

Özge GÜLBAŞ



**İSKENDERUN TEKNİK**

ÜNİVERSİTESİ

LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**YÜKSEK  
LİSANS  
TEZİ**

**FIRÇASIZ DC MOTORLAR  
İÇİN YENİ BİR HIZ  
KONTROL YÖNTEMİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ**

**Özge GÜLBAŞ**

**ELEKTRİK-ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ  
ANABİLİM DALI**

**HAZİRAN 2021**

**HAZİRAN 2021**



**FİRÇASIZ DC MOTORLAR İÇİN YENİ BİR HIZ KONTROL  
YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ**

**Özge GÜLBAŞ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ  
ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**Haziran 2021**

Özge GÜLBAŞ tarafından hazırlanan “FİRÇASIZ DC MOTORLAR İÇİN YENİ BİR HIZ KONTROL YÖNTEMİNİN GELİŞTİRİLMESİ” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ / OY ÇOKLUĞU ile İskenderun Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

**Danışman:** Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

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

.....  
.....

**Başkan:** Prof. Dr. Yakup HAMEŞ

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

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

.....  
.....

**Üye:** Prof. Dr. Ahmet TEKE

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Çukurova Üniversitesi

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

.....  
.....

**Üye:** Dr. Öğr. Üyesi Ömer TÜRKSOY

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, İskenderun Teknik Üniversitesi

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

.....  
.....

Tez Savunma Tarihi: 22/06/2021

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 görüntülediğinde 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

Özge GÜLBAŞ

22 / 06 / 2021

FIRÇASIZ DC MOTORLAR İÇİN YENİ BİR HIZ KONTROL YÖNTEMİNİN  
GELİŞTİRİLMESİ  
(Yüksek Lisans Tezi)

Özge GÜLBAŞ

İSKENDERUN TEKNİK ÜNİVERSİTESİ  
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Haziran 2021

ÖZET

BLDC motorlar, uzay sistemlerinde, otomotiv alanlarında, askeri sahada, robotik sistemlerde, tıp elektroniklerinde, bilgisayar sistemlerinde, ev aletlerinde vb. günümüzdeki pek çok endüstriyel alanlarda sıklıkla kullanılmaktadır. BLDC motorların sahip olduğu avantajları belirtirsek; verimleri çok yüksektir, yapıları sağlamdır, güvenilirlikleri yüksektir, yapılarında fırça bulunmaması sebebiyle ark oluşmaz ve karbon tozları bulunmaz, yüksek hızlar elde edilebilir, kolay soğutulabilir, hız kontrolü mümkündür, fırçalı motorların aksine uyarma akımları gerektirmezler ve sessiz olarak çalışırlar. Günümüzde, kontrol tekniklerinin ve teknolojinin düzeyinin ilerlemesi ile BLDC motorlarının kullanımı artmış, hem de süregelen dezavantajları elimine edilmeye doğru yol almıştır.

Literatür çalışmaları incelendiğinde BLDC motorlar üzerine yapılan çalışmalarda hız kontrolüne yoğunlaşıldığı gözlenmiştir. BLDC motorların hız kontrollerinin hassas bir şekilde yapılmasında bugüne kadar yapay sinir ağları, bulanık mantık, dalgacık tekniği, genetik algoritma, Anfis gibi çeşitli yöntemler kullanılmıştır. Ayrıca BLDC motor hız kontrolünde bu yöntemlerle birlikte ya da bağımsız olarak PI ve PID kontrolü de kullanılmıştır. Bu tez çalışmasında mevcut yöntemlerin dışında hibrit bir kontrol yöntemi önerilmiş, parametrelerin optimizasyonu PSO ile gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlarda elde edilen sonuçlar önerilen hibrit kontrol yöntemini BLDC motorlara uygulanabileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler : BLDC Motor, PI, STC, PSO, SCA, Hibrit kontrol  
Sayfa Adedi : 40  
Danışman : Prof. Dr. Yakup HAMEŞ  
İkinci Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT

# DEVELOPMENT OF A NEW SPEED CONTROL METHOD FOR BRUSLESS DC MOTORS

(M. Sc. Thesis)

Özge GÜLBAŞ

ISKENDERUN TECHNICAL UNIVERSITY  
INSTITUTE OF GRADUATE STUDIES

June 2021

## ABSTRACT

BLDC motors are used in space systems, automotive fields, military field, robotic systems, medical electronics, computer systems, home appliances, etc. It is frequently used in many industrial areas today. If we indicate the advantages of BLDC motors, their efficiency is very high, structure is strong, and reliability is high. They do not have any arc and carbon dust due to their lack of brushes, high speeds can be achieved, BLDC motor can be easily cooled, speed control is possible, unlike brushed motors, they do not require excitation currents and operate silently. At the present time, with the advancement of control techniques and technology, the use of BLDC motors has increased, and the ongoing disadvantages have been eliminated.

When the literature studies were examined, it was observed that the studies on BLDC motors focused on speed control. Various methods such as artificial neural networks, fuzzy logic, wavelet technique, genetic algorithm, Anfis have been used to control the speed of BLDC motors precisely. In addition, PI and PID control are used together with these methods or independently in BLDC motor speed control. In this thesis, a hybrid control method has been proposed. Apart from the existing methods, and the optimization of the parameters is performed with PSO. The results obtained from the simulations showed that the proposed hybrid control method can be applied to BLDC motors.

Key Words : BLDC Motor, PI, STC, PSO, SCA , Hybrid control  
Page Number : 40  
Supervisor : Prof. Dr. Yakup HAMEŞ  
Second Supervisor : Assist. Prof. Dr. Murat FURAT

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca ilminden faydalandığım, insani ve ahlaki değerlerini örnek edindiğim, engin bilgi ve birikimlerini benimle büyük bir titizlikle paylaşıp, beni yönlendiren saygıdeğer danışmanlarım Prof. Dr. Yakup HAMEŞ ve Dr. Öğr. Üyesi Murat FURAT'a sonsuz teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Hayatım boyunca beni her zaman destekleyen, emekleri ile beni bu güne kadar getiren ailem ve dostlarıma, yoğun çalışmalarım süresince yanımda bulunup desteği ile bana güç veren eşim Şekip KURT'a sonsuz teşekkür ederim.



**İÇİNDEKİLER**

	<b>Sayfa</b>
ÖZET .....	iv
ABSTRACT.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI.....	11
2.1. Ateş Böceği Algoritması .....	11
2.2. Yarasa Algoritması.....	12
2.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması .....	12
2.4. Kurt Kolonisi Algoritması .....	13
2.5. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu .....	13
2.6. Sinüs-Kosinüs Algoritması .....	15
3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	18
3.1. BLDC Motor Özellikleri .....	18
3.2. Kontrol Yöntemleri .....	18
3.3. Optimizasyon Yöntemleri .....	18
3.4. Optimizasyon Sonuçları .....	20
3.4.1. PI Optimizasyonun Sonuçları .....	20
3.4.2. STC Optimizasyonun Sonuçları .....	24
3.5. Referans İzleme Performansı .....	27
3.6. Genel Performans Değerlendirmesi .....	29



	<b>Sayfa</b>
4. ST+ID HİBRİT KONTROL VE OPTİMİZASYONU.....	30
5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ.....	35
KAYNAKLAR .....	36
DİZİN .....	40



## ÇİZELGELERİN LİSTESİ

<b>Çizelge</b>	<b>Sayfa</b>
Çizelge 1.1. BLDC motor ile fırçalı da motorunun karşılaştırılması.....	3
Çizelge 3.1. BLDC motor modelinin özellikleri.....	18
Çizelge 3.2. Optimizasyon Algoritmalarının Parametreleri .....	18
Çizelge 3.3. Optimizasyon algoritmalarının parametreleri.....	19
Çizelge 3.4. Optimum PI parametreleri .....	21
Çizelge 3.5. Optimum STC parametreleri .....	25
Çizelge 3.6. Çıkış performans değerleri .....	29
Çizelge 4.1. Çıkış performans değerleri .....	33

## ŞEKİLLERİN LİSTESİ

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 1.1. BLDC Motor sürücü sistemi.....	3
Şekil 1.2. BLDC motor eşdeğer diyagramı.....	4
Şekil 1.3. PID kontrolcü blok diyagramı .....	6
Şekil 2.1. Algoritmaların sınıflandırılması .....	11
Şekil 2.2. PSO Algoritmasının akış diyagramı .....	15
Şekil 2.3. Sinüs-kosinüs algoritmasının akış şeması .....	17
Şekil 3.1. PI kontrolünün SCA ile uygunluk fonksiyonus izleme performansı.....	20
Şekil 3.2. PI kontrolcünün PSO ile uygunluk fonksiyonu izleme performansı.....	21
Şekil 3.3. SCA ile optimize edilmiş PI kontrolcü ile elde edilen çıkış.....	22
Şekil 3.4. PSO ile optimize edilmiş PI kontrolcü ile elde edilen çıkış .....	22
Şekil 3.5. SCA ile optimize edilmiş PI kontrolcünün kontrol sinyali.....	23
Şekil 3.6. PSO ile optimize edilmiş PI kontrolcünün kontrol sinyali .....	23
Şekil 3.7. SCA ile STC'nin uygunluk fonksiyonu izleme performans grafiği .....	24
Şekil 3.8. PSO ile STC'nin uygunluk fonksiyonu izleme performans grafiği.....	25
Şekil 3.9. SCA ile optimize edilmiş STC ile elde edilen çıkış .....	26
Şekil 3.10. PSO ile optimize edilmiş STC ile elde edilen çıkış.....	26
Şekil 3.11. SCA ile optimize edilmiş STC kontrol sinyali .....	27
Şekil 3.12. PSO ile optimize edilmiş STC kontrol sinyali.....	27
Şekil 3.13. PSO algoritması ile elde edilen PI ve ST kontrolcülerinin performans izleme grafiği .....	28
Şekil 3.14. PSO algoritması ile elde edilen STC ve SCA kontrolcülerinin performans izleme grafiği.....	28
Şekil 4.1. ST+ID kontrol blok diyagramı .....	30

<b>Şekil</b>	<b>Sayfa</b>
Şekil 4.2. ST+ID kontrolcünün PSO ile uygunluk fonksiyonu izleme performansı .....	32
Şekil 4.3. PSO ile elde edilen ST+ID kontrolcü kullanılarak elde edilen motor hızı grafiği .....	32
Şekil 4.4. PSO ile optimize edilmiş ST+ID kontrolcünün kontrol sinyali .....	33
Şekil 4.5. ST+ID performans izleme grafiği.....	34
Şekil 4.6. Farklı hızlar için ST+ID ile BLDC motor çıkışı.....	34



## SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklamalar</b>
<b>ABA</b>	Firefly Algorithm (Ateş Böceği Algoritması)
<b>ABC</b>	Artificial Bee Colony Algorithm (Yapay Arı Kolonisi Algoritması)
<b>BLDC Motor</b>	Brushless Direct Current Motor (Fırçasız DC Elektrik Motoru)
<b>DA</b>	Doğru Akım
<b>DC</b>	Direct Current
<b>FLC</b>	Fuzzy Logic Control (Bulanık Mantık Kontrolü)
<b>KKA</b>	Wolf Colony Algorithm (Kurt Kolonisi Algoritması)
<b>KKK</b>	Kayan Kipli Kontrol
<b>P</b>	Proportional (Oransal)
<b>PD</b>	Proportional Derivative (Oransal Türevsel)
<b>PI</b>	Proportional Integral (Oransal Integral)
<b>PID</b>	Proportional Integral Derivative (Oransal İntegral Türevsel)
<b>PSO</b>	Particle Swarm Optimization (Parçacık Sürüsü Optimizasyonu)
<b>SCA</b>	Sine-Cosine Algorithm (Sinüs Kosinüs Algoritması)
<b>SMC</b>	Sliding Mode Control
<b>STC</b>	Super Twisting Control (Üstün Burulma Kontrolü)

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklamalar</b>
$R$	Direnç
$L$	Stator sargılarının öz indüktansı
$M$	İki stator sargısı arasındaki karşılıklı indüktans
$\Omega$	Açısal Hız
$T_e$	Elektromanyetik Tork
$T_L$	Yük Torku
$J$	Dönme Eylemsizliği

$\beta_v$	Akı Yoğunluğu
$k_p$	Oransal Kazanç
$k_i$	İntegral Kazanç
$k_d$	Türev Kazancı
$r(t)$	Referans Girişi
$e(t)$	Hata
$u$	Kontrolcü Çıkışı
$y$	Sistemin Çıkışı
$\alpha$	Kontrol Parametresi
$\beta$	Kontrol Parametresi
$\rho$	Kontrol Parametresi
$\sigma(t)$	Kayma Fonksiyonu
$\sigma_0$	Sistemin başlangıç hatası
$p$	Çift Kutup Sayısı

## 1. GİRİŞ

Endüstriyel uygulamalarda elektrik motorları, mekanik sistemlerin istenen nitelikte hareketini sağlamak amacıyla kullanılır. Niteliğin türüne göre farklı yapıda üretilen motorlar olduğu gibi genel amaçlı motorlar da kullanılmaktadır. Genel amaç çerçevesinde düşünüldüğünde sabit devirli, az bakım gerektiren, asenkron motorlar tercih edilmektedir. DA motorları ise armatür gerilimine bağlı olarak devri değiştirilebilen motorlar olduğundan, sıklıkla devir ayarı gerektiren yerlerde tercih edilmektedir. Bunların dışında özel amaçlara yönelik birçok motor türü de mevcuttur.

Son yıllarda endüstriyel üretim aşamalarında ve günlük hayatta ihtiyaç duyulan çeşitli makinalarda BLDC motorların tercih edilmeye başlanmıştır. Dolayısıyla, literatürde BLDC motor kontrolü üzerine yapılan çalışmalarda artış gözlenmiştir [1].

Uygulanan kontrol yöntemleri arasında PI kontrol önemli yer kaplamaktadır. PI kontrol, basit yapısı ve parametrelerinin ayarlanmasındaki kolaylık nedeniyle BLDC motorların hız kontrolü için önerilen en popüler kontrol yöntemlerinden biri olmuştur [2, 3].

PI kontrol parametreleri iyi ayarlandığında, PI kontrol yük değişimleri sırasında sabit hız ve tork verir. Bununla birlikte motor doğrusal olmayan bir yüke bağlandığında, motorun çıkışı doğrusal olmayan özellikler gösterir. Bu nedenle PI kontrolünün kendisi yeterli performansı göstermeyebilir [4]. Bu sorunun üstesinden gelmek amacıyla bulanık mantık, genetik algoritma, sinir ağları, dalgacık teknikleri ve PI kontrolcüsü ile veya tek başına kullanılması önerilmiştir [5-8].

Ahmed ve diğerleri, yaptıkları çalışmada PI ile FLC kontrol yöntemlerini BLDC motor üzerinde simülasyon yaparak karşılaştırmıştır. Hem yüklü hem de yüksüz durumda elde edilen sonuçlar değerlendirildiğinde FLC yönteminin PI üzerinde üstünlüğü ortaya konmuştur. Bununla beraber uygun tasarım yapıldığında FLC yönteminin PI kontrolcüye göre çok daha iyi olduğu vurgulanmıştır [9].

