

Mekatronik Mühendisliğinde

Yük Frekans Kontrolü ve Stabilizasyon

Editör
EVREN ÇAĞLARER

BİDGE Yayınları

Mekatronik Mühendisliğinde Yük Frekans Kontrolü ve
Stabilizasyon

Editörler: Dr. Öğrt. Üyesi Evren Çağlarer

ISBN: 978-625-372-263-0

1. Baskı

Sayfa Düzeni: Gözde YÜCEL

Yayınlama Tarihi: 25.06.2024

BİDGE Yayınları

Bu eserin bütün hakları saklıdır. Kaynak gösterilerek tanıtım için yapılacak kısa alıntılar dışında yayıncının ve editörün yazılı izni olmaksızın hiçbir yolla çoğaltılamaz.

Sertifika No: 71374

Yayın hakları © BİDGE Yayınları

www.bidgeyayinlari.com.tr - bidgeyayinlari@gmail.com

Krc Bilişim Ticaret ve Organizasyon Ltd. Şti.

Güzeltepe Mahallesi Abidin Daver Sokak Sefer Apartmanı No: 7/9 Çankaya /
Ankara



ÖNSÖZ

Mekatronik mühendisliği, disiplinler arası bir yaklaşımla mekanik, elektronik ve bilgisayar mühendisliği prensiplerini birleştirerek karmaşık sistemlerin tasarımı ve kontrolünü sağlayan dinamik bir alandır. Günümüzde elektrik güç sistemleri, enerji iletiminde ekonomik ve verimli çözümler sunmak amacıyla sürekli olarak geliştirilmektedir. Bu süreçte karşılaşılan önemli bir konu ise optimal güç akışının sağlanmasıdır. Üretim ve yük talebi arasındaki dengesizlikler, beklenmedik iç ve dış etkenler veya yük değişiklikleri, sistem frekansının ve güç iletim hatlarının istenen sınırlarının dışına çıkmasına neden olabilir. Elektrik güç sistemlerinde bu istikrarsızlıkları önlemek ve kontrol altında tutmak için Yük Frekans Kontrolü (YFK) kritik bir öneme sahiptir.

Mekatronik Mühendisliğinde Yük Frekans Kontrolü ve Stabilizasyon adlı bu kitap, mekatronik mühendisliği alanında ileri düzey kontrol ve optimizasyon tekniklerinin uygulamalarını incelemektedir. Özellikle, PID (Proportional-Integral-Derivative) denetleyicileri ve Çıta Optimizasyonu Algoritması'nı temel alan çözümler sunulmaktadır. Üç ana bölümden oluşan kitap, güç sistemlerinde yük frekans kontrolü, kendini dengede tutan robotlar ve drone kalkış stabilitesini artırma konularını kapsamakta, kontrol stratejilerini incelemekte ve endüstriyel uygulamalar için pratik çözümler sunmaktadır.

Bu kitap, mekatronik mühendisliği alanında çalışan mühendisler, araştırmacılar ve öğrenciler için değerli bir kaynak olmayı hedeflemektedir. Elektrik güç sistemleri, robot teknolojileri ve dron stabilizasyonu gibi konularda yenilikçi yaklaşımlar sunarak okuyuculara geniş bir perspektif kazandıracaktır. Endüstri 4.0 ve

akıllı sistemler gibi geleceğin teknolojilerine yönelik pratik çözümler sunan bu kitap, mekatronik mühendisliğinin gelişimine katkıda bulunacaktır. **“Mekatronik Mühendisliğinde Yüksek Frekans Kontrolü ve Stabilizasyon”** adlı eserimizin tamamlanma sürecinde tüm emeği geçenlere, bölüm yazarlarına, “BİDGE” yayınevi çalışanlarına sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Editör

Dr.Öğr. Üyes. Evren ÇAĞLARER

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ	3
İÇİNDEKİLER	5
PID Denetleyici Tasarımı İçin Çita Optimizasyonu Algoritması Kullanarak Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrol Optimizasyonu	6
Beytullah BOZALİ	6
Hilmi KARABAŞ	6
Robot Kollu Kendini Dengeleyen Robot	39
Nafi Göktuğ YALÇIN	39
Mustafa Engin	39
Pid Kontrol Sistemi ve Çita Optimizasyon Algoritmasını Kullanarak Dron Kalkış Stabilesini Artırma	63
Beytullah BOZALİ	63
Doğukan TEKİNER	63

BÖLÜM I

PID Denetleyici Tasarımı İçin Çıta Optimizasyonu Algoritması Kullanarak Güç Sistemlerinde Yük Frekans Kontrol Optimizasyonu

**Beytullah BOZALI¹
Hilmi KARABAŞ²**

Giriş

1.1. Amaç ve Kapsam

Elektrik Güç Sistemlerinin (EGS) temel amacı, elektrik enerjisini tüketicilere ekonomik ve verimli bir şekilde iletmektir. EGS işletimi içindeki önemli konulardan biri, optimal güç akışı (OPF) problemini içerir ve bu da elektrik dağıtımının ekonomik yönünü kapsar. Araştırmacılar tarafından yaygın olarak incelenen bir konudur (Mandal & Kumar Roy, 2014; Naderi et al., 2019). Üretim

¹ Beytullah BOZALI, Öğretim Görevlisi Dr. Düzce Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği

² Hilmi KARABAŞ, Düzce Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği, , Orcid:0009-0001-9337-3636

ve yük talebi arasındaki uyumsuzluklar, öngörülemeyen iç ve dış bozulmalar veya yük değişiklikleri nedeniyle sistem çalışma frekansının ve değişim hattı güç akışının planlanan limitlerinden sapmaya yol açabilir. Bu durum, EGS modellemesinde Yük Frekansı Kontrolü (YFK) olarak adlandırılan doğru, verimli ve hızlı bir kontrol mekanizması tasarlanmasını gerektirir, böylece sistem performansını, yani alan frekansı ve değişim bağlantı hattı gücünü, planlanan değerlerde tutabiliriz. YFK, EGS 'nin sorunsuz ve güvenli çalışması için en karlı yan hizmetlerden biridir (Guha et al., 2016, 2017; Singh et al., 2017). EGS 'lerin YFK 'sinde iyileştirmeler yapmak için dünya çapındaki araştırmacılar, kontrolcü yapısı ve kazanımlarını optimize etmek için farklı yöntemler üzerinde çalışıyorlar. Bazı çalışmalar, klasik PI/PID tekniklerinin kazanımlarını artırmak için yeni yüksek performanslı optimizasyon algoritmalarının kullanıldığını gösteriyor. Diğer araştırmalar ise, yanıltıcı kontrol performansını önlemek için kontrolcü parametrelerini temel arama algoritmalarıyla ayarlayarak yeni kontrol şemaları öneriyor. Son olarak, araştırmacılar yeni bir kontrolcü yapısı sunuyor ve parametrelerini üstün arama performansı sağlayan bir optimize edici kullanarak ayarlıyorlar. Bu üç yaklaşımdan, orijinal kontrol şemasına ve yeni arama algoritmalarına dayanan sonuncusu, daha iyi bir YFK mekanizması geliştirme potansiyeli taşıyor (Guha et al., 2017a). YFK probleminin doğrusal olmayan davranışını ele almak ve sistemin kararlılığını sağlamak için, stokastik yük modeli ve bozucu girdiler altında alternatif kontrol yaklaşımları da incelenmiştir. Bunlar arasında yapay sinir ağı yaklaşımları, bulanık mantık teorisi ve uyarlanabilir nöro bulanık çıkarım sistemi gibi yeni kontrol yaklaşımları yer

almaktadır (Khuntia & Panda, 2012). Yeni kontrol yaklaşımları, hesaplama açısından maliyetli ve tasarımı zor olabilir; ancak geleneksel yöntemlerin kısıtlamalarını ortadan kaldırarak önemli performans artışları sağladıkları görülmektedir. Bir çalışmada, enerji üretim sistemlerinde kontrol problemlerini çözmek için farklı yaklaşımlar sunulmuş ve geleneksel yöntemlere kıyasla daha iyi performans ve daha hızlı yakınsama sağladığı vurgulanmıştır (Guha et al., 2016; Hota & Mohanty, 2016). Enerji üretim sistemlerinde, Yapay Sinir Ağları (YSN) doğrusal olmayan kontrol problemlerini ele almak için önemli bir yöntemdir.

YSN'ler, enerji üretim sistemlerinde PID veya PI/PID denetleyicileri yerine doğrudan kontrol sağlayarak daha etkili ve verimli çözümler sunduğunu belirtmişlerdir (Saikia et al., 2011). Enerji üretim sistemlerindeki YFK problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılır, özellikle belirsizliklerin ve karmaşıklıkların olduğu durumlarda Bulanık Mantık Teorisi (BMT), etkili olduğunu belirtmişlerdir (Guha et al., 2017b; Sahu et al., 2015). Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), veri setlerindeki kalıpları tanımak ve öğrenmek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, enerji üretim sistemlerindeki YFK problemlerini çözmek için kullanılabilir ve sistemin dinamik doğasına uyum sağlama yeteneğine sahip olduğunu belirtmişlerdir (Sahu et al., 2015; Saikia et al., 2011). Bir diğer çalışmada Kesirli Dereceli Analiz (FDA) YFK problemlerini ele almak için kullanılabilir ve karmaşık sistem dinamiklerini yakalamak için yararlı olduğunu belirtmektedirler (Mohanty et al., 2014). Kontrol stratejisinin önemli bir yönü, istenen dinamik performansı sağlarken parametre belirsizlikleriyle başa çıkma yeteneğidir. Bu nedenle, tasarlanan kontrolcüler mümkün

olduğunca karmaşık olmamalı ve pratik uygulamaya uygun olması gerektiğini belirtmektedirler (Guha et al., 2017a).

