



İSKENDERUN TEKNİK

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**YÜKSEK
LİSANS
TEZİ**

**SARKAÇ TİPİ VİNÇ
SİSTEMİ İÇİN META
SEZGİSEL ALGORİTMALAR
İLE LQR DENETLEYİCİ
TASARIMI VE PERFORMANS
KARŞILAŞTIRMASI**

Ferhat KAYA

**MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI**

OCAK 2022



**SARKAÇ TİPİ VİNÇ SİSTEMİ İÇİN META SEZGİSEL ALGORİTMALAR
İLE LQR DENETLEYİCİ TASARIMI VE PERFORMANS
KARŞILAŞTIRMASI**

Ferhat KAYA

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

OCAK 2022

Ferhat KAYA tarafından hazırlanan “SARKAÇ TİPİ VİNÇ SİSTEMİ İÇİN META SEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE LQR DENETLEYİCİ TASARIMI VE PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile İskenderun Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi ÇAĞLAR CONKER

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Başkan: Dr. Öğr. Üyesi HASAN HÜSEYİN BİLGİÇ

Uçak Mühendisliği Anabilim Dalı, Necmettin Erbakan Üniversitesi Üniversite

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Üye: Doç. Dr. MUSTAFA KAAAN BALTACIOĞLU

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum/onaylamıyorum.

.....
.....

Tez Savunma Tarihi: 24.01.2022

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

.....

Doç. Dr. Ersin BAHÇECİ

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

İskenderun Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez üzerinde Yükseköğretim Kurulu tarafından hiçbir değişiklik yapılamayacağı için tezin bilgisayar ekranında görüntülendiğinde asıl nüsha ile aynı olması sorumluluğunun tarafıma ait olduğunu,
 - Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
 - Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
 - Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
 - Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
 - Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,
- bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

İmza

Ferhat KAYA

24/01/2022

SARKAÇ TİPİ VİNÇ SİSTEMİ İÇİN META SEZGİSEL ALGORİTMALAR İLE LQR
DENETLEYİCİ TASARIMI VE PERFORMANS KARŞILAŞTIRMASI
(Yüksek Lisans Tezi)

Ferhat KAYA

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Ocak 2022

ÖZET

Tez çalışması ile sarkaç tipi tepe vinç sistemi için Doğrusal Kuadratik Düzenleyici (LQR) denetleyicinin kontrol parametreleri için Genetik Algoritma (GA), Yapay Arı Kolonisi (ABC), Titreşimli Parçacıklar Sistemi Algoritması (VPS), Büyük Patlama-Büyük Çöküş Algoritması (BB-BC) ve Termal Değişim Optimizasyon (TEO) algoritmalarının tasarım ve performans analizleri detaylı olarak sunulmaktadır. Optimizasyonun amacı vinç arabası istenilen konuma en kısa sürede ulaşırken, sarkaç salınımlarını ortadan kaldıracak bir LQR denetleyici tasarlamaktır. Bu amaca uygun olarak ve kontrol yanıtlarının parametrelerini göz önünde bulundurarak yeni bir çoklu amaç fonksiyonu tasarlanmaktadır. Optimizasyon için kullanılan algoritmalar arasında yer alan VPS, BB-BC ve TEO algoritmaları ilk kez sarkaç tipi tepe vinç sisteminin hareket kontrolü için kullanılmış ve geleneksel GA ve ABC algoritmaları ile karşılaştırılmıştır. En başarılı optimizasyon sonuçlarını elde etmek için, Genetik Algoritma, Yapay Arı Kolonisi, Titreşimli Parçacıklar Sistemi Algoritması, Büyük Patlama-Büyük Çöküş Algoritması ve Termal Değişim Optimizasyon algoritmalarının altı farklı popülasyon veya parçacık boyut değeri (10-60) için 100 iterasyonda incelenmektedir. Ayrıca Yapay Arı kolonisi, Büyük Patlama-Büyük Çöküş ve Termal Değişim Optimizasyon algoritmalarının başlangıç parametreleri iki bağımsız değişken incelenerek elde edilmiştir. GA, ABC, VPS, BB-BC ve TEO algoritmalarının birbiri ve optimize edilmemiş Doğrusal Kuadratik Düzenleyici ile karşılaştırılmaktadır. Benzetim çalışmaları ile elde edilen en iyi konfigürasyonlar deneysel olarak doğrulanmaktadır. Tez çalışması ile ulaşılan sonuçlar, kontrol yanıt parametreleri (yükselme zamanı, oturma zamanı vb.) ve önemli istatistiksel performans değerlendirme (Ortalama Mutlak Hata (MAE), Ortalama Kare Hata (MSE), Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) ve maksimum hata) kriterleri incelenerek değerlendirilmiştir.

Optimizasyon sonuçlarına göre, sarkaç arabasının kararlı durum hatası ortadan kaldırılmış ve oturma süresinde %52,46 iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca sarkaç açısının oturma süresinde %73,81'e varan iyileştirme sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : Tepe vinci, LQR, meta sezgisel algoritmalar, optimizasyon algoritmaları
Sayfa Adedi : 70
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER

LQR CONTROLLER DESIGN AND PERFORMANCE COMPARISON WITH
METAHEURISTIC ALGORITHMS FOR THE GANTRY CRANE SYSTEM
(M. Sc. Thesis)

Ferhat KAYA

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

January 2022

ABSTRACT

In the thesis, the design and performance analysis of Genetic algorithm (GA), Artificial Bee Colony (ABC), Vibrating Particle System (VPS) and Big Bang-Big Crunch (BB-BC) and Thermal Exchange Optimization (TEO) algorithms for the control parameters of the Linear Quadratic Regulator (LQR) controller for the pendulum type gantry crane system are presented in detail. The aim of the optimization is to design an LQR controller to follow the command of the desired position as soon as possible and eliminate pendulum oscillations. To address this problem and to provide a solution, is designed the novel multi-objective function considers the significant parameters of the control responses. Vibrating Particle System, Big Bang-Big Crunch and Thermal Exchange Optimization algorithms, which are among the algorithms used for optimization, were used for the first time for the motion control of the single pendulum gantry system and compared with the traditional of Genetic algorithm and Artificial Bee Colony algorithms. To achieve the most successful optimization results, six distinct populations or particle size values (10-60) of Genetic algorithm, Artificial Bee Colony, Vibrating Particle System and Big Bang-Big Crunch and Thermal Exchange Optimization algorithms have been examined for 100 iterations. In addition, the initial parameters of ABC, BB-BC, and VPS algorithms were obtained by examining two independent variables. GA, ABC, VPS, BB-BC, and TEO algorithms were compared with each other and with non-optimized LQR. The best configurations obtained by simulation studies are verified experimentally. The results obtained by the study were evaluated by examining the control response parameters (rise time, settling time, overshoot, peak time, etc.) and important statistical performance evaluation criteria (Mean Absolute Error, Mean Squared Error, Root Mean Square Error).

According to the pre-design results, the steady-state error of the pendulum cart was eliminated and 52.46% improvement was achieved in settling time. In addition, an improvement of up to 73,81% was achieved in the settling time of the pendulum angle.

Key Words : Gantry crane, LQR, metaheuristic algorithms, optimization algorithms
Page Number : 70
Supervisor : Asst. Prof. Dr. Çağlar CONKER

TEŞEKKÜR

Akademik bilgi ve birikimine hayranlık duymanın yanı sıra hayat duruşunu örnek aldığım ve öğrencisi olmaktan her zaman gurur ve onur duyduğum, yüksek lisans ve tez çalışmamın her aşamasında tezimi tamamlayabilmem için değerli görüşlerini ve desteğini benden esirgemeyen, sorularımı içtenlikle ve sabırla cevaplayarak bana yol gösteren değerli danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Çağlar CONKER'e saygı ve teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca değerli tecrübeleri ile tezime katkıda bulunan ve desteğini esirgemeyen Sayın Dr. Öğr. Üyesi Hasan Hüseyin BİLGİÇ'e teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca beni manevi olarak destekleyen annem Hakime KAYA'ya, babam Sinan KAYA'ya ve ablam Zeynep KAYA AKYOL'a teşekkürlerimi sunarım. Her zaman manevi desteklerini hissettiren uzun zamandır arkadaş olduğumuz Kerem GÜNDÜZ ve Eren DURAN'a şükranlarımı sunarım.

Son ve özel olarak, çalışmamın her aşamasında yanımda olan, sabrı ve bana inancıyla her zaman motivasyonumu korumamı sağlayan, çoğu zorluğu sayesinde aştığım Arş. Gör. Berrin İŞLEK'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN ÇİZELGESİ	xi
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....	10
3. MATERYAL VE YÖNTEM	18
3.1. Materyal	18
3.1.1. Sarkaç tipi tepe vinç sistemi	18
3.1.2. Sarkaç tipi tepe vinç sisteminin matematik modeli	19
3.1.3. Sarkaç tipi tepe vinç sisteminin durum-uzay modeli.....	23
3.1.4. Sarkaç tipi tepe vinç sisteminin matlab/simulink diyagramları.....	23
3.2. Yöntem.....	25
3.2.1. Kontrol sistemleri	25
3.2.2. Lineer kuadratik regülatör (LQR).....	27
3.2.3. LQR kontrol yöntemi için çok amaçlı optimizasyon.....	29
3.2.4. Genetik algoritma (GA).....	30
3.2.5. Yapay arı kolonisi algoritması (ABC).....	31

	Sayfa
3.2.6. Titreşimli parçacıklar sistemi (VPS) algoritması	33
3.2.7. Büyük patlama-büyük çöküş (BB-BC) algoritması.....	35
3.2.8. Termal değişim optimizasyon (TEO) algoritması	37
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA.....	40
4.1. Optimizasyon Algoritmalarının Benzetim Verileri.....	40
4.2. Optimizasyon Algoritmalarının Deneysel Olarak Karşılaştırılması	54
5. SONUÇ VE ÖNERİLER	59
KAYNAKÇA.....	61
DİZİN.....	70

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 3.1. Quanser sarkaç tipi tepe vinç sistemine ait fiziksel parametreler.....	22
Çizelge 4.1. GA ve VPS algoritmaları için optimizasyon benzetim sonuçları.....	40
Çizelge 4.2. BB-BC algoritması için optimizasyon benzetim sonuçları	41
Çizelge 4.3. ABC algoritması için optimizasyon benzetim sonuçları	42
Çizelge 4.4. TEO algoritması için optimizasyon benzetim sonuçları.....	43
Çizelge 4.5. Meta sezgisel algoritmaları için optimizasyon sonuçları.....	44
Çizelge 4.6. Tüm PPS değerlerinde algoritmaların performans sıralaması.....	54
Çizelge 4.7. En iyi konfigürasyonların kontrol yanıtlarının karşılaştırılması.....	57
Çizelge 4.8. İstatistiksel performans değerlendirme kriterleri.....	58
Çizelge 4.9. En iyi konfigürasyonların performans kriterleri	58

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Sanayi devrimlerinin tarihsel süreci	1
Şekil 1.2. Sarkaç tipi tepe vinç sisteminde kullanılan temel kontrol teknikleri.....	3
Şekil 1.3. Meta sezgisel arama algoritmalarının sınıflandırılması.....	5
Şekil 3.1. a) Sarkaç tipi tepe vinç sistemi mekanik modeli b) şematik gösterimi	18
Şekil 3.2. Sarkaç tipi tepe vinç sistemi için Matlab/Simulink diyagramı	24
Şekil 3.3. Sarkaç tipi tepe vinç sistemi için DC motorun Matlab/Simulink diyagramı...	24
Şekil 3.4. Açık çevrim kontrol sistem blok diyagramı	26
Şekil 3.5. Kapalı çevrim kontrol tekniği blok diyagramı.....	26
Şekil 3.6. LQR denetleyici tasarım blok diyagramı.....	30
Şekil 3.7. Genetik algoritma (GA) akış şeması.....	31
Şekil 3.8. Yapay arı kolonisi (ABC) algoritması akış şeması.....	32
Şekil 3.9. Titreşimli parçacıklar sistemi (VPS) algoritması akış şeması	34
Şekil 3.10. Büyük patlama-büyük çöküş (BB-BC) algoritması akış şeması	36
Şekil 3.11. Termal değişim optimizasyon (TEO) algoritması akış şeması.....	38
Şekil 4.1. Algoritmaların yaklaşma eğrileri a)PPS=10, b)PPS=20, c)PPS= 30.....	45
Şekil 4.2. Algoritmaların yaklaşma eğrileri d)PPS=40, e)PPS=50 f)PPS=60	46
Şekil 4.3. Araba konumunun benzetim sonuçları a)PPS=10, b)PPS=20, c)PPS=30.....	49
Şekil 4.4. Araba konumunun benzetim sonuçları d)PPS =40, e)PPS=50, f)PPS=60	50
Şekil 4.5. Sarkaç açısı için benzetim sonuçları a)PPS=10, b)PPS=20,c)PPS=30	52
Şekil 4.6. Sarkaç açısı için benzetim sonuçları d)PPS=40, e)PPS=50, f)PPS=60.....	53
Şekil 4.7. En iyi konfigürasyonların deneysel olarak karşılaştırılması.....	55
Şekil 4.7. (Devam) En iyi konfigürasyonların deneysel olarak karşılaştırılması	56

RESİMLERİN ÇİZELGESİ

Resim	Sayfa
Resim 1.1. Vinç çeşitleri a) gantry crane b) rotary crane c) boom crane	2



SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

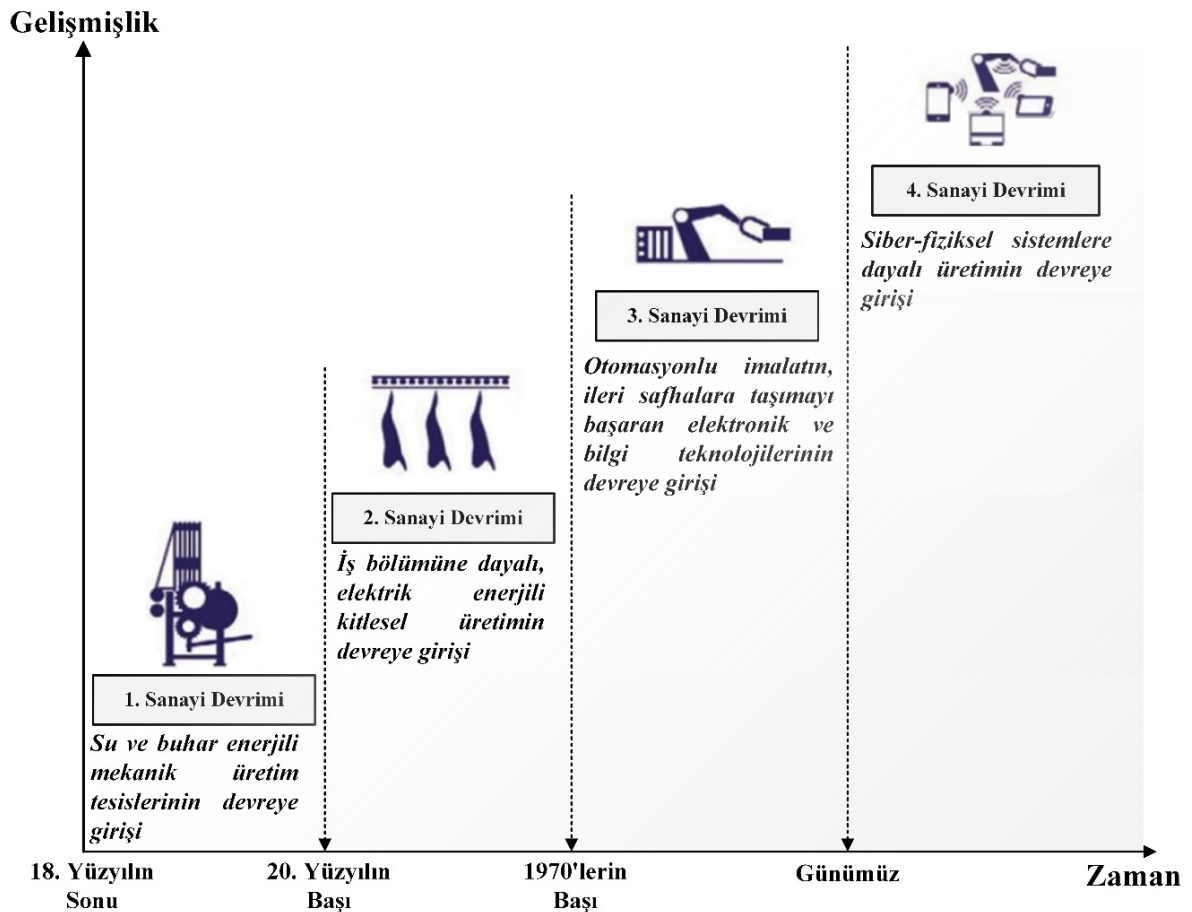
Simgeler	Açıklamalar
x_c	Araba pozisyonu
α	Sarkacın salınım açısını
g	Yer çekimi sabiti
M_p	Sarkacın kütlesi
l_p	Sarkacın ağırlık merkezinin mile olan uzaklığı
J_{eq}	Arabanın eşdeğer ataleti
J_p	Sarkacın atalet momentini
J_m	Rotor atalet momenti
η_g	Planet dişli kutusu verimliliği
η_m	Motor verimi
K_g	Planet dişli kutusu dişli oranı
K_m	Zıt emk sabiti
K_t	Motor tork sabiti
R_m	Motor armatür direnci
r_{mp}	Motor pinyon dişli radüsü
B_{eq}	Eşdeğer viskoz sönüm oranı
B_p	Viskoz sönümlenme katsayısını
F_c	Motor kuvveti
J_{sum}	Amaç fonksiyonu değeri
x	Durum vektörünü
u	Kontrol matrisini
t_r	Yükselme zamanı
t_s	Yerleşme zamanı
t_p	Tepe zamanı
s_p	Maksimum aşma
s_s	Kalıcı durum hatasını

Kısaltmalar**Açıklamalar**

ABC	Yapay Arı Kolonisi Algoritması
BB-BC	Büyük Patlama Büyük Çöküş Algoritması
GA	Genetik Algoritma
IIR	Sonsuz Darbe Tepkili Filtre
FIR	Sonlu Darbe Tepkili Filtre
J_{sum}	Amaç fonksiyonu değeri
LPF	Alçak Geçiren Filtre
LQG	Doğrusal Kuadratik Gauss
LQR	Linear Kuadratik Regülatör
MAE	Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error)
MPC	Model Öngörülü Kontrol
MSE	Ortalama Kare Hata (Mean Squared Error)
PD	Oransal-Türevsel Kontrol
PI	Oransal-İntegral Kontrol
PID	Oransal-İntegral-Türevsel Denetleyici
PPS	Popülasyon Ve Ya Parçacık Boyutu Değeri
RMSE	Kök Ortalama Kare Hata (Root Mean Square Error)
TEO	Termal Değişim Optimizasyon Algoritması
VPS	Titreşimli Parçacıklar Sistemi Algoritması

1. GİRİŞ

İnsanlık tarihinin önemli dönüm noktalarından birisi sanayi kavramının oluşması ve sanayi devrimlerinin gerçekleştirilmesi olarak görülmektedir. Birinci sanayi devrimi 18. Yüzyılın sonlarına gerçekleştirilmiştir. Dördüncü sanayi devrimi ise günümüzde gerçekleşmekte ve akıllı sistemlerin temelini oluşturmaktadır. Bu dört büyük sanayi devrimi temel olarak üretim faaliyetlerinin hızlı, kaliteli ve yüksek verimlilikte gerçekleştirilmesi için ortaya çıkmıştır [1]. Yaşadığımız çağın sanayi devrimi ise Endüstri 4.0 projesi olarak gösterilmektedir. Endüstri 4.0 ile geleneksel sanayi donanımlarının yüksek teknolojik alt yapı ile donatılarak üretim verimini artırılması hedeflenmektedir [2]. Sanayi devrimlerinin tarihsel süreci Şekil 1.1 ile gösterilmektedir [3].

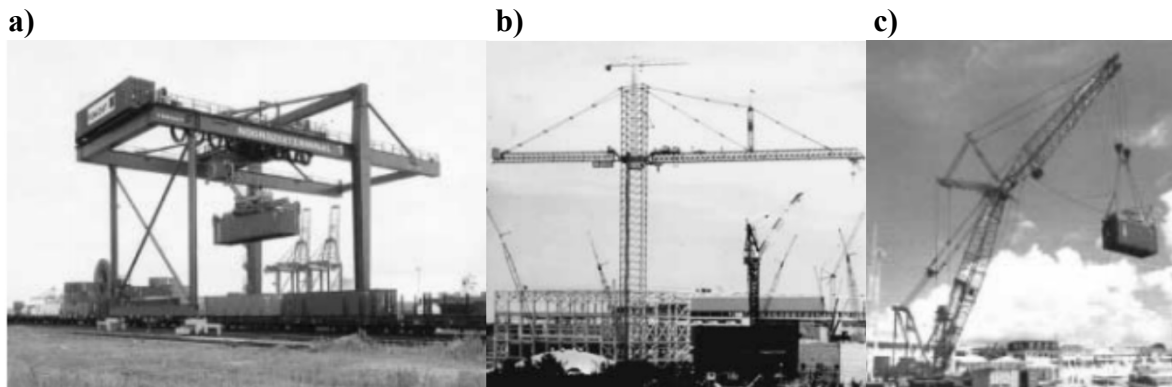


Şekil 1.1. Sanayi devrimlerinin tarihsel süreci

Endüstri 4.0 benimsenerek oluşturulan akıllı fabrikalarda; esneklik, kullanılabilirlik, güvenlik, öğrenme yeteneği ve yüksek performans kullanılan robotlar için temel

gerekliliklerdir [4]. Günümüz endüstri şartları için önemli olan, hızlı ve kaliteli üretim gereksinimleri beraberinde çözülmesi gereken bazı problemler getirmektedir. Bu problemlerin birisi artık titreşimlerdir. Esnek yapılı mekanik bir sisteme kuvvet uygulandığında, elde edilen hareket ile beraber artık titreşimler oluşmaktadır [5]. Daha hızlı hareket yeteneği sağlayabilmek için özellikle esnek ve hafif bileşenlerden oluşturulmuş mekanik sistemlerin kontrol edilmesi daha zordur. Artık titreşimler bu tür mekanik sistemlerin davranışlarının kontrol edilmesini oldukça zorlaştırır.

Bu tez kapsamında incelenen ve hareket kontrolü üzerine çalışılan sistem ise vinç sistemlerinden biri olan sarkaç tipi tepe vinç sistemleridir. Vinç sistemleri, imalat endüstrileri, inşaat sektörü, liman sanayisi gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Vinç sistemi, bir kaldırma mekanizması (kablo ve kanca) ve bir destek mekanizmasından (araba kirişi, vinç kolu ya da bir araç) oluşmaktadır. Vinç sisteminin destek mekanizması taşınmak istenilen yükü hareket ettirmek ve yoldaki engelleri aşabilmek için kullanılmaktadır. Taşınacak yük ise kablo ve kanca ile destek mekanizmasına asılmaktadır. Vinçler, destek mekanizmasının askı noktası için sunduğu serbestlik derecelerine göre üç temel sınıfa ayrılmaktadırlar. Bu vinç çeşitleri tepe vinç (gantry crane), döner vinç (rotary crane) ve bomlu vinç (boom crane) olarak isimlendirilmekte ve Resim 1.1 ile gösterilmektedir [6].

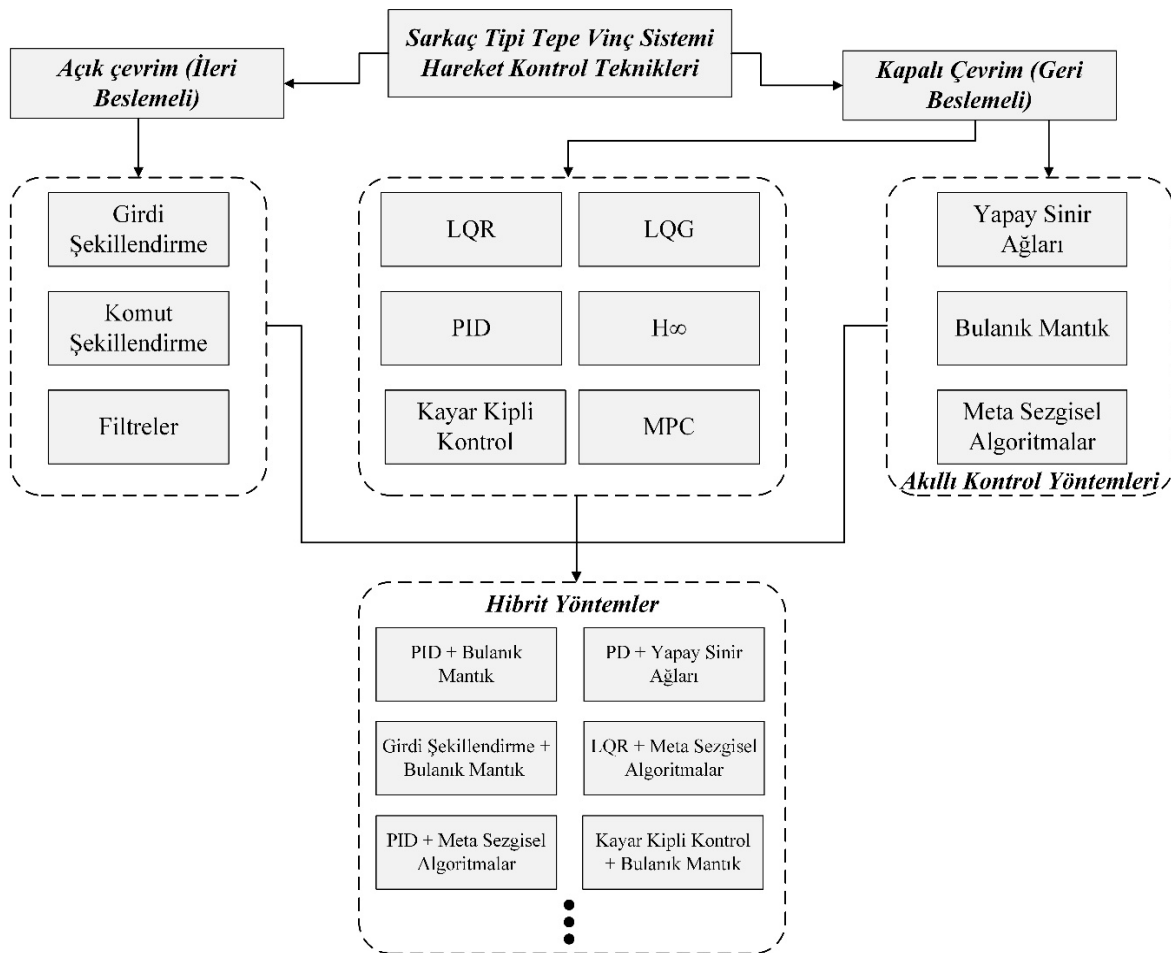


Resim 1.1. Vinç çeşitleri a) tepe vinç b) döner vinç c) bomlu vinç

Vinç sistemleri temel olarak bir yükün bir noktadan başka bir noktaya taşınması için kullanılmakta ve işlem operatörler tarafından gerçekleştirilmektedir. Günümüz endüstri şartlarında bu taşıma işleminin olabildiğince hızlı gerçekleştirilmesi istenilmektedir. Yüksek hız gereksinimi, vinçlerin mekanik yapıları ve operatörlerin yapılabileceği hatalardan dolayı taşıma işlemi sırasında artık titreşimler meydana gelmektedir. Artık titreşimler ise çeşitli

güvenlik problemlerine, zaman kaybına, taşınan yükün zarar görmesine sebep olarak sistemin verimini düşürmektedir [5,6]. İstenmeyen artık titreşimler araştırmacılar tarafından dikkat çeken konulardandır. Artık titreşimlerin giderilmesi ya da en aza indirilmesi için birçok kontrol tekniği üzerine çalışmalar devam etmektedir.

Vinç sistemlerinin hareket kontrolü; açık çevrim (ileri beslemeli) ve kapalı çevrim (geri beslemeli) olmak üzere iki temel grup ve bu yöntemlerin avantajlarının birleştirilmesi ile oluşturulan hibrit yöntemler olarak incelenmektedir [7]. Sarkaç gibi tepe vinç sistemi için kullanılan temel ve önemli kontrol teknikleri Şekil 1.2 ile gösterilmektedir.



