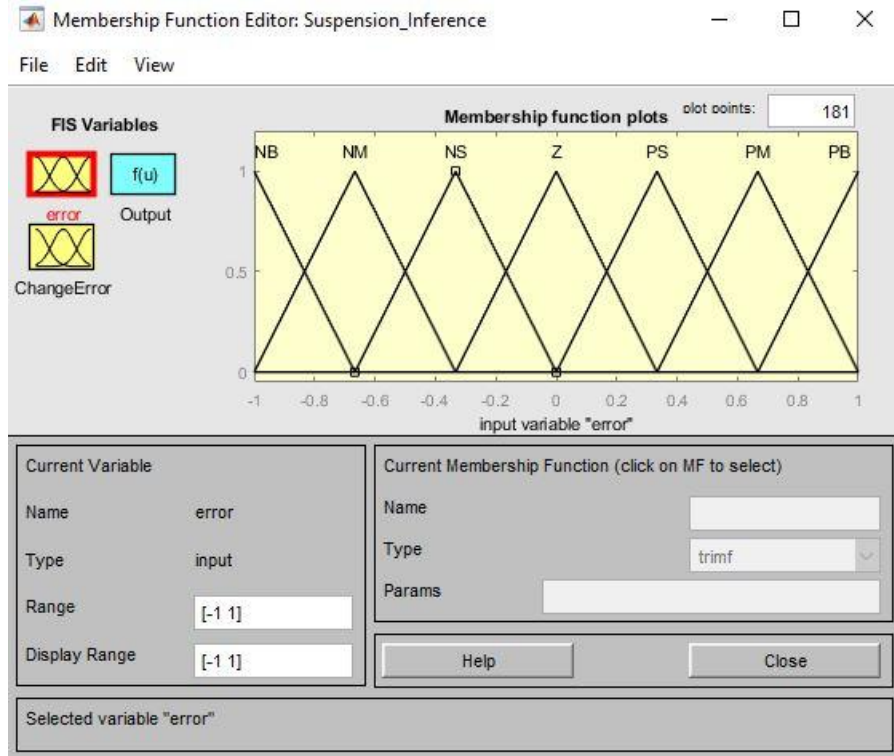
Şekil 58. Tez kapsamında kullanılan kapalı çevrim sistem blok diyagramı.

Şekilde gösterilen ve tez kapsamında kullanılan kapalı çevrim blok diyagram üzerinde, konum farkının kontrolör işaretine bölümü olarak ifade edilen birinci transfer fonksiyonu denklem 67’de matematiksel çıkarımı yapılan fonksiyonuna ve konum farkının yol profiline bölümü olarak ifade edilen ikinci transfer fonksiyonu ise denklem 68’de matematiksel olarak tezin önceki kısımlarında çıkarımı yapılan fonksiyonuna ilişkin tanımlanmıştır. Buna ek olarak yol profilleri de tüm matematiksel parametreleriyle birlikte tezin önceki kısımlarında detaylı olarak verilen parametreler vasıtasıyla tanımlanmışlardır. Tez kapsamında yapılan bu kontrolör şemasında kullanılan bulanık kontrolör için giriş olarak tanımlanan sistemin hatası ve hata türevi değerleri, alt değer -1 ve üst değer +1 kabul edilerek, bu değerler arasında 7 adet üçgen tip bulanık kümelerle bölünmüşlerdir. Ek olarak üçgen tip bulanık üyelik fonksiyonunun yapısı gereğince hem hata hem de hata türevi değişkenleri için ortak olarak ele alınan tüm bulanık kümelerle ilgili dilsel ifadeleri, sembolleri, alt, tepe ve üst değerleri ile üyelik fonksiyonu tipleri detaylı olarak aşağıda verilen Tablo 13 üzerinde gösterilmiştir.

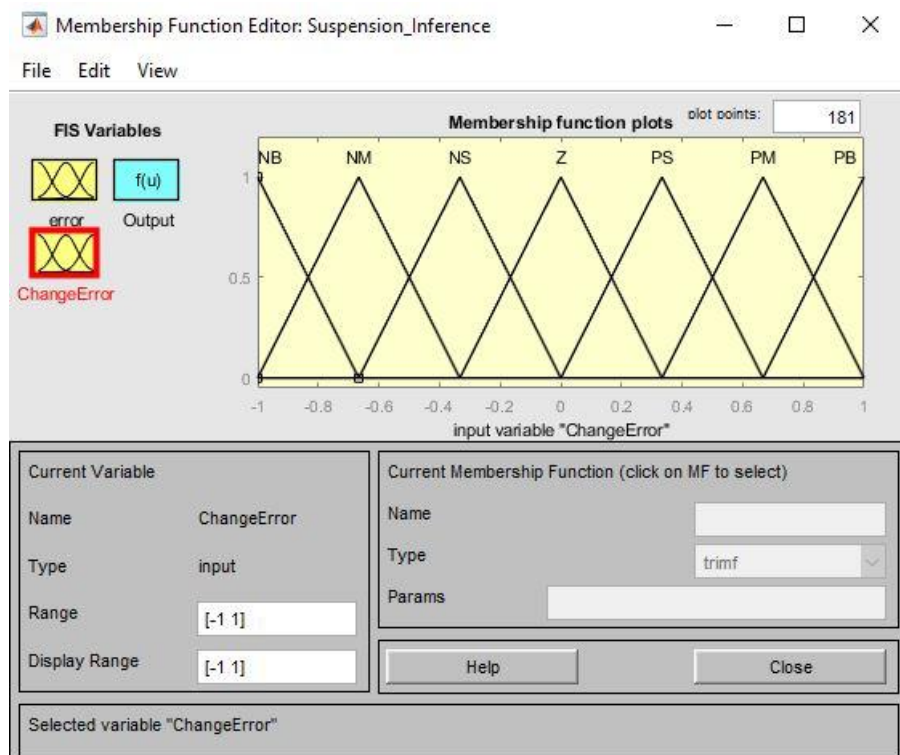
Dilsel İfade	Sembol	Alt Değer	Tepe Değeri	Üst Değer	Üyelik Fonksiyonu Türü
Negatif Büyük	NB	-1	-1	-0,67	Üçgen tip
Negatif Orta	NM	-1	-0,67	-0,33	Üçgen tip
Negatif Küçük	NS	-0,67	-0,33	0	Üçgen tip
Sıfır	Z	-0,33	0	0,33	Üçgen tip
Pozitif Küçük	PS	0	0,33	0,67	Üçgen tip
Pozitif Orta	PM	0,33	0,67	1	Üçgen tip
Pozitif Büyük	PB	0,67	1	1	Üçgen tip

Tablo 13. Tez kapsamında kullanılan bulanık kontrolör girişlerine ait bulanık kural değer tablosu.

Parametreleri verilen üyelik fonksiyonlarının MATLAB üzerinde bulanık mantık arayüzü kullanılarak oluşturulmuş biçimleri de sırasıyla hata ve hata türevi için aşağıda verilen Şekil 59 ve 60 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 59. Hata değişkeni için MATLAB bulanık küme gösterimi.



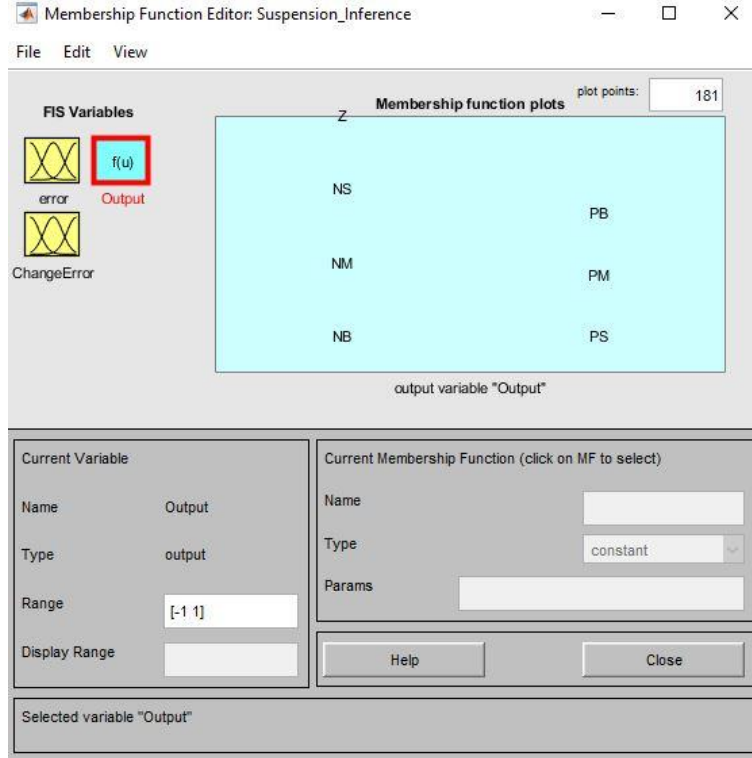
Şekil 60. Hata türevi değişkeni için MATLAB bulanık küme gösterimi.

Kümeleri verilen bulanık girişlerin neticesinde bulanık kontrolörde çıkış olarak tanımlanan kontrol işareti bulanık kümesi için kullanılan yedi üyelik fonksiyonuna ait, dilsel ifadeleri, sembolleri, değerleri ve üyelik fonksiyonu türü detaylı olarak aşağıda verilen Tablo 14 üzerinde gösterilmiştir.

Dilsel İfade	Sembol	Değer	Üyelik fonksiyonu türü
Negatif Büyük	NB	-1	Singleton (tekil)
Negatif Orta	NM	-0,67	Singleton (tekil)
Negatif Küçük	NS	-0,33	Singleton (tekil)
Sıfır	Z	0	Singleton (tekil)
Pozitif Küçük	PS	0,33	Singleton (tekil)
Pozitif Orta	PM	0,67	Singleton (tekil)
Pozitif Büyük	PB	1	Singleton (tekil)

Tablo 14. Tez kapsamında kullanılan bulanık kontrolör çıkışına ait bulanık kural değer tablosu.

Parametreleri verilen çıkış üyelik fonksiyonlarının MATLAB üzerinde bulanık mantık ara yüzü kullanılarak oluşturulmuş biçimi de tanımlanan sabitler neticesinde aşağıda verilen Şekil 61 üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 61. Bulanık kontrolör çıkışı için MATLAB bulanık küme gösterimi.

Tez kapsamında kullanılan, girişleri hata ve hata türevi, çıkışı ise bulanık kontrol işareti olarak verilen bulanık sistemin, ilgili sistem için bulanık kural tabanı aşağıda verilen Tablo 15 üzerinde gösterildiği şekilde uygulanmıştır.

<i>Hata/Hata Türevi</i>	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	Z
NM	NB	NM	NM	NM	NS	Z	PS
NS	NB	NM	NS	NS	Z	PS	PS
Z	NM	NM	NS	Z	PS	PM	PM
PS	NS	NS	Z	PS	PS	PM	PB
PM	NS	Z	PS	PM	PM	PM	PB
PB	Z	PS	PM	PB	PB	PB	PB

Tablo 15. Tez kapsamında kullanılan bulanık kural tabanı.

Tez kapsamında ele alınan süspansiyon sistemi için bulanık kombinasyonu yedişer adet bulanık kümelere ayrılmış girişler için Tablo 15 üzerinde verilen kırk dokuz adet bulanık kural aşağıdaki sırayla ifade edilebilir.

- 1) Eğer hata değeri negatif büyük ve hata türevi değeri negatif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif büyüktür.
- 2) Eğer hata değeri negatif büyük ve hata türevi değeri negatif orta ise o halde çıkış kontrol işareti negatif büyüktür.
- 3) Eğer hata değeri negatif büyük ve hata türevi değeri negatif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif büyüktür.
- 4) Eğer hata değeri negatif büyük ve hata türevi değeri sıfır ise o halde çıkış kontrol işareti negatif büyüktür.
- 5) Eğer hata değeri negatif büyük ve hata türevi değeri pozitif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif ortadır.
- 6) Eğer hata değeri negatif büyük ve hata türevi değeri pozitif orta ise o halde çıkış kontrol işareti negatif küçüktür.
- 7) Eğer hata değeri negatif büyük ve hata türevi değeri pozitif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti sıfırdır.
- 8) Eğer hata değeri negatif orta ve hata türevi değeri negatif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif büyüktür.
- 9) Eğer hata değeri negatif orta ve hata türevi değeri negatif orta ise o halde çıkış kontrol işareti negatif ortadır.
- 10) Eğer hata değeri negatif orta ve hata türevi değeri negatif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif ortadır.
- 11) Eğer hata değeri negatif orta ve hata türevi değeri sıfır ise o halde çıkış kontrol işareti negatif ortadır.
- 12) Eğer hata değeri negatif orta ve hata türevi değeri pozitif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif küçüktür.
- 13) Eğer hata değeri negatif orta ve hata türevi değeri pozitif orta ise o halde çıkış kontrol işareti sıfırdır.
- 14) Eğer hata değeri negatif orta ve hata türevi değeri pozitif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif küçüktür.