EGS modellemesinde YFK kontrolü için farklı algoritmalar ile çalışmalar yapılmaktadır. Bunlara örnek olarak, Yarı-karşıt Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (QOGWO) tabanlı PID (Guha D, 2016). Yarı-karşıt Simbiyotik Organizma Arama (QOSOS) Algoritması tabanlı PI/PID (Guha D, 2017). Bakteriyel Yiyecek Arama Optimizasyon Algoritması (BFOA) tabanlı PI denetleyici (Ali ES, 2011). Yapay Arı Kolonisi (ABC) Tekniği tabanlı PI/PID (Gözde H, 2012). Hibrit BFOA ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) (hBFOA-PSO) Algoritma tabanlı PI (Panda S, 2013). Diferansiyel Evrim (DE) Algoritma tabanlı I/PI/PID (Mohanty B, 2014). Geri İzleme Arama Algoritması (BSA) tabanlı PI/PID (Guha D, 2018). Yarı-karşıt Uyum Arama Algoritması (QOHS) tabanlı PID (Shiva CK, 2015). Diferansiyel Arama Algoritması (DSA) tabanlı PID (Guha D, 2017). Hibrit Ateşböceği Algoritması-Örüntü Araması (hFA-PS) Teknik tabanlı PI/PID (Sahu RK, 2015). Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) tabanlı PI/PID (Guha D, 2016). Ayrıca, Yarasa Algoritması tabanlı çift modlu PI (Sathya ve Ansari 2015), hibrit stokastik fraktal arama ve yerel tek modlu örnekleme (hSFS-LUS) tabanlı çok aşamalı PID (Sivalingam et al.,2017), GWO gibi PID kontrol şemalarının değiştirilmiş versiyonlarına dayalı kademeli PI-PD denetleyici (Padhy ve ark. 2017), Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA) tabanlı PI-PD kademeli denetleyici (Dash ve ark. 2016) ve iki serbestlik derecesine dayalı farklı optimizasyon teknikleri (2DOF) kontrolörleri (Sahu ve ark. 2013, 2016; Dash ve ark. 2014; Patel ve ark. 2019) gibi öneriler bulunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, beklenmedik yük kesintileri ve diğer olası aksaklık durumlarında sistemin istikrarını sağlamak ve kontrol altında tutmaktır. Sistem frekansı ve bağlantı hattı güç dalgalanmalarının istenilen seviyede tutulması ve sistem kararlılığının korunması hedeflenmektedir. Adım yük değişimlerinin ardından alan kontrol hatasının en aza indirilmesi ve her bir alanın kararlı durumdayken kendi yükünü idare edebilmesi sağlanacaktır. Geçici durumlarda güç talebi artan alanların birbirleriyle iş birliği yaparak, sistemin daha etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Tek Alanlı Yük Frekans Kontrolü

Çalışmamızda tek alanlı YFK kontrol sistemi kullanılmaktadır. Tek alanlı yük frekans kontrolü, elektrik enerjisinin dağıtımında ve kullanımında önemli bir rol oynayan bir sistemdir. Bu sistem, elektrik ağlarında gerilim ve frekansın istikrarını sağlamak için kullanılır. Temel olarak, elektrik ağlarındaki yük değişikliklerine hızlı bir şekilde yanıt vererek frekansın istikrarını korur (Saadat, 1999). Bu kontrol sistemi, enerji talebindeki ani değişikliklere uyum sağlamak için tasarlanmıştır.

Özellikle, elektrik tüketiminin yüksek olduğu bölgelerde, mesela büyük şehirlerde veya sanayi bölgelerinde, yük frekans kontrolü önemli bir unsur haline gelir. Ani yük artışları veya azalışları, frekansın dengesini bozabilir ve bu da elektrik sistemlerinde ciddi sorunlara yol açabilir (Öztürk et al., 2016). Tek alanlı yük frekans kontrolü genellikle enerji üretim ve dağıtım şirketleri tarafından kullanılan sofistike sistemlerle sağlanır. Bu

sistemler, frekansı sabit tutmak için enerji üretimini anında ayarlayabilir ve ağıdaki yük değişikliklerine adapte olabilir. Ayrıca, akıllı şebeke teknolojileri ve dijital kontrol sistemleri, yük frekans kontrolünün etkinliğini artırmak için kullanılır (Öztürk et al., 2016). Sonuç olarak, tek alanlı yük frekans kontrolü, elektrik ağlarının güvenliğini ve istikrarını sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Bu sistemler, enerji tedarikinin sürekliliğini ve elektrik sistemlerinin güvenilirliğini artırırken, aynı zamanda enerji verimliliğini ve sürdürülebilirliğini de destek sağlamaktadır (Laghari, 2024).

İzole edilmiş bir güç istasyonu aşağıdaki parametrelere sahiptir.

Türbin Zaman Sabiti: T_t	0,05 saniye
Governör Zaman Sabiti T_g	0,2 saniye
Jeneratör Atalet Sabiti: H	5saniye
Regülatör Hız düzenleyicisi	R birim başına

Frekanstaki %1'lik bir değişiklik için yük yüzde 0,8 oranında değişmektedir. $D = 0,8$.

Governor hız regülasyonu birim başına $R = 0,05$ olarak ayarlanmıştır. Türbin anma gücü 60 Hz nominal frekansta 250 MW 'tır. 50 MW 'lık ani yük değişimi (ΔPL birim başına 0,2saniye) meydana gelir (Saadat, 1999).

Simulink blok diyagramını oluşturun ve frekans sapma yanıtını elde edin. Regülatör hız regülasyonu R birim başına 0,05. Bu nedenle $1/R$ olur. $1/R$ denklemi Denklem (1)'de verilmektedir (Laghari, 2024; Öztürk Ali et al., 2016).

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{0.05} = 20 \quad (1)$$

Örnekte hesaplandığı gibi kararlı durum frekans sapması Denklem (2)'de verilmektedir (Öztürk et al., 2016; Saadat, 1999).

$$\Delta_f = -0,0096 \quad (2)$$

Kararlı durum frekans sapma denklemi Denklem (3) ve (4)'te verilmektedir (Laghari, 2024; Saadat, 1999).

$$\Delta_{f_{Actual}} = \Delta_{f_{p.u.}} \times \Delta_{f_{base}} \quad (3)$$

$$\Delta_{f_{Actual}} = -0,0096 \times 60 = -0,576 \quad (4)$$

Hertz cinsinden kararlı durum frekansı denklemi, Denklem (5 ve 6)'da ifade edilmektedir (Laghari, 2024; Öztürk Ali et al., 2016).

$$f_{Actual} = f_{orijinal} + \Delta_{f_{Actual}} \quad (5)$$

$$f_{Actual} = 60 - 0,576 = 59,424 \text{ Hz} \quad (6)$$

50 MW Yük Değişimi Türbin nominal gücü 250 MW' tır. 50 MW' lık ani yük değişimi olduğu kabul edilmiştir. Adım giriş fonksiyonunun değeri Denklem (7, e ve 9)'da verilmektedir (Saadat, 1999).

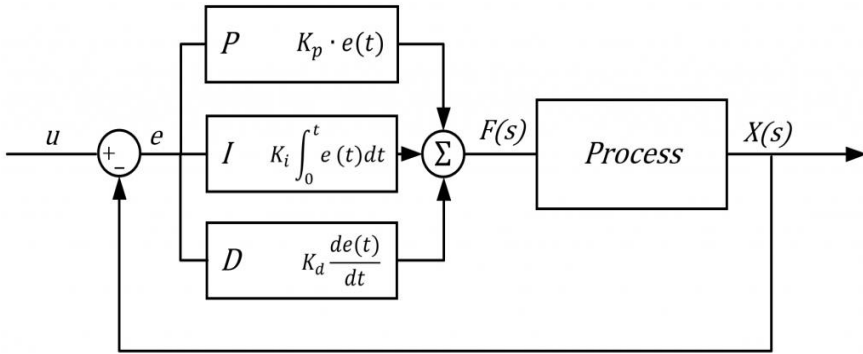
$$\Delta P_L = \frac{50}{250} = 0,2 \text{ p. u.} \quad (7)$$

$$\Delta P_L = 0,2 \times 250 = 50 \text{ MW} \quad (8)$$

$$P_L = 250 + 50 = 300 \text{ MW} \quad (9)$$

2.2 Proportional-Integral-Derivative (PID)

PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolcüsü, endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir geri besleme mekanizmasıdır. PID kontrolcüsü, oransal (P), integral (I) ve türev (D) terimlerini kullanarak bir proses değişkeninin istenen değerde kalmasını sağlar. Bu üç terimin birleşimi, sistemin kararlı, hızlı ve doğru bir şekilde kontrol edilmesini sağlar (Öztürk Ali et al., 2016; Saadat, 1999). Şekil 1’de PID blok diyagram gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. PID blok diyagram

2.2.1 Oransal (P) Kontrol

Oransal kontrol, hatanın (set noktası ile mevcut ölçüm arasındaki fark) anlık değerine bağlı olarak bir çıkış üretir. Bu terim, hatayı hızlı bir şekilde azaltmak için kullanılır ancak tek başına kalıcı bir hata bırakabilir (Öztürk Ali et al., 2016; Saadat, 1999).

2.2.2 İntegral (I) Kontrol

İntegral kontrol, hatanın zaman içindeki birikimini dikkate alır. Bu terim, oransal kontrolün bıraktığı kalıcı hatayı ortadan

kaldırmak için kullanılır ve uzun vadede hatayı sifıra indirmeye çalışır (Saadat, 1999).

2.2.3 Türev(D) Kontrol

Türev kontrol, hatanın değişim hızına göre tepki verir. Bu terim, sistemin aşırı tepkisini azaltmak ve stabiliteyi artırmak için kullanılır (Öztürk Ali et al., 2016).

Matematiksel Temel

PID kontrolörünün işleyişinin ifadesi Denklem (10)'da ifade edilmiştir. Uygun K_p , K_i ve K_d kontrol kazançlarının bulunması için maliyet fonksiyonunun seçimi oldukça önemlidir. Bu seçim, hedeflenen sistem bütünlüğüne ulaşmak için kritik bir şekilde sunulmaktadır (Kumarakrishnan et al., 2020).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

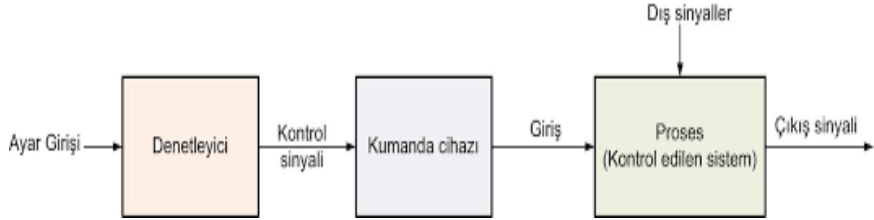
Denklem (10)'da $u(t)$ = Kontrol çıkışı, $e(t)$ = Hata (set noktası-Proses değişkeni), K_p = Oransal Kazanç, K_i = İntegral Kazanç, K_d = Türevsel Kazancı ifade etmektedir (Kumarakrishnan et al., 2020).

PID kontrolcüler, farklı sistemler için optimize edilmelidir. Bu süreç genellikle deneysel yöntemlerle veya belirli algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilir. Ayarlama, her bir terimin kazanç değerlerinin belirlenmesini içerir ve bu değerler, sistemin performansını doğrudan etkiler (Saadat, 1999).

2.2.4 Açık Çevrim Kontrol

Açık çevrim kontrol sistemi, giriş sinyali ile çıkış sinyali arasında geri besleme döngüsünün bulunmadığı bir kontrol yöntemidir. Sistem, önceden belirlenmiş bir kontrol stratejisine göre çalışır ve dışarıdan gelen herhangi bir geri bildirim dikkate alınmaz.