Şekil 1.2. Sarkaç tipi tepe vinç sisteminde kullanılan temel kontrol teknikleri

Tez kapsamında ise kapalı çevrim kontrol tekniklerinden olan doğrusal kuadratik düzenleyici (LQR) kontrol tekniği kullanılmaktadır. Birçok endüstriyel alanda kullanılan, durum uzayı ile geri beslemeli bir kontrol yöntemidir. LQR kontrol, sistemi etkileyen bozucuların çok olduğu yapılarda yaygın kullanılmaktadır[8]. LQR kontrol tekniği, kontrol

performansını doğrudan etkileyen ağırlık matrislerinin (Q ve R) belirlenerek tasarlanan bir kontrol yöntemidir. Bu tasarım geleneksel olarak uzman tasarımcılar tarafından deneme yanılma yolu ile belirlenmektedir. Geleneksel tasarım, her zaman en iyi kontrol yanıtlarını veremeyeceği gibi zaman kaybına yol açabilir [8]. LQR denetleyicinin ağırlık matrislerini optimize ederek bu dezavantajlar ortadan kaldırılabılır. Yapılan tez çalışmasında LQR denetleyicinin ağırlık matrisleri optimizasyonu sunulmaktadır.

Optimizasyon, doğanın ve insan yaşamının ayrılmaz bir parçasıdır. İnsanoğlu verdiği herhangi bir kararda veya karşılaştığı bir problemde ideal ya da ideale en yakın sonuca ulaşmaya çalışır. Optimizasyon da genel olarak, bir sistemin performansı daha iyi noktaya getirmek ya da bir problemin çözümü için olabildiğince en iyi çözüm önerisine ulaşmak için kullanılmaktadır [9].

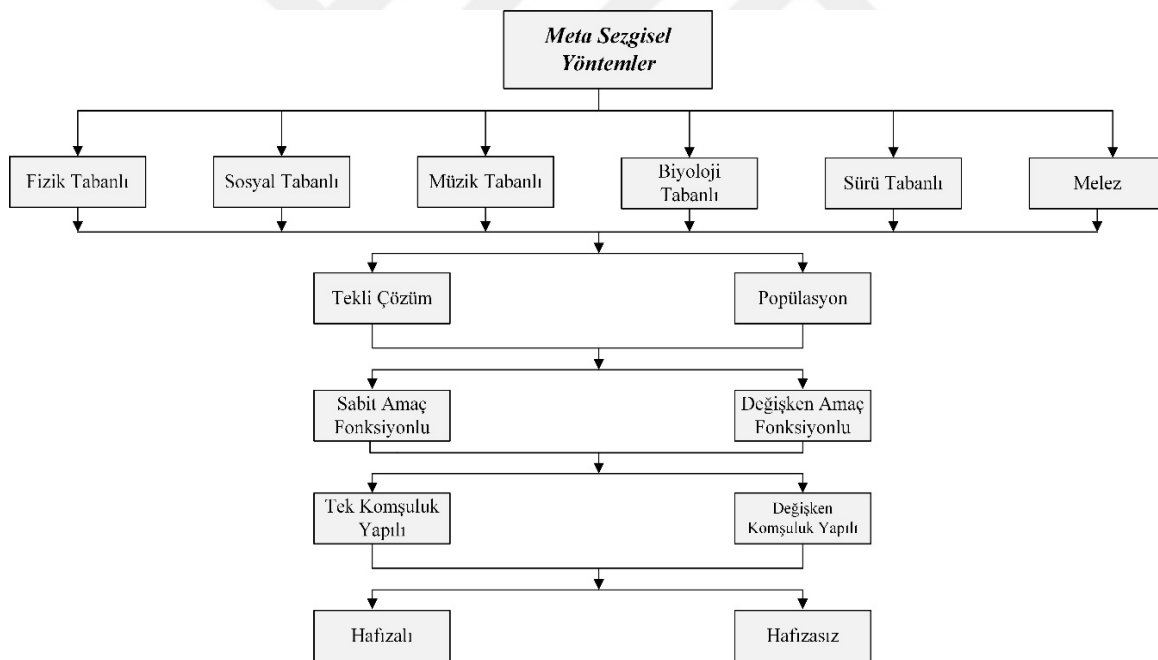
Optimizasyon, Beightler ve arkadaşları tarafından 1967 yılında üç aşamalı bir karar verme süreci olarak tanımlanmıştır. Birinci aşama, problem verilerine dayalı olarak problemin modellenmesi, ikinci aşama etkinlik ölçütlerinin veya amaç fonksiyonunun bulunması ve son aşama ise optimizasyon yöntemi veya optimizasyon teori olarak sınıflandırılmaktadır [10]. Bilgisayar teknolojisinin ortaya çıkması ve gelişmesiyle birlikte, karmaşık ve doğası gereği doğrusal olmayan problemlerin çözümü için optimizasyon teorisinde yeni gelişmeler ortaya çıkmıştır. 1940'ların ortalarında meta sezgisel optimizasyon algoritmaları geliştirilmeye başlanmış ve son yıllarda araştırmacılar tarafından büyük ilgi görmüştür [9].

Meta sezgisel terimi ilk kez Fred Glover tarafından “metaheuristic” olarak 1986 yılında ortaya atılmıştır. “Metaheuristic” kelimesi iki eski Yunanca kelimenin birleşimi ile oluşmaktadır. “Heuriskein” fiili bulmak anlamına ve “meta” ön eki ise ötesinde, üst seviye anlamına gelmektedir [11]. Türkçeye ise meta sezgisel olarak geçmiştir.

Sorensen ve arkadaşları (2017), meta sezgisel optimizasyon algoritmalarını beş farklı döneme ayırarak incelemişlerdir. Birinci dönem 1940 yılına kadar olan teori öncesi dönemdir. Bu dönemde çalışmalarda yer aldığı fakat resmi olarak tanıtılmadığı zaman dilimidir. İkinci dönem 1940 ve 1980 yılları arasında gerçekleşen erken dönemdir. Bu dönem ile sezgisel yöntemler ile ilk çalışmalar yapılmaya başlamıştır. Üçüncü dönem 1980 ve 2000 yılları arasında gerçekleşmiş ve metot merkezli dönem olarak adlandırılmaktadır. Bu dönem, Meta sezgisel optimizasyon algoritmalarının yükselişe geçerek birçok farklı

algoritmanın önerildiği dönemdir. Dördüncü dönem ise yapı merkezli dönem olarak isimlendirilmekte ve 2000 yılından günümüze kadar olan dönemi kapsamaktadır. Bu dönem ile meta sezgisel algoritmalar yöntem olarak değil, yapı olarak daha faydalı olduğunun düşünüldüğü dönemdir. Beşinci ve son dönem ise bilimsel dönem olarak tanımlanmaktadır. Algoritmaların tasarlanmasının bir sanattan çıkarak bilime dönüştüğü gelecek bir döneme işaret etmektedir [12].

Meta sezgisel algoritmaların tanımlanması ve sınıflandırılması üzerine farklı yollar mevcuttur. Algoritmalar esinlenen kaynağa (doğal veya yapay), başlangıç türüne (popülasyon veya tek çözüm), amaç fonksiyonunun özelliğine (dinamik, statik), komşuluk yapısına (tekli, çoklu) ve çözümleri hafızaya alıp almaması gibi parametrelere dikkat edilerek gruplara ayrılmıştır [13,14]. Meta sezgisel algoritmaların sınıflandırılması Şekil 1.3 ile gösterilmektedir.



Şekil 1.3. Meta sezgisel arama algoritmalarının sınıflandırılması

Son yıllarda bilgisayarların performansındaki gerçekleşen gelişmeler ile günlük yaşamda karşılaşılan çeşitli disiplinlerdeki problemlerin modelleme, analiz etme ve tasarlanmasına olanak sağlamaktadır. Neredeyse karşılaşılan tüm problemler, karmaşık optimizasyon problemleri olarak düşünülebilir. Meta sezgisel algoritmalar mühendislik, endüstri, işletme, ekonomi gibi çeşitli birçok disiplinde karmaşık ve büyük problemlerin çözümü için sıklıkla

tercih edilmektedir. Meta sezgisel optimizasyon algoritmaları, doğada bulunan canlıların yaşamsal faaliyetlerinin devam ettirirken içgüdüsel olarak yaptıkları davranışlardan esinlenilerek ortaya konulmaktadır. Canlıların besin bulma, barınma, korunma ve göç etme gibi birçok davranışları modellenerek oluşturulmaktadır [15]. Genel olarak meta sezgisel optimizasyon algoritmaları, rastgele belirlenen bir noktadan başlayarak ve arama alanını en etkin şekilde incelemek için birçok iterasyon yaparak en iyi ya da en iyiye yakın çözüm önerisini elde etmeye çalışmaktadırlar [16]. Algoritma tarafından önerilen çözümün doğrulanabilir olması ve diğer yöntemlere göre daha hızlı çözüm önerisinde bulunması araştırmacılar tarafından tercih edilme sebepleri olarak görülmektedir [15].

Tezin amaç ve kapsamı

Vinç sistemlerinin hareket kontrolü araştırmacılar tarafından incelenen önemli konulardandır. Hareket kontrolü için açık çevrim, kapalı çevrim ve bu yöntemlerin avantajlarını birleştirerek oluşturulan hibrit birçok yöntem üzerine çalışılmaktadır. Bu tez kapsamında ise kapalı çevrim kontrol yöntemlerinden birisi olan LQR kontrol tekniği kullanılarak Quanser firmasının ürettiği sarkaç tipi tepe vinç sisteminin hareket kontrolü yapılmaktadır. LQR kontrol tekniği, uzman bir tasarımcı tarafından kontrolcünün ağırlık matrislerinin belirlenmesi ile yapılan esnek sistemlerin hareket kontrolü için yaygın kullanılan bir kontrol tekniğidir. Bu matrislerin belirlenmesi aşamasında uzman tasarımcının başarısı denetleyicinin performansını doğrudan etkilemektedir. Denetleyicinin bu dezavantajının giderilmesi ve insan etkisinin en aza indirilmesi hedeflenerek LQR denetleyicinin ağırlık matrisleri meta sezgisel optimizasyon algoritmalarıyla belirlenmesine yönelik çalışmalar sürdürülmeye devam edilmektedir. Bu tez kapsamında sarkaç tipi tepe vinç sistemi matematiksel olarak modellenmiş ve sistemin hareket kontrolü için LQR kontrol tekniği kullanılmaktadır. LQR kontrol tekniğinin ağırlık matrisleri Genetik Algoritma (GA), Yapay Arı Kolonisi (ABC), titreşimli parçacık sistemi (VPS), büyük patlama-büyük çöküş (BB-BC) ve termal değişim optimizasyon (TEO) algoritmaları ile optimize edilmiştir. Her algoritmanın başlangıç parametrelerini belirlemek için detaylı benzetim çalışmaları yapılmıştır. ABC, BB-BC ve TEO algoritması için iki farklı başlangıç parametresine incelenirken GA ve VPS algoritması için ise bir başlangıç parametresi için incelenmiştir. Algoritmalar altı farklı popülasyon veya parçacık boyutu değeri (10-60) ve 100 iterasyon sayısında incelenmiştir. Algoritmalar hem birbirleriyle hem de optimize edilmemiş ve

geleneksel olarak tasarlanmış LQR denetleyici ile karşılaştırılmaktadır. Elde edilen bulgular çeşitli değerlendirme kriterleri kullanılarak kapsamlı olarak tartışılmıştır.

Tezin katkısı

Tez kapsamında yapılan kontrol çalışmasında LQR kontrol tekniğinin ağırlık matrisleri meta sezgisel algoritmalar ile optimize edilmektedir. Optimizasyon için beş farklı meta sezgisel arama algoritmasından yararlanılmaktadır. Optimize edilmemiş LQR denetleyici ve optimizasyon sonrası elde edilen benzetim ve deneysel sonuçlar grafik ve çizelgelerle açıklanarak detaylı olarak kıyaslanmaktadır. Yapılan tez çalışmasının literatüre katkıları maddelerle sunulmaktadır.

- ❖ Vinç sistemlerinin hareket kontrolünde kullanılan yöntemler, doğrusal kuadratik düzenleyici ve meta sezgisel arama algoritmalar ile ilgili detaylı olarak literatür taraması yapılmıştır.
- ❖ Tez kapsamında kullanılan; vinç sisteminin hareket ve durum-uzay modeli, LQR kontrol tekniği ve kullanılan meta sezgisel optimizasyon algoritmalarının teknik detayları sunulmuştur.
- ❖ Sarkaç tipi tepe vinç sistemi için yeni bir çoklu amaç fonksiyonu tasarımı yapılmıştır.
- ❖ Kullanılan meta sezgisel optimizasyon algoritmaların başlangıç parametrelerinin seçimi için algoritmalar altı farklı (10, 20, 30, 40, 50 ve 60) popülasyon ve ya parçacık boyutu değerlerinde (PPS) ve 100 iterasyon değerinde ayrı ayrı benzetim çalışmaları yapılmıştır. ABC, BB-BC ve TEO algoritmaların başlangıç parametreleri iki farklı değişkene göre incelenmiştir.
- ❖ VPS, BB-BC ve TEO algoritmaları sarkaç tipi vinç sisteminin LQR denetleyici ile hareket kontrolü için ilk defa kullanılmıştır.
- ❖ Geleneksel olarak tasarlanan LQR denetleyici ile meta sezgisel arama algoritmaları kullanılarak optimize edilmiş LQR denetleyiciler benzetim ve deneysel olarak çeşitli performans değerlendirme kriteri kullanılarak karşılaştırılmıştır.
- ❖ Vinç sisteminin hareket kontrolü başarıyla gerçekleştirilmiş ve optimizasyon öncesi sonuçlarına göre, arabanın kararlı durum hatası ortadan kaldırılmış ve oturma süresinde %52,46 iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca sarkaç açısının oturma süresinde %73,81'e varan iyileştirme sağlanmıştır.

Tezin birinci bölümü

Tezin giriş bölümü, günümüz endüstri şartları değerlendirilerek esnek sistemlerin hareket kontrolünün önemi anlatılmaktadır. Tez kapsamında kullanılan sistem, hareket kontrolü ve kullanılan kontrol tekniği, optimizasyon ve meta sezgisel optimizasyon algoritmaları üzerine açıklamalar yapılmaktadır. Daha sonra tez çalışmasının amaç ve kapsamı anlatılarak tezin literatüre katkıları listelenmektedir. Bölümün sonunda tezin yapısı ve bölümleri hakkında bilgi verilmiştir.

Tezin ikinci bölümü

Sarkaç tipi tepe vinç sisteminin hareket kontrolünde uygulanan kontrol teknikleri üzerine yapılan önemli çalışmalar sunulmaktadır. Kullanılan kontrol tekniklerinin avantajları ve dezavantajları verilmektedir. Tez kapsamında kullanılan LQR kontrol tekniği ve meta sezgisel optimizasyon algoritmalarının kullanıldığı birçok çalışmanın detayları sunulmaktadır.

Tezin üçüncü bölümü

Tez kapsamında kullanılan sarkaç tipi tepe vinç sisteminin matematik modeli, durum uzay modeli ve Matlab/Simulink diyagram detayları sunulmaktadır. Temel kontrol teknikleri olan açık ve kapalı çevrim kontrol teknikleri hakkında bilgi verilerek tez çalışmasında kullanılan LQR kontrol tekniğinin teorik yapısı açıklanmaktadır. Yapılacak optimizasyonun performansını gösterebilmek için geleneksel olarak bir LQR denetleyici tasarlanmıştır. Daha sonra optimizasyon çalışması için kontrol parametreleri göz önüne alınarak çok amaçlı yeni bir amaç fonksiyonu tasarlanmıştır. Bölümün sonunda ise optimizasyon için kullanılan meta sezgisel GA, ABC, VPS, BB-BC ve TEO algoritmalarının teknik ayrıntılar sunulmaktadır.

Tezin dördüncü bölümü

Kullanılan meta sezgisel GA, ABC, VPS, BB-BC ve TEO algoritmalarının başlangıç parametrelerinin nasıl seçildiği ve seçilirken yapılan benzetim çalışmaları çizelgeler ile gösterilmektedir. Meta sezgisel algoritmaların altı farklı popülasyon ve ya parçacık boyutu değerinde 100 iterasyon sayısında elde edilen benzetim sonuçları ve optimize edilmemiş

LQR denetleyicinin kontrol yanıtları (yaklaşma eğrileri, araba pozisyonları ve sarkaç açıları) zamana bağlı olarak karşılaştırıldığı grafikler sunulmuştur. Daha sonra en iyi benzetim sonuçları deneysel olarak doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar kontrol yanıt parametreleri (yükselme zamanı, oturma zamanı vb.) ve önemli istatistiksel performans değerlendirme (MAE, MSE, RMSE ve maksimum hata) kriterlerine bakılarak yapılan değerlendirmeler tartışılmıştır.

Tezin beşinci bölümü

Tez kapsamında incelenen ve tartışılan kontrol problemin çözümü ile ilgili öneriler sunulmaktadır. Tez kapsamında elde edilen benzetim ve deneysel çalışmalar ile ulaşılan sonuçlar açıklanarak maddeler şeklinde sunulmaktadır.

2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Sarkaç tipi tepe vinçler, geniş endüstriyel kullanım alanları bulunan önemli taşıma sistemleridir. Bu vinç sistemin eksik eyleyici yapısı ve taşıma hareketi sırasında oluşturduğu artık titreşimlerin giderilmesi için araştırmacılar tarafından birçok kontrol tekniği geliştirilmiş ve uygulanmıştır. Daha iyi kontrol performansı sağlamak için çalışmalar devam etmektedir. Vinç sistemlerinin hareket kontrolü çalışmaları temel iki grup altında incelenmektedir.

Açık çevrim kontrol tekniği çalışmaları

Açık çevrim kontrol yöntemleri oluşan artık titreşimlerin kontrolü için yaygın olarak kullanılan kontrol tekniklerini içermektedir. Kontrol edilecek sistemin çalışma koşullarının önceden iyi bilindiği kararlı yapıya sahip sistemlerde sıklıkla tercih edilmektedir. Herhangi bir sensör elemanı içermedikleri için düşük maliyetli kontrol teknikleridir. Ucuz çözümlerin arandığı sistemlerde kullanılabilirler. Açık çevrim kontrol yöntemlerinin uygulaması kolaydır. Fakat bu yöntemlerin en büyük dezavantajı bozucu etkilere karşı duyarlı olmalarıdır [7,17]. Girdi şekillendirme ve komut şekillendirme, önemli açık çevrim kontrol tekniklerindedir. Girdi şekillendirme birçok araştırmacı tarafından, vinç sistemleri gibi esnek yapılarda oluşan artık titreşimlerin yok edilmesi ya da en aza indirilmesi için yaygın kullanılan etkili bir tekniktir [17]. Girdi şekillendirme tekniği kullanılırken, bozucu etkiler ve sistemin çalışma koşulları iyi bilinmesini gerektirmektedir. Araştırmacılar tarafından yapılan önemli çalışmalar verilen [5,17-21] referanslar ile sunulmaktadır. Komut şekillendirme ise uygulamasının kolaylığı ve sistemin çalışma durumundaki belirsizliklere karşı duyarlı bir kontrol tekniğidir. Vinç sistemleri, robot manipülatörler, uzay araçları gibi birçok sistemin hareket kontrolünde araştırmacılar tarafından tercih edilmektedir. Literatürde vinç sistemleri için kullanılan bazı çalışmalar referansta sunulmaktadır [22-24].

Filtreleme teknikleri, belirlenmiş frekans aralıklarında elektriksel sinyalleri herhangi bir değişikliğe uğratmadan geçiren fakat belirlenmiş frekans aralığında olmayan bozucu sinyallerin filtrelenmesi sonucu yapılan bir kontrol teknikleridir. Sarkaç tipi tepe vinç sistemlerinin hareket kontrolü sonsuz darbe tepkili filtre (IIR-Infinite Impulse Response) [25], sonlu darbe tepkili filtre (FIR-Finite Impulse Response) [26] ve alçak geçiren filtre

(LPF-Low Pass Filter) [27] gibi çeşitli filtreler kullanılarak yapıldığı çalışmalar da mevcuttur.

Kapalı çevrim kontrol tekniği çalışmaları

Vinç sistemlerinin hareket kontrolünde kullanılan bir başka kontrol yöntemi ise kapalı çevrim kontrol teknikleridir. Sistemlerin istenilen kontrol yanıtını alabilmesi için belirli aralıklar ile geri besleme yaparak herhangi bir sebepten oluşacak hataların giderilmesi amaçlanmaktadır. Açık çevrim kontrol yöntemlerine göre bozuculardan etkilenme oranı daha düşüktür. Bu avantajından dolayı vinç sistemlerinin hareket kontrolü gibi hassas ve yüksek kontrol performansı gerektiren yapılarda oldukça fazla kullanılmaktadır. Tasarımı ve kullanımı açık çevrim kontrol teknikleri kadar basit değildir. Arabanın pozisyonu ve sarkaç salınımları algılayıcılar tarafından ölçülmektedir. Sisteme eklenen algılayıcı elemanlar sistemin maliyetini arttırmaktadır. Buna ek olarak durum geri besleme sistemin kontrol edilme hızını düşürmektedir [7]. Fakat denetleyicilerin tasarımı iyi ve özenli yapılarak bu olumsuzluk iyileştirilebilmektedir. Literatürde vinç sistemlerinin hareket kontrolü için geliştirilmiş birçok kapalı çevrim kontrol tekniği bulunmaktadır.

Tasarımının ve kullanımının kolaylığı sayesinde hareket kontrolü çalışmalarında araştırmacılar tarafından yaygın olarak kullanılan kapalı kontrol tekniklerinden birisi PID kontrol tekniğidir. PID kontrol tekniği, temel olarak durum geri besleme ile elde edilen hatanın geçmişine, şu anına ve geleceğine bakarak sistemin kontrol hedefine uygun kontrol yanıtları üretmektedir. Oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) parametrelerinin birleştirilmesi ile oluşturulmaktadır. Bu parametreler durum geri besleme ile elde edilen hatayı düzelterek sistemin kontrol hedefine ulaşması için kullanılmaktadır. Bu parametreler kontrol edilecek sistem üzerinde farklı etkiler göstermektedir. P parametresi hatanın genliğine bakarak hatanın o an ki durumunu değerlendirmektedir. Yükselme zamanını ve kararlı durum hatasını düşürme etkisine sahiptir fakat sistemin maksimum aşmasını arttırmaktadır. I parametresi hatanın alanına ve geçmişine bakarak kontrol sinyali üretmektedir. Sistemin yükselme zamanını düşürürken kalıcı durum hatasını ortadan kaldırmaktadır. Sistemin maksimum aşmasını düşürücü etki gösterir fakat sistemin oturma zamanını olumsuz etkilemektedir. D parametresi ise hatanın eğimine bakarak bir kontrol sinyali üretmektedir. Hatanın geleceğini referans alarak sistemin performansını iyileştirmek için kullanılmaktadır. Sistemin kararlılığını artırırken maksimum aşmayı azaltmaktadır.

[28,29]. Bu üç kontrol parametresi farklı yöntemler ile ayarlanabilmektedir. Vinç sistemlerinde ve endüstride birçok kullanımı olan bu kontrol tekniği ile yapılan çalışmaların bazıları [30-32] sunulmaktadır. Ayrıca kontrol hedefine göre PID bileşenlerinin birinin ve ya ikisinin kullanıldığı P, I, PD ve PI gibi kontrol teknikleri ile yapılan çalışmalar [33-37] bulunmaktadır.

Kayan kipli kontrol tekniği (Sliding Mode Control), vinç sistemleri gibi bozucu etkisinde çalışan, doğrusal olmayan ve sistemin çalışma koşullarının bilinmediği durumlarda kullanılan kapalı çevrim kontrol tekniklerinden birisidir. Kayan kipli kontrol tekniği, kontrolü için kullanılan sistemin kaçınıcı dereceden olduğuna bakmadan sistemi birinci dereceye indirerek sistemi kontrol etmektedir. Yapısı sayesinde sistemin dinamik davranışlarını değiştirebilmesi ve kontrol sisteminin maruz kaldığı bozuculara karşı başarılı kontrol performansı göstermektedir. Bu avantajlarından dolayı araştırmacılar tarafından sıklıkla kullanılmakta ve kararlı kontrol sonuçlar elde edilmektedir [38]. Kayan kipli kontrol tekniği ile sarkaç sisteminin hareket kontrolünün yapıldığı başlıca çalışmalar [39-42] numaralı referanslar ile sunulmaktadır.

Vinç sistemleri gibi karmaşık sistemlerin hareket kontrolüne akıllı çözümler üretmek için yapay zeka teknikleri de kullanılmaktadır. Bulanık mantık, sinir ağları gibi yapay zeka tabanlı kontrol yöntemleri araştırmacılar tarafından dikkat çekmektedir [43]. Akıllı kontrol teknikleri karmaşık sistemlerin kontrolünde kullanılması büyük bir avantaj sağlamaktadır. Bu akıllı sistemlerden biri olan sinir ağları yöntemidir. İnsan beyninin ve sinir sisteminin çalışma şeklini model alan ve insan öğretme sürecinden esinlenilerek ortaya atılmaktadır [44]. Yapısı gereği birçok kontrol probleminin çözümü için kullanılabilir. Sistemin çalışma koşullarını ve sistemin dinamik yapısını öğrenebilmesi, bu öğrenme sürecinin sürekli devam etmesi ile yüksek kontrol başarısı sağlayabilmektedir. Fakat başarılı kontrol sağlamak için kontrol problemine uygun eğitim verisi gerekmektedir. Vinç sistemlerine yönelik literatürde bulunan kontrol çalışmalarının bazıları [44-47] ile sunulmaktadır.

1965 yılında Lotfi A. Zadeh tarafından bulanık mantık ve bulanık küme teorisi ortaya atılmıştır [48]. Bu teori ile belirsizlik içeren sistemlerin incelenmesi üzerine yapılan çalışmalar başka bir boyut getirmiştir [49]. Klasik Aristo mantığında durumlar kesindir ve 0 ile 1 olarak gösterilmiştir. Fakat gerçek hayatta birçok probleminin çözümü sadece bu iki durum ile çözülmez birden fazla belirsiz durum oluşmaktadır. Bu noktada Aristo mantığı

yetersiz kalmaktadır [50]. Bulanık mantık, matematik modellenmesinin zor olduğu, karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünde yaygın olarak kullanılmaktadır. Ayrıca kontrol edilen sistemin çalışma koşullarının net olarak bilinmediği ya da koşulların değişkenlik gösterdiği durumlarda başarılı kontrol sonuçları sağlamaktadır [51]. Bulanık mantık ile yapılan vinç sistemlerinin hareket kontrol çalışmaları [51-55] sunulmaktadır.

Vinç sistemlerinin hareket kontrolü birçok farklı kapalı çevrim kontrol tekniği kullanılarak yapılmaktadır. Literatürde bulunan diğer kontrol teknikleri ile yapılan çalışmalar; H_∞ [56-58], model öngörülü kontrol (MPC) [59,60], doğrusal kuadratik gauss (LQG) [61], uyarlamalı kontrol (adaptive control) [62,63] olarak sunulmaktadır.

Vinç sistemleri için geliştirilen açık ve kapalı çevrim tüm kontrol tekniklerinin avantajları ve dezavantajları vardır. Kullanılan bu kontrol tekniklerinin dezavantajlarının giderilerek daha hassas kontrol sonuçları elde etmek için; açık çevrim, kapalı çevrim ve akıllı kontrol tekniklerinin en az iki tanesinin birleştirilmesi ile birçok hibrit kontrol teknikleri geliştirilmiştir. Bulanık mantık ile PID kontrolün [64,65], kayan kipli kontrol ile bulanık mantığın [66], sinir ağları ile bulanık mantığın [67], uyarlamalı sinir ağları ile kayan kipli kontrolü [68], girdi şekillendirici ile bulanık mantığın [69], girdi şekillendirici ile PID kontrolün [70,71], sinir ağları ile PID kontrolün [72,73], girdi şekillendirici ve PD tipi bulanık mantığın [74,75], bulanık mantık ile LQR kontrol tekniğinin [76], PID kontrol ile genetik algoritmanın [77], PID kontrol ile parçacık sürü optimizasyonunun [78,79] beraber kullanılarak yapıldığı önemli çalışmalar sunulmaktadır.

Tez kapsamında ve vinç sistemlerinin hareket kontrolünde kullanılan başka bir kapalı çevrim kontrol tekniği ise doğrusal kuadratik düzenleyici (LQR) tekniğidir. Bu teknik, kontrol durum (Q) ve kontrol ağırlık (R) matrislerinin belirlenmesi ile tasarlanmaktadır. LQR kontrol tekniğinin birçok kullanım alanı bulunmaktadır. Literatürde; roket sistemlerinde [80], araba süspansiyon sistemlerinde [81], ABS fren sistemlerinde [82], esnek sistemlerde [83-87] yapılan çalışmaların bir kısmı sunulmaktadır. Yaygın olarak LQR denetleyicinin ağırlık matrisleri tasarımcı tarafından deneme yanılma yöntemi ile belirlenmektedir. Tasarımcının deneyimi ve yeterliliği kontrolün performansını doğrudan etkilemektedir. Bu matrislerinin geleneksel yöntem ile belirlenmesi başarılı kontrol yanıtlarına ulaşılacağı garanti etmemektedir. Ayrıca zaman kaybına neden olmaktadır. LQR denetleyicinin ağırlık matrislerinin belirlenmesi üzerindeki tasarımcı etkisinin oluşturabileceği olumsuz durum,

denetleyicinin en büyük dezavantajı olarak görülmektedir. Araştırmacılar farklı yöntemler ile tasarımcı etkisini ortadan kaldırılmaya çalışmaktadır. Literatürdeki LQR denetleyicinin ağırlık matrislerinin geleneksel olarak belirlenmediği, LQR denetleyici ile meta sezgisel optimizasyon algoritmalarının çeşitli sistemler ve vinç sistemleri ile beraber kullanıldığı ve meta sezgisel optimizasyon algoritmalarının vinç sistemlerinin hareket kontrolünde başka kontrol teknikleriyle kullanıldığı bazı önemli çalışmaların detayları sunulmaktadır.