Ashok ve diğerleri, çalışmalarında PI, FLC ve hibrit sistem (FLC+PI) kontrol yöntemlerini BLDC motor üzerinde simülasyonda karşılaştırma yapmıştır. FLC ve hibrit kontrolde aşım gözlenmemiş, PI' da %20 aşım gözlenmiştir. Bu çalışmada, hibrit sistemin üstünlüğü aşım ve tork bakımından belirtilmiştir. Fakat hibrit kontrol için donanım

uygulamasında yer alan tasarım yönü ve maliyet daha fazla olacağı söylenmiştir. Bu nedenle, karşılaştırmalı analizden, hibrit kontrol yönteminin yüksek güçlü uygulamalar için daha uygun olduğu belirtilmiştir [10].

Jahir Abbas Mullick, bu çalışmasında BLDC motorun Matlab programında simülasyonu ve hız kontrolü üzerine çalışmıştır. PI , PID ve FLC karşılaştırılmıştır. FLC kontrol, BLDC motorun kontrolünde PI ve PID'ye göre daha iyi performansa sahip olduğu belirtilmiştir [11].

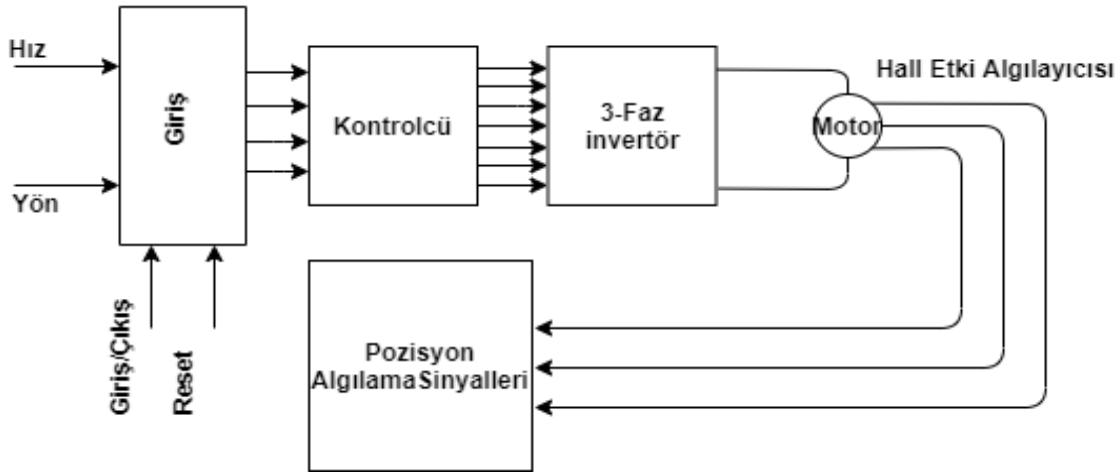
Bu çalışmada BLDC motorun matematiksel modellemesi üzerinde PI ve STC ile hız kontrolleri yapılmıştır. Optimum kontrolör parametreleri SCA ve PSO algoritmaları kullanılarak aranmıştır. Optimizasyon algoritmalarının performansını net bir şekilde karşılaştırmak için simülasyonların tümünde parametreler için aynı arama uzayı seçilmiştir.

### BLDC Motor

BLDC motor bir DC motor türüdür. Fırçasız DC motorlar iletken akımları ile motora yerleştirilmiş olan sabit mıknatısların manyetik alanla etkileşimleri sonucu indüklenen moment ile enerji dönüşümünü gerçekleştiren elektrik makineleridir. Bu motorlarda fırça ve kolektör bulunmamaktadır. Bu özelliği ile ark oluşmamakta yanıcı ve patlayıcı alanlarda kullanılabilirler. komütasyon belirli rotor pozisyonlarında otomatik olarak gerçekleştirilir. Stator fazının sargıları birçok şekilde yapılandırılabilir [12].

BLDC motor, rotor, stator, geri besleme üniteleri (hall etki algılayıcısı vb.) evirici sürücü katmanı ve denetleyici ünitelerden oluşmaktadır. Şekil 1.1'de bir BLDC motorun genel yapısı gösterilmiştir [13].





Şekil 1.1. BLDC Motor sürücü sistemi

Çizelge 1.1 incelendiğinde BLDC motorun Fırçalı DA motorları yerine tercih edilmesinde aşağıdaki nedenler gösterilebilir [14]:

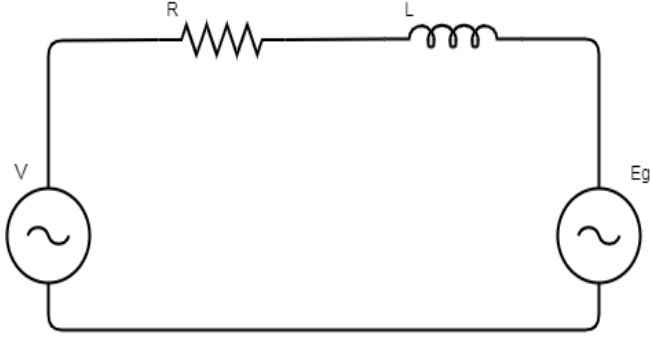
- Uzun kullanım ömrü
- Yüksek dinamik yanıt
- Yüksek verimlilik
- Daha iyi hız ve tork özellikleri
- Gürültüsüz çalışma
- Daha yüksek hız aralığı
- Daha yüksek tork-ağırlık oranı
- Fırçasız olduğundan daha az bakım ihtiyacı

Çizelge 1.1. BLDC motor ile fırçalı da motorunun karşılaştırılması

ÖZELLİKLER	BLDC MOTOR	FIRÇALI DA MOTORU
<b>Komütasyon</b>	Elektronik Tabanlı	Fırçalı komütasyon
<b>Tork / hız</b>	Düz (flat)	Orta Düz
<b>Boyut oranına göre çıkış gücü</b>	Yüksek	Yüksek
<b>Verimlilik</b>	Yüksek	Orta
<b>Hız Yüksek Orta</b>	Hız Yüksek Orta	Hız Yüksek Orta
<b>Kontrol</b>	Karmaşık & Pahalı	Basit & Ucuz
<b>Maliyet</b>	Yüksek	Düşük
<b>Bakım</b>	Az Bakım	Periyodik Bakım
<b>Ömür</b>	Uzun	Kısa
<b>Gürültü</b>	Düşük	Yüksek
<b>Rotor ataleti</b>	Düşük	Yüksek

## BLDC Motorun Matematiksel Modelinin Elde Edilmesi

Bu konu başlığında Şekil 1.2’de eşdeğer devre diyagramı belirtilen BLDC motorun matematiksel modelini elde etmek amacıyla yazılan formüller gösterilmiştir.



Şekil 1.2. BLDC motor eşdeğer diyagramı

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & 0 & 0 \\ 0 & L_{bb} & 0 \\ 0 & 0 & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (1.1)$$

Her statorun direnci eşit olduğundan, üç stator sargısının yapısı tamamen simetrik olduğundan denklemler:

$$R_a = R_b = R_c = R \quad (1.2)$$

$$L_{aa} = L_{bb} = L_{cc} = L \quad (1.3)$$

$$L_{ab} = L_{bc} = L_{ba} = L_{ca} = L_{cb} = M \quad (1.4)$$

Üç fazlı motor için denklem;

$$i_a = i_b = i_c = 0 \quad (1.5)$$

1.3 ve 1.5 denklemlerini göz önünde bulundurarak aşağıdaki denklemi oluşturabiliriz.

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

BLDC motorun tork denklemi şu şekilde tanımlanır:

$$T_e = \frac{E_a i_a + E_b i_b + E_c i_c}{\Omega} \quad (1.7)$$

BLDC motorun hareket denklemi aşağıdaki gibi tanımlanır [15]:

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega}{dt} + \beta_v \Omega \quad (1.8)$$

Burada;

$L$ : Stator sargılarının öz indüktansı (H)

$M$ : İki stator sargısı arasındaki karşılıklı indüktans (H)

$\Omega$ : Açısal Hız (rad/s)

$T_e$  = Elektromanyetik Tork

$T_L$  = Yük Torku

$J$ : Dönme Eylemsizliği

$E_a, E_b, E_c$ : Her bir fazın zıt Emk değeri (V)

$\beta_v$ : Akı Yoğunluğu (Ns/m)

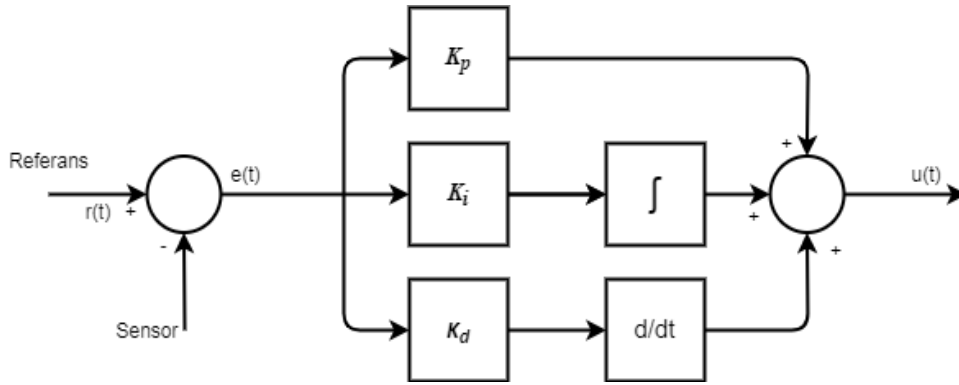
### Kontrol Yöntemleri

Kontrolcü türleri:

- P (Oransal) Kontrol
- PI (Oransal İntegral) Kontrol
- PD (Oransal Türevsel) Kontrol
- PID (Oransal İntegral Türevsel) Kontrol

### PID kontrol

PID en yaygın kullanılan kontrol türlerinden biridir [16]. PID kontrollünün blok diyagramı Şekil 1.3'de belirtilmiştir.



Şekil 1.3. PID kontrolcü blok diyagramı

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{d}{dt} e(t) \quad (1.9)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (1.10)$$

$r(t)$  : Referans girişi

$e(t)$  : Giriş ile sistem arasındaki geri beslemenin farkı olan hatayı

$u$  : Kontrolcü çıkışı

$y$  : Sistemin çıkışı

$k_p$ ,  $k_i$  ve  $k_d$  sırasıyla PID'nin kontrol parametreleridir. Her kontrol parametresinin etkileri aşağıdaki tabloda özetlenmiştir.

Çizelge 1.2. PID kontrol parametrelerinin etkisi [17]

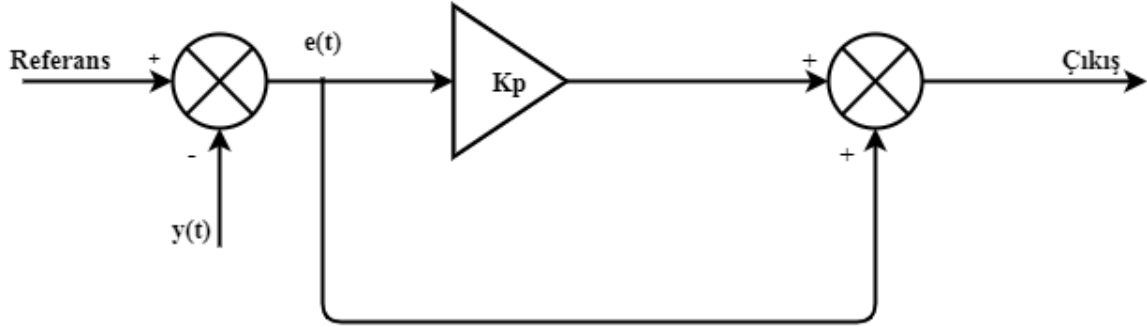
Kontrol Parametreleri	Yükselme Zamanı	Aşım	Yerleşme Zamanı	Kararlı Durum Hatası
$k_p$	Azalır	Artar	Küçük Değişim	Artar
$k_i$	Azalır	Artar	Artar	Yok eder
$k_d$	Küçük Değişim	Azalır	Azalır	Değişmez

### P kontrol (Oransal Kontrol)

P kontrolde kontrol sinyali o andaki hata değeri ile oransal kazanç değerinin çarpılması ile hesaplanır. Dolayısıyla, kontrol sinyalinin oluşması için her zaman hata mevcut olmalıdır.

Sürekli görülen bu hataya “kalıcı durum hatası” adı verilir. P kontrolünün genel formu aşağıda tanımlandığı gibidir.

$$u(t) = k_p e(t) \quad (1.11)$$



Şekil 1.4. P kontrol blok diyagramı

#### PI kontrol

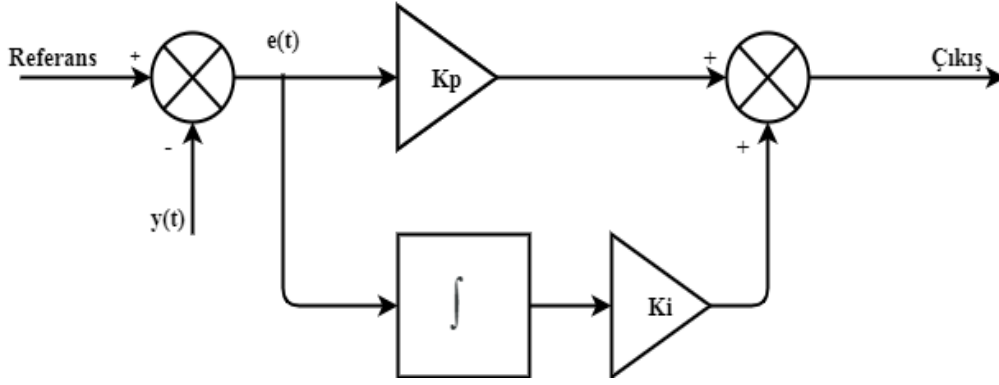
Parametrelerin ayarlanması sistemin çıkış özelliklerine göre yapılabildiğinden, PI kontrolü endüstriyel kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. İntegral terimii P kontrolde görülen kalıcı durum hatasını yok etmek amacıyla kullanılır. PI kontrolünün genel formu aşağıda tanımlandığı gibidir.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad (1.12)$$

Referans hız ile motor hızı arasındaki ölçülen fark hata olarak adlandırılır.

$$e(t) = \Omega_{ref}(t) - \Omega_{out}(t) \quad (1.13)$$

Kontrol parametreleri çok büyük seçildiğinde, simülasyonun sonucunda aşma gözlenebilir. Diğer bir yandan küçük parametreler seçildiğinde kalıcı durum hatası verebilir veya referans değerine ulaşma süresi artabilir.

