

**KARMAŞIK FONKSİYONLARIN VE ARALIKLI TİP-2 BULANIK
MANTIK KONTROLÖRÜNÜN OPTİMİZASYONU İÇİN GERÇEK
KODLU KUANTUM KLONAL SEÇİM ALGORİTMASININ
GELİŞTİRİLMESİ**

EKREM BAŞER

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK ve BİLGİSAYAR MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ ESRA ŞATIR**

DÜZCE, 2023

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

KARMAŞIK FONKSİYONLARIN VE ARALIKLI TİP-2 BULANIK
MANTIK KONTROLÖRÜNÜN OPTİMİZASYONU İÇİN GERÇEK
KODLU KUANTUM KLONAL SEÇİM ALGORİTMASININ
GELİŞTİRİLMESİ

Ekrem BAŞER tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Esra ŞATIR

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Esra ŞATIR

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Pakize ERDOĞMUŞ

Düzce Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ahmet CİHAN

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. İnan GÜLER

Gazi Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa BURUNKAYA

Gazi Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 16/01/2023

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

16 Ocak 2023

Ekrem BAŞER

TEŐEKKÖR

Doktora öğrenimimde ve bu tezin hazırlanmasında gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Dr. Öğr. Üyesi Esra ŞATIR'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili aileme ve çalışma arkadaşlarıma sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

16 Ocak 2023

Ekrem BAŞER



İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	ix
KISALTMALAR.....	x
SİMGELER	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiii
EXTENDED ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ.....	1
1.1. LİTERATÜR TARAMASI	2
1.2. BU TEZ ÇALIŞMASININ AMACI	5
1.3. BU TEZ ÇALIŞMASININ KATKILARI	5
2. GERÇEK KODLU KUANTUM EVRİMSEL ALGORİTMA (REAL CODED QUANTUM EVOLUTIONARY ALGORITHM- RCQE)	8
2.1. KUANTUM HESAPLAMANIN TEMELLERİ	8
2.1.1. Kübit.....	8
2.2. RCQE TEMEL MEKANİZMASI.....	9
2.2.1. Kromozom Yapısı.....	10
2.2.2. Mutasyon Operatörü (Complementary Double Mutation Operator – CDMO).....	10
2.2.3. Kuantum Rotasyon Kapısı (Quantum Rotation Gate – QRG).....	11
2.2.4. Ayrık Çaprazlama.....	12
2.2.5. Tepe Tırmanma Seçimi (Hill Climbing Selection – HCS).....	13
2.3. RCQE ÜZERİNE GELİŞTİRMELER	13
2.3.1. QRG.....	13
2.3.2. Arama Uzayı Daraltma Tekniği	14
3. GERÇEK KODLU KUANTUM KLONAL SEÇİM ALGORİTMASI (REAL CODED QUANTUM CLONAL SELECTION ALGORITHM – RCQCSA)	16
4. RCQE ve RCQCSA’nın optimizasyon üzerine performans karşılaştırması	18
4.1. KARMAŞIK FONKSİYONLARIN OPTİMİZASYONU.....	18
4.1.1. Optimizasyon Sonuçları.....	20
4.2. AT2-BMK OPTİMİZASYONU	28
4.2.1. Tip-1 Bulanık Kümeler (T1-BK) ve Tip-1 Bulanık Mantık Kontrolör (T1-BMK).....	28
4.2.2. T1-BK.....	29

4.2.2.1. Üçgen Üyelik Fonksiyonu	29
4.2.2.2. Yamuk Üyelik Fonksiyonu.....	30
4.2.2.3. Gauss Üyelik Fonksiyonu.....	31
4.2.3. T1-BMK	32
4.2.4. Aralıklı Tip-2 Bulanık Kümeler (AT2-BK) ve Aralıklı Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolör (AT2-BMK).....	34
4.2.5. AT2-BK	34
4.2.6. AT2-BMK	36
4.2.7. AT2-BMK ile Kontrol Edilen Sistem	39
4.2.8. AT2-BMK ile Kontrol Edilen Sistemin Optimizasyonu	40
4.2.9. Optimizasyon Metodu.....	41
4.2.9.1. Parametrelerin Kodlanması.....	42
4.2.9.2. Uygunluk Değerinin Belirlenmesi	53
4.2.9.3. Ayrık çaprazlama ve Mutasyon operatörü üzerinde geliştirme	53
4.2.10. Optimizasyon Sonuçları.....	57
5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR.....	63
6. KAYNAKLAR.....	65
ÖZGEÇMİŞ.....	72

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1. Kübit Durumları a) $ 0\rangle$ durumu b) $ 1\rangle$ durumu c) Süperpozisyon durumu.	9
Şekil 2.2. Bir kübit durumu için QRG'den beklenen rotasyon.	12
Şekil 4.1. 30 boyutlu Penalized-2 fonksiyonunun 4 farklı optimizasyondan elde edilen iterasyon – maliyet karşılaştırması.	27
Şekil 4.2. 50 boyutlu Penalized-2 fonksiyonunun 4 farklı optimizasyondan elde edilen iterasyon – maliyet karşılaştırması.	27
Şekil 4.3. 100 boyutlu Penalized-2 fonksiyonunun 4 farklı optimizasyondan elde edilen iterasyon – maliyet karşılaştırması.	28
Şekil 4.4. Tip-1 üçgen üyelik fonksiyonu.	30
Şekil 4.5. Tip-1 yamuk üyelik fonksiyonu.	31
Şekil 4.6. Tip-1 Gauss üyelik fonksiyonu.	32
Şekil 4.7. T1-BMK genel yapısı.	33
Şekil 4.8. Üçgen aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonu.	35
Şekil 4.9. Yamuk aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonu.	35
Şekil 4.10. Gauss aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonu.	36
Şekil 4.11. AT2-BMK genel yapısı.	37
Şekil 4.12. Ters sarkaç sisteminin şematik gösterimi.	39
Şekil 4.13. Ters sarkacın stabilizasyonunu sağlayan AT2-BMK'nın optimizasyonu çalışmasının mimarisi.	41
Şekil 4.14. AT2-BMK optimizasyonunun MATLAB/Simulink ortamında simülasyonu.	41
Şekil 4.15. Hata girişi için oluşturulan minimum tip-2 üyelik fonksiyonları.	44
Şekil 4.16. Hata girişi için oluşturulan maksimum tip-2 üyelik fonksiyonları.	44
Şekil 4.17. Hatanın türevi girişi için oluşturulan minimum tip-2 üyelik fonksiyonları.	45
Şekil 4.18. Hatanın türevi girişi için oluşturulan maksimum tip-2 üyelik fonksiyonları.	45
Şekil 4.19. Uygulanan kuvvet çıkışı için oluşturulan minimum tip-2 üyelik fonksiyonları.	46
Şekil 4.20. Uygulanan kuvvet çıkışı için oluşturulan maksimum tip-2 üyelik fonksiyonları.	46
Şekil 4.21. Bulanık PD kontrolörüne ait blok gösterimi.	47
Şekil 4.22. Hata ve hatanın integrali girişleri ile oluşturulan Bulanık PI kontrolörüne ait blok gösterimi.	47
Şekil 4.23. Hata ve hatanın değişimi girişleri ile oluşturulan Bulanık PI kontrolörüne ait blok gösterimi.	48
Şekil 4.24. Hata ve hatanın değişimi girişleri ile oluşturulan Bulanık PI kontrolörüne ait blok gösterimi.	48
Şekil 4.25. Hata ve hatanın değişimi girişleri ile oluşturulan Bulanık PI kontrolörüne ait blok gösterimi.	49
Şekil 4.26. Aralıklı tip-2 sola çarpık bir Gauss tipinde bir üyelik fonksiyonu.	51
Şekil 4.27. Aralıklı tip-2 sağa çarpık bir Gauss tipinde bir üyelik fonksiyonu.	51
Şekil 4.28. Aralıklı tip-2 sola çarpık bir Gauss tipinde bir üyelik fonksiyonunun kromozoma kodlanma parametreleri.	52
Şekil 4.29. Başlangıç popülasyonunun yapısı.	53
Şekil 4.30. Çaprazlamaya örnek olarak verilmiş iki tane Gauss tipinde tip-2 üyelik	

fonksiyonu.....	55
Şekil 4.31. Çaprazlama operatöründen sonra yapılan geliştirmelerin akış şeması.....	56
Şekil 4.32. Mutasyon operatöründen sonra yapılan geliştirmelerin akış şeması.....	57
Şekil 4.33. 4 farklı optimizasyon metoduyla ters sarkacın açđ değişimi üzerinden performans karşılaştırması.....	59
Şekil 4.34. 4 farklı optimizasyon metoduyla ters sarkacın bağlı olduğu arabanın konumunun değişimi üzerinden performans karşılaştırması.....	60
Şekil 4.35. 4 farklı optimizasyon metodunun ters sarkacı kontrol eden AT2-BMK optimizasyonu üzerindeki performans karşılaştırması.....	60
Şekil 4.36. “Hata” girişine ait optimize edilmiş üyelik fonksiyonları.....	61
Şekil 4.37. “Hatanın Değişimi” girişine ait optimize edilmiş üyelik fonksiyonları.....	61
Şekil 4.38. “Uygulanan Kuvvet” çıkışına ait optimize edilmiş üyelik fonksiyonları.....	62



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 4.1. Kullanılan kalite test fonksiyonları [64].	19
Çizelge 4.1. (devam) Kullanılan kalite test fonksiyonları [64].	20
Çizelge 4.2. 30 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.	21
Çizelge 4.2. (devam) 30 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.	22
Çizelge 4.2. (devam) 30 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.	23
Çizelge 4.3. 50 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.	23
Çizelge 4.3. (devam) 50 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.	24
Çizelge 4.4. 100 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.	25
Çizelge 4.4. (devam) 100 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları. ...	26
Çizelge 4.5. Karnik-Mendel algoritması çalışma mekanizması.	38
Çizelge 4.6. Ters sarkaç sisteminin parametreleri.	40
Çizelge 4.7. Örnek bir bulanık kural tablosu.	43
Çizelge 4.8. AT2-BMK'daki dilsel terimler.	49
Çizelge 4.8. (devam) AT2-BMK'daki dilsel terimler.	50
Çizelge 4.9. AT2-BMK'daki bulanık kural tablosu.	50
Çizelge 4.10. Optimizasyon algoritmalarının farklı QRG'ler ile tasarlanmasıyla optimize edilen ters sarkaç sisteminin cevabı.	59

KISALTMALAR

AT2-BMK	Aralıklı Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolörü
AT2-BK	Aralıklı Tip-2 Bulanık Küme
BMK	Bulanık Mantık Kontrolörü
CDMO	Complementary Double Mutation Operator
DC	Disscrete Crossover
HCS	Hill-Climbing Selection
IT2-FLC	Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller
QEIA	Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm
QRG	Quantum Rotation Gate
RCQEA	Real Coded Quantum Evolutionary Algorithm
RCQCSA	Real Coded Quantum Clonal Selection Algorithm
SRCQEA	Stepwise Real Coded Quantum Evolutionary Algorithm
T1-BK	Tip-1 Bulanık Küme
T2-BK	Tip-2 Bulanık Küme
T1-BMK	Tip-1 Bulanık Mantık Kontrolörü
T2-BMK	Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolörü

SİMGELER

θ	Açı değeri
m_c	Arabanın ağırlığı
γ	Gamma
α	Kübit olasılıksal genliği
β	Kübit olasılıksal genliği
σ	Standart Sapma
l	Ters sarkacın uzunluğu
m_p	Ters sarkacın ağırlığı
F	Uygulanan kuvvet
g	Yerçekimi kuvveti



ÖZET

KARMAŞIK FONKSİYONLARIN VE ARALIKLI TİP-2 BULANIK MANTIK KONTROLÖRÜNÜN OPTİMİZASYONU İÇİN GERÇEK KODLU KUANTUM KLONAL SEÇİM ALGORİTMASININ GELİŞTİRİLMESİ

Ekrem BAŞER

Düzce Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği

Anabilim Dalı

Doktora Tezi

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Esra ŞATIR

Eylül 2022, 71 sayfa

Bu çalışma yüksek boyutlu karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için RCQCSA (Real Coded Quantum Clonal Selection Algorithm – Gerçek kodlu kuantum klonal seçim algoritması) sunmaktadır. Algoritma geleneksel klonal seçim algoritmasıyla RCQEA (Real Coded Quantum Evolutionary Algorithm – Gerçek kodlu kuantum evrimsel algoritma) birleştirmektedir. RCQEA’ da bulunan ve verimli çalışmayan QRG’nin (Quantum Rotation Gate – Kuantum rotasyon kapısı) yerine yeni bir QRG önerilmiştir. Ayrıca, algoritmanın yakınsama oranını iyileştirmek için algoritmanın evrimsel sürecine dayalı olarak uygulanan arama alanını daraltma tekniği benimsenmiştir. Önerilen QRG ve arama uzayı daraltma tekniği sayesinde algoritmanın yakınsama oranı geliştirilmiştir. Algoritma iki farklı problemin optimizasyonunda kullanılmıştır. İlk olarak, yüksek boyutlu sürekli optimizasyon problemlerinin optimizasyonunda, daha sonra ters sarkaç sistemini kontrol eden aralıklı tip-2 bulanık mantık kontrolörünün (AT2-BMK) optimizasyonunda kullanılmıştır. Optimizasyon algoritmalarının performans kriteri olarak algoritmaların küresel optimum çözümlere eriştiği iterasyon sayısı ve optimizasyondaki kararlılığı kullanılmıştır. Simülasyon sonuçları, RCQCSA’nın sürekli optimizasyon problemlerinin ve AT2-BMK’nın optimizasyonunda diğer algoritmalarla kıyasla hızlı yakınsama özelliğine sahip olduğunu ve iyi bir küresel arama yeteneği ve kararlılığa sahip olduğunu göstermektedir.

Anahtar sözcükler: Aralıklı tip-2 bulanık mantık kontrolörü, Gerçek kodlu kuantum klonal seçim algoritması, Optimizasyon.

ABSTRACT

THE DEVELOPMENT OF REAL-CODED QUANTUM CLONAL SELECTION ALGORITHM FOR THE OPTIMIZATION OF COMPLEX FUNCTIONS AND INTERVAL TYPE-2 FUZZY LOGIC CONTROLLER

Ekrem BAŞER

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronics
and Computer Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Esra ŞATIR

September 2022, 71 pages

This work presents the real coded quantum clonal selection algorithm (RCQCSA) to solve optimization problems. The algorithm combines the traditional clonal selection algorithm with the real coded quantum evolutionary algorithm (RCQEA). A new quantum rotation gate (QRG) is proposed to replace the inefficient quantum rotation gate used in RCQEA. In addition, reducing the search space technique, which is implemented based on the evolutionary process of the algorithm, is adopted to improve the convergence rate of the algorithm. Thanks to the running mechanism of the algorithm, the proposed QRG and the reducing search space technique, the convergence rate of the algorithm is improved. The algorithm is used in the optimization of two different problems. It was first used in the optimization of high dimensional continuous optimization problems, then in the optimization of interval type 2 fuzzy logic controller that controls the inverted pendulum system. As the performance criteria of the optimization algorithms, the number of iterations in which the algorithms reach the global optimum solutions and their stability in optimization are used. The simulation results show that the RCQCSA has the characteristics of rapid convergence compared to other algorithms in the optimization of continuous optimization problems and the interval type-2 fuzzy logic controller, and has good global search capability and stability.

Keywords: Interval type-2 fuzzy logic controller, Real-coded quantum clonal selection algorithm, Optimization.

EXTENDED ABSTRACT

THE DEVELOPMENT OF REAL-CODED QUANTUM CLONAL SELECTION ALGORITHM FOR THE OPTIMIZATION OF COMPLEX FUNCTIONS AND INTERVAL TYPE-2 FUZZY LOGIC CONTROLLER

Ekrem BAŞER

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Electrical-Electronics
and Computer Engineering

Doctoral Thesis

Supervisor: Assist. Prof. Dr. Esra ŞATIR

September 2022, 71 pages

1. INTRODUCTION

In the early 2000's, Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm (QIEA) was presented as an optimization algorithm that takes inspiration from quantum computing to evolve a probability distribution. The algorithm uses a string of quantum bits (qubits) that hold the sampling probability of a one or a zero. Therefore, it was applied on only binary combinatorial optimization problems and then modified versions of algorithm were applied on real valued problems. In order to deal with complex functions with high dimension, Real Coded Quantum Evolutionary Algorithm (RCQEA) was proposed.

RCQEA is based on the concepts and principles of the quantum computing such as qubits and superposition of states by using triploid chromosomes whose alleles are composed of a real variable and a pair of probability amplitudes of the corresponding qubits state. The algorithm uses the Complementary Double Mutation Operator (CDMO), Quantum Rotation Gate (QRG) and Discrete Crossover (DC) for diversity of solution and the Hill-Climbing Selection (HCS) for accelerating the convergence speed. RCQEA has brought a new perspective on optimization problems by inspiring quantum computing principles.

After RCQEA was proposed, researchers made many improvements to RCQEA and the improvements made significant changes in the performance of the algorithm. These improvements can be summarized as follows: The QRG of the original version of RCQEA is modified, the running mechanism of the algorithm is changed or hybridized with some other optimization algorithms and new gates are added to the algorithm for improving its performance in many studies. However, the algorithm is still open for improvement performance-wise.

In this study, some improvements are realized in RCQEA and Real Coded Quantum Clonal Selection Algorithm (RCQCSA) is proposed by modifying the running mechanism of the algorithm based on the clonal selection principles. The RCQEA, whose structure we modified, and the RCQCSA that we proposed are used in the optimization of high dimensional complex functions and the Interval Type-2 Fuzzy Logic Controller (IT2-FLC). The performances of both algorithms are compared and analyzed. In summary, the main contributions of this study are as follows:

- The QRG gate of RCQEA is improved and a new more effective QRG is proposed.
- The RCQCSA is proposed by improving the mutation, quantum rotation strategy and adding the reducing search space technique.
- There are some works in the literature about optimization the IT2-FLC by using RCQEA. The deficiencies of these studies are identified and new effective methods for optimization the IT2-FLC by the RCQEA and the RCQCSA is proposed.
- High dimensional complex functions are optimized by using RCQEA and RCQCSA. The proposed RCQCSA performs significantly better than original and modified versions of RCQEA in terms of convergence rate and optimum results.

2. MATERIAL AND METHODS

The proposed algorithm, RCQCSA, combines the clonal selection principles and the RCQEA. Also, the technique of reducing search space is applied to the algorithm. This technique facilitates the algorithm to find global solutions in the search space.

In this study, unimodal and multimodal benchmark functions are used for comparing the performances of the algorithms. Benchmark functions are tested with 30, 50 and 100 dimensions. Additionally, in this study IT2-FLC is optimized by RCQEA and RCQCSA. The inverted pendulum system which has nonlinear system dynamics is chosen as a system to be controlled by IT2-FLC. System dynamics are modelled and simulated in MATLAB/Simulink environment.

3. RESULTS AND DISCUSSIONS

The QRG existing in the original version of RCQEA can be senseless in some cases of

parameters of the RCQEA. Our proposed QRG performs more effective rotation for the RCQEA or RCQCSA to find new possible better solutions in search space. By adapting the technique of reducing search space, both algorithms can easily find global solutions. Moreover, because the RCQCSA is based on the clonal selection principles, the RCQCSA focuses on the possible better solutions around the good solutions. This technique enhances the convergence rate. As a summary, RCQCSA that we proposed in this study by improving RCQEA and adapting it to the clonal selection principles performs better than original RCQEA and its modified versions.

4. CONCLUSION AND OUTLOOK

In this study, we propose RCQCSA, which combines the clonal selection principles with RCQEA and uses the improved QRG and the reducing search space technique. The optimization of the benchmark functions and the IT2-FLC by the more effective methods are realized. The simulation results show that our proposed RCQCSA has the powerful ability to search global optimum solutions and the ability to effectively avoid falling into local optimum solutions and it is highly efficient for solving numerical optimization with continuous variables and optimization of IT2-FLC.



1. GİRİŞ

Optimizasyon, bir problemin kısıtlamalarını sağlayan en iyi çözümü bulma süreci olarak tanımlanabilir. Matematiksel olarak da gerçel bir fonksiyonu minimize veya maksimize etmek için belirli veya tanımlı bir aralıktaki en uygun gerçek veya tamsayı değerlerini bulmak için yapılan işlemlerin tümüdür. Matematiksel optimizasyon, bir arama veya optimizasyon problemi olarak formüle edilebilir ve bilim, mühendislik, ekonomi ve yaşam problemlerinin çözümünde çok önemli bir rol oynar. Dolayısıyla, bir mühendislik probleminin optimize edilebilmesi için öncelikli olarak matematiksel modelinin çıkarılması gerekmektedir. Matematiksel model, bir problemin değişken, kısıt, amaç fonksiyonu gibi parametrelerinin matematiksel olarak ifade edilmesidir. Matematiksel modelde hedef, amaç fonksiyonunu minimize veya maksimize eden değişken değerlerinin problemin belirtilen kısıtları dahilinde bulunabilmesidir. Matematiksel modeli basit, kısıtları ve değişken sayıları az olan optimizasyon problemlerinin optimum çözümlerinin bulunması kolay olmaktadır. Ancak matematiksel model karmaşıktıkça, değişken sayıları ve kısıtları arttıkça problemin optimum çözümlerinin bulunması zorlaşmaktadır. Yüksek boyutlu, doğrusal olmayan, dışbükey olmayan, türevlenemeyen ve birçok yerel optimum noktası barındıran karmaşık değişkenli optimizasyon problemleri birçok mühendislik probleminin modeli olarak kullanılmaktadır.

Deterministik optimizasyon teknikleri küresel en iyi çözümleri bulamadıkları için karmaşık fonksiyonların optimizasyonunda başarılı olmamaktadır. Bu nedenle araştırmacılar yüksek boyutlu karmaşık fonksiyonlarının optimizasyonu için her geçen gün yeni bir teknik, yeni bir algoritma önermektedir. Karmaşık fonksiyonların optimizasyonunda deterministik optimizasyon tekniklerinin yerini evrimsel algoritmalar almıştır. Ancak evrimsel algoritmaların da erken yakınsama ve yerel optimumda takılı kalma gibi sakıncaları nedeniyle daha farklı araştırmacılar daha farklı teknikler kullanmaya yönelmiştir.

1.1. LİTERATÜR TARAMASI

Mühendislikteki optimizasyon problemleri yüksek boyutlu, karmaşık, dışbükey olmayan ve türevlenemeyen optimizasyon problemleri olabilmektedir ve bilgisayar bilimlerinin amacı bu zor problemleri daha efektif şekilde çözebilen algoritmalar geliştirmektir. Araştırmacılar bu problemleri çözebilmek için doğa ve doğadaki canlılardan esinlenerek farklı özneliliklerde algoritmalar geliştirmiştir. Literatür incelendiğinde Yapay Alg Algoritması [1], [2], Gri Kurt Optimizasyonu [3], Kurbağa Sıçrama Algoritması [4], Yapay Arı Kolonisi Algoritması [5], Genetik Algoritma [6], Parçacık Sürü Optimizasyonu [7] gibi birçok algoritmanın doğa ve canlılardan esinlenerek oluşturulduğu görülmektedir. Kromozomların temsil edilmesi, mutasyon veya yeniden birleştirme operatörleri, çaprazlama ve seçim veya yeniden üretilme operatörleri bu yaklaşımların anahtar noktalarını temsil etmektedir.

1990'lı yılların sonlarından beri araştırmacılar kuantum hesaplama teknikleri ile evrimsel algoritmaları birleştirmeye çalışarak daha verimli algoritmalar üretmeye çalışmaktadır. Bu amaçla üretilen algoritmalar üç sınıfta incelenebilir.

1. Evrimsel olarak tasarlanmış kuantum algoritmalar: Evrimsel algoritmalar kullanılarak kuantum algoritmalarından yeni kuantum algoritmaların üretildiği algoritmalar. [8]–[12]'de yapılan çalışmalarda geliştirilen algoritmalar bu sınıftaki algoritmalarla örnek olarak gösterilebilir.
2. Kuantum evrimsel algoritmalar: Kuantum evrimsel algoritmalar evrimsel algoritmaları kuantum bilgisayarlarda uygulamaya çalışmaktadır. [11], [13]–[17]'de yapılan çalışmalar ise bu sınıfa örnektir.
3. Kuantumdan esinlenen evrimsel algoritmalar (Quantum Inspired Evolutionary Algorithm, QIEA): Kuantumdan esinlenen evrimsel algoritmalar kuantum hesaplamının temel teknik ve prensiplerinden esinlenerek yeni evrimsel algoritmalar geliştirme üzerine yapılan algoritmalar. [18]–[20]'de yapılan çalışmalar bu sınıftaki algoritmalarla ilham kaynağı olmuştur.

Bu tez çalışmasında QIEA üzerine odaklanılmıştır. Son yıllarda kuantumdan esinlenen algoritmalar ilgi artmıştır. Araştırmacılar gerek QIEA'yı geliştirmek gerekse de QIEA'yı farklı problemlere uygulamak için çeşitli çalışmalar yapmıştır.

Narayanan ve Moore verimli evrimsel algoritmalar geliştirebilmek için kuantum

mekanizmasının temel kavram ve ilkeleri tanıtıldı. Kuantumdan esinlenen bir çaprazlama operatörü sunuldu ve gezgin satıcı problemini çözdüler [21]. Yaptıkları diğer bir çalışmada ise bir OEIA'nın tasarlanması ve geliştirilmesi için temel teknikleri anlattılar [22].

Han ve Kim ilk olarak kübit, süperpozisyon teoremi gibi kuantum hesaplamanın temel kavram ve ilkelerine dayanan Kuantum Genetik Algoritmayı ardından OIEA'yı önerdiler ve sırt çantası problemine uyguladılar [23], [24]. Daha sonra algoritmanın modifiye edilmiş versiyonları OneMax, Noisy-flat, ve NK-landscapes yapay ağ eğitimi, bilgisayar ağları gibi çeşitli problemlere uygulandı [25]–[27].

QIEA'da, çözüm çeşitliliğini korumak ve erken yakınsamanın üstesinden gelmek için kübit kromozomu benimsenmiştir ve kromozomları güncellemek ve yerel optimumlarda tıkanmayı önlemek için kuantum rotasyon kapısı (Quantum Rotation Gate, QRG) kullanılır. QIEA ilk olarak ikili kodlanmış şekilde önerilmiştir. Bu nedenle kombinatorial optimizasyon problemlerini çözmede nümerik optimizasyon problemlerine kıyasla daha başarılıdır [23], [24], [28]. Nümerik optimizasyon probleminin boyutunun arttıkça QIEA'da bulunan kromozomların büyüklüğü ve işlem maliyeti artacaktır.

Nümerik optimizasyon problemlerini de QIEA ile çözebilmek için araştırmacılar yeni yöntemler geliştirmişlerdir. İlk olarak Cruz ve arkadaşları gerçek değerlerin optimizasyonu üzerine geliştirdikleri algorithmada optimum değerlere daha iyi yakınsama zamanını elde ettiler [29]. Daha sonra bu yönteme dayanan basitleştirilmiş yeni bir gerçek kodlu kuantumdan esinlenen evrimsel algoritma (Real coded quantum inspired evolutionary algorithm, RCQEA) şeklinde isimlendirdikleri algoritmayı sundular [30]. Algoritma, üzerinde yapılan değişikliklerle birlikte geliştirildi ve daha verimli versiyonları sunuldu [31]–[34]. RCQEA'da gerçek değişkenlerin doğrudan kromozom yapısına kodlanabildiği yapı oluşturuldu. Bu sayede nümerik değerlerin optimizasyonunda algoritmanın ihtiyaç duyduğu hafıza ihtiyacı azaltıldı.