Kimiaghalam ve arkadaşları (1999), vinç kontrolünün zorluklarından yola çıkılarak ve genetik algoritma kullanılarak hareket kontrolü yapılmıştır. Kontrol problemini çözmek için gerekli koşullar, başlangıç durum vektörünün bulunmasını gerektirir. Çalışma ile sistemin maliyet değerlerinin istenen başlangıç değerini herhangi bir kısıtlama olmaksızın bulmak için genetik algoritma kullanılmıştır. Yapılan çalışma, Genetik algoritmanın zor ve doğrusal olmayan kontrol problemlerini çözmek için kullanılabileceğini ve sınırlı bir alanda arama yapması gerekmediğini göstermiştir [88].

Solihin ve arkadaşları (2010), esnek robot kol sistemi için LQR denetleyicinin ağırlık matrislerinin tasarımcı tarafından belirlenme sorununu çözebilmek için parçacık sürü optimizasyon algoritması ile ağırlık matrislerini belirleyerek akıllı bir yöntem önermişlerdir. Esnek sistemler, yapıları ve çalışma koşullarından dolayı kontrol edilmesi zor sistemlerdir. Kontrol hedefi sistemin uç titreşimlerinin yok edilmesi olarak belirlenmiştir. Önerilen tekniğin etkinliğini değerlendirmek için deneysel çalışmalar sunulmuştur [89].

Yang ve Xiong (2010), sarkaç tipi tepe vinç sistemi için pratik üretim gereksinimlerini karşılamak için çalışmışlardır. Q ağırlık matrisini, LQ ters problemlerine parametrik bir formülün çözüm yöntemini kullanarak elde edilmektedir. Araştırma sonucu, vinç sisteminin hareket kontrolü sağlanarak otomasyon ve insansız kontrol yönelimine doğru gelişim desteklenmiştir [90].

Adeli ve arkadaşları (2011), çift sarkaçlı bir vinç sistemi için hem konum hem de titreşim kontrolünü içeren hibrit bir yöntem önermektedir. Hareket kontrolünü gerçekleştirmek için Takagi-Sugeno bulanık modellemesi kullanılmış ve genetik algoritma ile bir bulanık kural seti seçilmiştir. Ardından, sistemi kontrol etmek için paralel dağıtılmış bir bulanık LQR denetleyicisi tasarlanmıştır. Önerilen kontrol tekniği ile istenilen araba pozisyonu ve salınım

açısı değerlerine ulaşılmıştır. Benzetim sonuçları ile tasarlanan kararlı kontrol tekniğinin etkinliğini gösterilmektedir [91].

He ve arkadaşları (2011), sarkaç tipi tepe vinç sistemi için atalet kuvveti ve dış yüklerin sebep olduğu salınımları gidermek üzerine LQR denetleyici geliştirmişlerdir. Kontrol hedefi arabanın hareketi tamamlandıktan sonra sarkaç salınımlarının hızlı biçimde yok edilmesidir. Bu hedefe uygun olarak ağırlık matrisleri tasarlanarak artık titreşimler ortadan kaldırılmaktadır [92].

Jaafar ve arkadaşları (2012), doğrusal olmayan bir vinç sisteminin konum ve salınım kontrolü için PID ve PD kontrol tekniklerinin bir kombinasyonu kullanılmaktadır. Kontrolcü parametrelerini ayarlayabilmek için uygunluk yaklaşımına dayalı geliştirilmiş bir parçacık sürü optimizasyon algoritması önerilmiştir. Tasarlanan kontrolcünün performansı doğrulamak için benzetim çalışmaları ile doğrulanarak sistemin tepkileri incelenmiştir. Yapılan çalışma ile arabayı mümkün olduğunca hızlı bir şekilde istenilen konuma getirilerek oluşacak titreşimlerin yok edilmesi üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir [93].

Mu ve arkadaşları (2014), sarkaç tipi tepe vinç sisteminin hareket kontrolü için bulanık mantık ve LQR denetleyicinin birleştirilmesi ile sağlanmıştır. Vinç sisteminin daha hızlı ve daha hassas hareket kontrolü hedefi ile LQR denetleyicinin ağırlık matrisleri bulanık mantık ile belirlenmektedir. Benzetim çalışması sonucu, artık titreşimlerin % 30'dan fazla azaltılmıştır. Arabanın pozisyonunda ise oluşan aşma giderilmiştir [94].

Wang ve arkadaşları (2014), Dairesel raylı çift ters sarkaç sistemi için LQR denetleyicinin optimizasyonu için geliştirilmiş yapay arı kolonisi algoritması uygulanmış ve önerilen optimizasyon probleminin üzerindeki etkisini benzetim çalışmaları ile gösterilmektedir. Yapay arı kolonisi denetleyicinin optimum performansını elde etmek ve sistemin verimini arttırmak için kullanılmıştır. Ayrıca geleneksel yapay arı kolonisi algoritmasının yakınsama hızını ve popülasyon çeşitliliğini arttırmak için yaratıcı bir şekilde geliştirilmiş çözüm arama yaklaşımı önerilmiştir. Ters sarkaç sistemi için yeni önerilen geliştirilmiş ABC algoritması geleneksel ABC algoritmasına göre daha iyi performans göstermiş ve benzetim sonuçları sunulmuştur [95].

Bilgiç ve arkadaşları (2016), doğrusal ters bir sarkaç için arı algoritması (BA) ile LQR denetleyicinin ağırlık matrislerini optimize etmek üzerine çalışmışlardır. Çalışma, arabanın konumu istenilen konuma gelirken sarkaç dik konumda ve sarkaç salınımlarının minimum olması hedeflenmektedir. Optimizasyon için bal arılarının yiyecek arama davranışından esinlenen ortaya atılan arı algoritması (BA) kullanılmıştır. Kontrol başarısını göstermek için benzetim ve deneysel sonuçlar grafiksel olarak sunulmuştur [96].

Razmjooy ve arkadaşları (2016), tek bağlantılı esnek eklemli bir robot sistemi üzerinde titreşim kontrolü yapmışlardır. Sistemin kontrolü için LQR kontrol tekniği tercih edilmiştir. Kontrolcünün ağırlık matrisleri bu sistem için ilk defa gri kurt optimizasyon algoritması kullanılarak belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar ise parçacık sürü optimizasyon algoritması ile optimize edilmiş LQR denetleyici ile karşılaştırılarak üstünlükleri sunulmuştur [97].

Ata ve Çoban (2017), doğrusal olmayan ters sarkaç sisteminin araba konunu ve sarkaç salınımını kontrol etmek için LQR denetleyicinin ağırlık matrisleri ABC algoritmasını kullanarak optimize edilmiş ve belirlenmiştir. Kontrol hedefi oturma zamanını, kalıcı durum hatasını ve çıkış sinyalinin yüzdesini en aza düşürmektir [98]. Tasarlanan kontrol ile literatürde, Ghosh ve arkadaşlarının 2012 yılında [99], kutup yerleştirme tekniği ile tasarladıkları LQR denetleyicinin sonuçları ile kıyaslanmaktadır. Çalışma sonucunda sistemin kontrol performansının artırıldığı kanıtlanmıştır. Ayrıca deneysel sonuçlar ile önerilen yöntemin gerçek hayattaki sistemlerde verimli bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir [98].

Edwar Yazid (2017), bir vinç sistemi için taşınan yükün konum kontrolü ve salınımın azaltılması için yapay arı kolonisi algoritması ile PD kontrol tekniğini optimize etmiştir. Önerilen kontrol tekniğinin etkinliğini gösterebilmek için Ziegler-Nichols ile tasarlanan PD kontrolcü ile kıyaslamıştır. Çalışma sonucunda, optimize edilen kontrolcü daha yavaş yükselme süresi ve tepe süresine ulaşırken yerleşme zamanı ise daha hızlı elde edilmiştir [100].

Önen ve Çakan (2017), sarkaç tipi tepe vinç sistemi için konum ve salınım kontrolü yapmak için LQR denetleyici kullanmışlardır. En iyi kontrol yanıtlarını elde edebilmek için LQR denetleyici ağırlık matrisleri Genetik Algoritma ile optimize edilmiştir. Tasarlanan denetleyicinin performansı, benzetim sonuçları üzerinden değerlendirilerek önceden

tasarlanmış klasik bir PID denetleyici ile karşılaştırılmıştır. Benzetim sonuçları, optimize edilmiş LQR denetleyicinin yerleşme süresi ve salınım genliği açısından PID denetleyiciden daha iyi kontrol yanıtları sunduğunu göstermiştir [101].

Kaya ve Conker (2020), sarkaç tipi tepe vinç sisteminin hareket kontrolü için LQR kontrol tekniği kullanmışlardır. LQR denetleyicinin ağırlık matrisleri termal değişim optimizasyonu ve genetik algoritma ile belirlenerek performansları deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Termal değişim optimizasyon algoritması bu sistem için ilk defa kullanılmıştır. Algoritmalar dört farklı parçacık ya da popülasyon boyutunda ve 100 iterasyonda incelenmiştir. Çalışma sonucunda, genetik algoritma daha iyi kontrol yanıtları verdiği görülmüştür [102].

Solihin ve arkadaşları (2020), doğrusal olmayan vinç sistemini bulanık mantık kontrol yöntemi ile hareket kontrolünü sağlamışlardır. Bulanık mantık kural kümesinin oluşturulması uzmanlar tarafından oluşturulmaktadır. Kontrol tekniğinin kural kümesi parçacık sürü optimizasyon, guguk kuşu ve diferansiyel gelişim algoritmaları kullanılarak oluşturulmaktadır. Meta sezgisel algoritmalar kullanılarak bulanık mantık kural kümeleri optimize edilmiş ve benzetim çalışmaları başarı ile gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre optimizasyon sonucu elde edilen veriler geleneksel bulanık mantık kontrol yönteminden daha başarılı olmuştur. Ayrıca parçacık sürü optimizasyon algoritması diğer meta sezgisel algoritmalarından daha iyi performans göstermiştir [103].

Özkaya ve arkadaşları (2021), esnek robot kol sisteminin kontrolü için LQR denetleyicinin ağırlık matrislerinin seçimi için titreşimli parçacık sistemi algoritmasını ilk defa kullanarak geleneksel genetik algoritma ve yapay arı kolonisi algoritmaları ile karşılaştırmışlardır. Optimizasyon için yeni bir amaç fonksiyonu tasarlanmış ve elde edilen sonuçlar deneysel olarak karşılaştırılmıştır. Çalışma sonunda titreşimli parçacık sistemi algoritmasının daha başarılı olduğu gösterilmiştir [104].

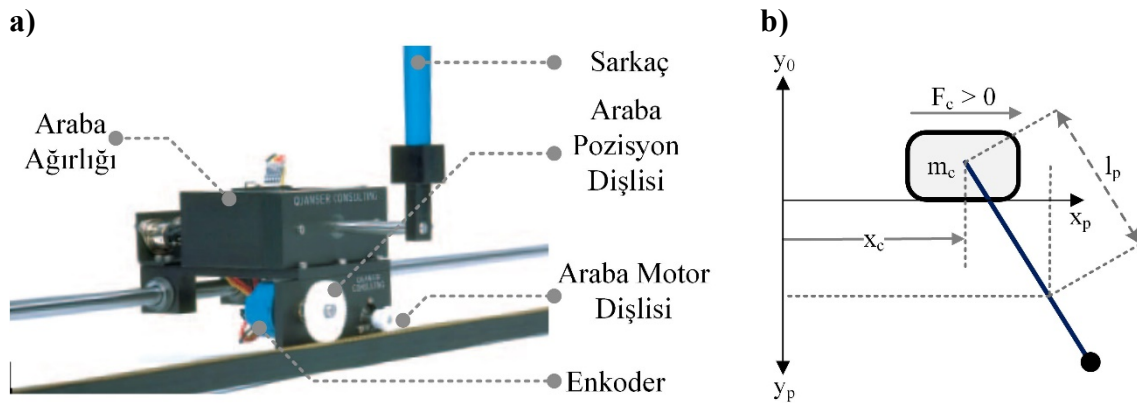
3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Materyal bölümü ile tez kapsamında hareket kontrolü üzerine çalışılan ve deneysel veriler elde etmek için kullanılan sarkaç tipi tepe vinç sistemi deney düzeneğinin detayları sunulmaktadır. Quanser tarafından üretilen sarkaç tipi tepe vinç sistemi, sistemin Lagrange yöntemi kullanılarak elde edilen hareket denklemleri, durum uzay modeli ve hareket denklemlerinin kullanılarak modellenen Matlab/Simulink diyagramları teorik detayları ile gösterilmektedir.

3.1.1. Sarkaç tipi tepe vinç sistemi

Tez çalışması Quanser firması tarafından üretilen sarkaç tipi tepe vinç deney düzeneği ile yapılmıştır. Deney düzeneğinin mekanik modeli ve şematik gösterimi Şekil 3.1 ile gösterilmektedir. Bu düzenek bir mil üzerinde, DC motor tarafından tahrik edilerek yatay olarak hareket eden bir araba ve bu arabaya bağlı olarak, arabaya dik konumda bulunan bir sarkaçtan oluşmaktadır. Sarkaç açısı dikey olarak askıya alındığı zaman sıfırdır. Arabaya bir kontrol girişi uygulanmakta ve çıkış olarak sarkaç açısı ve arabanın konumu, bunlara bağlı olarak sarkacın uç noktasının konumu, sarkacın açısal hızı ve konumu, arabanın doğrusal hızı ve ivmesi enkoderler sayesinde ölçülmektedir [105].



Şekil 3.1. a) Sarkaç tipi tepe vinç sistemi mekanik modeli b) şematik gösterimi

3.1.2. Sarkaç tipi tepe vinç sisteminin matematik modeli

Sistemin hareket denklemleri klasik mekanik yöntemler yerine Lagrange yöntemi kullanılarak hesaplanmıştır. Bu yöntem çok eklemlili robotik manipulatörler gibi karmaşık sistemlerin modellenmesinde daha iyi sonuç verdiği bilinmektedir [105].

Daha özel olarak, motor voltajına göre arabanın ve sarkacın hareketini tanımlayan dinamik denklemler Eş. 3.1 ile gösterilen Euler-Lagrange denklemi kullanılarak elde edilecektir:

$$\frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i \quad (3.1)$$

q_i , değişkeni genelleştirilmiş koordinat olarak tanımlanmaktadır.

$$q(t)^T = [x_c(t) \alpha(t)] \quad (3.2)$$

Burada $x_c(t)$, araba konumu ve $\alpha(t)$, sarkaç açısıdır.

$$\dot{q}(t)^T = \left[\frac{\partial x_c(t)}{\partial t} \frac{\partial \alpha(t)}{\partial t} \right] \quad (3.3)$$

Tanımlanan genelleştirilmiş koordinatlar ile sarkaç tipi tepe vinç sisteminin araba ve sarkaç için ayrı ayrı yazılmış Euler-Lagrange denklemleri Eş. 3.4 ve Eş. 3.5 ile gösterilmektedir.

$$\frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \dot{x}_c} - \frac{\partial L}{\partial x_c} = Q_{x_c} \quad (3.4)$$

$$\frac{\partial^2 L}{\partial t \partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial L}{\partial \alpha} = Q_{\alpha} \quad (3.5)$$

Sistemin Lagrangian'ı olan L değişkeni Eş. 3.6 ile tanımlanır:

$$L = T - V \quad (3.6)$$

Eş. 3.6 ile gösterilen; T sistemin toplam kinetik enerjisini, V ise sistemin toplam potansiyel enerjisini temsil eder. Bu nedenle Lagrangian, sistemin kinetik ve potansiyel enerjisi

arasındaki farkı temsil eder.(Bkz. Şekil 3.1) ile gösterilen referans şematik gösterime göre, sarkacın ağırlık merkezinin kartezyen koordinatları Eş. 3.7 ve Eş. 3.8 ile gösterildiği şekilde tanımlanır:

$$x_p = x_c + l_p \sin(\alpha) \quad (3.7)$$

$$y_p = -l_p \cos(\alpha) \quad (3.8)$$

Arabanın doğrusal hareketi dikey olarak sabitlendiğinden, sistemin toplam potansiyel enerjisi sarkacın yerçekimi potansiyel enerji olarak ifade edilebilir:

$$V_T = -M_p g l_p \cos(\alpha) \quad (3.9)$$

Sistemin toplam kinetik enerjisi ise araba ve sarkaçtan kaynaklanan öteleme ve dönme hareketlerinden dolayı kazandıkları kinetik enerjilerin toplamıdır. Arabanın öteleme kinetik enerjisini temsil eden T_{ct} , Eş. 3.10 ile ifade edilebilir:

$$T_{ct} = \frac{1}{2} M \dot{x}_c^2 \quad (3.10)$$

ve DC motora bağlı olarak dönme enerjisi T_{cr} ise Eş. 3.11 ile tanımlanmaktadır:

$$T_{cr} = \frac{\eta_g J_m K_g^2 \dot{x}_c^2}{2 r_{mp}^2} \quad (3.11)$$

Denklemlerle kullanılan deneysel kurulum parametreleri Çizelge 3.1 ile verilmiştir. Kinetik enerji denklemleri birleştirilirse, arabanın toplam kinetik enerjisi Eş. 3.12 ile tanımlanabilir:

$$T_c = \frac{1}{2} J_{eq} \dot{x}_c^2 \quad (3.12)$$

Burada;

$$J_{eq} = M + \frac{\eta_g K_g^2 J_m}{r_{mp}^2} \quad (3.13)$$

Sarkacın öteleme hareketinden kazandığı kinetik enerji, sarkaç ağırlık merkezinin doğrusal hızının bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir:

$$T_{pt} = \frac{1}{2} M_p \sqrt{\dot{x}_p^2 + \dot{y}_p^2} \quad (3.14)$$

Sarkaç ağırlık merkezinin doğrusal hızının bileşenleri Eş. 3.15 ve Eş. 3.16 ile tanımlanır:

$$\dot{x}_p = \dot{x}_c + l_p \cos(\alpha) \dot{\alpha} \quad (3.15)$$

$$\dot{y}_p = l_p \sin(\alpha) \dot{\alpha} \quad (3.16)$$

Sarkacın yaptığı dönme hareketinden kazandığı kinetik enerji ise şu Eş. 3.17 ile tanımlanır:

$$T_{pr} = \frac{1}{2} J_p \dot{\alpha}^2 \quad (3.17)$$

Sistemin toplam kinetik enerjisi, arabanın kinetik enerjisinin gösterildiği Eş. 3.12 ile Eş. 3.14 ve Eş. 3.17 ile gösterilen sarkacın kinetik enerjisinin birleştirilmesiyle bulunur ve Eş. 3.18 ile gösterilmektedir.

$$T_T = \frac{1}{2} (J_{eq} + M_p) \dot{x}_c^2 + M_p l_p \cos(\alpha) \dot{\alpha} \dot{x}_c + \frac{1}{2} (J_p + M_p l_p^2) \dot{\alpha}^2 \quad (3.18)$$

Genelleştirilmiş kuvvetler olan Q_{x_c} ve Q , genel koordinatlara göre bir sisteme uygulanan korunaklı olmayan kuvvetleri (sürtünme vb.) tanımlamak için kullanılır. Doğrusal arabaya etki eden genelleştirilmiş kuvvet Eş. 3.19 ile sarkaç üzerine etki eden genelleştirilmiş kuvvet ise Eş. 3.20 ile gösterilmiştir.

$$Q_\alpha = -B_p \dot{\alpha} \quad (3.20)$$

$$Q_{x_c} = F_c - B_{eq} \dot{x}_c \quad (3.19)$$

Doğrusal arabaya uygulanan, doğrusal olmayan Coulomb sürtünmesi ve sarkacın hareketinden kaynaklanan doğrusal araba üzerindeki kuvvetler dinamik modelde ihmal edilmiştir. Eş. 3.9 ve Eş. 3.18 ile gösterilen sistemin toplam kinetik ve potansiyel enerjisini

ve genelleştirilmiş kuvvetleri Euler-Lagrange eşitliğine koyarak doğrusal olmayan hareket denklemleri elde edilerek Eş. 3.21 ve Eş. 3.22 ile gösterilmektedir:

$$(J_{eq} + M_p)\ddot{x}_c + M_p l_p \cos(\alpha)\ddot{\alpha} + B_{eq}\dot{x}_c - M_p l_p \sin(\alpha)\dot{\alpha}^2 = F_c \quad (3.21)$$

$$M_p l_p \cos(\alpha)\dot{x}_c + (J_p + M_p l_p^2)\ddot{\alpha} + B_p\dot{\alpha} + M_p l_p g \sin(\alpha) = 0 \quad (3.22)$$

Çizelge 3.1. Quanser sarkaç tipi tepe vinç sistemine ait fiziksel parametreler

<i>Sembol</i>	<i>Açıklama</i>	<i>Değer</i>
x_c	Araba pozisyonu	mm
α	Sarkacın salınım açısını	rad
M_p	Sarkacın kütlesi	0,230 kg
l_p	Sarkacın ağırlık merkezinin mile olan uzaklığı	0,3302 m
J_{eq}	Arabanın eşdeğer ataleti	1,07313 kg
J_p	Sarkacın atalet momentini	$7,89 \cdot 10^{-3}$ kg.m ²
J_m	Rotor atalet momenti	$3,9 \cdot 10^{-7}$ kg.m ²
η_g	Planet dişli kutusu verimliliği	0,90
η_m	Motor verimi	0,69
K_g	Planet dişli kutusu dişli oranı	3,71
K_m	Zıt emk sabiti	$7,68 \cdot 10^{-3}$ V/(rad/s)
K_t	Motor tork sabiti	$7,68 \cdot 10^{-3}$ N.m/A
R_m	Motor armatür direnci	2,6 Ω
r_{mp}	Motor pinyon dişli radüsü	$6,35 \cdot 10^{-3}$ m
B_{eq}	Eşdeğer viskoz sönüm oranı	5,4 N.m.s/rad
B_p	Viskoz sönümlenme katsayısını	0,0024 N.m.s/rad

Eş. 3.23 ile arabaya uygulanan ve servo motor tarafından üretilen F_c kuvveti gösterilmiştir.

$$F_c = \left(\frac{\eta_g K_g K_t}{R_m r_{mp}} \right) \left(- \frac{K_g K_m \dot{x}_c}{r_{mp}} + \eta_m V_m \right) \quad (3.23)$$

Tez kapsamında kullanılan sarkaç tipi tepe vinç sisteminin hareket denklemlerinin hesaplanması için gerek duyulan fiziksel parametreler ve değerleri Çizelge 3.1 ile açıklamalı olarak gösterilmektedir [105].

3.1.3. Sarkaç tipi tepe vinç sisteminin durum-uzay modeli

Sarkaç tipi tepe vinç sisteminin dinamiğini açıklamak için kullanılan başka bir yöntem ise sistemin durum uzay modelinin çıkartılmasıdır. Durum-uzay modeli; fiziksel bir sistemin girdilerinin, çıktılarının ve durum değişkenlerini göz önüne alınarak birinci dereceden diferansiyel denklemler ile oluşturulan bir denklem modelidir. Durum denklemleri matris ve vektör biçimleri kullanılarak ifade edilir. Durum-uzay modeli ile herhangi bir anda bir sistemin dinamik davranışı o sistemin durum değişkenleri cinsinden tanımlanabilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3.24)$$

x durum, u kontrol girdisi, A , B , C ve D ise durum-uzay matrisleridir. Sarkaç tipi tepe vinç sistemi için durum ve çıktı belirtmektedir. $x_c = x_1$ arabanın konumunu, $\alpha = x_2$ sarkacın açısını, $\dot{x}_c = x_3$ arabanın doğrusal hızını, $\dot{\alpha} = x_4$ ise sarkacın açısal hızını ifade eder. Sarkaç tipi tepe vinç sisteminin durum uzay gösteriminin matris formda gösterimi Eş. 3.25 ile gösterilmektedir.

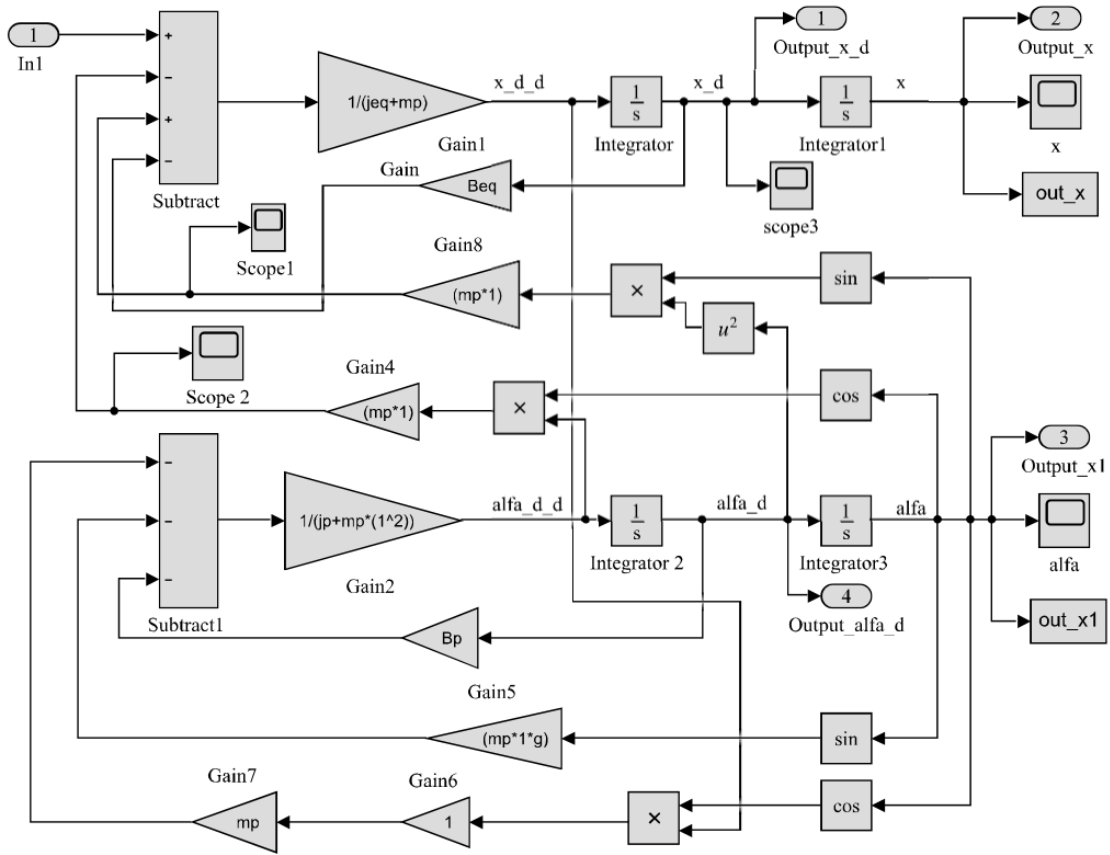
$$\begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \\ \ddot{x}_c \\ \ddot{\alpha} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{M_p l_p^2 g}{J_T} & -\frac{(J_p + M_p l_p^2) B_{eq}}{J_T} & \frac{M_p l_p B_p}{J_T} \\ 0 & -\frac{(J_{eq} + M_p) M_p l_p g}{J_T} & \frac{M_p l_p B_{eq}}{J_T} & -\frac{(J_{eq} + B_p) B_p}{J_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ \alpha \\ \dot{x}_c \\ \dot{\alpha} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{J_p + M_p l_p^2}{J_T} \\ -\frac{M_p l_p}{J_T} \end{bmatrix} u \quad (3.25)$$

Durum uzay modelinde gösterilen J_T ise aşağıdaki Eş. 3.26 ile gösterilmektedir.