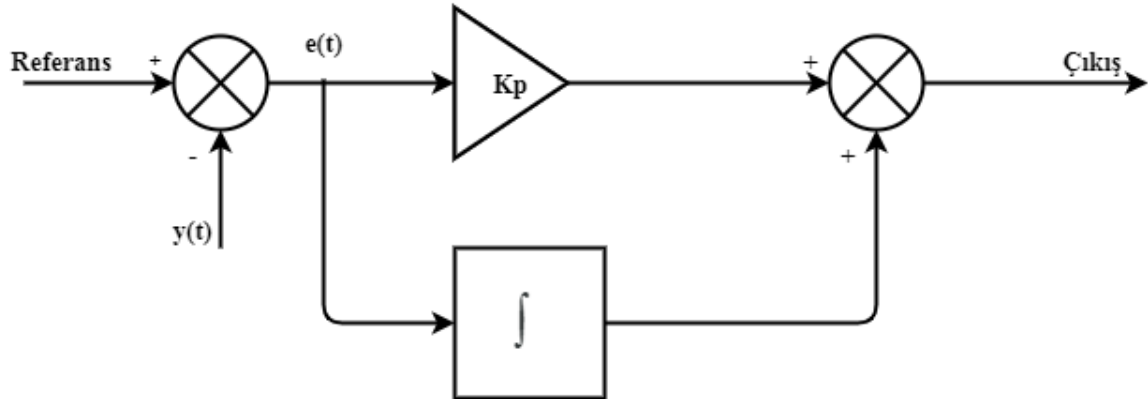


Şekil 1.5. PI kontrol blok diyagramı

### PD kontrol (Oransal Türevsel Kontrol)

Türevsel kontrol oransal kontrolün oluşturduğu aşimaları azaltmak ve sistemin dinamik cevabını arttırmak için kullanılır. Bu nedenle oransal kontrol türevsel kontrol ile birlikte daha iyileştirilebilir sonuçlar verebilir. PD kontrolünün genel formu aşağıda belirtildiği gibidir.

$$u(t) = k_p e(t) + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1.14)$$



Şekil 1.6. PD kontrol blok diyagramı

### Kayan kipli kontrol

BLDC motor doğrusal olmayan karakteristiğe sahip olduğundan, PI kontrolcünün ürettiği kontrol sinyali BLDC motor için kabul edilebilir sonuçlar vermeyebilir. BLDC motorun hızını iyileştirmek için literatürde KKK yöntemi de önerilmiştir [18].

Çatırdama (Chattering), geleneksel KKK algoritmalarının en önemli olumsuz özelliğidir. Çatırdama, kontrol sinyalini oluşturan anahtarlama kuralında tanımlanan kazancın yüksek ayarlanmasından kaynaklanır. Düşük anahtarlama kazancı kontrol edilen sistemin yavaş kalkınmasına sebep olurken, hızlandırılmak için arttırılması da kontrol sinyalinde yüksek genlikli salınımaya yani çatırdamaya sebep olur. Çatırdamanın önüne geçmek için geleneksel kayan kipli kontrol algoritmalarında farklı anahtarlama kuralları tanımlandığı gibi STC gibi farklı yapıda kayan kipli kontrol yöntemleri de önerilmiştir [19]. Bu nedenden dolayı, bu çalışmada kayan kipli kontrol yönteminin BLDC motor hız kontrolü için seçilmiştir.

STC yönteminde kontrol sinyalinin oluşturulması için iki farklı kural tanımlanır:

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t) \quad (1.15)$$

$$\dot{u}_1(t) = \begin{cases} -u(t) & \text{eğer } |u(t)| > U_{\max} \\ \alpha \operatorname{sgn}(\sigma(t)) & \text{eğer } |u(t)| \leq U_{\max} \end{cases} \quad (1.16)$$

$$u_2(t) = \begin{cases} -\beta |\sigma_0|^\rho \operatorname{sgn}(\sigma(t)) & \text{if } |\sigma(t)| > \sigma_0 \\ -\beta |\sigma(t)|^\rho \operatorname{sgn}(\sigma(t)) & \text{if } |\sigma(t)| \leq \sigma_0 \end{cases} \quad (1.17)$$

Burada:

$r(t)$ : Referans

$y(t)$ : Çıkış

$e(t)$ : Hata, referans ile çıkış arasındaki fark

$\sigma(t)$ : Kayma fonksiyonu ,  $\sigma(t) = e(t) = y(t) - r(t)$

$\alpha$  ,  $\beta$  ,  $\rho$  : Kontrol parametreleri ( $\rho = 0.5$ )

$\sigma_0$  : Sistemin başlangıç hatası (at  $t=0$ )

$U_{\max}$  : En yüksek kontrol sinyali

Ayrıca literatüre bakıldığında, model kestirimli kontrol [20], tam durum geri besleme kontrol [21] ve uyarlamalı kesir dereceli PID kontrol [22] yöntemleri de BLDC motorlar için önerilmiştir.

### Tezin Yapısı

Tez çalışmasının ikinci bölümünde optimizasyon algoritmaları ele alınmış, çeşitli yönleriyle sınıflandırmaları yapılmıştır. Ele alınan optimizasyon algoritmalarının çalışma prensipleri anlatılmıştır.

Materyal ve yöntem bölümünün ilk kısmında simülasyonlarda kullanılan BLDC motorun özellikleri verilmiştir. Ayrıca bu bölümde ele alınan PI ve STC kontrol yöntemlerinin optimizasyonu için kullanılan optimizasyon parametreleri verilmiştir. Seçilen PSO ve SCA algoritmalarının uygunluk fonksiyonu da bu bölümde anlatılmıştır.

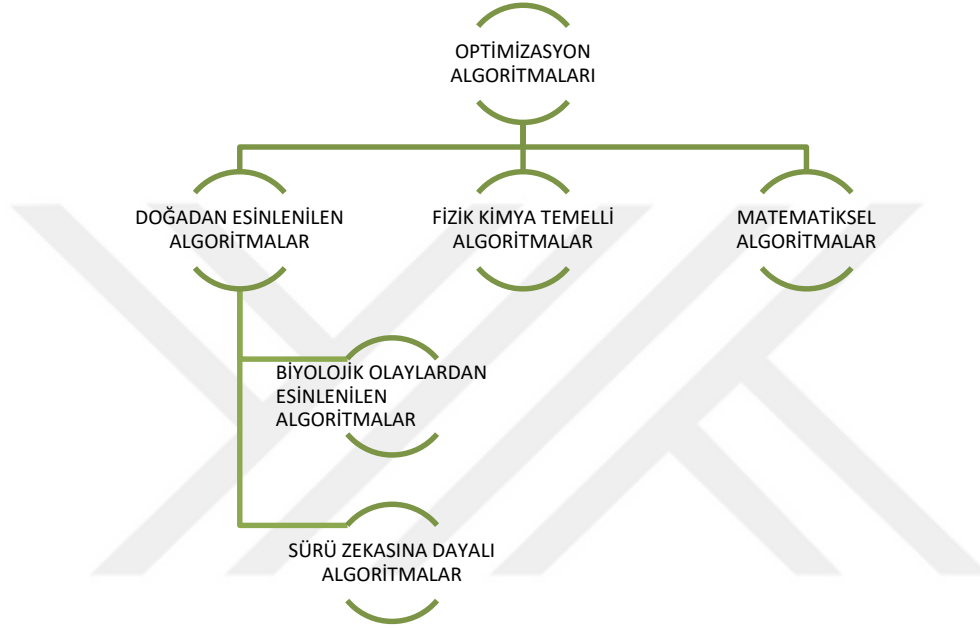
Materyal ve yöntem bölümünün ikinci kısmında PI kontrolcünün SCA ve PSO algoritmalarıyla optimize edilen kontrolcülerin performansı üzerine sonuçlar verilmiştir. Aynı şekilde STC kontrolcüsü de PSO ve SCA ile optimize edilmiş ve sonuçları verilmiştir.

4. bölümde önerilen hibrit kontrolcü anlatılmış, PSO ile yeni parametrelerin optimizasyonu yapıp sonuçlar hem grafiksel hem de istatistiksel olarak verilmiştir.



## 2. OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI

Optimizasyon algoritmaları kontrol parametrelerinin optimum ayarlanmasında son zamanlarda yoğunlukla tercih edilmektedir. Şekil 2.1’de yapılarına göre optimizasyon algoritmalarının sınıflandırılması verilmiştir.



Şekil 2.1. Algoritmaların sınıflandırılması

Doğa birçok araştırmacıya birçok yönden ilham kaynağı olmuştur. Günümüzde çoğu yeni algoritma doğadan esinlenerek geliştirilmiştir. Biyolojik olaylardan esinlenen algoritmalar arasında özellikle bir sınıfı sürü zekasına dayalı olarak adlandırılabilir [23]. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu, Ateş Böceği Algoritması, Yarasa Algoritması, Kedi Sürüsü Optimizasyonu, Yapay Arı Koloni Algoritması, Kurt Kolonisi Algoritması sürü zekâsı tabanlı optimizasyonlara örnek verilebilir [24-27].

### 2.1. Ateş Böceği Algoritması

Ateş Böceği Algoritması (ABA) 2008 yılında Xin-She-Yang tarafından duyurulan doğadan esinlenerek oluşturulmuş bir algoritmadır [28]. Ateş böceği algoritması popülasyon tabanlı bir algoritmadır. Mühendislik uygulamaları için optimizasyon alanında oldukça popüler hale gelmiştir [29].

Ateş Böceği Algoritması şu varsayımlar üzerine kurulmuştur:

- Tüm ateş böcekleri cinsiyetsiz kabul edilir. Bu yüzden tüm ateş böcekleri birbirine etkileyebilir.
- Çekicilik ateş böceklerinin parlaklıklarıyla doğru orantılıdır. İki adet ateş böceğinden hangisi daha fazla ışık yayıyorsa daha çekici olarak kabul edilir ve daha fazla ışık yayana doğru eğilim olur. Parlaklık aradaki uzaklığa göre değişir. En parlak ateş böceği kendisi ise rastgele bir yöne hareket edecektir.
- Ateş böceklerinin parlaklığı ışık yoğunluğu, uygunluk fonksiyonunda bulunan sonuç ile ilişkilidir [30].

## 2.2. Yarasa Algoritması

2010 yılında Yang tarafından önerilen yarasa algoritması aynı zamanda bir sürü zekası algoritmasıdır. Yarasa algoritması ekolokasyon adı verilen ses ile konum belirleme olarak ifade edilebilir. Yarasalar da dahil ekolokasyon kullanan tüm canlılar belirli bir frekansta sinyal yayarlar. Yarasalar avlanmada, saklanmada, birbirleri arasında iletişim kurma gibi birçok durumda ekolokasyonu kullanırlar [31].

## 2.3. Yapay Arı Kolonisi Algoritması

Yapay Arı Kolonisi algoritması (ABC) doğada bulunan arıların davranışlarından esinlenerek 2005 yılında D. Karaboğa tarafından sunulmuş bir algoritma çeşididir. O zamandan beri ABC algoritmalarına olan ilgi gittikçe artmıştır. Bir arı kolonisinde üç tür arı bulunmaktadır.

- İşçi arı
- Gözcü arı
- Kaşif arı

Kaynaktan yiyecek taşıyan arı işçi arı olarak tanımlanır. Arılar yiyecek kaynağı bulduklarında dans ederek diğer arılara bilgi vermiş olurlar. Gelen bilgilere göre yiyecek kaynağı seçen arılar gözcü arılardır. Rastgele dolaşarak yiyecek arayan arılara da kaşif arılar denir [32, 33].

## 2.4. Kurt Kolonisi Algoritması

Kurt Kolonisi algoritması (KKA) ilk olarak Yang ve diğerleri tarafından 1992’de önerilmiştir. Bu algoritma, kurt kolonisinin sıkı bir organize sisteme sahip olmasından esinlenerek yazılmıştır. Kurtlar doğada besin zincirinin tepesindeki hayvanlardır. Kurtların katı bir hiyerarşisi vardır. Kurtlar kendi aralarında üç kategoriye ayrılır.

- Lider Kurt
- Araştırmacı Kurt
- Kuşatmacı Kurt

Araştırmacı kurtlar avın konumunu belirlediği zaman diğer kurtlara uluyarak bildirirler. Diğer kuşatmacı kurtlar ava yaklaşırlar ve avı kuşatırlar. Kurt kolonisinde atanma kuralına göre yiyecek önden güçlü olan lider kurda verilir ve sonra güç sıralamasına göre dağıtılır. Kurt kolonisi algoritması da bu davranışların gözlenmesi ile yapılmıştır [34].

## 2.5. Su Döngüsü Algoritması

Su döngüsü algoritması doğadan esinlenerek tasarlanmış bir algoritma çeşididir. Su döngüsünde buharlaşma, yoğunlaşma, yağış, erozyon gibi aşamalar izlenerek matematiksel olarak ifade edilir. Bir optimizasyon algoritması haline dönüştürülmüştür [35].

## 2.6. Parçacık Sürüsü Optimizasyonu

Parçacık sürüsü optimizasyonu 1995’te Eberhart ve Kennedy tarafından önerilen, biyolojik olaylardan esinlenerek düzenlenmiş bir algoritmadır [36].

PSO algoritması, hayvanların sosyal davranışlarını simüle eder. Böcekler, sürüler, balıklar kuşlar vb. Bu sürüler yiyecek bulabilmek için işbirliğine dayalı bir yol izlerler ve arama modellerini öğrenme deneyimlerine göre şekillendirirler [37]. Algoritmaların başlangıç aşamasında, probleme parçacık adı verilen rastgele seçilmiş çözüm adayları uygulanır. Sinüs kosinüs algoritmasına benzer şekilde, sonuçları ölçmek için bir uygunluk işlevi kullanılır ve mevcut ve tüm yinelemelerin en iyi çözümlerine bağlı olarak, parçacıklar durdurma kriterleri karşılanana kadar güncellenir.

Döngüler boyunca en iyi durum bulunmaya çalışılır ve en iyi iki durum pbest ve gbest olarak adlandırılır. Pbest her parçacığın kendi içinde elde ettiği en iyi durum olarak tanımlanır. Gbest ise tüm parçacıklar arasındaki en iyi durum olarak tanımlanır. Pbest bireysel en iyi çözümdür. Gbest ise global en iyi çözümdür.

N adet parametrelili D parçacığın matris olarak gösterilimi aşağıdaki gibidir.