- 15) Eğer hata değeri negatif küçük ve hata türevi değeri negatif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif büyüktür.
- 16) Eğer hata değeri negatif küçük ve hata türevi değeri negatif orta ise o halde çıkış kontrol işareti negatif ortadır.
- 17) Eğer hata değeri negatif küçük ve hata türevi değeri negatif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif küçüktür.
- 18) Eğer hata değeri negatif küçük ve hata türevi değeri sıfır ise o halde çıkış kontrol işareti negatif küçüktür.
- 19) Eğer hata değeri negatif küçük ve hata türevi değeri pozitif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti sıfırdır.
- 20) Eğer hata değeri negatif küçük ve hata türevi değeri pozitif orta ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif küçüktür.
- 21) Eğer hata değeri negatif küçük ve hata türevi değeri pozitif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif küçüktür.
- 22) Eğer hata değeri sıfır ve hata türevi değeri negatif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif ortadır.
- 23) Eğer hata değeri sıfır ve hata türevi değeri negatif orta ise o halde çıkış kontrol işareti negatif ortadır.
- 24) Eğer hata değeri sıfır ve hata türevi değeri negatif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif küçüktür.
- 25) Eğer hata değeri sıfır ve hata türevi değeri sıfır ise o halde çıkış kontrol işareti sıfırdır.
- 26) Eğer hata değeri sıfır ve hata türevi değeri pozitif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif küçüktür.
- 27) Eğer hata değeri sıfır ve hata türevi değeri pozitif orta ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif ortadır.
- 28) Eğer hata değeri sıfır ve hata türevi değeri pozitif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif ortadır.
- 29) Eğer hata değeri pozitif küçük ve hata türevi değeri negatif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif küçüktür.
- 30) Eğer hata değeri pozitif küçük ve hata türevi değeri negatif orta ise o halde çıkış kontrol işareti negatif küçüktür.

- 31) Eğer hata değeri pozitif küçük ve hata türevi değeri negatif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti sıfırdır.
- 32) Eğer hata değeri pozitif küçük ve hata türevi değeri sıfır ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif küçüktür.
- 33) Eğer hata değeri pozitif küçük ve hata türevi değeri pozitif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif küçüktür.
- 34) Eğer hata değeri pozitif küçük ve hata türevi değeri pozitif orta ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif ortadır.
- 35) Eğer hata değeri pozitif küçük ve hata türevi değeri pozitif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif büyüktür.
- 36) Eğer hata değeri pozitif orta ve hata türevi değeri negatif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti negatif küçüktür.
- 37) Eğer hata değeri pozitif orta ve hata türevi değeri negatif orta ise o halde çıkış kontrol işareti sıfırdır.
- 38) Eğer hata değeri pozitif orta ve hata türevi değeri negatif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif küçüktür.
- 39) Eğer hata değeri pozitif orta ve hata türevi değeri sıfır ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif ortadır.
- 40) Eğer hata değeri pozitif orta ve hata türevi değeri pozitif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif ortadır.
- 41) Eğer hata değeri pozitif orta ve hata türevi değeri pozitif orta ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif ortadır.
- 42) Eğer hata değeri pozitif orta ve hata türevi değeri pozitif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif büyüktür.
- 43) Eğer hata değeri pozitif büyük ve hata türevi değeri negatif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti sıfırdır.
- 44) Eğer hata değeri pozitif büyük ve hata türevi değeri negatif orta ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif küçüktür.
- 45) Eğer hata değeri pozitif büyük ve hata türevi değeri negatif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif ortadır.
- 46) Eğer hata değeri pozitif büyük ve hata türevi değeri sıfır ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif büyüktür.

- 47) Eğer hata değeri pozitif büyük ve hata türevi değeri pozitif küçük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif büyüktür.
- 48) Eğer hata değeri pozitif büyük ve hata türevi değeri pozitif orta ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif büyüktür.
- 49) Eğer hata değeri pozitif büyük ve hata türevi değeri pozitif büyük ise o halde çıkış kontrol işareti pozitif büyüktür.

Giriş ve çıkış değişkenleri için verilen üyelik fonksiyonu tipleri ve ilişkili değer aralıklarına bağlı kalınarak, bulanık kural kombinasyonu da verildiği gibi oluşturulduktan sonra, tez kapsamında işletilen tüm ilişkili kontrol ve BBBC optimizasyon süreci sırasıyla aşağıdaki gibi açıklanabilir.

Öncelikli olarak MATLAB/Simulink içerisinde Şekil 58 üzerinde verilen blok diyagram sistemi, içerisinde bulunan tüm bileşenlerle birlikte kurulur ve gerekli bağlantılar yapılır. Daha sonra test edilecek bozucu yol profili, tek tümsek, çift tümsek, sinüzoidal yol profili, rastgele yol profili ya da rastgele yol profiliyle birleştirilen tek tümsek yol profilleri arasından seçilir. Daha sonra tezin önceki kısımlarında belirtilen denklem 67 ve 68'in simülasyona dahil edilebilmesi adına bu transfer fonksiyonlarının iç dinamiklerinde bulunan kütle, damper ve yay değişkenlerinin katsayıları ve ilgili transfer fonksiyonları simülasyona tanımlanır. Ardından sistemde tercih edilen performans kriterine göre BBBC optimizasyon metodu aracılığıyla iyileştirme yapılabilmesi için referans değer belirlemek amacıyla süspansiyonun pasif hali (kontrolör olmayan pasif süspansiyon sistemi) üzerinden hangi performans kriteri işletilecekse, ilgili performans kriteri amaç fonksiyonu olarak kabul edilerek referans değeri alınır ve optimizasyonun elde edilen referans değerini iyileştirmesi hedeflenen kat doğrultusunda durma katsayısı tanımlanır. Pasif sistemden elde edilen performans değeri, belirlenen durma katsayısına bölünerek durma kriteri belirlenir. Daha sonra BBBC optimizasyon algoritmasının çeyrek süspansiyon sistemi üzerinde işletilebilmesi için tanımlanan katsayı aralıklarından popülasyon sayısı kadar rastgele sayı setleri oluşturulur. Bu değişkenlerinin sayı setleri olarak adlandırılmasının sebebi, her bir popülasyon üyesinde çok boyutlu değer barındırmasıdır. Her bir popülasyon üyesi bünyesinde 11 adet değişkeni barındırır. Bu değişkenler tez kapsamında ele alınan sistem için sırasıyla; hata katsayısı, hata türevi katsayısı, negatif büyük, negatif orta, negatif küçük, pozitif küçük, pozitif orta ve pozitif büyük üyelik fonksiyonlarının değerleri, oransal, integral ve türev PID kontrolör

katsayıları olarak bir sıraya mutabık tutulur. Belirlenen popülasyon üye sayısı N olmak üzere, 11 elemandan oluşturulacak bir değişken seti bulunacağı için oluşturulacak olan katsayılar vektörü N satır 11 sütun (Nx11) boyutunda elde edilir. İlgili değişkenlerin katsayı setlerini oluşturabilmek için tez kapsamında hata, hata türevi ve PID kontrolörün içerdiği değişkenlerin katsayıları sistemden gelebilecek maksimum ve minimum değerleri test edilerek, bu sınırlar tüm yol profili koşulları için tespit edilmiştir. Tez kapsamında kullanılan kapalı çevrim kontrol sisteminde hata ve hata türevi değişkenlerinin ilgili yol profilleri için tanımlanan değer aralıkları aşağıda verilen Tablo 16 üzerinde belirtilmiştir.

Değişken Adı	Alt Değer	Üst Değer	Yol Profili
Hata	0,004	0,09	Tek Tümsek
Hata	0,004	0,09	Çift Tümsek
Hata	0,01	0,4	Sinüzoidal Yol
Hata	0,02	0,09	Rastgele Yol
Hata	0,003	0,16	Rastgele ve Tek Tümsek
Hata Türevi	0,1	1,6	Tek Tümsek
Hata Türevi	0,1	1,6	Çift Tümsek
Hata Türevi	0,25	7,5	Sinüzoidal Yol
Hata Türevi	0,5	5	Rastgele Yol
Hata Türevi	0,5	5,7	Rastgele ve Tek Tümsek

Tablo 16. Hata ve hata türevi değişkenleri için katsayı tablosu.

Hata ve hata türevi katsayıları, seçilen yol profiline göre tabloda verildiği gibi tanımlandıktan sonra, popülasyonda eleman olarak bulunacak her bir setin

oluşturulabilmesi için bulanık kontrolörde işletilecek olan 6 adet üyelik fonksiyonunun katsayı aralıkları (-1 ile +1 değerleri arasında olacak şekilde) ve buna ek olarak PID kontrolörde işletilecek olan oransal, integral ve türev değişkenlerinin katsayı aralıkları tüm yol profilleri için ortak tutularak aşağıda verilen Tablo 17 üzerinde belirtilmiştir.

Değişken Adı	Alt Değer	Üst Değer	Yol Profili
NB	-1	-0,67	Tüm yol profilleri
NM	-0,67	-0,33	Tüm yol profilleri
NS	-0,33	0	Tüm yol profilleri
PS	0	0,33	Tüm yol profilleri
PM	0,33	0,67	Tüm yol profilleri
PB	0,67	1	Tüm yol profilleri
K_p	0	250000	Tüm yol profilleri
K_I	0	250000	Tüm yol profilleri
K_D	4000	250000	Tüm yol profilleri

Tablo 17. Üyelik fonksiyonları ile oransal integral ve türev katsayılarının değerler tablosu.

Tüm katsayı aralıkları ve durma kriteri belirlendikten sonra N tane popülasyon üyesi $N \times 11$ vektör olacak şekilde ilk popülasyon adıyla vektör formunda tutulur. Daha sonra ele alınan performans kriteri amaç fonksiyonu olacak şekilde her bir popülasyon üyesi kontrol sisteminde ilgili değerler için yerleştirilerek sistem işletilir ve amaç fonksiyonu değerlerinden oluşan sonuçlar elde edilir. Bu performans kriteri sonuçları, popülasyonda bulunan eleman sayısı kadar sınamaya maruz kalacağı için $N \times 1$ boyutunda bir vektörden oluşmaktadır. Daha sonra oluşturulan ilk popülasyondan elde edilen sonuçlar, durma kriteri ile karşılaştırılır. Bu kıyaslama neticesinde iki ihtimale göre algoritma şekillenmektedir. Eğer ilk popülasyon üyelerinden elde edilen sonuç durma kriterinden daha iyiye (küçükse) en iyi performansı veren değer seti, en iyi popülasyon üyesi olarak kabul edilir ve algoritma durur. Bu durum BBBC optimizasyon algoritması işletilmeden

ilk popülasyondaki rastgele dağılımdan netice elde edilen durumdur, tez kapsamında istenen durum BBBC optimizasyon ile iyileştirilme yapılmasıdır. Algoritmanın ikinci durumu ise, ilk popülasyon üyeleri işletilerek elde edilen sonuçların en iyisinin (en küçük), istenen durma kriterinden daha büyük olması durumudur. Bu koşul sağlandığında sistem BBBC optimizasyon algoritmasını yapmak üzere çalışmaya başlar. İlk popülasyonda oluşturulan üyelerin 11 boyutlu setleri için tüm değişken değerleri (11 değişken için) alınır. Her bir değişken için tezin önceki kısımlarında verilen ağırlık merkezi denklemi (denklem 59) kullanılarak ağırlık merkezi hesaplanır. Elde edilen ağırlık merkezi değeri, tez kapsamında 1 satır 11 sütun (1x11) vektör formuna sahip bir ağırlık merkezi vektörüdür. Vektör formunda olmasının sebebi ise çoklu boyutta (11 değişken için) optimizasyon yapılmasıdır. Daha sonra yine tez kapsamında önceki bölümlerde verilen yeni üye oluşturma denklemi (denklem 60) vasıtasıyla tanımlanan tüm ilgili değişken türleri için N kadar yeni popülasyon üyeleri oluşturulur ve bir sonraki iterasyon işletilmek üzere hazır hale getirilir. Burada ağırlık merkezi hesaplaması yardımıyla yeni popülasyon üyelerinin oluşturulması evresine muadil olarak en iyi değer seçimi (best-fit) de yapılabilir. Bu evre tercih edilecekse, ilk popülasyon üyeleri sisteme verilerek elde edilen performans sonuçları içerisinde en iyi sonucu (ancak bu sonuç, durma kriterine henüz erişemeyen sonuçtur) veren ilgili popülasyon üyesi setinin değerleri (11 değişken için) ağırlık merkezi olarak kabul edilir. Daha sonra bu değişken seti için yeni üye oluşturma denklemi (denklem 60) kullanılarak yeni popülasyon üyeleri oluşturulur ve bir sonraki iterasyon işletilmek üzere hazır hale getirilir. Daha sonra sıradaki ilgili iterasyon için de (ilk popülasyonun tüm üyelerinde işletildiği gibi) sonuçlar elde edilmek üzere popülasyon üyeleri sırasıyla çeyrek araç süspansiyon sistemine testi icra edilen yol profiliyle birlikte verilerek seçilen performans sonuçları elde edilir. Elde edilen sonuçlar, takip edecek (ya da etmeyecek) her iterasyon için, ilgili performansın durma kriteri değeri ile kıyaslanarak algoritmanın sürekliliği sağlanır. İterasyonlarda elde edilen performans sonuçları istenen durma değerinden küçük olacak değer elde edilinceye kadar BBBC anlatılan minvalde kendisini tekrarlayarak sürekliliği sağlanır. Bu yüksek lisans tezi için ele alınan ve detayları ile anlatılan tüm bu konu akışı içerisinde, sistemin simülasyonu MATLAB/Simulink üzerinde gerekli tüm blok diyagram bileşenleri kullanılarak kurulmuştur. Ek olarak kodlama tarafından bakıldığında, tez kapsamında ilk olarak sistem parametrelerin tanımları yapılarak ilgili matematiksel ifadeleri bulunan