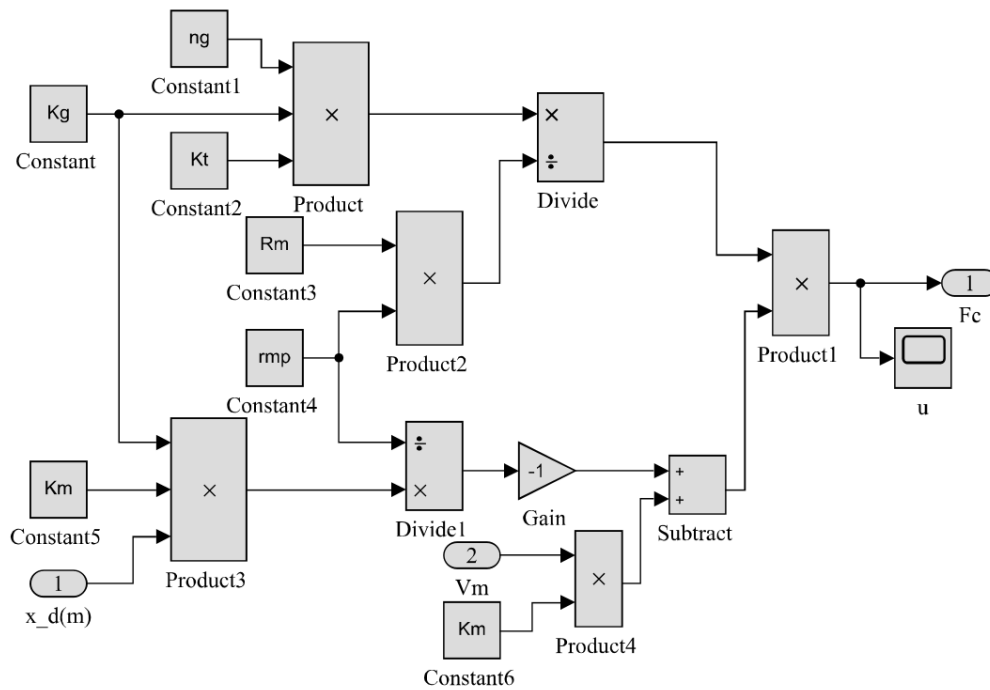
$$J_T = (J_{eq} + M_p)(J_p + M_p l_p^2) - (M_p l_p)^2 = J_{eq} J_p + M_p J_p + J_{eq} M_p l_p^2 \quad (3.26)$$

3.1.4. Sarkaç tipi tepe vinç sisteminin matlab/simulink diyagramları

Sarkaç tipi tepe vinç sisteminin hareket denklemleri Matlab/Simulink yazılımı kullanılarak modellenmiştir. Şekil 3.2 ile sarkaç tipi tepe vincinin ve Şekil 3.3 ile kullanılan DC motorun modellendiği diyagramlar gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Sarkaç tipi tepe vinç sistemi için Matlab/Simulink diyagramı



Şekil 3.3. Sarkaç tipi tepe vinç sistemi için DC motorun Matlab/Simulink diyagramı

3.2. Yöntem

Hareket kontrolü için kullanılan kontrol yöntemi, LQR denetleyici, optimizasyon için kullanılan meta sezgisel algoritmaların teorik detayları bu başlık altında sunulmaktadır.

3.2.1. Kontrol sistemleri

Belirli bir işlevi ve amacı olan, bileşenleri arasında karşılıklı ilişki, etkileşim bağıntı ve bağlantı olan elemanlar kümesine sistem denir. Kontrol ise bir sistemin davranışlarının daha önceden belirlenmiş değerlere göre şekillendirilmesi olarak tanımlanmaktadır. Başka bir ifadeyle, değişen bir niceliğin önceden belirlenmiş koşullara uyum sağlamasına yönelik olarak gerçekleştirilen işlemlerdir. Kontrol sistemleri, robotik sistemler, modern imalat yöntemleri, uzay teknolojileri ve sıcaklık, basınç, nem, akış vb. kontrolünü içeren herhangi bir endüstriyel sistem gibi çeşitli alanlarda kullanılmaktadır [106].

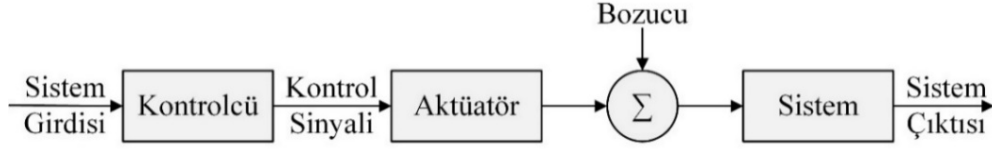
Kontrol sistemleri sistem girdisine uygun ve istenilen sistem çıktısını en kısa sürede elde edilerek sistem çıktısının bozuculardan etkilenmesini olabildiğine azaltmayı hedeflemektedir. Bu hedef doğrultusunda kontrol sistemleri açık çevrim (ileri besleme) ve kapalı çevrim (geri besleme) kontrol sistemleri olarak iki temel grupta incelenmektedir. Kullanım yerlerine göre bu kontrol tekniklerinden birisi ya da ikisi uygun şekilde birleştirilerek beraber kullanılabilirlerdir.

Açık çevrim (ileri beslemeli) kontrol sistemleri

Açık çevrim kontrol sistemlerinde sistem girdisi bağımsız bir değişkendir ve sistem çıktısı üzerinde etkisi yoktur. Kararlılığın büyük sorun olmadığı sistemler için uygun kontrol sistemleridir. Sistemin içinde herhangi bir algılayıcı eleman bulunmadığı için kapalı çevrim kontrol sistemlerine göre düşük maliyete sahiptir. Sisteme etkisi olan parametrelerin önceden bilindiği ve gürültülerin olmadığı sistemler için açık çevrim kontrol sistemleri yaygın olarak kullanılmaktadır.

Açık çevrim kontrol sistemleri bozucu etkilere karşı duyarlı olduklarından düzgün çalışan sistemler için uygundur. Aynı zamanda kararsız sistemleri kararlı hale getirememektedir. Sistemin düzgün ve kararlı biçimde çalışıyor olması gerekmektedir. Bu durumlar açık

çevrim kontrol sistemlerinin dezavantajıdır [106]. Açık çevrim kontrol sistemi blok diyagramı Şekil 3.4 ile gösterilmektedir.

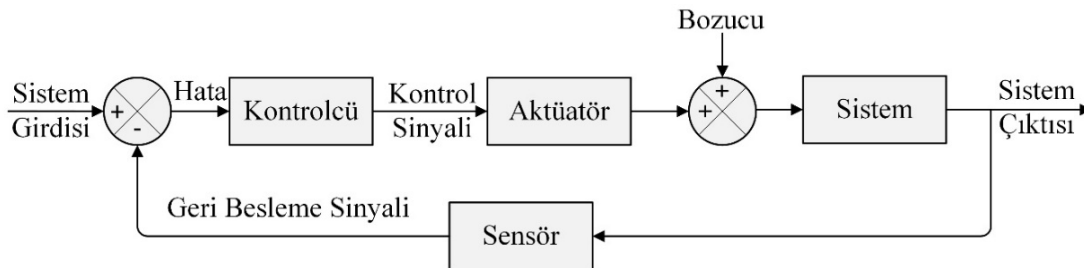


Şekil 3.4. Açık çevrim kontrol sistem blok diyagramı

Kapalı çevrim (geri beslemeli) kontrol sistemleri

Endüstrinin gelişimiyle paralel olarak hassas, hızlı ve doğru kontrol gereksiniminin önemi artmaktadır. Kapalı çevrim kontrol tekniklerinde, giriş sinyali ile geri besleme sinyali arasındaki fark alınarak hata sinyali elde edilmektedir. Elde edilen hata sinyali, hatayı azaltmak ve sistemin çıkışını istenen değere getirmek için denetleyiciye beslenerek kontrol sağlanmaktadır. Hata sinyalinin yapısı ve yapılmak istenilen kontrol önceliklerine uygun bir kontrol sinyali üretilerek yapılan bir kontrol tekniği olarak bilinmektedir.

Performansı aynı şartlar altında çalışan bir açık çevrim kontrol tekniğine göre daha yüksek olduğu bilinmektedir. Kapalı çevrim kontrol tekniklerinin avantajı, geri besleme kullanımı ile sistem parametrelerindeki harici bozululara ve değişikliklere nispeten duyarsız hale getirmesidir. Kapalı çevrim kontrol sisteminde kararlılık önemli bir sorundur. bu da hataları aşırı düzeltme eğiliminde olabilir ve bu nedenle sabit veya değişen genlikte salınımlara neden olabilmektedir. Kapalı çevrim kontrol tekniği blok diyagramı Şekil 3.5. ile gösterilmektedir.



Şekil 3.5. Kapalı çevrim kontrol tekniği blok diyagramı

Sistem sürekli olarak kontrol edildiği için sistem üzerindeki öngörülmeleyen bozucuların etkilerinin giderilmesi daha kolay ve hızlıdır. Tasarımı daha karmaşık ve zor olmasına karşın hassas kontrol gerektiren sistemler için uygun ve avantajlıdır [106].

3.2.2. Lineer kuadratik regülatör (LQR)

Kapalı çevrim kontrol sistemlerinden biri doğrusal kuadratik düzenleyici (LQR) kontrol tekniğidir. Modern kontrol yöntemlerinden olan LQR kontrol tekniği esnek sistemlerin hassas kontrolünde, füze sistemlerinde, araç süspansiyon sistemlerinde, otonom araçlarda ABS fren sistemlerinde yaygın kullanılan kontrol tekniklerden biridir. Yaygın olarak tercih edilmesinin sebebi olarak kararlı yapısı, bozuculardan etkilenme konusunda başarısı ve düzenli sentez sürecine sahip olması gösterilmektedir. Bu yöntem durum geri beslemesi sayesinde gürbüz bir denetim sağlamaktadır.

Eş. 3.27 gibi tanımlanan bir sistem için x durum vektörünü, u ise kontrol matrisini temsil etmektedir. A , B ve C ise dinamik sistemin matrisleri olarak gösterilmektedir.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (3.27)$$

İkinci dereceden maliyet fonksiyonu olan J , Eş. 3.28 ile gösterilmektedir. Denklemdaki Q , simetrik, yarı kesin pozitif ve R , simetrik ve pozitif ağırlık matrisleridir.

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (e^T Q e + u^T R u) dt \quad (3.28)$$

Ağırlık matrisleri (Q ve R) ikinci dereceden maliyet fonksiyonunun minimize edilmesinde kullanılmaktadır. Maliyet fonksiyonunun minimize edilmesiyle u hesaplanır. $u = K(referans - x)$ şeklinde gösterilmektedir. K , kazanç vektörünü temsil eder Eş. 3.29 ile gösterilmektedir.

$$K = R^{-1} B^T P \quad (3.29)$$

LQR kazanç matrisinin hesaplanmasında pozitif tanımlı simetrik matris olan P 'ye ihtiyaç duyulmaktadır. Bunun için Eş. 3.30'da gösterilen Ricatti denkleminin çözümüne bakılmaktadır.

$$PA + A^T P + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (3.30)$$

Ricatti denkleminin çözümü sonucu belirlenen P değeri sayesinde sistemin kazancı bulunarak denetleyici tasarlanmaktadır. Eşitlikte bulunan, Q ve R matrisleri tasarlanan LQR denetleyicinin performansını doğrudan etkileyen önemli parametrelerdir. Ağırlık matrisleri Eş. 3.31 ile gösterilmektedir.

$$Q = \begin{bmatrix} q_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & q_n \end{bmatrix}, R = \begin{bmatrix} r_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \ddots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \ddots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_m \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Ağırlık matrislerinin seçimi sistem cevabı ve kontrol işaretini doğrudan etkilemektedir. R matrisinin daha büyük seçilmesi sistemin kontrol yanıtı süresini uzatırken sistem daha az güç harcayarak durum vektörünü sifıra yaklaştırır. Eğer Q matrisi daha büyük seçilirse sistem daha hızlı yanıt verirken daha fazla güç ihtiyacı duyar. Tasarım aşamasında bu faktörler göz önünde bulundurularak seçim yapılmaktadır. Ayrıca iki matrisinde değeri arttıkça hata azalırken sistem yanıtı hızlanmaktadır [107]. Bu ağırlık matrisleri geleneksel olarak deneme yanılma yoluyla uzman tasarımcılar tarafından yapılmaktadır.

Tez kapsamında LQR denetleyicinin ağırlık matrisleri meta sezgisel optimizasyon algoritmaları ile optimize edilerek hem kullanılan algoritmalar içinde hem de geleneksel olarak tasarlanan LQR denetleyici ile karşılaştırılmaktadır. Geleneksel tasarım için literatürdeki farklı çalışmalar [90, 96, 108, 109] incelenerek deney düzeneğine uygun ağırlık matrisleri seçilmiştir. Denetleyicinin ağırlık matrisleri (Q ve R) Eş. 3.32 ile gösterildiği gibi seçilmiş ve Matlab yazılımı ile elde edilen kazanç (K) vektörü ise Eş. 3.33 ile gösterilmektedir.

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 50 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \end{bmatrix}, R = [0.1] \quad (3.32)$$

$$K = [31.6228 \quad -48.9727 \quad 15.2214 \quad -2.9399] \quad (3.33)$$

Sonraki alt bölümde optimizasyon için gerekli tez kapsamında incelenen kontrol problemi için yeni çoklu amaç fonksiyonu tasarlanmış ve kullanılan meta sezgisel algoritmaların detayları sunulmaktadır.

3.2.3. LQR kontrol yöntemi için çok amaçlı optimizasyon

Geleneksel yöntemler ile yapılacak olan tasarımların oluşturduğu dezavantajların giderilmesi için ağırlık matrislerinin (Q ve R) meta sezgisel arama algoritmaları ile belirlenmesi hedeflenmektedir. Tez çalışmasının bu kısmında beş farklı meta sezgisel arama algoritması olarak; genetik algoritma (GA), yapay arı kolonisi (ABC) algoritması, titreşimli parçacıklar sistemi (VPS) algoritması, büyük patlama-büyük çöküş (BB-BC) algoritması ve termal değişim optimizasyon (TEO) algoritmaları kullanılarak LQR kontrol cihazının tasarımı ve optimizasyonu ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Temel kontrol amacı; servo motorun mümkün olan en kısa sürede hareket ettirilmesi ve bu yüksek hızlı hareket sonucu oluşacak artık titreşimlerin en hızlı şekilde giderilmesi olarak tanımlanmaktadır.

Q ve R matrislerinin optimizasyonu için amaç fonksiyonuna ihtiyaç duyulmaktadır. Tez kapsamında çok amaçlı optimizasyon sağlamak için sarkaç açısı ve arabanın pozisyonu dikkate alınarak iki farklı amaç fonksiyonu birleştirilerek yeni çok amaçlı tek bir fonksiyon tasarlanmıştır. Sistemin zaman cevabından elde edilen tepe zamanı, yükselme süresi, yerleşme zamanı, kararlı durum hatası ve maksimum aşım parametrelerini en aza indirmek için tasarlanan fonksiyon Eş. 3.34 ile gösterilmektedir. Bu eşitlik tasarlanırken literatürde yapılan birçok çalışma detaylı olarak incelenmiştir.

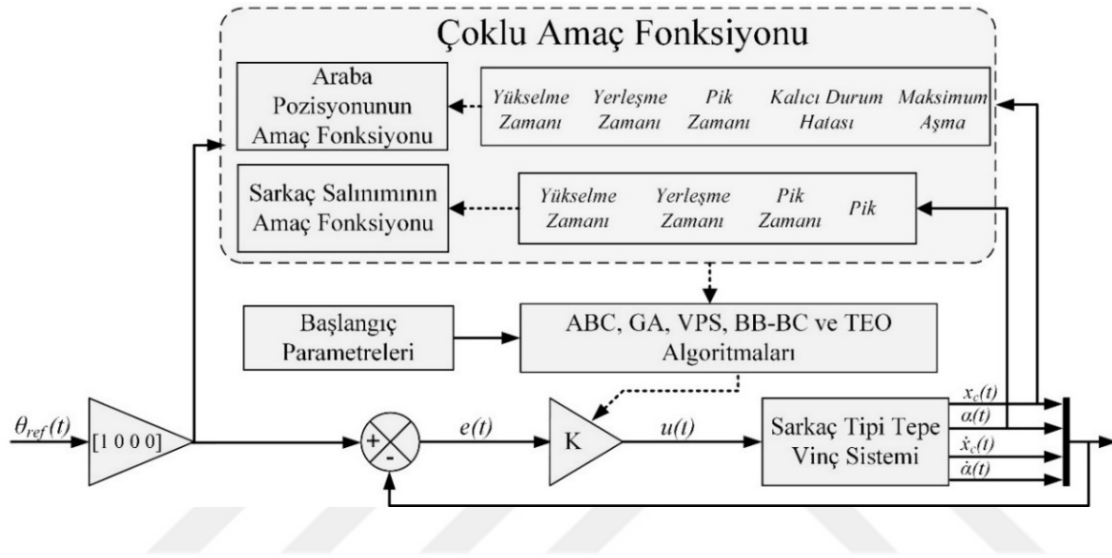
Eş. 3.34 ile gösterilen eşitlikte x_c sarkaç tipi tepe vinç sistemindeki arabanın pozisyonu, α sarkacın salınımı, t_r yükselme zamanı, t_s yerleşme zamanı, t_p tepe zamanı, s_p maksimum aşım ve s_s kalıcı durum hatasını temsil etmektedir.

$$J_{sum} = J_{x_c} + J_{\alpha}$$

$$J_{x_c} = (0.75 t_r(x_c)) + (0.56 t_s(x_c)) + (0.4 t_p(x_c)) + (29.7 |\max s_p|(x_c)) + (1000 |\max s_s - ref|(x_c)) \quad (3.34)$$

$$J_{\alpha} = (0.1 \text{norm}(\alpha)) + (0.46 t_s(\alpha)) + (5.1 t_p(\alpha)) + (31.8 |\max s_p|(\alpha)) + (1000 |\max s_s - ref|(\alpha))$$

Şekil 3.6 ile tez kapsamında deney düzeneği için tasarlanan kontrol yapısının genel bir blok diyagramı ile gösterilmektedir.

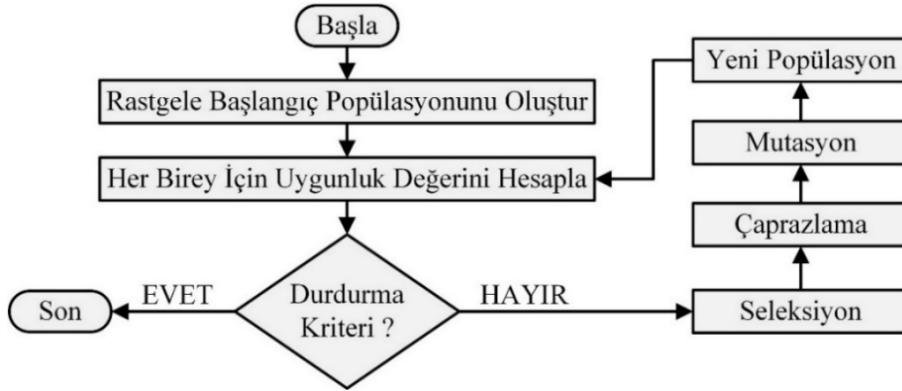


Şekil 3.6. LQR denetleyici tasarım blok diyagramı

Sonraki alt bölümler, tasarlanan çoklu amaç fonksiyonuna göre LQR denetleyicinin ağırlık matrislerinin en uygun değerlerini belirlemek için kullanılan GA, ABC, VPS, BB-BC ve TEO algoritmalarının teknik detayları verilmektedir.

3.2.4. Genetik algoritma (GA)

Genetik algoritma, tarihte birçok kullanımı olan evrimsel algoritmalarından biridir. Algoritma, Darwin'in doğadaki en güçlünün hayatta kalması teorisinden yola çıkılarak geliştirilmiştir. John Holland tarafından çok boyutlu bir arama uzayında uygun amaç fonksiyonuna göre arama yaparak en iyi sonucu bulmayı hedefleyen bir optimizasyon tekniği olarak 1970 yılında ortaya konulmaktadır. Finans, pazarlama, mekanik öğrenme, kontrol problemleri gibi çeşitli alanlarda kullanılan bir arama ve optimizasyon tekniğidir [110]. Zor, karmaşık ve süresiz problemlerde, hassas kontrol gerektiren ve bozucuların çok olduğu sistemlerde iyi sonuç vermektedir. GA algoritma akış şeması Şekil 3.7 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Genetik algoritma (GA) akış şeması

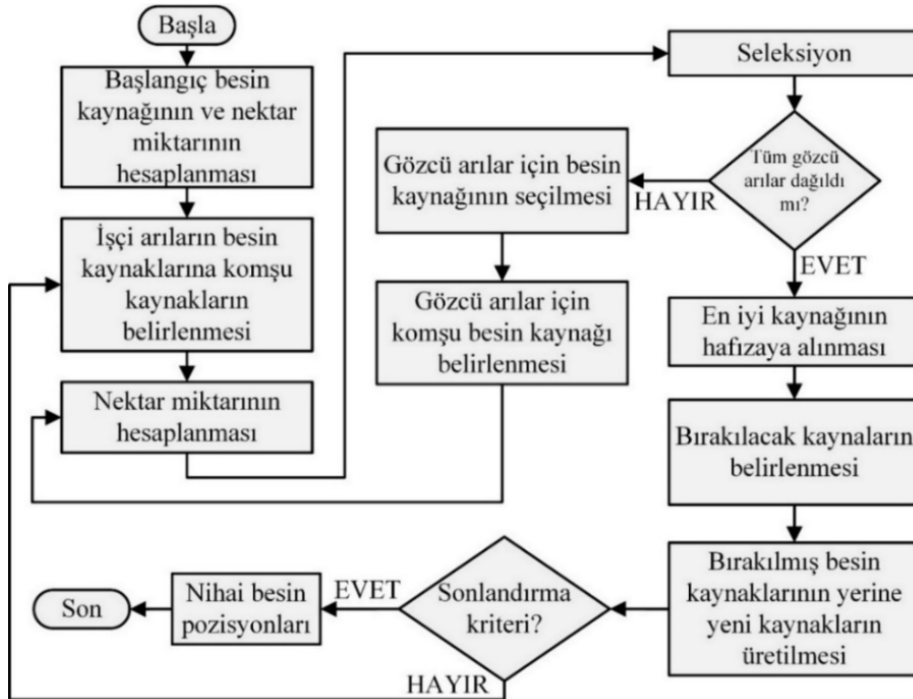
Algoritma rastgele oluşturulmuş bireylerden oluşan popülasyonlarla başlatılmaktadır. Bu popülasyonlar nesil olarak adlandırılmaktadır. Önceki nesillerden yararlanılarak yeni nesiller üretilmektedir. Oluşturulan nesillerdeki tüm bireyler olası çözümler olarak görülmekte ve uygunluklarına bakılmaktadır. Doğal seçim, bu değerlendirmeye göre şekillenmektedir. Yapılan seçimden sonra çaprazlama ve mutasyon işlemleri uygulanmaktadır. Çaprazlama ve mutasyon işlemleri ise seçilen bireyler ile yeni bir nesil oluştururken daha iyi çözümlere ulaşan yeni bireylerin oluşturulması için kullanılır. Oluşturulan yeni nesillerin hepsi önceki nesillerden daha iyi sonuç vermesi beklenmektedir. Algoritma genellikle maksimum sayıda nesil üretildiğinde veya popülasyon istenilen sonlandırma kriterine ulaştığında sonlandırılmaktadır. Popülasyon büyüklüğü, çaprazlama ve mutasyon oranları algoritmanın performansını doğrudan etkilemektedir [110].

3.2.5. Yapay arı kolonisi algoritması (ABC)

Yapay arı kolonisi, 2005 yılında Derviş Karaboğa tarafından arıların doğadaki besin bulma davranışlarından esinlenerek tasarlanan bir algoritmadır. Bu algoritma üç çeşit arı türünden oluşmaktadır. Birinci grup bilinen kaynaktan nektar taşıyan işçi arılardır. Bu arılar dans ederek diğer arılara nektarın bulunduğu yerin bilgisini bildirmektedir. İkinci arı çeşidi ise gözcü arılardır. İşçi arılar tarafından getirilen bilgiler sayesinde nektarın bulunduğu yere doğru yönelmektedirler. Koloninin yarısı işçi yarısı ise gözcü arılardan oluşmaktadır. İşçi ve gözcü arılar buldukları nektar tükendiği zaman birer kâşif arıya dönmekte ve üçüncü grubu oluşturmaktadır. Bu grup ise belli bir bilgi olmadan kovanın etrafında gelişigüzel dolaşarak nektar aramaktadırlar.

Arıların yiyecek aramak için gittikleri kaynaklar, algoritmada çözülmek istenen problemin olası çözümlerini, kaynaklardaki nektar miktarı ise çözümün kalitesini (amaç fonksiyon) ifade etmektedir. ABC algoritması en fazla besine sahip kaynağın yerini bulmaya çalışarak arama uzayındaki çözümlerden problemin minimumunu ya da maksimumunu veren çözümü bulmaya çalışmaktadır [111].

Yapay arı kolonisi algoritması rastgele oluşturulan bal arıları ile başlamaktadır. Bal arılarının sayısı (n_{HB}) olarak gösterilir ve koloninin veya popülasyonun boyutu olarak kabul edilmektedir. Algoritmanın döngüsü; işçi, gözcü ve kaşif arılar tarafından ardışık üç arama ile gerçekleştirilmektedir. Bu arı gruplarının arama işlemi ile buldukları yeni nektar kaynakları değerlendirilmektedir. Nektar miktarına yani amaç fonksiyonuna bakılarak eski nektar kaynakları ile yenilerini değiştirilmekte ya da eski nektar kaynakları korunmaktadır. Algoritma kullanıldığı probleme göre değişik stratejiler uygulanarak değiştirilebilir. Gerçekleştirilen üç ardışık arama aşamasının denklemleri alt bölümde açıklanarak verilmektedir. Keşif arı aşaması sadece yeni nektar kaynakları üretmek ve popülasyon eklemek için kullanılmaktadır. ABC algoritmasının program akış şeması Şekil 3.8 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Yapay arı kolonisi (ABC) algoritması akış şeması

Birinci aşamada işçi arılar stratejisine dayalı olarak yeni bal arılarının (newHB) üretilmektedir. Her işçi arı rastgele seçilen başka bir besin kaynağına doğru rastgele bir permütasyona dayalı adım büyüklüğü ile yeni ve daha iyi besin kaynağı bulmak için çalışmaktadır. Bu aşama Eş. 3.35 ile matematiksel olarak ifade edilmektedir.

$$\begin{aligned} stepsize &= rand_{(i)(j)}(HB - HB[permute(i)(j)]) \\ newHB &= HB + stepsize \end{aligned} \quad (3.35)$$

Burada $rand_{(i)(j)}$, $[-1,1]$ aralığında seçilen rastgele bir sayıdır. $permute$ permütasyon fonksiyonlarının farklı satırlarıdır. i , bal arılarının sayısı ve j ise problemin boyutlarının sayısıdır. Bu aşama algoritmanın çözüm önerilerinin çeşitlendirmesi için önemlidir. Yapay arı kolonisi algoritmasında arama, başlangıçta büyük adımlarla gerçekleşmekteyken işlemin tamamlanmasına doğru adımlar küçülerek popülasyon birbirine yaklaşmaktadır.