QIEA'da ikili kodlanmış olarak kübit dizisi kullanılıyordu. Nümerik fonksiyonlar ikili kod formuna dönüştürülerek optimize ediliyordu. Daha sonraki çalışmalarda RCQEA için üçlü kromozom yapısı kullanıldı [33]. Bu üçlü yapıdan biri gerçek değeri diğer ikisi ise bir kübitin olasılıksal genliklerini ifade etmektedir. Oluşturulan üçlü kromozom yapısındaki gerçek değerin ve olasılıksal genliklerin algoritmanın evrimsel sürecinde

değişime uğraması için tamamlayıcı mutasyon operatörü (Complementary Double Mutation Operator, CDMO) kullanılmaktadır. Ayrıca mutasyona uğrayan kromozomlardan kötü çözümler bulunması halinde bir sonraki mutasyon işleminde algoritmanın daha iyi çözümlere yakınsaması için QRG kullanılmaktadır. QRG kapısı kübitin rotasyonunu gerçekleştirerek olasılıksal genliklerin değişmesini dolayısıyla algoritmanın yakınsamasını etkilemektedir [33].

QRG kübitin olasılıksal genliklerini kullanarak belirlediği büyüklükteki bir açı değeriyle kübit durumunu rotasyona uğratmaktadır. Ancak RCQEA'nın orijinal versiyonunda kullanılan QRG, kübitin olasılıksal genliklerinin bazı durumlarında anlamsız açı değerleri üreterek algoritmanın performansını zayıflatmaktadır. Bu değerlerin maksimum $\pi/2$ olması gerekmektedir ve algoritmanın yerel ve küresel çözümleri bulabilmesini sağlamak için QRG'nin kübit durumunun olasılıksal genliklerinden birinin sayısal değerini azaltırken diğerini artırması gerekmektedir. Ancak RCQEA'nın orijinal versiyonunda kullanılan QRG, kübitin olasılıksal genliklerinin her durumu için bu amaca yönelik çalışmamaktadır.

Araştırmacılar RCQEA'nın performansını geliştirmek için kullanılan QRG yapısını geliştirerek algoritmanın performansı üzerinde iyileştirmeler yapmışlardır. Rotasyon açısının değerini farklı tekniklerle belirleyerek algoritmanın performansını artırmışlardır. Han ve Kim tarafından geliştirilen ikili kodlanmış OIEA'da kullanılan QRG'de rotasyon açısı olarak sabit $\pi/100$ değeri kullanılmıştı [24]. [35]'te geliştirilen kuantum genetik algoritmada iterasyon sayısı ilerledikçe değişen adaptif bir QRG önerdiler ve fonksiyon optimizasyonunda daha başarılı sonuçlar aldılar. Hossain ve arkadaşları hibrit olarak geliştirdikleri gerçek kodlu algoritmada QRG yapısını parçacık sürü optimizasyonu algoritmasının (Particle Swarm Optimization, PSO) temel yapısına benzetmişler ve QRG'nin performansını iyileştirmişlerdir [36]. Wright ve Jordanov yaptıkları çalışmada RCQEA için yeni bir QRG önermişlerdir. Önerdikleri QRG'de rotasyon açısını kübitin olasılıksal genliklerini kullanarak aşamalı bir şekilde belirlemişlerdir [37].

Araştırmacılar ikili kodlanmış QEA'nın yakınsama oranını artırmak için algoritmanın çalışma mekanizmasını genetik algoritma [38]–[41], yapay bağışıklık algoritması [42]–[44], PSO algoritması [45]–[47] olarak temelde üç ana metasezgisel algoritmadan esinlenerek değiştirmişlerdir. Yapılan çalışmaların sonuçları, geliştirilen hibrit algoritmaların ikili kodlanmış QEIA'nın performansını artırdığını göstermektedir.

RCQEA önerildikten sonra araştırmacılar algoritmanın performansını iyileştirmek için farklı teknikler kullanmıştır. [48]'de RCQEA kullanarak çözümleri barındıran arama uzayını algoritmanın evrimsel süreciyle birlikte daraltan bir teknik kullanılmıştır. Kullandıkları teknik RCQEA'nın küresel çözümlere yakınsama oranını artırmış ve algoritmanın performansını geliştirmiştir [34].

QEIA ve RCQEA önerildikten sonra farklı problemlerin optimizasyonunda kullanılmıştır. Bu çalışmalardan bazıları bir sistemi kontrol eden bulanık mantık kontrolörünün (BMK) optimizasyonunu gerçekleştirmektedir [49]–[53]. Araştırmacılar, sistemi kontrol eden BMK'da tanımlanan kuralların her birinde kullanılan dilsel terimlerin temsil ettiği üyelik fonksiyonlarının üretilebileceği aralıklarda rastgele üyelik fonksiyonları oluşturarak kromozomları kodlamışlar ve sistemi daha verimli çalıştıracak kontrolör tasarımını gerçekleştirmişlerdir.

1.2. BU TEZ ÇALIŞMASININ AMACI

Bu tez çalışmasında RCQEA'nın orijinal versiyonunda bulunan QRG yapısı geliştirilerek daha verimli yeni bir yöntem önerilmiştir. Ayrıca algoritmaya [34]'de önerilen arama uzayı daraltma tekniğinin de eklenmesiyle algoritmanın performansı artırılmıştır.

Geliştirilen RCQEA'nın performansını daha da iyileştirmek için algoritmanın çalışma mekanizması klonal seçim prensiplerine dayandırılarak gerçek değerli optimizasyon problemleri için gerçek kodlu kuantum evrimsel algoritma (Real Coded Quantum Clonal Selection Algorithm, RCQCSA) önerilmiştir.

Literatürde bulunan çalışmalarda QEIA ve RCQEA algoritmaları kullanılarak tip-1 bulanık mantık kontrolörü (T1-BMK) ve AT2-BMK'nın optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu çalışmalara bazı geliştirmeler yapılarak RCQEA ve RCQCSA ile AT2-BMK optimizasyonunun daha verimli olması sağlanmıştır.

1.3. BU TEZ ÇALIŞMASININ KATKILARI

Bu tez çalışmasının katkıları şu şekilde sıralanabilir.

1. RCQEA'nın orijinal versiyonunda bulunan QRG yapısı kübitin olasılıksal genliklerinin bazı durumlarında anlamsız rotasyon değerleri üreterek QRG'nin

amacından sapmasına yol açmaktadır ve kübitin mantıksız rotasyon yapmasına sebep olmaktadır. Bu durum RCQEA'nın küresel çözümleri bulmasını zorlaştırmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada ilgili QRG yapısının rotasyon açısı belirleme stratejisi için yeni bir yöntem önerilerek geliştirilmiştir.

2. RCQEA ile BMK optimizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda, BMK'da tanımlanan tüm kurallarda bulunan dilsel terimlerin temsil ettiği üyelik fonksiyonlarının üretilebileceği alanlarda rastgele üretilerek kromozomlara kodlanması gerçekleştirilmiştir [49]–[53]. Bir kromozomun maliyetinin hesaplanması için BMK'nın bu kromozomdaki verilerle tasarlanması ve sistemin yanıtının alınması gerekmektedir. Kromozomlar BMK'da bulunan kurallardan çıkarım yapılarak kodlandığında kromozomlarda aynı üyelik fonksiyonu için birden fazla üyelik fonksiyonu üretilebilmektedir ve kromozomun değerlendirilmesi esnasında aynı üyelik fonksiyonu için üretilmiş birden fazla üyelik fonksiyonlarından sadece en son üretileni dikkate alınacaktır. Bu nedenle RCQEA ile o üyelik fonksiyonu için daha verimli bir üyelik fonksiyonu üretilse bile kromozomda en son sırada yer almıyorsa kromozomun değerlendirme aşamasında dikkate alınmayacaktır ve optimizasyonun performansı zayıflayacaktır. Bu nedenle bu çalışmada kromozom yapısında BMK'nın girdi ve çıktılarında bulunan üyelik fonksiyonlarının her biri için bir tane üyelik fonksiyonu üretecek genlerin bulunduğu bir yapı kullanılmıştır. Bu sayede bu sorun çözülmüştür.
3. Bu çalışmada AT2-BMK optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. AT2-BMK'da çarpık olabilen Gauss tipinde üyelik fonksiyonları kullanılmıştır. Bu sayede üyelik fonksiyonları, AT2-BMK'nın girdilerinin ve çıktılarının sahip olduğu alanın her bölgesinde tepe noktasına sahip olabileceklerdir.
4. Bu çalışmada AT2-BMK'nın girdi ve çıktıların sahip olduğu tanım kümelerinde üyelik fonksiyonlarının üretilebileceği alanlar farklı bir strateji ile belirlenmiştir. Bu strateji sayesinde kontrol edilen sistemi daha hızlı bir şekilde denge konumuna getirecek üyelik fonksiyonları girdi ve çıktıların sahip olduğu tanım kümesinde daha çok alana sahiptir. Böylece kontrol edilen sistem daha hızlı bir şekilde dengeye getirilmektedir.
5. Bu çalışmada [34]'de kullanılan arama uzayı daraltma tekniği benimsenmiştir.

Bu teknikler sayesinde RCQEA'nın performansı artırılmıştır. Ayrıca bu çalışmada RCQEA'nın küresel çözümleri daha verimli bir şekilde bulabilmesi için klonal seçim prensiplerinden esinlenerek algoritmanın çalışma mekanizmasını modifiye ettiğimiz RCQCSA algoritması önerilmiştir. Önerdiğimiz bu algoritma hem AT2-BMK optimizasyonunda hem de karmaşık fonksiyonların optimizasyonunda denenmiştir ve RCQEA'ya göre daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.



2. GERÇEK KODLU KUANTUM EVRİMSEL ALGORİTMA (REAL CODED QUANTUM EVOLUTIONARY ALGORITHM- RCQEA)

Bu bölümde RCQEA tanıtılacaktır. Algoritma, kuantum hesaplama prensiplerinden esinlendiği için öncelikle kuantum hesaplama hakkında temel bilgiler verilmiştir.

2.1. KUANTUM HESAPLAMANIN TEMELLERİ

Kuantum hesaplama, atomik ve atom altı seviyedeki madde ve enerjinin davranışını açıklayan modern fizikle ilgilenen kuantum teorisinin ilkelerine odaklanır. Kuantum hesaplama, veri işlemlerini gerçekleştirmek için kuantum bitleri (kübit), süperpozisyon ve dolanıklık gibi kuantum olaylarını kullanır.

2.1.1. Kübit

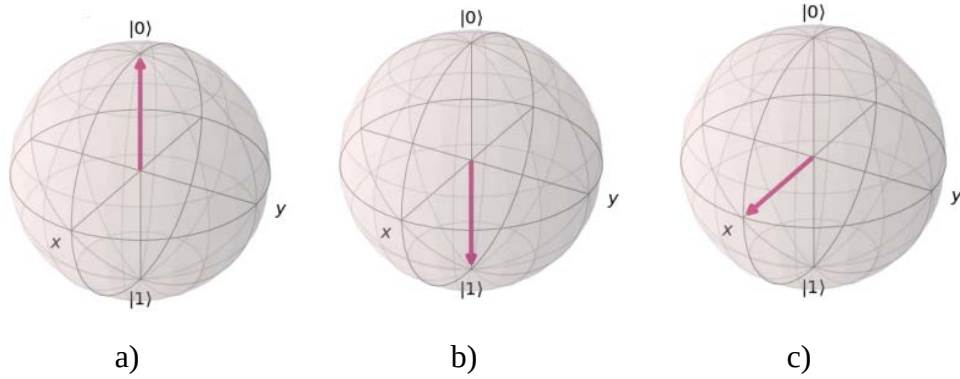
Klasik hesaplamada bilginin en küçük birimi bit olarak ifade edilir. Bir bit ya 0 ya da 1 olabilir. Kuantum hesaplamada ise bilginin en küçük birimi kübit olarak adlandırılır. Bir kübit durumu $|0\rangle$, $|1\rangle$ veya $|0\rangle$ ve $|1\rangle$ 'in lineer bir şekilde birleşimi (süperpozisyon teoremi) şeklinde olabilir. Bir kübit durumu matematiksel olarak Dirac tarafından geliştirilen bir sembole ifade edilir. Bu sembole Dirac notasyonu veya Bra-ket notasyonu denilmektedir. Denklem (2.1) bir kübit durumunun Dirac notasyonu ile ifade şeklini göstermektedir. Burada α ve β kompleks sayılardır ($\alpha, \beta \in \mathbb{C}$) ve kübit durumunun olasılıksal genliklerini ifade etmektedir. $|0\rangle$ ve $|1\rangle$ ise ortogonal temel vektörlerdir ve Denklem (2.2)'deki gibi ifade edilir [34].

$$|\Psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \quad (2.1)$$

$$|0\rangle = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Bir kübit durumu kuantum mekaniğine Felix Bloch tarafından kazandırılmış Bloch küresi ile gösterilir [54]. Üç boyutlu küredeki herhangi bir nokta kübitin durumunu

göstermektedir. Şekil 2.1’de 3 farklı kübit durumunun Bloch küresindeki temsili gösterilmiştir.



Şekil 2.1. Kübit Durumları a) $|0\rangle$ durumu b) $|1\rangle$ durumu c) Süperpozisyon durumu.

Kuantum mekaniğinde $|\alpha|^2$ kübitin $|0\rangle$ durumunda olma olasılığını, $|\beta|^2$ ise kübitin $|1\rangle$ durumunda olma olasılığını belirler. Bu olasılıksal genliklerin toplamı ise Denklem (2.3)’de belirtildiği gibi 1’e eşittir [55].

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1 \quad (2.3)$$

2.2. RCQEA TEMEL MEKANİZMASI

RCQEA karmaşık fonksiyonların optimizasyonu için önerilmiştir [33]. Bu bölümde RCQEA’nın orijinal versiyonu anlatılmış ve bu çalışmada RCQEA üzerinde yapılan geliştirmelerden Bölüm 2.3’de bahsedilmiştir.

Bir optimizasyon probleminin amacı genellikle bir fonksiyonun minimizasyonu ve maksimizasyonudur. Karmaşık fonksiyonların optimizasyon problemi genel olarak Denklem (2.4)’deki gibi tanımlanır. Denklem (2.4)’de belirtilen karmaşık fonksiyonun minimizasyonu ve bu fonksiyonu minimum yapan noktaların bulunması hedeflenmektedir. $X \in R^n$ ifadesi n boyutlu kısıtlı arama uzayını ifade etmektedir. $L = (l_1, \dots, l_i, \dots, l_n)$ ve $U = (u_1, \dots, u_i, \dots, u_n)$ ifadesi arama uzayının kısıtlarını belirlemektedir.

$$\begin{aligned}
J &= \min(f(X)) \\
X &= (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n) \in R^n \\
L &\leq X \leq U
\end{aligned} \tag{2.4}$$

2.2.1. Kromozom Yapısı

RCQEA üçlü kromozom yapısını kullanmaktadır. Bu üçlü yapı gerçek değer ve bir kübitin olasılıksal genliklerini ifade eden değerlerden oluşmaktadır. Üçlü kromozom yapısı Denklem (2.5)'de gösterilmiştir.

$$q = \begin{bmatrix} x_1 & \cdots & x_i & \cdots & x_n \\ \alpha_1 & \cdots & \alpha_i & \cdots & \alpha_n \\ \beta_1 & \cdots & \beta_i & \cdots & \beta_n \end{bmatrix} \tag{2.5}$$

Denklem (2.5)'de $[x_i, \alpha_i, \beta_i]^T$ $i=1, 2, \dots, n$ ifadesi i .üçlü gerçek kodlu kromozomu, x_i gerçek değeri, $[\alpha_i, \beta_i]^T$ ise bir kübitin olasılıksal genliklerini ifade etmektedir. Olasılıksal genlikler Denklem (2.3)'deki normalizasyon şartını sağlamalıdır.

RCQEA'da başlangıç popülasyonu, gerçek değerlerin tanımlı olduğu minimum ve maksimum değerlerin aralığında rastgele üretilerek kodlandığı ve bir kübitin olasılıksal genliklerini ifade eden değerlerin rastgele üretilerek kodlandığı üçlü kromozomlarla oluşturulur.

2.2.2. Mutasyon Operatörü (Complementary Double Mutation Operator – CDMO)

RCQEA'da her bir iterasyonda popülasyondaki tüm kromozomlardaki rastgele seçilen bir genin mutasyona uğradığı tek gen mutasyonu kullanılmaktadır. N popülasyon boyutu olmak üzere $\{p_1^t, \dots, p_j^t, \dots, p_N^t\}$ ifadesi t . iterasyondaki popülasyondaki tüm kromozomları ifade etmektedir. Popülasyondaki mutasyona uğrayacak kromozomdan, p_j^t , rastgele seçilen bir gen, $[x_{j,i}^t, \alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t]^T$, mutasyona uğratılmaktadır. Gauss mutasyon operatörü sayesinde gendeki gerçek değer Denklem (2.6)'daki gibi mutasyona uğratılır.

$$x_{j,i}^{t+1,k} = x_{j,i}^t + (x_{i,\max} - x_{i,\min})N\left(\left(\sigma_{j,i}^{t,k}\right)^2\right) \quad (2.6)$$

$$k \in \{\alpha_{j,i}, \beta_{j,i}\}$$

Denklem (2.6)'da kullanılan $N\left(\left(\sigma_{j,i}^{t,k}\right)^2\right)$ ifadesi ortalama değeri 0 ve varyansı $\left(\sigma_{j,i}^{t,k}\right)^2$ olan normal dağılımı ifade etmektedir. Varyans değeri ise Denklem (2.7)'deki gibi belirlenir.

$$\left(\sigma_{j,i}^{t,k}\right)^2 = \begin{cases} |\alpha|^2, & k = \alpha \\ |\beta|^2 / 5, & k = \beta \end{cases} \quad (2.7)$$

Mutasyondan sonra oluşturulan gerçek değer tanımı olduğu sınırları aşması durumunda bu değer Denklem (2.8) ile tekrar revize edilir.

$$x_{j,i}^{t+1,k} = \begin{cases} 2x_{i,\max} - x_{j,i}^{t+1,k}, & x_{j,i}^{t+1,k} > x_{i,\max} \\ 2x_{i,\min} - x_{j,i}^{t+1,k}, & x_{j,i}^{t+1,k} < x_{i,\min} \end{cases} \quad (2.8)$$

2.2.3. Kuantum Rotasyon Kapısı (Quantum Rotation Gate – QRG)

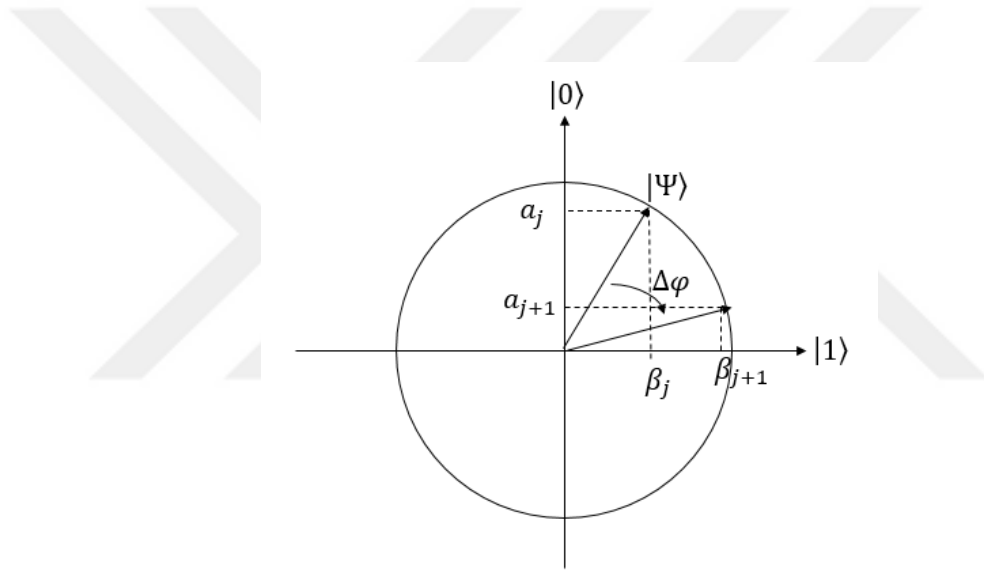
Mutasyon operatörüne uğrayan kromozomun uygunluk değeri kromozomun mutasyona uğramadan önceki uygunluk değerinden daha iyiye optimizasyon için daha iyi bir çözüm bulunmuş olur. Aksi halde daha kötü bir çözüm bulunmuş olur ve üçlü kromozomdaki olasılıksal genlik çiftleri QRG ile yapılan rotasyon işlemi sayesinde revize edilir.

QRG'nin amacı kromozomun bir sonraki mutasyon operatörüne uğramasında optimizasyon için daha iyi bir çözümün bulunabilmesini sağlamaktır. Bu amaçla QRG sayesinde olasılıksal genlik çiftlerinden $|\alpha_{j,i}^t|$ değeri kademe kademe azaltılırken, $|\beta_{j,i}^t|$ değeri kademe kademe artırılmaktadır. Bu amacı gerçekleştirmeye yönelik olarak geliştirilen QRG'nin yapısı Denklem (2.9)'da gösterilmiştir. Denklem (2.9)'da kullanılan θ_0 ve γ ifadeleri sırasıyla başlangıç rotasyon açısını ve ölçek parametresini ifade etmektedir ve algoritmanın yakınsama hızında etkiye sahiptir. Rotasyon işlemi sayesinde algoritmanın küresel ve yerel çözümleri bulabilmesi hedeflenmektedir.

Denklem (2.10) kubit durumunun dönderileceği rotasyon açısını belirlemektedir. Şekil 2.2 bir kubit durumu için beklenen rotasyon yöntemini grafiksel olarak göstermektedir. Şekilde görüldüğü üzere rotasyon işleminden sonra kubit durumunun genliklerinden $|\alpha_{j,i}^t|$ değeri azalmakta, $|\beta_{j,i}^t|$ değeri ise artmaktadır.

$$\begin{pmatrix} \alpha_{j,i}^{t+1} \\ \beta_{j,i}^{t+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\Delta\theta_{j,i}^t) & -\sin(\Delta\theta_{j,i}^t) \\ \sin(\Delta\theta_{j,i}^t) & \cos(\Delta\theta_{j,i}^t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha_{j,i}^t \\ \beta_{j,i}^t \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

$$\Delta\theta_{j,i}^t = \text{sgn}(\alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t) \theta_0 \exp\left(\frac{|\beta_{j,i}^t|}{|\alpha_{j,i}^t| + \gamma}\right) \quad (2.10)$$



Şekil 2.2. Bir kubit durumu için QRG'den beklenen rotasyon.

2.2.4. Ayrık Çaprazlama

RCQEA belirli periyotlarda belirlenen sayılarda popülasyondaki kromozomlar arasından rastgele seçilen ebeveyn kromozom çiftleri üzerinde ayrık çaprazlama operatörü kullanmaktadır. Ebeveyn kromozomların birbirine karşılık gelen tüm genleri %50 olasılıkla rastgele olarak birbiriyle çaprazlanır ve iki yeni melez kromozom oluşturulur. Bu sayede popülasyonda çeşitlilik amaçlanmaktadır.

Denklem (2.11) kullanılan ayrık çaprazlama yöntemini göstermektedir. Popülasyondaki rastgele seçilen ebeveyn kromozomların karşılıklı genleri $[0,1]$ aralığında tanımlı rastgele üretilen bir ondalık değer $0,5$ değerinden küçük veya büyük olması durumuna

göre birbiriyle değiş tokuş yapılır bu sayede iki yeni kromozom oluşturulmuş olur.

$$\left(x_{k,i}^t, \alpha_{k,i}^t, \beta_{k,i}^t\right)^T = \begin{cases} \left(x_{u,i}^t, \alpha_{u,i}^t, \beta_{u,i}^t\right)^T, & r < 0.5 \\ \left(x_{v,i}^t, \alpha_{v,i}^t, \beta_{v,i}^t\right)^T, & r \geq 0.5 \end{cases} \quad (2.11)$$

2.2.5. Tepe Tırmanma Seçimi (Hill Climbing Selection – HCS)

RCQEA’da ayırık çaprazlama ve mutasyon işlemlerinden sonra oluşturulan kromozomların uygunluk değerleri popölasyondaki bireylerden daha iyiye onların yerini alırlar. Bu tekniğe tepe tırmanma seçimi denilmektedir. Algoritma bu sayede küresel çözümleri bulabilmektedir.

2.3. RCQEA ÜZERİNE GELİşTİRMELER

Bu çalışmada literatürde bulunan RCQEA üzerine geliştirmeler yapılmıştır. QRG kapısı geliştirilmiş ve bu sayede algoritmanın yakınsama hızı artırılmıştır. Ayrıca kullandığımız arama uzayı daraltma tekniği algoritmanın küresel çözümleri bulmasını kolaylaştırmıştır. Bu geliştirmeler bu bölümde anlatılmıştır.

2.3.1. QRG

RCQEA’nın orijinal versiyonunda kullanılan Denklem (2.9) ve Denklem (2.10)’da ifade edilen QRG, bazı durumlarda amacından sapmaktadır. Wright ve Jordanov yaptıkları çalışmada Denklem (2.3)’de belirtilen normalizasyon koşulunu sağlayan bazı olasılıksal genlik çifti değerleri için QRG’nin verimsiz çalıştığını gözlemlemiştir. Örneğin, olasılıksal genlik çiftlerinin değerleri $\alpha = 0,01$ ve $\beta = 0,99$ olması durumunda QRG, rotasyon açısı olarak $2,0e7$ değerini üretmektedir. Rotasyon açısının maksimum olarak $\pi/2$ olması gerekmektedir ve bu durum nedeniyle olasılıksal genlik çiftlerinin değerleri istenildiği gibi değişmemektedir. Dolayısıyla RCQEA’nın yerel ve küresel çözümleri bulması zorlaşmaktadır [37].

Bu problemi çözmek için araştırmacılar literatüre çeşitli yöntemler sunmuşlardır. Wright ve Jordanov yaptıkları çalışmada kübit durumunun genliklerini kademeli olarak değiştiren bir rotasyon açısı belirleme yaklaşımı sunmuşlardır. Önerdikleri rotasyon açısı belirleme yöntemi Denklem (2.12)’de ifade edilmiştir [37].

$$\Delta\theta_{j,i}^t = \text{sgn}(\alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t) \pi / 250 \quad (2.12)$$

Bu çalışmada QRG'nin rotasyon açısının belirlenmesi için farklı bir teknik önerilmiştir. Önerilen teknik olasılıksal genlik çiftlerinin tüm durumlarında kübit durumunu istenildiği gibi rotasyona uğratmaktadır ve QRG'nin amacına uygun çalışmasını sağlamaktadır. Bu sayede RCQEA'nın küresel çözümlere yakınsama oranı artırılmıştır. Önerdiğimiz teknik kübit durumunun olasılıksal genliklerini ve açısını kullanmaktadır. Bu teknik sayesinde QRG her durumda kendisinden beklenen şekilde çalışmaktadır.