transfer fonksiyonları kodlanmış ve değerleri simülasyon tarafında yürütülen blok diyagramın ilgili bloklarına gömülmüştür. Daha sonra hem ilgili performans kriterine göre referans alma işlemi için yapılan başlangıç kademesinde hem de BBBC optimizasyon algoritmasının süregelen her iterasyonunda elde edilen performans kriterleri ve bu performansa ilişkin tüm popülasyon üyeleri, her simülasyon sürecinde elde edildikten sonra MATLAB çalışma ortamına aktarım blokları (to workspace) vasıtasıyla, her iterasyonda her popülasyon üyesi için özgün olacak şekilde elde edilen performans kriterleri ilgili değişkenler de sıralı olarak ilgili değişkenlerin hafızalarında tutulacak biçimde kodlanmıştır. Başlangıçta oluşturulan popülasyonlar için ve daha sonrasında BBBC optimizasyon algoritmasının barındırdığı tüm hesaplamalar çerçevesinde, yeni popülasyonlar üretilirken, belirlenen alt ve üst sınırlar içerisinde, popülasyon üye sayısına bağlı olacak şekilde rastgele sayı üreteç fonksiyonları da sistemde bulunan her değişken (11 değişken) için özgün olacak bir biçimde yazılmış ve temel kod döngüsünde sağlıklı çalışır olarak entegre edilmiştir. Yapılan tüm testler için, ilk popülasyon üretimlerinde ve BBBC optimizasyon algoritmasının içerisinde yeni jenerasyon üretim fonksiyonlarının çalışması ve üretilen değerlerin sistemde ilgili değişken parametreleri yerine konmaları işlemi, bu durumun sürekliliğini sağlayabilmek adına algoritma içerisinde tekrarlı işleme dayalı döngülerle (for-loop), performansların kıyaslanmaları ve BBBC optimizasyon algoritmasının iterasyon durumuna devam edilmesine koşul teşkil edecek muhakemeleri yapmak için ise gerekli şart komutları (if-else) ve sistemde koşturulan BBBC optimizasyon algoritmasının iterasyonlarının son bulmasının bağlı bulunduğu durma şartı, bulunan en iyi performans kriterinin durma kriterinden küçük olana kadar devam etmesi ana koşulu olarak kabul edildiğinde, tekrarlı işlemlerden kaçınarak ana döngü içerisinde (while-loop) tüm parametreleri barındıracak biçimde kodlanmıştır. Anlatılan ve uygulaması yapılan tüm bu tez kapsamındaki işlerde bahsedilen performans kriterleri, tezin takip eden bir sonraki kısmında açıklanacaktır.

5.4. Ele Alınan Performans Kriterleri

Performans kriterleri, kapalı çevrim kontrol sistemlerinde ele alınan sistem için değerlendirme pariteleridir. Kontrol perspektifinden bakıldığında, performans kriterleri, sistemin uygulanan kontrolör biçimleri arasındaki mukayesesinin yapılabilmesi için kullanılır. En yaygın olarak bilinen ve kullanılan hata çeşitlerinin başlıca mutlak hata integrali (IAE) ve karesel hata integrali (ISE) olduğu söylenebilir.

5.4.1. Mutlak Hata İntegrali (IAE)

IAE kriteri, kapalı çevrim kontrol sisteminin referans girişten çıkış cevabı farkı alınarak elde edilen hatanın mutlak değer içerisinde ele alınan sistemin koşurulduğu süreç boyunca toplanılmasıyla elde edilir. IAE performans kriteri aşağıda verilen denklem 72 üzerinde gösterilmiştir.

$$IAE = \int_0^t |e(t)| dt \quad (72)$$

5.4.2. Karesel Hata İntegrali (ISE)

ISE kriteri, kapalı çevrim kontrol sisteminin referans girişten çıkış cevabı farkı alınarak elde edilen hatanın karesi alınarak sistemin koşurulduğu süreç boyunca toplanmasıyla elde edilir. ISE performans kriteri aşağıda verilen denklem 73 üzerinde gösterilmiştir.

$$ISE = \int_0^t e^2(t) dt \quad (73)$$

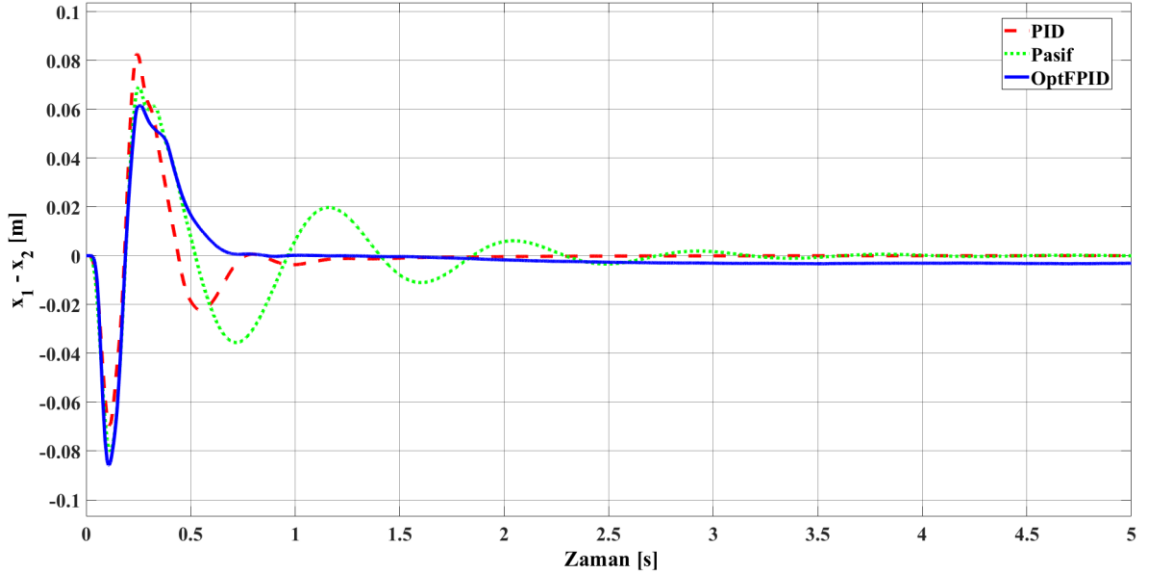
6. SONUÇLAR

Yapılan bu tez çalışmasında, çeyrek araç süspansiyon modeli üzerinde referans giriş sıfır baz alınarak, kapalı çevrim kontrol sisteminin çıkış ifadesi taşıt ile tekerlek arasındaki konum farkı ($x_1 - x_2$) olarak ele alınmıştır. Bu kapalı çevrim kontrol sisteminde 11 değişken ele alınarak BBBC optimizasyon metodu aracılığıyla bu katsayıların amaç fonksiyonu çerçevesinde optimize edildiği direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolör uygulanmıştır. Bu kapsamda çeyrek araç süspansiyon modeli için tasarlanan optimize bulanık PID kontrolör, tek tümsek, çift tümsek, sinüzoidal, rastgele ve rastgele ile tek tümsek birleşimi yol profillerinde test edilmiştir. Testler performans açısından, optimizasyonda amaç fonksiyonları olarak belirlenen karesel hata integrali (ISE) ve mutlak hata integrali (IAE) kriterleri üzerinde kıyaslanmıştır. Yapılan kıyaslamalar neticesinde tez kapsamında önerilen kontrolörden, çeyrek araç süspansiyon sistemine ait pasif durum ve çeyrek araç süspansiyon sistemine tasarlanan geleneksel PID kontrolöre göre daha iyi sonuç verdiği elde edilmiştir.

Çeyrek araç süspansiyon sisteminin önerilen kontrolör yapısı için tek tümsek yol profili üzerinde çeyrek araç pasif süspansiyon sistemi modelinden alınan referans ISE performans kriteri değeri 0,001591 olarak elde edilmiştir. Sistemde BBBC optimizasyon yöntemi ile tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün kullanılmasıyla ve kontrolörün pratik anlamda daha uygulanabilir olması amacıyla, sisteme kontrolör çıkışında +1000 ile -1000 değerleri arasında saturasyon sınırlaması getirilmesi ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen ISE performans kriteri ise $7,68 \times 10^{-4}$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu performans kriterini meydana getiren direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün, optimizasyon sonrası elde edilen iç parametre değerleri sırasıyla hata, hata türevi, NB, NM, NS, PS, PM, PB, K_p , K_I ve K_d katsayıları olmak üzere 0,0732, 0,8377, -0,7913, -0,6166, -0,2255, 0,0661, 0,5394, 0,9017, 2,3084e+05, 1,5804e+04 ve 3,6344e+04 değerlerine sahiptir.

Pasif durum ile önerilen kontrolör yapısı sonucunda elde edilen ISE performans kriterleri arasındaki bağlam sistemin kaç kat iyileştirildiği açısından incelendiğinde, önerilen metodun sistemin pasif durum performansına göre 2,02 kat daha iyi sonuç verdiği hesaplanmıştır. Ele alınan performans değerlendirmesinin, pasif durum, geleneksel PID tasarımı ile kontrol edilmiş sistem ve BBBC optimizasyon metodu kullanılarak tasarlanan

direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörler altındaki çıkış cevabı aşağıda Şekil 62 üzerinde verilen kıyaslama grafiği üzerinde gösterilmiştir.



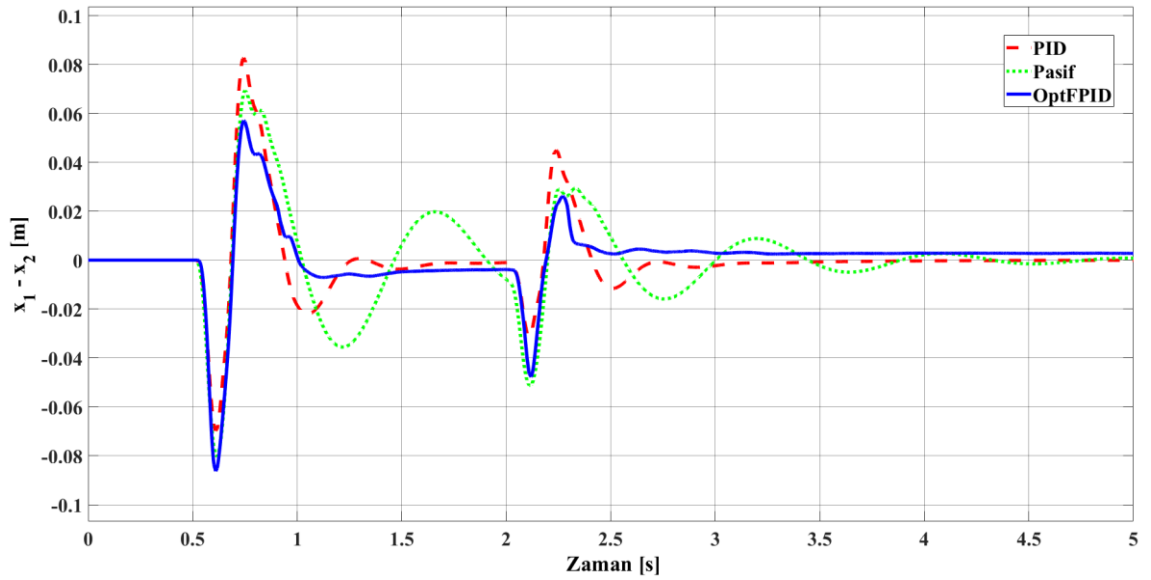
Şekil 62. Tek tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (ISE).