İkinci aşamada gözcü arılara göre yeni bal arıları (newHB) oluşturulmaktadır. Algoritmada bulunan tüm arılar arama süreçlerini tamamladıktan sonra besin kaynaklarına ilişkin nektar kalitesi ve konumu gözcü arılara aktarılmaktadır. İşçi ve gözcü arıların sayısı birbirine eşittir. Gözcü arı, besin kaynağına ilişkin verileri elde ettikten sonra Eş. 3.36 ile gösterilen P_i denkleminde gösterilen olasılığa göre arama uzayındaki besin kaynağı bölgesini hesaplamaktadır [111].

$$P_i = PFit_i / \sum_{i=1}^{nHB} PFit_i \quad (3.36)$$

$PFit_i$ uygunluk değerini olarak tanıtılmakta ve hesaplamak için Eş. 3.37 kullanılmaktadır.

$$newHB = \begin{cases} HB_{rws} + stepsize, & \text{if } rand < mr \\ HB_{rws} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (3.37)$$

3.2.6. Titreşimli parçacıklar sistemi (VPS) algoritması

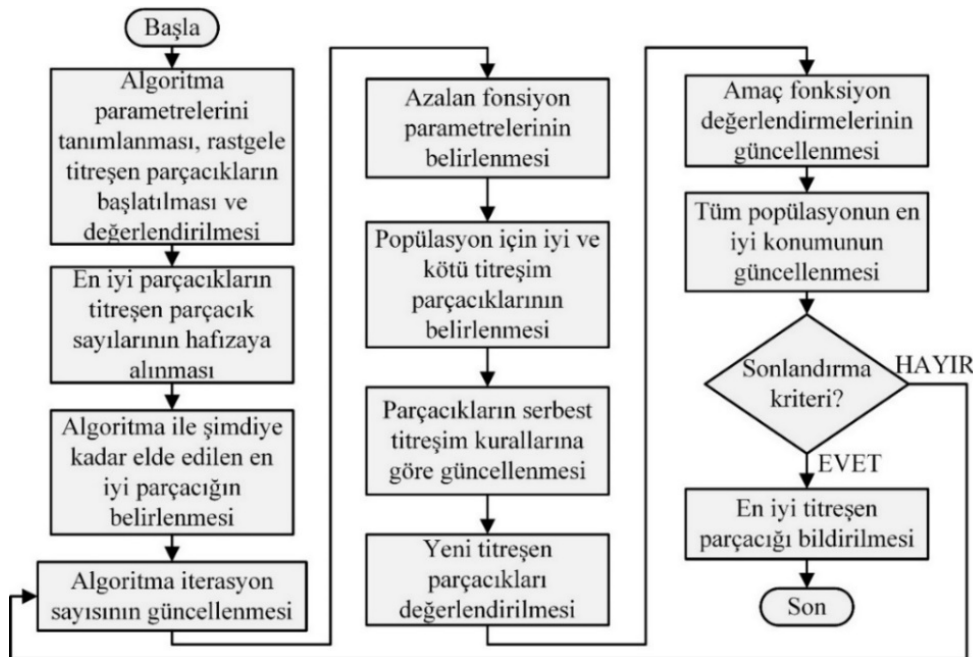
Titreşimli Parçacıklar Sistemi (VPS) Algoritması 2017 yılında Kahev ve Ghoozon tarafından ortaya konulmuştur. Temeli tek serbestlik dereceli sistemlerin serbest titreşiminden yola çıkılarak oluşturulmuştur. Algoritma yapısal optimizasyon sorunlarını çözmek için tasarlanmıştır. Algoritmanın çalışma şekli diğer meta sezgisel algoritmalarına

benzer şekildedir. Algoritma rastgele bir çözüm arayarak başlamaktadır. Bunu tek serbest dereceli sistem gibi kabul etmektedir. Sönümlü koşullar dikkate alındığında her parçacık sallanır ve diferansiyel denklemlerden yararlanılarak oluşturulan formülasyonlarla denge konumuna getirilmektedir [112].

Düşük sönümlü titreşimler için, tek serbestlik dereceli sistemi için çözümü Eş. 3.38 ile gösterilmektedir;

$$x(t) = \rho e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_D t + \emptyset) \quad (3.38)$$

Eş. İle verilen ζ sistemin sönüm oranını ve ω_n ise sistemin doğal frekansını temsil etmektedir. ρ ve \emptyset ise titreşimin başlangıç koşullarında belirlenen sabitlerdir. Her parçacık için farklı ağırlıklara sahip üç tane denge konumu tanımlanmaktadır. Her yeni nesil bu konumlardan yararlanmaktadır. Bu denge konumları; tüm popülasyonların içinden elde edilmiş en iyi konuma sahip parçacık (HP), iyi bir parçacık (GP) ve kötü bir parçacık (BP) olarak tanımlanmaktadır. Her parçacık, çözüm önerisi sunmak için GP ve BP seçerek amaç fonksiyonuna göre artan bir sıra ile hizalanmaktadır. Titreşimli parçacıklar sistemi algoritmasının program akış şeması Şekil 3.9 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Titreşimli parçacıklar sistemi (VPS) algoritması akış şeması

Sönümlenme, titreşimli sistemde salınımları azaltmasını ve sınırlandırması etkisine sahiptir. Serbest sönümlü titreşimin genliği azaldığı zaman sönümlenme seviyesi yükselmektedir. İterasyon sayısı ile orantılı VPS algoritmasının sönüm seviyesinin ayarlanması için bir Azalan fonksiyon tanımlanan (D) Eş. 3.39 ile gösterilmektedir.

$$D = \left(\frac{NITs}{maxNITs} \right)^{-\alpha} \quad (3.39)$$

Eş. 3.39'de bulunan $NITs$ optimizasyon sürecinde geçerli iterasyon sayısını, $maxNITs$ ise durdurma kriteri kabul edilen maksimum iterasyon sayısını temsil etmektedir. α ise, (D) fonksiyonun sabitini gösterir. Yapılan açıklamalara göre parçacıklar, serbest titreşim formülü olarak Eş. 3.40 olarak güncellenmektedir.

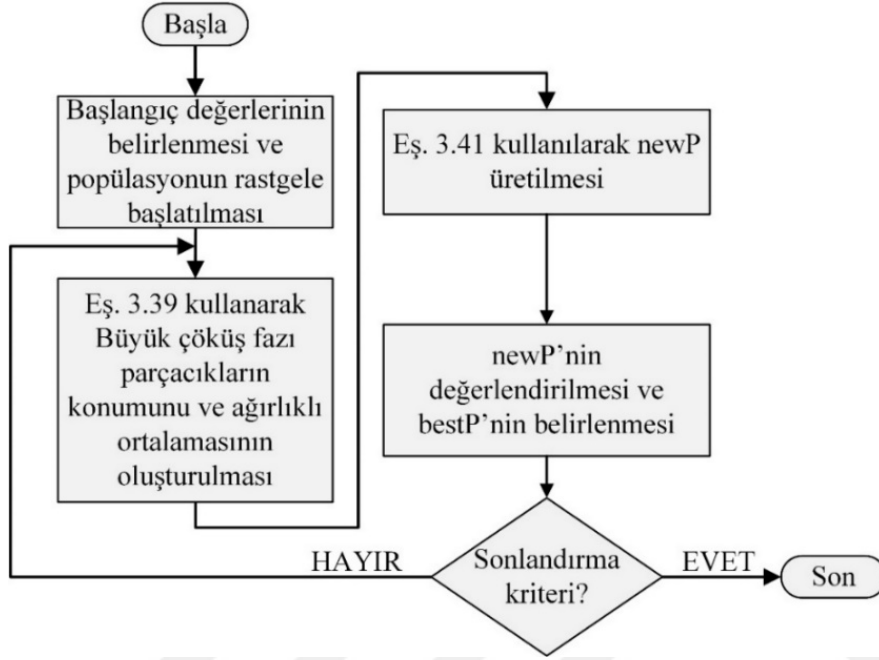
$$\begin{aligned} newVP_i &= \omega_1(D.A.rand + HP) + \omega_2(D.A.rand + GP_i) + \omega_3(D.A.rand + BP_i) \\ A &= \omega_1(HP - VP_i) + \omega_2(GP_i - VP_i) + \omega_3(BP_i - VP_i) \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 &= 0 \end{aligned} \quad (3.40)$$

Eş. 3.38 ile verilen eşitliklerde VP_i titreşimli parçacığın şimdiki konumunu $newVP_i$ ise aynı parçacığın güncellenmiş konumunu gösterir. $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ ağırlıkları sırası ile en iyi partikül (HP), iyi bir partikül (GP) ve kötü bir partikül (BP) göreceli önemini değerlendirmek için kullanılan ağırlıklar olarak gösterilmektedir. $rand$ değeri ise 0 ile 1 arasında rastgele olarak üretilen sayıdır [112].

3.2.7. Büyük patlama-büyük çöküş (BB-BC) algoritması

Büyük patlama-büyük çöküş (BB-BC) algoritması, 2006 yılında Erol ve Eksin tarafından evrenin oluşumu esnasında gerçekleştiği varsayılan süreçten esinlenilerek oluşturulmuştur. Büyük patlama Teorisine bakıldığında fiziksel, doğal veya astrolojik temelli teori ile popülasyon temelli bir meta-sezgisel arasında bir benzerlik vardır. Evrenin kökeni olarak gösterilen büyük patlama teorisi iki aşamadan oluşur. BB-BC Algoritması bu temele dayandırılarak ortaya konulmaktadır. Algoritma iki temel fazdan oluşmaktadır. Büyük patlama aşamasında parçacıklar enerji kaybederek düzensizliğe doğru çekilirken, büyük çöküş aşamasında belirli bir yöne doğru birleşirler. En uygun çözümü bulmak için parçacıkların ağırlık merkezleri değerlendirilmektedir. Algoritma sonlandırma kriterine gelene kadar yeni patlamalar daha sonra yeni ağırlık merkezleri hesaplamaları yaparak

devam etmektedir. Ağırlık merkezinin değişmemesi durumunda en son hesaplanan ağırlık merkezi en iyi çözüm olarak kabul edilir [113]. Oluşturulan her parçacık bir çözüm önerisi olarak görülmektedir. BB-BC meta sezgisel optimizasyon algoritmasının program akış şeması Şekil 3.10 ile gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Büyük patlama-büyük çöküş (BB-BC) algoritması akış şeması

Büyük çöküş aşamasında kütle merkezi olarak gösterilen CM her parçacığın pozisyonunu ve uygunluk derecesinin hesaplanması için kullanılmakta ve Eş. 3.41 ile gösterilmektedir.

$$CM(i) = \frac{\sum_{j=1}^{nP} \frac{P_{(j,i)}}{PFit_{(j)}}}{\sum_{j=1}^{nP} \frac{1}{PFit_{(j)}}} \quad (3.41)$$

$i = 1, \dots, nv$

Eş. 3.41 ile yapılan hesaplama ile elde edilen sonuca göre daha iyi çözümler elde etmek için yeni patlamalar gerçekleştirilir. Bu işlem aranan kritere uygun olan değerler bulunana kadar devam edilmektedir. Büyük patlama aşamasında yeni çözüm önerileri oluşturulmak için Eş. 3.42 kullanılmaktadır.

$$newP = (CM \text{ ya da } bestP) + \frac{rand. (Ub - Lb)}{nIT} \quad (3.42)$$

Eş. 3.42 ile gösterilen $rand$ 0 ile 1 arasında rasgele atanan bir sayıyı göstermektedir. Ub tasarım aşamasında belirlenen arama uzayının üst sınırını ve Lb ise alt sınırını belirtmektedir. nIT ise iterasyon sayısını göstermektedir.

Meta sezgisel optimizasyon algoritmaları genel olarak iki parametre belirlenmektedir. Bu parametreler; Durdurma kriteri olarak algoritma popülasyonunun sayısı ve iterasyon sayısıdır. 2007 yılında Camp BB-BC algoritması için yeni iki parametre eklemiştir [114]. Arama uzayının boyutunu sınırlamak için α parametresini ve hem kütle merkezini hem de en iyi parçacığı göz önünde bulundurmak için β parametresini önermiş ve oluşturulan yeni denklem Eş. 3.43 ile gösterilmektedir.

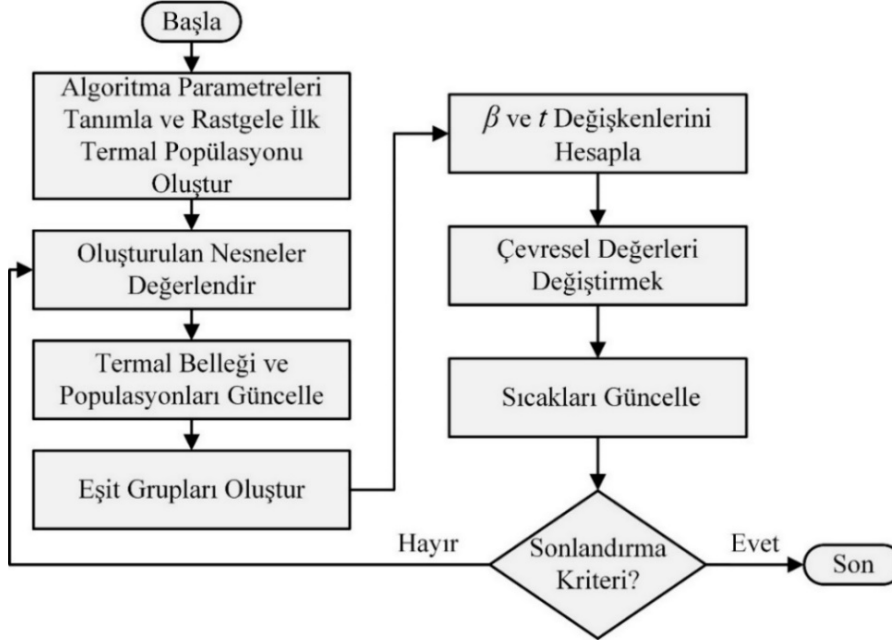
$$newP(i) = (\beta \cdot CM + (1 - \beta) \cdot bestP) + \frac{rand \cdot \alpha \cdot (Ub - Lb)}{nIT} \quad (3.43)$$

$i = 1, \dots, nv$

3.2.8. Termal değişim optimizasyon (TEO) algoritması

2017 yılında Kaveh ve Dadras tarafından Newton'un soğuma yasasından yararlanılarak yeni bir meta sezgisel yöntem olarak termal değişim optimizasyon algoritması ortaya konulmaktadır. Algoritma oluşturulurken yararlanılan Newton yasasına göre, bir cismin kaybettiği ısı oranının, cisim ve cismin çevresi arasındaki sıcaklık farkıyla orantılı olduğu belirtilmektedir. Termal değişim optimizasyonu bu temele dayandırılmaktadır. Diğer meta sezgisel yöntemler gibi rastgele bir popülasyon oluşturulmaktadır. Algoritma bu popülasyon içindeki her parçacığı ısıtma ya da soğutma nesnesi olarak görmekte ve diğer değişken olan çevre ile birleştirerek bir termal değişim meydana getirmektedir. Bu ısı transferinden sonra oluşacak yeni sıcaklık değeri parçacığın arama uzayındaki yeni konumunu temsil etmektedir. Sıcaklığı yüksek olan parçacıklar iyi çözüm verdiği bilinmektedir. Buradan yola çıkarak parçacıkların sıcaklıklarına göre aynı sayıda parçacıktan oluşan iki farklı grup oluşturulur. Her iki grubu oluşturan parçacıklar da çevre sıcaklığından etkilenmektedirler. Eğer parçacık ilk grupta ise çevre sıcaklığı ikinci gruptan karşılık gelen bir parçacık olmaktadır. Bu durumun tam tersi de geçerlidir. İlk grupta bulunan daha yüksek sıcaklığa sahip iyi parçacıklar daha düşük sıcaklıktaki parçacıklara doğru titreterek hareket ettirilmektedir. İkinci gruptaki düşük sıcaklıktaki kötü parçacıklar ise daha sıcak parçacıklara doğru hareket ettirilerek sıcaklıklarının yükseltilmesi hedeflenmektedir.

Böylece tüm parçacıklar için en iyi konum sağlanmaya çalışılmaktadır [115]. Termal değişim optimizasyon Algoritmasının akış şeması Şekil.3.11. ile gösterilmektedir.



Şekil 3.11. Termal değişim optimizasyon (TEO) algoritması akış şeması

Fiziksel özellikler sabit olduğu varsayılmakta ve toplam ısı transfer katsayısının h olarak gösterilmektedir. Katı bölgenin şekli önemsizdir. Sadece toplam ısı transfer katsayısının hesaplanmasında etkilidir. Nesne, $t = 0$ zamanında T yüksek sıcaklığında iken aniden farklı bir ortama yerleştirilir ve burada sabit sıcaklıktaki T_b çevreleyen akışkan tarafından soğutulur. Katının hacmi V ve yüzey alanı A olarak gösterilmektedir. Yüzeyden ısı kaybı oranı Eş 3.44 ile gösterilmektedir. Eş 3.44'teki A , ısı akışının alanı (m^2), T , sıcaklığı (K) göstermektedir. h ise ısı transfer katsayısını ($W m^{-2}K^{-1}$) ve t saniye cinsinden zamanı temsil etmektedir.

$$\frac{dQ}{dt} = h(T_a - T_b)A \quad (3.44)$$

dt zamanındaki ısı kaybı $h(T_a - T_b)A dt$ ve bu sıcaklık dT düştükçe depolanan ısıdaki değişime eşittir. Eş. 3.45 ile gösterilmektedir.

$$V_{pcdT} = -hA(T - T_b)dt \quad (3.45)$$

Eş. 3.45 ile gösterilen V hacmi (m^3), ρ yoğunluğu (kgm^3), c ise özgül ısıyı ($J kg^{-1} K^{-1}$) temsil etmektedir. Bu eşitliklerin birleştirilmesi ile Eş. 3.46 oluşturulmaktadır.

$$\frac{T - T_b}{T_0 - T_b} = \exp\left(-\frac{hA}{V\rho c}t\right) \quad (3.46)$$

Birleştirme yalnızca $\frac{hA}{V\rho c}$ sabit olduğunda geçerlidir. Yani T'nin bir fonksiyonu yoktur ve β olarak kabul edilerek denklem tekrar düzenlendiğinde Eş. 3.47 elde edilmektedir.

$$\frac{T - T_b}{T_0 - T_b} = \exp(-\beta t) \quad (3.47)$$

Denklem yeniden düzenlendiğinde ise Eş. 3.48 elde edilmektedir.

$$T = T_b + (T_0 - T_b)\exp(-\beta t) \quad (3.48)$$

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

Bu bölüm tasarlanan LQR kontrol tekniğinin ağırlık matrisleri (Q ve R) meta sezgisel arama algoritmaları ile optimize edilerek verilerin teorik ve deneysel olarak kıyaslanarak açıklandığı bölümdür. Optimizasyon sürecinde yapılan benzetim ve deneysel veriler detaylı olarak açıklanmaktadır. Optimizasyon için; GA, ABC, VPS, BB-BC ve TEO algoritmaları kullanılmaktadır. Kullanılan meta sezgisel arama algoritmaları altı popülasyon ya da parçacık boyut değeri (10-60) için ayrı ayrı incelenerek sonuçlar 100 iterasyon sayısında elde edilmiştir. Tasarım ve benzetim çalışmaları Intel Core i5 CPU 2.2 GHz işlemci ve 4 GB belleğe sahip bir bilgisayar tarafından Matlab yazılımı kullanılarak yapılmıştır.

4.1. Optimizasyon Algoritmalarının Benzetim Verileri

Algoritmaların başlangıç parametrelerinin seçimi optimizasyonun performansını doğrudan etkilemektedir. Seçim için yapılan benzetim çalışmaları çizelgelerle sunulmaktadır.

Çizelge 4.1. GA ve VPS algoritmaları için optimizasyon benzetim sonuçları

		<i>Çaprazlama Oranı</i>									
		<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>	
GA	<i>PPS</i>	<i>10</i>	19,020	16,900	19,165	16,193	16,221	16,923	16,164	16,346	16,774
		<i>20</i>	15,938	16,287	16,271	16,120	15,904	16,207	15,995	15,996	16,136
		<i>30</i>	16,283	15,995	16,209	15,694	15,632	16,102	15,997	15,608	16,062
		<i>40</i>	16,395	16,125	15,620	15,776	15,605	16,058	15,777	16,044	15,781
		<i>50</i>	16,339	15,765	15,932	15,773	16,331	15,608	15,783	16,039	15,606
		<i>60</i>	16,197	15,797	15,637	15,609	15,778	15,605	15,611	15,607	15,607
		<i>Titreşim Sabitinin Başlangıç Değeri</i>									
		<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>	
VPS	<i>PPS</i>	<i>10</i>	15,981	15,798	15,795	16,053	16,064	15,984	15,574	15,855	15,578
		<i>20</i>	15,576	15,572	15,571	15,580	15,783	15,612	15,584	15,650	15,584
		<i>30</i>	15,743	15,792	15,579	15,589	15,589	15,595	15,583	15,599	15,586
		<i>40</i>	15,578	15,577	15,578	15,582	15,581	15,642	15,585	15,580	15,581
		<i>50</i>	15,735	15,748	15,596	15,588	15,576	15,587	15,625	15,736	15,669
		<i>60</i>	15,577	15,579	15,724	15,579	15,595	15,594	15,580	15,577	15,578

Çizelge 4.2. BB-BC algoritması için optimizasyon benzetim sonuçları

		<i>Beta</i>								
<i>J_{sum}</i>		<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>
Alfa=0.2	<i>PPS</i>									
	<i>10</i>	16,154	16,263	16,033	16,107	16,232	16,165	16,227	16,651	20,378
	<i>20</i>	16,180	16,151	16,253	16,023	16,127	16,286	16,112	16,229	16,279
	<i>30</i>	16,047	15,637	16,178	16,129	16,280	16,169	16,148	16,175	16,565
	<i>40</i>	15,601	15,605	16,118	16,103	15,660	16,170	16,138	16,227	16,615
	<i>50</i>	16,012	15,578	15,597	16,135	15,583	16,123	16,353	16,182	16,635
<i>60</i>	16,062	16,026	16,041	16,049	15,581	16,036	16,053	16,159	16,235	
		<i>Beta</i>								
<i>J_{sum}</i>		<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>
Alfa=0.4	<i>PPS</i>									
	<i>10</i>	16,150	16,146	16,084	16,237	16,193	16,118	16,204	16,556	17,082
	<i>20</i>	16,179	16,098	15,610	15,599	16,157	16,061	16,160	16,154	16,256
	<i>30</i>	16,063	15,618	16,172	16,050	16,313	16,197	16,165	16,257	16,084
	<i>40</i>	16,049	16,110	15,626	16,154	16,025	16,149	16,149	16,152	16,173
	<i>50</i>	15,593	16,075	15,589	16,079	15,600	16,102	16,281	16,185	16,242
<i>60</i>	16,041	16,159	15,581	16,055	15,607	16,05	16,138	16,062	16,195	
		<i>Beta</i>								
<i>J_{sum}</i>		<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>
Alfa=0.6	<i>PPS</i>									
	<i>10</i>	16,236	15,924	16,250	16,292	17,461	16,345	16,268	17,539	17,981
	<i>20</i>	16,241	16,220	16,259	15,975	16,074	16,069	16,246	16,562	18,650
	<i>30</i>	16,178	16,012	16,033	15,600	16,182	16,100	16,239	16,150	16,212
	<i>40</i>	15,615	16,06	16,041	15,586	16,194	15,971	16,222	16,167	16,187
	<i>50</i>	16,012	15,578	15,597	16,135	15,583	16,123	16,353	16,182	16,635
<i>60</i>	15,606	15,958	15,581	15,583	16,055	15,579	16,074	16,172	16,139	
		<i>Beta</i>								
<i>J_{sum}</i>		<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>
Alfa=0.8	<i>PPS</i>									
	<i>10</i>	16,266	16,337	16,847	16,147	16,086	16,235	16,219	16,358	19,045
	<i>20</i>	15,728	16,122	15,744	16,182	16,170	16,312	16,147	16,201	16,173
	<i>30</i>	16,170	16,072	16,133	16,123	16,212	15,920	16,283	16,113	16,247
	<i>40</i>	15,940	16,067	15,940	15,947	16,157	16,081	16,020	16,146	16,330
	<i>50</i>	16,026	15,575	16,050	16,173	16,049	16,126	16,163	16,137	16,167
<i>60</i>	16,061	16,092	15,592	16,109	16,073	15,677	16,088	16,191	16,150	
		<i>Beta</i>								
<i>J_{sum}</i>		<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>
Alfa=1	<i>PPS</i>									
	<i>10</i>	16,109	16,383	16,172	16,253	16,175	16,144	16,248	16,336	19,119
	<i>20</i>	16,112	16,125	16,242	16,240	16,196	16,220	16,156	16,239	18,311
	<i>30</i>	16,188	15,898	16,236	16,134	16,050	16,103	16,096	16,190	17,721
	<i>40</i>	16,085	15,598	16,205	15,934	16,198	16,284	16,158	16,146	16,228
	<i>50</i>	16,061	15,657	15,595	16,128	15,606	16,033	16,129	16,235	16,225
<i>60</i>	16,012	15,991	15,600	16,045	16,095	15,964	16,136	16,139	16,220	

Çizelge 4.3. ABC algoritması için optimizasyon benzetim sonuçları

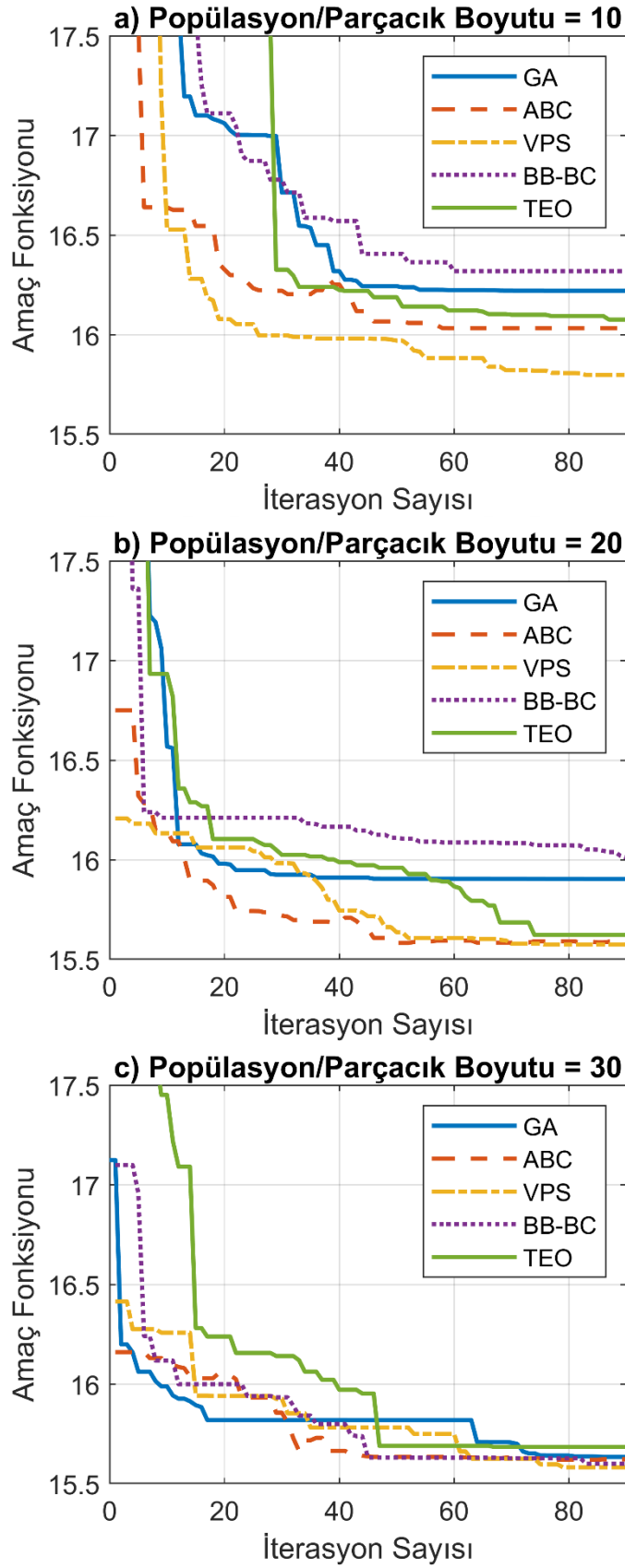
		<i>Modifikasyon Oranı</i>									
		<i>J_{sum}</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>
A=50	PPS	<i>10</i>	16,000	16,056	15,928	16,282	16,242	16,258	16,233	16,204	16,159
		<i>20</i>	15,578	15,646	15,588	15,578	15,573	16,056	15,963	16,032	18,505
		<i>30</i>	15,573	15,571	15,581	15,580	15,580	16,025	15,977	15,697	16,074
		<i>40</i>	15,967	15,573	15,571	15,574	15,578	15,567	15,579	15,581	15,628
		<i>50</i>	15,575	15,575	15,568	15,572	15,594	15,982	15,972	15,609	15,989
		<i>60</i>	15,577	15,970	15,574	15,568	15,571	15,575	15,588	15,565	15,583
		<i>Modifikasyon Oranı</i>									
		<i>J_{sum}</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>
A=200	PPS	<i>10</i>	16,000	16,056	15,928	16,282	16,242	16,258	16,233	16,209	16,243
		<i>20</i>	16,014	15,579	16,035	16,057	15,969	15,955	16,015	16,071	16,075
		<i>30</i>	15,977	15,575	16,074	15,980	15,584	15,584	16,024	16,081	15,972
		<i>40</i>	15,578	15,997	15,573	15,964	16,076	15,574	15,982	15,606	16,073
		<i>50</i>	15,963	15,575	15,966	15,566	15,986	15,738	15,826	15,938	15,974
		<i>60</i>	15,576	15,964	15,578	15,573	15,574	15,953	15,578	15,578	15,571
		<i>Modifikasyon Oranı</i>									
		<i>J_{sum}</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>
A=400	PPS	<i>10</i>	16,015	16,169	16,268	16,005	16,137	16,004	16,015	16,034	16,560
		<i>20</i>	16,076	15,971	15,965	16,038	16,067	15,871	15,983	16,001	15,736
		<i>30</i>	16,075	15,986	15,935	15,571	15,577	15,993	16,077	16,193	15,577
		<i>40</i>	15,967	16,019	15,593	15,572	16,036	16,062	15,570	15,940	15,585
		<i>50</i>	15,973	15,970	15,742	15,575	15,573	15,966	15,973	15,570	15,575
		<i>60</i>	15,574	15,576	15,570	15,975	15,571	16,074	15,959	16,061	15,596
		<i>Modifikasyon Oranı</i>									
		<i>J_{sum}</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>
A=600	PPS	<i>10</i>	16,008	16,056	15,928	16,282	16,242	16,258	16,233	16,204	16,159
		<i>20</i>	15,578	15,646	15,588	15,578	15,573	16,056	15,96	16,032	18,505
		<i>30</i>	15,573	15,571	15,581	15,580	15,580	16,025	15,977	15,697	16,074
		<i>40</i>	15,967	15,573	15,571	15,574	15,578	15,567	15,579	15,581	15,628
		<i>50</i>	15,575	15,575	15,568	15,572	15,594	15,982	15,972	15,609	15,989
		<i>60</i>	15,577	15,970	15,574	15,568	15,571	15,575	15,588	15,565	15,583
		<i>Modifikasyon Oranı</i>									
		<i>J_{sum}</i>	<i>0,1</i>	<i>0,2</i>	<i>0,3</i>	<i>0,4</i>	<i>0,5</i>	<i>0,6</i>	<i>0,7</i>	<i>0,8</i>	<i>0,9</i>
A=800	PPS	<i>10</i>	16,008	16,056	15,928	16,282	16,242	16,258	16,233	16,204	16,159
		<i>20</i>	16,024	15,580	16,066	15,972	16,079	16,740	15,926	15,582	16,025
		<i>30</i>	15,677	15,572	15,572	16,053	16,046	15,571	16,019	16,027	16,055
		<i>40</i>	15,967	15,582	15,572	15,994	15,971	15,576	15,911	15,944	15,956
		<i>50</i>	15,574	15,859	15,951	15,571	15,937	15,968	15,567	15,567	15,567
		<i>60</i>	15,571	15,971	15,574	15,575	15,579	15,575	15,573	15,585	15,994