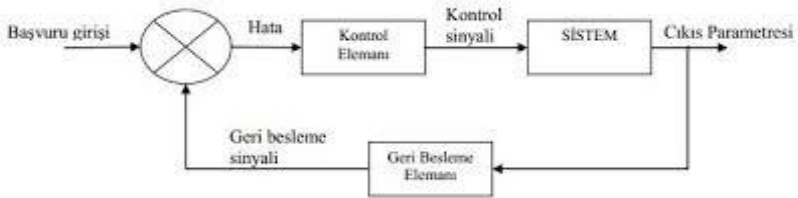
Açık çevrim sistemler, genellikle basit ve ucuzdur, ancak sistemdeki değişikliklere veya bozulmalara karşı duyarlıdır (Öztürk Ali et al., 2016; Saadat, 1999). Şekil 2’ açık çevrim blok diyagramı gösterimi verilmektedir.



Şekil 2. Açık çevrim blok diyagramı

2.2.5 Kapalı Çevrim Kontrol

Kapalı çevrim kontrol sistemi, çıkış sinyalini sürekli olarak ölçen ve geri besleyen bir kontrol yöntemidir. Bu geri besleme bilgisi, kontrol stratejisini ayarlamak için kullanılır. PID kontrolcüsü, tipik olarak kapalı çevrim kontrol sisteminde kullanılır ve sistem performansını optimize eder (Saadat, 1999). Şekil 3’te kapalı çevrim blok diyagram gösterimi verilmektedir.



Şekil 3. Kapalı çevrim blok diyagram

2.2.6 Tepe Zamanı (Peak Time) T_p

Sistemin ilk hareketinde en yüksek noktaya çıkması için geçen süreye Tepe Zamanı denir. Denklem (11)’deki gibi ifade edilir.

$$T_p = \frac{\pi}{\omega_d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (11)$$

Denklem (11)'de ξ =Sönüm oranı, ω_n = doğal frekans, ω_d =sönümlü doğal frekans olarak ifade etmektedir (Öztürk Ali et al., 2016).

2.2.7 Ayarlama Süresi (Setting Time) Ts

T zamanı sonsuza giderken fonksiyon değeri $C_{final}=C_f$ olmaktadır. Bu duruma sistem değeri, $C_f (1\pm0,02)$ sınırları içerisinde girene kadar geçen zamana Ayarlama Süresi veya Yerleşme Zamanı denir. Denklem (12)'de Ts değeri verilmiştir (Saadat, 1999).

$$T_s = \frac{-\ln(0,02 \times \sqrt{1-\xi^2})}{\xi \times \omega_n} = \frac{4}{\xi \times \omega_n} \quad (12)$$

2.2.8 Yükselme Zamanı (Rise Time) Tr

Sistemin son değeri olan C_f değerinin %10 'undan(T_1) başlayıp %90 değerine(T_2) varana kadar geçen süreye yükselme zamanı denir. Denklem (13)'te yükselme zaman ifadeleri verilmektedir (Öztürk Ali et al., 2016).

$$T_2=0,9 \times C_f, T_1=0,1 \times C_f \quad T_r=T_2-T_1 \quad (13)$$

2.2.9 Maksimum Aşma (OverShoot) %OS

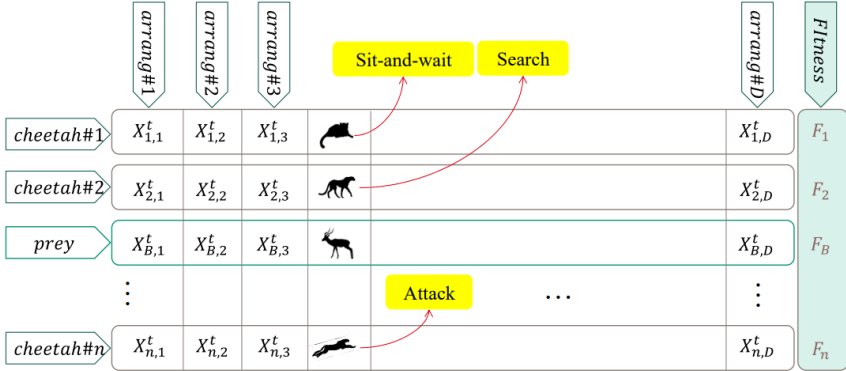
T zamanından sonsuza giderken $C_{final}=C_f$ olmaktadır. Bu durumda sistem değeri $C_f(1\pm0,02)$ sınırına girene kadar geçen süreye denir, Denklem (14)'te Maksimum Aşma ifadesi verilmiştir (Öztürk Ali et al., 2016).

$$\%OS = \frac{C_{max} \times C_f}{C_f} \times 100 \quad (14)$$

2.3 Çita Optimizasyonu (CO)

Çita Optimizasyon Algoritması (CO), çitaların avlanma davranışlarından türetilen, doğadan ilham alan bir optimizasyon tekniğidir. Bu algoritma çitaların stratejik avlanma taktiklerini taklit ediyor ve dört temel aşamayı içeriyor: arama, bekleme, saldırma ve yaşam alanına geri dönme. Bu aşamalar toplu olarak algoritmanın keşif ve kullanım yeteneklerini geliştirerek çeşitli sorun alanlarında etkili optimizasyon sağlar (Akbari et al., 2022). Bir çita, devriye sırasında ya da çevresel gözlem yaparken potansiyel bir avı fark edebilir. Avı gözlemlediğinde, çita, avın daha yakın bir mesafeye gelmesini beklemek için oturabilir ve bu süre zarfında saldırı için uygun anı kollar. Saldırı, hızlı bir koşu ve avı ele geçirme evrelerini içerir. Çeşitli sebeplerle, örneğin enerji sınırlamaları veya avın hızla uzaklaşması gibi durumlarda, çita avlanmayı terk edebilir ve dinlenmek üzere yuvasına geri dönebilir.

Daha sonra, yeni bir av arayışına başlayabilir (Öztürk et al., 2016) Çita, avının konumunu, çevresindeki alanı ve kendisine olan mesafesini değerlendirerek, görselde gösterilen stratejilerden birini seçer. Genel olarak, Çita Optimizasyonu (CO) algoritması, bu avlanma stratejilerini avlanma sürecinde etkin bir şekilde kullanmaya dayanır (Öztürk et al., 2016). CO algoritması, Akbari ve diğerleri tarafından çitaların avlanma stratejilerini taklit etmek amacıyla etkili bir optimizasyon algoritması olarak geliştirilmiştir. CO algoritması, avlanma sürecinde üç ana strateji kullanır: av arama, oturma ve bekleme ve saldırı. Algoritmanın yerel optimum noktalarda sıkışmasını önlemek için, avdan ayrılma ve eve dönme tanımlanmıştır. Çita popülasyonlarının farklı düzenlemeleri Şekil 4'te verilmiştir (Akbari et al., 2022; Memon et al., 2023).



Şekil 4. CO algoritması farklı düzenleme gösterimi

Şekil (4) de anlatılmak verilen CO algoritmasının, avlanma sürecinde üç ana strateji ifadeleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

Arama stratejisi: Çitalar ava ulaşmak için otururken ve beklerken çevreyi gözlemlemesinin matematiksel modellenmesidir (Akbari et al., 2022).

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + \hat{r}_{i,j}^{-1} \cdot \alpha_{i,j}^t \quad (15)$$

Denklem (15) de $x_{i,j}$ vektörü çitanın mevcut konumunu, j çitanın bir sonraki arama konumunu, $X_{i,j}^{t+1}$ ve $X_{i,j}^t$ çitanın i ve j koordinatındaki ve sonraki arama konumunu temsil eder. T maksimum avlanma zamanını, t mevcut avlanma zamanını temsil eder, $X_{i,j}^t$ randomize bir parametredir, $\alpha_{i,j}^t$ avlanmak için adım uzunluğudur (Memon et al., 2023; Öztürk Ali et al., 2016).

Otur ve bekle stratejisi: Çitaların avlanırken pusuya yatmasıdır. Otur ve bekle stratejisinin denklemi Denklem (16)'da verilmektedir.

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t \quad (16)$$

Denklem (16)'da, j her adımda güncellenmiş konum, i her çitanın çözüm arayışını temsil eder (Akbari et al., 2022; Memon et al., 2023).

Saldırı stratejisi: Denklem (17)'de çitalar avlarına saldırmaya karar verdiğinde hız ve esneklik üstünlüklerini kullanırlar. Av, çitayı fark edip kaçmaya başladığı esnada çita avı kaçırmamak için değişir (Akbari et al., 2022).

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{B,j}^t + \hat{r}_{i,j}^{-1} \cdot B_{i,j}^t \quad (17)$$

$\alpha_{i,j}^t$ avın mevcut konumu, $\alpha_{i,j}^t$ çitanın hızlı yer değiştirmesi, $\alpha_{i,j}^t$ dönüş faktörünü temsil eder (Memon et al., 2023). Denklem (18)'de etkileşim faktörü formülü verilmektedir.

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{B,j}^t + \hat{r}_{i,j}^{-1} \cdot B_{i,j}^t \quad (18)$$

2.4 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bir hesaplamalı yöntemdir. İlk olarak 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilmiştir. Doğada kuş sürülerinin ya da balık sürülerinin davranışlarını taklit eder. PSO' nun temel özelliklerini ve çalışma prensibini açıklayayım (Kennedy James & Eberhart Russel, 2011). Parçacık (Particle): Optimizasyon probleminin çözüm uzayında bir aday çözümdür. Her parçacığın belirli bir konumu ve hızı vardır. Bu konum ve hız, parçacığın optimizasyon sürecindeki durumunu ve hareketini tanımlar. Sürü (Swarm): Parçacıkların oluşturduğu topluluktur. Bu topluluk, parçacıkların etkileşim ve iş birliği yaparak daha iyi çözümler bulmasına olanak tanır.

Fitness Değeri: Her parçacığın çözümünün ne kadar iyi olduğunu belirleyen bir ölçüttür. Fitness değeri, optimizasyon probleminin amacına göre minimize edilmeye ya da maksimize edilmeye çalışılır. Bu değer, parçacığın mevcut çözümünün kalitesini yansıtır ve algoritmanın performansını değerlendirmek için kullanılır (Reeves, 1983).

PSO'nun Çalışma Prensipleri Başlangıç: PSO, belirli sayıda parçacığın rastgele konumlandırılmasıyla başlar. Hareket ve Güncelleme: Her bir parçacık, kendi en iyi konumunu ($pBest$) ve tüm sürünün en iyi konumunu ($gBest$) dikkate alarak hız ve konumunu günceller. Hız Güncelleme: Parçacığın yeni hızı, mevcut hızına, kendi en iyi konumuna ve sürünün en iyi konumuna olan uzaklıklarla orantılı olarak güncellenir.