QRG için önerdiğimiz teknik Denklem (2.13)- (2.16) ile ifade edilmiştir. Bu teknikte kübit durumunun olasılıksal genliklerinin çarpımlarının sırasıyla Denklem (2.13) için (-1), Denklem (2.14) için (0), Denklem (2.15) için (1) olması durumu göz önüne alınmıştır. Dolayısıyla A, B, C ifadeleri sadece olasılıksal genliklerin çarpımlarının sırasıyla (-1), 0, 1 olduğu durumlarda sıfırdan farklı değere sahip olabileceklerdir. Denklem (2.16) ise 0 ile $\pi / 2$ minimum ve maksimum değerleri arasında normalizasyon yaparak rotasyon açısını belirlemektedir. Geliştirdiğimiz QRG sayesinde RCQEA daha efektif çalışmaktadır.

$$A = - \left(\frac{(\text{sgn}(\alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t) - 1)}{2} \right) \left(\frac{\pi}{2} - \theta_i^t \left(\text{mod } \frac{\pi}{2} \right) \right) \text{sgn}(\alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t) \quad (2.13)$$

$$B = - \left(\frac{2(\text{sgn}(\alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t) + 1)}{2} \right) \left(\frac{2(\text{sgn}(\alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t) - 1)}{2} \frac{\pi}{2} \right) \quad (2.14)$$

$$C = \left(\frac{-(\text{sgn}(\alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t) + 1)}{2} \right) \theta_i^t \left(\text{mod } \frac{\pi}{2} \right) \text{sgn}(\alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t) \quad (2.15)$$

$$\Delta\theta_{j,i}^t = \frac{\pi}{4} \left(\frac{|A + B + C| - \min}{\max - \min} \right) \left(-\text{sgn}(\alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t)^{\text{sgn}(\alpha_{j,i}^t, \beta_{j,i}^t)} \right) \quad (2.16)$$

2.3.2. Arama Uzayı Daraltma Tekniği

Bu çalışmada arama uzayı daraltma tekniği benimsenmiştir [34]. Teknik, temel olarak küresel çözümleri barındıran arama uzayı ne kadar daraltılırsa küresel çözümlerin

bulunma olasılığı o kadar yükselir mantığına dayanmaktadır. Bu mantıkla kromozomdaki her bir genin minimum (l_i^r) ve maksimum (u_i^r) sınırları Denklem (2.17)- (2.19)'deki gibi belirlenir. Denklem (2.17)'de kullanılan ζ ifadesi 0 ile 1 arasında rastgele üretilen bir değeri temsil etmektedir. Denklem (2.17)'de kromozomun genlerindeki gerçek değerlerin bir sonraki iterasyon için üst ve alt sınırları belirlenmektedir. Kromozomun tüm genlerindeki gerçek değerlerin minimum ve maksimum değerlerin yakın bölgesinde bir sonraki iterasyon için arama uzayının minimum ve maksimum sınırları belirlenir. Bu sayede arama uzayı kademe kademe daraltılmaktadır. Arama uzayının daha da daraltılabilmesi için Denklem (2.18) ve Denklem (2.19) kullanılmaktadır.

$$\begin{cases} l_i^r = \min \{x_1^t, \dots, x_N^t\} - \zeta (u_i^{r-1} - l_i^{r-1}) \\ u_i^r = \max \{x_1^t, \dots, x_N^t\} + \zeta (u_i^{r-1} - l_i^{r-1}) \end{cases} \quad (2.17)$$

$$\begin{cases} l_i^r = l_i^{r-1}, & \text{eğer } l_i^r < l_i^{r-1} \text{ ise} \\ l_i^r = l_i^r, & \text{eğer } l_i^r \geq l_i^{r-1} \text{ ise} \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\begin{cases} u_i^r = u_i^{r-1}, & \text{eğer } u_i^r > u_i^{r-1} \text{ ise} \\ u_i^r = u_i^r, & \text{eğer } u_i^r \leq u_i^{r-1} \text{ ise} \end{cases} \quad (2.19)$$

3. GERÇEK KODLU KUANTUM KLONAL SEÇİM ALGORİTMASI (REAL CODED QUANTUM CLONAL SELECTION ALGORITHM – RCQCSA)

Yapay bağışıklık sistemleri biyolojik mekanizmaları modelleyen bir sistemdir [56], [57]. Çalışma mekanizması bakımından yapay bağışıklık sistemlerine dayanan farklı türde metasezgisel algoritmalar vardır. Bunlardan biri olarak Klonal Seçim Algoritması (CLONALG) klonal seçim prensiplerinden esinlenmektedir [58]–[60]. [59]’da yapılan çalışmada CLONALG detaylıca anlatılmıştır.

Bu bölümde RCQEA’ nın performansını artırmak ve küresel çözümleri daha kolay şekilde bulabilmesini sağlamak için algoritmanın çalışma mekanizmasını klonal seçim prensiplerine dayandırarak geliştirdiğimiz RCQCSA algoritması detaylıca anlatılmıştır.

Bu çalışmada, RCQCSA algoritmasında kullandığımız antikör yapısı RCQEA’da kullanılan üçlü kromozom yapısıyla benzer şekilde geliştirilmiştir. Ayrıca RCQCSA’da antikörlerin çeşitliliğini oluşturmak için RCQEA’da kullanılan mutasyon operatörü ve geliştirdiğimiz QRG kullanılmıştır. RCQCSA klonal seçim prensiplerine dayandırıldığından dolayı RCQCSA’ da ayrık çaprazlama operatörü kullanılmamıştır.

Klonal seçim prensiplerine dayanan RCQCSA’ nın kaba kodu Algoritma 3.1’de verilmiştir. Algoritmanın çalışma mekanizması şu şekilde anlatılabilir.

1. Oluşturulmuş antikörlerin $g(.)$ amaç fonksiyonuyla belirlenen f uygunluk değeri hesaplanır.
2. Uygunluğu yüksek olan antikörler seçilir ve uygunluk oranıyla doğru orantılı olacak şekilde klonlanarak yeni bir C repertuarı oluşturulur. Bu çalışmada antikörlerin uygunluk oranlarıyla doğru orantılı olarak uygunluk sırasına göre azalan bir popülasyon sırasında antikörlerin her biri için klonlanma sayısını belirlemek amacıyla Denklem (3.1)’deki ifade kullanılmıştır. N kullanılan antikör sayısını temsil etmektedir.

$$\text{Klon sayısı} = \text{round}(N * 0.68^i) \quad (3.1)$$

3. C repertuarındaki klonlanmış antikora mutasyon operatörü uygulanır ve antikordaki gerçek değişkenler mutasyona uğrattılır.
4. Daha kötü çözümler bulunması durumunda QRG ile kübit durumuna rotasyon işlemi gerçekleştirilir.
5. Arama uzayı daraltılır.

Algoritma 3.1. RCQCSA

Girdi: antikorlar, iterasyon sayısı, seçim sayısı, yer değiştirme sayısı, olasılıksal genlikler

Çıktı: en iyi çözüm

```

1  Begin
2      uygunluk değerleri ← uygunluk değeri hesapla(antikorlar);
3      for iter = 1 to n (iterasyon) do
4          seçilen antikorlar ← seç(antikorlar, uygunluk değerleri, seçim sayısı);
5          C repertuarı ← klonla(seçilen antikorlar, uygunluk değerleri);
6          C repertuarı ← CDMO(C repertuarı, uygunluk değerleri);
7          olasılıksal genlikler ← QRG(C repertuarı, uygunluk değerleri);
8          C repertuarı uygunluk değerleri ← calcAffinities(C repertuarı);
9          güncelle (antikorlar, uygunluk değerleri, C repertuarı, uygunluk değerleri,
              yer Değiştirme Sayısı);
10         arama uzayını daralt()
11     end
12     en iyi çözüm ← en uygun antikoru bul(antikorlar);
13 end

```

4. RCQEA VE RCQCSA'NIN OPTİMİZASYON ÜZERİNE PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI

Bu tez çalışmasında RCQEA'nın orijinal versiyonunu, geliştirdiğimiz QRG ile birlikte arama uzayı daraltma tekniği uyguladığımız modifiye edilmiş RCQEA'yı, Wright ve Jordanov tarafından önerilen SRCQEA'yı [37] (Stepwise Real Coded Quantum Evolutionary Algorithm – Adım adım gerçek kodlu kuantum evrimsel algoritma) ve önerdiğimiz RCQCSA'yı kullanarak iki farklı optimizasyon probleminin çözülmesiyle algoritmaların performans karşılaştırması yapılmıştır. Bu iki optimizasyon probleminden birisi karmaşık fonksiyonların optimizasyonu, diğeri ise bir ters sarkaç sisteminde sistemi kontrol eden AT2-BMK'nın optimizasyonudur.

4.1. KARMAŞIK FONKSİYONLARIN OPTİMİZASYONU

Bu tez çalışmasında algoritmaları, karmaşık fonksiyonların optimizasyonunda kullanmak ve test etmek amacıyla kalite test fonksiyonları kullanılmıştır. Literatürde birçok kalite test fonksiyonu bulunmaktadır. Bu fonksiyonlar gerçek hayattaki mühendislik problemlerinin zorluk ve karmaşıklığına sahiptir. Optimizasyon çalışmalarında sıklıkla bu fonksiyonlar kullanılarak algoritmaların yakınsama, hassasiyet, sağlamlık ve genel performans karşılaştırması yapılmaktadır. Bu karşılaştırma, kalite test fonksiyonlarının zorluk seviyeleri, boyut ve aralık parametreleri değiştirilerek yapılır [61], [62].

Bu çalışmada algoritmaların yüksek boyutlu problemlerin optimizasyonundaki etkisini gözlemleyebilmek için 13 tane test fonksiyonu kullanılmıştır. Kullanılan bu 13 fonksiyon ve bu fonksiyonların boyut sayısı, üst ve alt limitleri ve küresel minimum noktaları Çizelge 4.1'de verilmiştir. $f_1 - f_7$ fonksiyonları tek doruklu (unimodal) fonksiyonlardır. f_6 fonksiyonu sürekli olmayan ve bir minimum noktası olan adım fonksiyonudur. f_7 fonksiyonu kuadratik fonksiyondur. $f_8 - f_{13}$ fonksiyonları ise yerel minimumlarının sayısının problemin boyutuyla eksponansiyel olarak arttığı çok doruklu (multimodal) fonksiyonlardır [6], [63], [64]. Çizelge 4.1'de n boyut sayısını ifade

etmektedir. Fonksiyonun minimum ve maksimum alabileceği değerler “Sınırlar” sütununda belirtilmiştir. Fonksiyonları minimum yapan optimum değerler ise “Optimum” sütununda gösterilmiştir.

Çizelge 4.1. Kullanılan kalite test fonksiyonları [64].

Fonksiyon	Denklem	Sınırlar	Optimum
Sphere	$f_1(x) = \sum_{i=1}^n x_i^2$	$[-100,100]^n$	0
Schwefel 2.22	$f_2(x) = \sum_{i=1}^n x_i + \prod_{i=1}^n x_i $	$[-10,10]^n$	0
Schwefel 1.2	$f_3(x) = \sum_{i=1}^n \left(\sum_{j=1}^i x_j \right)^2$	$[-100,100]^n$	0
Schwefel 2.21	$f_4(x) = \max_i \{ x_i , 1 \leq i \leq n \}$	$[-100,100]^n$	0
Rosenbrock	$f_5(x) = \sum_{i=1}^{n-1} \left[100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2 \right]$	$[-30,30]^n$	0
Step	$f_6(x) = \sum_{i=1}^n (\lfloor x_i + 0.5 \rfloor)^2$	$[-100,100]^n$	0
Quartic	$f_7(x) = \sum_{i=1}^n i x_i^4 + \text{random}[0,1)$	$[-1.28,1.28]^n$	0
Schwefel	$f_8(x) = \sum_{i=1}^n -x_i \sin(\sqrt{ x_i })$	$[-500,500]^n$	-12569,50
Rastrigin	$f_9(x) = \sum_{i=1}^n [x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10]$	$[-5.12,5.12]^n$	0
Ackley	$f_{10}(x) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2} \right) - \exp \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \cos 2\pi x_i \right)$	$[-32,32]^n$	0
Griewank	$f_{11}(x) = \frac{1}{4000} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \prod_{i=1}^n \cos \left(\frac{x_i}{\sqrt{i}} \right) + 1$	$[-600,600]^n$	0

Çizelge 4.2. (devam) Kullanılan kalite test fonksiyonları [64].

Penalized-1	$f_{12}(x) = \frac{\pi}{n} \left\{ 10 \sin^2(\pi y_i) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(y_i - 1)^2}{[1 + 10 \sin^2(\pi y_i + 1)]} \right\}$ $+ \sum_{i=1}^n u(x_i, 10, 100, 4),$ $y_i = 1 + \frac{1}{4}(x_i + 1),$ $u(x_i, a, k, m) = \begin{cases} k(x_i - a)^m, & x_i > a, \\ 0, & -a \leq x_i \leq a, \\ k(-x_i - a)^m, & x_i < -a, \end{cases}$	$[-50, 50]^n$	0
Penalized-2	$f_{13}(x) = 0.1 \left\{ \sin^2(3\pi x_1) + \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(x_i - 1)^2}{[1 + \sin^2(3\pi x_i + 1)]} \right\}$ $+ (x_n - 1)[1 + \sin^2(2\pi x_n)]$ $+ \sum_{i=1}^n u(x_i, 5, 100, 4)$	$[-50, 50]^n$	0

4.1.1. Optimizasyon Sonuçları

Çizelge 4.2, Çizelge 4.3 ve Çizelge 4.4 sırasıyla RCQEA'nın orijinal versiyonu, SRCQEA [37], geliştirdiğimiz RCQEA (RCQEA v2) ve RCQCSA ile optimize edilen sırasıyla 30, 50 ve 100 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçlarını göstermektedir. Algoritmaların performans karşılaştırmasını gerçekleştirmek için her bir algoritma için fonksiyon değerlendirme sayısı 500.000 olarak belirlenmiştir. Algoritmaların benzer şartlarda nasıl çalıştığını gözlemleyebilmek için RCQEA ve SRCQEA' da 50 tane kromozom, RCQCSA' da ise 50 tane antikor kullanılmıştır. Sürekli değişkenlerin maksimum ve minimum değerleri arasında kromozomlarda 30, 50 ve 100 boyutlu rastgele başlangıç popülasyonu oluşturulmuştur. Optimizasyon sonuçları algoritmaların 50 tekrar ile çalıştırılmasından bulunan optimum çözümlerden elde edilmiştir. Elde edilen sonuçların arasından en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerleri gözlemlenmiştir. Sonuçlar RCQCSA'nın daha az standart sapmayla küresel çözümleri bulduğunu göstermektedir. Ayrıca Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3 sırasıyla 30 boyutlu, 50 boyutlu ve 100 boyutlu Penalized-2 fonksiyonunun optimizasyonunda

algoritmaların iterasyon sayısına karşılık maliyet bakımından performans karşılaştırmasını göstermektedir. Algoritmaların optimum çözümlere yakınsamasını gözlemlemek için optimizasyonun ilk 100 iterasyonu incelenmiştir. Sonuçlar RCQCSA'nın daha az iterasyonda küresel çözümleri bulunduğunu göstermektedir. RCQEA'da çeşitliliği artıran çaprazlama operatörünün RCQCSA'da bulunmamasına rağmen geliştirilen QRG ile arama uzayının tamamında arama gerçekleştirilebilmekte ve algoritmanın iyi çözümlerin etrafındaki daha iyi çözümlere ulaşmasını sağlayan çalışma mekanizması sayesinde küresel çözümler bulunabilmektedir. Ayrıca kullandığımız arama uzayı daraltma tekniği algoritmanın küresel çözümleri düşük iterasyonlarda bulabilmesini kolaylaştırmaktadır.

Çizelge 4.3. 30 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.

Fonksiyon	Fonksiyon Tipi	Algoritma	En İyi	En Kötü	Ortalama	Standart Sapma
Sphere	Tek doruklu	RCQEA	1,84e-3	7,74e-3	3,86e-3	2,54e-3
		SRCQEA	1,90e-4	3,59e-4	2,79e-4	6,83e-5
		RCQEA v2	1,29e-201	3,07e-198	6,48e-199	0
		RCQCSA	0	0	0	0
Schwefel 2,22	Tek doruklu	RCQEA	1,69e-2	2,27e-2	2,02e-2	2,33e-3
		SRCQEA	9,98e-3	2,76e-2	1,84e-2	6,50e-3
		RCQEA v2	1,31e-122	2,76e-120	8,61e-121	1,18e-120
		RCQCSA	9,52e-205	3,73e-200	1,15e-200	0
Schwefel 1,2	Tek doruklu	RCQEA	4,99e-1	1,06	7,01e-1	2,29e-1
		SRCQEA	2,36e-1	0,87	6,22e-1	3,22e-1
		RCQEA v2	1,18e-4	9,20e-3	3,58e-3	4,23e-3
		RCQCSA	1,66e-5	1,08e-3	1,23e-4	4,76e-2
Schwefel 2,21	Tek doruklu	RCQEA	1,87e-1	3,18e-1	2,29e-1	5,42e-2
		SRCQEA	3,17e-2	9,73e-2	6,09e-2	3,21e-2
		RCQEA v2	2,15e-27	7,27e-25	3,21e-25	3,39e-25
		RCQCSA	6,56e-57	1,73e-54	3,66e-55	7,67e-55

Çizelge 4.4. (devam) 30 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.

Rosenbrock	Tek doruklu	RCQEA	6,99e-1	8,82e-1	7,91e-1	6,97e-1
		SRCQEA	5,12e-1	1,07	8,12e-1	1,40e-1
		RCQEA v2	6,55e-5	4,63e-3	5,32e-3	3,23e-3
		RCQCSA	6,66e-7	6,83e-5	3,23e-6	5,63e-5
Step	Tek doruklu, sürekli olmayan	RCQEA	0	0	0	0
		SRCQEA	0	0	0	0
		RCQEA v2	0	0	0	0
		RCQCSA	0	0	0	0
Quartic	Tek doruklu	RCQEA	3,53e-3	7,48e-3	4,65e-3	1,63e-3
		SRCQEA	2,87e-3	5,72e-3	4,96e-3	1,20e-3
		RCQEA v2	6,26e-4	1,65e-3	1,299e-3	4,23e-4
		RCQCSA	1,41e-5	6,32e-5	4,54e-5	1,99e-5
Schwefel	Çok doruklu	RCQEA	-12569,48	-12569,48	-12569,48	1,31e-3
		SRCQEA	-12569,48	-12569,47	-12569,48	2,45e-3
		RCQEA v2	-12569,48	-12569,48	-12569,48	2,72e-12
		RCQCSA	-12569,48	-12569,48	-12569,48	1,28e-12
Rastrigin	Çok doruklu	RCQEA	6,02e-4	2,47e-3	1,32e-3	8,10e-4
		SRCQEA	4,93e-4	3,60e-3	1,21e-3	3,34e-4
		RCQEA v2	5,68e-14	2,27e-13	1,13e-13	6,96e-14
		RCQCSA	0	5,68e-14	2,27e-14	3,11e-14
Ackley	Çok doruklu	RCQEA	9,16e-3	1,64e-2	1,36e-2	2,83e-3
		SRCQEA	8,02e-3	2,00e-2	1,43e-2	5,05e-3
		RCQEA v2	2,22e-14	3,99e-14	3,21e-14	7,70e-15
		RCQCSA	1,50e-14	1,50e-14	1,50e-14	0
Griewank	Çok doruklu	RCQEA	1,51e-2	6,08e-2	3,70e-2	2,18e-2
		SRCQEA	3,30e-3	1,84e-2	9,45e-3	5,85e-3
		RCQEA v2	0	1,11e-3	3,12e-4	4,55e-3
		RCQCSA	0	5,54e-4	1,13e-3	2,46e-3

Çizelge 4.5. (devam) 30 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.

Penalized-1	Çok doruklu	RCQEA	3,63e-06	5,56e-05	2,31e-05	2,29e-05
		SRCQEA	2,21e-06	4,74e-05	2,18e-05	1,67e-05
		RCQEA v2	1,57e-32	1,57e-32	1,57e-32	0
		RCQCSA	1,51e-32	1,51e-32	1,51e-32	0
Penalized-2	Çok doruklu	RCQEA	7,58e-05	3,39e-4	1,73e-4	1,04e-4
		SRCQEA	3,83e-05	1,78e-4	8,91e-05	5,29e-05
		RCQEA v2	1,34e-32	1,34e-32	1,34e-32	0
		RCQCSA	1,34e-32	1,34e-32	1,34e-32	0

Çizelge 4.6. 50 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.

Fonksiyon	Fonksiyon Tipi	Algoritma	En İyi	En Kötü	Ortalama	Standart Sapma
Sphere	Tek doruklu	RCQEA	1,00e-2	2,04e-2	1,44e-2	4,18e-3
		SRCQEA	1,33e-2	1,91e-2	1,59e-2	2,17e-3
		RCQEA v2	1,16e-125	2,01e-124	1,02e-124	6,79e-125
		RCQCSA	1,35e-189	3,66e-187	7,87e-188	0
Schwefel 2,22	Tek doruklu	RCQEA	5,03e-2	6,40e-2	5,84e-2	5,34e-3
		SRCQEA	4,98e-2	6,20e-2	5,76e-2	6,81e-3
		RCQEA v2	7,13e-77	7,04e-76	2,57e-76	2,55e-76
		RCQCSA	4,82e-120	4,91e-119	2,44e-119	1,89e-119
Schwefel 1,2	Tek doruklu	RCQEA	5,96	8,44	7,23	1,14
		SRCQEA	1,52	2,52	1,91	3,73e-1
		RCQEA v2	2,07e-1	3,15e-1	2,66e-1	4,30e-2
		RCQCSA	2,89e-2	5,61e-2	3,85e-2	1,08e-3
Schwefel 2,21	Tek doruklu	RCQEA	6,41e-1	8,03e-1	7,19e-1	7,59e-2
		SRCQEA	6,67e-2	2,18e-2	1,25e-2	6,22e-3
		RCQEA v2	1,48e-11	7,49e-11	3,38e-11	2,41e-11
		RCQCSA	1,90e-26	3,64e-25	1,68e-25	1,30e-25
Rosenbrock	Tek doruklu	RCQEA	9,18e-1	1,65e-1	1,23e-1	3,18e-2
		SRCQEA	8,82e-1	1,39e-1	1,05e-1	2,18e-2
		RCQEA v2	7,79e-4	1,52e-4	1,16e-4	3,33e-5
		RCQCSA	7,00e-6	1,42e-6	9,43e-6	2,80e-6

Çizelge 4.7. (devam) 50 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.

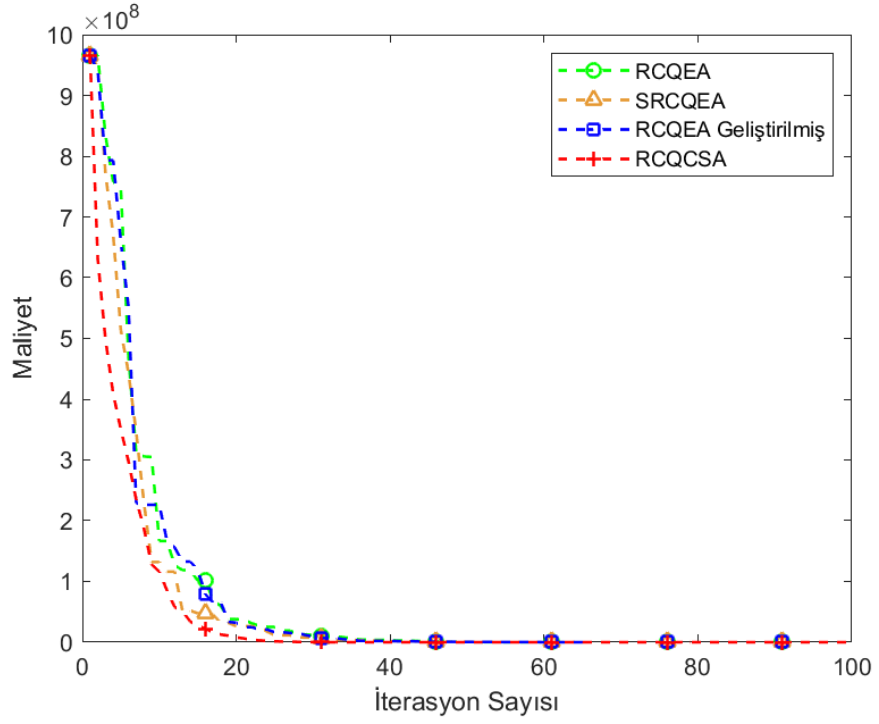
Step	Tek doruklu, sürekli olmayan	RCQEA	0	0	0	0
		SRCQEA	0	0	0	0
		RCQEA _{v2}	0	0	0	0
		RCQCSA	0	0	0	0
Quartic	Tek doruklu	RCQEA	1,30e-2	2,25e-2	1,60e-2	3,88e-3
		SRCQEA	9,21e-3	2,11e-3	1,44e-3	4,53e-4
		RCQEA _{v2}	3,05e-3	5,63e-3	4,26e-3	9,77e-4
		RCQCSA	8,37e-4	1,78e-3	1,18e-3	3,57e-4
Schwefel	Çok doruklu	RCQEA	-14949,13	-14949,10	-14949,12	1,11e-2
		SRCQEA	-14949,13	-14949,11	-14949,12	7,09e-3
		RCQEA _{v2}	-14949,14	-14949,14	-14949,14	2,1599e-11
		RCQCSA	-14949,14	-14949,14	-14949,14	8,9112e-12
Rastrigin	Çok doruklu	RCQEA	4,15e-3	1,90e-2	1,03e-2	5,52e-3
		SRCQEA	3,01e-3	1,01e-2	6,53e-3	3,00e-3
		RCQEA _{v2}	5,68e-14	4,13e-13	3,09e-14	3,11e-14
		RCQCSA	5,68e-16	1,13e-15	1,01e-15	1,57e-15
Ackley	Çok doruklu	RCQEA	1,76e-2	3,38e-2	2,58e-2	6,33e-3
		SRCQEA	1,76e-2	3,22e-2	2,25e-2	6,24e-3
		RCQEA _{v2}	2,22e-14	3,99e-14	3,14e-14	6,45e-15
		RCQCSA	4,35e-16	6,48e-16	5,48e-16	1,07e-15
Griewank	Çok doruklu	RCQEA	1,74e-2	4,91e-2	3,00e-2	1,26e-2
		SRCQEA	1,26e-2	4,32e-2	2,95e-2	1,29e-2
		RCQEA _{v2}	0	8,22e-1	1,64e-1	3,68e-1
		RCQCSA	0	6,022e-1	1,53e-1	2,60e-1
Penalized-1	Çok doruklu	RCQEA	1,45e-05	1,23e-4	4,14e-05	4,58e-05
		SRCQEA	9,99e-06	1,78e-05	1,35e-05	2,93e-06
		RCQEA _{v2}	9,42e-33	9,42e-33	9,42e-33	0
		RCQCSA	9,42e-33	9,42e-33	9,42e-33	0
Penalized-2	Çok doruklu	RCQEA	3,54e-4	1,47e-3	6,38e-4	4,70e-4
		SRCQEA	1,78e-4	6,09e-4	3,90e-4	2,03e-4
		RCQEA _{v2}	1,34e-32	1,34e-32	1,34e-32	0
		RCQCSA	1,34e-38	1,34e-38	1,34e-38	0

Çizelge 4.8. 100 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.

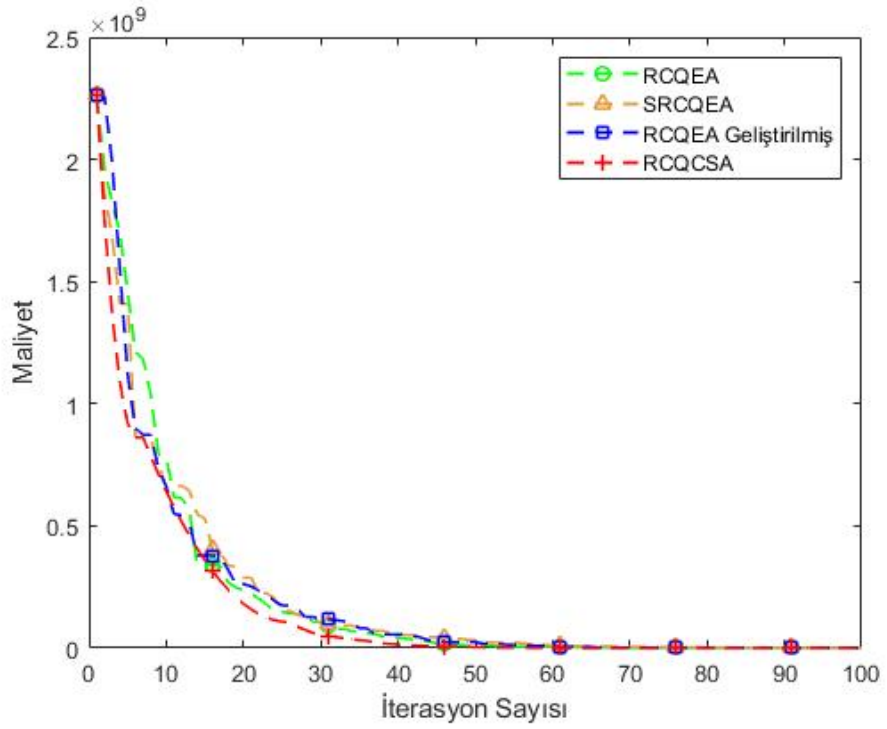
Fonksiyon	Fonksiyon Tipi	Algoritma	En İyi	En Kötü	Ortalama	Standart Sapma
Sphere	Tek doruklu	RCQEA	1,01e-1	1,42e-1	1,25e-1	1,68e-2
		SRCQEA	9,70e-2	1,00e-1	1,00e-1	1,00e-2
		RCQEA v2	6,61e-64	1,10e-62	3,39e-63	4,40e-63
		RCQCSA	3,15e-92	3,36e-90	7,50e-91	1,46e-90
Schwefel 2,22	Tek doruklu	RCQEA	2,10e-1	3,04e-1	2,54e-1	3,47e-2
		SRCQEA	2,08e-1	2,29e-1	2,19e-1	8,48e-3
		RCQEA v2	3,30e-39	1,82e-38	8,25e-39	6,23e-39
		RCQCSA	4,2836e-58	1,1933e-56	3,2666e-57	4,8905e-57
Schwefel 1,2	Tek doruklu	RCQEA	11,32	20,32	14,45	1,35
		SRCQEA	9,36	16,63	12,64	1,12
		RCQEA v2	3,42	7,54	4,67	3,94e-1
		RCQCSA	2,13	4,87	3,12	2,60e-1
Schwefel 2,21	Tek doruklu	RCQEA	2,52	3,18	2,91	2,84e-1
		SRCQEA	2,32	4,38	3,57	7,74e-1
		RCQEA v2	2,93e-3	5,87e-3	4,21e-3	1,38e-3
		RCQCSA	4,98e-08	1,37e-07	9,69e-08	4,12e-08
Rosenbrock	Tek doruklu	RCQEA	5,19	11,52	8,42	8,54e-1
		SRCQEA	3,45	6,51	5,41	4,92e-1
		RCQEA v2	2,18	4,12	3,18	2,42e-1
		RCQCSA	1,95e-1	2,85e-1	2,41e-1	1,45e-2
Step	Tek doruklu, sürekli olmayan	RCQEA	0	0	0	0
		SRCQEA	0	0	0	0
		RCQEA v2	0	0	0	0
		RCQCSA	0	0	0	0
Quartic	Tek doruklu	RCQEA	5,69e-2	7,13e-2	6,44e-2	6,56e-3
		SRCQEA	5,49e-2	7,16e-2	6,06e-2	7,41e-3
		RCQEA v2	1,90e-2	2,82e-2	2,20e-2	3,71e-3
		RCQCSA	3,72e-3	8,96e-3	6,07e-3	2,00e-3

Çizelge 4.9. (devam) 100 boyutlu karmaşık fonksiyonların optimizasyon sonuçları.