Verilen grafik üzerinde x eksenini saniye biriminde simülasyon süresini belirtirken, y eksenini ise metre biriminde ($x_1 - x_2$) yer değiştirme çıkışını belirtmektedir. Görüleceği üzere, BBBC optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolör, tek tümsek yol profili için pasif durum ve geleneksel PID kontrolörden 0,25 – 0,50 saniyeleri arasında gelen yol profiline karşı daha iyi kompanzasyon davranışı sergileyerek daha kısa bir yerleşme zamanı ve daha az yüzdellik aşım yaparak, süspansiyonun daha hızlı tepki vermesi açısından daha iyi sonuç sergilemiştir.

Diğer bir simülasyonda, çeyrek araç süspansiyon sisteminin önerilen kontrolör yapısı için çift tümsek yol profili üzerinde çeyrek araç pasif süspansiyon sistemi modelinden alınan referans ISE performans kriteri değeri 0,002011 olarak elde edilmiştir. Sistemde BBBC optimizasyon yöntemi ile tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün kullanılmasıyla ve kontrolörün pratik anlamda daha uygulanabilir olması amacıyla, sisteme kontrolör çıkışında +1000 ile -1000 değerleri arasında satürasyon sınırlaması getirilmesi ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen ISE performans kriteri ise $1,0770 \times 10^{-3}$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu performans kriterini meydana getiren direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün, optimizasyon sonrası elde edilen iç parametre değerleri sırasıyla hata, hata türevi, NB, NM, NS, PS, PM, PB, K_p , K_I ve K_d

katsayıları olmak üzere 0,0229, 1,3987, -0,8449, -0,6631, -0,1747, 0,0213, 0,4195, 0,7173, 2,4025e+05, 27,7456, 1,6307e+05 değerlerine sahiptir.

Pasif durum ile önerilen kontrolör yapısı sonucunda elde edilen ISE performans kriterleri arasındaki bağlam sistemin kaç kat iyileştirildiği açısından incelendiğinde, önerilen metodun sistemin pasif durum performansına göre 1,86 kat daha iyi sonuç verdiği hesaplanmıştır. Ele alınan performans değerlendirmesinin, pasif durum, geleneksel PID tasarımı ile kontrol edilmiş sistem ve BBBC optimizasyon metodu kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörler altındaki çıkış cevabı aşağıda Şekil 63 üzerinde verilen kıyaslama grafiği üzerinde gösterilmiştir.



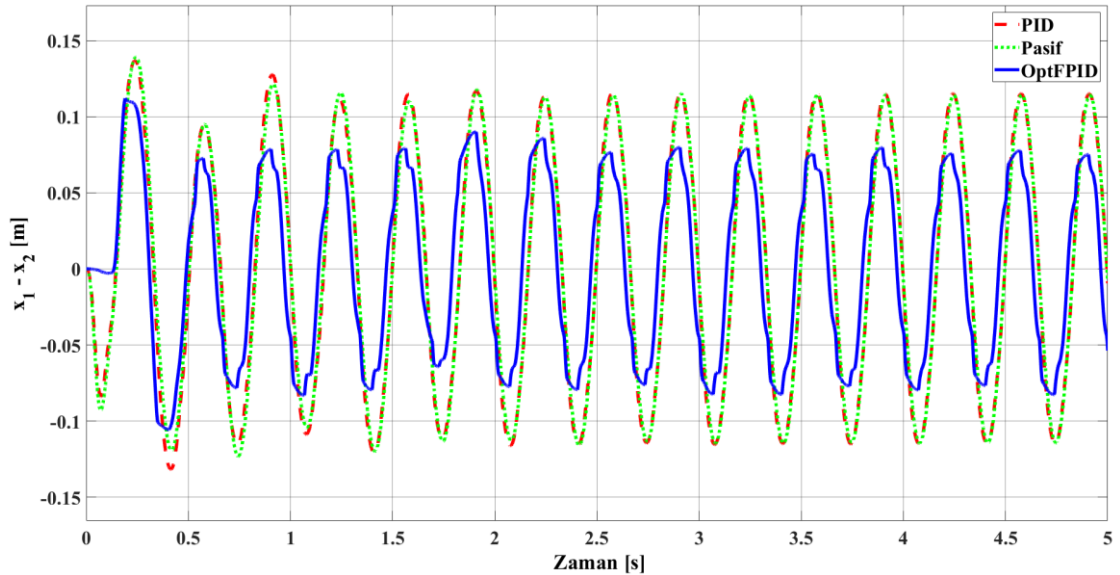
Şekil 63. Çift tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (ISE).

Verilen grafik üzerinde x eksenini saniye biriminde simülasyon süresini belirtirken, y eksenini ise metre biriminde ($x_1 - x_2$) yer değiştirme çıkışını belirtmektedir. Görüleceği üzere, BBBC optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolör, çift tümsek yol profili için pasif durum ve geleneksel PID kontrolörden 0,50 - 0,75 ve 2,00 - 2,25 saniyeleri arasında gelen yol profiline karşı daha iyi kompanzasyon davranışı sergileyerek daha kısa bir yerleşme zamanı ve daha az yüzdellik aşım yaparak, süspansiyonun daha hızlı tepki vermesi açısından daha iyi sonuç sergilemiştir.

Bir diğer simülasyonda, çeyrek araç süspansiyon sisteminin önerilen kontrolör yapısı için sinüzoidal yol profili üzerinde çeyrek araç pasif süspansiyon sistemi modelinden alınan

referans ISE performans kriteri değeri 0,032825 olarak elde edilmiştir. Sistemde BBBC optimizasyon yöntemi ile tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün kullanılmasıyla ve kontrolörün pratik anlamda daha uygulanabilir olması amacıyla, sisteme kontrolör çıkışında +1000 ile -1000 değerleri arasında satürasyon sınırlaması getirilmesi ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen ISE performans kriteri ise $1,7933 \times 10^{-2}$ olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu performans kriterini meydana getiren direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün, optimizasyon sonrası elde edilen iç parametre değerleri sırasıyla hata, hata türevi, NB, NM, NS, PS, PM, PB, K_p , K_I ve K_d katsayıları olmak üzere 0,1641, 6,8066, -0,7508, -0,4961, -0,1654, 0,2504, 0,5054, 0,7166, 2,3568e+05, 2,1642e+05, 1,4998e+05 değerlerine sahiptir.

Pasif durum ile önerilen kontrolör yapısı sonucunda elde edilen ISE performans kriterleri arasındaki bağlam sistemin kaç kat iyileştirildiği açısından incelendiğinde, önerilen metodun sistemin pasif durum performansına göre 1,83 kat daha iyi sonuç verdiği hesaplanmıştır. Ele alınan performans değerlendirmesinin, pasif durum, geleneksel PID tasarımı ile kontrol edilmiş sistem ve BBBC optimizasyon metodu kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörler altındaki çıkış cevabı aşağıda Şekil 64 üzerinde verilen kıyaslama grafiği üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 64. Sinüzoidal yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (ISE).

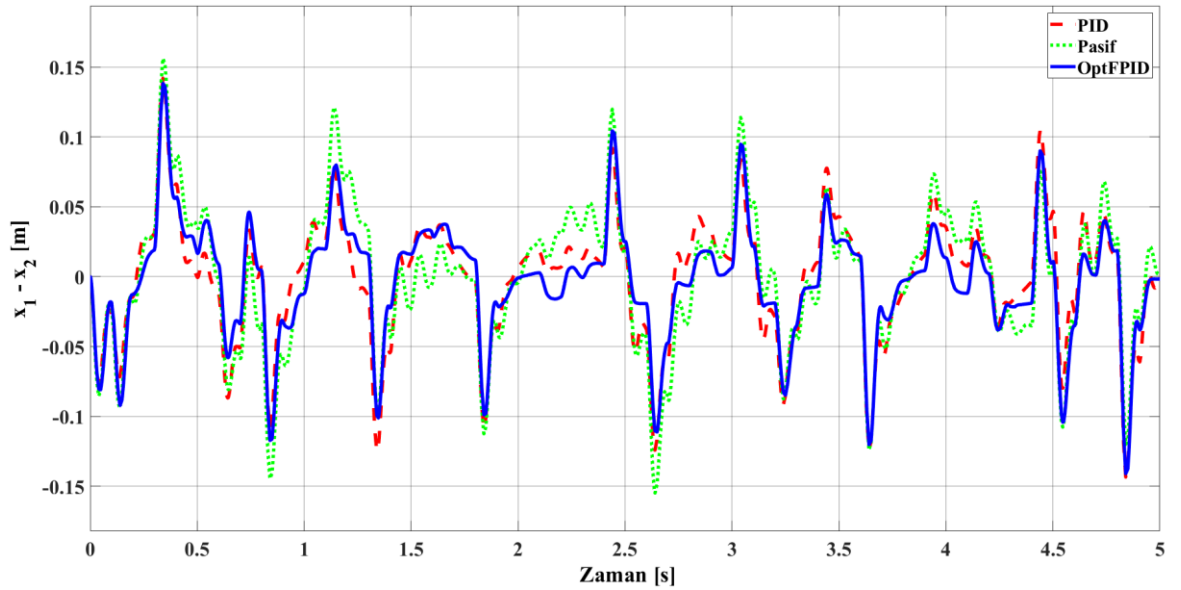
Verilen grafik üzerinde x eksenini saniye biriminde simülasyon süresini belirtirken, y eksenini ise metre biriminde ($x_1 - x_2$) yer değiştirme çıkışını belirtmektedir. Görüleceği üzere, BBBC optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık

PID kontrolör, sinüzoidal yol profili için pasif durum ve geleneksel PID kontrolörden tüm simülasyon saniyeleri arasında gelen yol profiline karşı daha dengeli bir bant aralığında salınım davranışı sergileyerek süspansiyonun daha hızlı tepki vermesi ve sinüzoidal dalgaları sönmüleyebilme yeteneği açısından daha iyi sonuç sergilemiştir.

Bir diğer simülasyonda, çeyrek araç süspansiyon sisteminin önerilen kontrolör yapısı için rastgele yol profili üzerinde çeyrek araç pasif süspansiyon sistemi modelinden elde edilen ISE performans kriteri değeri 0,012912 olarak elde edilmiştir. Sistemde BBBC optimizasyon yöntemi ile tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün kullanılmasıyla ve kontrolörün pratik anlamda daha uygulanabilir olması amacıyla, sisteme kontrolör çıkışında +1000 ile -1000 değerleri arasında satürasyon sınırlaması getirilmesi ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen ISE performans kriteri ise 0,0084 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu performans kriterini meydana getiren direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün, optimizasyon sonrası elde edilen iç parametre değerleri sırasıyla hata, hata türevi, NB, NM, NS, PS, PM, PB, K_p , K_I ve K_d katsayıları olmak üzere 0,0603, 4,9722, -0,9759, -0,3768, -0,0945, 0,2280, 0,3517, 0,8276, 2,0974e+05, 9,0417e+04, 2,2585e+05 değerlerine sahiptir.

Pasif durum ile önerilen kontrolör yapısı sonucunda elde edilen ISE performans kriterleri arasındaki bağlam sistemin kaç kat iyileştirildiği açısından incelendiğinde, önerilen metodun sistemin pasif durum performansına göre 1,53 kat daha iyi sonuç verdiği hesaplanmıştır. Ele alınan performans değerlendirmesinin, pasif durum, geleneksel PID tasarımı ile kontrol edilmiş sistem ve BBBC optimizasyon metodu kullanılarak tasarlanan

direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörler altındaki çıkış cevabı aşağıda Şekil 65 üzerinde verilen kıyaslama grafiği üzerinde gösterilmiştir.