Hız güncelleme formülü Denklem (19)'da verilmektedir (Minsky, 1954).

$$v_i(t + 1) = w \times v_i(t) + c_1 \times r_1 \times (pBest_i - x_i(t)) + c_2 \times r_2 \times (gBest - x_i(t)) \quad (19)$$

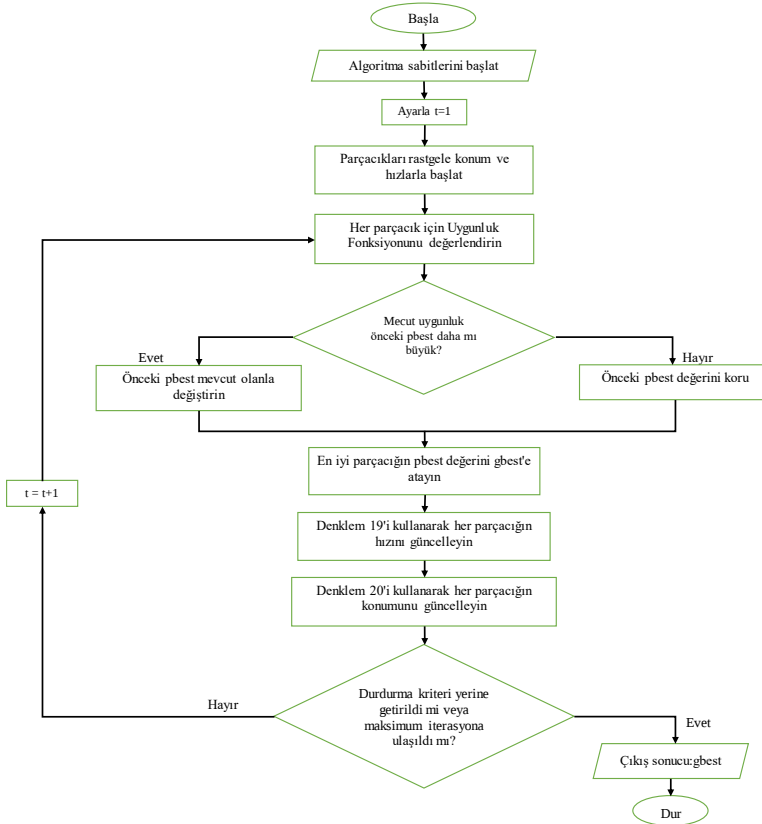
Denklem (19)'da $v_i(t)$: Parçacığın t anındaki hızı, $v_i(t)$:Parçacığın t anındaki konumu, w : Atalet ağırlığı (inertia weight), c_1, c_2 : Öğrenme faktörleri (genellikle sabit sayılar), r_1, r_2 : Rastgele sayılar (0-1 arasında), $pBest_i$: Parçacığın bulunduğu en iyi konum, $gBest$: Sürünün bulunduğu en iyi konumu belirtir.

PSO konum güncellenmesi, parçacığın yeni konumu, mevcut konumuna yeni hızının eklenmesiyle bulunur. Konum güncelleme formülü Denklem (20)'da verilmiştir (Minsky, 1954; Reeves, 1983)

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (20)$$

Döngü, adımlar belirli bir iterasyon sayısına ulaşana kadar veya durdurma kriteri karşılanana kadar tekrarlanır (Minsky, 1954).

PSO'nun avantajı olarak, Kolay Anlaşılır ve Uygulanabilir olmasıdır. PSO'da ayarlanması gereken parametre sayısı azdır. Küresel en iyiyi bulma eğilimi, lokal minimumlara takılma olasılığı düşük olan küresel bir arama stratejisi kullanır (Kennedy James & Eberhart Russel, 2011). Şekil 5'te PSO algoritması akış şeması vermiştir (Kennedy et all, 2011; Minsky, 1954).



Şekil 5. PSO Akış Şeması

3. Bulgular

YFK, Matlab 2023b sürümü ile 1650 ekran kartı ve i7 11. nesil işlemci bulunan bir bilgisayardan simüle edilmiştir. Yük frekans kontrolü, elektrik güç sistemlerinde frekansın nominal değerinde (genellikle 50 Hz veya 60 Hz) sabit tutulmasını ve jeneratörler arasında yük paylaşımının dengeli bir şekilde gerçekleştirilmesini amaçlayan bir kontrol mekanizmasıdır. Elektrik üretimi ve tüketimi arasındaki dengenin bozulması, frekans saptmalarına yol açar. Bu saptmaların minimumda tutulması, sistemin kararlılığı ve güvenilirliği için hayati önem taşır. YFK, frekans saptmalarını algılayarak, jeneratörlerin giriş gücünü ayarlamak suretiyle gerekli düzeltmeleri yapar. Birincil Frekans Kontrolü: Hız düzenleyicileri (governors) kullanarak ani frekans değişimlerine hızlı tepki verir (Saadat, 1999).

Jeneratörlerin hız düzenleyicileri, sistem frekansındaki değişiklikleri algılar ve giriş gücünü ayarlayarak tepki verir. Denklem (21)'de Frekans saptması (Δ_f) Sistemin frekansı, nominal frekanstan saptar denklem verilmiştir (Saadat, 1999).

$$\Delta_f = f_{\text{nominal}} - f \quad (21)$$

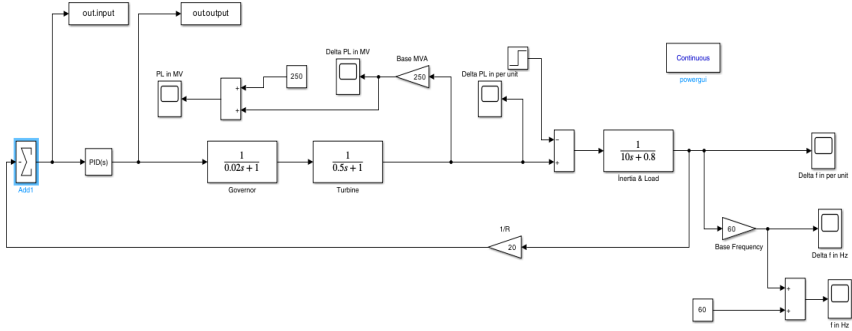
Jeneratör güç değişimi (ΔP): Hız düzenleyicisinin tepkisi Denklem (22)'deki gibi ifade edilir (Laghari, 2024; Saadat, 1999). Denklem (22)'de K_d , düzenleyicinin frekans duyarlılık katsayısını ifade eder.

$$\Delta P = -K_d \Delta_f \quad (22)$$

İkincil Frekans Kontrolü: Otomatik Üretim Kontrolü (AGC) sistemleri aracılığıyla daha yavaş ve hassas düzeltmeler yapar. AGC, birincil kontrolün ardından gelen kalıcı saptmaları düzeltir ve sistem

frekansını nominal değere döndürür (Saadat, 1999). AGC denklemi denklem (23)'te verilmektedir.

$$\Delta P_{AGC} = K_p \Delta_f + K_i \int \Delta_f dt + K_d \frac{d(\Delta_f)}{dt} \quad (23)$$



Şekil 6. Tek alanlı yük frekans kontrolü blok diyagramı

Şekil 6'da yer alan bu diyagram, elektrik güç sisteminde frekans sapmalarını kontrol etmek için kullanılan bir kontrol sistemini göstermektedir. Add1 (Toplama Bloğu), bu blok, giriş sinyallerini toplar. Bu modelde, frekans hatasını ve yük değişimlerini toplar. PID Kontrolcüsü, toplama eğiliminden gelen hata alanı ve bu hata ayıklama kullanarak bir kontrol sinyali üretimi kontrolcüsü. PID kontrolcüsü, sistemi istenilen referans birleştirmelerle çalıştırılır. Governor (Regülatör) Bloku, PID kontrolcüsünden gelen teklifi alır ve türbin parçalarının kontrolünü yapar. Bu blok, genellikle zaman sabitine (0,02s) ve kazanca sahip bir transfer fonksiyonu içerir. Türbin (Türbin) bloğu, regülatörden gelen sinyali alır ve jeneratör milinin mekanik gücünü sağlar. Türbinin zaman sabiti (0,5s) ve kazanç burada gerçekleşir (Laghari, 2024; Öztürk Ali et al., 2016; Saadat, 1999).

Atalet ve Yük (Atalet ve Yük) bloku, türbinden gelen mekanik gücü alır ve sistem ataletini birlikte ve temsil eder. Bu blok, sistem frekans dinamiklerini çalıştıran bir transfer fonksiyonuna sahiptir ($10s + 0.8$). Frekans Hesabı (Frekans Hesaplama), atalet ve yk düşüşünden çıkan frekans değişimini hesaplar. Delta f (frekans değişimi) başına birim olarak hesaplamalar ve bu değer baz frekans (60 Hz) ile çarpılarak gerçek frekans değişimi (Hz cinsinden Delta f) elde edilir. Delta PL (Gç Yükü Değişimi), sisteme uygulanan güç yükü değişimini temsil eder. Bu, referans olarak 250 MW birleştirilerek birim başına bölünerek (birim değeri) olarak normalleştirilir. 1/R Bloku, regülatör verimini temsil eden ters çevrilmiş R'de bulunur (1/R). Bu değer, sistem frekans tepkisini belirlemede kullanılır ve genellikle hız regülasyonunu temsil eder.

MW cinsinden Baz MVA ve PL, sistemdeki megavat (MW) eşitlerinin özellikleri ve baz yük (250 MW) ile karşılaştırılması yapılır. Powergui, bu blok, Simulink modelinde gç ölçümlerinin performansını yönetir. Sürekli zaman simülasyonları için kullanılır (Laghari, 2024; ztrk Ali et al., 2016; Saadat, 1999).

3.1 Tek Alanlı Yük Frekans Kontrolü PID Optimizasyon Sonuçları

3.1.1. PSO-PID Sonuçları

Parçacık Srs Optimizasyonu (PSO) tabanlı PID kontrolü, dinamik sistemlerde hassas ve etkili bir kontrol mekanizması sağlamak için kullanılan modern bir yöntemdir. PSO, doğada sürü davranışlarından esinlenen bir optimizasyon algoritmasıdır ve parametre ayarlama problemlerinde oldukça etkilidir. Geleneksel PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolörünün kazanç değerlerinin optimal ayarları, sistem performansını büyük ölçüde

etkileyebilir. PSO, bu kazanç değerlerini optimize ederek, PID kontrolörünün performansını iyileştirir. PSO algoritması, birçok aday çözümün aynı anda değerlendirilmesi ve güncellenmesi yoluyla, global optimuma daha hızlı ve daha güvenilir bir şekilde ulaşılmasını sağlar. Bu yöntem, özellikle karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerde, geleneksel yöntemlere kıyasla daha üstün performans sergileyebilir ve sistemin istenen cevabı vermesi için gerekli kontrol parametrelerini etkin bir şekilde belirleyebilir.

Tablo 1. PSO-PID Parametreleri

PID Parametreleri	PSO-PID
K_p	0.87
K_i	0.45
K_d	0.98

Tablo 1’de oluşturmuş olduğumuz YFK sisteminin PSO algoritması yardımı ile daha kararlı hale getirebilmemiz için bulmuş olduğumuz parametrelerdir.