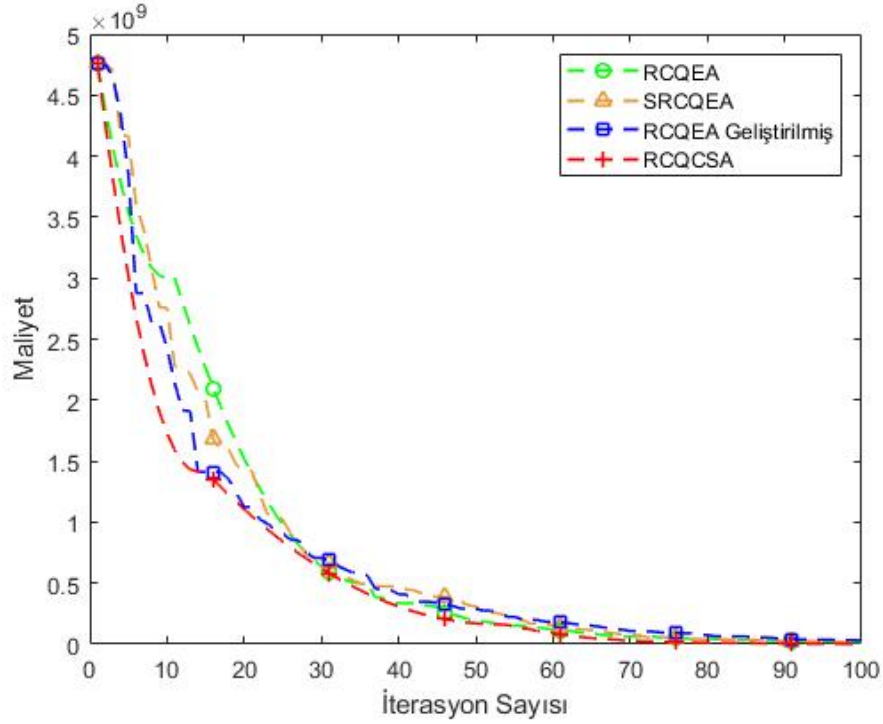
Schwefel	Çok doruklu	RCQEA	-26458,41	-25426,45	-26025,14	3,15
		SRCQEA	-24423,48	-23458,15	-23954,54	2,25
		RCQEA _{v2}	-15452,35	-16854,52	-15975,26	1,25
		RCQCSA	-15124,41	-15500,52	-15301,25	1,54e-1
Rastrigin	Çok doruklu	RCQEA	5,48e-2	9,61e-2	7,83e-2	1,85e-2
		SRCQEA	4,50e-2	7,78e-2	6,16e-2	1,49e-2
		RCQEA _{v2}	6,82e-13	2,50e-12	1,59e-12	7,71e-13
		RCQCSA	1,13e-13	6,82e-13	4,54e-13	2,12e-13
Ackley	Çok doruklu	RCQEA	5,02e-2	7,43e-2	6,18e-2	9,50e-3
		SRCQEA	4,07e-2	7,38e-2	5,18e-2	1,40e-2
		RCQEA _{v2}	9,32e-14	1,28e-13	1,13e-13	1,55e-14
		RCQCSA	6,48e-14	7,54e-14	7,05e-14	4,76e-15
Griewank	Çok doruklu	RCQEA	8,50e-2	1,50e-1	1,17e-2	2,48e-2
		SRCQEA	6,18e-2	1,43e-1	9,72e-2	3,25e-2
		RCQEA _{v2}	0	3,22e-1	6,45e-3	1,44e-1
		RCQCSA	0	2,52e-2	5,04e-3	1,12e-2
Penalized-1	Çok doruklu	RCQEA	4,83e-05	7,19e-4	2,43e-4	2,79e-4
		SRCQEA	4,38e-05	8,93e-05	6,59e-05	1,79e-05
		RCQEA _{v2}	4,71e-33	4,71e-33	4,71e-33	0
		RCQCSA	4,71e-33	4,71e-33	4,71e-33	0
Penalized-2	Çok doruklu	RCQEA	4,58e-3	1,01e-2	5,89e-3	2,41e-3
		SRCQEA	4,01e-3	8,65e-3	6,54e-3	2,29e-3
		RCQEA _{v2}	1,34e-32	1,34e-32	1,34e-32	0
		RCQCSA	1,34e-32	1,34e-32	1,34e-32	0



Şekil 4.1. 30 boyutlu Penalized-2 fonksiyonunun 4 farklı optimizasyondan elde edilen iterasyon – maliyet karşılaştırması.



Şekil 4.2. 50 boyutlu Penalized-2 fonksiyonunun 4 farklı optimizasyondan elde edilen iterasyon – maliyet karşılaştırması.



Şekil 4.3. 100 boyutlu Penalized-2 fonksiyonunun 4 farklı optimizasyondan elde edilen iterasyon – maliyet karşılaştırması.

4.2. AT2-BMK OPTİMİZASYONU

Bu tez çalışmada ters sarkaç sistemini kontrol eden AT2-BMK'nın optimizasyonunu için RCQCSA önerilmiştir. Bu amaçla öncelikle T1-BMK ve T2-BMK hakkında temel bilgiler verilmiştir.

4.2.1. Tip-1 Bulanık Kümeler (T1-BK) ve Tip-1 Bulanık Mantık Kontrolör (T1-BMK)

Geleneksel karar verme sistemleri mantığın temel prensibi olan iki değerlilik ilkesine dayanır. Bu yaklaşımda bir nesne bir kümenin ya elemanıdır ya da değildir. Benzer şekilde bir önerme ya doğrudur ya da değildir. Matematiksel olarak ifade edildiğinde nesne, kümenin elemanıysa “1”, değilse “0” değerini alır.

1965 yılında Zadeh bulanık mantık kavramını tanıttı [65]. Bulanık mantık klasik mantık yapısının daha genişlemiş halidir. Klasik mantık doğru ve yanlış gibi kesin ifadelerle işlem yaparken, bulanık mantık bu keskin ifadelerin arasında kalan değerleri kullanır. 1975 yılına kadar Zadeh bulanık kümeler, bulanık benzerlik ilişkileri, dilsel terimler, bulanık karar verme sistemini geliştirerek bu teoriyi genişletti [66]–[68].

Bulanık mantığın temelinde bulanık kümeler vardır. Klasik mantık ile bulanık mantık arasındaki temel fark, bulanık kümelerde, bir eleman kısmi olarak bir bulanık kümeye, kısmi olarak da başka bir bulanık kümeye üye olabilir. Bir elemanın bir bulanık kümeye ne ölçüde üye olduğu, o elemanın o küme için üyelik derecesini belirler.

4.2.2. T1-BK

Zadeh ilk olarak tip-1 bulanık mantık sistemini tanıtmıştır. Bir T1-BK kısmi üyelik derecelerine sahip elemanlardan oluşmaktadır. Bu nedenle, bir T1-BK'nın kesin sınırları yoktur. Bir eleman, birden fazla bulanık kümeye ait olabilir. Uzman görüşüne göre veya deneme yanılma yöntemi ile belirlenen T1-BK'lar sayesinde elemanların ait olduğu kümeye olan üyelik dereceleri kesin bir değerle belirlenir. D_X , sürekli ve sonsuz bir evrensel küme olmak üzere, X bulanık kümesi Denklem (4.1)'deki gibi tanımlanır. Denklem (4.1)'de $\mu_X(x)$ ifadesi X bulanık kümesindeki x elemanının T1-BK'ya olan üyelik derecesini göstermektedir.

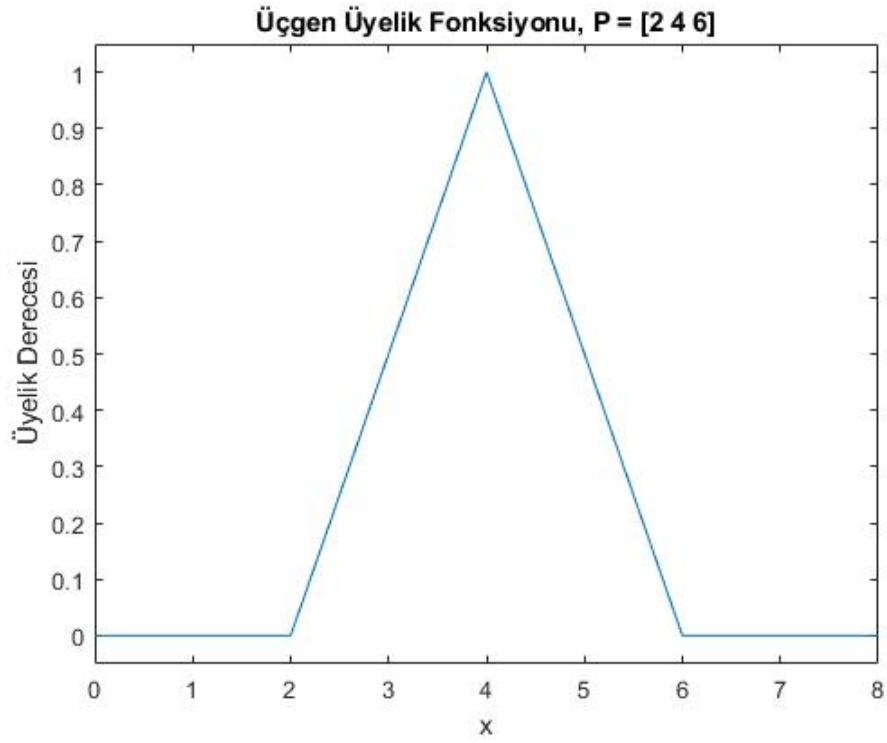
$$X = \{(x, \mu_X(x)) \mid x \in D_X\} \quad (4.1)$$

Üyelik fonksiyonu $(\mu_X(x))$ her bir elemana elemanın bulanık kümedeki aitlik derecesine göre $[0,1]$ aralığında bir değer atamaktadır. Elemanın bulanık kümeye olan üyeliği arttıkça bu üyelik derecesi de 0'dan 1'e doğru artmaktadır. Literatürde tanımlanmış birçok tip-1 üyelik fonksiyonu bulunmaktadır. Bunlardan en çok bilinenleri üçgen, yamuk ve Gauss üyelik fonksiyonlarıdır.

4.2.2.1. Üçgen Üyelik Fonksiyonu

Tip-1 üçgen üyelik fonksiyonu a, b, c olmak üzere üç parametre ile tanımlanır. Bu parametrelerden a parametresi üçgenin sol uç noktasını, b parametresi üçgenin tepe orta noktasını, c parametresi ise üçgenin sağ uç noktasını tanımlar. Üçgen üyelik fonksiyonu Denklem (4.2) ile tanımlanır. Şekil 4.4'de tip-1 üçgen üyelik fonksiyonu gösterilmiştir.

$$f(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (4.2)$$

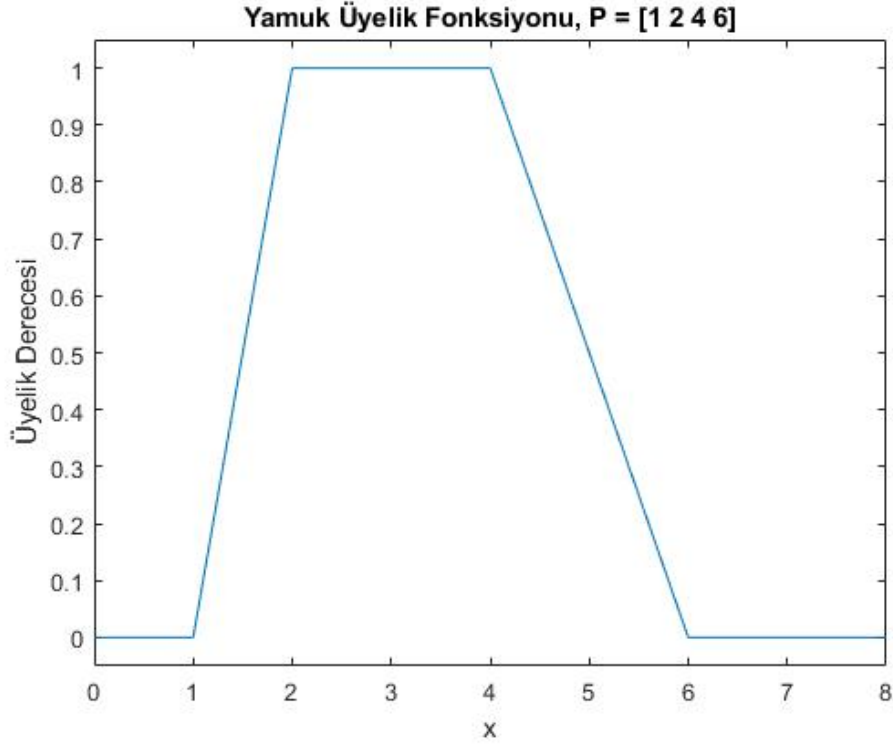


Şekil 4.4. Tip-1 üçgen üyelik fonksiyonu.

4.2.2.2. Yamuk Üyelik Fonksiyonu

Tip-1 yamuk üyelik fonksiyonu a, b, c, d olmak üzere dört parametre ile tanımlanır. Bu parametrelerden a parametresi yamuğun sol uç noktasını, b parametresi tepe sol noktasını, c parametresi tepe sağ noktasını, d parametresi ise sağ uç noktasını tanımlar. Yamuk üyelik fonksiyonu Denklem (4.3) ile tanımlanır. Şekil 4.5’de tip-1 yamuk üyelik fonksiyonu gösterilmiştir.

$$f(x; a, b, c) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (4.3)$$

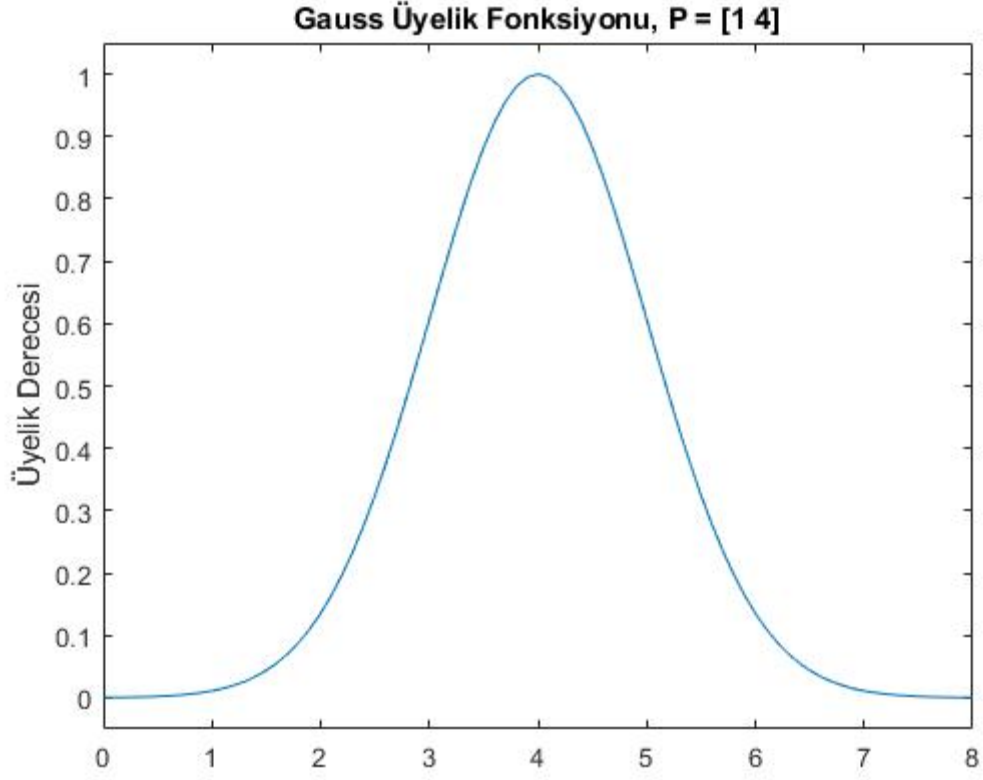


Şekil 4.5. Tip-1 yamuk üyelik fonksiyonu.

4.2.2.3. Gauss Üyelik Fonksiyonu

Tip-1 Gauss üyelik fonksiyonu c , σ olmak üzere iki parametre ile tanımlanır. Bu parametrelerden c parametresi Gauss üyelik fonksiyonunun merkez noktasını, σ parametresi ise Gauss üyelik fonksiyonunun standart sapma değerini tanımlar, dolaylı olarak taban genişliğini belirler. Gauss üyelik fonksiyonu Denklem (4.4) ile tanımlanır. Şekil 4.6’de tip-1 Gauss üyelik fonksiyonu gösterilmiştir.

$$f(x; \sigma, c) = e^{\frac{-(x-c)^2}{2\sigma^2}} \quad (4.4)$$



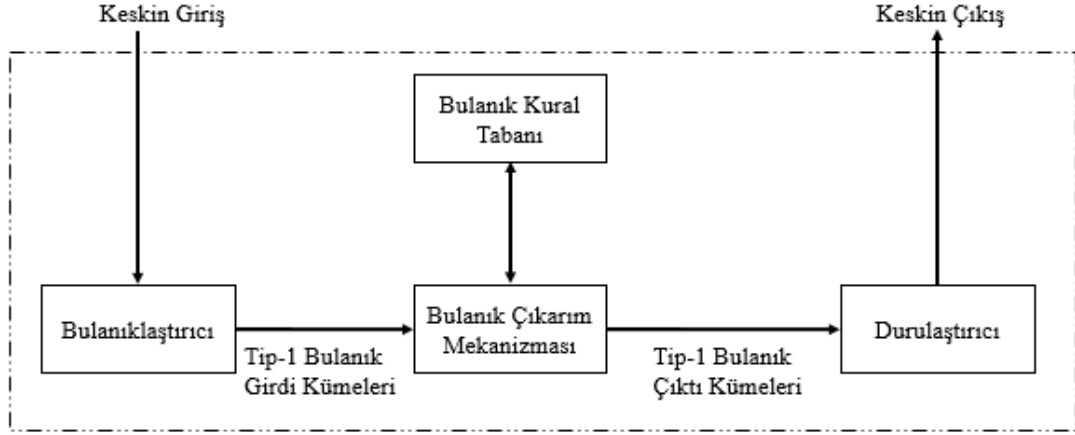
Şekil 4.6. Tip-1 Gauss üyelik fonksiyonu.

4.2.3. T1-BMK

Bu bölümde T1-BMK tanıtılmıştır. T1-BMK’da sistemi kontrol etmek için bulanık kümeler ve uzman kişiler tarafından belirlenen kurallar kullanılır. T1-BMK temel olarak 4 bloktan oluşur:

- Bulanıklaştırma
- Kural tabanı
- Çıkarım mekanizması
- Durulaştırma

T1BMK genel yapısı Şekil 4.7’deki gibidir.



Şekil 4.7. T1-BMK genel yapısı.

Bulanıklaştırıcı bloğu keskin girdileri bulanık kümelere dönüştürür. Her bir girdinin üye olduğu kümeye olan üyelik derecesini belirler. Her bir bulanık küme bir dilsel terimle temsil edilir.

Bulanık kural tabanı bulanık kuralları barındırır. Bu kurallar EĞER – O HALDE (IF-THEN) yapısını kullanır. Bulanık kurallar girdiler ve çıktılar arasındaki ilişkiyi belirler. “ x ” ve “ y ” sırasıyla girdi ve çıktı değişkenleri olmak üzere örnek bir bulanık kural (R_i) Denklem (4.5)’deki gibi tanımlanır. Burada $\tilde{X}_1^n \dots \tilde{X}_m^n$ ifadesi girdi değişkenlerinin üye olduğu bulanık kümeleri, Y^n ifadesi de çıktı değişkenlerinin üye olduğu bulanık kümeleri temsil etmektedir.

$$\tilde{R}^n : \text{IF } x_1 \text{ is } \tilde{X}_1^n \text{ and } \dots x_m \text{ is } \tilde{X}_m^n, \text{ THEN } y \text{ is } Y^n \quad (4.5)$$

Bulanık çıkarım mekanizması bloğu giriş ve çıkış bulanık kümeleri arasında kurulmuş olan ilişkilerin hepsini bir araya getirerek sistemin bir çıkışlı davranmasını temin eden işlemler topluluğunu içerir. Bu blokta her bir kuralın çıkarımı bir araya getirilir ve tüm sistemin sahip olduğu girdilere karşı nasıl çıkış vereceği belirlenir.

Bulanık çıkarım mekanizmasından elde edilen çıktılar bulanık kümelerdir. Durulaştırıcı bloğu sayesinde bu kümeler keskin çıktı değerlerine dönüştürülür. Literatürde farklı durulaştırma yöntemleri vardır. En çok kullanılan durulaştırma yöntemleri alan merkezi metodu, maksimumların ortası metodu ve yükseklik metodudur.

4.2.4. Aralıklı Tip-2 Bulanık Kümeler (AT2-BK) ve Aralıklı Tip-2 Bulanık Mantık Kontrolör (AT2-BMK)

T1-BMK bulanıklığı temsil etmek için $[0,1]$ aralığında keskin değerleri kullanırlar. Ancak değeri belirsiz bir bulanıklık ifade edileceği zaman T1-BMK yetersiz kalmaktadır. Bu nedenle Zadeh 1975 yılında tip-2 bulanık mantık kontrolörleri (T2-BMK) önermiştir [66]–[68]. T1-BMK bulanıklığı ifade etmek için keskin değerler kullanırken T2-BMK yine tip-1 bulanık kümeleri (T1-BK) kullanmaktadır. Bu sayede T2-BMK’lar belirsiz bulanıklığı ifade edebilmektedir [69], [70]. T2-BMK’ların ekstra boyutu olduğundan dolayı matematiksel olarak ifade edilmeleri kolay değildir [71]. Bu nedenle araştırmacılar hesaplama maliyetinin az olması nedeniyle T2-BMK’nın özel bir çeşidi olan AT2-BMK kullanmaktadır [72]. Araştırmacılar yaptıkları çalışmalarda kontrol operasyonlarında AT2-BMK’nın T1-BMK’dan daha dayanıklı olduğunu belirtmektedir [73], [74].

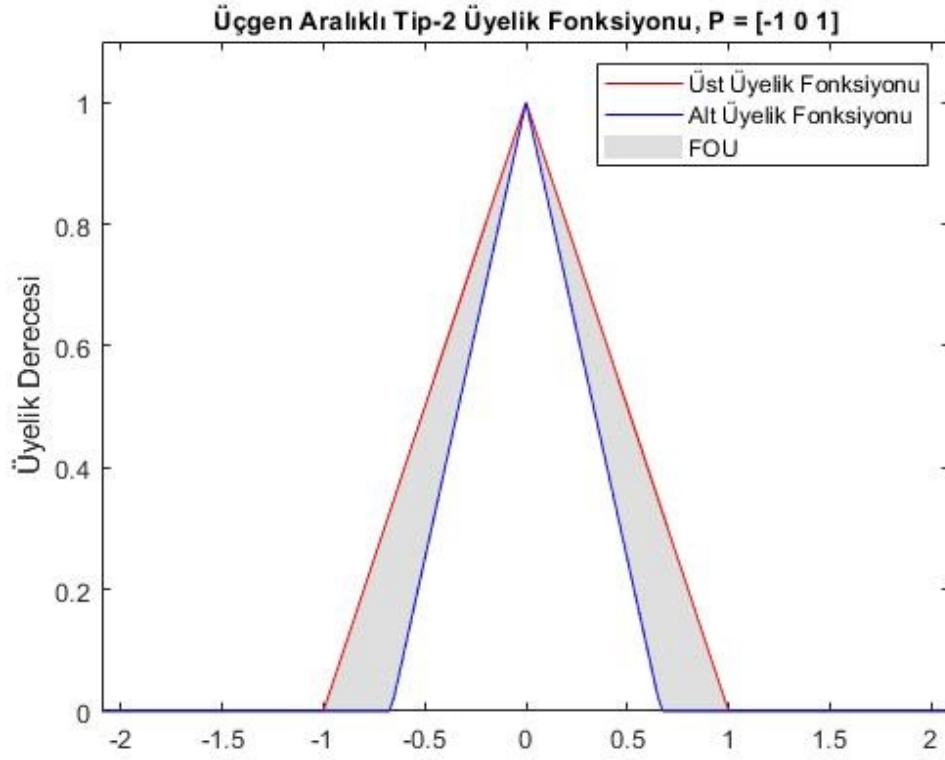
4.2.5. AT2-BK

Aralıklı tip-2 bulanık kümeler tip-2 bulanık kümelerin özel bir çeşididir. Hesaplama maliyetinin az olması nedeniyle araştırmacılar tarafından çalışmalarda sıkça kullanılmaktadır. Bu bölümde aralıklı tip-2 bulanık kümeler hakkında temel bilgiler verilmiştir.