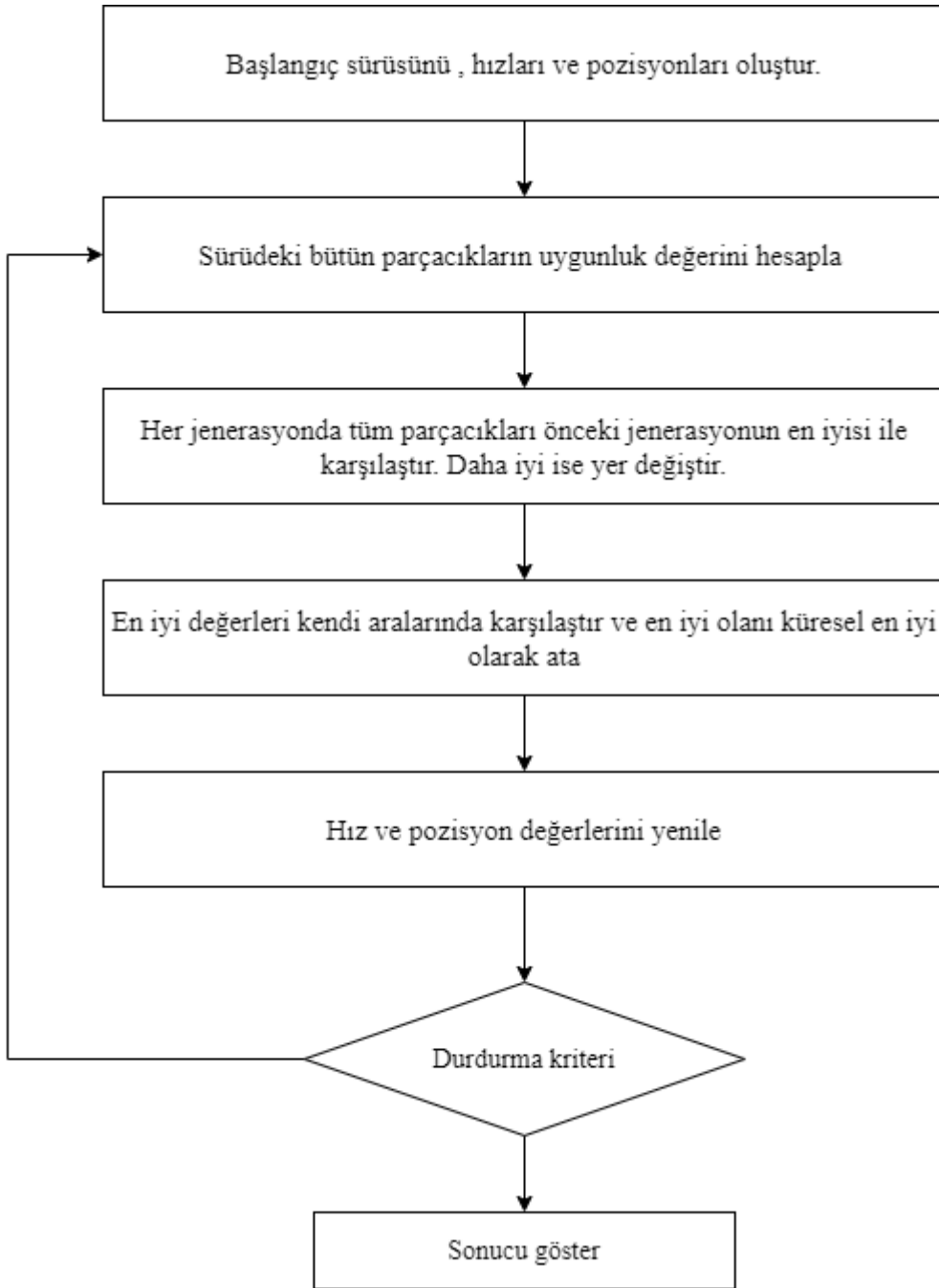
$$P = \begin{pmatrix} P_{11} & \cdots & P_{1D} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{N1} & \cdots & P_{ND} \end{pmatrix}_{N \times D} \quad (2.1)$$

Parçacıkları güncellemek için, ilgili hızları ve konumlarını belirlemek için aşağıdaki gibi optimizasyon parametreleri kullanılır.

$$v_i^{k+1} = wv_i^k + c_1r_1(P_l^k - x_i^k) + c_2r_2(P_g^k - x_i^k) \quad (2.2)$$

$$x_i^{k+1} = x_i^k + v_i^{k+1} \quad (2.3)$$

Yukarıdaki denklemlerde  $c_1$  ve  $c_2$  öğrenme katsayılarıdır.  $r_1$  ve  $r_2$  sayıları 0 ile 1 arasından seçilen rastgele sayılardır. PSO'nun amacı parçacıkların kendi içinde elde ettiği en iyi durum pbest ve tüm parçacıkların kendi içinde elde ettiği en iyi durum gbest'i kullanarak en iyi çözümü elde etmektir [38]. PSO akış diyagramı Şekil 2.2'de verilmiştir [39].



Şekil 2.2. PSO Algoritmasının akış diyagramı

## 2.7. Sinüs-Kosinüs Algoritması

Bu algoritma Mirjalli tarafından önerilen, rastgele çözüm adayları kümesi ile başlayan yeni bir popülasyon tabanlı algoritmadır [40].

Kuralların matematiksel ifadesi aşağıda belirtildiği gibidir:

$$X_j^{g+1} = \begin{cases} X_j^g + r_1 \sin(r_2) |r_3 (Xb)_i^g - X_j^g| & \text{if } r_4 < 0.5 \\ X_j^g + r_1 \cos(r_2) |r_3 (Xb)_i^g - X_j^g| & \text{if } r_4 \geq 0.5 \end{cases} \quad (2.4)$$

Burada;

$r_1$  bir sonraki hareket yönünü tanımlar,

$r_2$  optimal çözüme doğru veya dışarıya doğru çözümü tanımlar,

$r_3$  optimal çözüm için ağırlık tanımlar,

$r_4$  denklemin sinüs ve kosinüs bileşenleri arasında rasgele geçiş yapan bir değişkendir.

Sinüs ve Kosinüs algoritmasının sözde kodu ve ilgili akış şeması sırasıyla aşağıda verilmiştir.

**Başlat:** Arama ajanları kümesini (çözümler) (X) başlat.

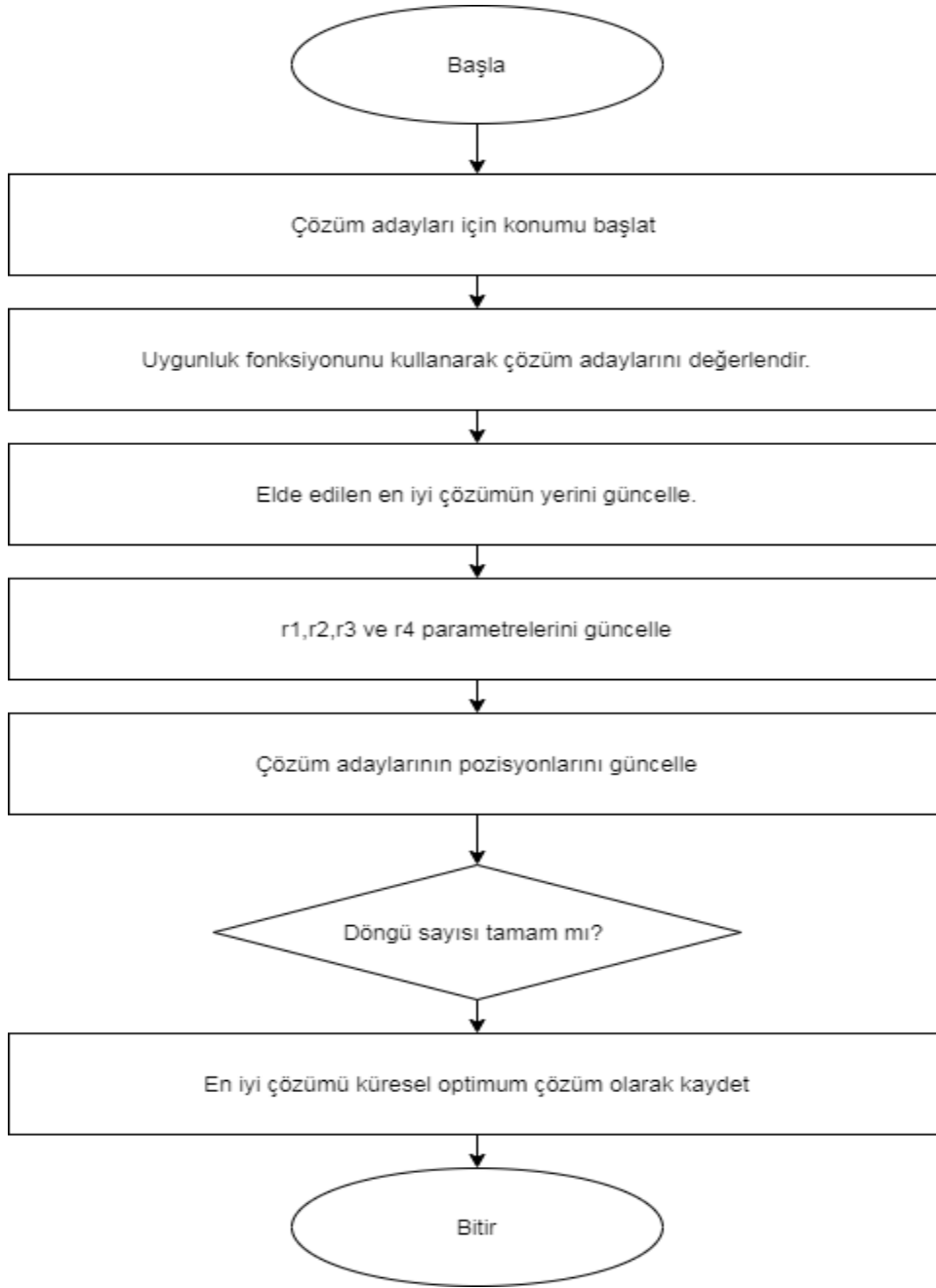
**Do**

**Değerlendir:** Her arama çözüm adaylarının uygunluk fonksiyonu ile değerlendir.

**Güncelle:** Denklem 2.1'i kullanarak çözüm adaylarının pozisyonlarını güncelle.

**While** (t < döngü sayısı)

**Return:** Şimdiye kadar küresel optimum olarak elde edilen en iyi çözümü döndür [41].



Şekil 2.3. Sinüs-kosinüs algoritmasının akış şeması

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. BLDC Motor Özellikleri

Simülasyonlarda kullanılan BLDC motor modelinin teknik özellikleri Çizelge 3.1’de verilmiştir. Optimizasyon parametreleri Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. BLDC motor modelinin teknik özellikleri

Özellikler	Değerler
Kutup Sayısı, p	3
Voltaj Sabiti (V)	87.9646
Stator Faz Direnci R ( ohm)	0.7
Stator Faz İndüktansı L (Henry)	2.72e-3
Tork Sabiti (Nm/A)	0.84

#### 3.2. Kontrol Yöntemleri

BLDC motor hız kontrol için bu tezde PI ve ST kontrol yöntemleri kullanılmıştır. PI ve ST parametreleri optimizasyonu için aşağıda verilen optimum kontrol parametreleri kullanılmıştır.

Çizelge 3.2. Optimizasyon Algoritmalarının Parametreleri

PI parametreleri için arama aralıkları	
$k_p$	0.001 – 0.05
$k_i$	4 – 24
STC parametreleri için arama aralıkları	
$\alpha$	800 – 2400
$\beta$	2 – 6
Referans Hız	1500rpm

#### 3.3. Optimizasyon Yöntemleri

BLDC motorun hız kontrolü için bu tezde PSO ve SCA algoritmaları kullanılmıştır ve bu algoritmaların optimum parametreleri Çizelge 3.3’te verilmiştir.



Çizelge 3.3. Optimizasyon algoritmalarının parametreleri

Parametreler	Genlik
Döngü sayısı	50
Parçacık sayısı	20
Örnekleme Zamanı	0.5 $\mu$ s
Simülasyon Süresi	0.3s
<b>Başlangıç PSO Sabitleri</b>	
$c_1$	1.20
$c_2$	0.12
$\omega$	0.50

Simülasyonlarda uygunluk fonksiyonu, çıkışta aşım olmadan hata ve dalgalanmaları en aza indirmek için yapılandırılmıştır. Bu amaçla, integral kare hatası (ISE) ve standart sapma (sd) seçilmiştir. Uygunluk fonksiyonunun genliğini en az yapan parametreler optimum parametrelerdir. Ancak, çıkışta aşım oluşturan parametrelerin daha iyi seçilmesi amacıyla en yüksek çıkışın referans değerinin %5'ini geçmesi durumunda o parametreleri en kötü yapacak bir bozulma katsayısı,  $A_d$ , fonksiyona eklenmiştir. Bu katsayı, motor hızında aşım görülmesi halinde uygunluk fonksiyonunun genliğini arttırarak en kötü yapacaktır. Buna göre tasarlanan uygunluk fonksiyonu, *fitness*, aşağıda verilmiştir:

$$fitness = A_1 sd(u(t)) + A_2 sd(y_{ss}(t)) + A_3 ISE \quad (3.1)$$

Burada;

$$ISE = \begin{cases} ISE = A_d \int e^2(t) dt & \text{eğer maksimum(hız)} > 1.05 \times r(t) \\ ISE = \int e^2(t) dt & \text{değilse} \end{cases} \quad (3.2)$$

$A_1, A_2, A_3$ : Uygunluk fonksiyonu parametrelerinin ağırlıkları,

$y_{ss}(t)$ : Sabit durum çıkışı.

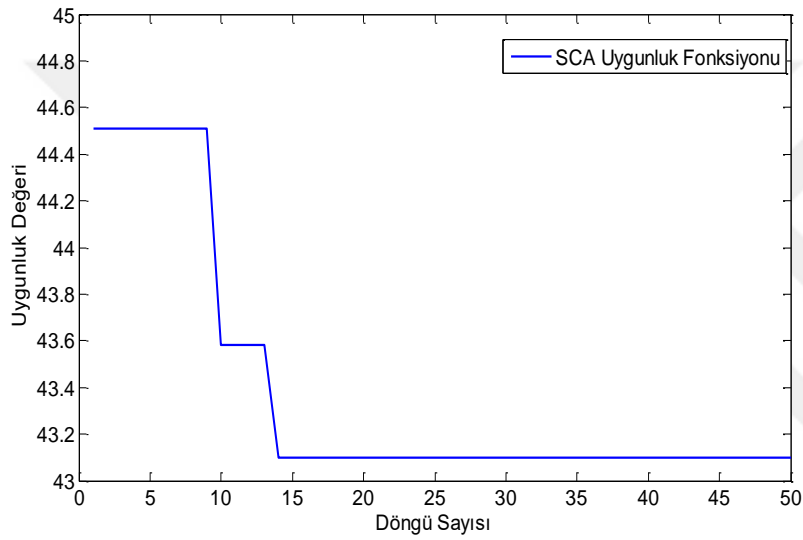
$A_1 = 1, A_2 = 2.5, A_3 = 0.003$  uygunluk fonksiyonunda ve bozulma katsayısında ağırlık olarak seçilir,  $A_d = 100$ , seçilmiştir.