Bu parametreler YFK’ yi PSO kullanarak en kararlı şekilde çalıştırmamızı sağladı. Şekil 6’da simüle ettiğimiz YFK PSO kullanarak Tablo 1’de belirttiğimiz parametreler yardımı ile kararlı hale getirmeye çalıştığımız YFK’ nin kararlılığını gösterir.

3.1.2. Matlab Tuned-PID Sonuçları

PID kontrolörleri, sistemlerin istenen performansa ulaşması için belirli parametrelerle ayarlanması gereken kontrol cihazlarıdır. Bu parametreler, oransal (P), integral (I) ve türev (D) kazançlardır. "Tuned PID" ise bu parametrelerin optimize edilerek ayarlandığı durumu ifade eder. Sonuç olarak, "Tuned PID" kontrolörü, belirli

performans kriterlerini karşılayacak şekilde optimize edilmiş P, I ve D kazançlarına sahip bir kontrolör anlamına gelir. Bu, sistemin daha hızlı, daha kararlı ve daha doğru bir şekilde çalışmasını sağlar.

Tablo 2. Tuned-PID Parametreleri

PID Parametreleri	Tuned-PID
K_p	0.5728
K_i	0.2548
K_d	0.9566

Tablo 2’de oluşturmuş olduğumuz sistemin PID ye Matlab Simulink uygulamasının kendi içinde bulunan Tuned seçeneği ile yapabildiği en kararlı hale getirmesi için uygulama tarafından verilen PID parametreleridir. Şekil 6’da simüle ettiğimiz YFK’ nin Turned kullanarak Tablo 2 de belirttiğimiz parametreler yardımı ile kararlı hale getirmeye çalıştığımız YFK’ nin kararlılığını gösterir.

3.1.3. CO-PID Sonuçları

Çita Optimizasyonu temelli PID (CO-PID) kontrolü, özellikle karmaşık endüstriyel süreçlerde yüksek performans ve hassasiyet sağlamak için kullanılan gelişmiş bir kontrol yöntemidir. Çita Optimizasyonu, doğadan ilham alan bir optimizasyon algoritmasıdır ve çitaların avlarını yakalarken sergiledikleri hızlı ve etkin hareketleri model alır. Bu algoritma, PID kontrolörünün parametrelerini optimize ederek sistemin performansını artırmayı hedefler.

Tablo 3. CO-PID Parametreleri

PID Parametreleri	CO-PID
K_p	1.42
K_i	0.952
K_d	0.922

Tablo 3'te oluşturmuş olduğumuz YFK CO algoritması yardımı ile daha kararlı hale getirebilmemiz için bize bulmuş olduğu parametrelerdir. Bu parametreler YFK'yi CO kullanarak en kararlı şekilde çalıştırmamızı sağladı. Şekil 6 da simüle ettiğimiz YFK' nin CO kullanarak Tablo 3 de belirttiğimiz parametreler yardımı ile kararlı hale getirmeye çalıştığımız YFK' nin kararlılığını gösterir.

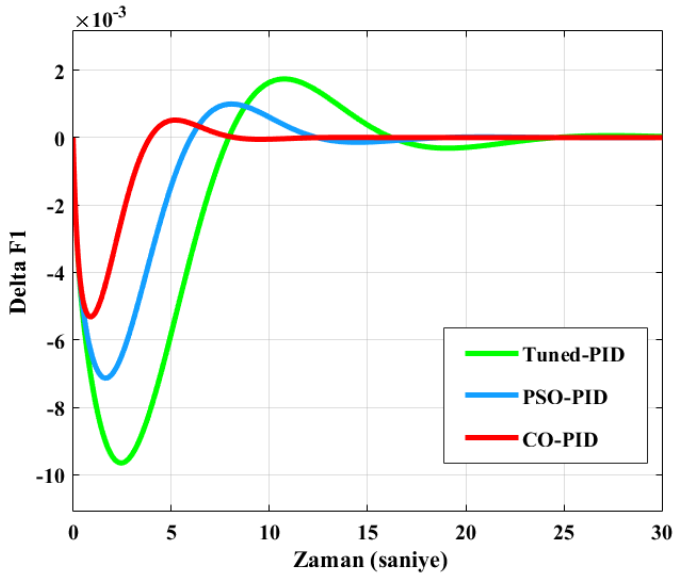
3.1.4. Matlab Simülasyon Sonucunda $\Delta F1$, Delta Ftie ve Hertz Cinsinden Gerçek Frekans Değerlerinin Bulunması

$\Delta F1$ kontrol stratejileri, frekans sapmalarını izleyerek ve düzelterek sistemin nominal frekansta çalışmasını sağlar (Laghari, 2024; Saadat, 1999). Delta Ftie, güç sistemlerinin kararlılığını ve güvenilirliğini korumak için izlenmesi ve kontrol edilmesi gereken önemli bir parametredir. Kontrol stratejileri, bu sapmayı minimuma indirerek sistem performansını iyileştirmeyi amaçlar (Saadat, 1999). Frekans sapmaları, çeşitli kontrol stratejileri kullanılarak minimize edilir ve bu sapmaların izlenmesi, sistem kararlılığı ve güvenilirliği için kritiktir (Laghari, 2024; Saadat, 1999).

Yerleşme zamanı (ts), maksimum aşma (M-(Hz)), maksimum düşme (M+(p.u.MW)), sinyal statikleri olan maksimum aşma (M+(Hz)) ve maksimum düşme (M+(p.u.MW)) gibi parametreler bu sürecin önemli göstergeleridir (Laghari, 2024).

Tablo 4. $\Delta F1$ için Sistem Performans Değerleri

Kontrolör Tipi	t_s (s)	M^+ (Hz)	M^+ (p.u. MW)	M^- (Hz)	M^+ (p.u. MW)
Tuned- PID	27,383	10,754	2,458	4,138	17,059
PSO-PID	20,938	1,655	8,062	1,658	14,368
CO-PID	13,901	0,888	5,213	9,341	0,549



Şekil 7. Delta F1 zamana göre grafiği

Delta F1, belirli bir bölgedeki veya jeneratör grubundaki frekans sapmasını ifade eder ve güç sistemlerinin kararlılığı için önemli bir parametredir. Frekans sapmalarını minimize etmek, sistemin güvenilirliğini ve performansını artırır.

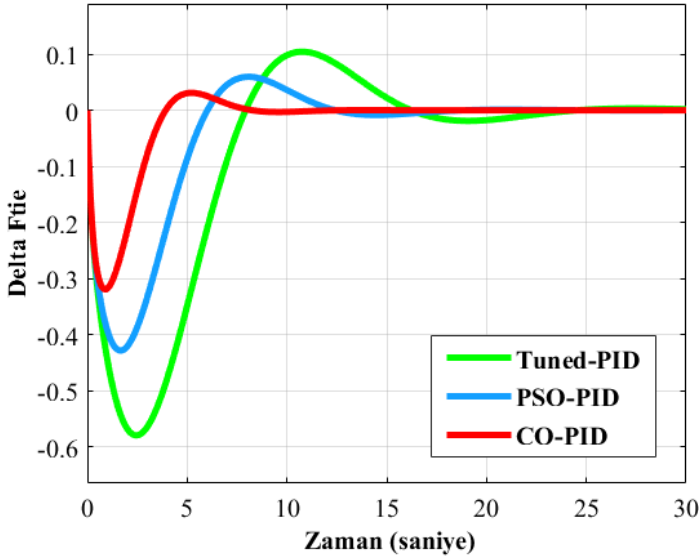
Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'te göstermiş olduğumuz K_p , K_i , K_d değerlerini PID üzerinde yerlerine yazdığımızda ve simülasyonu

çalıştırdığımız zaman Delta F1'in sistem performans değerlerini Tablo 4'te verilmiştir. Burada ts yerleşme zamanını, M-(Hz) maksimum aşmayı, M+(p.u.MW) maksimum düşmeyi, M+(Hz) ve M+(p.u. MW) sinyal statiklerini göstermektedir. Bu sonuçların alındığı grafik ise Şekil 7'de gösterilmiştir.

Tablo 4'deki değerlere ve Şekil 7'ye göre; CO-PID kontrolörü, yerleşme zamanı, frekans sapması ve güç sapmasında en iyi performansı göstermiştir. PSO-PID kontrolörü, frekans düşüşü açısından en iyi performansı sergiler ve genel olarak iyi bir denge sağlamıştır. Tuned-PID kontrolörü, en uzun yerleşme zamanına sahip olup frekans sapmasında daha düşük performans sergiler, ancak bazı güç sapmalarında diğer kontrolörlere göre daha iyi olabilir. Bu sonuçlara göre, CO-PID kontrolörünün genel olarak en iyi performansa sahip olduğunu, ancak belirli durumlarda PSO-PID kontrolörünün de tercih edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 5. ΔF_{tie} için Sistem Performans Değerleri

Kontrolör Tipi	t_s (s)	M^+ (Hz)	M^+ (p.u. MW)	M^- (Hz)	M^+ (p.u. MW)
Tuned- PID	27,383	10,754	2,458	4,138	17,059
PSO-PID	20,938	1,655	8,062	1,658	14,368
CO-PID	13,901	0,888	5,213	9,341	0,549



Şekil 8. Delta F_{tie} zamana göre grafiği

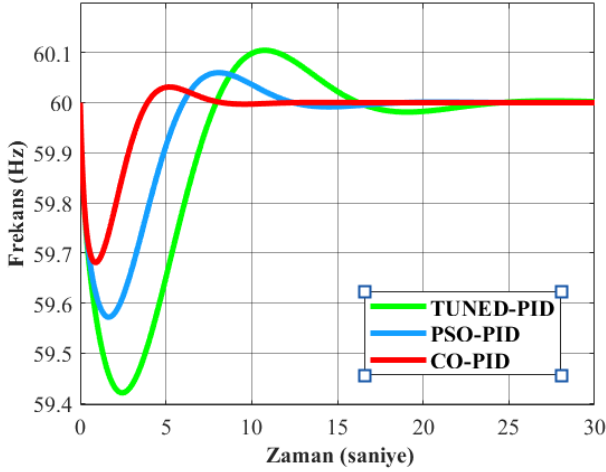
Delta F_{tie} güç sistemlerinin kararlılığını ve güvenilirliğini korumak için izlenmesi ve kontrol edilmesi gereken önemli bir parametredir. Bu sapmanın minimize edilmesi, sistemin nominal frekansta çalışmasını ve bölgesel güç dengesinin korunmasını sağlar. Tablo 5 ve şekil 8'e göre, CO-PID kontrol stratejisi, en kısa kararlılık süresine (ts) sahip olup, pozitif frekans sapmasında (M+) en düşük değeri ve negatif güç sapmasında (M-) en düşük değeri göstermektedir. Ancak, negatif frekans sapmasında (M-) en yüksek değere sahiptir. PSO-PID kontrol stratejisi, genelde frekans sapmalarında düşük değerlere sahiptir ve negatif frekans sapmasında (M-) en düşük değeri göstermektedir. Güç sapmalarında orta derecede değerlere sahiptir. Tuned-PID kontrol stratejisi, en uzun kararlılık süresine (ts) sahip olup, pozitif ve negatif güç

sapmalarında (M^+ ve M^-) en düşük değerleri göstermektedir. Ancak, frekans sapmalarında (M^+ ve M^-) yüksek değerlere sahiptir. Bu sonuçlara göre, seçilecek kontrol stratejisi sistemin hangi parametresinin daha kritik olduğuna bağlıdır. Eğer kararlılık süresi ve pozitif frekans sapması kritikse CO-PID; frekans sapmalarında genel bir denge aranıyorsa PSO-PID; güç sapmalarını minimize etmek öncelikliyse Tuned-PID tercih edilebilir.