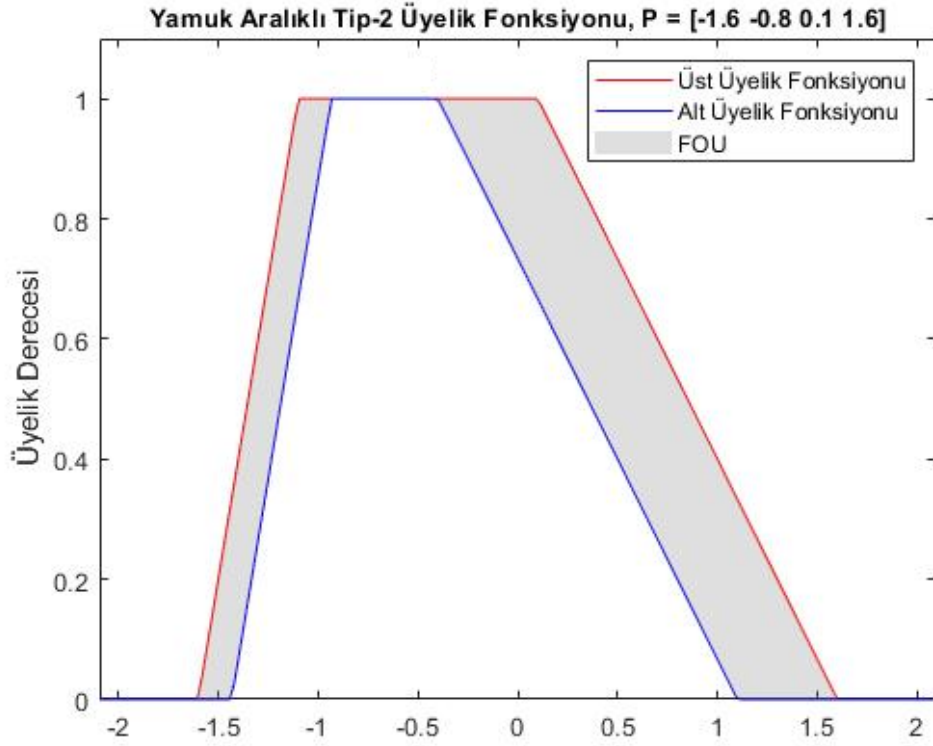
Evrensel küme $D_{\tilde{X}}$ ’de tanımlı olan girdi değeri (x) ’in bulanıklaştırılması için aralıklı tip-2 bulanık kümeler Denklem (4.6)’deki gibi tanımlanır.

$$\tilde{X} = \int_{x \in D_{\tilde{X}}} \int_{u \in J_x \subseteq [0,1]} \frac{\mu_{\tilde{X}}(x, u)}{(x, u)} \quad (4.6)$$

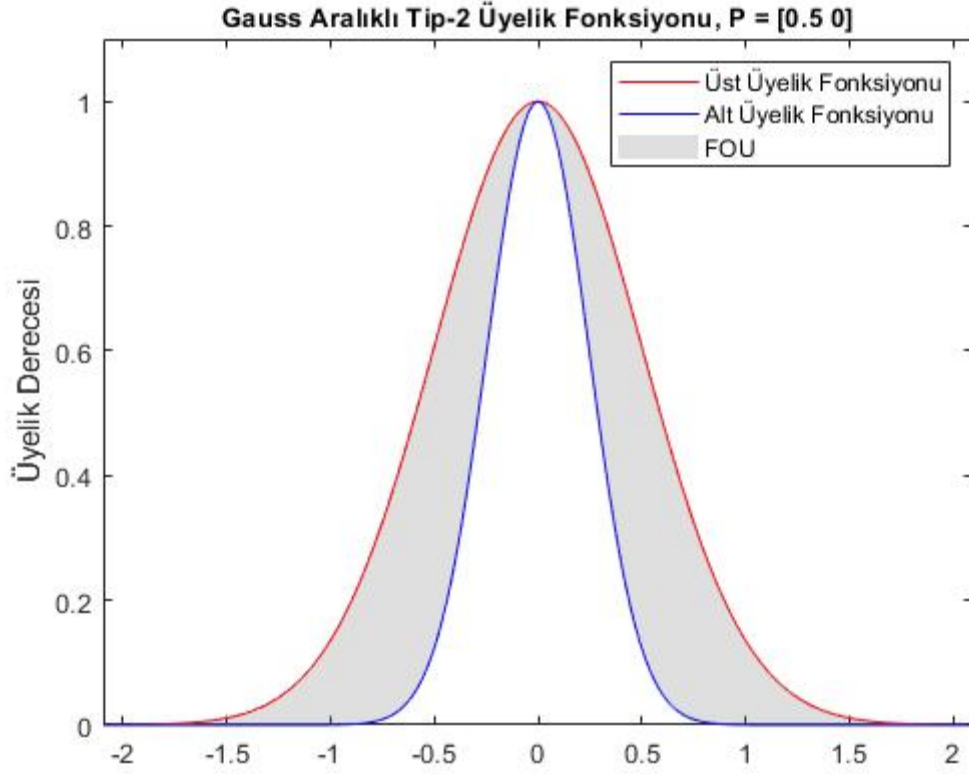
Şekil 4.8, Şekil 4.9, Şekil 4.10’de örnek olarak sırasıyla üçgen, yamuk ve gauss şeklinde tip-2 üyelik fonksiyonları gösterilmiştir. Şekillerde görüldüğü üzere tip-2 üyelik fonksiyonları üst ve alt üyelik fonksiyonları olmak üzere iki üyelik fonksiyonundan oluşmaktadır. Bu iki üyelik fonksiyonunun arasında kalan bölge Belirsizliğin Ayak İzi (Footprint of Uncertainty-FOU) olarak bilinir.



Şekil 4.8. Üçgen aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonu.



Şekil 4.9. Yamuk aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonu.



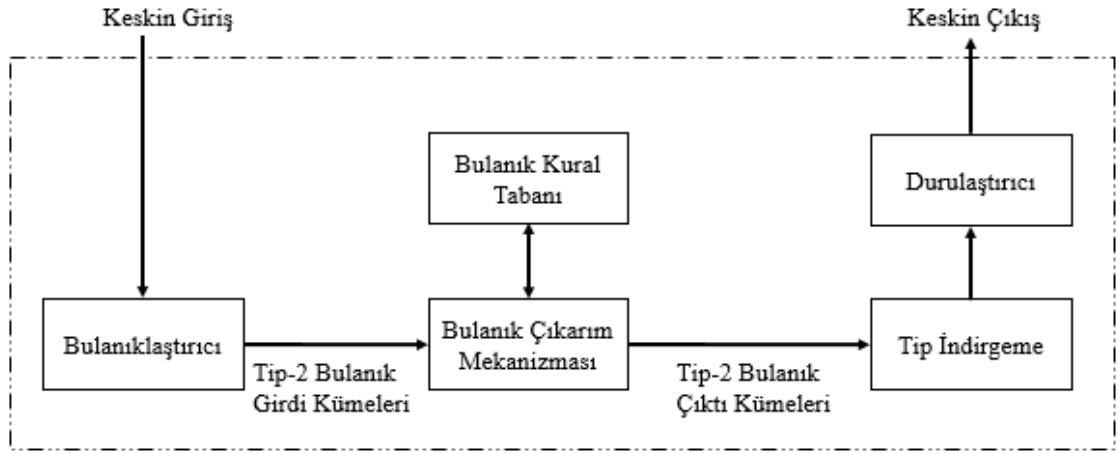
Şekil 4.10. Gauss aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonu.

4.2.6. AT2-BMK

En az bir tane aralıklı tip-2 bulanık küme (AT2-BK) içeren BMK'lar AT2-BMK olarak adlandırılır. AT2-BMK temel olarak 5 bloktan oluşur:

- Bulanıklaştırma
- Kural tabanı
- Çıkarım mekanizması
- Tip indirgeme
- Durulaştırma

Şekil 4.11'de görüldüğü üzere AT2-BMK'da T1-BMK'ya ek olarak tip indirgeme bloğu vardır. AT2-BMK, AT2-BK kullanmaktadır. Bu nedenle AT2-BMK'da durulaştırma safhasından önce tip indirgeme işlemi yapılması gerekmektedir. AT2-BK'lar tip-1 olarak indirgendikten sonra durulaştırma aşamasına geçilebilir.



Şekil 4.11. AT2-BMK genel yapısı.

AT2-BMK için bulanık kurallar T1-BMK ile benzer şekilde Denklem (4.5)'deki gibi hazırlanır. AT2-BMK'da $\tilde{X}_i^n$ ($i=1, \dots, m$) tip-2 girdi bulanık kümeleri, $Y^n = [\underline{y}^n, \bar{y}^n]$ aralıklı çıktı bulanık kümeleri olmak üzere keskin çıktının hesaplanması aşağıda belirtilen adımlarla gerçekleştirilir.

- $\tilde{X}_i^n$ 'de tanımlı her bir x'_i için üst üyelik fonksiyonu ve alt üyelik fonksiyonu ile tanımlı aralıklar $[\underline{\mu}_{\tilde{X}_i^n}(x'_i), \bar{\mu}_{\tilde{X}_i^n}(x'_i)]$ olacak şekilde hesaplanır.
- Her bir kuralın ateşlenmesi $F^n(x') \equiv [\underline{f}^n, \bar{f}^n]$, $n=1, \dots, N$ şeklinde Denklem (4.7) kullanılarak gerçekleştirilir.

$$\begin{aligned} \underline{f}^n &= [\underline{\mu}_{\tilde{X}_1^n}(x'_1) * \dots * \underline{\mu}_{\tilde{X}_m^n}(x'_m)] \\ \bar{f}^n &= [\bar{\mu}_{\tilde{X}_1^n}(x'_1) * \dots * \bar{\mu}_{\tilde{X}_m^n}(x'_m)] \end{aligned} \quad (4.7)$$

- Kuralların ateşlenmesinden elde edilen $F^n(x')$ 'ler tip indirgeme metotları kullanılarak tip-1'e dönüştürülür. Literatürde ağırlık merkezi, kümelerin merkezi ve yükseklik gibi çeşitli tip indirgeme yöntemleri mevcuttur. Literatürde en çok kullanılan tip indirgeme metodu kümelerin merkezi tip indirgeme metodudur. Kümelerin merkezi metodu Denklem (4.8) ile tanımlanır. Denklem (4.8)'de kullanılan L ve R ifadeleri sınır noktalarını temsil etmektedir. Bu noktaları bulabilmek için literatürde birçok algoritma bulunmaktadır. Literatürde en çok kullanılan tip indirgeme algoritması Karnik-Mendel algoritmasıdır [75].

$$Y_{\cos}(x') = \bigcup_{\substack{f^n \in F^n(x') \\ y^n \in Y^n}} \frac{\sum_{n=1}^N y^n f^n}{\sum_{n=1}^N f^n} = [y_l, y_r]$$

$$y_l = \frac{\sum_{n=1}^L \underline{y}^n \bar{f}^n + \sum_{n=L+1}^N \underline{y}^n \underline{f}^n}{\sum_{n=1}^L \bar{f}^n + \sum_{n=L+1}^N \underline{f}^n}$$

$$y_r = \frac{\sum_{n=1}^R \bar{y}^n \underline{f}^n + \sum_{n=R+1}^N \bar{y}^n \bar{f}^n}{\sum_{n=1}^R \underline{f}^n + \sum_{n=R+1}^N \bar{f}^n} \quad (4.8)$$

Sınır noktalarını bulunmasını sağlayan Karnik-Mendel algoritmasının çalışma mekanizması Çizelge 4.5’de verilmiştir. Literatürde Karnik-Mendel algoritmasının hesaplama maliyetini düşürmek için geliştirilmiş birçok algoritma bulunmaktadır.

Çizelge 4.10. Karnik-Mendel algoritması çalışma mekanizması.

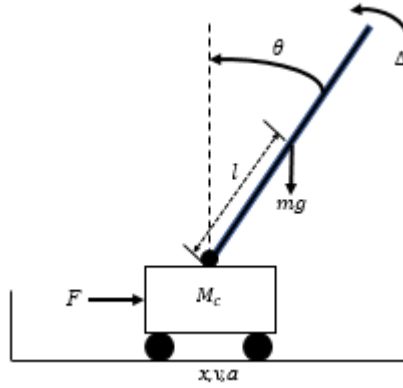
Adım	y_l 'nin hesaplanması	y_r 'nin hesaplanması
1	$f^n = \frac{\underline{f}^n + \bar{f}^n}{2}$ olarak belirle. $y = \frac{\sum_{n=1}^N \underline{y}^n f^n}{\sum_{n=1}^N f^n}$ hesapla.	$f^n = \frac{\underline{f}^n + \bar{f}^n}{2}$ olarak belirle. $y = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{y}^n f^n}{\sum_{n=1}^N f^n}$ hesapla.
2	$\underline{y}^l \leq y_l \leq \underline{y}^{l+1}$ eşitliğini sağlayan $l \in [1, N-1]$ bul.	$\bar{y}^r \leq y_r \leq \bar{y}^{r+1}$ eşitliğini sağlayan $r \in [1, N-1]$ bul.
3	$f^n = \begin{cases} \bar{f}^n, n \leq l \\ \underline{f}^n, n > l \end{cases}$ olarak belirle. $y' = \frac{\sum_{n=1}^N \underline{y}^n f^n}{\sum_{n=1}^N f^n}$ hesapla.	$f^n = \begin{cases} \underline{f}^n, n \leq r \\ \bar{f}^n, n > r \end{cases}$ olarak belirle. $y' = \frac{\sum_{n=1}^N \bar{y}^n f^n}{\sum_{n=1}^N f^n}$ hesapla.
4	Eğer $y' = y$ ise dur, $y_l = y$ ve $L = l$ olarak belirle. Aksi takdirde $y = y'$ ve 2. Adıma geri dön.	Eğer $y' = y$ ise dur, $y_r = y$ ve $R = r$ olarak belirle. Aksi takdirde $y = y'$ ve 2. Adıma geri dön.

- Durulaştırılmış keskin çıkış ise Denklem (4.9) kullanılarak hesaplanır.

$$y = \frac{y_l + y_r}{2} \quad (4.9)$$

4.2.7. AT2-BMK ile Kontrol Edilen Sistem

Bu tez çalışmasında AT2-BMK ile kontrol edilecek sistem olarak ters sarkaç sistemi seçilmiştir. Ters sarkaç sistemi kontrol mühendisliği alanında kullanılan en popüler ölçütlerden biridir. Ters sarkaç sistemi, doğrusal olmayan yüksek sistem dinamiğine sahip açık çevrim kararsız sistem olması nedeniyle klasik ve çağdaş kontrol teknikleri için popüler bir test problemi olmuştur. Şekil 4.12, bir araba, bu arabaya bağlı bir direk ve bir arabanın yatay konumda hareket edebileceği bir zeminden oluşan ters sarkaç sisteminin şematik diyagramını göstermektedir. Sistem bir giriş ve iki çıkışa sahiptir. Giriş olarak arabaya uygulanan kuvvet, çıkış olarak ise ters sarkacın dikey konumla yaptığı açı değeri ve arabanın konumu kullanılmaktadır.



Şekil 4.12. Ters sarkaç sisteminin şematik gösterimi.

Sistem kontrol edilmediği takdirde kararsızdır, dolayısıyla araba sarkacı dikey konumda dengelemek için hareket ettirilmezse sarkaç düşecektir. Bu amaçla sistem, araştırmacılara ters sarkacı dikey olarak stabilizasyonunda kontrol tekniklerinin performanslarını analiz etme imkânı sağlar. Sürtünme kuvvetinin olmadığı varsayıldığında, sistemin dinamikleri Denklem (4.10) ve Denklem (4.11) doğrusal olmayan denklemler ile modellenmektedir.

$$\ddot{\theta} = \frac{(m_c + m_p)g \sin \theta - \{F + m_p l \omega^2 \sin \theta\} \cos \theta}{\left\{ \frac{4}{3}(m_c + m_p) - m_p (\cos \theta)^2 \right\} l} \quad (4.10)$$

$$\ddot{x} = \frac{\frac{4}{3}\{F + m_p l \omega^2 \sin \theta\} - m_p g \sin \theta \cos \theta}{\left\{ \frac{4}{3}(m_c + m_p) - m_p (\cos \theta)^2 \right\}} \quad (4.11)$$

Sistemin parametreleri (θ , w , x , v) sırasıyla ters sarkacın açısını, ters sarkacın açısal hızını, arabanın konumunu ve arabanın hızını temsil etmektedir. Gerçekleştirdiğimiz simülasyon çalışması için ters sarkaç parametreleri çizelgedeki gibi belirlenmiştir. Bu parametreler gerçek veya fiziksel bir sisteme bağlı değildir.

Çizelge 4.11. Ters sarkaç sisteminin parametreleri.

Parametre İsmi	Sembol	Değeri	Birimi
Arabanın ağırlığı	m_c	1	kg
Ters sarkacın ağırlığı	m_p	0,10	kg
Ters sarkacın uzunluğu	l	0,50	m
Arabaya uygulanan kuvvet	F	-	N
Ters sarkacın dikeyle yaptığı açı	θ	0,52	rad
Yerçekimi kuvveti	g	9,80	m / s^2

4.2.8. AT2-BMK ile Kontrol Edilen Sistemin Optimizasyonu

Bu çalışmada ters sarkaç sistemini kontrol eden AT2-BMK kontrolörünün optimizasyonu kuantumdan esinlenen algoritmalarla sağlanmıştır. Bu amaçla oluşturulan simülasyon çalışmasının mimarisi Şekil 4.13’da gösterilmiştir. Sistemi kontrol eden AT2-BMK parametreleri optimizasyon algoritmaları ile dinamik olarak belirlenmektedir. Sistemin optimum sonuçlara ulaşmasının kontrolü için ters sarkacın dikey konumla yaptığı açı ve arabanın konumu kullanılmıştır. Ters sarkacın dikey bir konuma daha erken bir şekilde ulaşarak bu konumda stabil olarak kalabilmesi optimizasyon algoritmalarının hedefidir.

4.2.9.1. Parametrelerin Kodlanması

Literatürde bulunan kuantumdan esinlenen optimizasyon algoritmalarıyla BMK optimizasyonu çalışmalarında QIEA ile T1-BMK optimizasyonu [51], [52], RCQEA ile T1-BMK optimizasyonu [49], [53] ve RCQEA ile AT2-BMK optimizasyonu [50] gerçekleştirilmiştir.

RCQEA ile yapılan çalışmalarda [49], [50], [53] BMK'nın parametrelerinin kromozomlara kodlanma mantığı benzerdir. Bu çalışmalarda BMK'nın tüm giriş ve çıkış değişkenlerinde tanımlı dilsel terimlerin temsil ettiği üyelik fonksiyonlarının rastgele oluşturulabileceği bölgeler belirlenir. Bu bölgeleri araştırmacılar belirlemiştir ve algoritmanın evrimsel sürecinde BMK'nın üyelik fonksiyonları bu bölgelerde oluşturulabilecektir.

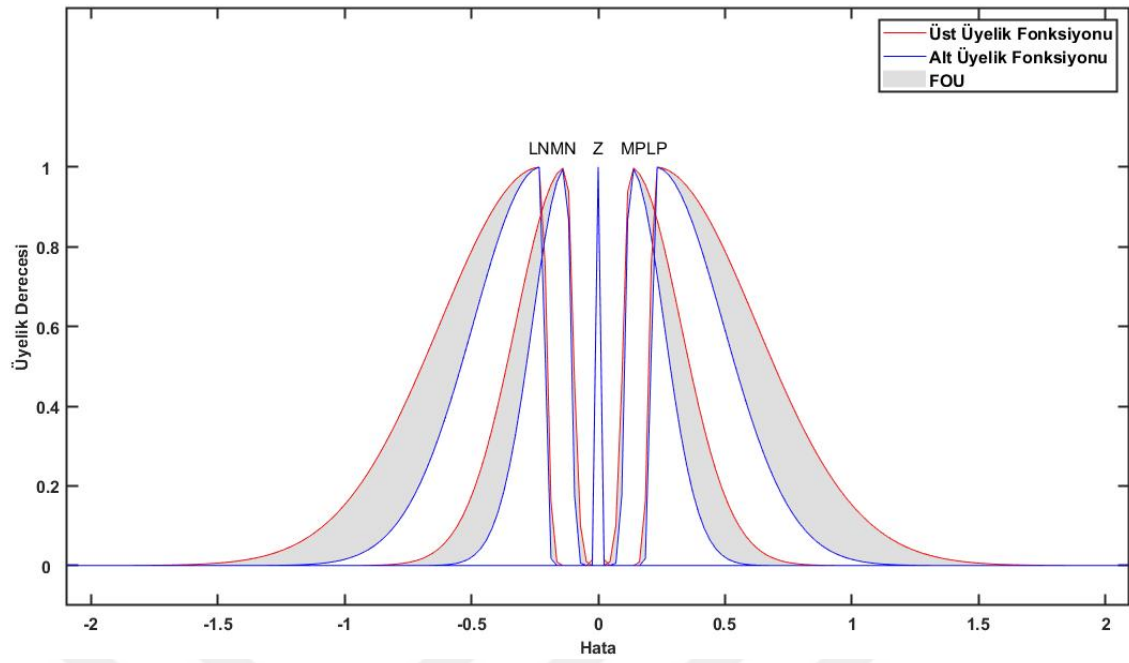
QIEA ve RCQEA ile yapılan optimizasyon çalışmalarında [49]–[53] araştırmacılar BMK'daki tüm kurallarda kullanılan tüm dilsel terimlerden çıkarım yaparak bu dilsel terimlerin temsil ettiği üyelik fonksiyonlarının oluşturulabileceği bölgelerde rastgele üyelik fonksiyonları üretmişler ve kromozomlara kodlamışlardır. Bu yöntem şöyle bir sorunu ortaya çıkarmaktadır. Birbirini tekrar eden bulanık kurallarda daha önceden çıkarım yapılmış bir dilsel terimin tekrar bulunması durumunda aynı dilsel terim için birden fazla üyelik fonksiyonu üretilmiş olacak ve kromozomlara kodlanmış tüm bulanık kurallar çözülerek BMK'ya verilirken BMK sadece ilgili dilsel terim için en son oluşturulan üyelik fonksiyonunu dikkate alacak ve bu üyelik fonksiyonunu kullanacaktır. Algoritmanın evrimsel süreciyle birlikte ilgili dilsel terimin temsil ettiği üyelik fonksiyonu için kendisinden daha verimli bir üyelik fonksiyonu bulursa dahi, eğer bu üyelik fonksiyonunu temsil eden dilsel terim kendisinden sonraki başka bir bulanık mantık kuralında barındırılıyorsa BMK'da o kuraldaki dilsel terim için üretilen üyelik fonksiyonu kullanılır. Yalın bir ifadeyle, BMK kurallardaki tekrar eden dilsel terimler için en son üretileni kullanır. Örnek olarak verilen Çizelge 4.7'da en alt satırda belirtilen bir bulanık kural daha önceki bulanık kurallarda kullanılan dilsel terimlerin aynısını kullanmaktadır. Bu durumda BMK bu dilsel terimler için en alt satırdaki, yani en son bulanık kuraldan oluşturulacak üyelik fonksiyonlarını kullanacaktır. Dolayısıyla aynı dilsel terim için birden fazla üyelik fonksiyonu oluşturulmuş olması durumunda en son oluşturulan üyelik fonksiyonu diğer olası daha verimli üyelik fonksiyonlarını ezmektedir ve bu da algoritmanın verimini düşürmektedir.

Çizelge 4.12. Örnek bir bulanık kural tablosu.

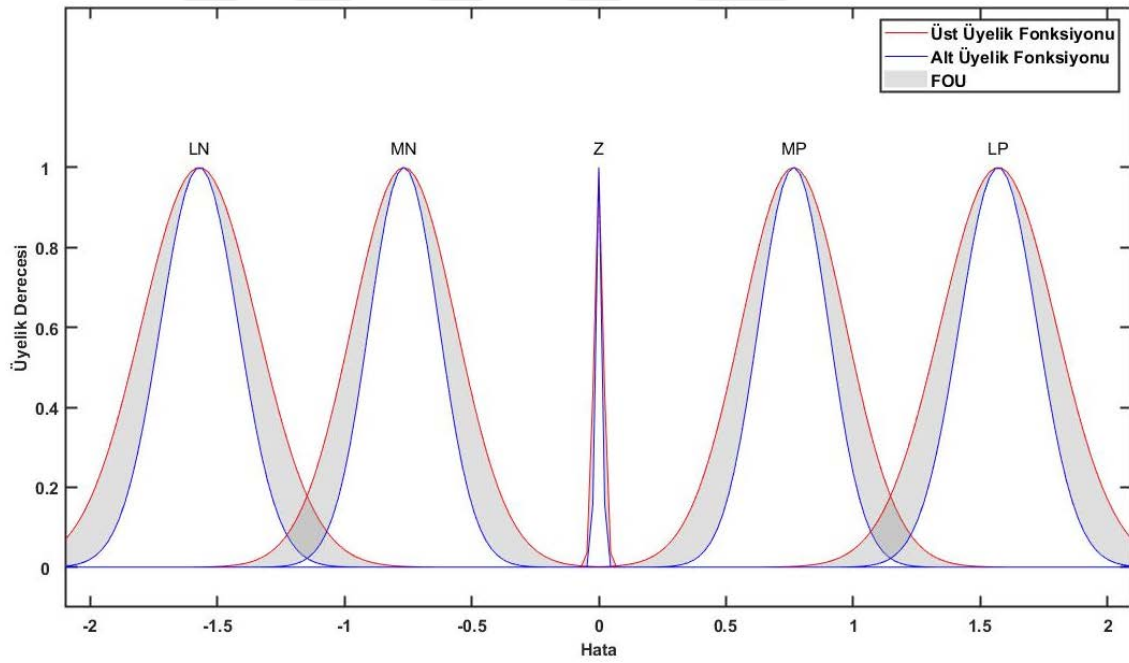
	Girdi-1	Girdi-2	Çıktı-1
Kural-1	X_1	X_2	Y_1
Kural-2	X_3	X_4	Y_2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
Kural-n	X_1	X_4	Y_3

Bu tez çalışmasında üyelik fonksiyonlarının üretilmesi ve kromozomlara kodlanmasında farklı bir strateji kullanılmıştır. Bu çalışmada üyelik fonksiyonlarını bulanık kurallardan çıkarım yaparak üretilip ardından kromozomlara kodlamak yerine BMK’da bulunan her bir dilsel terim için birer tane olacak şekilde üyelik fonksiyonu üretilmiş ve kromozomlara kodlanmıştır. Bu sayede aynı dilsel terim için üretilen üyelik fonksiyonlarının birbirini ezmesi sorunu ortadan kalkmıştır. Ayrıca BMK’daki tüm girdi ve çıktılara ait alanlarda üyelik fonksiyonlarının bölgelerini belirlemek amacıyla başlangıçta minimum ve maksimum üyelik fonksiyonları tanımlamaları yapılmış ve BMK’da kullanılacak üyelik fonksiyonları ilgili minimum ve maksimum üyelik fonksiyonlarının aralarındaki bölgelerde üretilmiştir.

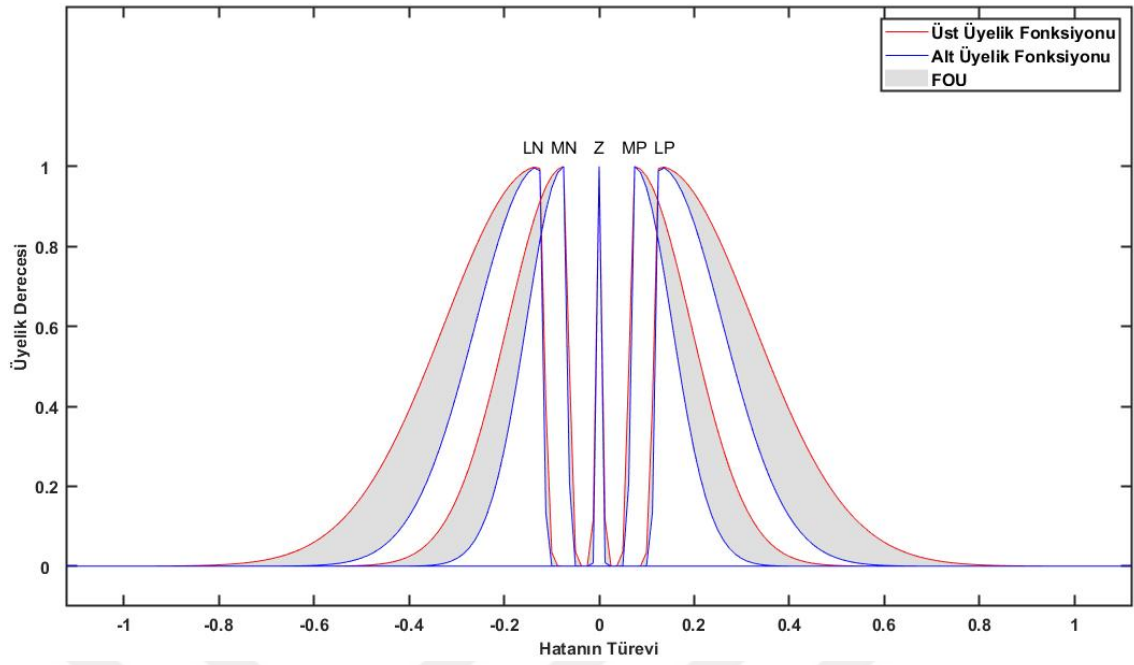
Şekil 4.15, Şekil 4.16, Şekil 4.17, Şekil 4.18 ve Şekil 4.20 sırasıyla ters sarkaç sistemi için hazırladığımız optimize edilecek AT2-BMK’nın giriş ve çıkışları olan “Hata”, “Hatanın Türevi” ve “Uygulanan Kuvvet” girdi ve çıktılarının alanlarında üretililebilecek üyelik fonksiyonlarının bölgelerini belirlemek amacıyla oluşturulan minimum ve maksimum üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Her bir üyelik fonksiyonu minimum ve maksimum üyelik fonksiyonlarının sınırları arasında üretilir. Bu şekillerde görüldüğü üzere dilsel terimlerin temsil ettiği üyelik fonksiyonları girdilerin ve çıktılarının tanımlı olduğu alanlarda çok geniş bölgelerde üretilmektedir. Bu sayede kontrol edilen sistemi hızlı bir şekilde dengeye ulaştıracak bulanık kurallarda kullanılan dilsel terimlerin temsil ettiği üyelik fonksiyonları kontrol edilen sistemde tanımlı olan girdi aralıklarında oldukça geniş bir bölgeye sahip olabilmektedir. Bu sayede girdilerin tanımlı olduğu her bir değerde AT2-BMK kuvvetli bir şekilde çıktı verebilmekte ve sistemi daha güçlü bir şekilde kontrol ederek dengeye getirebilmektedir.