Çizelge 4.4. TEO algoritması için optimizasyon benzetim sonuçları

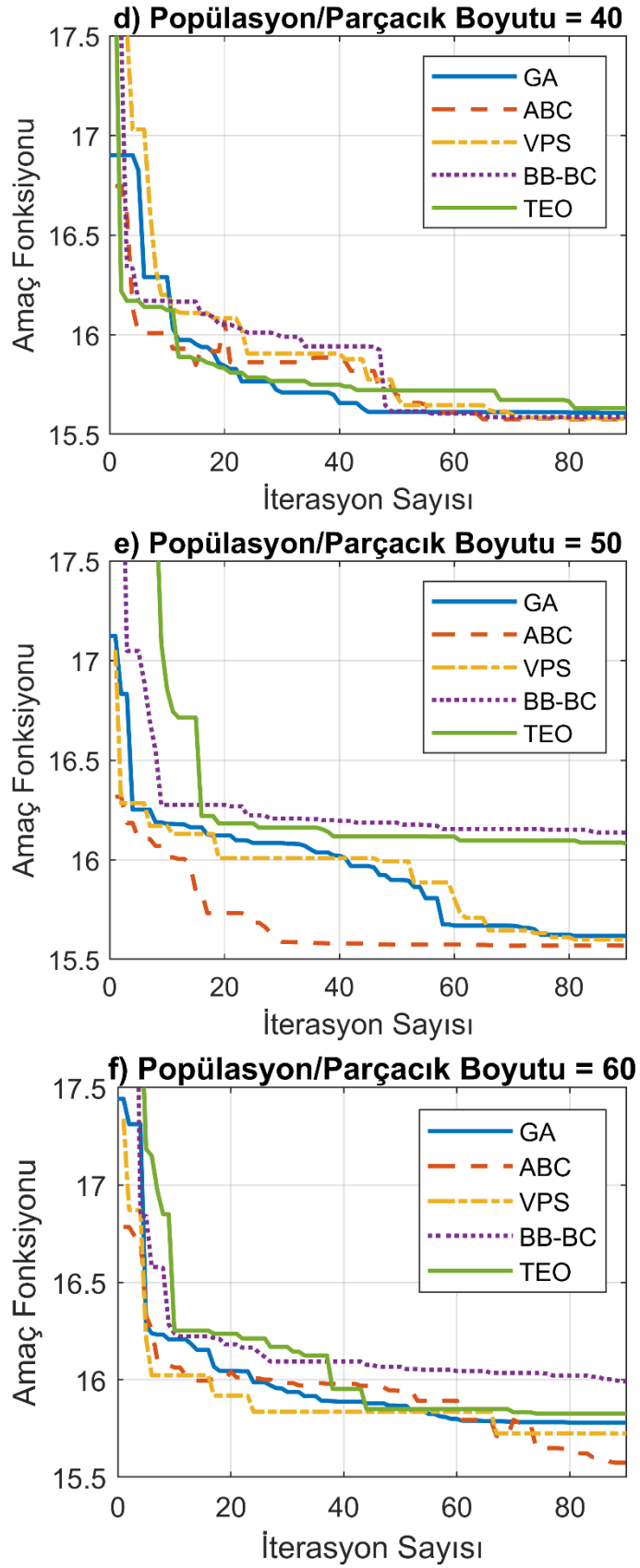
		<i>Olasılık Parametresi (p)</i>									
		J_{sum}	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9
Bellek Boyutu (STO_M)=3	PPS	10	16,191	16,091	15,920	16,024	16,100	16,108	16,124	16,038	16,157
		20	16,014	16,073	16,130	16,075	16,125	16,082	16,148	16,186	16,247
		30	15,950	16,069	16,012	16,091	16,012	16,141	15,930	16,100	16,199
		40	16,111	16,049	16,113	16,045	16,145	15,989	16,114	16,146	16,210
		50	16,051	16,056	16,069	16,096	16,134	15,962	16,02	16,125	16,103
		60	15,955	15,969	16,138	16,127	16,300	16,172	16,082	16,175	16,113
		Bellek Boyutu (STO_M)=5	PPS	10	15,902	16,123	16,086	16,093	16,048	15,976	16,138
20	15,929			15,914	15,981	15,670	16,072	16,012	16,073	16,045	16,126
30	15,998			16,055	16,059	15,843	16,089	16,111	16,100	16,188	16,165
40	16,080			15,997	15,911	16,052	16,070	16,128	16,171	16,185	15,963
50	16,090			16,102	16,133	16,002	16,119	16,111	15,974	16,120	16,025
60	15,954			16,023	16,097	16,078	15,950	16,116	16,015	16,101	16,048
Bellek Boyutu (STO_M)=7	PPS			10	16,126	16,119	16,014	16,035	16,086	15,809	15,942
		20	15,624	15,927	16,076	15,872	15,918	15,797	16,051	16,085	16,007
		30	15,965	16,054	15,874	15,938	15,849	16,014	16,105	16,130	16,026
		40	15,724	16,001	15,906	16,149	16,102	16,034	16,002	16,042	15,971
		50	16,024	15,917	15,926	16,037	15,682	16,094	16,082	16,060	16,045
		60	16,008	15,910	16,042	15,998	16,036	16,142	16,140	16,020	16,100
		Bellek Boyutu (STO_M)=9	PPS	10	16,116	16,113	16,084	16,085	16,017	15,967	16,134
20	15,915			15,881	15,623	15,820	15,956	16,048	15,842	15,813	15,919
30	15,997			15,973	15,684	15,922	16,088	16,006	16,010	15,895	15,900
40	15,686			15,847	15,631	15,891	15,945	15,890	16,039	16,003	16,155
50	15,926			15,912	16,003	15,961	16,055	16,003	16,054	15,885	16,095
60	16,042			15,875	15,827	16,066	16,019	16,019	15,995	15,956	16,014
Bellek Boyutu (STO_M)=11	PPS			10							
		20	15,980	15,714	16,069	16,083	15,884	15,836	15,866	15,959	15,898
		30	15,837	15,928	15,782	15,877	15,949	15,874	15,915	15,990	15,783
		40	15,897	15,654	15,862	16,037	16,009	15,813	15,942	15,890	15,837
		50	15,967	15,821	15,706	16,003	15,853	16,053	15,822	16,100	15,793
		60	15,931	15,854	16,065	15,918	15,997	16,069	16,118	15,803	16,032

Başlangıç parametrelerinin doğru seçilmesi, optimizasyonun başarısı için önemlidir. Tez kapsamında kullanılan meta sezgisel algoritmaların başlangıç parametrelerinin seçimi için detaylı benzetim çalışmaları yapılmıştır. Benzetim çalışmaları ile başlangıç koşullarının en düşük amaç fonksiyon değerleri üzerindeki etkisi çizelgeler ile gösterilmektedir. Başlangıç parametrelerinin belirlenmesi için yapılan benzetim çalışmaları altı farklı PPS değeri ve 100 iterasyon sayısında sabit tutulmaktadır. GA ve VPS algoritmalarında sadece bir başlangıç parametresi için değişimler incelenirken ABC, BB-BC ve TEO algoritmalarının başlangıç parametreleri iki farklı değişkene bağlı olarak incelenmiştir. Benzetim çalışmaları ile elde edilen en düşük amaç fonksiyonu değerlerinin toplandığı değerler başlangıç parametreleri olarak seçilmiştir. Çizelge 4.1 ile sırasıyla GA için çaprazlama oranının değişimini, VPS algoritmasının ise titreşim sabitinin başlangıç değerinin değişimleri incelenmiştir. Çizelge 4.2 ile BB-BC algoritmasının ilk arama alanının boyutunu sınırlama parametresi (alfa) ve parçacık konumlarının ağırlıklı ortalamasının etkisini kontrol etme parametresi (beta) başlangıç parametreleri ayrı ayrı incelenmiştir. Çizelge 4.3 ile ABC algoritmasının vazgeçme için önceden belirlenmiş tekraralama sayısı (A) ve modifikasyon oranı parametreleri incelenmiştir. Çizelge 4.4 ile TEO algoritması için bellek boyutu (STO_M) parametresi ve olasılık parametresi (p) için ayrı ayrı incelemeler yapılmıştır.

GA için çaprazlama oranı 0,1'den 0,9 aralığında taranmıştır. Başarılı gen seçimi ve çaprazlama oranı sırasıyla PPS *0.05 ve 0,5 olarak seçilmiştir. VPS algoritmasında titreşen parçacıkların ağırlık değerleri olan ω_1 , ω_2 , ω_3 sırası ile 0,3, 0,3 ve 0,4 olarak seçilmiştir. Azalan fonksiyon sabiti (α) ve titreşim sabitinin başlangıç koşulları (ρ) sırasıyla 0,05 ve 0,3 değerleri seçilmiştir. BB-BC algoritması için, alfa 0,2 ve 1 sayıları aralığında beş farklı ve beta ise 0,1'den 0,9'a kadar dokuz farklı değer için ayrı ayrı incelenmiş ve en düşük amaç fonksiyonu değerinin toplandığı alfa ve beta başlangıç parametreleri sırasıyla 0,6 ve 0,4 olarak tercih edilmiştir. ABC algoritmasında ise vazgeçme için önceden belirlenmiş tekraralama sayısı değeri (A) için 50 ile 800 aralığında farklı beş değer incelenerek 600 seçilmiştir. Benzer şekilde modifikasyon oranı ise 0,1 ve 0,9 arasındaki dokuz değere bakılarak en düşük amaç fonksiyonu değerlerinin toplandığı 0,3 değeri seçilmiştir. TEO algoritması için STO_M değeri parçacık sayısından büyük olduğu durum hesaplanamamaktadır. Bu sebepten STO_M değeri 11 iken 10 PPS değerinde sonuç elde edilmemiştir. TEO algoritması için bellek boyutu (STO_M) 3 ile 11 değerleri arasında benzetim sonuçlarına göre 9 değerinin ve olasılık parametresi (p), 0,1'den 0,9'a kadar geniş bir aralıkta incelenerek 0,3 değerinin daha düşük değerlere ulaşıldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1. Algoritmaların yaklaşma eğrileri a)PPS=10, b)PPS=20, c)PPS= 30



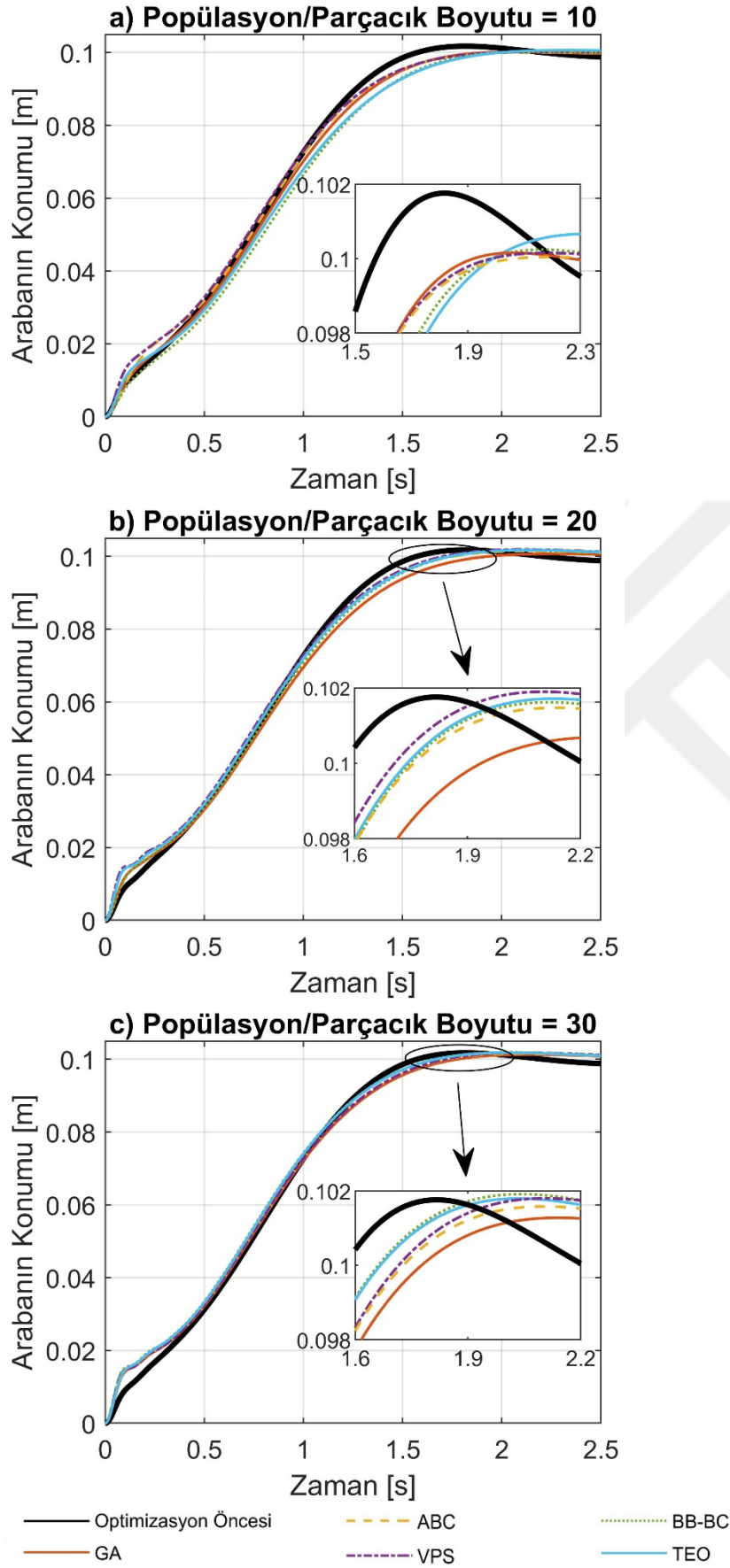
Şekil 4.2. Algoritmaların yaklaşma eğrileri d)PPS=40, e)PPS=50 f)PPS=60

Meta sezgisel arama algoritmalarının başarısını etkileyen üç kıstas bulunmaktadır. Bu kıstaslar en düşük amaç fonksiyonu değeri, optimizasyon süresi ve yaklaşma eğrileri olarak gösterilmektedir. Bu kıstaslara ek olarak algoritmaların PPS değerleri ve iterasyon sayıları da optimizasyon performansını doğrudan etkilemektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 ile altı farklı popülasyon veya parçacık boyutu değerleri için GA, ABC, VPS, BB-BC ve TEO algoritmalarının karşılaştırılmasında önemli bir kıstas olan yaklaşma eğrileri göstermektedir. Şekil 4.1 ve Şekil 4.2 daha anlaşılır olması için, iterasyon sayısının gösterildiği x ekseninin üst sınırı 90 iterasyon sayısına kadar gösterilmektedir. Şekil 4.1 a, b ve c incelendiğinde VPS algoritması diğer algoritmalara göre daha düşük amaç fonksiyonuna ulaşmaktadır. Şekil 4.2 d, e ve f incelendiğinde ise ABC algoritması diğer algoritmalarından daha iyi hesaplama yaptığı görülmektedir. 10, 20 ve 30 gibi düşük PPS değerlerinde VPS algoritması daha düşük değerler hesaplarken, 40, 50 ve 60 gibi daha büyük PPS değerlerinde ABC algoritması daha düşük değerlere inmektedir.

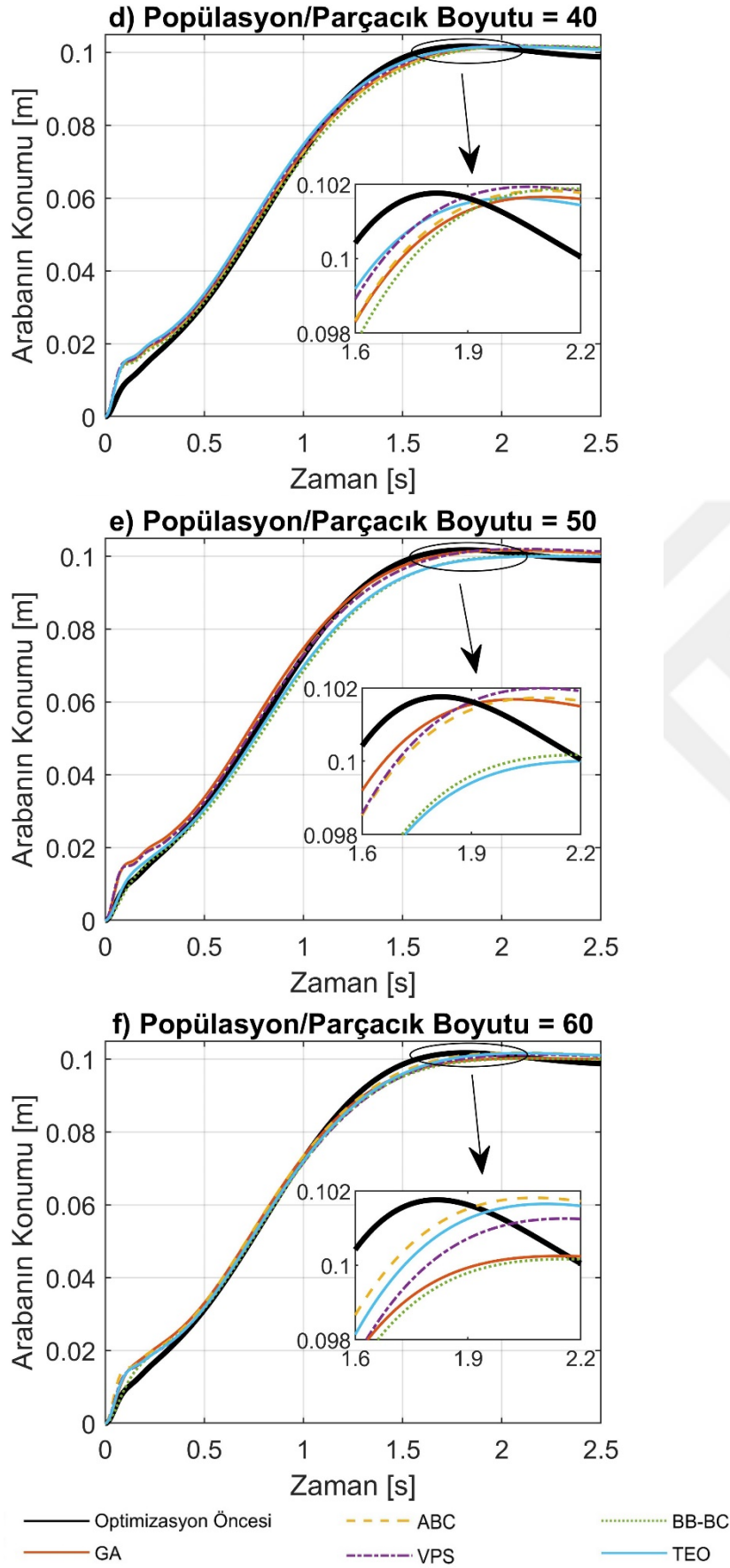
Algoritmaların doğru biçimde karşılaştırılması için diğer önemli kıstaslar ise en düşük amaç fonksiyonu değeri ve toplam optimizasyon süreleridir. Çizelge 4.5 ile algoritmalar benzetim çalışmaları sonucunda elde edilen altı farklı PPS değeri için ulaştıkları en düşük amaç fonksiyonu (J_{sum}) değeri ve optimizasyon süreleri ayrı ayrı olarak gösterilmiştir. Bu değerlerin yanında meta sezgisel algoritmalar ile optimize edilmiş LQR kontrolcünün ağırlık matrisleri (Q ve R) ve kazanç matrisi (K) sunulmuştur. Çizelge 4.5 incelendiğinde Genetik algoritma tüm PPS değerlerinde en hızlı optimizasyon hesaplamalarını gerçekleştirirken, hiçbir PPS değerinde en düşük amaç fonksiyonu değerine ulaşamamıştır. ABC algoritması, tüm PPS değerleri için en uzun hesaplama periyoduna sahip algoritmadır. Ancak yüksek popülasyon ve ya parçacık boyutu değerlerinde (40-60 PPS) en düşük amaç fonksiyon değerlerine ABC algoritması ile ulaşıldığı görülmektedir. VPS algoritması ise özellikle düşük popülasyon ve ya parçacık boyutu değerlerinde (10-30 PPS) GA, ABC, BB-BC ve TEO algoritmalarına göre daha hızlı yakınsama oranı ve daha düşük amaç fonksiyon değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Ayrıca VPS algoritması 40-60 popülasyon ve ya parçacık boyutu değerlerinden ABC algoritmasının hemen arkasında en düşük amaç fonksiyon değerlerine ulaşmaktadır. BB-BC ve TEO algoritması ise hiçbir değerlendirme kıstaslarında ve popülasyon ve ya parçacık boyutu değerlerinde diğer algoritmaların önüne geçememiştir. Çalışmada kullanılan algoritmalar ayrı ayrı değerlendirildiğinde ise: GA 40 PPS, ABC 50 PPS, VPS 20 PPS, BB-BC 40 PPS ve TEO 20 PPS değerlerinde kendilerinin en düşük amaç fonksiyon değerlerine ulaştıkları görülmektedir.

Çizelge 4.5. Meta sezgisel algoritmaları için optimizasyon sonuçları

	Q				R	K		J_{sum}	Süre [s]
	q_1	q_2	q_3	q_4	r_1				
$PPS = 10$	<i>GA</i>	99,0634	185,9586	7,8549	3,6299	0,1727	[23,9472 -37,7975 10,3899 -0,4193]	16,221	138,253
	<i>ABC</i>	119,0081	265,2181	3,0945	8,2465	2,3680	[20,4167 -28,2001 7,2965 0,5561]	16,032	317,008
	<i>VPS</i>	61,5735	145,0497	8,3883	0,0688	0,0405	[41,2324 -61,5651 21,8609 2,7419]	15,795	146,029
	<i>BBBC</i>	110,2289	228,5617	6,2315	7,6971	0,2727	[20,6176 -37,2417 8,8139 -1,3028]	16,292	147,340
	<i>TEO</i>	16,0531	59,0084	2,7997	0,3152	0,0229	[30,8802 -56,4152 16,1669 1,5244]	15,984	210,696
$PPS = 20$	<i>GA</i>	71,6647	233,6413	9,4256	0,4256	0,0468	[39,1420 -69,2089 21,7536 2,4822]	15,904	249,516
	<i>ABC</i>	86,7478	281,1262	9,6903	0,0002	0,0231	[61,3476 -104,3017 35,6937 5,9672]	15,588	567,473
	<i>VPS</i>	66,1688	234,2539	7,1147	0,0111	0,0152	[70,8738 -121,3054 41,5791 7,4638]	15,571	287,356
	<i>BBBC</i>	98,2177	297,4382	7,9027	0,8298	0,0498	[35,3109 -61,5351 17,9886 1,7488]	15,975	291,266
	<i>TEO</i>	12,2459	59,0481	1,2120	0,0200	0,0032	[60,8468 -105,8672 35,3746 5,8255]	15,623	287,108
$PPS = 30$	<i>GA</i>	69,2058	217,4550	8,0182	0,0014	0,0216	[56,5522 -94,8292 32,4765 5,2074]	15,632	364,239
	<i>ABC</i>	31,9134	252,9522	9,5365	2,9988	1,0421	[58,3130 -97,6837 33,2060 5,3554]	15,620	842,475
	<i>VPS</i>	81,3334	281,2808	8,2938	0,0261	0,0190	[67,6572 -115,3540 39,5070 6,9276]	15,579	424,549
	<i>BBBC</i>	90,9313	268,4264	8,9466	0,1560	0,0001	[67,9746 -109,7409 38,5040 6,8146]	15,600	426,125
	<i>TEO</i>	7,9213	62,9130	1,2424	0,3060	0,0036	[58,6207 -94,1842 32,4382 5,1672]	15,684	462,162
$PPS = 40$	<i>GA</i>	71,1973	225,9537	7,5174	0,0034	0,0171	[64,5399 -108,3838 37,3455 6,4157]	15,605	476,813
	<i>ABC</i>	34,6913	103,9840	6,4261	3,1314	4,4169	[68,9855 -117,8344 40,3961 7,1639]	15,571	1118,5
	<i>VPS</i>	90,9230	263,0775	8,5164	0,0099	0,0178	[71,4585 -117,8855 41,1869 7,4043]	15,578	564,094
	<i>BBBC</i>	72,1217	265,1229	7,7107	0,2361	0,0919	[63,9236 -115,3446 37,8888 6,5765]	15,586	562,607
	<i>TEO</i>	11,1822	42,4433	2,8463	0,2514	3,5104	[62,4739 -96,6849 34,5970 5,8105]	15,631	569,988
$PPS = 50$	<i>GA</i>	98,3733	270,7600	9,9426	0,0026	0,0237	[64,4685 -100,4804 35,9297 6,1227]	15,617	589,203
	<i>ABC</i>	268,4971	155,0504	3,5177	0,5935	2,8521	[67,0803 -111,5630 38,7635 6,7608]	15,568	1400,9
	<i>VPS</i>	70,9907	271,5757	7,1335	0,0188	0,0111	[72,1779 -123,5024 42,2907 7,6548]	15,596	701,636
	<i>BBBC</i>	126,4973	285,8155	3,5833	3,4650	0,4357	[19,1645 -30,9874 7,1696 -0,3276]	16,135	703,353
	<i>TEO</i>	8,8759	34,9469	0,7527	0,2105	0,0325	[30,1022 -51,4094 14,9365 1,2316]	15,965	756,766
$PPS = 60$	<i>GA</i>	73,3325	178,9917	9,7755	0,0037	0,0401	[42,7593 -63,3237 22,6894 2,9811]	15,778	712,33
	<i>ABC</i>	0,7979	93,9315	9,3712	5,4186	0,7652	[68,8227 -114,3217 39,7652 7,0304]	15,574	1674,9
	<i>VPS</i>	125,3895	266,4230	9,6445	0,8067	0,0443	[50,6009 -86,3712 28,6785 4,2541]	15,724	844,751
	<i>BBBC</i>	123,3550	272,2892	9,7290	0,9013	0,2358	[24,7617 -36,8057 10,5591 0,7416]	15,983	833,895
	<i>TEO</i>	34,9825	67,5564	2,5418	3,0953	0,0258	[46,8266 -79,5912 25,5397 3,6634]	15,827	843,532