Tablo 6 Hertz Cinsinden Gerçek Frekans Değerleri

Kontrolör Tipi	t_s (s)	M^+ (Hz)	M^+ (p.u. MW)	M^- (Hz)	M^+ (p.u. MW)
Tuned- PID	27,383	10,754	2,458	4,138	17,059
PSO-PID	20,938	1,655	8,062	1,658	14,368
CO-PID	13,901	0,888	5,213	9,341	0,549

Şekil 9’da gösterilmiştir. Hertz (Hz) cinsinden gerçek frekans, bir elektrik güç sisteminde belirli bir anda ölçülen frekans değeridir ve nominal frekans (genellikle 50 Hz veya 60 Hz) etrafında değişiklik gösterebilir. Gerçek frekans, sistemin dengede olup olmadığını ve güç üretimi ile tüketimi arasındaki dengenin sağlanıp sağlanmadığını belirler.



Şekil 9. Hertz cinsinden gerçek frekans

Tablo 6 ve Şekil 9 göre; Tuned-PID kontrol stratejisi en yüksek pozitif frekans değerine (60.754 Hz) ve oldukça düşük negatif frekans değerine (45.862 Hz) sahiptir. PSO-PID kontrol stratejisi daha dengeli sonuçlar vermekte olup, pozitif frekans (51.655 Hz) ve negatif frekans (48.342 Hz) değerleri daha nominal frekansa yakındır. CO-PID kontrol stratejisi en düşük pozitif frekans değerine (50.888 Hz) ve en düşük negatif frekans değerine (40.659 Hz) sahiptir. Bu sonuçlar, sistemin gerçek frekans performansını analiz ederken hangi kontrol stratejisinin daha uygun olduğunu belirlemede yardımcı olabilir. Frekans sapmalarının minimize edilmesi hedeflendiğinde, PSO-PID stratejisi dengeli ve nominal frekansa yakın frekans değerleri sağladığı için tercih edilebilir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, Matlab Simulink ortamında modeli oluşturulan tek alanlı bir güç sistemi için Yük Frekans Kontrolü (YFK) amacıyla

PID kontrolör tasarımı ve optimizasyonunu ele almaktadır. Çalışmanın odak noktası, CO (Çıta Optimizasyonu), PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) ve Tuned gibi farklı optimizasyon algoritmalarının PID kontrolör performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. CO-PID kontrolörü, CO algoritması kullanılarak optimize edilmiştir ve frekans dalgalanmalarının hızlı bir şekilde yerleşmesi, sınırlı tepe aşımı ve yeterli sönümlleme değerleri açısından en iyi performansı göstermiştir. Öte yandan, PSO-PID kontrolörü genel bir frekans sapması denge sağlarken, Tuned-PID kontrolörü ise güç sapmalarını minimize etme konusunda daha başarılıdır. Elde edilen sonuçlar, kontrol stratejisinin seçiminde kritik parametrelere bağlı olarak rehberlik sağlar. Kararlılık süresi ve pozitif frekans sapması kritikse, CO-PID kontrolörü tercih edilebilirken, genel bir frekans sapması denge aranıyorsa PSO-PID kontrolörü uygun olabilir. Güç sapmalarını minimize etmek öncelikliyse, Tuned-PID kontrolörü tercih edilebilir. Öte yandan, bu çalışma enerji verimliliği açısından da önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Yük frekans kontrolünde kullanılan CO, PSO ve Tuned gibi algoritmalar, sistem kararlılığını artırarak enerji verimliliğini artırır. Bu algoritmalar, elektrik enerjisi iletim sistemlerinde ve benzeri uygulamalarda daha güvenilir, esnek ve verimli çözümler sunmak için önemli bir araç olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, tek alanlı bir güç sistemi için Yük Frekans Kontrolü amacıyla farklı PID kontrolör optimizasyonlarının performansını değerlendirerek, kontrol stratejisi seçiminde rehberlik sağlamış ve enerji verimliliğini artırmak için önemli bir adım atmıştır. Gelecekte, daha geniş kapsamlı güç sistemleri üzerinde benzer analizlerin yapılması ve farklı optimizasyon algoritmalarının

kullanılması, bu alandaki araştırmaların derinleştirilmesine katkı sağlayabilir.

Kaynakça

Akbari, M. A., Zare, M., Azizipanah-abarghooee, R., Mirjalili, S., & Deriche, M. (2022). The cheetah optimizer: a nature-inspired metaheuristic algorithm for large-scale optimization problems. *Scientific Reports*, 12(1), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14338-z>

Guha, D., Roy, P., & Banerjee, S. (2017a). Quasi-oppositional symbiotic organism search algorithm applied to load frequency control. *Swarm and Evolutionary Computation*, 33(June 2016), 46–67. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.10.001>

Guha, D., Roy, P. K., & Banerjee, S. (2016). Load frequency control of interconnected power system using grey Wolf optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 27, 97–115. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2015.10.004>

Guha, D., Roy, P. K., & Banerjee, S. (2017b). Study of differential search algorithm based automatic generation control of an interconnected thermal-thermal system with governor dead-band. *Applied Soft Computing Journal*, 52, 160–175. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.12.012>

Kennedy James, & Eberhart Russel. (2011). Particle Swarm Optimization. *The Industrial Electronics Handbook - Five Volume Set*, 1942–1948. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46173-1_2

Khuntia, S. R., & Panda, S. (2012). Simulation study for automatic generation control of a multi-area power system by ANFIS approach. *Applied Soft Computing Journal*, 12(1), 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.08.039>

Kumarakrishnan, V., Vijayakumar, G., Boopathi, D., Jagatheesan, K., Saravanan, S., & Anand, B. (2020). Optimized PSO technique based PID controller for load frequency Control of single area power system. *Solid State Technology*, 63(5), 7979–7990.

Laghari. (2024). How To Design Load Frequency Control of Thermal / Hydro Power Plant Using Transfer. <https://youtu.be/9Aocf1sAtdY?Si=eaWdEnLvnh6iItUW>.

Mandal, B., & Kumar Roy, P. (2014). Multi-objective optimal power flow using quasi-oppositional teaching learning based optimization. *Applied Soft Computing Journal*, 21, 590–606. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.04.010>

Memon, Z. A., Akbari, M. A., & Zare, M. (2023). An Improved Cheetah Optimizer for Accurate and Reliable Estimation of Unknown Parameters in Photovoltaic Cell and Module Models. *Applied Sciences* (Switzerland), 13(18). <https://doi.org/10.3390/app13189997>

Minsky, M. L. (1954). The Annals of Human Genetics has an archive of material originally published in print format by the Annals of Eugenics. *Nucl. Phys.*, 13(1), 104–116.

Mohanty, B., Panda, S., & Hota, P. K. (2014). Differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power systems with non-linearity. *Alexandria Engineering Journal*, 53(3), 537–552. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.06.006>

Naderi, E., Pourakbari-Kasmaei, M., & Abdi, H. (2019). An efficient particle swarm optimization algorithm to solve optimal

power flow problem integrated with FACTS devices. *Applied Soft Computing Journal*, 80, 243–262.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.04.012>

Öztürk Ali, Bozali Beytullah, & Tosun Salih. (2016). Investigating voltage and frequency stability problems in the electrical power system using gravitational search algorithms. *JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS*, 18(1-2 JANUARY), 153–159.

Reeves, W. T. (1983). Particle systems - Technique for modeling a class of fuzzy objects. *Proceedings of the 10th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH* 1983, 2(2), 359–376.
<https://doi.org/10.1145/800059.801167>

Saadat, H. (1999). Power Flow Analysis. In *Fundamentals of Power Systems Analysis* 1 (pp. 528–542).
<https://doi.org/10.1201/9781003394433-4>

Sahu, R. K., Panda, S., & Padhan, S. (2015). A hybrid firefly algorithm and pattern search technique for automatic generation control of multi area power systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 64, 9–23.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.013>

Saikia, L. C., Mishra, S., Sinha, N., & Nanda, J. (2011). Automatic generation control of a multi area hydrothermal system using reinforced learning neural network controller. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 33(4), 1101–1108.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.01.029>

Singh, S. P., Prakash, T., Singh, V. P., & Babu, M. G. (2017). Analytic hierarchy process based automatic generation control of multi-area interconnected power system using Jaya algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 60(September 2016), 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.01.008>

BÖLÜM II

Robot Kollu Kendini Dengeleyen Robot

Nafi Göktuğ YALÇIN¹
Mustafa Engin²

1.Giriş

Robot teknolojileri günümüzde birçok alanda kullanılmaktadır. Endüstriyel otomasyondan kişisel yardımcılara kadar geniş bir yelpazede kullanılan robot teknolojileri, insanların hayatını kolaylaştırmak, tehlikeli ortamlarda çalışmayı azaltmak ve zorlu görevleri gerçekleştirmek gibi birçok alanda büyük avantajlar sunmaktadır. Kendini dengeleyen robotlar ise bu gelişen teknolojilerin önemli bir parçasını oluşturmaktadır. Bu robotların sahip oldukları tasarım ve gömülü algoritmaları sayesinde dengelerini dış ortamdan gelen bozucu etkilere rağmen koruyarak

¹ Nafi Göktuğ YALÇIN, Mekatronik Mühendisi, Ege Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Tezli Yüksek Lisans

² Doç. Dr. Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksekokulu Elektronik ve Otomasyon Bölümü Bornova İzmir

istikrarlı bir şekilde hareket edebilmekte ve amacına uygun tasarlanmış komponentlerini kullanarak çeşitli görevleri yerine getirebilmektedir.

Bu proje kapsamında, Arduino Mega geliştirme kartı ve Raspberry Pi geliştirme kartı kullanılarak kendini dengeleyen robotun tasarım ve geliştirme süreci ele alınmaktadır. Robotun temel yapılış amacı, hiçbir dış yardım almadan her türlü aksiyonu kendi kendine gerçekleştirmek, başlangıç ve bitiş konumunda dengesini koruyabilen bir mekanizma tasarlamaktır. Bu kapsamda, robot teknolojileri ve denge kontrolü konularında daha çeşitli tecrübe kazanmaya yönelik bir araştırma ve uygulama çalışması olarak tasarlanmıştır. Aynı zamanda, robotun donanım ve yazılım bileşenlerinin entegrasyonunu içeren bu çalışma, gerçek dünya uygulamalarında kullanılabilecek potansiyeli olan bir prototipin geliştirilmesini hedeflemektedir.