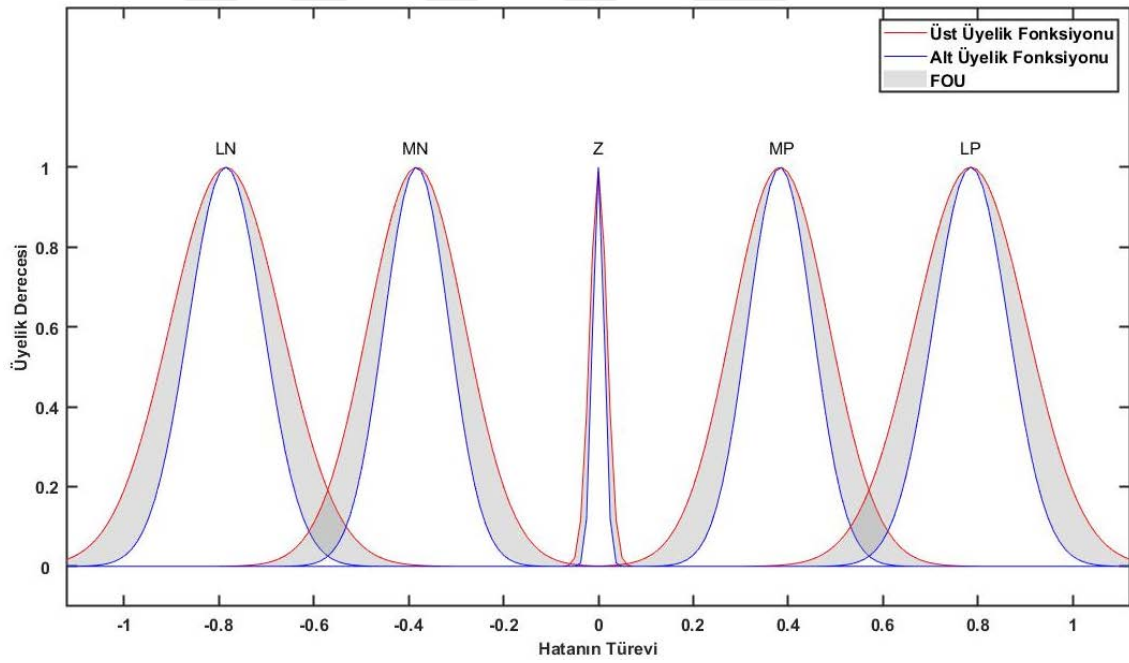
Şekil 4.15. Hata girişi için oluşturulan minimum tip-2 üyelik fonksiyonları.



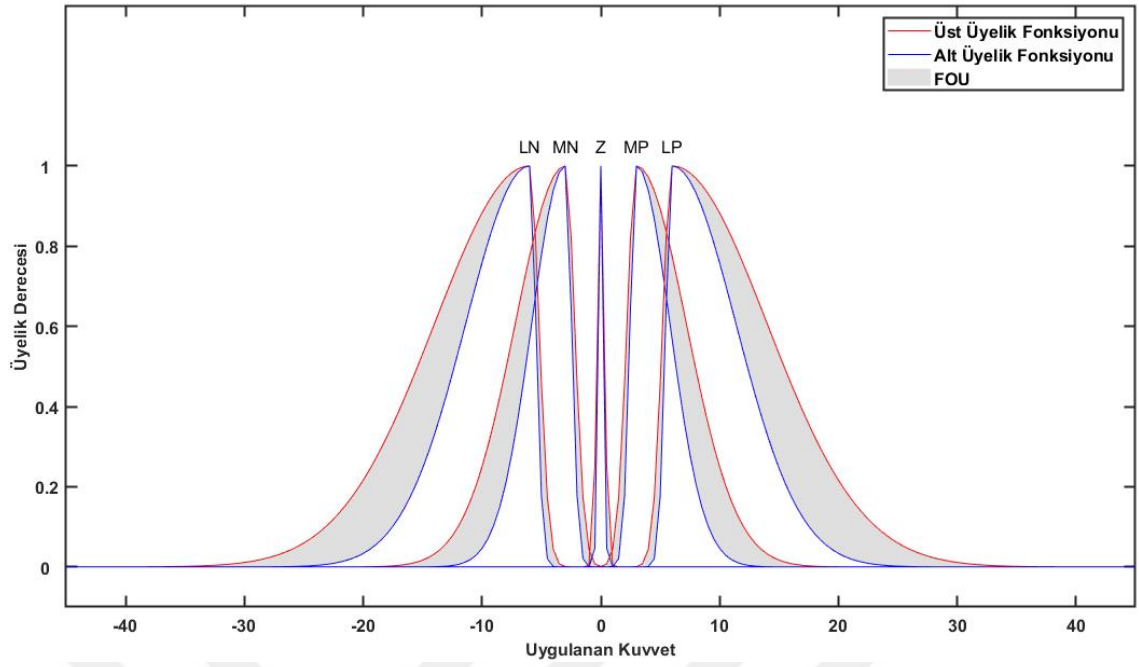
Şekil 4.16. Hata girişi için oluşturulan maksimum tip-2 üyelik fonksiyonları.



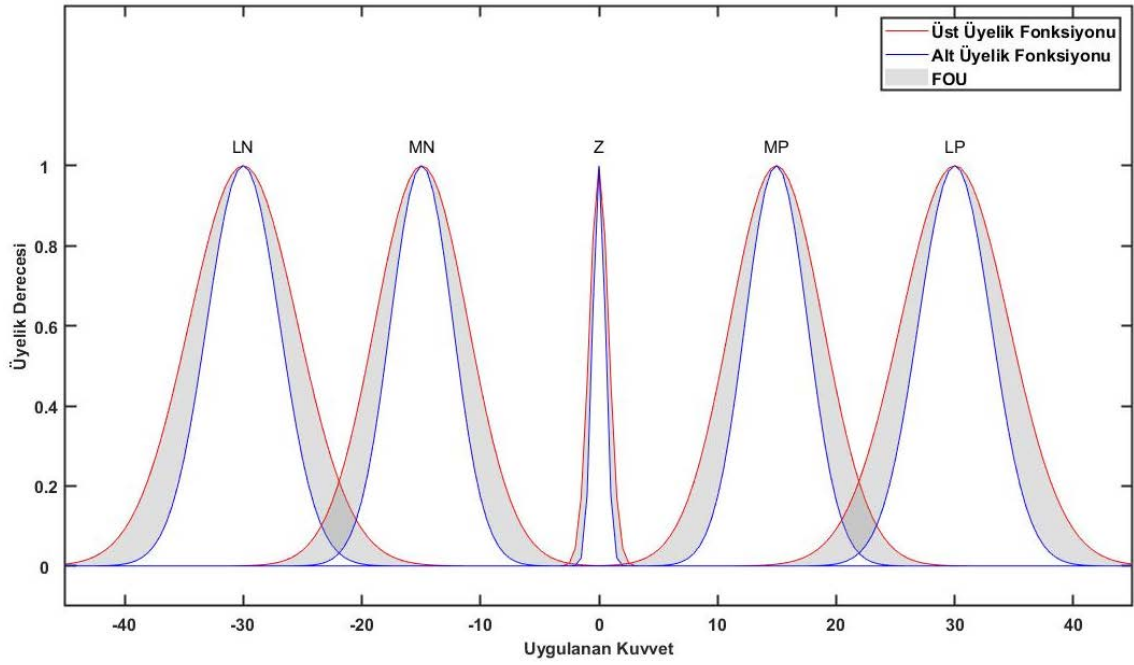
Şekil 4.17. Hatanın türevi girişi için oluşturulan minimum tip-2 üyelik fonksiyonları.



Şekil 4.18. Hatanın türevi girişi için oluşturulan maksimum tip-2 üyelik fonksiyonları.



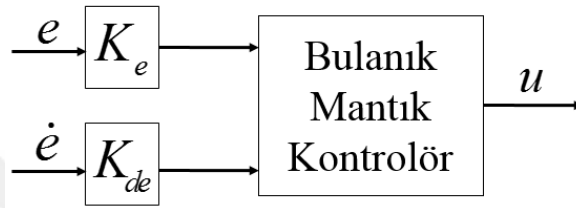
Şekil 4.19. Uygulanan kuvvet çıkışı için oluşturulan minimum tip-2 üyelik fonksiyonları.



Şekil 4.20. Uygulanan kuvvet çıkışı için oluşturulan maksimum tip-2 üyelik fonksiyonları.

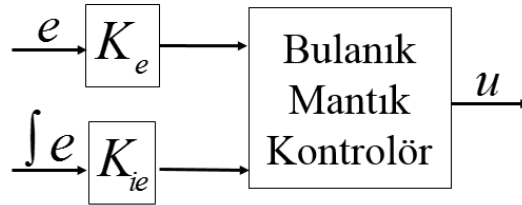
Temel olarak, BMK'ların üç tür yapısı vardır: bulanık PD kontrolör, bulanık PI kontrolör ve bulanık PID kontrolör. Kontrolör tipleri kontrol başarımı üzerinde büyük etkiye sahiptir.

Bulanık PD kontrolör hata (e) ve hatanın değişimini ($\dot{e}$) kullanarak kontrol sinyalini üretir. Bu tip kontrolörlerde kural tabanındaki her bir giriş değişkenine atanan üyelik fonksiyonları sayısının çarpımı kadar bulanık kural bulunmaktadır. Şekil 4.21 bulanık PD kontrolörün blok diyagramını göstermektedir. Elde edilen kontrol işareti (u) ifadesindeki K_e ve K_{de} terimleri giriş değişkenlerine ait giriş ölçekleme çarpanlarıdır. Bulanık PD kontrolör, sistem tipi 0'dan büyükse, yani sistemin sürekli hal hatası sıfırda uygundur. Eğer sistem tipi sıfır ise bulanık PD kontrolör sürekli hal hatasının oluşmasına sebep olacaktır. Pozisyon tipi bulanık kontrolör olarak bilinir.



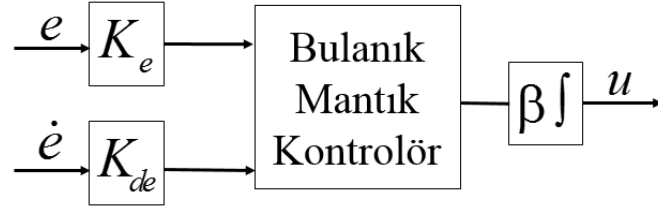
Şekil 4.21. Bulanık PD kontrolörüne ait blok gösterimi.

Sistem cevabında oluşacak sürekli hal hatasını ortadan kaldırmak amacıyla bulanık PD kontroldeki girişlerden birisi olan hatanın değişimi yerine hatanın integrali kullanılarak bulanık PI kontrolörü oluşturulmuştur. Bu tip kontrolöre ait blok diyagramı Şekil 4.22’de gösterilmiştir.



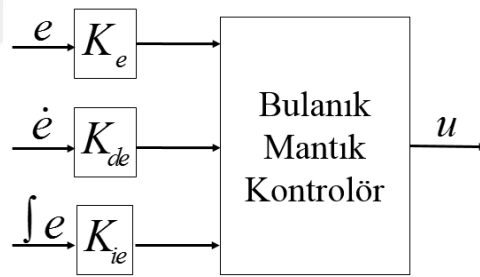
Şekil 4.22. Hata ve hatanın integrali girişleri ile oluşturulan Bulanık PI kontrolörüne ait blok gösterimi.

Hata ve hatanın integrali kullanarak oluşturulan bulanık PI kontrolör sürekli hal hatasını ortadan kaldırmaktadır, ancak oransal kontrol parametresinin küçük seçilmesi halinde sistem cevabı yavaş yükselme zamanına, büyük seçilmesi halinde de sistem cevabı büyük bir aşımaya sahip olacaktır. Bu nedenle girişleri hata ve hatanın değişimi olan kontrolör çıkışının integralini alarak kontrol sinyalini üreten bulanık PI kontrolör yapısı önerilmiştir. Bu tip kontrolöre ait blok diyagramı Şekil 4.23’da gösterilmiştir.



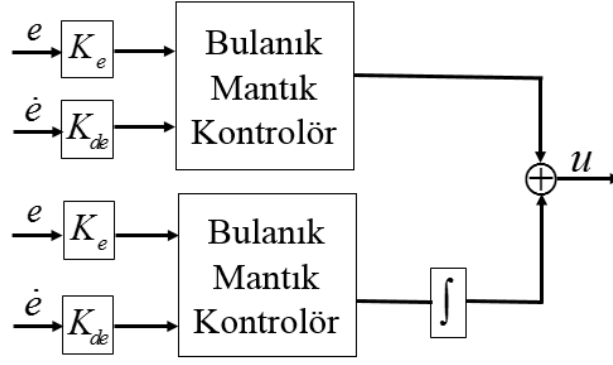
Şekil 4.23. Hata ve hatanın değişimi girişleri ile oluşturulan Bulanık PI kontrolörüne ait blok gösterimi.

Bulanık PD kontrolörü ile ortaya çıkan sürekli hal hatasını ve bulanık PI kontrolör kullanımı ile ortaya çıkan yavaş yükselme zamanı ve büyük aşım gibi sorunları ortadan kaldırmak amacıyla integral ve türev kontrollerini bir arada bulunduran bulanık PID kontrolör yapısı kullanılmaktadır. Bu amaçla oran, integral ve türev kontrol elemanlarını bir araya getirilmesiyle bulanık PID kontrolör elde edilmesi mümkündür [76]–[78]. Kontrolör girişinde hata, hatanın değişimi ve hatanın integralini kullanarak türev ve integral yapılarının birleştirilmesiyle oluşan bulanık PID kontrolörün blok diyagramı Şekil 4.24’de gösterilmiştir.



Şekil 4.24. Hata ve hatanın değişimi girişleri ile oluşturulan Bulanık PI kontrolörüne ait blok gösterimi.

Bulanık PID kontrolörler uygulamada oldukça zordur. Çünkü kontrolör girişinde kullanılan hatanın integralinin sistemin kontrolü esnasında takip edilip düzenlenmesi gerekmektedir. Bu nedenle girişleri tekrar hata ve hatanın değişimi olan Şekil 4.25’de blok diyagramı gösterilen bir bulanık PID kontrolörü kullanılmaktadır. Bu bulanık PID kontrolörü yapısında da görüldüğü üzere 2 tane BMK kullanılmaktadır ve bu iki kontrolörün sahip olduğu bulanık kurallar sistemin kontrolünde yük oluşturmaktadır.



Şekil 4.25. Hata ve hatanın değişimi girişleri ile oluşturulan Bulanık PI kontrolörüne ait blok gösterimi.

Bulanık kontrolör yapıları incelendiğinde basitliği ve kolay kullanımı nedeniyle bulanık PD kontrolörler yüksek mertebeli sistemlerin kontrolü uygulamalarında sıkça kullanılmıştır. Literatürde ters sarkaç sistemi için kullanılan çeşitli bulanık kontrolör tasarımları bulunmaktadır. Yadav ve arkadaşları yaptıkları çalışmada ters sarkaç sistemi üzerinde çeşitli bulanık kontrol yapılarını karşılaştırmalı olarak analiz etmişler ve bulanık PD kontrolörün diğer kontrolörlere göre daha verimli olduğunu gözlemlemişlerdir [79]. Bu nedenle bu tez çalışmasında bulanık PD tipindeki AT2-BMK optimize edilerek ters sarkaç sisteminin kontrolü sağlanmıştır.

Bu çalışmada optimize edilecek bulanık PD tipindeki AT2-BMK'nın her bir girişi ve çıkışı için 5'er tane dilsel terim kullanılmıştır. Bu dilsel terimler her bir giriş ve çıkış için LN (Large Negative – Büyük Negatif), MN (Medium Negative – Orta Negatif), Z (Zero – Orta), MP (Medium Positive – Orta Pozitif) ve LP (Large Positive – Büyük Pozitif) olmak üzere tablodaki gibi gösterilmiştir. Çizelge 4.8'de görüldüğü üzere AT2-BMK'da toplamda 15 tane dilsel terim, dolayısıyla 15 tane üyelik fonksiyonu bulunmaktadır. AT2-BMK'da hata (Error – E), hatanın değişimi (Derivative error – DE) olmak üzere 2 giriş ve Uygulanan Kuvvet (Force – F) olmak üzere 1 çıkış bulunmaktadır. AT2-BMK'da toplam 25 tane kural belirlenmiştir ve bu bulanık kurallar Çizelge 4.9'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.13. AT2-BMK'daki dilsel terimler.

E	DE	F
LN	LN	LN

Çizelge 4.14. (devam) AT2-BMK'daki dilsel terimler.

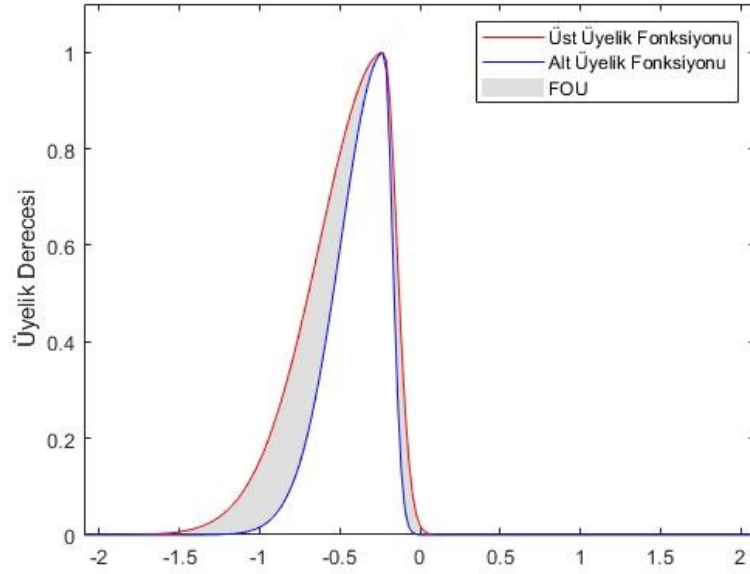
MN	MN	MN
Z	Z	Z
MP	MP	MP
LP	LP	LP

Çizelge 4.15. AT2-BMK'daki bulanık kural tablosu.

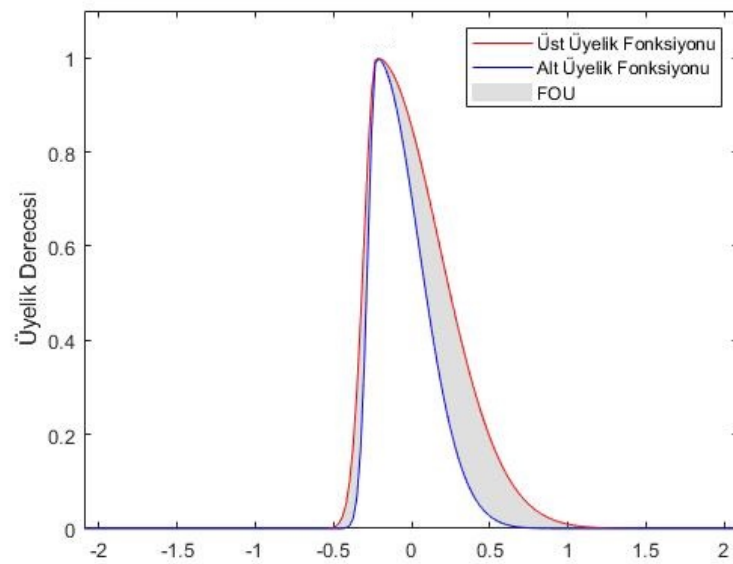
F		DE				
		LN	MN	Z	MP	LP
E	LN	LN	LN	LN	MN	Z
	MN	LN	MN	MN	Z	MP
	Z	MN	MN	Z	MP	MP
	MP	MN	Z	MP	MP	LP
	LP	Z	MP	LP	LP	LP

RCQEA ile AT2-BMK optimizasyonu üzerine yapılan çalışmada [50] araştırmacılar bulanık kurallardan çıkarım yaparak ürettikleri Gauss tipinde aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonlarını kullanarak AT2-BMK tasarımı gerçekleştirmişlerdir. AT2-BMK'da bulunan giriş ve çıkışların tanımlı olduğu alanlarda kendilerine ayrılan bölgelerde üretilebilen Şekil 4.10'deki gibi Gauss tipindeki bir üyelik fonksiyonları üretilmiş ve kromozomlara kodlanmıştır. Ancak Gauss tipindeki bir üyelik fonksiyonunun tepe noktası her zaman üyelik fonksiyonunun ortalama değerinin bulunduğu noktadır. Dolayısıyla Gauss tipindeki bir üyelik fonksiyonu üyelik derecesi olarak sadece üyelik fonksiyonunun orta noktasındaki bir girdi için 1 değerini üretir. Bu nedenle üyelik fonksiyonunun üretilebileceği bölgede maksimum üyelik derecesine sahip oldukça dar bir bölge bulunmaktadır. Bu durum da üyelik fonksiyonunun üretilebileceği bölgede bulunan oldukça az girdi elemanına maksimum üyelik derecesi atanabileceğini göstermektedir. Bu çalışmada optimize edilecek AT2-BMK'da sağa çarpık veya sola çarpık biçimde olabilen, genişleyip daralabilen Gauss tipinde aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonu üretilmiş ve gerçek kodlu kromozomlara kodlanmıştır. Şekil 4.26 ve Şekil 4.27 örnek olarak bu çalışmada üretilen sırasıyla sola çarpık ve sağa çarpık olabilen

Gauss tipinde aralıklı tip-2 üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Tepe noktasının her zaman orta noktasında olmadığı, sağa veya sola çarpık olabilen Gauss tipinde üyelik fonksiyonu sayesinde üyelik fonksiyonunun üretilebileceği bölgede tanımlı her bir girdi maksimum üyelik derecesine sahip olabilmektedir. Bu da AT2-BMK’da tanımlı olan her girdi değerine karşı sistemi hızlı bir şekilde dengeye ulaştıracak bulanık kuralların atışlenebilmesini sağlayacaktır.

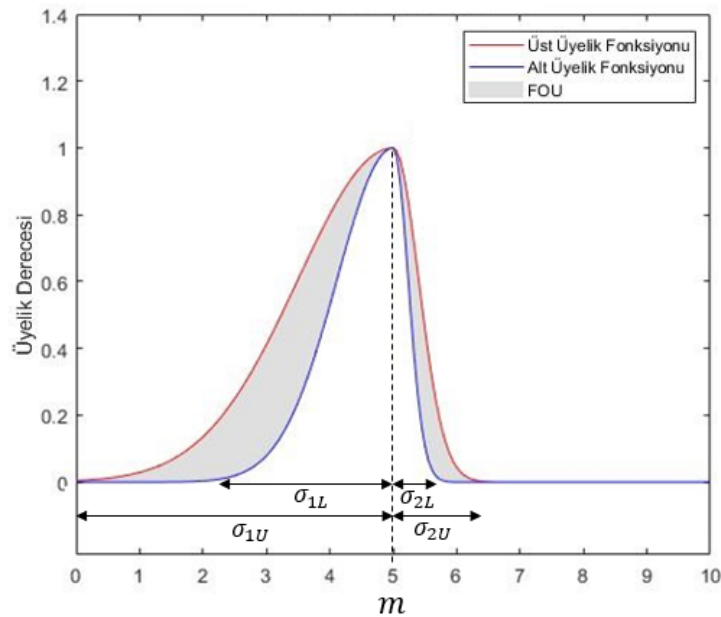


Şekil 4.26. Aralıklı tip-2 sola çarpık bir Gauss tipinde bir üyelik fonksiyonu.

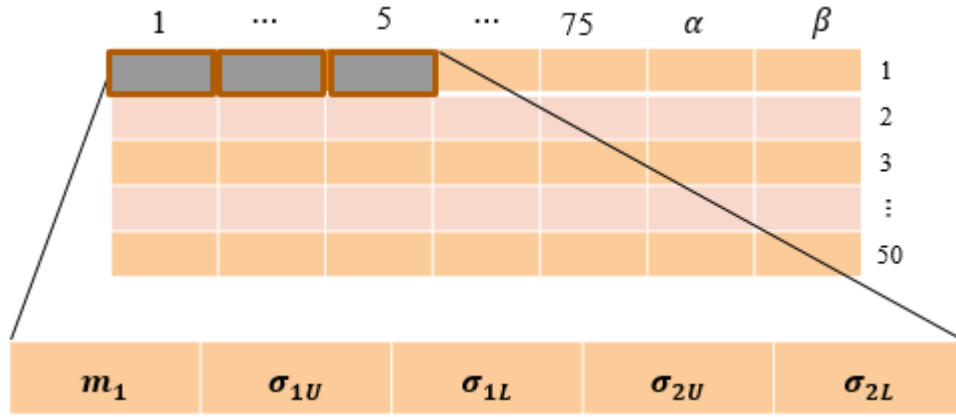


Şekil 4.27. Aralıklı tip-2 sağa çarpık bir Gauss tipinde bir üyelik fonksiyonu.

Bu tez çalışmasında optimize edilecek AT2-BMK'nın üyelik fonksiyonları kendilerine ayrılan bölgelerde üretilerek gerçek kodlu kromozomlara kodlanmaktadır. Bir kromozomda AT2-BMK'nın tüm giriş ve çıkışlarında tanımlanan üyelik fonksiyonlarını temsil eden parametreler kodlanmaktadır. Şekil 4.28'te gösterildiği gibi çarpık Gauss tipindeki bir üyelik fonksiyonunu temsil eden parametreler sırasıyla üyelik fonksiyonunun ortalama değeri (m), sol üst üyelik fonksiyonunun taban genişliği (σ_{1U}), sol alt üyelik fonksiyonunun taban genişliği (σ_{2U}), sağ üst üyelik fonksiyonunun taban genişliği (σ_{1L}) ve sağ alt üyelik fonksiyonunun taban genişliği (σ_{2L}) olmak üzere 5 tane parametreden oluşmaktadır. Bu tez çalışmasında optimize edilecek AT2-BMK'da 15 tane üyelik fonksiyonu olduğu için bir kromozom 75 tane genden oluşmaktadır. Kromozoma bir kübit durumunun olasılıksal genliklerini ifade eden, normalizasyon şartını sağlayan rastgele üretilmiş α ve β parametrelerinin kodlanmasıyla gerçek kodlu üçlü kromozom yapısı oluşturulmuş olur. Optimizasyon aşamasından önce üretilebileceği bölgelerde rastgele olarak üyelik fonksiyonlarının ve olasılıksal genliklerin rastgele üretilerek kromozomlara kodlanmasıyla başlangıç popülasyonu oluşturulmuştur. Bu çalışmada başlangıç popülasyonu 50 kromozomdan oluşmaktadır. Şekil 4.29 üçlü kromozom yapısını ve dolayısıyla başlangıç popülasyonunu göstermektedir.