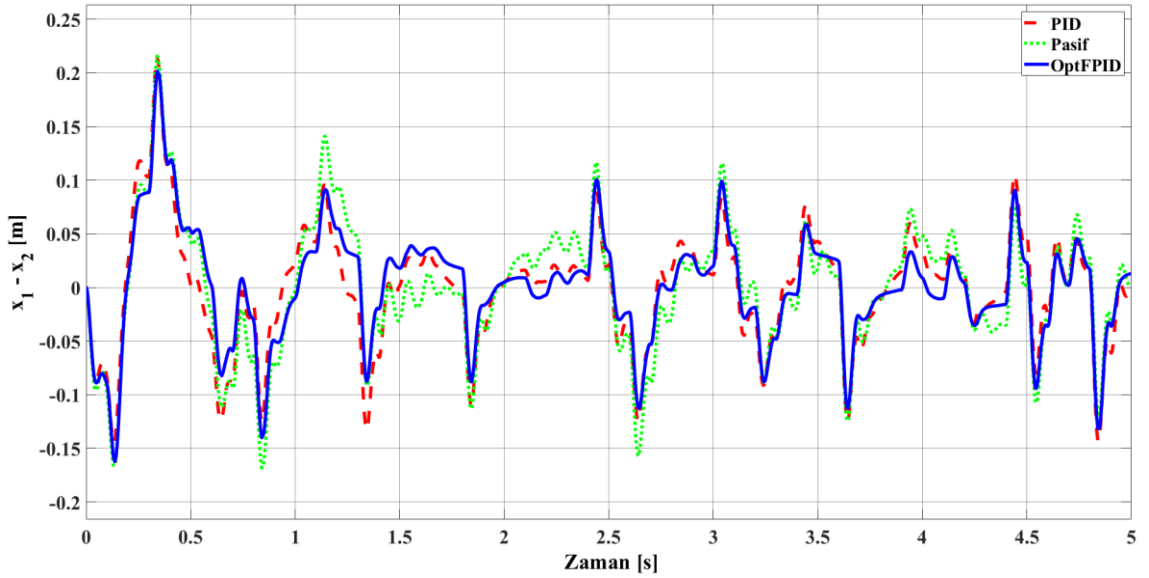
Şekil 65. Rastgele yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (ISE).

Verilen grafik üzerinde x eksenini saniye biriminde simülasyon süresini belirtirken, y eksenini ise metre biriminde ($x_1 - x_2$) yer değiştirme çıkışını belirtmektedir. Görüleceği üzere, BBBC optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolör, rastgele yol profili için pasif durum ve geleneksel PID kontrolörden tüm simülasyon saniyeleri arasında gelen yol profiline karşı daha dengeli bir bant aralığında salınım davranışı sergileyerek süspansiyonun daha hızlı tepki vermesi ve rastgele yol profilinden gelen etkilerin sönmülenebilmesi açısından daha iyi sonuç sergilemiştir.

Bir diğer simülasyonda, çeyrek araç süspansiyon sisteminin önerilen kontrolör yapısı için rastgele ve tek tümsek birleşimi yol profili üzerinde çeyrek araç pasif süspansiyon sistemi modelinden alınan referans ISE performans kriteri değeri 0,018403 olarak elde edilmiştir. Sistemde BBBC optimizasyon yöntemi ile tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün kullanılmasıyla ve kontrolörün pratik anlamda daha uygulanabilir olması amacıyla, sisteme kontrolör çıkışında +1000 ile -1000 değerleri arasında satürasyon sınırlaması getirilmesi ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen ISE performans kriteri ise 0,0122 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu performans kriterini meydana getiren direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün, optimizasyon sonrası elde edilen iç parametre değerleri sırasıyla hata, hata türevi, NB, NM, NS, PS, PM, PB, K_p , K_I

ve K_d katsayıları olmak üzere 0,1137, 5,6901, -0,9466, -0,4513, -0,1677, 0,1717, 0,5205, 0,8140, 2,4796e+05, 1,6097e+05, 2,4555e+05 değerlerine sahiptir.

Pasif durum ile önerilen kontrolör yapısı sonucunda elde edilen ISE performans kriterleri arasındaki bağlam sistemin kaç kat iyileştirildiği açısından incelendiğinde, önerilen metodun sistemin pasif durum performansına göre 1,50 kat daha iyi sonuç verdiği hesaplanmıştır. Ele alınan performans değerlendirmesinin, pasif durum, geleneksel PID tasarımı ile kontrol edilmiş sistem ve BBBC optimizasyon metodu kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörler altındaki çıkış cevabı aşağıda Şekil 66 üzerinde verilen kıyaslama grafiği üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 66. Rastgele ve tek tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (ISE).

Verilen grafik üzerinde x eksenini saniye biriminde simülasyon süresini belirtirken, y eksenini ise metre biriminde ($x_1 - x_2$) yer değiştirme çıkışını belirtmektedir. Görüleceği üzere, BBBC optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolör, sinüzoidal rastgele ve tek tümsek yol profili için pasif durum ve geleneksel PID kontrolörden tüm simülasyon saniyeleri arasında gelen yol profiline karşı daha dengeli bir bant aralığında salınım davranışı sergileyerek süspansiyonun daha hızlı tepki vermesi ve rastgele yol profilinden gelen etkilerin sönmülenebilmesi açısından daha iyi sonuç sergilemiştir.

Yukarıda anlatılan tüm ISE performans kriteri kıyaslamalarına ait, katsayılar ve sonuçlara ait sonuç tablosunu aktarabilmek adına birtakım kısaltmalardan faydalanılacaktır. Değişkenlere ait kısaltmalar sırasıyla; hata katsayısı D1, hata türevi katsayısı D2, NB üyelik fonksiyonu D3, NM üyelik fonksiyonu D4, NS üyelik fonksiyonu D5, PS üyelik fonksiyonu D6, PM üyelik fonksiyonu D7, PB üyelik fonksiyonu D8, oransal katsayı (K_p) D9, integral katsayısı (K_I) D10, türev katsayısı (K_D) D11, tek tümsek yol profili Y1, çift tümsek yol profili Y2, sinüzoidal yol profili Y3, rastgele yol profili Y5, referans ISE değeri ISEREF, elde edilen ISE değeri ISESONUC, satürasyon değeri SD ve son olarak performans iyileştirme katı PİK olmak üzere tüm yol profilleri için ilgili parametrelerden elde edilen ISE değerleri, referans değerler, satürasyon miktarı ve sistem iyileştirme katsayısına bağlı olarak hesaplanan performans iyileştirme yüzdeleriyle birlikte aşağıda verilen Tablo 18 üzerinde gösterilmiştir.

	D1	D2	D3	D4	D5	D6	D7	D8	D9	D10	D11	YOL	ISE REF	ISESONUC	SD	PİK
0,1137	0,0732	0,0229	0,1641	0,0603	0,1137	0,1717	0,5205	0,8140	2,4796e+05	1,6097e+05	2,4555e+05	Y5	0,018403	0,0122	±1000	1,50
5,6901	0,8377	1,3987	6,8066	4,9722	5,6901	0,2280	0,3517	0,8276	2,0974e+05	9,0417e+04	2,2585e+05	Y4	0,012912	0,0084	±1000	1,53
-0,9466	-0,7913	-0,8449	-0,7508	-0,9759	-0,9466	0,2504	0,5054	0,7166	2,3568e+05	2,1642e+05	1,4998e+05	Y3	0,032825	1,7933e-02	±15000	1,83
-0,4513	-0,6166	-0,6631	-0,4961	-0,3768	-0,4513	0,0213	0,4195	0,7173	2,4025e+05	27,7456	1,6307e+05	Y2	0,002011	1,077e-03	±1000	1,86
-0,1677	-0,2255	-0,1747	-0,1654	-0,0945	-0,1677	0,0661	0,5394	0,9017	2,3084e+05	1,5804e+04	3,6344e+04	Y1	0,001591	7,86e-04	±1000	2,02

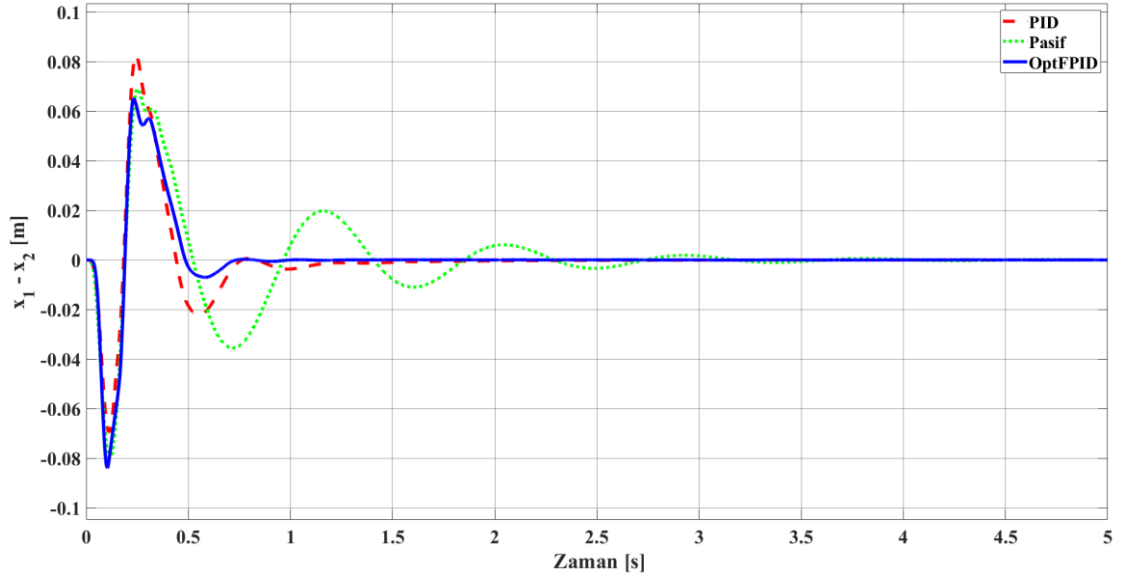
Tablo 18. Tüm yol profilleri için değişkenler ve ISE performans değerleri tablosu.

Tablo 18’de verildiği üzere, hata katsayısı, hata türev katsayısı, NB, NM, NS, PS, PM, PB üyelik fonksiyonları, oransal, integral ve türev katsayıları doğrultusunda (D1-D11), tüm yol profilleri için (Y1-Y5) referans ISE ve elde edilen ISE sonuçları ilgili satürasyon

değerleri (SD) altında gösterilmiştir. Bu tabloya göre, kontrolör yapısında bulunan 11 değişken için, tek tümsek yol profili için referans alınan ISE performans kriterine göre 2,02 kat, çift tümsek yol profili için referans alınan ISE performans kriterine göre 1,86 kat, sinüzoidal yol profili için referans alınan ISE performans kriterine göre 1,83 kat, rastgele yol profili için referans alınan ISE performans kriterine göre 1,53 kat ve son olarak rastgele ile tek tümsek yol profillerinin birleşiminden oluşan yol profili için referans alınan ISE performans kriterine göre 1,50 kat kontrolör kaynaklı performans iyileştirmeleri elde edilmiştir.

Mutlak hata integrali (IAE) ele alınarak gerçekleştirilen bir diğer simülasyonda çeyrek araç süspansiyon sisteminin önerilen kontrolör yapısı için tek tümsek yol profili üzerinde çeyrek araç pasif süspansiyon sistemi modelinden alınan referans IAE performans kriteri değeri 0,043715 olarak elde edilmiştir. Sistemde BBBC optimizasyon yöntemi ile tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün kullanılmasıyla ve kontrolörün pratik anlamda daha uygulanabilir olması amacıyla, sisteme kontrolör çıkışında +1000 ile -1000 değerleri arasında saturasyon sınırlaması getirilmesi ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen IAE performans kriteri ise 0,019747 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu performans kriterini meydana getiren direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün, optimizasyon sonrası elde edilen iç parametre değerleri sırasıyla hata, hata türevi, NB, NM, NS, PS, PM, PB, K_p , K_i ve K_d katsayıları olmak üzere 0,0858, 0,8991, -0,9439, -0,3862, -0,0602, 0,0504, 0,3941, 0,7506, 2,4260e+05, 1,8384e+05, 4,0056e+03 değerlerine sahiptir.

Pasif durum ile önerilen kontrolör yapısı sonucunda elde edilen IAE performans kriterleri arasındaki bağlam sistemin kaç kat iyileştirildiği açısından incelendiğinde, önerilen metodun sistemin pasif durum performansına göre 2,21 kat daha iyi sonuç verdiği hesaplanmıştır. Ele alınan performans değerlendirmesinin, pasif durum, geleneksel PID tasarımı ile kontrol edilmiş sistem ve BBBC optimizasyon metodu kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörler altındaki çıkış cevabı aşağıda Şekil 67 üzerinde verilen kıyaslama grafiği üzerinde gösterilmiştir.