Bu çalışma, öğrencilerin ve araştırmacıların kendini dengeleyen robot teknolojilerine olan ilgilerini artırmayı hedeflemekte ve gelecekteki gelişmelere katkıda bulunabilecek bir kaynak olarak kullanılmayı amaçlamaktadır. Ayrıca endüstriyel otomasyon, depolama ve lojistik gibi alanlarda kullanıcı ihtiyaçlarını karşılayabilecek bir temel oluşturacak olan elde edilecek sonuçlar daha etkili kontrol stratejileri ve donanım tasarımları geliştirmek için bir fırsat sunacaktır.

2.Literatür araştırması

Bu projeyi hayata daha rahat geçirebilmek için, daha önce bu alanda yapılmış veya benzer çalışma mantıklarına sahip olan çalışmalar detaylıca incelenmesi uygun görülmüştür. 21.yy

başlarında yavaş yavaş duyulmaya başlayan ve hızlı gelişen bu alanda yapılmış olan çalışmaları incelediğimizde, çalışmaların ters sarkaç (inverted pendulum) modelinden esinlenilerek, iki tekerlekli denge robotlarının geliştirilmeye başlanmasında önemli bir katkı sağlamıştır (Grasser, 2002).

Ters sarkaç sistemini kabaca inceleyecek olursak, iki ana parçadan oluşmaktadır. İlk parça, ufuk çizgisi doğrultusunda bir doğru üzerine yerleştirilen aktüatör (eyleyici) ve bu doğrultu boyunca gidip gelen salınım hareketi yapabilme kabiliyetine sahip bir parçadan oluşmaktadır. İkinci parça ise ilk parçaya eklem yardımıyla monte edilmiştir ve ilk parçanın aktüatörü yardımı ile yer çekimi kuvvetine ters şekilde konumunu koruyup dengede tutulmaya çalışılan bir rijit uzuvdan oluşmaktadır. Bu mekanik tasarım kolaylıkla denge noktasına ulaşacak şekilde tasarlanmalıdır aksi takdirde sistemin denge noktasına ulaşması çok zor veya imkânsız hale gelebilmektedir (Ding et al., 2012).

Bu sistemin dengede durabilmesi için donanım kısmı haricinde kontrol kısmı da bir o kadar önemlidir. Genel olarak PID, PI, PD, yapay sinir ağları, adaptif, Fuzzy Mantık ve Bang-Bang gibi kontrol algoritmalarından faydalanılmaktadır. Bunlarla beraber çeşitli filtreler kullanılarak bu sistemler en optimum hale getirilmektedir. Bunlar genellikle Kalman Filtresi, Savitzky-Golay Filtresi, Partikül Filtresi, Dijital Filtreler, Median Filtresi, Butterworth Filtresi, Wiener Filtresi ve Adaptif Filtrelerdir (Sun & Gan, 2010).

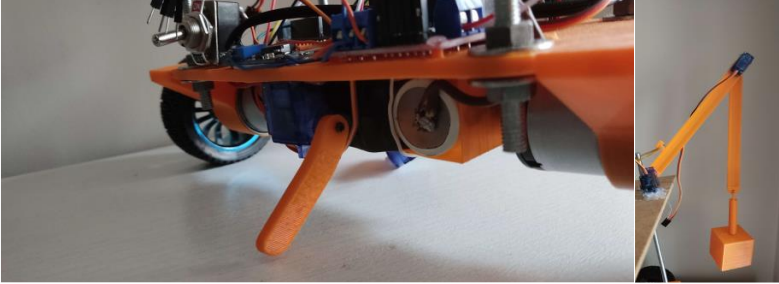
3. Donanım

Bu kısımda, robotun kendisini tamamlayıcı bileşenlerini içerir. SG90 servo motor, enkoderli DC motor, L298N motor sürücü, Arduino Mega, Raspberry Pi, IMU (ivme ölçer) sensörü ve Raspberry Pi kamera sistemi gibi kritik elemanlar, projenin temel yapı taşlarını oluşturur. SG90 servo motor, robotun denge kontrolünden sorumlu iken, enkoderli DC motorlar hareketi sağlar. L298N motor sürücü, motorların güçlü ve hassas kontrolünü gerçekleştirir. Arduino Mega, tüm sistemleri entegre ederken, Raspberry Pi, görüntü işleme ve yüksek seviye kontrol için kullanılır. IMU (ivme ölçer) sensörü, robotun eğimini ve hareketini algılamada kritik bir rol oynarken, Raspberry Pi kamera sistemi çevresel bilgi toplamak için entegre edilmiştir. Bu bileşenlerin etkileşimi, projenin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesinde önemli bir rol oynar.

3.1 Servo Motor

Bu sistemde maliyeti düşürmek ve yeterliliği sağlamak amacıyla SG90 servo motoru kullanılması uygun görülmüştür. Küçük mekanizmalarda kullanabilecek hem düşük güç tüketimi hem de performansı ile robotun aktif oynar eklemleri için ideal bir servo motordur. Üç adet kablo girişi mevcuttur; bunlardan kırmızı olan 4.8v-6v besleme, kahverengi olan GND ve turuncu olan ise sinyal girişidir. Birçok mikro denetleyicinin üretebileceği PWM sinyali ile kolaylıkla servo motorda açı kontrolü yapılabilmektedir. Servo motorun içindeki mekaniksel kısıtlamalardan dolayı 0-180 derece dönebilme kabiliyetine sahiptir ancak bu sisteme başarılı bir şekilde entegre edilebilmesi için bazı servo motorların içinde mekanik olarak modifikasyonlar yapılmıştır. Bu modifikasyon sayesinde gerekli kısımlarda servo motoru 360 derece dönebilme kabiliyeti

kazandırılmıştır. Kendini dengeleyen sistemler kategorisinde özgün bir çalışma olarak farklılığı ile ön plana çıkan belirli cisimleri toplama ve kendi haznesine alıp taşıma işlemi bu motorlar sayesinde gerçekleştirilmektedir. Ayrıca başlangıç ve bitiş konumlarında sistemin sonsuz döngüde tekrar tekrar kendine yetebilecek sistem bu sayede kurulmuştur.



***Şekil 1.0** Robot sisteminin alt dengeleyici ayakları **Şekil 1.1**
Robot kolu*

3.2 Enkoderli DC Motor

Enkoderli DC motorlar, döner bir milin hareketini ölçmek ve kontrol etmek için kullanılan elektronik bileşenler içeren özel motorlardır ve konum kontrolü konusunda tercih edilen motor çeşididir. Bu motorlar, genellikle bir optik enkoder veya manyetik enkoder içerir. Bu sistemin minimum gereksinimlerini karşılayıp robotu gerekli görevlerini yerine getirmesinde kullanılacak olan manyetik enkoderli redüktörlü DC motor JGB-520-530RPM modeli olarak uygun görülmüştür. Motorun redüktörlü dişli sisteminde ise torku arttırabilmek için motor hızından feragat edilmiştir. Ancak bunun sisteme olan katkısı göz önünde bulundurulunca motorlara verilen komutlarda hızlı ve güçlü tepki sürelerine ulaşılmıştır.

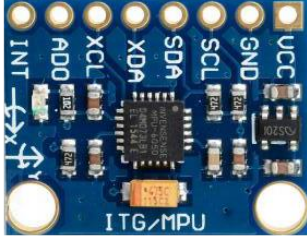
Manyetik enkoder sayesinde motorun verdiği tepkiden hızlı geribildirim ve hassas konum kontrolü sağlanmaktadır.



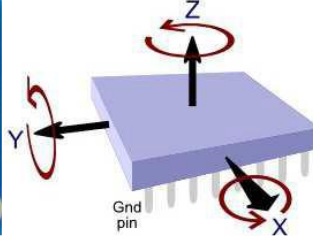
Şekil 2.0 JGB-520-530RPM DC motor

3.3 Jiroskop sensörü

Bu sistemde kullanılabilirlik açısından yeterli olduğu için bu tarz projelerde geniş bir kullanım alanına sahip olan ve diğerk geliştiriciler tarafından yazılan zengin kütüphane içeriğiyle MPU6050 IMU (Inertial Measurement Unit) sensörü kullanılmaktadır. MPU6050 6 eksen ivme ve gyro sensörünün jiroskopu üç yönde açı hızını algılar, ivmeölçer ise üç yönde açısali ivmeyi ölçebilme kabiliyetine sahiptir. Bu sensör, tekerleklerin dönme ekseninden daha yukarılara yerleştirilerek daha doğru verilerin alınması planlanmaktadır bu çıktıların sonucunda gelen veriler ise lineer ve orantılı hale getirilerek daha anlamlı sonuçlar çıkartılmaktadır. MPU6050 ivme ölçer sensörü, bir kart üzerine monte edilmiştir ve doğrudan kontrol modülüne I2C pinleri üzerinden (slave) köle modunda alt birim olarak çalışmaktadır. Her ekseninde 16 bitlik bir çözünürlükle çıkış verebilmektedir.



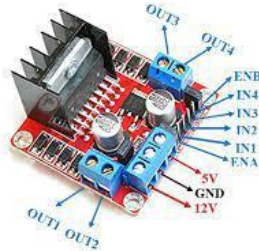
Şekil 3.0 MPU 6050 ivme ve gyro sensörü



Şekil 3.1 MPU 6050 dönme eksenleri

3.4 Motor Sürücü

Robotun minimum gereksinimini karşılayacak şekilde iki ayrı PWM sinyalini alıp iki ayrı motorun kontrolü için L298N voltaj regülatörlü çift motor sürücü kartı kullanılmaktadır. L298N motor sürücü, DC motorların kontrolünü sağlamak için H köprüsü (H-Bridge) prensibini temel almaktadır. Bu motor sürücü, her iki motor çıkışı için bağımsız kontrol sağlar ve yüksek akım kapasitesi ile güçlü motorları etkili bir şekilde sürer. H köprüsü sayesinde, L298N entegresi, projelerdeki DC motorlu sistemlerin yönlendirilmesi ve hız kontrolü için ideal bir çözüm sunmaktadır. Bu sürücünün Besleme gerilimi girişi 4.8v-24v arasında olup kanal başına 2A verebilmektedir ayrıca üzerinde bulunan dahili 5v regülatör sayesinde servo motorların beslemesi için ek bir güç dağıtım ünitesi olarak kullanılabilir.