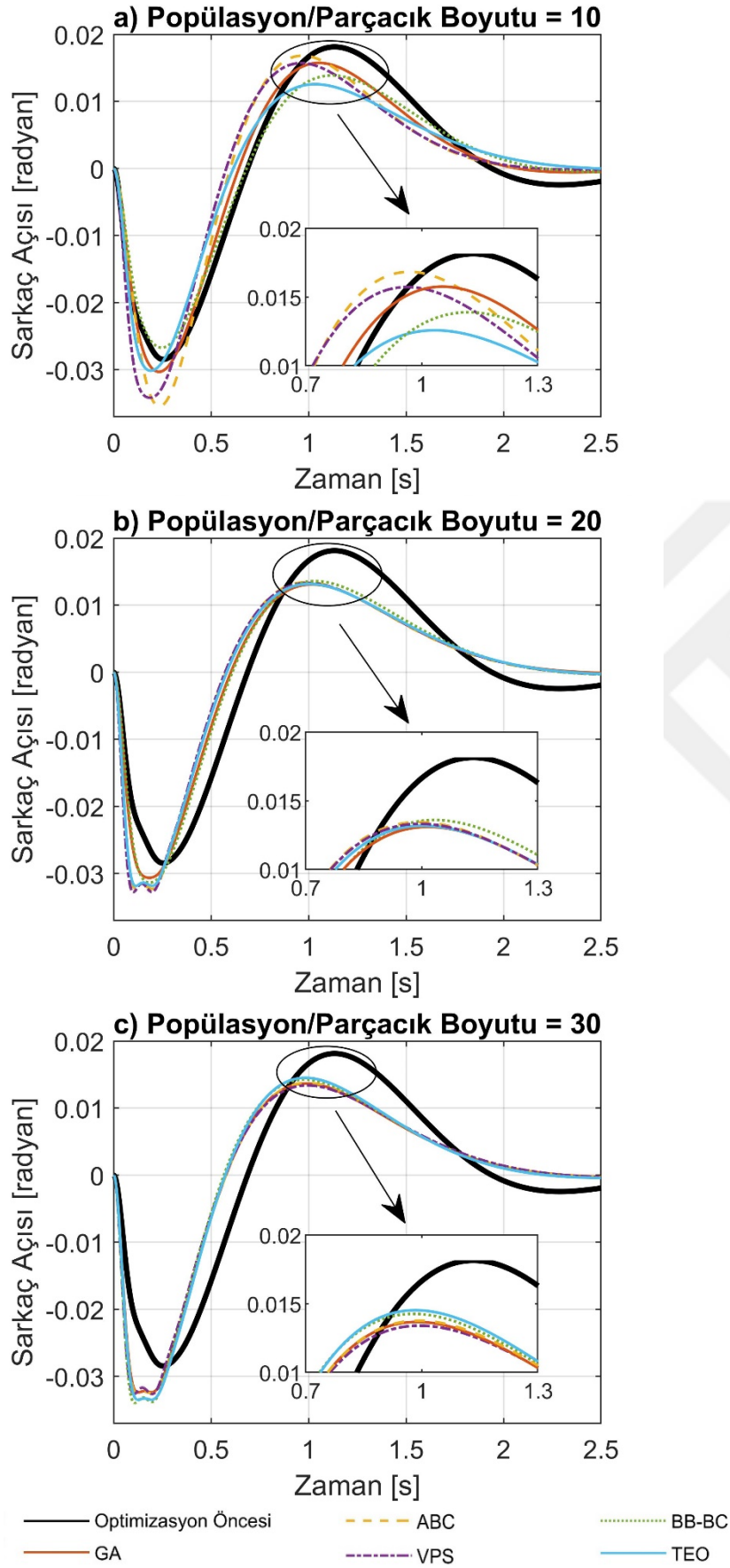
Şekil 4.3. Araba konumunun benzetim sonuçları a)PPS=10, b)PPS=20, c)PPS=30



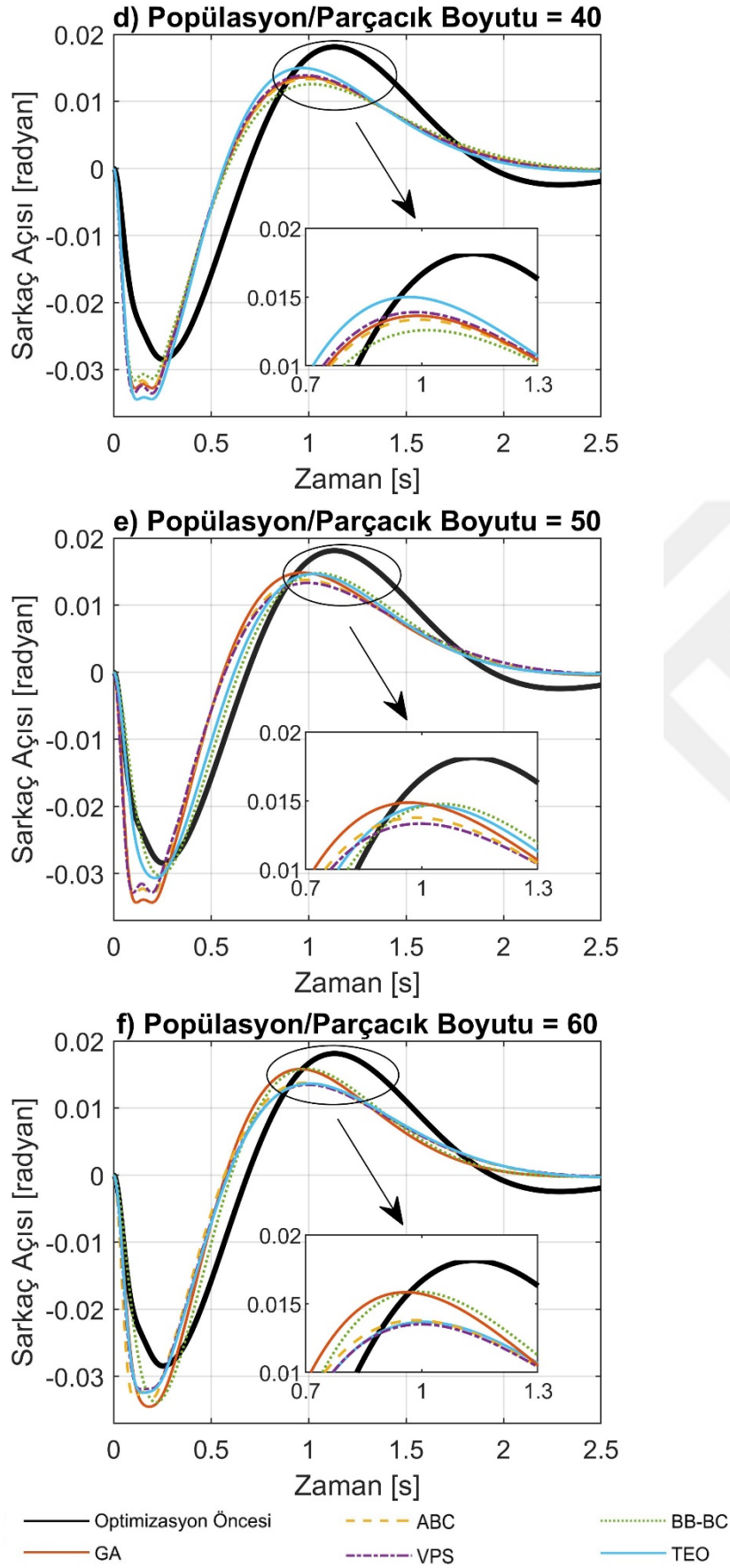
Şekil 4.4. Araba konumunun benzetim sonuçları d)PPS =40, e)PPS=50, f)PPS=60

Amaç fonksiyonun doğruluğu gösterebilmek ve algoritmaları daha başarılı karşılaştırarak kesin bir sonuç elde edebilmek için farklı popülasyon ve ya parçacık boyutu değerlerine sahip Genetik Algoritma (GA), Yapay Arı Kolonisi (ABC), Titreşimli Parçacıklar Sistemi Algoritması (VPS), Büyük Patlama-Büyük Çöküş Algoritması (BB-BC) ve Termal Değişim Optimizasyon (TEO) algoritmaları ile optimize edilmiş LQR kontrolcüler ve geleneksel olarak tasarlanmış LQR kontrolcü sonuçları zamana bağlı olarak yorumlanması gerekmektedir. Şekil 4.3 ve Şekil 4.4 ile sarkaç tipi tepe vinç sistemi için araba konumlarının benzetim sonuçlarını göstermektedir. Sunulan grafikler her PPS değeri için algoritmaların en düşük amaç fonksiyonu değerine ulaştıkları sonuçlar alınarak karşılaştırılmıştır. Bu değerler Çizelge 4.5 ile gösterilmiştir. Benzetim çalışmaları 0,1 metre için yapılmıştır. Tüm popülasyon ve ya parçacık boyutu değerleri incelendiğinde, optimize edilmemiş LQR denetleyicisinin araba konumu en hızlı kontrol yanıtını sağlamıştır. Optimizasyon algoritmaları kendi içinde değerlendirildiğinde ise 10 ve 50 PPS değerlerinde en iyi kontrol yanıtını genetik algoritma elde etmiştir. 20 PPS’de VPS algoritması, 30 PPS’de BB-BC algoritması, 40 PPS’de TEO algoritması, ve son olarak 60 PPS’de ABC algoritması istenilen referansa en hızlı ulaşan algoritmalarıdır.

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 sarkaç tipi tepe vinç sisteminin sarkaç açısı için benzetim sonuçlarını göstermektedir. Şekil 4.5 ve Şekil 4.6 incelendiğinde, optimize edilmemiş LQR denetleyicinin sarkaç salınım performansı tüm optimizasyon algoritmalarının gerisinde kalmıştır. Geleneksel yöntemler ile tasarlanan LQR denetleyici araba pozisyonunda referans noktaya hızlı ulaşmasına rağmen bu hız beraberinde artık titreşimlerin oldukça fazlaşmasına neden olmuştur. Algoritmaların birbirlerine göre durumlarının detaylı gösterilebilmesi için metnin devamında sadece meta sezgisel arama algoritmalarının sarkaç salınımları karşılaştırılmıştır. VPS algoritması 30, 50 ve 60 PPS değerlerinde en iyi sarkaç açısı değerlerine ulaştığı görülmektedir. 30, 50 ve 60 PPS’de en kötü performansları sırasıyla TEO, GA ve BB-BC algoritmaları göstermiştir. 10 PPS’de en yumuşak titreşim yanıtını TEO algoritması verirken en fazla artık titreşim ABC algoritması vermiştir. GA 20 PPS’de en başarılı performansı gösterirken, BB-BC algoritması en kötü performansı göstermiştir. 40 PPS değerinde ise BB-BC algoritması en düzgün kontrol sonucuna ulaşırken TEO algoritması en kötü sonuca ulaşmıştır. Algoritmaların sarkaç salınım performanslarının tam sırası Çizelge 4.6 ile ayrıntılı olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.5. Sarkaç açısı için benzetim sonuçları a)PPS=10, b)PPS=20,c)PPS=30



Şekil 4.6. Sarkaç açısı için benzetim sonuçları d)PPS=40, e)PPS=50, f)PPS=60

Çizelge 4.6. Tüm PPS değerlerinde algoritmaların performans sıralaması

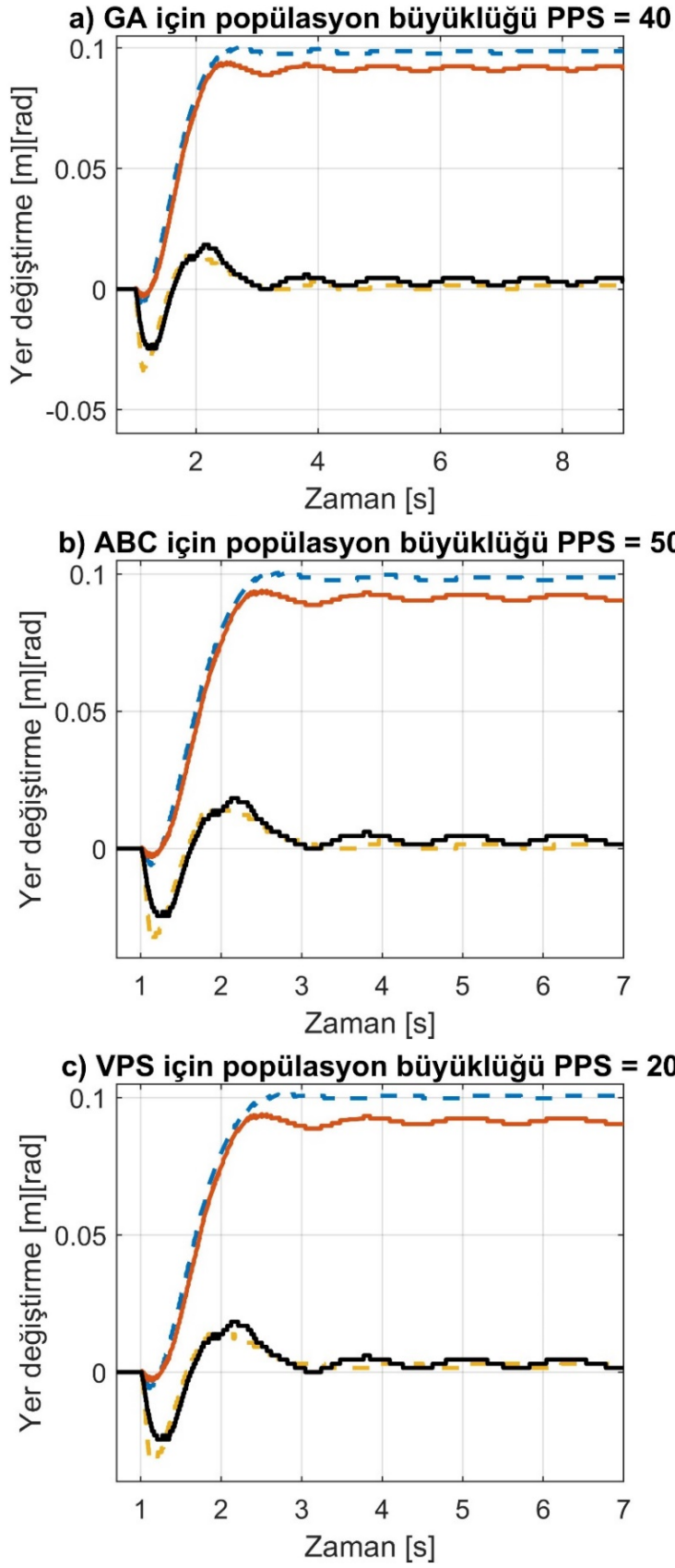
	<i>PPS</i>	<i>10</i>	<i>20</i>	<i>30</i>	<i>40</i>	<i>50</i>	<i>60</i>
<i>En Düşük Amaç Fonksiyonu Değeri</i>	<i>GA</i>	5	4	4	4	3	3
	<i>ABC</i>	3	2	3	1	1	1
	<i>VPS</i>	1	1	1	2	2	2
	<i>BB-BC</i>	4	5	2	3	5	5
	<i>TEO</i>	2	3	5	5	4	4
<i>Araba Konumu</i>	<i>GA</i>	1	5	5	4	1	4
	<i>ABC</i>	5	4	4	3	3	1
	<i>VPS</i>	2	1	3	2	2	3
	<i>BB-BC</i>	3	3	1	5	4	5
	<i>TEO</i>	4	2	2	1	5	2
<i>Sarkaç Açısı</i>	<i>GA</i>	4	1	2	3	5	4
	<i>ABC</i>	5	4	3	2	2	3
	<i>VPS</i>	3	3	1	4	1	1
	<i>BB-BC</i>	2	5	4	1	4	5
	<i>TEO</i>	1	2	5	5	3	2

1=çok iyi, 2=iyi, 3=orta, 4=kötü, 5=çok kötü

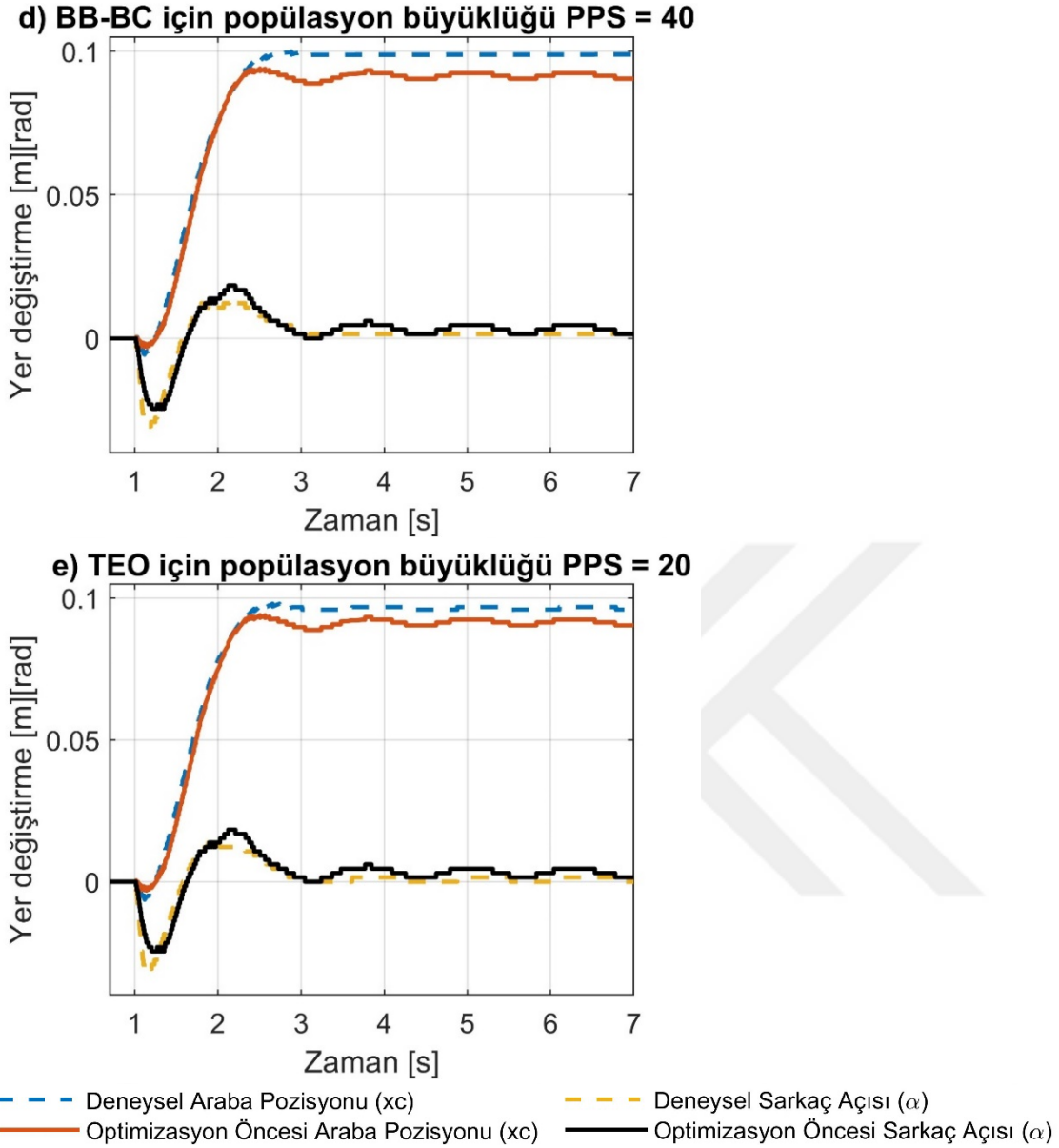
Tüm popülasyon ve ya parçacık boyutu değerleri için tez kapsamında kullanılan meta sezgisel algoritmaların en düşük amaç fonksiyonu değeri, araba konumu ve sarkaç açısı benzetim çalışmalarının başarı sırasının daha anlaşılır olabilmesi için Çizelge 4.6 ile gösterilmiştir. Çizelge 4.6 ile en başarılı algoritma 1 numara, en başarısız algoritma ise 5 numara ile gösterilmiştir. Tüm PPS değerleri için en iyi araba konumu ve en kötü sarkaç açısı performansı gösterdiği için geleneksel olarak tasarlanan optimize edilmemiş LQR denetleyici gösterilmemiştir.

4.2. Optimizasyon Algoritmalarının Deneysel Olarak Karşılaştırılması

Benzetim çalışmaları sonucunda kullanılan algoritmaların en başarılı konfigürasyonları deneysel olarak kıyaslanmıştır. Benzetim sonuçları ile GA, ABC, VPS, BB-BC ve TEO algoritmaları için en iyi sonuçların sırasıyla 40, 50, 20, 40 ve 20 PPS değerlerinde elde edildiği gözlemlenmiştir. Her algoritmanın en iyi konfigürasyonların ve geleneksel olarak tasarlanan LQR denetleyicinin araba pozisyonu ve sarkaç salınımlarının deneysel olarak karşılaştırılması Şekil 4.7 ile gösterilmektedir. Şekil 4.7 incelendiğinde kullanılan meta sezgisel arama algoritmalarının LQR denetleyicinin ağırlık matrislerini başarıyla optimize etmiş oldukları görülmüş ve benzer kontrol yanıtları elde edilmiştir.



Şekil 4.7. En iyi konfigürasyonların deneysel olarak karşılaştırılması



Şekil 4.7. (Devam) En iyi konfigürasyonların deneysel olarak karşılaştırılması

Elde edilen deneysel sonuçlar, optimizasyon algoritmalarının başlangıç parametrelerinin seçiminin doğruluğunu ve tez kapsamında oluşturulan çoklu amaç fonksiyonun kontrol hedefine uygunluğunu kanıtlamıştır.

Şekil 4.7 ile sunulan deneysel sonuçların yükselme zamanı, oturma zamanı, maksimum aşma, kalıcı durum hatası gibi kontrol yanıtlarının sayısal olarak karşılaştırılması Çizelge 4.7 ile gösterilmektedir. Verilen bu kontrol yanıtları karşılaştırılmanın doğruluğu için önemli parametrelerdir. Şekil 4.7 ve Çizelge 4.7 ile görüldüğü gibi, optimizasyon algoritmaları araba konumları ve sarkaç açısı tepkisi açısından benzer sonuçlar elde edilmektedir. Fakat araba pozisyonları (x_c) incelendiğinde optimize edilmemiş LQR denetleyici en hızlı kontrol performansını göstermiştir. Kullanılan algoritmalar içinde ise en iyi sonucu ABC algoritması

gösterirken en kötü sonucu BB-BC algoritması vermiştir. Diğer algoritmalar ise bu iki algoritmanın arasında sırasıyla GA, TEO ve VPS şeklinde sıralanmıştır. Deneysel sonuçlar sarkaç açısı (α) için incelendiğinde ise BB-BC algoritması en iyi oturma zamanına sahip olduğu görülmektedir. Diğer algoritmaların iyiden kötüye doğru sıralanması ise ABC, VPS, GA ve TEO şeklindedir. En kötü sarkaç açısı performansı iste optimize edilmemiş LQR denetleyici tarafından ulaşılmıştır. Algoritmaların en iyi konfigürasyonlarına göre en düşük amaç fonksiyonu değerine ABC algoritması ulaşmıştır fakat 100 iterasyon için en uzun hesaplama süresine sahiptir. En hızlı hesaplama süresine ise TEO algoritması ulaşmıştır.

Çizelge 4.7. En iyi konfigürasyonların kontrol yanıtlarının karşılaştırılması

	<i>GA</i>	<i>ABC</i>	<i>VPS</i>	<i>BB-BC</i>	<i>TEO</i>	<i>Opt, Öncesi</i>
<i>Popülasyon ve ya Parçacık Boyutu (PPS)</i>	40	50	20	40	20	-
<i>Amaç Fonksiyonu Değeri (Jsum)</i>	15,605	15,568	15,571	15,586	15,623	-
<i>Optimizasyon Süresi [s]</i>	476,813	1400,9	287,356	562,607	287,108	-
<i>Yükselme Zamanı [s]</i>	0,7969	0,7947	0,8467	0,8718	0,8223	0,7026
<i>Oturma Zamanı [s]</i>	1,3863	1,3697	1,4966	1,5091	1,3888	2,8481
x_c <i>Tepe Zamanı [s]</i>	1,6690	1,7070	1,9050	1,8830	1,6570	1,5050
<i>Max, Aşma [%]</i>	0,0014	0,0017	0,0054	0,0009	1,1446	-
<i>Kalıcı Durum Hatası [m]</i>	0	0	0	0	0	-0,06
<i>Yükselme Zamanı</i>	0,0219	0,0229	0,0229	0,0223	0,0229	0,0226
<i>Oturma Zamanı [sn]</i>	6,2577	5,1325	5,2235	2,0906	7,3006	7,9796
α <i>Tepe Zamanı [sn]</i>	0,1350	0,1290	0,1130	0,1150	0,1180	0,2050
<i>Tepe [rad]</i>	0,0338	0,0337	0,0322	0,0307	0,0322	0,0245

Geleneksel olarak tasarlanmış LQR denetleyiciye göre kullanılan tüm meta sezgisel algoritmalar daha başarılı sonuçlar elde etmişlerdir. Vinç arabasının kararlı durum hatası ortadan kaldırılmış ve oturma zamanında ABC algoritması tarafından %52,46 iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca sarkaç açısının oturma süresinde BB-BC algoritması %73,81'e varan iyileştirme sağlanmıştır.

Tez kapsamında kullanılan algoritmalar en düşük amaç fonksiyonu değeri, optimizasyon süresi, yaklaşma eğrileri, araba pozisyonlar ve sarkaç açıları gibi çeşitli kriterlere göre detaylı olarak değerlendirilerek çizelge ve şekiller ile gösterilmiştir. Bu kriterlere ek olarak literatürde yaygın olarak kullanılan istatistiksel performans değerlendirme kriterleri bulunmaktadır. Performans değerlendirmelerinde; ortalama mutlak hata (Mean Absolute Error-MAE), ortalama kare hata (Mean Squared Error-MSE), kök ortalama kare hata (Root Mean Square Error-RMSE) ve maksimum hata gibi kriterler yer almaktadır. Bu istatistiksel

performans kriterlerinin hesaplanması Çizelge 4.8 ile gösterilmektedir. Yapılan değerlendirmelere ek olarak sayısal veriler sunabilmek için bu temel performans değerlendirme kriterlerinden faydalanılmaktadır.

Çizelge 4.8. İstatistiksel performans değerlendirme kriterleri

MAE	$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t $
MSE	$\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2$
RMSE	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n e_t^2}$

Çizelge 4.9 ile GA, ABC, VPS, BB-BC, TEO algoritmaları ile optimize edilmiş ve optimize edilmemiş LQR denetleyicinin en iyi konfigürasyonların deneysel sonuçlarının performans değerlendirilmesi sunulmaktadır.

Çizelge 4.9. En iyi konfigürasyonların performans kriterleri

	<i>GA</i>	<i>ABC</i>	<i>VPS</i>	<i>BB-BC</i>	<i>TEO</i>	<i>Opt. Öncesi</i>
<i>PPS</i>	<i>40</i>	<i>50</i>	<i>20</i>	<i>40</i>	<i>20</i>	-
<i>x_c</i>						
<i>MAE</i>	0,0205	0,0203	0,0197	0,0205	0,0221	73,9511
<i>MSE</i>	0,1843	0,1949	0,2491	0,2009	0,0018	6,6338e+03
<i>RMSE</i>	0,0418	0,0418	0,0418	0,0420	0,0421	81,3573
<i>Max Error</i>	0,0113	0,0112	0,0112	0,0112	0,0113	93,8680
<i>a</i>						
<i>MAE</i>	0,1843	0,1949	0,2491	0,2009	0,1765	0,2756
<i>MSE</i>	7,6476e+03	7,6901e+03	7,9483e+03	7,6714e+03	7,3557e+03	6,6338e+03
<i>RMSE</i>	0,3799	0,3876	0,3998	0,3706	0,3717	0,4037
<i>Max Error</i>	0,0138	0,0138	0,0138	0,0138	0,0138	1,0547

Performans kriterlerinin sonuçları sıfıra olan uzaklığına göre değerlendirilmektedir. Hem araba pozisyonu hem de sarkaç açısı için meta sezgisel arama algoritmaları birbirlerine ve sıfıra oldukça yakın sonuçlar vermişlerdir. Fakat geleneksel olarak tasarlanan LQR denetleyicinin performans değerleri kullanılan algoritmalara göre oldukça başarısızdır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Tez çalışması, sarkaç tipi tepe vinç sistemi için kapalı çevrim LQR denetleyicinin ağırlık matrislerinin meta sezgisel GA, ABC, VPS, BB-BC ve TEO algoritmalarının tasarımı ve performans analizlerini sunması üzerine yapılmıştır. Yapılan kontrol çalışmasının temel amacı; arabanın istenilen konuma en hızlı şekilde getirilmesi ve bu konuma gelirken oluşacak artık titreşimlerin mümkün olan en kısa sürede giderilmesidir. Bu hedefe uygun olarak sistemin kontrol yanıtlarının önemli parametreleri göz önüne alınarak yeni çoklu bir amaç fonksiyonu tasarlanmıştır. En iyi optimizasyon sonucuna ulaşabilmek için algoritmalar altı farklı popülasyon veya parçacık boyutu değerinde 100 iterasyon için incelenmiştir. Bunun yanında algoritmaların başlangıç parametrelerinin seçimi için GA ve VPS algoritmasının bir parametresi, ABC, BB-BC ve TEO algoritmalarının ise iki parametresi benzetim çalışmaları yapılarak seçilmiştir. Ayrıca optimizasyon başarısını karşılaştırabilmek için geleneksel olarak LQR denetleyici tasarlanmıştır. Tez kapsamında kullanılan tüm algoritmalar hem kendi içlerinde hem de optimize edilmemiş LQR denetleyici ile birçok açıdan kıyaslanmış ve benzetim çalışmaları deneyler ile doğrulanmıştır. Performans analiz detayları tartışılmıştır.