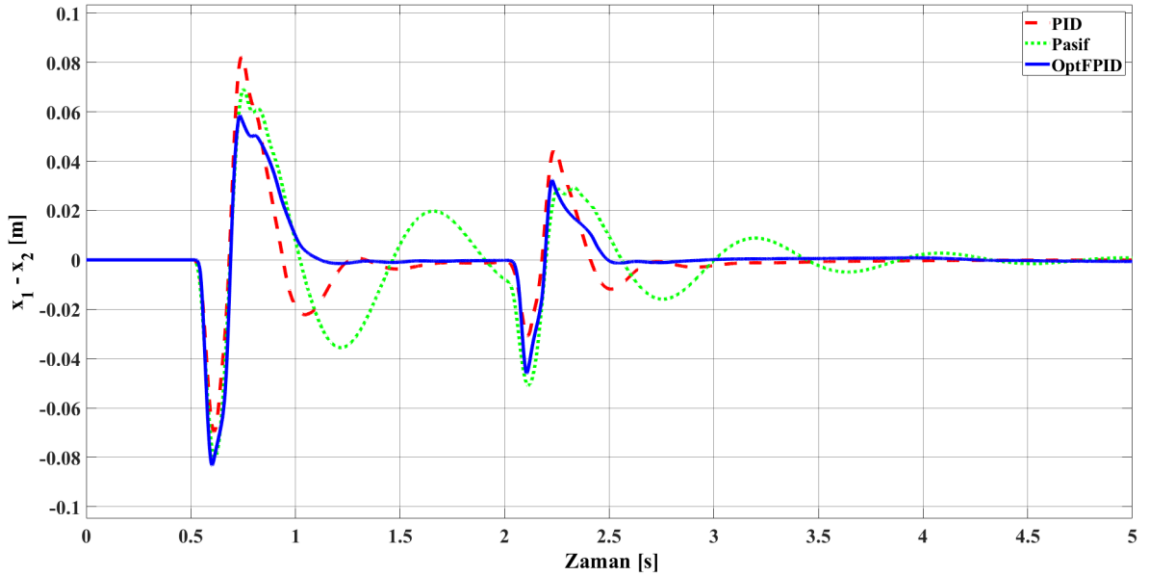


Şekil 67. Tek tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (IAE).

Verilen grafik üzerinde x eksenini saniye biriminde simülasyon süresini belirtirken, y eksenini ise metre biriminde ($x_1 - x_2$) yer değiştirme çıkışını belirtmektedir. Görüleceği üzere, BBBC optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarlanan direkt aksiyon tipi bulanık PID kontrolör, tek tümsek yol profili için pasif durum ve geleneksel PID kontrolörden 0,25 – 0,50 saniyeleri arasında gelen yol profiline karşı daha iyi kompanzasyon davranışı sergileyerek daha kısa bir yerleşme zamanı ve daha az yüzdellik aşım yaparak, kullanıcı konforu açısından daha iyi sonuç sergilemiştir.

Diğer bir simülasyonda, çeyrek araç süspansiyon sisteminin önerilen kontrolör yapısı için çift tümsek yol profili üzerinde çeyrek araç pasif süspansiyon sistemi modelinden alınan referans IAE performans kriteri değeri 0,058829 olarak elde edilmiştir. Sistemde BBBC optimizasyon yöntemi ile tasarlanan direkt aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün kullanılmasıyla ve, kontrolörün pratik anlamda daha uygulanabilir olması amacıyla, sisteme kontrolör çıkışında +1000 ile -1000 değerleri arasında satürasyon sınırlaması getirilmesi ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen IAE performans kriteri ise 0,028956 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu performans kriterini meydana getiren direkt aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün, optimizasyon sonrası elde edilen iç parametre değerleri sırasıyla hata, hata türevi, NB, NM, NS, PS, PM, PB, K_p , K_I ve K_d katsayıları olmak üzere 0,0853, 0,5749, -0,8456, -0,3889, -0,2552, 0,0750, 0,5244, 0,7519, $1,3329e+05$, $2,1790e+05$, $6,5487e+03$ değerlerine sahiptir.

Pasif durum ile önerilen kontrolör yapısı sonucunda elde edilen IAE performans kriterleri arasındaki bağlam sistemin kaç kat iyileştirildiği açısından incelendiğinde, önerilen metodun sistemin pasif durum performansına göre 2,03 kat daha iyi sonuç verdiği hesaplanmıştır. Ele alınan performans değerlendirmesinin, pasif durum, geleneksel PID tasarımı ile kontrol edilmiş sistem ve BBBC optimizasyon metodu kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörler altındaki çıkış cevabı aşağıda Şekil 68 üzerinde verilen kıyaslama grafiği üzerinde gösterilmiştir.



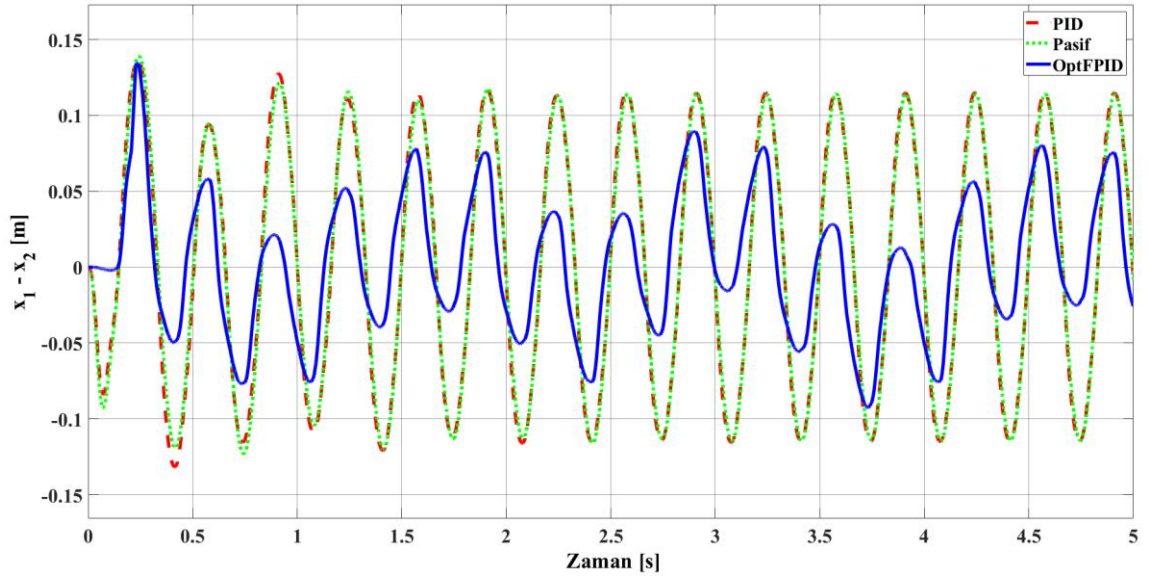
Şekil 68. Çift tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (IAE).

Verilen grafik üzerinde x eksenini saniye biriminde simülasyon süresini belirtirken, y eksenini ise metre biriminde ($x_1 - x_2$) yer değiştirme çıkışını belirtmektedir. Görüleceği üzere, BBBC optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolör, çift tümsek yol profili için pasif durum ve geleneksel PID kontrolörden 0,50- 0,75 ve 2,00- 2,25 saniyeleri arasında gelen yol profiline karşı daha iyi kompanzasyon davranışı sergileyerek daha kısa bir yerleşme zamanı ve daha az yüzdellik aşım yaparak, süspansiyonun daha hızlı tepki vermesi açısından daha iyi sonuç sergilemiştir.

Bir diğer simülasyonda, çeyrek araç süspansiyon sisteminin önerilen kontrolör yapısı için sinüzoidal yol profili üzerinde çeyrek araç pasif süspansiyon sistemi modelinden alınan referans IAE performans kriteri değeri 0,290479 olarak elde edilmiştir. Sistemde BBBC optimizasyon yöntemi ile tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün kullanılmasıyla ve kontrolörün pratik anlamda daha uygulanabilir olması amacıyla,

sisteme kontrolör çıkışında +15000 ile -15000 değerleri arasında satürasyon sınırlaması getirilmesi ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen IAE performans kriteri ise 0,1819 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu performans kriterini meydana getiren direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün, optimizasyon sonrası elde edilen iç parametre değerleri sırasıyla hata, hata türevi, NB, NM, NS, PS, PM, PB, K_p , K_I ve K_d katsayıları olmak üzere 0,3313, 7,3239, -0,7493, -0,4301, -0,3048, 0,1888, 0,6507, 0,7664, $4,7730e+04$, 587,1889, $2,4089e+05$ değerlerine sahiptir.

Pasif durum ile önerilen kontrolör yapısı sonucunda elde edilen IAE performans kriterleri arasındaki bağlam sistemin kaç kat iyileştirildiği açısından incelendiğinde, önerilen metodun sistemin pasif durum performansına göre 1,59 kat daha iyi sonuç verdiği hesaplanmıştır. Ele alınan performans değerlendirmesinin, pasif durum, geleneksel PID tasarımı ile kontrol edilmiş sistem ve BBBC optimizasyon metodu kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörler altındaki çıkış cevabı aşağıda Şekil 69 üzerinde verilen kıyaslama grafiği üzerinde gösterilmiştir.

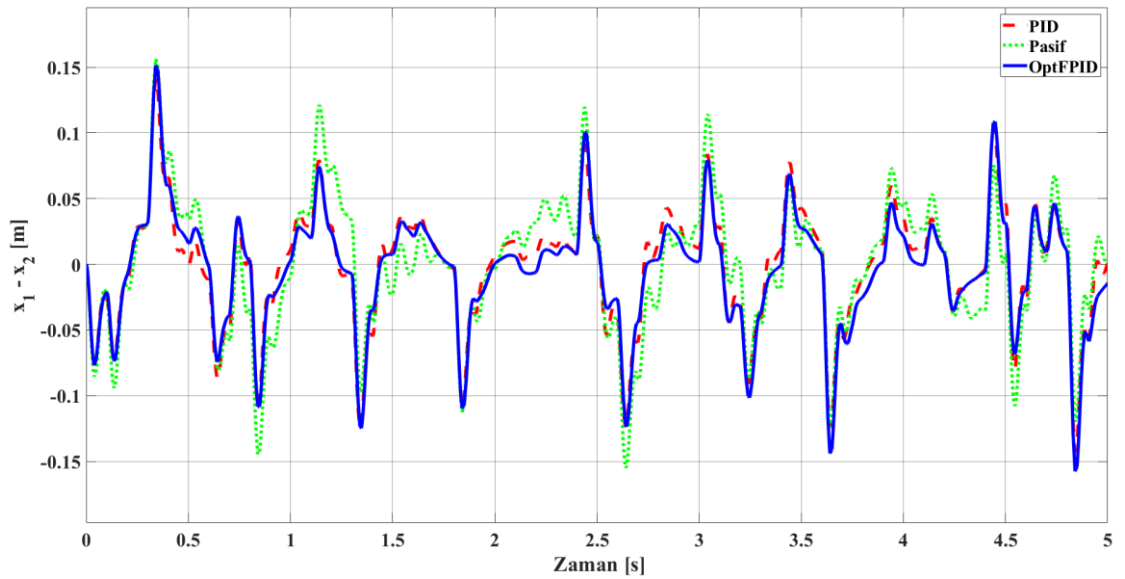


Şekil 69. Sinüzoidal yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (IAE).

Verilen grafik üzerinde x eksenini saniye biriminde simülasyon süresini belirtirken, y eksenini ise metre biriminde ($x_1 - x_2$) yer değiştirme çıkışını belirtmektedir. Görüleceği üzere, BBBC optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolör, sinüzoidal yol profili için pasif durum ve geleneksel PID kontrolörden tüm simülasyon saniyeleri arasında gelen yol profiline karşı daha dengeli bir bant aralığında salınım davranışı sergileyerek kullanıcı konforu açısından daha iyi sonuç sergilemiştir.

Bir diğerk simülasyonda, çeyrek araç süspansiyon sisteminin önerilen kontrolör yapısı için rastgele yol profili üzerinde çeyrek araç pasif süspansiyon sistemi modelinden elde edilen IAE performans kriteri değeri 0,145943 olarak elde edilmiştir. Sistemde BBBC optimizasyon yöntemi ile tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün kullanılmasıyla ve kontrolörün pratik anlamda daha uygulanabilir olması amacıyla, sisteme kontrolör çıkışında +1000 ile -1000 değerleri arasında satürasyon sınırlaması getirilmesi ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen IAE performans kriteri ise 0,82178 olarak elde edilmiştir. Elde edilen bu performans kriterini meydana getiren direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün, optimizasyon sonrası elde edilen iç parametre değerleri sırasıyla hata, hata türevi, NB, NM, NS, PS, PM, PB, K_p , K_I ve K_d katsayıları olmak üzere 0,0781, 4,1900, -0,7143, -0,5862, -0,1678, 0,2562, 0,3369, 0,9909, $2,0443e+05$, $2,3047e+05$, $1,4048e+04$ değerlerine sahiptir.

Pasif durum ile önerilen kontrolör yapısı sonucunda elde edilen IAE performans kriterleri arasındaki bağlam sistemin kaç kat iyileştirildiği açısından incelendiğinde, önerilen metodun sistemin pasif durum performansına göre 1,72 kat daha iyi sonuç verdiği hesaplanmıştır. Ele alınan performans değerlendirmesinin, pasif durum, geleneksel PID tasarımı ile kontrol edilmiş sistem ve BBBC optimizasyon metodu kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörler altındaki çıkış cevabı aşağıda Şekil 70 üzerinde verilen kıyaslama grafiği üzerinde gösterilmiştir.