### 3.4. Optimizasyon Sonuçları

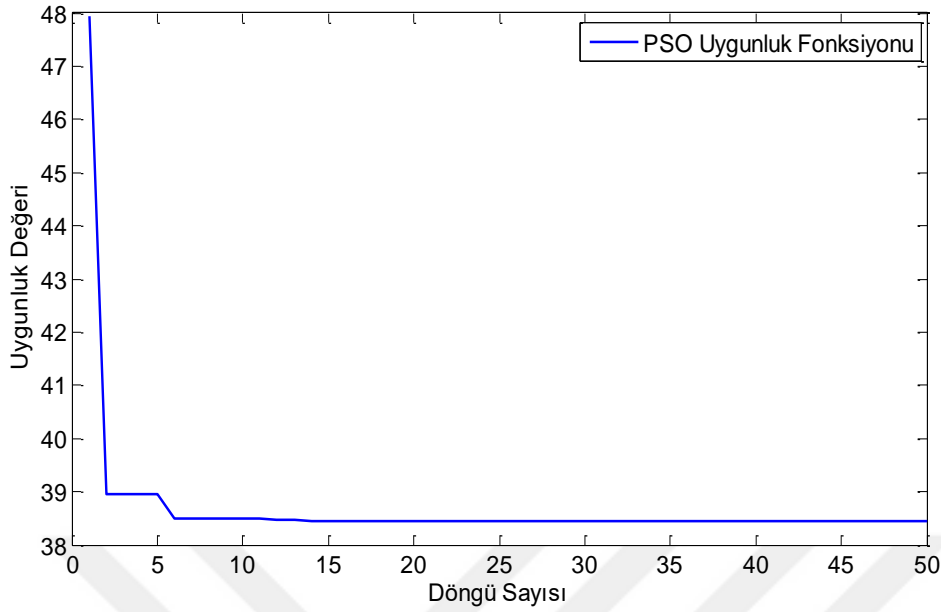
Bu çalışmada PI ve STC parametrelerinin optimizasyonunda PSO ve SCA algoritmaları kullanılmıştır. Sonuçları aşağıda verilmiştir.

#### 3.4.1. PI optimizasyonun sonuçları

PI kontrolcü parametreleri için optimizasyonlar Çizelge 3.2’de verilen parametrelerle gerçekleştirilmiştir. Simülasyonlar sonunda, sırasıyla Şekil 3.1 ve Şekil 3.2’de gösterildiği gibi SCA ve PSO ile uygunluk fonksiyonu izleme performans grafikleri elde edilmiştir.



Şekil 3.1. PI kontrolünün SCA ile uygunluk fonksiyonus izleme performansı



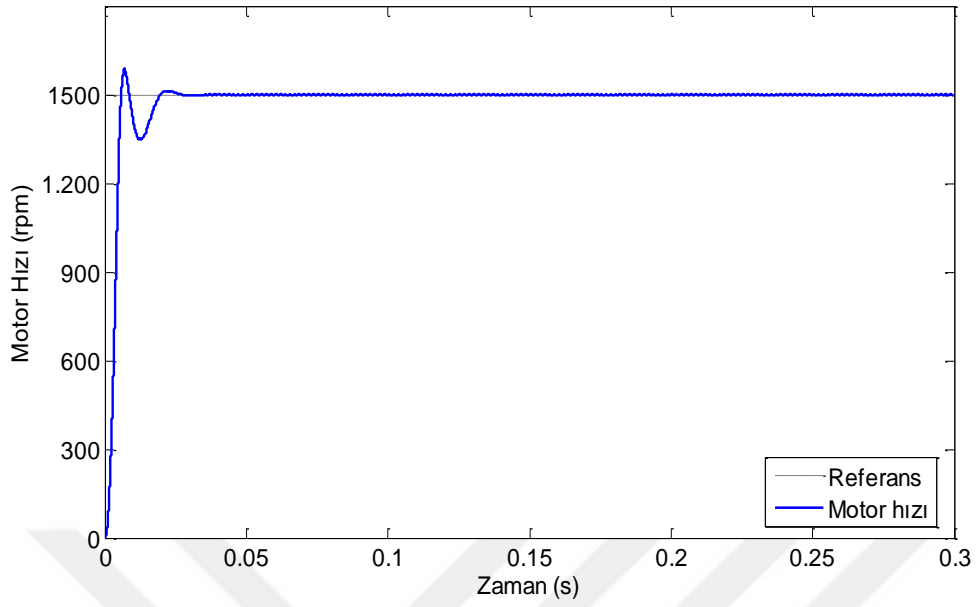
Şekil 3.2. PI kontrolcünün PSO ile uygunluk fonksiyonu izleme performansı

Her iki optimizasyon algoritmasının da uygunluk fonksiyonu izleme performansı hemen hemen aynı özellikleri göstermiştir. Dolayısıyla, SCA veya PSO BLDC motor hızının PI kontrolü amacıyla optimum parametrelerin aranmasında kullanılabileceğini göstermiştir. Her iki optimizasyon sonucunda, Çizelge 3.4'te optimum kontrol parametreleri elde edilmiştir.

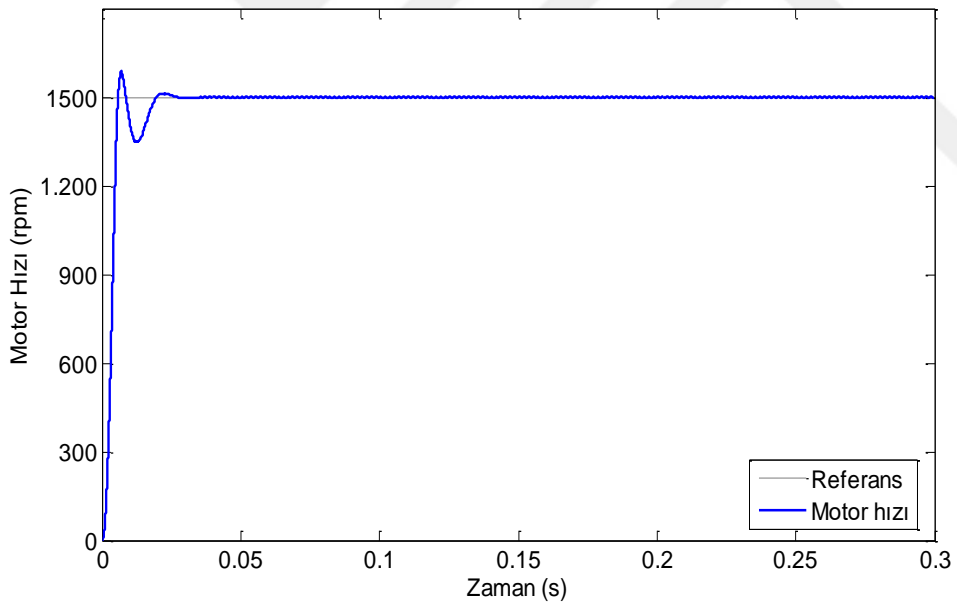
Çizelge 3.4. Optimum PI parametreleri

Optimizasyon algoritması	$k_p$	$k_i$
SCA	0.0488	23.0653
PSO	0.0923	21.4022

Çizelge 3.4'teki parametreleri ile PI kontrolcü ayarlanmış ve motorun çıkış grafikleri Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'teki gibi elde edilmiştir. Motor, başlangıçta %5'i aşmayan bir hızlanma ile referans değerine küçük bir osilasyon ile ulaşmıştır.

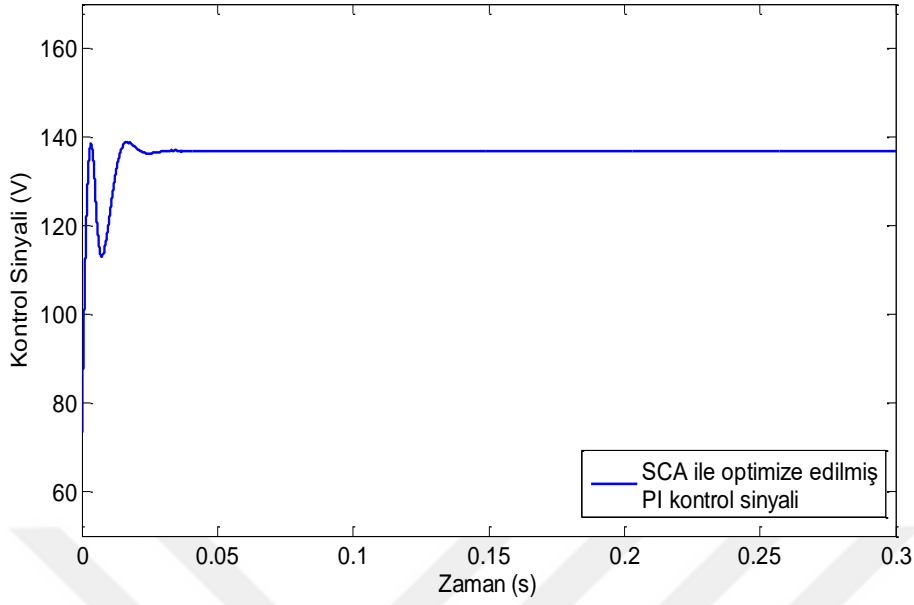


Şekil 3.3. SCA ile optimize edilmiş PI kontrolcü ile elde edilen çıkış

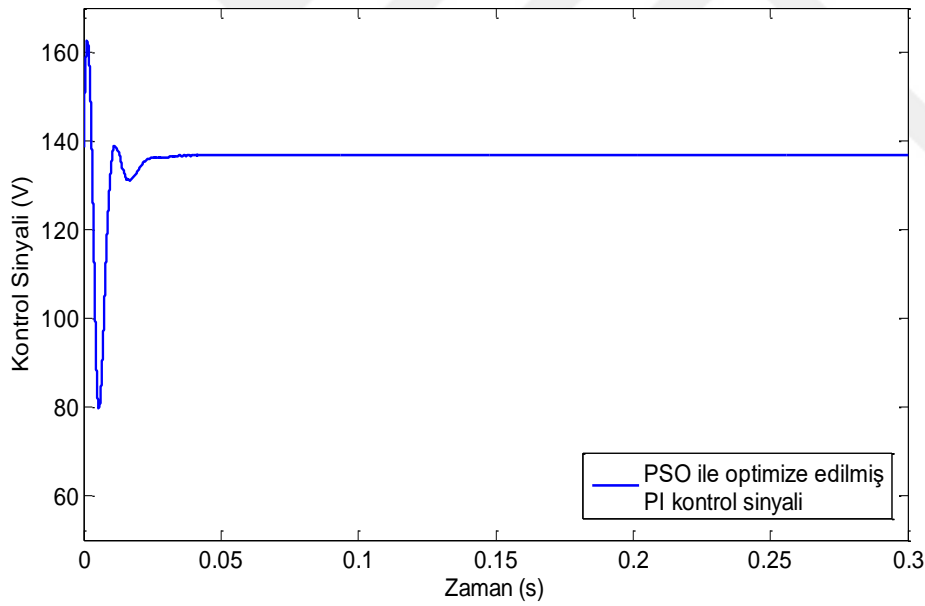


Şekil 3.4. PSO ile optimize edilmiş PI kontrolcü ile elde edilen çıkış

Çizelge 3.4'deki optimum parametrelerle PI kontrolcünün kontrol sinyalleri Şekil 3.5 ve Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.5. SCA ile optimize edilmiş PI kontrolcünün kontrol sinyali

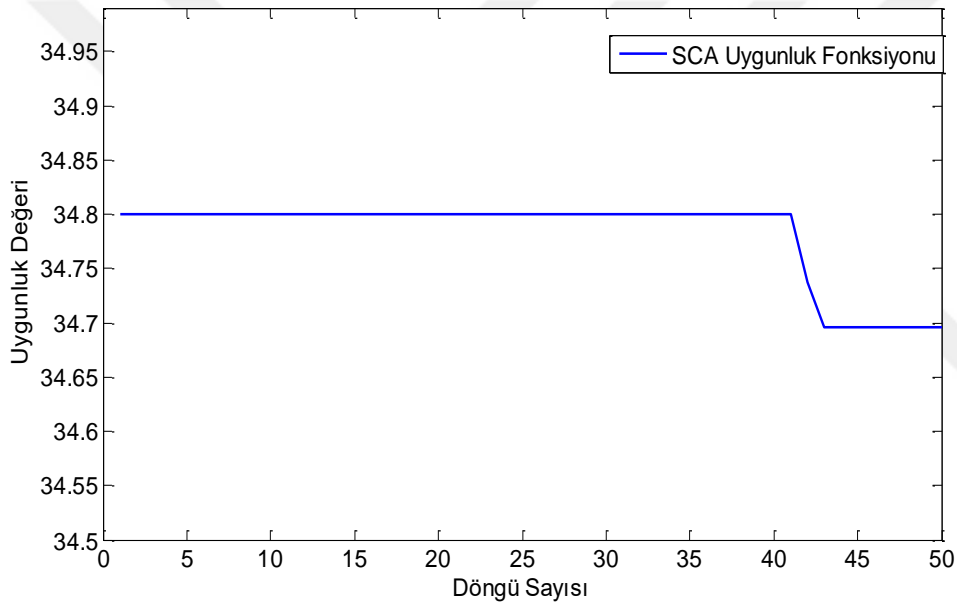


Şekil 3.6. PSO ile optimize edilmiş PI kontrolcünün kontrol sinyali

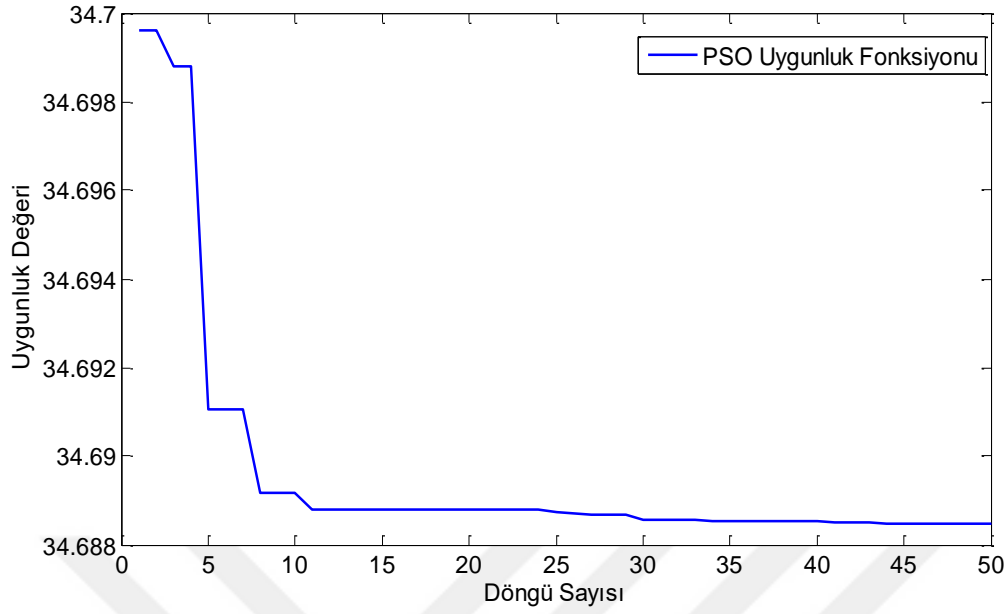
SCA ve PSO ile bulunan optimum parametreler büyüklük olarak birbirine yakın olduğundan, BLDC motorun çıkış hızı ve kontrol sinyallerinin özellikleri hem geçici durumda hem de kalıcı durumda yaklaşık olarak aynı olduğu görülmüştür.