Benzetim ve deneysel çalışmalar ile ulaşılan tüm bulgular aşağıda listelenmiştir:

- ❖ Geleneksel olarak tasarlanmış ve optimize edilmemiş LQR denetleyici arabanın referansa en hızlı ulaştığı denetleyicidir fakat sarkaç salınım performansı tüm meta sezgisel algoritmaların gerisinde kalmıştır.
- ❖ 100 iterasyon için optimizasyon süreleri değerlendirildiğinde, GA tüm parçacık sayıları için en kısa hesaplama süresine sahip algoritma olduğu görülmektedir. VPS ve BB-BC algoritmalarının optimizasyon süreleri birbirine çok yakın ve genetik algoritmanın arkasında sıralanmaktadır. TEO algoritmasının ise bu algoritmalarından daha uzun hesaplama süresine sahiptir. Yapay Arı Kolonisi (ABC) algoritması ise tüm parçacık sayıları için en uzun hesaplama süresine olan algoritma olduğu anlaşılmaktadır.
- ❖ VPS algoritması, benzetim çalışmalarına göre özellikle düşük popülasyon ve ya parçacık boyutlarında (10-30 PPS) diğer algoritmalara göre daha hızlı yakınsama oranı ve daha düşük amaç fonksiyonu değeri sağlar. Ayrıca daha büyük popülasyon ve ya parçacık boyutlarında (40-60 PPS) en düşük amaç fonksiyonuna ulaşan ikinci algoritmadır.

- ❖ ABC algoritması, benzetim sonuçlarına göre yüksek popülasyon ve ya parçacık boyutlarında (40-60 PPS) en düşük amaç fonksiyon değerlerinin ulaşan algoritmadır.
- ❖ Optimizasyon algoritmalarının birbirlerine göre durumları incelendiğinde deneysel ve benzetim sonuçlardan en hızlı araba kontrol yanıtı ABC, en yumuşak kontrol yanıtı ise BB-BC algoritmaları tarafından elde edildiği görülmüştür.
- ❖ Çalışma sonucunda, geleneksel olarak tasarlanmış LQR denetleyiciye göre optimizasyon algoritmaları ile sarkaç arabasının kararlı durum hatası ortadan kaldırılmış ve oturma zamanında ABC algoritması tarafından %52,46 iyileşme sağlanmıştır. Ayrıca sarkaç açısının oturma zamanında BB-BC algoritması %73,81'e varan iyileştirme sağlamıştır.

Tez çalışması ile elde edilen tüm veriler sarkaç tipi tepe vinç sistemi için kullanılan meta sezgisel optimizasyon algoritmalarının geleneksel olarak tasarlanan LQR denetleyiciye göre daha iyi kontrol performansı elde edildiğini gösterilmiştir. Kullanılan GA, ABC, VPS, BB-BC ve TEO algoritmaları ise birbirine karşı durumları birçok şekilde kıyaslanmış ve elde edilen veriler aktarılmıştır. Vinç sisteminin kullanım amacına göre ise çalışılan algoritmaların içinden biri seçilerek kullanılabilceği teorik ve deneysel olarak gösterilmiştir. Tez çalışması kapsamında sarkaç tipi tepe vinç sisteminin hareket kontrolü için LQR denetleyici tasarımı ve denetleyici ağırlık matrislerinin optimizasyonu başarılı şekilde yapılmış ve tasarımcının oluşturabileceği dezavantajlar giderilmiştir.

KAYNAKÇA

1. Ellen Frederick, D. (2016). Libraries, data and the fourth industrial revolution (Data Deluge Column). *Library Hi Tech News*, 33(5), 9-12.
2. Schuh, G., Potente, T., Wesch-Potente, C., Weber, A. and Prote, J. (2014). Collaboration Mechanisms to Increase Productivity in the Context of Industrie 4.0. *Procedia CIRP*, 19, 51–56.
3. Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., and Wahlster, W. (2013). Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry, *final report of the Industrie 4.0 Working Group. Forschungsunion.*
4. Indri, M., Grau, A. and Ruderman, M. (2018). Guest Editorial Special Section on Recent Trends and Developments in Industry 4.0 Motivated Robotic Solutions. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 14. 1677-1680.
5. Conker, C., Kilic, A., Mistikoglu, S., Kapucu, S. and Yavuz, H. (2014). An enhanced control technique for the elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 60(9), 592-599.
6. Abdel-Rahman, E. M., Nayfeh, A. H. and Masoud, Z. N. (2003). Dynamics and Control of Cranes: A Review. *Journal of Vibration and Control*, 9(7), 863–908.
7. Yüksel, İ. (2015). *Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri* (Beşinci Baskı). NOBEL Yayıncılık
8. Bryson, A. E., Ho Y. and Siouris G. M. (1979). Applied Optimal Control: Optimization, Estimation, and Control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9, 366-367.
9. Kaveh, A. and Bakhshpoori, Taha. (2019). *Metaheuristics: Outlines, MATLAB Codes and Examples*. Switzerland: Springer.
10. Wilde, D. J. and Beightler, C. S. (1967). *Foundations of optimization*. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall.
11. Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & Operations Research*, 13(5), 533–549.
12. Sörensen, K., Sevaux, M. and Glover, F. (2018). A history of metaheuristics. In R. Martí, P. M. Pardalos, & M. G. C. Resende (Eds.), *Handbook of Heuristics* (pp.791-808). Cham: Springer International Publishing.
13. Blum, C. and Roli A. (2003). Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison, *ACM computing surveys (CSUR)*, 35(3), 268–308.

14. Alataş, B. (2007). Kaotik Haritalı Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritmaları Geliştirme, Yayınlanmamış Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ.
15. Albayrak, G. ve Özdemir, I. (2016). Yapı Projelerinin Süre-Maliyet Optimizasyonunda Metasezgisel Algoritma Kullanımı. *ADYU Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5, 39-49.
16. Talbi, E.G. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*, John Wiley & Sons, 1-86.
17. Bilgiç, H. H. (2018). Esnek Sistemlerin Kontrolü İçin Yapay Zeka Teknikleri İle Girdi Şekillendirici Tasarımı, Yayınlanmamış Doktora Tezi, *İskenderun Teknik Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü*, İskenderun.
18. Ahmad, M.A., Ismail, R.M. and Ramli, M.S. (2009). Input shaping techniques for anti-sway control of a 3-D gantry crane system. *2009 International Conference on Mechatronics and Automation*, 2876-2881.
19. Singhose, W., Porter, L., Kenison, M. and Kriikku, E. (2000). Effects of hoisting on the input shaping control of gantry cranes. *Control Engineering Practice*, 8, 1159-11658.
20. Conker, C. (2016). Command generation techniques for elimination of residual vibrations for robotic applications, Yayınlanmamış Doktora Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana.
21. Hu, Y., Wu, B., Vaughan, J. and Singhose W. (2013). Oscillation suppressing for an energy efficient bridge crane using input shaping. *2013 9th Asian Control Conference (ASCC)*, 1-5.
22. Conker, C., Yavuz, H. and Bilgic H.H. (2016). A review of command shaping techniques for elimination of residual vibrations in flexible-joint manipulators. *Journal of Vibroengineering*, 18(5), 2947-2958.
23. Blackburn, D., Singhose, W., Kitchen, J., Patrangenaru, V., Lawrence, J., Kamoi, T. and Taura, A. (2010). Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics. *Journal of Vibration and Control*, 16(4), 477-501.
24. Ngo, Q.H., Nan, Y. and Hong, K.S. (2012). Command shaping for vibration reduction of container cranes. *12th International Conference on Control, Automation and Systems*, 651-655.
25. Ahmad, M. A., Ismail, R.M., Ramli, M.S. and Hambali, N. (2010). Analysis of IIR Filter with NCTF-PI control for sway and trajectory motion of a DPTOC system. *International Conference on Electronic Devices, Systems and Applications*, 54-58.
26. Economou, D. and Antoniadis, I. (2001). Vibration reduction of gantry crane loads with hoisting using finite impulse response (FIR) digital filters. *5th WSES/IEEE International Conference on Systems*, 22-28.

27. Ahmad, M.A., Misran, F.R., Ramli, M.S. and Raja Ismail R.M.T. (2010). Experimental Investigations of Low pass Filter Techniques for Sway Control of a Gantry Crane System. *2nd International Conference on Electronic Computer Technology*, 1-4.
28. Ang, K.H. and Chong, G. (2005). PID Control System Analysis, Design and Technology, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 13(4), 559-576.
29. Çakır, O. ve Tekin, S. (2021). Oransal İntegral Türevsel Denetleyici Parametrelerinin Değiştirilmiş Radyal Hareket Optimizasyonu ile Ayarlanması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 23, 9-21.
30. Nazemizadeh, C.M. (2013). A PID Tuning Method for Tracking Control of an Underactuated Gantry. *Universal Journal of Engineering Mechanics 1*, 45-49.
31. Ospina-Henao, P.A. and Lopez-Suspes F. (2017). Dynamic analysis and control PID path of a model type gantry crane. *Journal of Physics: Conference Series*, 850 1-15.
32. Wang, J. (2011). Simulation studies of inverted pendulum based on PID controllers. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 19(1), 440-449.
33. Wang, J., Noda, Y. and Inomata, A. (2015). Straight transfer control system using PI control and trajectory planning in overhead traveling crane. *2015 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, 522-527.
34. Çakan, A. and Onen, U. (2016). Position Regulation And Sway Control Of A Nonlinear Gantry Crane System. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 5(11), 121-124.
35. Kiss, B., Levine, J. and Mullhaupt, P. (2000). A Simple Output Feedback PD Controller for Nonlinear Cranes. *Proceedings of the IEEE Conference on Decision and Control 5*. 5097 – 5101.
36. Kawada, K., Sogo, H., Yamamoto, T. and Mada, Y. (2002). Evolutionary computation in designing a robust PD sway controller for a mobile crane. *Proceedings of the International Conference on Control Applications*, 2, 868-873.
37. Hussien, S.Y.S., Jaafar, H.I., Ghazali, R. and Razif N.R.A. (2015). The Effects of Auto-Tuned Method in PID and PD Control Scheme for Gantry Crane System. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE)*, 4(6), 121-125.
38. Koca, Ö.G. (2010). Dört kol mekanizmalı mekatronik bir sistemin akıllı yöntemlerle kontrolü, Yayımlanmamış Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 24-32.
39. Tuan, L.A., Moon, S.C., Lee, W.G. and Lee, S.G. (2013). Adaptive sliding mode control of overhead cranes with varying cable length. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 27(3), 885-893.

40. Choi, K. and Lee, J.S. (2011). Sliding Mode Control of Overhead Crane. *International Journal of Modelling and Simulation*, 31(3), 203-209.
41. Ngo, Q.H. and Hong K.S. (2012). Adaptive sliding-mode control of container cranes. *IET Control Theory and Applications*, 6(5), 662-668.
42. Zinober, A.S.I. (1979). The self-adaptive control of overhead crane operations. *IFAC Proceedings Volumes*, 12(8), 1161-1167.
43. Ramli, L., Mohamed, Z., Abdullahi, A., Jaafar, H.I. and Lazim, I.M. (2017). Control Strategies for Crane Systems: A Comprehensive Review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 95, 1-23.
44. Duong, S.C., Uezato, E., Kinjo, H. and Yamamoto, T. (2012). A hybrid evolutionary algorithm for recurrent neural network control of a three-dimensional tower crane. *Automation in Construction*, 23, 55–63.
45. Chiu, C.H. and Lin C.H. (2010). Adaptive output recurrent Neural network for overhead crane system. *IEEE Proceedings of SICE Annual Conference 2010*, 1082-1087.
46. Méndez, J., Acosta, L., Moreno, L., Torres S. and Marichal G.N. (1999). An Application of a Neural Self-Tuning Controller to an Overhead Crane. *Neural Computing & Applications*, 8, 143–150.
47. Burananda, A., Ngamwiwit, J., Panaudomsup, S., Benjanarasuth T. and Komine, N. (2002). Neural network based self-tuning control for overhead crane systems. *Proceedings of the 41st SICE Annual Conference*, 3, 1944-1947.
48. Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338-353.
49. Altaş, İ.H. (1999). Bulanık Mantık: Bulanıklılık Kavramı. *Enerji, Elektrik, Elektromekanik-3e*, 62, 80-85.
50. Yılmaz, A. (2018). *Yapay Zeka* (İkinci Baskı). Türkiye: Kodlab Yayınları.
51. Liu, C., Zhao, H. and Cui Y. (2014). Research on application of fuzzy adaptive PID controller in bridge crane control system. *IEEE 5th International Conference on Software Engineering and Service Science*, 971-974.
52. Benhidjeb, A. and Gissing G.L. (1995). Fuzzy control of an overhead crane performance comparison with classic control. *Control Engineering Practice*, 3(12), 1687-1696.
53. Bilgic, H.H., Conker, C., Yavuz, H. ve Sen M.A. (2015). Sarkaç Tipi Bir Tepe Vincinin Kontrolüne Bulanık Yaklaşım. *Uluslararası Katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu (UMTS 2015, TrISToMM 2015)*

54. Mahfouf, M., Kee, C.H., Abbod, M.F. and Linkens, D.A. (2000). Fuzzy Logic-Based Anti-Sway Control Design for Overhead Cranes. *Neural Computing and Applications*, 9(1), 38–43.
55. Ranjbari, L., Shirdel, A.H., Aslahi-Shahri, M., Anbari, S., Ebrahimi, A., Darvishi, M., Alizadeh, M., Rahmani, R. and Seyedmahmoudian, M. (2015). Designing precision fuzzy controller for load swing of an overhead crane. *Neural Computing and Applications*, 26(7), 1555–1560.
56. Burul, I., Kolonic, F. and Matuško, J. (2010) The Control System Design of a Gantry Crane Based on H_∞ Control Theory. *The 33rd International Convention MIPRO*, 183 – 188.
57. Mohd Tumari, M.Z., Saealal, M.S., Ghazali M.R. and Abdul Wahab Y. (2012). H_∞ controller with graphical LMI region profile for gantry crane system. *The 6th International Conference on Soft Computing and Intelligent Systems, and The 13th International Symposium on Advanced Intelligence Systems*, 1397-1402.
58. Moradi, H., Hajikolaie, K.H. and Bakhtiari-Nejad, F. (2009). Robust H-Infinity Control of an Over-Head Crane System With Parametric Uncertainties. *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conference*, 7, 377-383.
59. Chen, H., Fang Y. and Sun N. (2016). A Swing Constraint Guaranteed MPC Algorithm for Underactuated Overhead Cranes. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 21(5), 2543-2555.
60. Käpernick, B. and Graichen K. (2013). Model predictive control of an overhead crane using constraint substitution. *American Control Conference (ACC)*, 3973-3978.
61. Pannil, P., Smerpitak, K., La-orlao, V. and Trisuwannawat, T. (2010). Load swing control of an overhead crane. *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS)*, 1926-1929.
62. Hua, Y.J. and Shine, Y.K. (2007). Adaptive coupling control for overhead crane systems. *Mechatronics*, 17(2-3), 143–152.
63. Fang, Y., Ma, B., Wang, P. and Zhang, X. (2012). A Motion Planning-Based Adaptive Control Method for an Underactuated Crane System. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 20(1), 241-248.
64. Solihin, M.I., Wahyudi, W. and Legowo, A. (2010). Fuzzy-tuned PID Anti-swing Control of Automatic Gantry Crane. *Journal of Vibration and Control*, 16(1), 127–145.
65. Azeloglu, C. O. , Sagırlı, A. , Yazıcı, H. and Guclu, R. (2013). Gantry Crane Structure Seismic Control by the use of Fuzzy PID Controller. *Gazi University Journal of Science*, 26 (2) , 215-223.
66. Liu, D., Yi, J., Zhao, D. and Wang, W. (2005). Adaptive sliding mode fuzzy control for a two-dimensional overhead crane. *Mechatronics*, 15(5), 505-522.

67. Smoczek, J. and Szpytko, J. (2009). Pole placement approach to discrete and neuro-fuzzy crane control system prototyping. *Journal of KONES*, 16(4), 435-445.
68. Frikha, S., Djemel, M. and Derbel, N. (2018). A New Adaptive Neuro-sliding Mode Control for Gantry Crane. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 16, 559–565.
69. Bilgic, H.H., Conker, C. and Yavuz, H. (2021). Fuzzy logic–based decision support system for selection of optimum input shaping techniques in point-to-point motion systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 235(6), 795–808.
70. Tumari, M.Z.M., Shabudin, L., Zawawi, M.A. and Shah, L.H.M. (2013). Active sway control of a gantry crane using hybrid input shaping and PID control schemes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 50, 1-10.
71. Ahmad, M.A., Ismail R.M.T.R. and Ramli, M.S. (2009). Hybrid input shaping and non-collocated PID control of a gantry crane system: Comparative assessment. *IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, 1792-1797.
72. Suh, J.H., Lee J.W., Lee Y.J. and Lee K. (2005) Anti-sway position control of an automated transfer crane based on neural network predictive PID controller. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 19(2), 505-519.
73. Choi, S. U., Kim, J. H., Lee, J. W., Lee, Y. J. and Lee, K. S. (2001). A study on gantry crane control using neural network two degree of PID controller. *In ISIE 2001. 2001 IEEE International Symposium on Industrial Electronics Proceedings*, 3, 1896-1900.
74. Ahmad, M.A., Nasir, A.N.K., Hambali, N. and Ishak, H. (2009). Hybrid input shaping and PD-type Fuzzy Logic control scheme of a gantry crane system. *IEEE Control Applications, (CCA) & Intelligent Control, (ISIC)*, 1051-1056.
75. Ahmad, M. A. and Mohamed, Z. (2009). Hybrid Fuzzy Logic Control with Input Shaping for Input Tracking and Sway Suppression of a Gantry Crane System. *American Journal of Engineering and Applied Sciences*, 2(1), 241-251.
76. Esleman, E.A., Önal, G. and Kalyoncu, M. (2021). Optimal PID and fuzzy logic based position controller design of an overhead crane using the Bees Algorithm. *SN Applied Sciences*, 3, 811.
77. Solihin, M.I., Wahyudi, Kamal, M.A.S. and Legowo, A. (2008). Objective function selection of GA-based PID control optimization for automatic gantry crane. *International Conference on Computer and Communication Engineering*, 883-887.
78. Azmi, N.I.M., Yahya, N.M., Fu, H.J., and Yusoff, W.A.W. (2019). Optimization of the PID-PD parameters of the overhead crane control system by using PSO algorithm. *In MATEC Web of Conferences* (Vol. 255, p. 04001). EDP Sciences.

79. Solihin, M.I., Wahyudi, Kamal, M.A.S. and Legowo, A. (2008). Optimal PID controller tuning of automatic gantry crane using PSO algorithm. *5th International Symposium on Mechatronics and Its Applications*, 1-5.
80. Tang, X., Tao, G., Wang, L. and Stankovic, J.A. (2004). Robust and adaptive actuator failure compensation designs for a rocket fairing structural-acoustic model. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 40(4), 1359-1366.
81. Kumar M.S. and Vijayarangan S. (2005). Desing of LQR Controller for Active Suspension System. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 13,173-179.
82. Petersen, I., Johansen, T.A., Kalkkuhl, J. and Lüdemann, J. (2001). Wheel slip control in ABS brakes using gain scheduled constrained LQR. *European Control Conference (ECC)*, 606-611.
83. Hassani, K. and Lee W. (2014). Optimal Tuning of Linear Quadratic Regulators Using Quantum Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the International Conference on Control, Dynamic Systems, and Robotics (CDSR'14)*, 14-15.
84. Wang, H., Dong, H., He, L., Shi, Y. and Zhang Y. (2010). Design and Simulation of LQR Controller with the Linear Inverted Pendulum. *International Conference on Electrical and Control Engineering*, 699-702.
85. Kumar, E.V. and Jerome, J. (2013). Robust LQR Controller Design for Stabilizing and Trajectory Tracking of Inverted Pendulum. *Procedia Engineering*, 64, 169-178.
86. Baroudi, M., Saad, M. and Ghie, W. (2009). State-feedback and Linear Quadratic regulator applied to a single-link flexible manipulator. *IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO)*, 1381-1386.
87. Saini, S.C., Sharma, Y., Bhandari, M. and Satija, U. (2012). Comparison of Pole Placement and LQR Applied to Single Link Flexible Manipulator. *International Conference on Communication Systems and Network Technologies*, 843-847.
88. Kimiaghalam, B., Homaifar, A., Bikdash, M. and Dozier G. (1999). Genetic algorithms solution for unconstrained optimal crane control. *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation-CEC99*, 3, 2124-2130.
89. Solihin, M.I., Wahyudi, Legowo, A. and Akmeliawati, R. (2010). Comparison of LQR and PSO-based state feedback controller for tracking control of a flexible link manipulator. *2010 2nd IEEE International Conference on Information Management and Engineering*. 354-358.
90. Yang, B. and Xiong, B. (2010). Application of LQR Techniques to the Anti-Sway Controller of Overhead Crane. *Advanced Materials Research*, 139–141, 1933–1936.

91. Adeli, M., Zarabadipour, H., Zarabadi, S.H. and Shoorehdeli, M.A. (2011). Anti-swing control for a double-pendulum-type overhead crane via parallel distributed fuzzy LQR controller combined with genetic fuzzy rule set selection. *2011 IEEE Int. Conf. Control Syst. Comput. Eng. (ICCSCE 2011)*, 306–311.
92. He, K.D., Fang, Z.F., Zhu, D.L. and Yang, W.H. (2011). The Control System Model of Gantry Crane for Preventing Swing. *Applied Mechanics and Materials*, 135–136, 1013–1019.
93. Jaafar, H.I., Mohamed, Z., Abidin A.F.Z. and Ghani Z.A. (2012). PSO-tuned PID controller for a nonlinear gantry crane system. *2012 IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering*, 515-519.
94. Mu, C.X., Shi, M.Q., Han, Z.F. and Li, Q.M. (2014). Fuzzy-LQR Based Anti-Swing Control of Gantry Crane. *Advanced Materials Research*, 1030–1032, 1596–1601.
95. Wang, H., Liao, L., Wang, D., Wen, S. and Deng, M. (2014). Improved Artificial Bee Colony Algorithm and Its Application in LQR Controller Optimization. *Mathematical Problems in Engineering*, 1-8.
96. Bilgic, H.H., Sen, M.A. and Kalyoncu, M. (2016). Tuning of LQR controller for an experimental inverted pendulum system based on the bees algorithm. *Journal of Vibroengineering*, 18(6), 3684-3694.
97. Razmjoooy, N., Ramezani, M. and Namadchian, A. (2016). A new lqr optimal control for a single-link flexible joint robot manipulator based on grey wolf optimizer. *Majlesi Journal of Electrical Engineering*, 10(3), 53-60.
98. Ata, B. ve Çoban, R. (2017). Yapay Arı Kolonisi Algoritması ile Bir Arabalı Ters Sarkacın Lineer Kuadratik Kontrolü: Deneysel Bir Çalışma. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(2), 109-124.
99. Ghosh, A., Krishnan, T. and Subudhi, B. (2012). Brief Paper-robust Proportional-integral-Derivative Compensation of an Inverted Cart-Pendulum System: An Experimental Study. *IET Control Theory & Applications*, 6(8), 1145-1152.
100. Yazid, E. (2017). Optimizing the Gains of PD Controller Using Artificial Bee Colony for Controlling the Rigid Gantry Crane System. *INKOM Journal - Journal of Informatics, Control Systems, and Computers*, 11(1),1-8.
101. Onen, U. and Çakan, A. (2017). Anti-Swing Control of an Overhead Crane by Using Genetic Algorithm Based LQR. *International Journal Of Engineering And Computer Science*, 6(6), 21612-21616.
102. Kaya, F. and Conker, Ç. (2020). Sarkaç Tipi Tepe Vinç Sistemi İçin Genetik Algoritma ve Termal Değişim Optimizasyon Algoritmaları ile LQR Denetleyici Tasarımı ve Performans Karşılaştırması. *V. International Scientific and Vocational Studies Congress – Engineering (BILMES EN 2020)*, 127-139.

103. Solihin, M.I., Chuan, C.Y. and Astuti, W. (2020). Optimization of fuzzy logic controller parameters using modern meta-heuristic algorithm for gantry crane system (GCS), *Materials Today: Proceedings*, 29(1), 168-172.
104. Özkaya, S., Conker, Ç. ve Bilgiç, H.H. (2021). Esnek Robot Kol Sistemi İçin Lqr Denetleyici Parametrelerinin Metasezgisel Algoritmalar Kullanılarak Belirlenmesi. *Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(3), 735-752.
105. İnternet: Quanser Inc.IP02 Linear Inverted Pendulum and IP02 Linear Pendulum Gantry Experiments User Manual. URL: <https://www.made-for-science.com/de/quanser/?df=made-for-science-quanser-linear-servo-base-unit-inverted-pendulum-usermanual.pdf>, Son Erişim Tarihi: 29.01.2022.
106. Ogata, K. (1997). *Modern Control Engineering*. Upper Saddle River, N.J: Prentice Hall, 1997. Print.
107. Anderson, B.D. and Moore, J.B. (2007). *Optimal control: linear quadratic methods*. Courier Corporation.
108. Jafari, J., Ghazal, M., and Nazemizadeh, M. (2014). A LQR Optimal Method to Control the Position of an Overhead Crane. *International Journal of Robotics and Automation*, 3(4): 252-258.
109. Rao, L.V.V.G. and Narayanan, S. (2020). Optimal response of half car vehicle model with sky-hook damper using LQR with look ahead preview control. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42:471.
110. Holland, J. H. (1992). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*: MIT press.
111. Karaboga, D. and Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459-471.
112. Kaveh, A. and Ilchi Ghazaan, M. (2017). Vibrating particles system algorithm for truss optimization with multiple natural frequency constraints. *Acta Mech*, 228(1), 307-322.
113. Erol, O.K. and Eksin, I. (2006). A new optimization method: Big Bang–Big Crunch. *Advances in Engineering Software*, 37(2), 106-111.
114. Camp, C. V. (2007). Design of Space Trusses Using Big Bang–Big Crunch Optimization. *Journal of Structural Engineering*, 133(7), 999–1008.
115. Kaveh, A. and Dadras, A. (2017) A novel meta-heuristic optimization algorithm: thermal exchange optimization. *Advances in Engineering Software*, 110, 69–84

DİZİN

A

ABC · iv, xiii, 6, 7, 8, 15, 29, 31,
32, 33, 41, 43, 45, 48, 49, 52,
55, 57, 58, 59, 60, 61

Açık çevrim kontrol · 10, 11, 26

ağırlık matrisleri · xii, 4, 6, 13,
15, 16, 29, 41, 48

amaç fonksiyonu · iv, 7, 8, 29,
30, 45, 48, 52, 55, 58, 60

arabanın pozisyonu · 30

artık titreşimler · 15

B

BB-BC · iv, xiii, 6, 7, 8, 29, 31,
36, 38, 41, 42, 45, 48, 52, 55,
57, 58, 59, 60, 61

benzetim · 6, 7, 8, 9, 15, 16, 17,
41, 42, 43, 44, 45, 48, 50, 51,
52, 53, 54, 55, 60, 61

D

deneysel · 7, 9, 14, 16, 17, 20, 41,
55, 57, 59, 60, 61

G

GA · iv, xiii, 6, 8, 29, 31, 41, 45,
48, 49, 52, 55, 57, 58, 59, 60,
67

H

hareket kontrolü · 2, 3, 6, 7, 8,
10, 11, 13, 14, 15, 17

K

kapalı çevrim kontrol · 3, 6, 8,
11, 12, 13, 26

L

LQR · i, iv, v, xiii, 3, 6, 7, 8, 9,
13, 14, 15, 16, 17, 27, 28, 29,
30, 31, 41, 48, 52, 55, 57, 58,
59, 60, 61, 68, 69

LQR denetleyici · 4, 9, 28, 29,
31, 52, 55, 59, 60

M

meta sezgisel · 4, 6, 7, 8, 17, 29,
34, 38, 41, 45, 48, 52, 55, 59,
60

O

Optimizasyon · iv, 4, 7, 8, 16, 29,
38, 41, 52, 55, 58, 61, 63, 69

P

PPS · 7, 41, 42, 43, 44, 45, 46,
48, 49, 50, 52, 53, 55, 58, 59,
60, 61

Q

Quanser · 18, 22

S

sarkaç açısı · 18, 30, 52, 55, 57,
59

Sarkaç tipi tepe vinç sistemi · 7,
23, 24, 25

T

TEO · iv, xiii, 6, 7, 8, 29, 31, 38,
40, 41, 44, 45, 48, 49, 52, 55,
57, 58, 59, 60

V

VPS · iv, xiii, 6, 7, 8, 29, 31, 34,
35, 36, 41, 45, 48, 49, 52, 55,
57, 58, 59, 60



TEKNOVERSİTE



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

İSTE