Şekil 4.28. Aralıklı tip-2 sola çarpık bir Gauss tipinde bir üyelik fonksiyonunun kromozoma kodlanma parametreleri.



Şekil 4.29. Başlangıç popülasyonunun yapısı.

4.2.9.2. Uygunluk Değerinin Belirlenmesi

Bu tez çalışmasında bir kromozomun uygunluk değerinin belirlenmesi için kromozomda AT2-BMK'daki üyelik fonksiyonlarını temsil eden tüm genlerin çözülmesiyle oluşan parametreler kullanılarak AT2-BMK'nın tasarımı gerçekleştirilir. Tasarlanan AT2-BMK ile ters sarkaç kontrolü yapılmaktadır. Ters sarkaç sisteminden alınan yanıt uygunluk fonksiyonuna sokulur ve bir kromozomun uygunluk değeri belirlenir. Bu tez çalışmasında bir kromozomun uygunluk değerinin belirlenmesi amacıyla Denklem (4.12)'de gösterilen uygunluk fonksiyonu kullanılmıştır. Ters sarkaç kontrolünde amaç ters sarkacın dikey ekseninde stabilizasyonunu sağlamak olduğu için uygunluk fonksiyonu olarak ters sarkacın açısının zamanla olan değişiminin mutlak hata toplamı kullanılmıştır.

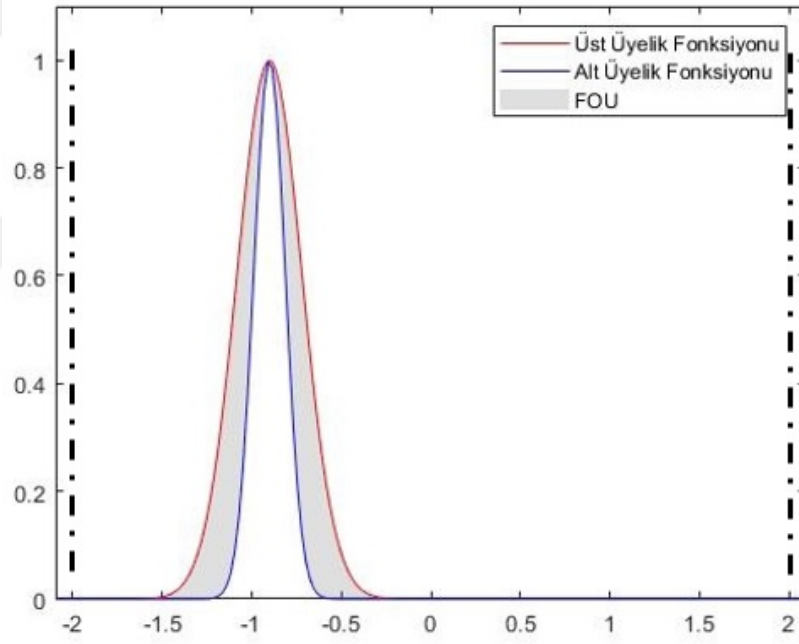
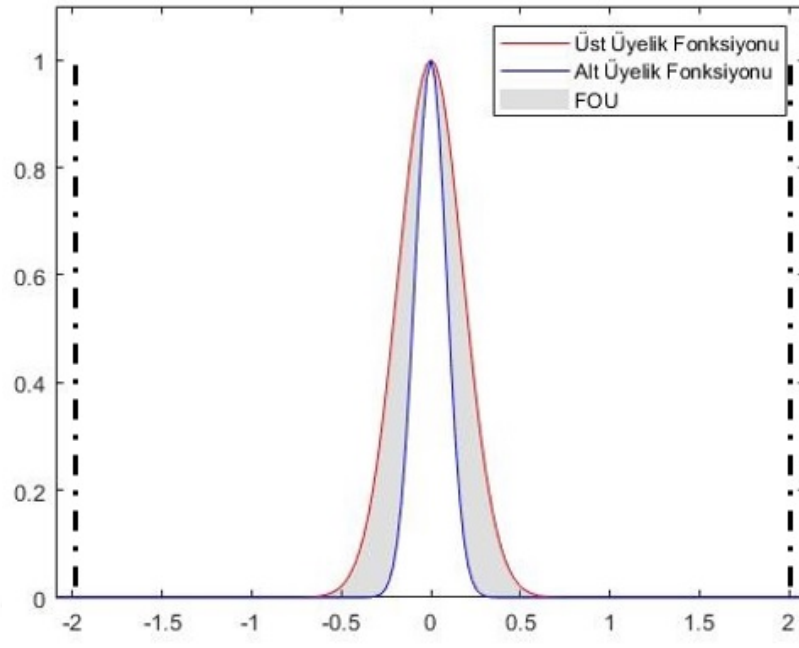
$$F = \sum_{t=1}^{200} |\theta_t| \quad (4.12)$$

4.2.9.3. Ayırık çaprazlama ve Mutasyon operatörü üzerinde geliştirme

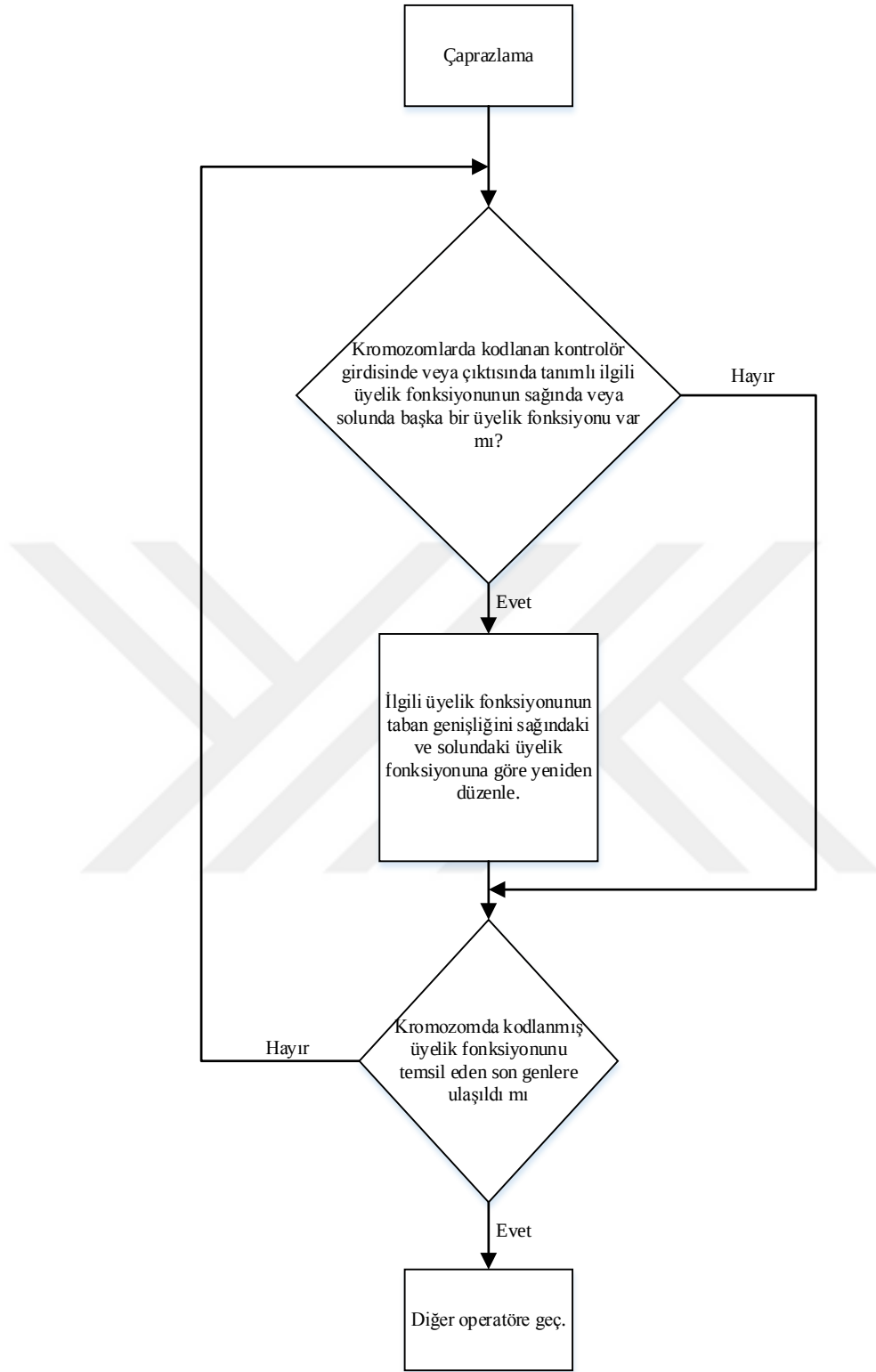
Literatürde bulunan RCQEA ile AT2-BMK optimizasyonu üzerine yapılan çalışmada [50] araştırmacılar bulanık kurallardaki dilsel terimlerin temsil ettiği Gauss tipindeki tip-2 üyelik fonksiyonlarını ifade eden genleri karşılıklı olarak 0.5 olasılıkla birbirleriyle çaprazlayarak çeşitliliği artırmaya çalışmışlardır. Ancak ilgili çalışmada araştırmacılar başlangıç popülasyonu oluştururken üyelik fonksiyonlarının taban genişliklerini kendine ayrılan bölgeleri tamamen kapsayacak şekilde oluşturmadıkları için çaprazlamanın ardından oluşan melez kromozomdaki ilgili üyelik fonksiyonlarının taban genişlikleri de

kendilerine ayrılan bölgeleri kapsamayacaktır. Örnek olarak Şekil 4.30'de $[-2, 2]$ aralığında bir Gauss tipinde tip-2 üyelik fonksiyonu çaprazlamayla üretilecek olsun. Başlangıç popülasyonunda iki farklı ebeveyn kromozomda ilgili dilsel terim için üretilmiş olarak bulunan iki farklı üyelik fonksiyonu da Şekil 4.30'de görüldüğü gibi olsun. Bu durumda iki kromozomun çaprazlanmasıyla yeni oluşacak olan melez kromozom ilgili dilsel terim için şekilde görünen bu iki üyelik fonksiyonundan birini kullanacaktır. Bu durumda bu iki üyelik fonksiyonu da kendisine ayrılan $[-2, 2]$ aralığında tanımlanan bölgeyi tamamen kapsamadığı için yeni oluşacak kromozom da kapsamayacaktır. Dolayısıyla üyelik fonksiyonu kendisine ayrılan bölgedeki kapsamadığı bir girdi için bulanıklaştırma işlemi gerçekleştiremeyecek ve AT2-BMK ile bu girdi için çıkışta bir keskin değer üretilmeyecektir.

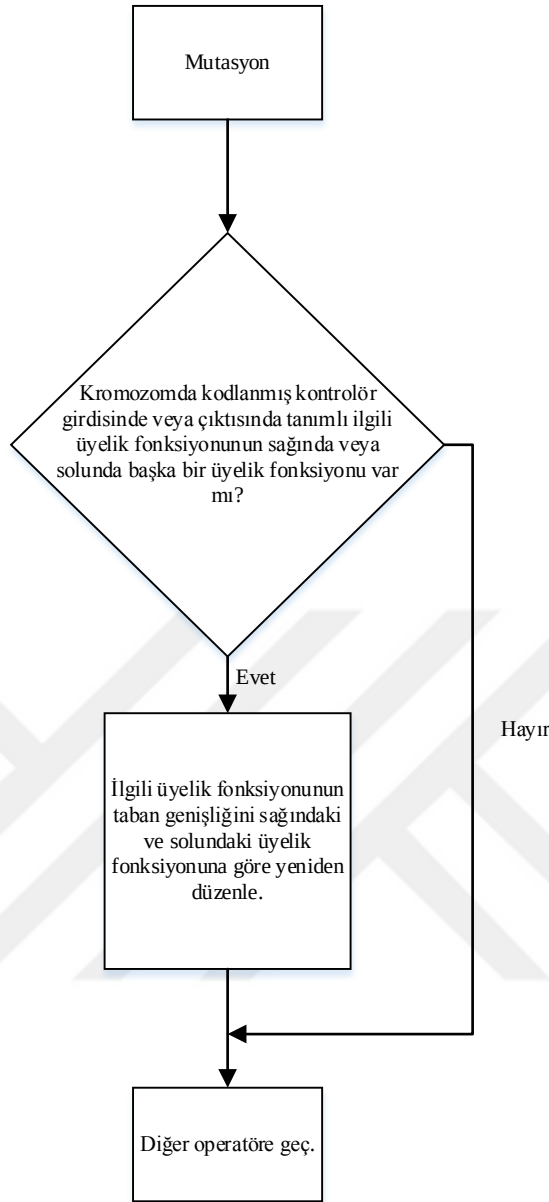
Bu tez çalışmasında kromozomların çaprazlanması işleminden sonra yeni oluşan melez kromozomdaki üyelik fonksiyonlarının kendilerine ayrılan bölgeleri tamamen kapsamaması için üyelik fonksiyonlarının taban genişlikleri yeniden düzenlenir. Benzer şekilde aynı yöntem mutasyon operatöründen sonra da kullanılmıştır. Mutasyon operatöründen sonra değişen kromozomdaki üyelik fonksiyonunun da taban genişliği sağındaki veya solundaki üyelik fonksiyonunun taban genişliğine göre yeniden düzenlenmiştir. Yapılan düzenlemenin ardından oluşan melez kromozomun ifade ettiği çarpık olabilen Gauss tipindeki tip-2 üyelik fonksiyonları AT2-BMK'nın girdileri ve çıktılarında bir süreklilik oluşturur ve tüm girdi aralıklarında kontrolörün çıktı üretebilmesine olanak sağlar. Çaprazlama ve mutasyon operatörlerinden sonra uyguladığımız bu geliştirmenin akış şeması sırasıyla Şekil 4.31 ve Şekil 4.32'deki gibidir.



Şekil 4.30. Çaprazlamaya örnek olarak verilmiş iki tane Gauss tipinde tip-2 üyelik fonksiyonu.



Şekil 4.31. Çaprazlama operatöründen sonra yapılan geliştirmelerin akış şeması.



Şekil 4.32. Mutasyon operatöründen sonra yapılan geliştirmelerin akış şeması.

4.2.10. Optimizasyon Sonuçları

Bu tez çalışmasında simülasyon çalışması MATLAB/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Ters sarkaç sistemi kontrolörü olan AT2-BMK'nın iki algoritma ile ayrı ayrı optimizasyonu yapılmıştır. Ayrıca bu iki algoritmanın çaprazlama, mutasyon ve QRG kapılarında yaptığımız geliştirmelerden öncesi ve sonrası olmak üzere iki farklı analiz daha gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada RCQEA ve RCQCSA algoritmalarının geliştirmelerden önceki ve sonraki halleriyle yapılan optimizasyon çalışmaları olmak üzere dört farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Simülasyon sonuçlarında bu karşılaştırmaların gözlemlenebilmesi için bu dört farklı analiz sırasıyla şu şekilde

isimlendirilmiştir: “RCQEA”, “RCQCSA”, “RCQEA Modifiye Edilmiş Çaprazlama, Mutasyon ve QRG” ve “RCQCSA Modifiye Edilmiş Mutasyon ve QRG”.

Optimizasyon algoritmaları ile ters sarkacın başlangıçta rastgele belirlenen bir başlangıç açısında olduğu varsayılarak gerçekleştirilen simülasyonda ters sarkacın optimum bir şekilde dikey ekseninde stabilizasyonunu sağlaması için ters sarkacı kontrol eden AT2-BMK’nın optimizasyonu hedeflenmiştir. Şekil 4.33 ve Şekil 4.34 sırasıyla 4 farklı optimizasyon yöntemiyle optimize edilen AT2-BMK’nın kontrol ettiği ters sarkaç sisteminin açı ve konum değişimini göstermektedir. Bu sonuçlarda ters sarkacın başlangıç açısı rastgele $0.52rad \cong 30^\circ$ olacak şekilde belirlenmiştir. Bu sonuçlara göre geliştirilen çaprazlama, mutasyon ve QRG kapılarını bulunduran RCQEA ve RCQCSA ile optimize edilen AT2-BMK’ların birbirleriyle aynı şekilde tasarlandıkları, dolayısıyla optimizasyon algoritmalarının aynı optimum çözümü bulduğu ve kontrol edilen ters sarkaç sisteminin daha az yer değiştirme ile dikey ekseninde daha hızlı stabilizasyon sağladığı görülmüştür.

Şekil 4.35 iterasyon sayısına karşı algoritmaların maliyetini göstermektedir. Bu karşılaştırma sonuçlarına göre RCQEA ve RCQCSA üzerinde yaptığımız geliştirmelerle birlikte algoritmalar aynı çözüme ulaşmaktadır. Ancak geliştirdiğimiz kapıları kullanan RCQCSA, RCQEA’ya göre optimum sonuca daha hızlı yakınsamaktadır.

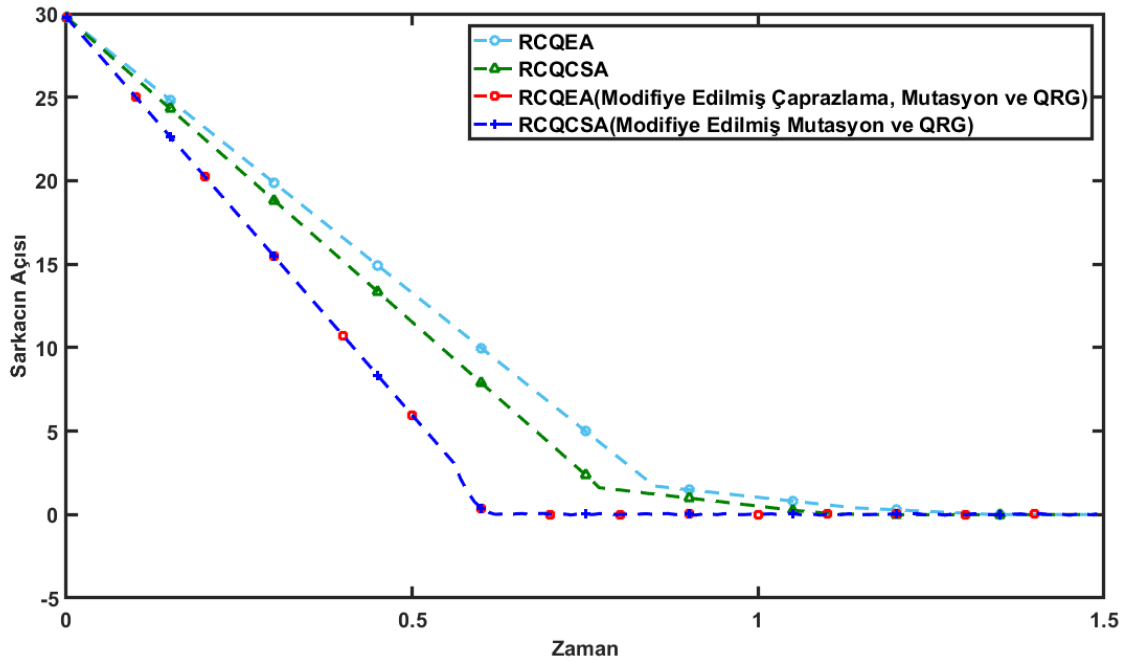
Şekil 4.36, Şekil 4.37 ve Şekil 4.38, sırasıyla “Hata” girişinin, “Hatanın Değişimi” girişinin ve “Uygulanan Kuvvet” çıkışının optimize edilmiş üyelik fonksiyonlarını göstermektedir. Şekil 4.36’de görüldüğü üzere ters sarkacın başlangıçta rastgele olarak belirlenmiş açı değeri olan 0,52 rad değerinde bulanık kurallarda tanımlı sistemi hızlı bir şekilde dengeye getirecek “LP” dilsel terimini temsil eden üyelik fonksiyonu maksimum üyelik derecesine sahiptir. Dolayısıyla bu şekilde tasarlanmış üyelik fonksiyonunu kullanan AT2-BMK ters sarkaç sisteminin daha küçük mutlak hata değeri üretmesini sağlamaktadır.

Çizelge 4.10. , [24], [37], [80]’de yapılan çalışmalarda sırasıyla kübit durumunu her bir adımda $\pi/100$, $\pi/250$, $\pi/20 + rand + \pi/20$ kadar rotasyona uğratacak QRG’yi ve bu çalışmada önerilen QRG’yi kullanan optimizasyon algoritmaları ile ters sarkaç sisteminin toplam mutlak hata yanıtını ve ters sarkacın dikey eksene yerleşme zamanını göstermektedir. Bu sonuçlara göre bu tez çalışmasında önerilen QRG’yi kullanan RCQEA ve RCQCSA ile üretilen optimum çözüm ters sarkacı daha kısa zamanda

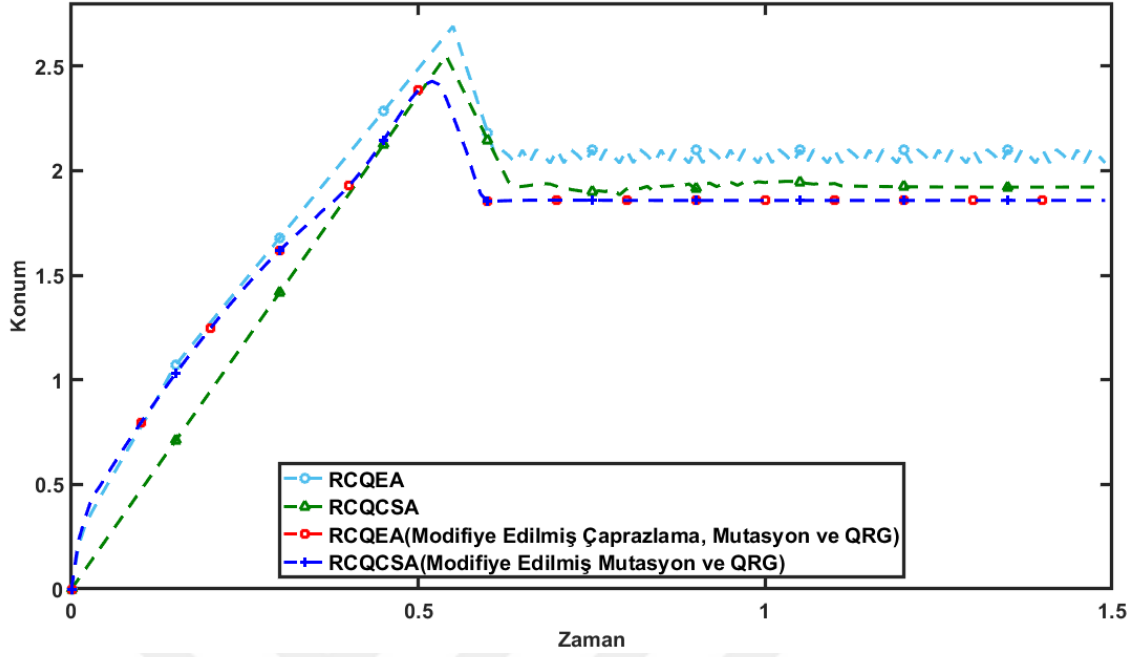
dengeye ulaştırmakta ve daha kk mutlak hata değerine sahip olmaktadır.

Çizelge 4.16. Optimizasyon algoritmalarının farklı QRG’ler ile tasarlanmasıyla optimize edilen ters sarkaç sisteminin cevabı.

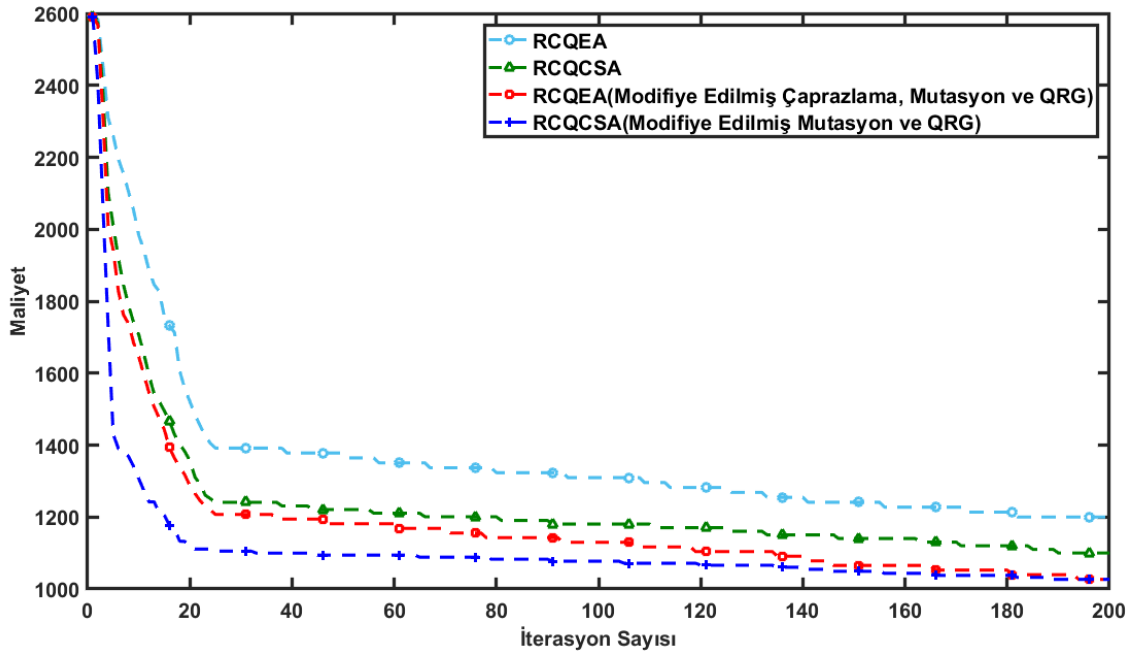
QRG	Optimizasyon Algoritması	Mutlak Hata	Yerleşme Zamanı (sn)
QRG’de rotasyon açısı [24]’deki gibi belirlenmiştir.	RCQEA	1,36e+3	1,10
	RCQCSA	1,29e+3	1,04
QRG’de rotasyon açısı [37]’deki gibi belirlenmiştir.	RCQEA	1,25e+3	0,85
	RCQCSA	1,23e+3	0,82
QRG’de rotasyon açısı [80]’deki gibi belirlenmiştir.	RCQEA	1,17e+3	0,70
	RCQCSA	1,16e+3	0,68
QRG’de rotasyon açısı bu çalışmada geliştirilen şekilde belirlenmiştir.	RCQEA	1,13e+3	0,64
	RCQCSA	1,13e+3	0,64



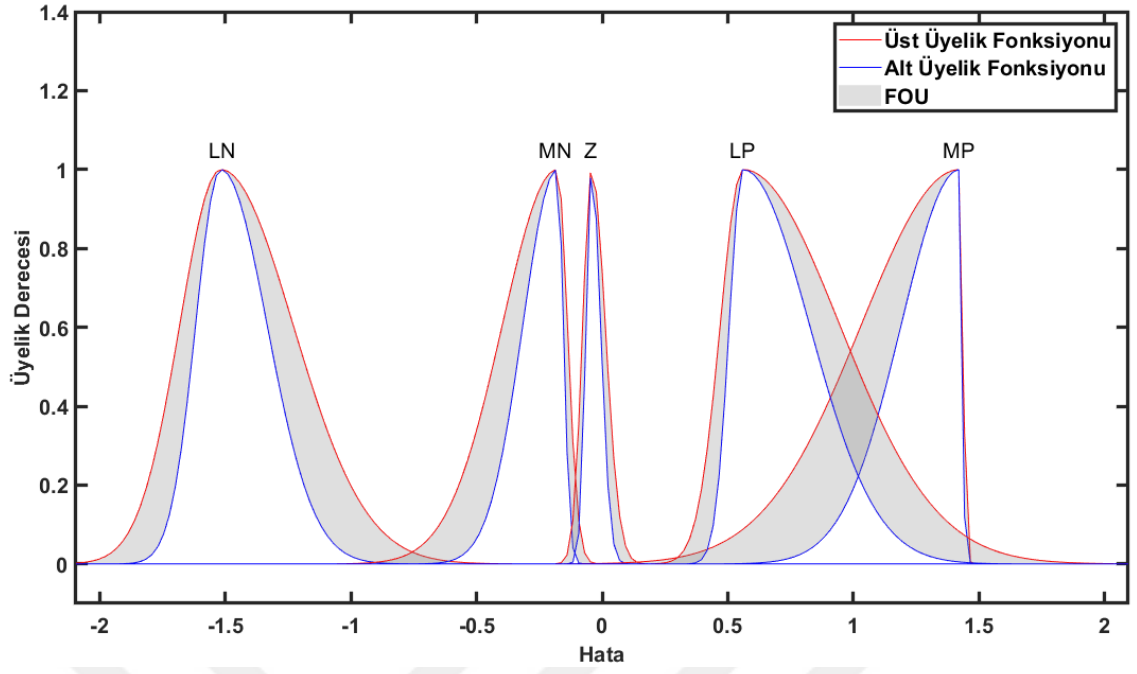
Şekil 4.33. 4 farklı optimizasyon metoduyla ters sarkacın açı değişimi üzerinden performans karşılaştırması.