### 3.4.2. STC optimizasyonun sonuçları

Simülasyonlar için aynı süre ve örnekleme zamanı kullanılarak, aşağıdaki uygunluk fonksiyonu izleme grafikleri, Şekil 3.7 ve Şekil 3.8’de gösterildiği gibi SCA ve PSO algoritmaları ile elde edilmiştir. SCA'nın uygunluk fonksiyonu izleme performansında, başlangıçta iyi bir sonuç bulunmuştur. 40. döngüden sonra daha iyi bir sonuç elde edilmiştir. PSO performansı sıklıkla daha iyi parametreler bulmaya devam etse de, nihai sonuçlar büyüklük olarak neredeyse aynıdır. Bu nedenle optimum STC parametreleri birbirine çok yakın çıkmıştır.



Şekil 3.7. SCA ile STC'nin uygunluk fonksiyonu izleme performans grafiği



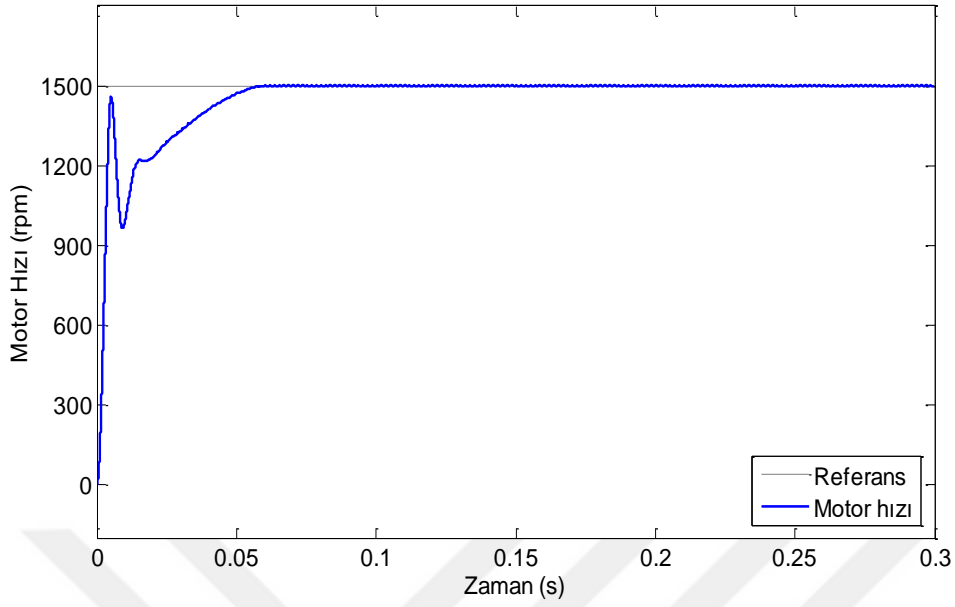
Şekil 3.8. PSO ile STC'nin uygunluk fonksiyonu izleme performans grafiği

Her iki optimizasyon algoritmasının çalıştırılması sonunda, STC için en iyi kontrol parametreleri Çizelge 3.5'te gösterildiği gibi elde edilmiştir.

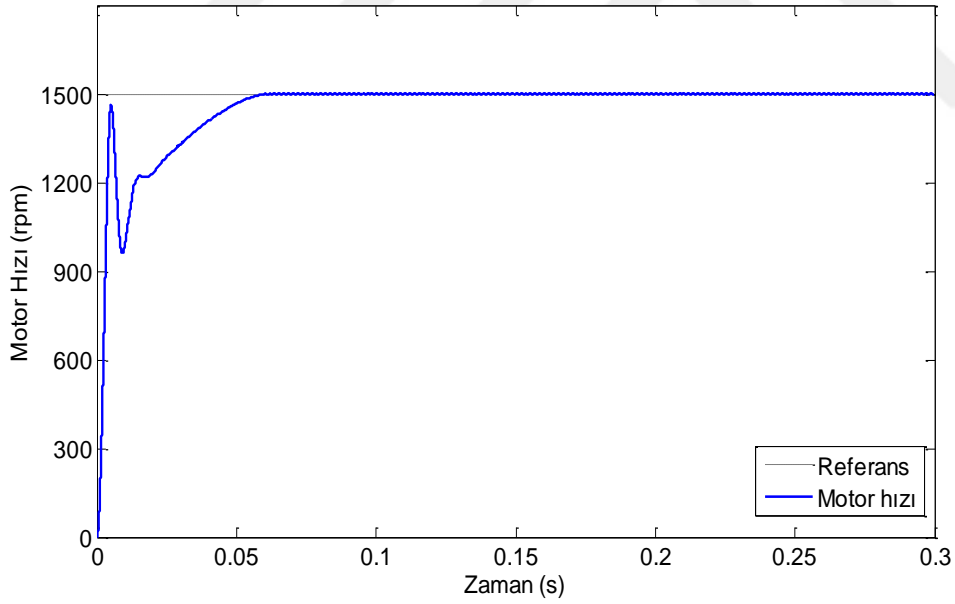
Çizelge 3.5. Optimum STC parametreleri

Optimasyon Algoritmaları	$\alpha$	$\beta$
SCA	2223.9363	4.4078
PSO	2194.7460	4.4519

Optimum STC parametrelerine karşılık gelen çıktılar Şekil 3.9 ve Şekil 3.10'da verilmiştir.



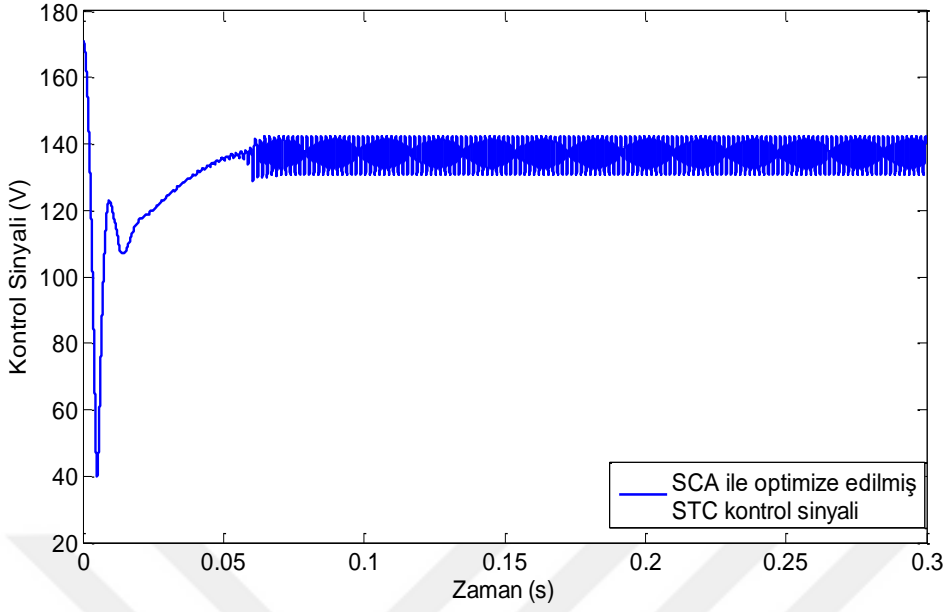
Şekil 3.9. SCA ile optimize edilmiş STC ile elde edilen çıkış



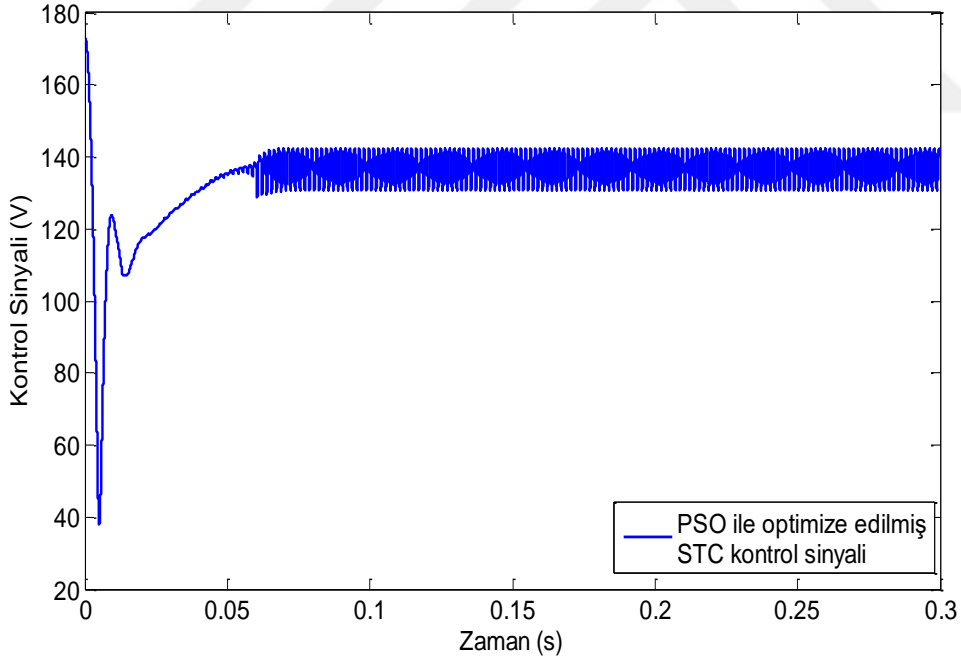
Şekil 3.10. PSO ile optimize edilmiş STC ile elde edilen çıkış

Çizelge 3.3'teki parametreler STC için kullanıldığında, 0.3s'de üretilen kontrol sinyali Şekil 3.11 ve Şekil 3.12 'de gösterilmektedir. Yaklaşık olarak aynı büyüklükteki STC parametreleri benzer özelliğe sahip kontrol sinyallerini üretmiştir.





Şekil 3.11. SCA ile optimize edilmiş STC kontrol sinyali



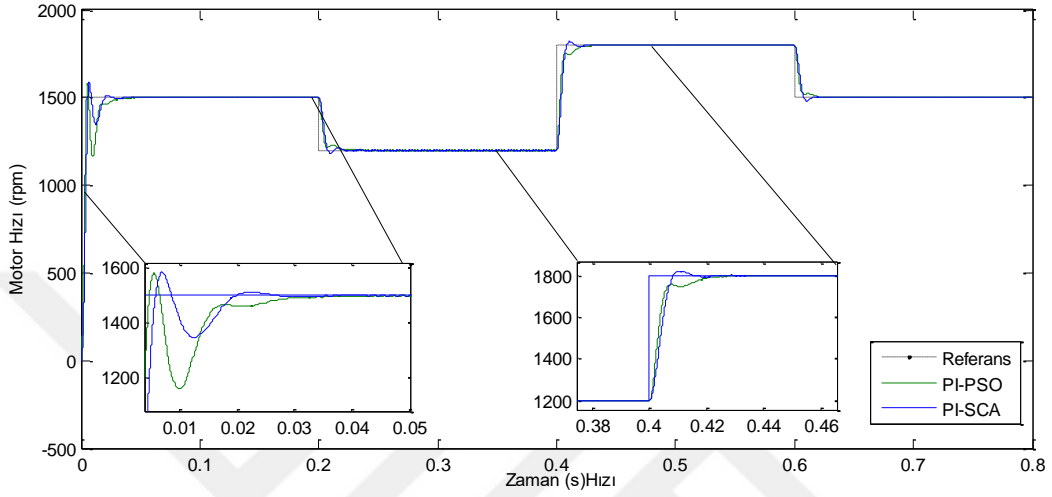
Şekil 3.12. PSO ile optimize edilmiş STC kontrol sinyali

### 3.5. Referans İzleme Performansı

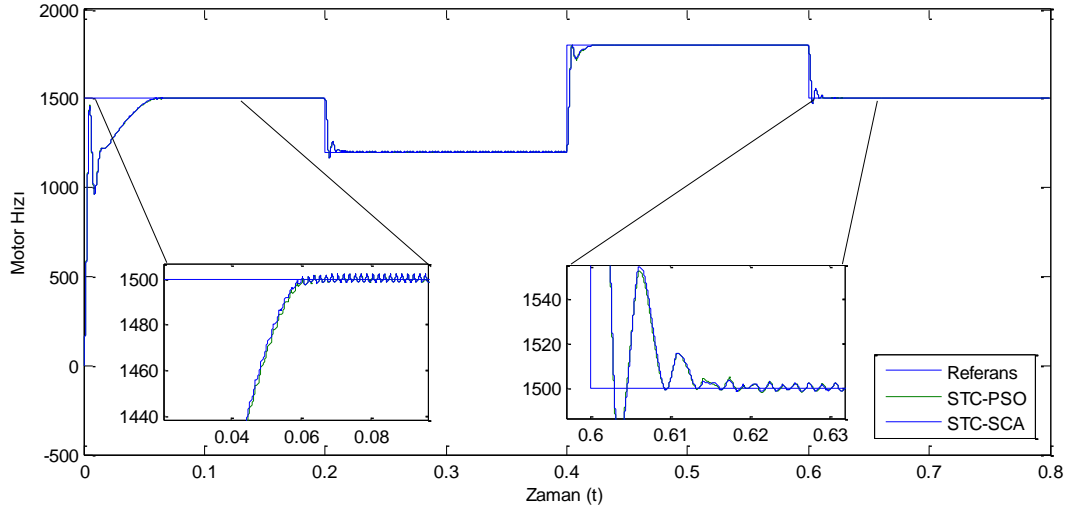
BLDC motorun referans izleme performansı, bu çalışmada ayrıca incelenmiştir. Seçilen kontrol algoritmaları ve optimizasyon yöntemleri ile elde edilen parametreler kullanılarak

1500rpm ile başlatılan motorun hızı 1200rpm ile 1800rpm referans noktalarında test edilmiştir. Elde edilen performans grafikleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

PSO algoritması ile elde edilen PI ve ST kontrolcülerinin performans izleme grafikleri Şekil 3.13 ve Şekil 3.14'te gösterilmiştir.



Şekil 3.13. PSO algoritması ile elde edilen PI ve ST kontrolcülerinin performans izleme grafiği



Şekil 3.14. PSO algoritması ile elde edilen STC ve SCA kontrolcülerinin performans izleme grafiği

### 3.6. Genel Performans Değerlendirmesi

Kontrolcülerin ve optimizasyonunda kullanılan algoritmaların performansını ayrıntılı değerlendirmek için, geçici durum ve sabit durum performans kriterleri Çizelge 3.6'da verilmiştir. Aşma için uygunluk fonksiyonunda bozulma katsayısı kullanılması nedeniyle, en yüksek aşım tanımlanan sınırın altındadır. İhmal edilebilir ölçüde bir sabit durum dalgalanması çıkışta gözlenmiştir. ISE ölçümleri farklı olsa da genel olarak tatmin edicidir.