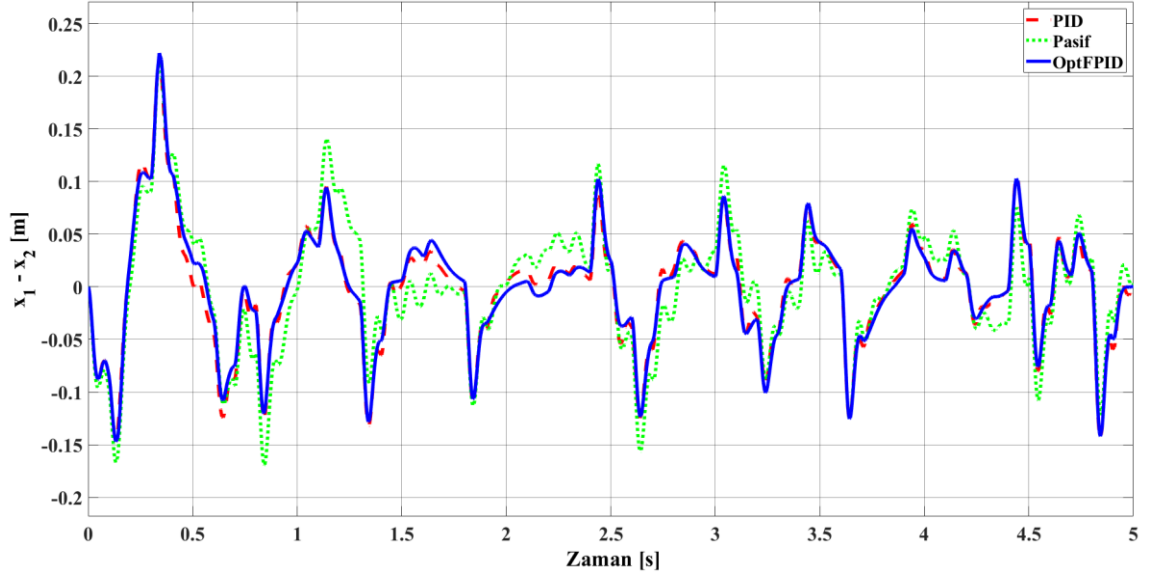


Şekil 70. Rastgele yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (IAE).

Verilen grafik üzerinde x eksenini saniye biriminde simülasyon süresini belirtirken, y eksenini ise metre biriminde ($x_1 - x_2$) yer değiştirme çıkışı belirtmektedir. Görüleceği üzere, BBBC optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolör, rastgele yol profili için pasif durum ve geleneksel PID kontrolörden tüm simülasyon saniyeleri arasında gelen yol profiline karşı daha dengeli bir bant aralığında salınım davranışı sergileyerek süspansiyonun daha hızlı tepki vermesi ve rastgele yol profilinden gelen etkilerin sönmülenebilmesi açısından daha iyi sonuç sergilemiştir.

Bir diğer simülasyonda, çeyrek araç süspansiyon sisteminin önerilen kontrolör yapısı için rastgele ve tek tümsek birleşimi yol profili üzerinde çeyrek araç pasif süspansiyon sistemi modelinden alınan referans IAE performans kriteri değeri 0,204585 olarak elde edilmiştir. Sistemde BBBC optimizasyon yöntemi ile tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün kullanılmasıyla ve kontrolörün pratik anlamda daha uygulanabilir olması amacıyla, sisteme kontrolör çıkışında +15000 ile -15000 değerleri arasında satürasyon sınırlaması getirilmesi ile gerçekleştirilen simülasyon sonucunda elde edilen IAE performans kriteri ise 0,08026 olarak hesaplanmıştır. Elde edilen bu performans kriterini meydana getiren direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörün, optimizasyon sonrası elde edilen iç parametre değerleri sırasıyla hata, hata türevi, NB, NM, NS, PS, PM, PB, K_p , K_I ve K_d katsayıları olmak üzere 0,1404, 5,3597, -0,9507, -0,4173, -0,0426, 0,0240, 0,4853, 0,7270, 2,0713e+05, 1,5481e+05, 1,1021e+04 değerlerine sahiptir.

Pasif durum ile önerilen kontrolör yapısı sonucunda elde edilen IAE performans kriterleri arasındaki bağlam sistemin kaç kat iyileştirildiği açısından incelendiğinde, önerilen metodun sistemin pasif durum performansına göre 2,54 kat daha iyi sonuç verdiği hesaplanmıştır. Ele alınan performans değerlendirmesinin, pasif durum, geleneksel PID tasarımı ile kontrol edilmiş sistem ve BBBC optimizasyon metodu kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolörler altındaki çıkış cevabı aşağıda Şekil 71 üzerinde verilen kıyaslama grafiği üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 71. Rastgele ve tek tümsek yol profili için sistem çıkış cevabı kıyaslama grafiği (IAE).

Verilen grafik üzerinde x eksenini saniye biriminde simülasyon süresini belirtirken, y eksenini ise metre biriminde $(x_1 - x_2)$ yer değiştirme çıkışını belirtmektedir. Görüleceği üzere, BBBC optimizasyon yöntemi kullanılarak tasarlanan direk aksiyon tipi bulanık PID kontrolör, sinüzoidal rastgele ve tek tümsek yol profili için pasif durum ve geleneksel PID kontrolörlerden tüm simülasyon saniyeleri arasında gelen yol profiline karşı daha dengeli bir bant aralığında salınım davranışı sergileyerek süspansiyonun daha hızlı tepki vermesi ve rastgele yol profilinden gelen etkilerin sönmülenebilmesi açısından daha iyi sonuç sergilemiştir.

Yukarıda anlatılan tüm IAE performans kriteri kıyaslamalarına ait, katsayılar ve sonuçlara ait sonuç tablosunu aktarabilmek adına birtakım kısaltmalardan faydalanılacaktır. Değişkenlere ait kısaltmalar sırasıyla; hata katsayısı D1, hata türevi katsayısı D2, NB üyelik fonksiyonu D3, NM üyelik fonksiyonu D4, NS üyelik fonksiyonu D5, PS üyelik fonksiyonu D6, PM üyelik fonksiyonu D7, PB üyelik fonksiyonu D8, oransal katsayı (K_p) D9, integral katsayısı (K_I) D10, türev katsayısı (K_D) D11, tek tümsek yol profili Y1, çift tümsek yol profili Y2, sinüzoidal yol profili Y3, rastgele yol profili Y5, referans IAE değeri IAEREF, elde edilen IAE değeri IAESONUC, satürasyon değeri SD ve son olarak performans iyileştirme katı PİK olmak üzere tüm yol profilleri için ilgili parametrelerden elde edilen IAE değerleri, referans değerler, satürasyon miktarı ve sistem iyileştirme katsayısına bağlı olarak hesaplanan performans iyileştirme yüzdeleriyle birlikte aşağıda verilen Tablo 19 üzerinde gösterilmiştir.

0,1404	0,0781	0,3313	0,0853	0,0858	D1
5,3597	4,1900	7,3239	0,5749	0,8991	D2
-0,9507	-0,7143	-0,7493	-0,8456	-0,9439	D3
-0,4173	-0,5862	-0,4301	-0,3889	-0,3862	D4
-0,0426	-0,1678	-0,3048	-0,2552	-0,0602	D5
0,0240	0,2562	0,1888	0,0750	0,0504	D6
0,4853	0,3369	0,6507	0,5244	0,3941	D7
0,7270	0,9909	0,7664	0,7519	0,7506	D8
2,0713e+05	2,0443e+05	4,7730e+04	1,3329e+05	2,4260e+05	D9
1,5481e+05	2,3047e+05	587,1889	2,1790e+05	1,8384e+05	D10
1,1021e+04	1,4048e+04	2,4089e+05	6,5487e+03	4,0056e+03	D11
Y5	Y4	Y3	Y2	Y1	YOL
0,204585	0,145943	0,2905	0,058829	0,043715	IAE REF
0,08026	0,08448	0,1819	0,028956	0,019747	IAESONUC
±15000	±1000	±15000	±1000	±1000	SD
2,54	1,72	1,59	2,03	2,21	PIK

Tablo 19. *Tüm yol profilleri için değişkenler ve IAE performans değerleri tablosu.*

Tablo 19’da verildiği üzere, hata katsayısı, hata türev katsayısı, NB, NM, NS, PS, PM, PB üyelik fonksiyonları, oransal, integral ve türev katsayıları doğrultusunda (D1-D11), tüm yol profilleri için (Y1-Y5) referans IAE ve elde edilen IAE sonuçları ilgili satürasyon değerleri (SD) altında gösterilmiştir. Bu tabloya göre, kontrolör yapısında bulunan 11 değişken için, tek tümsek yol profili için referans alınan IAE performans kriterine göre, çift tümsek yol profili için referans alınan IAE performans kriterine göre, sinüzoidal yol profili için referans alınan IAE performans kriterine göre, rastgele yol profili için referans alınan IAE performans kriterine göre ve son olarak rastgele ile tek tümsek yol profillerinin birleşiminden oluşan yol profili için referans alınan IAE performans kriterine göre kontrolör kaynaklı performans iyileştirmeleri elde edilmiştir.

Durumu kısaca özetlemesi açısından, ISE ve IAE performans kriterleri çerçevesinde elde edilen tüm sonuçlar, Tablo 20’de kıyaslanmıştır:

Yol Profilleri	Karesel Hata İntegrali (ISE)			Mutlak Hata İntegrali (IAE)		
	Pasif	Klasik PID	Bulanık PID	Pasif	Klasik PID	Bulanık PID
Tek Tümsek	0,001591	0,001089	0,000786	0,043715	0,02376	0,019747
Çift Tümsek	0,002011	0,001346	0,001077	0,058829	0,03507	0,028956
Sinüzoidal	0,032825	0,03428	0,017933	0,290479	0,28328	0,1819
Rastgele Yol	0,012912	0,009688	0,0084	0,145943	0,11973	0,082178
Rastgele Yol + Tek Tümsek	0,018403	0,01467	0,0122	0,204585	0,19922	0,08026

Tablo 20. Elde edilen tüm sonuçlar ve diğer kontrolörlerle kıyaslanması.

Bu çalışmanın ileri safhalarında, ele alınan direk aksiyon tipi optimize bulanık PID kontrolör türü, hibrit kontrolör yapıları içerisinde ve diğer tip bulanık ve/veya bulanık olmayan kontrolörler ile çeşitli kombinasyonlar içerisinde bulunarak, çalışma verimliliği artışı sağlanabilir.

7. KAYNAKLAR

- Ang, K. H., Chong, G. ve Li, Y. (2005). PID control system analysis, design, and technology. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4).
- Assahubulkahfi, M., Sam, Y. M., Maselena, A. ve Huda, M. (2018). LQR tuning by particle swarm optimization of full car suspension system. *International Journal of Engineering and Technology(UAE)*, 7(2.13 Special Issue 13).
- Back, T., Hammel, U. ve Schwefel, H. P. (1997). Evolutionary computation: Comments on the history and current state. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1).
- Bashir, A. O., Rui, X. ve Zhang, J. (2019). Ride comfort improvement of a semi-active vehicle suspension based on hybrid fuzzy and fuzzy-PID controller. *Studies in Informatics and Control*, 28(4).
- Blanchett, T. P., Kember, G. C. ve Dubay, R. (2000). PID gain scheduling using fuzzy logic. *ISA Transactions*, 39(3).
- Carlson, W. B. ve Bennett, S. (1982). A History of Control Engineering, 1800-1930. *Technology and Culture*, 23(4).
- Carvajal, J., Chen, G. ve Ogmen, H. (2000). Fuzzy PID controller: Design, performance evaluation, and stability analysis. *Information sciences*, 123(3).
- Çetin, Ş. ve Akkaya, A. V. (2010). Simulation and Hybrid Fuzzy-PID control for positioning of a hydraulic system. *Nonlinear Dynamics*, 61(3).
- Chang, C. S. ve Fu, W. (1997). Area load frequency control using fuzzy gain scheduling of PI controllers. *Electric Power Systems Research*, 42(2).
- Chellapilla, K. (1998). Combining mutation operators in evolutionary programming. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2(3).
- Chen, C. H., Wang, C. C., Wang, Y. T. ve Wang, P. T. (2017). Fuzzy Logic Controller Design for Intelligent Robots. *Mathematical Problems in Engineering*, 2017.
- Chen, Q., Zhu, D. ve Liu, Z. (2021). Attitude control of aerial and underwater vehicles using single-input FUZZY P+ID controller. *Applied Ocean Research*, 107.
- Ching-Chang Wong ve Shyuan-Ming Feng. (2002). A switching type of fuzzy controller.