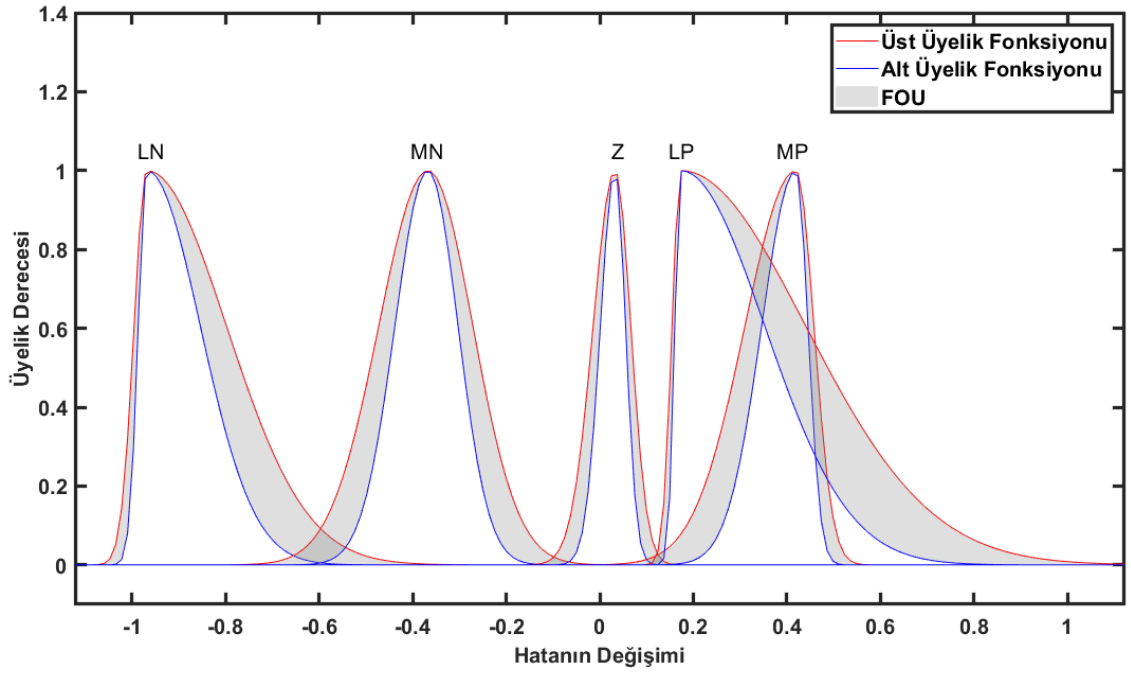
Şekil 4.34. 4 farklı optimizasyon metoduyla ters sarkacın bağlı olduğu arabanın konumunun değişimi üzerinden performans karşılaştırması.



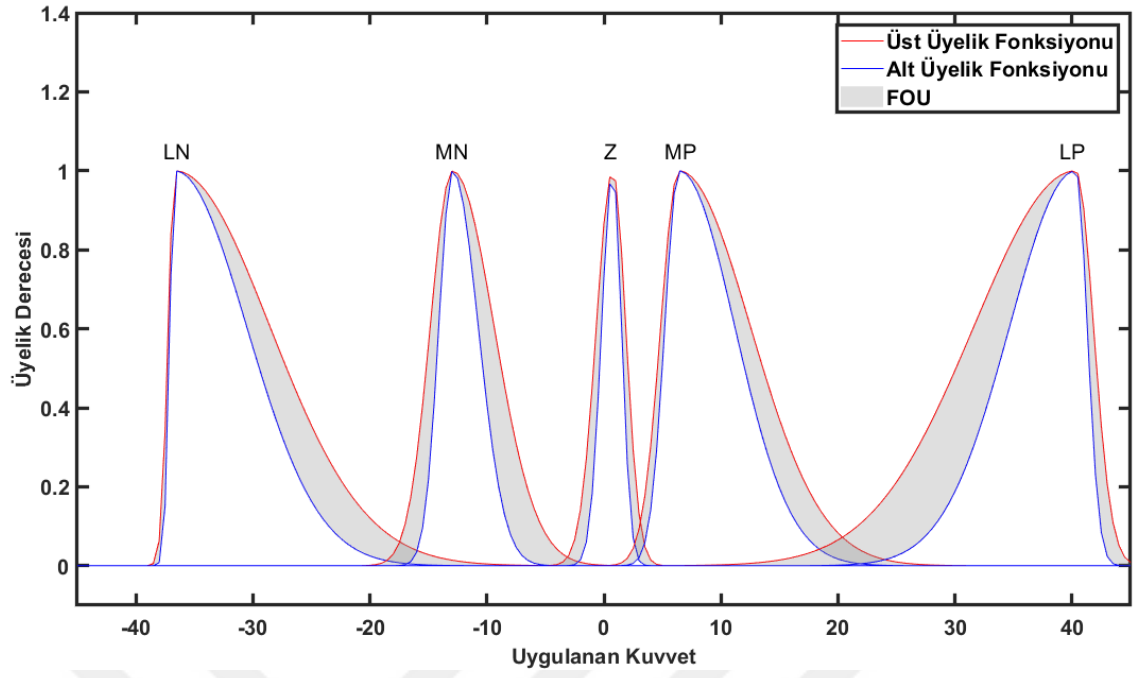
Şekil 4.35. 4 farklı optimizasyon metodunun ters sarkacı kontrol eden AT2-BMK optimizasyonu üzerindeki performans karşılaştırması.



Şekil 4.36. “Hata” girişine ait optimize edilmiş üyelik fonksiyonları.



Şekil 4.37. “Hatanın Değişimi” girişine ait optimize edilmiş üyelik fonksiyonları.



Şekil 4.38. “Uygulanan Kuvvet” çıkışına ait optimize edilmiş üyelik fonksiyonları.

5. SONUÇLAR VE GELECEK ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada RCQEA'nın optimizasyon üzerindeki performansını artırmak için geliştirmeler yapılmıştır. RCQEA'da kullanılan ve verimsiz çalışan QRG için yeni bir QRG önerilmiştir. Önerdiğimiz QRG kübit durumunun her halinde kendisinden beklenen şekilde rotasyon yaptırmakta ve RCQEA'nın performansını artırmaktadır. Ayrıca arama uzayı daraltma tekniği algoritmanın küresel çözümleri bulması kolaylaşmıştır.

Bu çalışmada RCQEA klonal seçim prensiplerine dayandırılarak RCQCSA önerilmiştir. Önerdiğimiz RCQCSA, klonal seçim algoritmasının çalışma prensibi gereği algoritmanın ilerleyen iterasyonlarında iyi çözümlerin etrafındaki daha iyi çözümlere odaklandığından dolayı küresel çözümlere daha az iterasyonda erişmektedir. RCQCSA klonal seçim prensibine dayandığından çaprazlama operatörü barındırmamaktadır. Bu durum, popülasyonda çeşitliliği azaltıyor olarak görülebilir; ancak mutasyon operatörünün arama uzayındaki küresel çözümleri bulabilmesi, RCQCSA'nın yerel çözümlerde tıkanmasını engellemektedir.

Bu çalışmada RCQEA'nın orijinal versiyonu, literatürde bulunan SRCQEA, RCQEA'nın geliştirdiğimiz hali ve önerdiğimiz RCQCSA karmaşık problemlerin optimizasyonunda kullanılmıştır. 30, 50 ve 100 boyutlu karmaşık problemlerin optimizasyonunda sonuçlar RCQCSA'nın optimum çözümleri daha az iterasyonda ve daha az standart sapmayla bulduğunu göstermektedir.

Bu çalışmada ayrıca literatürde bulunan RCQEA ile BMK optimizasyonu çalışmaları incelenmiştir. İncelenen çalışmalarda RCQEA'nın ters sarkacı kontrol eden BMK'ların kurallarında kullanılan her bir dilsel terimin temsil ettiği üyelik fonksiyonu için üyelik fonksiyonu üretildiği ve kromozomlara kodlanarak popülasyonun oluşturulduğu görülmüştür. Popülasyonun bu şekilde oluşturulduğu çalışmalarda bir kromozom değerlendirilirken birbirini takip eden kurallarda aynı dilsel terimlerin kullanılması durumunda aynı dilsel terimler için üretilip kromozoma kodlanmış son parametreler daha öncekileri ezmekte ve BMK'nın son parametrelere göre üretilen üyelik fonksiyonunu kullanarak tasarlandığı görülmüştür. Bu da optimizasyon algoritmasının ilgili üyelik fonksiyonu için BMK'nın performansını artıracak bir

tasarımını bulsa dahi bu parametrelerin kromozomun değerlendirilmesi esnasında görmezden gelinebileceğini göstermektedir. Bu nedenle bu çalışmada popülasyonun yapısı değiştirilerek kromozomlara BMK’da kullanılan her bir üyelik fonksiyonu birer kez kodlanmıştır. Ayrıca AT2-BMK üyelik fonksiyonlarının üretilebileceği bölgeler literatürdeki çalışmalardan farklı bir teknikle belirlenmiştir. Bu sayede sistemi hızlı bir şekilde dengeye götürecek bulanık kuralların atışlenebilmesi sağlanmış ve AT2-BMK’nın performansı artırılmıştır. Bu çalışmada AT2-BMK optimizasyonu için RCQCSA önerilmiştir. AT2-BMK ile kontrol edilecek sistem olarak literatürde kontrol yöntemlerinin performans analizinin gözlemlenmesinde oldukça popüler bir test problemi olarak görülen ters sarkaç problemi seçilmiştir. Ters sarkaç sistemini kontrol eden AT2-BMK optimizasyonu üzerine yaptığımız çalışmada geliştirdiğimiz RCQEA ile RCQCSA’nın aynı optimum çözümlere ulaştığı ancak RCQCSA’nın daha az iterasyonda ulaştığı görülmüştür. Bu sonuçlar geliştirdiğimiz RCQCSA’nın farklı optimizasyon problemlerinde başarıyla uygulanabildiğini göstermektedir.

Bu konu üzerine gelecek çalışmalarda RCQCSA ile kuantumdan esinlenen hibrit algoritmaların veya klasik optimizasyon algoritmalarının çeşitli optimizasyon problemleri üzerinde karşılaştırması yapılabilir veya RCQEA’nın çalışma mekanizması başka metasezgisel optimizasyon algoritmalarına dayandırılarak geliştirilebilir. Bulanık PD tipi yerine bulanık PI veya bulanık PID tipinde AT2-BMK optimizasyonu gerçekleştirilebilir ve kontrolör tipinin sistem yanıtı üzerindeki etkisi gözlemlenebilir. Ayrıca AT2-BMK’da üçgen ve yamuk gibi değişik tipteki üyelik fonksiyonları kullanarak yapılan optimizasyonda sistemin yanıtındaki farklılıklar gözlemlenebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] S. A. Uymaz, G. Tezel, ve E. Yel, “Artificial algae algorithm (AAA) for nonlinear global optimization”, *Applied Soft Computing*, c. 31, ss. 153-171, 2015.
- [2] M. A. Tawhid ve V. Savsani, “A novel multi-objective optimization algorithm based on artificial algae for multi-objective engineering design problems”, *Applied Intelligence*, c. 48, sayı 10, ss. 3762-3781, 2018.
- [3] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, ve A. Lewis, “Grey wolf optimizer”, *Advances in Engineering Software*, c. 69, ss. 46-61, 2014.
- [4] M. Eusuff, K. Lansey, ve F. Pasha, “Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization”, *Engineering Optimization*, c. 38, sayı 2, ss. 129-154, 2006.
- [5] D. Karaboga, “An idea based on honey bee swarm for numerical optimization”, Erciyes Üniversitesi, Türkiye, Technical Report-TR06, 2005.
- [6] H.-P. P. Schwefel, *Evolution and optimum seeking: the sixth generation*. A.B.D.: John Wiley & Sons, Incorporated, 1993, ss. 456.
- [7] J. Kennedy ve R. Eberhart, “Particle swarm optimization”, *ICNN’95-International Conference on Neural Networks*, Pert, Avustralya, 1995, ss. 1942-1948.
- [8] J. R. Koza, S. H. Al-Sakran, ve L. W. Jones, “Cross-domain features of runs of genetic programming used to evolve designs for analog circuits, optical lens systems, controllers, antennas, mechanical systems, and quantum computing circuits”, *2005 NASA/DoD Conference on Evolvable Hardware (EH’05)*, Washington, A.B.D, 2005, ss. 205-212.
- [9] I. Grigorenko ve M. E. Garcia, “Calculation of the partition function using quantum genetic algorithms”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, c. 313, sayı 3-4, ss. 463-470, 2002.
- [10] I. Grigorenko ve M. E. Garcia, “Ground-state wave functions of two-particle systems determined using quantum genetic algorithms”, *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, c. 291, sayı 1-4, ss. 439-448, 2001.

- [11] M. Şahin ve M. Tomak, "The self-consistent calculation of a spherical quantum dot: a quantum genetic algorithm study", *Physica E Low Dimens Syst Nanostruct*, c. 28, sayı 3, ss. 247-256, 2005.
- [12] L. Spector, H. Barnum, H. J. Bernstein, ve N. Swamy, "Finding a better-than-classical quantum AND/OR algorithm using genetic programming", *1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, Washington, A.B.D, 1999, ss. 2239-2246.
- [13] L. Spector, H. Barnum, H. J. Bernstein, ve N. Swamy, "Genetic programming for quantum computers", *Genetic Programming*, ss. 365-373, 1998.
- [14] B. Rylander, T. Soule, J. A. Foster, ve J. Alves-Foss, "Quantum genetic algorithms.", *Genetic and Evolutionary Computation Conference*, Las Vegas, A.B.D., 2000, ss. 373.
- [15] A. Malossini, E. Blanzieri, ve T. Calarco, "QGA: a quantum genetic algorithm", University of Trento, İtalya, Technical Report-DIT-04-105, 2004.
- [16] D. A. Sofge, "Toward a framework for quantum evolutionary computation", *Cybernetics and Intelligent Systems*, Bangkok, Tayland, 2006, ss. 1-6.
- [17] M. Udrescu, L. Prodan, ve M. Vlăduţiu, "Implementing quantum genetic algorithms: a solution based on grover's algorithm", *Computing Frontiers Conference*, New York, A.B.D, 2006, ss. 71-82.
- [18] W. Pötz, J. Fabian, ve U. Hohenester, *Quantum coherence: from quarks to solids*, c. 689. Springer Science & Business Media, 2006.
- [19] M. Moore ve A. Narayanan, "Quantum-inspired computing", University of Exeter, Birleşik Krallık, 1995.
- [20] S. Zhou ve Z. Sun, "A new approach belonging to EDAs: quantum-inspired genetic algorithm with only one chromosome", *International Conference on Natural Computation*, Çangşa, Çin, 2005, ss. 141-150.
- [21] A. Narayanan ve M. Moore, "Quantum-inspired genetic algorithms", *Evolutionary Computation*, Nagoya, Japonya, 1996, ss. 61-66.
- [22] A. Narayanan, "Quantum computing for beginners", *Evolutionary Computation-CEC99 (Cat. No. 99TH8406)*, Washington, Amerika, 1999, ss. 2231-2238.

- [23] K.-H. Han ve J.-H. Kim, "Genetic quantum algorithm and its application to combinatorial optimization problem", *Evolutionary Computation. CEC00 (Cat. No.00TH8512)*, La Jolla, A.B.D, 2000, ss. 1354-1360.
- [24] K.-H. Han ve J.-H. Kim, "Quantum-inspired evolutionary algorithm for a class of combinatorial optimization", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, c. 6, sayı 6, ss. 580-593, 2002.
- [25] H. Xing, Y. Ji, L. Bai, X. Liu, Z. Qu, ve X. Wang, "An adaptive-evolution-based quantum-inspired evolutionary algorithm for QoS multicasting in IP/DWDM networks", *Computer Communications*, c. 32, sayı 6, ss. 1086-1094, 2009.
- [26] M. D. Platel, S. Schliebs, ve N. Kasabov, "Quantum-inspired evolutionary algorithm: A multimodel EDA", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, c. 13, sayı 6, ss. 1218-1232, 2008.
- [27] G. K. Venayagamoorthy ve G. Singhal, "Quantum-inspired evolutionary algorithms and binary particle swarm optimization for training MLP and SRN neural networks", *Journal of Comput Theoretical Nanoscience*, c. 2, sayı 4, ss. 561-568, 2005.
- [28] J. Yang, Z. Zhuang, ve L. Shi, "Multi-universe parallel quantum genetic algorithm", *Acta Electronica Sinica*, c. 32, sayı 6, ss. 923, 2004.
- [29] A. V. A. da Cruz, M. Vellasco, ve M. A. C. Pacheco, "Quantum-Inspired Evolutionary Algorithm for Numerical Optimization", *Evolutionary Computation*, Vancouver, Kanada, 2006, ss. 2630-2637.
- [30] F. S. Alfares ve I. I. Esat, "Real-coded quantum inspired evolution algorithm applied to engineering optimization problems", *Second International Symposium on Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation (Isola 2006)*, Paphos, Kıbrıs, 2006, ss. 169-176.
- [31] H. Liu, G. Zhang, C. Liu, ve C. Fang, "A novel memetic algorithm based on real-observation quantum-inspired evolutionary algorithms", *3rd International Conference on Intelligent System and Knowledge Engineering*, Xiamen, Çin, 2008, ss. 486-490.
- [32] G. Zhang ve H. Rong, "Parameter setting of quantum-inspired genetic algorithm based on real observation", *Rough Sets and Knowledge Technology*, Toronto, Kanada, 2007, ss. 492-499.

- [33] R. Zhang ve H. Gao, “Real-coded quantum evolutionary algorithm for complex functions with high-dimension”, *Mechatronics and Automation*, Harbin, Çin, 2007, ss. 2974-2979.
- [34] H. Gao ve R. Zhang, “Real-coded quantum evolutionary algorithm for global numerical optimization with continuous variables”, *Chinese Journal of Electronics*, c. 20, sayı 3, ss. 499-503, 2011.
- [36] H. Wang, J. Liu, J. Zhi, ve C. Fu, “The improvement of quantum genetic algorithm and its application on function optimization”, *Mathematical Problems in Engineering*, c. 2013, 2013.
- [37] M. A. Hossain, M. K. Hossain, ve M. M. A. Hashem, “Hybrid real-coded quantum evolutionary algorithm based on particle swarm theory”, *Computers and Information Technology*, Dhaka, Bangladeş, 2009, ss. 13-18.
- [38] J. Wright ve I. Jordanov, “Convergence properties of quantum evolutionary algorithms on high dimension problems”, *Neurocomputing*, c. 326, ss. 82-99, 2019.
- [39] S. Yang, M. Wang, ve L. Jiao, “A genetic algorithm based on quantum chromosome”, *Signal Processing*, Pekin, Çin, 2004, ss. 1622-1625.
- [40] N. Li, P. Du, ve H. Zhao, “Independent component analysis based on improved quantum genetic algorithm: application in hyperspectral images”, *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seul, Güney Kore, 2005, ss. 4323-4326.
- [41] Y.-J. Lv ve N.-X. Liu, “Application of quantum genetic algorithm on finding minimal reduct”, *Granular Computing (GRC 2007)*, Fremont, A.B.D, 2007, ss. 728-728.
- [42] G. Zhang, N. Li, W. Jin, ve L. Hu, “Novel quantum genetic algorithm and its applications”, *Frontiers of Electrical and Electronic Engineering in China*, c. 1, sayı 1, ss. 31-36, 2006.
- [43] X. You, S. Liu, ve D. Shuai, “Studying the performance of quantum evolutionary algorithm based on immune theory”, *International Conference on Computational Science*, Pekin, Çin, 2007, ss 1068–1075.
- [44] X. You, D. Shuai, ve S. Liu, “Research and implementation of quantum evolution algorithm based on immune theory”, *Intelligent Control and Automation*, Dalian, Çin, 2006, ss. 3410-3414.

- [45] Q. Wu, L. Jiao, Y. Li, ve X. Deng, “A novel quantum-inspired immune clonal algorithm with the evolutionary game approach”, *Progress in Natural Science*, c. 19, sayı 10, ss. 1341-1347, 2009.
- [46] Y. Wang vd., “A novel quantum swarm evolutionary algorithm and its applications”, *Neurocomputing*, c. 70, sayı 4-6, ss. 633-640, 2007.
- [47] H. Yourui, T. Chaoli, ve W. Shuang, “Quantum-inspired swarm evolution algorithm”, *Computational Intelligence and Security Workshops (CISW 2007)*, Harbin, Çin, 2007, ss. 208-211.
- [48] Y. Wang, X.-Y. Feng, Y.-X. Huang, W.-G. Zhou, Y.-C. Liang, ve C.-G. Zhou, “A novel quantum swarm evolutionary algorithm for solving 0-1 knapsack problem”, *International Conference on Natural Computation*, Çangşa, Çin, 2005, ss. 698–704.
- [49] P. C. Shill, M. A. Hossain, M. K. Hossain, M. F. Amin, ve K. Murase, “Design and implementation of an effective fuzzy logic controller based on quantum inspired evolutionary algorithm.”, *Journal of Computers*, c. 7, sayı 3, ss. 586-596, 2012.
- [50] P. C. Shill, M. F. Amin, M. A. H. Akhand, ve K. Murase, “Optimization of interval type-2 fuzzy logic controller using quantum genetic algorithms”, *International Conference on Fuzzy Systems*, Brisbane, Avustralya, 2012, ss. 1-8.
- [51] P. C. Shill, M. A. H. Akhand, ve K. Murase, “Fuzzy logic controller for an inverted pendulum system using quantum genetic optimization”, *International Conference on Computer and Information Technology (ICCIT 2011)*, Dakka, Bangladeş, 2011, ss. 503-508.
- [52] P. C. Shill, M. C. Urmi, B. Sarker, ve K. Murase, “Quantum Fuzzy Controller for Inverted Pendulum System Based on Quantum Genetic Optimization.”, *International Journal of Advanced Research in Computer Science*, c. 3, sayı 6, 2012.
- [53] P. C. Shill, M. A. Hossain, M. F. Amin, ve K. Murase, “An adaptive fuzzy logic controller based on real coded quantum-inspired evolutionary algorithm”, *International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE 2011)*, Taipei, Tayvan, 2011, ss. 614-621.
- [54] F. Bloch, “Quantum mechanics of electrons in crystal lattices”, *Zeitschrift für Physik*, c. 52, ss. 555-600, 1928.
- [55] M. Hirvensalo, *Quantum computing*. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2003, ss. 214.

- [56] D. Dasgupta, *Artificial immune systems and their applications*. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2012, ss. 306.
- [57] J. Timmis, A. Hone, T. Stibor, ve E. Clark, “Theoretical advances in artificial immune systems”, *Theoretical Computer Science*, c. 403, sayı 1, ss. 11-32, 2008.
- [58] G. L. Ada ve S. G. Nossal, “The clonal-selection theory”, *Scientific American*, c. 257, sayı 2, ss. 62-69, 1987.
- [59] L. N. de Castro ve F. J. von Zuben, “Learning and optimization using the clonal selection principle”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, c. 6, sayı 3, ss. 239-251, 2002.
- [60] N. K. Jerne, “The immune system”, *Scientific American*, c. 229, sayı 1, ss. 52-63, 1973.
- [61] S. Kızılloluk ve A. B. Özer, “Melez elektromanyetizma benzeri-parçacık sürü optimizasyon algoritması”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, c. 7, sayı 3, ss. 515-526, 2016.
- [62] B. Alatas, “A novel chemistry based metaheuristic optimization method for mining of classification rules”, *Expert Systems with Applications*, c. 39, sayı 12, ss. 11080-11088, 2012.
- [63] A. Törn ve A. Žilinskas, *Global Optimization*. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 1989, ss. 260.
- [64] X. Yao, Y. Liu, ve G. Lin, “Evolutionary programming made faster”, *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, c. 3, sayı 2, ss. 82-102, 1999.
- [65] L. A. Zadeh, “Fuzzy sets”, *Information and Control*, c. 8, sayı 3, ss. 338-353, 1965.
- [66] L. A. Zadeh, “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I”, *Information Sciences*, c. 8, sayı 3, ss. 199-249, 1975.
- [67] L. A. Zadeh, “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—II”, *Information Sciences*, c. 8, sayı 4, ss. 301-357, 1975.
- [68] L. A. Zadeh, “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning-III”, *Information Sciences*, c. 9, sayı 1, ss. 43-80, 1975.
- [69] N. N. Karnik ve J. M. Mendel, “Operations on type-2 fuzzy sets”, *Fuzzy Sets*

and Systems, c. 122, sayı 2, ss. 327-348, 2001.

[70] N. N. Karnik ve J. M. Mendel, “Centroid of a type-2 fuzzy set”, *Information Sciences*, c. 132, sayı 1-4, ss. 195-220, 2001.

[71] J. M. Mendel, “Type-2 fuzzy sets and systems: an overview”, *IEEE Computational Intelligence Magazine*, c. 2, sayı 1, ss. 20-29, 2007.

[72] J. M. Mendel, “Uncertain rule-based fuzzy systems, Introduction and new directions”, Springer, 2017, ss. 684.

[73] D. Wu ve W. W. Tan, “Interval type-2 fuzzy PI controllers: Why they are more robust”, *International Conference on Granular Computing*, San Jose, A.B.D., 2010, 802-807.

[74] M. Aliasghary, İ. Eksin, M. Güzelkaya, ve T. Kumbasar, “Design of an interval type-2 fuzzy logic controller based on conventional PI controller”, *Mediterranean Conference on Control & Automation (MED)*, Barselona, İspanya, 2012, ss. 627-632.

[75] N. N. Karnik, J. M. Mendel, ve Q. Liang, “Type-2 fuzzy logic systems”, *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, c. 7, sayı 6, ss. 643-658, 1999.

[76] D. P. Kwok, P. Tam, C. K. Li, ve P. Wang, “Linguistic PID controllers”, *IFAC Proceedings Volumes*, c. 23, sayı 8, ss. 205-210, 1990.

[77] M. Mizumoto, “Fuzzy controls by product-sum-gravity method”, *Advancement of Fuzzy Theory and Systems in China and Japan*, ss. c1-1, 1990.

[78] H.-X. Li ve H. Gatland, “Conventional fuzzy control and its enhancement”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, c. 26, sayı 5, ss. 791-797, 1996.

[79] A. K. Yadav, P. Gaur, A. P. Mittal, ve M. Anzar, “Comparative analysis of various control techniques for inverted pendulum”, *India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010)*, Yeni Delhi, Hindistan, 2011, ss. 1-6.

[80] H. Talbi ve A. Draa, “A new real-coded quantum-inspired evolutionary algorithm for continuous optimization”, *Applied Soft Computing*, c. 61, ss. 765-791, 2017.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Ekrem BAŞER

Yabancı Dili : İngilizce

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Doktora	Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Müh.	Düzce Üniversitesi	2023
Y. Lisans	Bilgisayar Müh.	Düzce Üniversitesi	2016
Lisans	Bilgisayar Müh.	Erciyes Üniversitesi	2013
Lise	Sayısal	Selçuk Anadolu Lisesi	2008

YAYINLAR

[1] E. Satir ve E. Baser, “Optimization of interval type-2 fuzzy logic controller using real coded quantum inspired clonal selection algorithm”, *Elektronika ir Elektrotechnika*, c. 28, sayı 3, ss. 4-14, 2022.