Çizelge 3.6. Çıkış performans değerleri

Optimizasyon Algoritması- Kontrolcü	Aşım (rpm)	Yerleşme Zamanı	Çıkış Dalgalanması
SC-PI	74	16 ms	$\pm 1$ rpm
PSO-PI	75	15 ms	$\pm 1$ rpm
SC-ST	-	40 ms	$\pm 2$ rpm
PSO-ST	-	40 ms	$\pm 1$ rpm

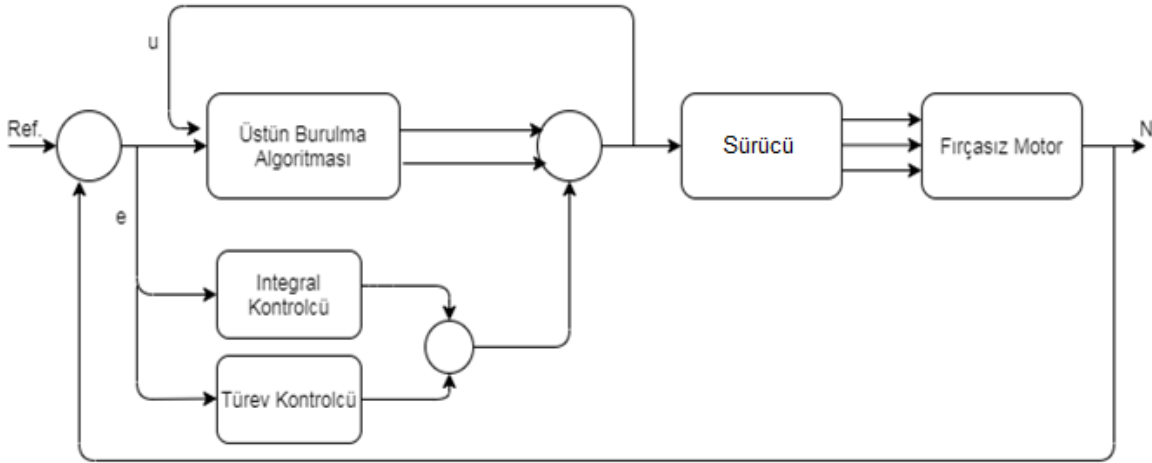
Yerleşme zamanının azalması ile birlikte, BLDC motorun hızında aşım görülürken, aşimsız hız kontrollerinde yerleşme zamanının arttığı gözlenmiştir. Bu durum, birçok kontrol edilen sistemin geçici hal performansında görülmektedir. Bununla beraber, geçici durumda görülen dalgalanma karakteristiği, her iki kontrol yönteminde de benzer olup optimizasyon yöntemleri ile ancak aşımın yerleşme zamanından fedakârlık edilerek azaltılması ile mümkün olabileceği Çizelge 3.6'da ortaya çıkmıştır.

Ancak, gerek PID kontrolcüsünün her bir parametresinin özelliği gerekse STC ile gelen özellikler birlikte düşünüldüğünde, bu iki kontrol yönteminin bir araya getirilmesiyle birlikte yerleşme zamanı ve aşım miktarının birlikte iyileştirilmesi üzerine bir yöntem üzerinde bir çalışma yapılmıştır. Sonraki bölümde, bu amaç ile önerilen yöntem ve BLDC motor hız kontrolü için izlenecek yol anlatılmıştır.

#### 4. ST+ID HİBRİT KONTROL VE OPTİMİZASYONU

BLDC motor hız kontrolü için yapılan çalışmada, geçici durum performansı incelendiğinde hem dalgalanma hem de aşım neden olmakla beraber, kontrol parametrelerinde yapılan değişiklikler ile elde edilen aşimsız çıkışta ise yerleşme zamanının arttığı gözlenmiştir. Bu iki durumun optimum kontrol parametreleri ile birlikte çözülmesi için kullanılan iki optimizasyon algoritması da kontrolcülerin performansını aynı noktaya taşımıştır. Dolayısıyla, iyileştirme konusunda kontrol parametrelerinin optimizasyonundan çok kontrolcü yapısında değişiklik üzerinde bir çalışma ile daha iyi performans elde edilebileceği düşünülmüştür.

STC bozuculara karşı dayanıklı bir kontrolcü olarak literatürde kullanılmaktadır. PID kontrolde ise integral terimi kalıcı durum hatasını yok etmekte etkili, türev terimi ise hatanın oluşumuna karşın onu yok edecek etkin kontrol sinyalinin üretilmesinde kullanılır. Bu özellikler bir arada düşünülüp, her ikisinin birlikte kullanılması ile dalgalı bir seyir izleyen BLDC motor hızı kontrolünde aşırı sönümlü ve daha kararlı bir çıkış amaçlanmıştır. Şekil 4.1’de optimize edilmiş STC sinyaline ek olarak ID kontrol kullanılmış ve bu iki terimin kazançları için PSO yeniden çalıştırılmıştır.



Şekil 4.1. ST+ID kontrol blok diyagramı

Önerilen hibrit sistemdeki integral ve türev parametrelerinin optimizasyonu için uygunluk fonksiyonu aşağıdaki gibi seçilmiştir:

$$fitness_{ID} = 100t_s + std(y(200000 : 300000)) \quad (4.1)$$

Burada *std*, standart sapma fonksiyonudur. Kalıcı durumdaki kontrol sinyalinin standart sapması ele alınmıştır. İntegral ve türev parametrelerinin arama uzayı Çizelge 4.1’de verilmiştir. Optimizasyon sonucu elde edilen yeni ID parametreleri Çizelge 4.2’de verilmiştir.

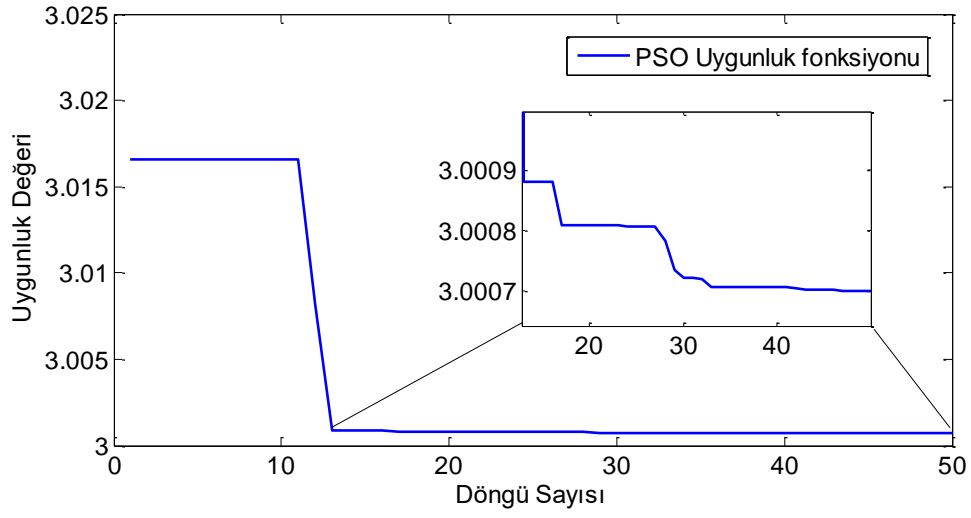
Çizelge 4.1. Optimizasyon algoritmalarının parametreleri

Parametreler	Genlik
Döngü sayısı	50
Parçacık sayısı	10
Örnekleme Zamanı	0.5 $\mu$ s
Simülasyon Süresi	0.3s
<b>Başlangıç PSO Sabitleri</b>	
$c_1$	1.2
$c_2$	0.12
$\omega$	0.5
<b>Sabit STC parametreleri</b>	
$\alpha$	2223.963
$\beta$	4.4078
<b>ID için arama aralıkları</b>	
$k_i$	$4 < k_i < 8$
$k_d$	$0.0001 < k_d < 0.01$

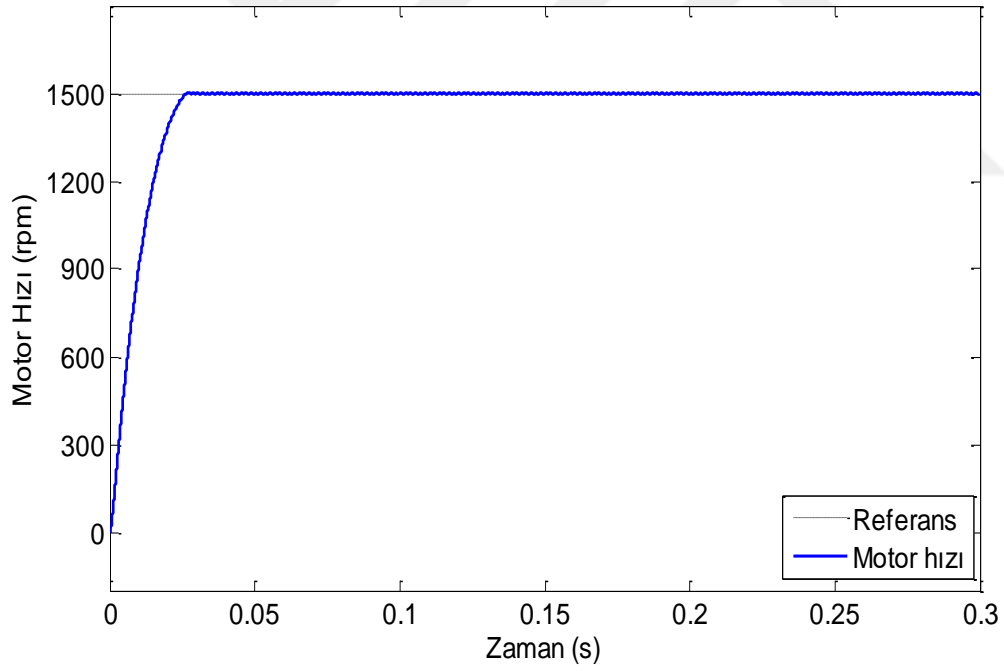
Yeni parametrelerin optimum parametrelerinin PSO ile aranması sonucu uygunluk fonksiyonundaki değişim Şekil 4.2’deki gibi elde edilmiştir. Bunun sonucunda elde edilen optimum parametreler Çizelge 4.2’de verilmiştir. Elde edilen parametreleri ile yapılan simülasyon sonucu motor hızındaki değişim Şekil 4.3’te verilmiştir. ST+ID kullanıldığında, geçici durumda görülen aşım ve dalgalanmanın önüne geçilmiş, kritik sönümlü bir çıkış elde edilmiştir.

Çizelge 4.2. Optimum ID parametreleri

$k_i$	$k_d$
5.8399	0.0013

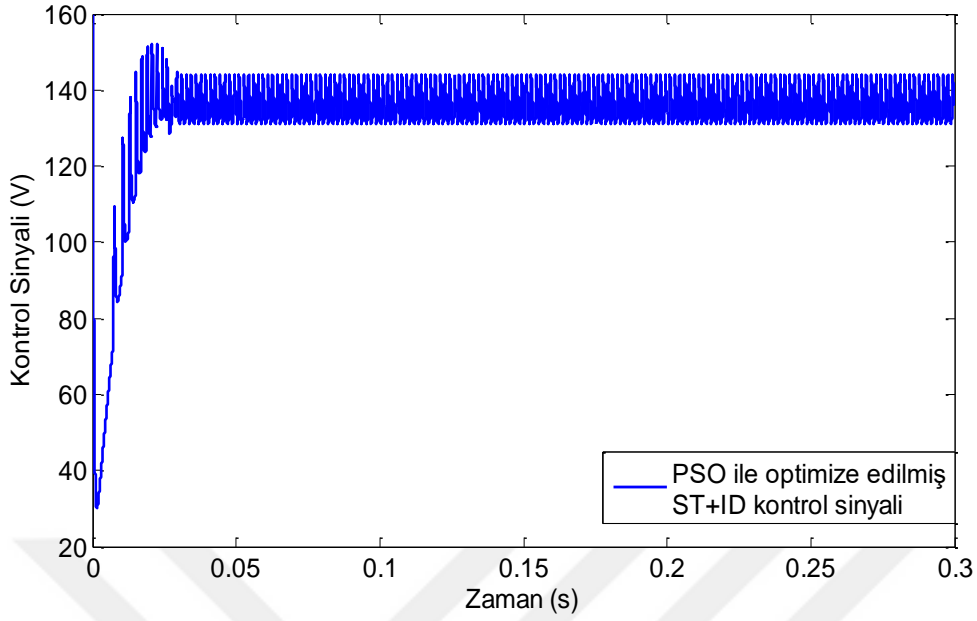


Şekil 4.2. ST+ID kontrolcünün PSO ile uygunluk fonksiyonu izleme performansı



Şekil 4.3. PSO ile elde edilen ST+ID kontrolcü kullanılarak elde edilen motor hızı grafiği

Optimum ST+ID parametrelerinin ürettiği kontrol sinyali Şekil 4.4'te verilmiştir.



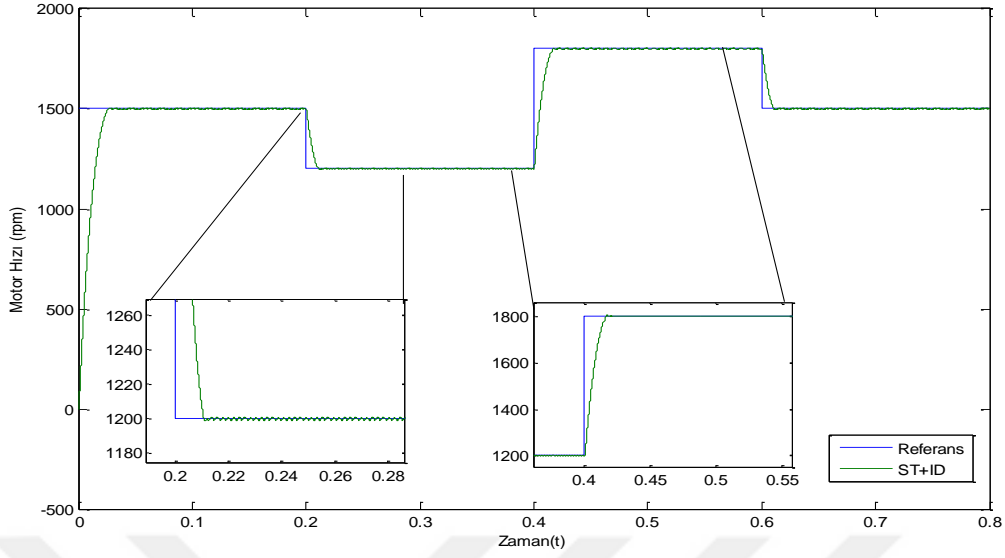
Şekil 4.4. PSO ile optimize edilmiş ST+ID kontrolcünün kontrol sinyali

Çizelge 4.1’de görüldüğü gibi önerilen kontrolcü ile en yüksek aşım yaklaşık 3rpm olarak ölçülmüştür. Bununla beraber yerleşme zamanı 17ms olarak gerçekleşmiştir. BLDC motorun çıkışındaki dalgalanma ise yaklaşık  $\pm 1$  rpm olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.1. Çıkış performans değerleri

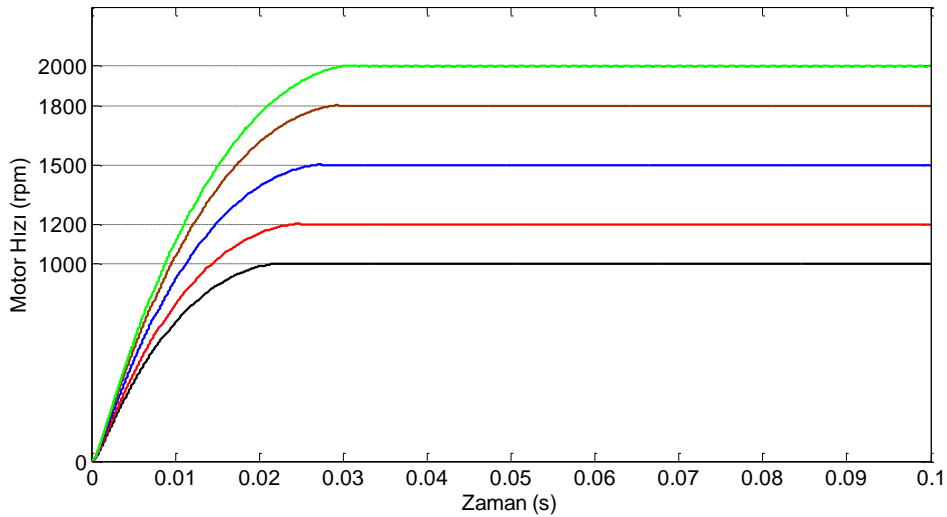
Önerilen Kontrolcü	Aşım (rpm)	Yerleşme Zamanı	Çıkış Dalgalanması
ST+ID	3	17 ms	$< \pm 1$ rpm

BLDC motorlarda geçici durum sürecini azaltmak amacıyla ST+ID kontrolcüsü kullanılmıştır. Seçilen kontrol algoritmaları ve optimizasyon yöntemleri ile elde edilen parametreler kullanılarak 1500rpm ile başlatılan motorun hızı 1200rpm ile 1800rpm referans noktalarında test edilmiştir. Elde edilen performans grafiği aşağıdaki şekilde verilmiştir.