- Choi, S. B., Choi, Y. T. ve Park, D. W. (2000). A sliding mode control of a full-car electrorheological suspension system via hardware in-the-loop simulation. *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Transactions of the ASME*, 122(1).
- Conroy, G. (1991). Handbook of genetic algorithms by Lawrence Davis (Ed.), Chapman & Hall, London, 1991, pp 385. *The Knowledge Engineering Review*, 6(4).
- Daniell, P. J. ve Volterra, V. (1932). The Theory of Functionals and of Integral and Integro-Differential Equations. *The Mathematical Gazette*, 16(217).
- Divekar, A. A. ve Mahajan, B. D. (2017). Analytical modeling and self-Tuned fuzzy-PID logic based control for quarter Car Suspension System using simulink. *2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology, RTEICT 2016 - Proceedings* içinde .
- Dorigo, M., Maniezzo, V. ve Colorni, A. (1996). Ant system: Optimization by a colony of cooperating agents. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 26(1).
- Du, H., Li, W. ve Zhang, N. (2012). Integrated seat and suspension control for a quarter car with driver model. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 61(9).
- Elkinany, B., Alfid, M., Chaibi, R. ve Chalh, Z. (2020). T-S Fuzzy System Controller for Stabilizing the Double Inverted Pendulum. *Advances in Fuzzy Systems*, 2020.
- Erol, O. K. ve Eksin, I. (2006). A new optimization method: Big Bang-Big Crunch. *Advances in Engineering Software*.
- Feng, J. E., Lv, H. ve Cheng, D. (2013). Multiple fuzzy relation and its application to coupled fuzzy control. *Asian Journal of Control*, 15(5).
- Fogel, D. B. (1993). Genetic algorithms and robotics: A heuristic strategy for optimization. *Biosystems*, 31(1).
- Gandhi, P., Adarsh, S. ve Ramachandran, K. I. (2017). Performance Analysis of Half Car Suspension Model with 4 DOF using PID, LQR, FUZZY and ANFIS Controllers. *Procedia Computer Science* içinde (C. 115).
- Gaweda, A. E. (2006). Flexible neuro-fuzzy systems: Structures, learning and performance evaluation. *IEEE Transactions on Neural Networks*.

- Ghafouri, M. ve Daneshmand, S. (2017). Design and evaluation of an optimal fuzzy pid controller for an active vehicle suspension system. *Transactions of Famena*, 41(2).
- Goldberg, D. E. (1989). Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning. *Choice Reviews Online*, 27(02).
- Golob, M. (2001). Decomposed fuzzy proportional-integral-derivative controllers. *Applied Soft Computing*, 1(3).
- Gupta, M. M. ve Qi, J. (1991). Theory of T-norms and fuzzy inference methods. *Fuzzy Sets and Systems*, 40(3).
- Hamam, A. ve Georganas, N. D. (2008). A comparison of mamdani and sugeno fuzzy inference systems for evaluating the quality of experience of haptic-audio-visual applications. *HAVE 2008 - IEEE International Workshop on Haptic Audio Visual Environments and Games Proceedings* içinde .
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems : an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. Ann Arbor University of Michigan Press 1975.
- Holmblad, L. P. ve Ostergaard, J. J. (1982). Control of a cement kiln by fuzzy logic. *Fuzzy Inf and Decis Processes*.
- Hu, B.-G., Mann, G. K. I. ve Gosine, R. G. (1997). Theoretic and genetic design of a three-rule fuzzy PI controller. *IEEE International Conference on Fuzzy Systems* içinde (C. 1, ss. 489–496).
- Jantzen, J. (1990). Tuning-rules for fuzzy controllers. *Proceedings of the IEEE International Workshop on Intelligent Motion Control, IMC 1990* içinde (C. 1).
- Kennedy, J. ve Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Neural Networks - Conference Proceedings* içinde (C. 4).
- Khan, L., Qamar, S. ve Khan, U. (2016). Adaptive PID control scheme for full car suspension control. *Journal of the Chinese Institute of Engineers, Transactions of the Chinese Institute of Engineers, Series A*, 39(2).
- Khodadadi, H. ve Ghadiri, H. (2018). Self-tuning PID controller design using fuzzy logic for half car active suspension system. *International Journal of Dynamics and*

Control, 6(1).

- Kirkpatrick, S., Gelatt, C. D. ve Vecchi, M. P. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598).
- Kwok, D. P., Tam, P., Li, C. K. ve Wang, P. (1991). Linguistic PID controllers. *IFAC Symposia Series - Proceedings of a Triennial World Congress* içinde (C. 4).
- Langari, R. ve Yen, J. (2001). Fuzzy logic at the turn of the millennium. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*.
- Lee, C. C. (1990a). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller—Part I. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20(2).
- Lee, C. C. (1990b). Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller, Part II. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 20(2).
- Li, H. X. ve Gatland, H. B. (1996). Conventional fuzzy control and its enhancement. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*, 26(5).
- Ling, C. ve Edgar, T. F. (1992). New fuzzy gain scheduling algorithm for process control. *Proceedings of the American Control Conference* içinde (C. 3).
- Ling, C. ve Edgar, T. F. (1997). Real-time control of a water-gas shift reactor by a model-based fuzzy gain scheduling technique. *Journal of Process Control*, 7(4).
- Malki, H. A., Misir, D., Feigenspan, D. ve Chen, G. (1997). Fuzzy PID control of a flexible-joint robot arm with uncertainties from time-varying loads. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 5(3).
- Mamdani, E. H. (1974). Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant. *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers*, 121(12).
- Mamdani, E. H. (1976). Advances in the linguistic synthesis of fuzzy controllers. *International Journal of Man-Machine Studies*, 8(6).
- Mamdani, E. H. ve Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *International Journal of Man-Machine Studies*, 7(1).
- Mann, G. K. I., Hu, B. G. ve Gosine, R. G. (2001). Two-level tuning of fuzzy PID controllers. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B: Cybernetics*.

- Márquez-Vera, M. A., Ramos-Fernández, J. C., Cerecero-Natale, L. F., Lafont, F., Balmat, J. F. ve Esparza-Villanueva, J. I. (2016). Temperature control in a MISO greenhouse by inverting its fuzzy model. *Computers and Electronics in Agriculture*, 124.
- Mohd Tumari, M. Z., Saat, S., Kasno, M. A., Johal, M. S., Bahari, M. F. ve Ahmad, M. A. (2019). Single Input Fuzzy Logic Controller for Liquid Slosh Suppression. *International Journal of Electrical Engineering and Applied Sciences (IJEEAS)*, 2(1).
- Morim, A., Sa Fortes, E., Reis, P., Cosenza, C., Doria, F. ve Goncalves, A. (2017). Think Fuzzy System : Developing New Pricing Strategy Methods for Consumer Goods Using Fuzzy Logic. *International Journal of Fuzzy Logic Systems*, 7(1).
- Nagarkar, M. P., Bhalerao, Y. J., Vikhe Patil, G. J. ve Zaware Patil, R. N. (2018). GA-based multi-objective optimization of active nonlinear quarter car suspension system—PID and fuzzy logic control. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 13(1).
- Nesimioglu, B. S. (2016). *Düşük Mertebeden Zaman Gecikmeli Sistemlerin Oransal Kontrolörler İle Kararlı Kılınması*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Ogata, K. ve Brewer, J. W. (1971). Modern Control Engineering. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 93(1).
- Palanisamy, S. ve Karuppan, S. (2016). 2115. Fuzzy control of active suspension system. *Journal of Vibroengineering*, 18(5).
- Pappachen, A. ve Peer Fathima, A. (2015). BFOA based FOPID controller for multi area AGC system with capacitive energy storage. *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, 7(3).
- Parnichkun, M. ve Ngaecharoenkul, C. (2001). Kinematics control of a pneumatic system by hybrid fuzzy PID. *Mechatronics*, 11(8).
- Rajendiran, S. ve Lakshmi, P. (2016). Simulation of PID and fuzzy logic controller for integrated seat suspension of a quarter car with driver model for different road profiles. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 30(10).

- Rao, T. R. ve Anusha, P. (2013). Active suspension system of a 3 DOF quarter car using fuzzy logic control for ride comfort. *CARE 2013 - 2013 IEEE International Conference on Control, Automation, Robotics and Embedded Systems, Proceedings* içinde .
- Rivera, D. E., Morarl, M. ve Skogestad, S. (1986). Internal Model Control: Pid Controller Design. *Industrial and Engineering Chemistry Process Design and Development*, 25(1).
- Rudolph, G. (1997). Local convergence rates of simple evolutionary algorithms with cauchy mutations. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(4).
- Rugh, W. J. (1991). Analytical Framework for Gain Scheduling. *IEEE Control Systems*, 11(1).
- Saleem, O., Shami, U. T. ve Mahmood-ul-Hasan, K. (2019). Time-optimal control of DC-DC buck converter using single-input fuzzy augmented fractional-order PI controller. *International Transactions on Electrical Energy Systems*, 29(10).
- Singh, D. ve Aggarwal, M. L. (2017). Passenger seat vibration control of a semi-active quarter car system with hybrid Fuzzy–PID approach. *International Journal of Dynamics and Control*, 5(2).
- Sugeno, M. ve Takagi, T. (1983). Multi-dimensional fuzzy reasoning. *Fuzzy Sets and Systems*, 9(1–3).
- Sun, W., Gao, H., Kaynak, O. (2010). Finite Frequency H_{∞} Control for Vehicle Active Suspension Systems. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 19(2), 416–422.
- Sun, W., Gao, H. ve Yao, B. (2013). Adaptive robust vibration control of full-car active suspensions with electrohydraulic actuators. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 21(6).
- Takagi, T. ve Sugeno, M. (1985). Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15(1).
- Tan, S., Hang, C. C. ve Chai, J. S. (1997). Gain scheduling: From conventional to neuro-

- fuzzy. *Automatica*, 33(3).
- Tang, K. S., Man, K. F., Chen, G. ve Kwong, S. (2001). An optimal fuzzy PID controller. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 48(4).
- Tao, Y., Xie, G., Chen, Y., Xiong, H., Liu, H., Zheng, J. ve Gao, J. (2016). A PID and fuzzy logic based method for Quadrotor aircraft control motion. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems* içinde (C. 31).
- Tyreus, B. D. ve Luyben, W. L. (1992). Tuning PI Controllers for Integrator/Dead Time Processes. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 31(11).
- Van Leekwijck, W. ve Kerre, E. E. (1999). Defuzzification: Criteria and classification. *Fuzzy Sets and Systems*, 108(2).
- Visioli, A. (2001). Tuning of PID controllers with fuzzy logic. *IEE Proceedings: Control Theory and Applications*, 148(1).
- Vrkalovic, S., Teban, T. A. ve Borlea, I. D. (2017). Stable Takagi-Sugeno fuzzy control designed by optimization. *International Journal of Artificial Intelligence*, 15(2).
- Wang, W., Song, Y., Chen, J. ve Shi, S. (2018). A novel optimal fuzzy integrated control method of active suspension system. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(1).
- Wang, W., Song, Y., Xue, Y., Jin, H., Hou, J. ve Zhao, M. (2015). An optimal vibration control strategy for a vehicle's active suspension based on improved cultural algorithm. *Applied Soft Computing Journal*, 28.
- Widder, D. V. (2015). *Laplace transform (PMS-6)*. *Laplace Transform (PMS-6)*.
- Yesil, E., Guzelkaya, M. ve Eksin, I. (2003). Fuzzy PID controllers : An overview. *ResearchGate*, 105–112.
- Ying, H. (2000). *Fuzzy control and modeling: Analytical foundations and applications*. *Fuzzy Control and Modeling: Analytical Foundations and Applications*. Texas: IEEE Press.
- Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*.
- Zadeh, L. A. (1975). The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-III. *Information Sciences*, 9(1), 43–80.

- Zadeh, L. A. (1996). Fuzzy logic = computing with words. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 4(2).
- Zhao, Z. Y., Tomizuka, M. ve Isaka, S. (1993). Fuzzy Gain Scheduling of PID Controllers. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(5).
- Ziegler, J. G. ve Nichols, N. B. (1942). Optimum settings for automatic controllers. *trans. ASME* 64(11), 115.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Ad Soyadı : Gökberk AY

EĞİTİM DURUMU

Lisans Öğrenimi : 2017, KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği.

Yüksek Lisans Öğrenimi : 2021, KTO Karatay Üniversitesi, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik ve Bilgisayar Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans Programı

Bildiği Yabancı Diller : İngilizce

Bilimsel Faaliyetleri :

İŞ DENEYİMİ

Stajlar : 2015, Stajyer, MONDIGROUP LTD. ŞTİ. 2016, Stajyer, MVD İnan Makine.

Projeler :

Çalıştığı Kurumlar : 2017-2019 Lisansüstü Proje Asistanı, KTO Karatay Üniversitesi, 2019-Halen, Araştırma Görevlisi, KTO Karatay Üniversitesi.

Tarih: 19 Mart 2021