Şekil 4.5. ST+ID performans izleme grafiği

Optimum parametreler 1500 rpm için bulunmuştur. Aynı parametreler kullanılarak farklı hızlardaki çıkış grafikleri Şekil 4.6'da birlikte verilmiştir. Yapılan çalışmada seçilen tüm yeni referans hız değerlerinde ST+ID kontrolcüsü aşısız ve osilasyonsuz bir şekilde motor hızını istenen değerlere ulaştırmıştır.



Şekil 4.6. Farklı hızlar için ST+ID ile BLDC motor çıkışı



## 5. DEĞERLENDİRME VE SONUÇ

Bu çalışmada BLDC motorun hız kontrolü için PI ve STC kullanılmıştır. Bu kontrolcülerin optimum parametreleri PSO ve SCA ile belirlenmiştir. Karşılaştırmalı olarak yapılan incelemede her iki optimizasyon algoritmasından da benzer parametre değerleri elde edilmiştir. Dolayısıyla her iki kontrolcünün uygulanması sonucu elde edilen BLDC motor hız performansı yaklaşık aynı olarak gözlemlenmiştir. Ancak BLDC motorun kalkınması sırasında hem PI hem de STC kontrolcünün kullanımında bir dalgalanma gözlemlenmiştir. Her ne kadar optimum kontrolcü parametreleri kullanılsa da bu dalgalanma geçici durum sürecinde gözlemlenmiştir. Geçici durum sürecindeki bu sorunun giderilmesi amacıyla hibrit bir kontrol yöntemi önerilmiştir. ST kontrolcüsünün ürettiği kontrol sinyalini integral ve türev terimleri eklenerek, geçici durum sürecinde iyileştirme amaçlanmıştır. Yapılan simülasyonlar sonucu amaçlanan iyileşme geçici durum sürecinde BLDC motorun referans değerine kritik sönümlü olarak yaklaşmasıyla gerçekleşmiştir. Bununla birlikte, kalıcı durumda hızdaki dalgalanma minimum seviyede ölçülmüştür.

Kontrolcülerin performansının daha iyi incelenmesi amacıyla yapılan referans izleme testinde PI ve STC kontrolcülerinde hız değişimleri sırasında aşımalar görülürken, önerilen hibrit kontrolcüde böyle bir aşım görülmemiştir. Sonuç olarak; BLDC motora önerilen kontrol yöntemi uygulandığında, farklı çalışma hızlarına geçişlerde daha başarılı kontrol sinyali ile yeni çalışma hızına ulaşmıştır.

Elde edilen sonuçlar göstermiştir ki, önerilen hibrit ST+ID kontrolcüsü gerçek uygulamalar için iyi bir kontrolcü olarak önerilebilir.

## KAYNAKLAR

1. Başçi, A., Orman, K., Can, K., & Derdiyok, A. (2016). Real-Time Speed Control of BLDC Motor Based On Fractional Sliding Mode Controller. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, (Special Issue-1), 314-318.
2. Tariq, M., Bhattacharya, T. K., Varshney, N., & Rajapan, D. (2016). Fast response Antiwindup PI speed controller of Brushless DC motor drive: Modeling, simulation and implementation on DSP. *Journal of electrical systems and information technology*, 3(1), 1-13.
3. Hasan, M. S., Sharaf, A. F., Albakhait, M. D., & Jaber, A. I. (2019). High Performance Rectifier/Multilevel Inverter Based BLDC Motor Drive with PI Controller. In *The Fourth Scientific Conference for Engineering and Postgraduate Research (Vol. 745)*.
4. Ahmed, A. H., Abd El Samie, B., & Ali, A. M. (2018). Comparison between fuzzy logic and PI control for the speed of BLDC motor. *International Journal of Power Electronics and Drive Systems*, 9(3), 11-16.
5. Goswami, R., & Joshi, D. (2018). Performance review of fuzzy logic based controllers employed in brushless DC motor. *Procedia computer science*, 132, 623-631.
6. Sivarani, T. S., Jawhar, S. J., & Kumar, C. A. (2018). Novel bacterial foraging-based ANFIS for speed control of matrix converter-fed industrial BLDC motors operated under low speed and high torque. *Neural Computing and Applications*, 29(12), 1411-1434.
7. Prabu, M. J., Poongodi, P., & Premkumar, K. (2017). Genetic algorithm tuned PID controller for rotor position control of BLDC motor. *World Applied Sciences Journal*, 35(2), 199-207.
8. Darong, S. O. R. N., & Chen, Y. (2018). Design optimization of Permanent Magnet Brushless Direct Current Motor using Radial Basis Function Neural Network. In *2018 IEEE 7th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS)* (pp. 38-43).
9. Akram, H. A., Abd El Samie, B. K., & Ayman, M. A. (2018). Comparison between Fuzzy Logic and PI Control for the Speed of BLDC Motor. *International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS)*, 9(3), 1114-1123.
10. Ashoka, R. B., & Kumar, B. M. (2017). Comparative Analysis of BLDC motor for different control topology, 1st International Conference on Power Engineering, Computing and CONTROL, PECCON-2017, VIT University, Chennai Campus.
11. Mullick J.A.,(2017). Fuzzy Controller for Speed Control of BLDC motor using MATLAB. *International Research Journal of Engineering and Technology* , 2495-0072
12. Usman, A., & Rajpurohit B.S., (2016). Speed Control of a BLDC Motor using Fuzzy Logic Controller. *1st IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems*

13. Ciba, S., Iskender, I., & H.A. Ariani. (2020). Comparing Control Performances Of Mrac And Pid Applied On A Brushless Dc Motor. *International Journal on "Technical and Physical Problems of Engineering"*, 10-15
14. Deshmukh, S., & Goswami, A. (2018). Performance Analysis of Speed Control of Brushless DC motor using Partial Swarm Optimization Technique .
15. Jigang H., Hui F. & Jie W., (2019). A PI controller optimized with modified differential evolution algorithm for speed control of BLDC motor, *Journal for Control, Measurement, Electronics, Computing and Communications*, 135–148
16. Mahmud, M., Motakabber, S. M. A., Islam, A. Z., Nordin, A. N., & Wafa, S. F. (2021, June). Advanced Adaptive PID Controller for BLDC Motor. In *2021 8th International Conference on Computer and Communication Engineering (ICCCCE)* (pp. 121-125). IEEE.
17. Yu Z., Yao X. & Liu Z., (2008). Slide mode variable structure control for BLDC electric actuator. *7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing*, 7736-7741
18. Furat, M., & Eker, I. (2016). Chattering-eliminated adaptive sliding-mode control: an experimental comparison study. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 605-620.
19. Levant A. Sliding Order and Sliding Accuracy in Sliding Mode Control, *International Journal of Control*, 1247-1263.
20. Naseri, F., Farjah, E., Schaltz, E., Lu, K., & Tashakor, N. (2021). Predictive Control of Low-Cost Three-Phase Four-Switch Inverter-Fed Drives for Brushless DC Motor Applications. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 68(3), 1308-1318.
21. Almeida, P. M., Valle, R. L., Barbosa, P. G., Montagner, V. F., Ćuk, V., & Ribeiro, P. F. (2021). Robust Control of a Variable-Speed BLDC Motor Drive. *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Industrial Electronics*, 2(1), 32-41.
22. Vanchinathan, K., & Selvaganesan, N. (2021). Adaptive fractional order PID controller tuning for brushless DC motor using Artificial Bee Colony algorithm. *Results in Control and Optimization*, 100032.
23. Iztok Jr., Yang X.Y., Fister I., Brest J., & Fister D., (2013). A Brief Review of Nature-Inspired Algorithms for Optimization *Elektrotehniški Vestnik* 1–7
24. Tian D., Shi Z., (2018). Modified particle swarm optimization and its applications. All rights reserved. *Swarm and Evolutionary Computation* 49–68
25. M. Altabeeb, A. M. Mohsen, & Abdullatif Ghallab, (2019). An improved hybrid firefly algorithm for capacitated vehicle routing problem, *Applied Soft Computing Journal*, 1568-4946
26. Cui Z., Li F. & Zhang W., (2019) .Bat algorithm with principal component analysis, *International Journal of Machine Learning and Cybernetics* volume , 603-622

27. Xue Y., Jiang J., Zhao B. & Ma T., (2017).A self-adaptive artificial bee colony algorithm based on global best for global optimization, Methodologies and Application Published, 2935–2952
28. Ataş K., &Yıldırım T., (2019) Storage Management System Problem and Firefly Algorithm Solution, Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference, IEEE.
29. Yelghi A., & Köse C.,(2018) A modified firefly algorithm for global minimum optimization , Department of Computer Engineering, Faculty of Engineering, Karadeniz Technical University,29-44
30. Aydilek İ.B., (2017) .Değiştirilmiş ateşböceği optimizasyon algoritması ile kural tabanlı çoklu sınıflama yapılması , Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University,1097-1107
31. Yetkin M., & Bilginer Ö. , (2019).Yarasa Algoritması ile Robust Kestirimin Nivelman Ağlarına Uygulanması, Journal of Geomatics Araştırma Makalesi .196-202
32. Karabörk T.,Sönmez M., Aydın E.,Çelik T., Bölükbaş Y., &Çelik (2018).Yapılarda Kullanılan Diyagonal Çelik Çaprazların Yapay Arı Koloni Algoritması İle Optimizasyonu, Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi
33. Kaya, R., & Furat, M. (2020). Three-Channel Cost Function Based Artificial Bee Colony Algorithm for PID Tuning. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (Özel Sayı), 382-392
34. Jianyun Z., Zhenhua W., &Taizhao L., (2018). Research of Wolf Pack Algorithm International Conferance on Intelligent Transportation ,Big Data &Smart City, IEEE
35. Gür, H., & Furat, M. (2020). Özelleştirilmiş Uygunluk Fonksiyonu Tabanlı Su Döngüsü Algoritması ile PID Parametrelerinin Optimizasyonu. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (Özel Sayı), 332-341.
36. Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). PSO optimization. In Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks. IEEE Service Center, Piscataway, NJ, 1941-1948
37. Wang D., Tan D., & Liu L., (2018) . Particle swarm optimization algorithm: an overview , Soft Computer 387–408
38. Berber Ö. , Ateş M.,Alhasan H.A., &Güneş M., (2016 ) Parçacık Sürü Optimizasyonu ve PID ile Mobil Robotun Optimum Yörünge Kontrolü , KSU. Journal of Engineering Sciences
39. Özsağlam M. Y.,Çunkaş M., (2008). Optimizasyon Problemlerinin Çözümü için Parçacık Sürü Optimizasyonu Algoritması, Journal of Polytechnic 299-305
40. Mirjalili, S. (2016). A sine cosine algorithm for solving optimization problems. Knowledge-based systems, 120-133.

41. Demir G., &Tanyıldızı E., (2017).Optimizasyon Problemlerinin Çözümünde Sinüs Kosinüs Algoritması (SKA)'nın Kullanılması, Science and Eng. J of Fırat Univ. 225-236



## DİZİN

---

### A

ABA · xi, 24

ABC · xi, 25

Araştırmacı Kurt · 26

Ateş Böceği Algoritması · vii, xi,  
24, 25

---

### B

BLDC · iv, v, vii, viii, ix, x, xi, 13,  
14, 15, 16, 17, 21, 22, 31, 32,  
34, 36, 40, 42, 43, 46, 48, 49,  
50

---

### D

DA · xi, 13, 15

---

### F

FLC · 13, 14

---

### G

Gözcü arı · 25

---

### H

Hibrit · iv, 14

---

### i

İşçi arı · 25

---

### K

Kaşif arı · 25

Kedi Sürüsü Optimizasyonu · 24

KKK · xi, 26

KKK · xi, 21

Kontrol Yöntemleri · vii, viii, 18,  
31

Kurt Kolonisi Algoritması · vii,  
xii, 24, 26

Kuşatmacı Kurt · 26

---

### L

Lider Kurt · 26

---

### M

mobilité · iv

---

### O

okuma · iv

Optimizasyon Yöntemleri · viii, 32

---

### P

P · xi, 18, 19, 49

Parametreler · 32, 44

Parçacık Sürüsü Optimizasyonu ·  
vii, xi, 24, 26

PD · xi, 18, 20, 21

PI · iv, viii, ix, x, xi, 13, 14, 18, 20,  
21, 22, 31, 33, 34, 35, 36, 41,  
42, 48, 49, 50

PID · iv, vii, x, xi, 14, 18, 19, 42,  
43, 49, 52

PSO · iv, x, xi, 22, 23, 26, 27, 28,  
32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39,  
40, 41, 42, 43, 44, 45, 48, 52

---

### S

SCA · iv, x, xii, 22, 32, 33, 34, 35,  
36, 37, 38, 39, 40, 41, 48, 52

sensör · xi

Sinüs-Kosinüs Algoritması · vii, 28

ST+ID · viii, x, 43, 45, 46, 47, 48

STC · iv, viii, ix, x, xi, 14, 22, 31,  
37, 38, 39, 40, 41, 42, 44, 48

---

### Y

Yapay Arı · vii, xi, 24, 25

Yapay Arı Koloni Algoritması ·  
24

Yarasa Algoritması · vii, 24, 25, 51



**TEKNOVERSİTE**



teknoversite **AYRICALIĞINDASINIZ**

**İSTE**