Şekil 4.0 L298N motor sürücü devresi

3.5 Arduino Mega

Geliştirilmekte sürecinde olan robotun birçok alt birimini yönetmek için gerekli gereksinimlerimizi karşılayacak ve yönetici(master) cihazıyla kolay haberleşebilecek mikro denetleyici olarak Arduino Mega 2560 geliştirici kartı uygun görülüp kullanılmaktadır. Arduino Mega 2560, ATmega2560 tabanlı bir mikro denetleyi kullanmaktadır. 54 adet dijital giriş-çıkış(input-output) pini ve bunların 15 tanesi PWM çıkışı olarak kullanılabilir. Analog giriş olarak ise 16 port mevcuttur, 4 adet UART (donanımsal seri port), 16 MHz kristal osilatör, USB bağlantısı, güç girişi ve bir reset düğmesi bulunmaktadır. Bu özellikleri sayesinde Raspberry Pi (master device) ve Arduino Mega 2560 (slave device) olarak UART haberleşme politikası ile başarılı bir şekilde kullanılmaya olanak tanımaktadır (Juang & Lum, 2013).

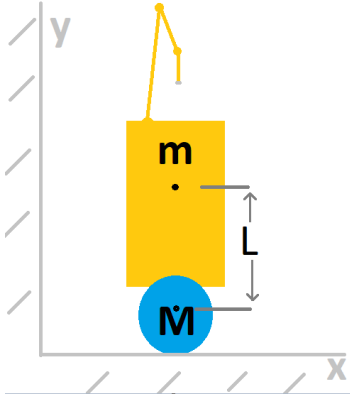
3.6 Raspberry Pi

Bu sistemin ana komuta merkezi olarak tanımlayabileceğimiz cihaz olarak Raspberry Pi model B+ (master device) olarak kullanılmaktadır. Bu mini bilgisayar kartı, Broadcom BCM2835 işlemcisine sahiptir ve 512 MB SDRAM bellek ile donatılmıştır. MicroSD kart ile genişletilebilir depolama kapasitesine sahip olan bu model, 4 adet USB 2.0 portu, 10/100 Ethernet bağlantısı, HDMI ve CSI kamera portu, 40 pinli genel amaçlı GPIO pini gibi birçok giriş-çıkış(input-output) seçeneği sunmaktadır. Dahili CSI kamera portu sayesinde Raspberry kamera modüllülerini basit bir şekilde montajını gerçekleştirebilir ve elde ettiğimiz görüntüleri işleme imkânı tanımaktadır. Raspberry Pi Model B+'ın en önemli özelliklerinden biri, dahili Wi-Fi ve Bluetooth 4.1 desteği ile kablosuz iletişim imkânı sunmasıdır. Bu

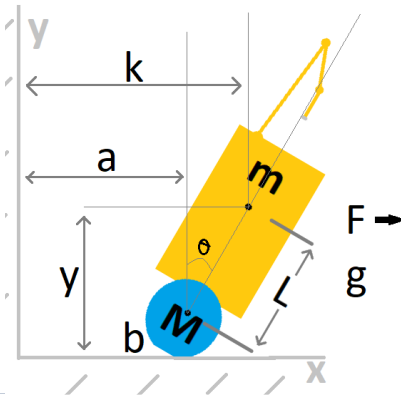
özellikler, Raspberry Pi'nin robot projeleri için ideal bir kontrol ünitesi olmasını sağlar. Raspberry Pi, Arduino Mega gibi mikrodenetleyicilerle etkileşimde bulunabilir ve geniş GPIO seçenekleri sayesinde birçok sensör ve aktüatörü kontrol edebilir. Ayrıca, dahili Wi-Fi modülü, dışarıdan kablosuz kumanda ile kontrol edilebilme özelliği sunar, bu da robotun uzaktan yönetilebilirliğini artırır. Bu kombinasyon, Raspberry Pi Model B+'ın robotik uygulamalarda kullanılmasını verimli ve esneklik sağlamaktadır.

4. Matematik modelleme

Genellikle bakış açısıyla iki tekerlekli bir kendi kendini dengeleyen robot, motor tahrikli bir gövde çerçevesine bağlı iki tekerlekten oluşur, güç ve kontrol elektroniği içermektedir. Robotun davranışını analitik yöntemlerle öngörülebilir tutmak için gerçeklikten soyutlamalar yapmak gerekmektedir. Özellikle gövde içindeki düzensiz şekilde dağılmış kütle, robot kol ve destek ayakları gibi ağırlıklar nokta kütlelere indirgenmelidir ve genel bir ortalama denge merkezi oluşturulmalıdır. Şekil 5.0 'de sistemin dikey konumdaki basitleştirilmiş serbest cisim diyagramı gösterilmektedir. Bu denge merkezleri toplamda iki ye indirgenip M (büyük m) ve m (küçük m) şeklinde iki ayrı denge noktası gösterilmektedir ve aralarındaki uzaklık L harfi ile belirtilmektedir. Dinamik denklemlerin oluşturabilmek için çeşitli yöntemler kullanılabilir. Bu çalışmada, Lagrange yöntemi dinamik denklemlerin elde edilmesi için uygun görülmüştür.



Şekil 5.0 Robotun dikey konumdaki



Şekil 5.1 Robotun hareketli haldeki basitleştirilmiş serbest cisim diyagramı

Tablo 1.0 Robotun serbest cisim diyagramındaki sembolik tanımlamaları

Sembol	Açıklama
M	Tekerleğin kütlesi
m	Gövdenin toplam kütlesi
l	Gövde merkezi ile tekerlek merkezinin (motor mili) arasındaki mesafe
k	Sabit referans doğrusundan gövde merkezinin x eksenine doğrultusunda yaptığı yer değiştirme
y	Sabit referans doğrusundan gövde merkezinin y eksenine doğrultusunda yaptığı yer değiştirme
a	Robotun referanstan katetmiş olduğu yol
F	Robotu etkileyen harici kuvvet
g	Yer çekimi ivmesi
b	Tekerlek ile zemin arasındaki sürtünme katsayısı

Bu verilere göre sistemin,

Kinetik enerjisini hesaplamak için

$$T = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} I \omega^2$$

$$T = \frac{1}{2} M \dot{k}^2 + \frac{1}{2} m [\dot{k}^2 + 2 \dot{k} \dot{\theta} l \cos \theta + l^2 \dot{\theta}^2] + \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2$$

Potansiyel enerjisini hesaplamak için

$$V = m \cdot g \cdot h$$

$$V = mgl(1 - \cos \theta)$$

Lagrange yöntemindeki kinetik-potansiyel (L) ifadesi, robotun kinetik ve potansiyel enerjilerinin farkıyla elde edilir.

$$L = T - V$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{q}_i} \right) - \left(\frac{\delta L}{\delta q_i} \right) = Q_i$$

Kendini dengeleyen robotun kabaca iki serbestlik derecesi olduğunu göz önüne alırsak, iki ayrı hareket denklemi elde edilir.

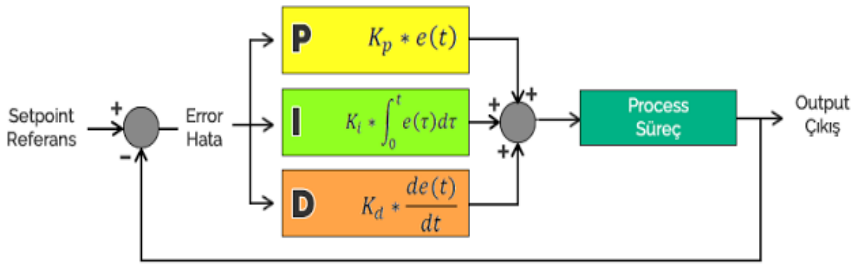
$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{k}} \right) = (M + m) \ddot{k} + m l \cos \theta \ddot{\theta} - m l \sin \theta \dot{\theta}^2$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\delta L}{\delta \dot{\theta}} \right) = (m l^2 + I) \ddot{\theta} + m \dot{k} l \cos \theta - m l \dot{\theta} \sin \theta$$

5.Kontrol Algoritması

PID kontrolcüsü, oransal (P), integral (I) ve türevsel (D) kontrolcülerin birleşimi olarak bilinir. PID kontrolü, uygulanması kolay yapısı nedeniyle endüstride en yaygın kontrol yöntemlerinden biridir. PID kontrolcüleri ilk olarak mekanik sistemlerde

kullanılmıştır. Mekanik sistemlerde yüksek performans gösterdikten sonra, elektrik sistemlerinde de kullanılmaya başlanmıştır. Sanayi geliştikçe, kontrol ihtiyacı arttı. Yazılımın kolay uygulanabilirliği, PID kontrolcüsünü mühendislik alanında daha ilginç hale getirdi. PID aslında bir kontrol geri bildirim mekanizmasıdır. Bir PID denetleyici görev süreci boyunca sürekli değişen ve istenilen ayar noktası ile arasındaki farkı olarak tanımlayabileceğimiz hata değerini hesaplar. Kontrol giriş ayarı yapılarak bu hata en aza indirilmesi sağlanır. Denge robotunun kontrolünde, dengeyi korumak için yani tekerlek ve gövde açısını istenilen değerde tutabilmek için PID kontrol yöntemi kullanılmıştır.



Şekil 6.0 PID kontrol algoritması şeması

Öncelikle PID kontrol’de hata tanımlaması yapılmalıdır. Bu indirgenmek isteyen hata değeri ise referans değere olan uzaklık olarak tanımlanabilir.

Referans = İstenilen değer

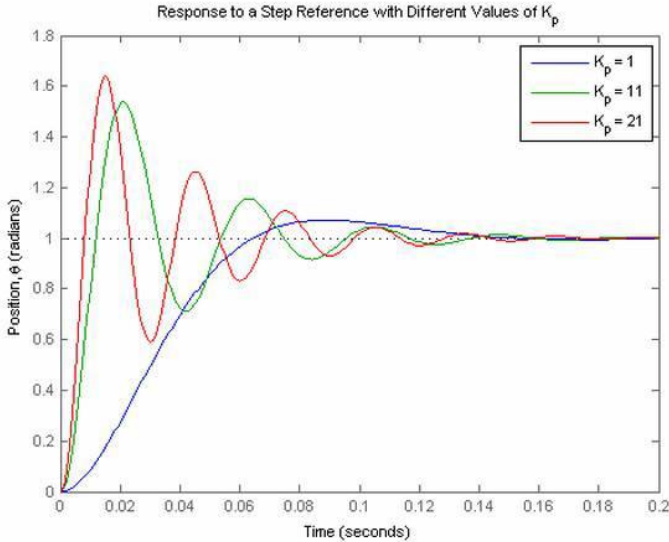
Gelen = Şu an ki değer

Hata = Referans-Gelen

5.1 Oransal (Proportional)

Oransal terim sistemden gelen hatayı tanımladığımız kat sayı ile çarparak hatayı küçültmeyi hedefler. Yani istenilen değere yaklaşma hızı olarak da belirtilebilir. Orantısız bir değer seçiminde ise sistemde bozucu etkiler yaratabilmektedir. Örneğin hata istenilen değerlere yaklaştığında çıkışta sürekli salınım hareketi görülme ihtimali muhtemeldir. Şekil 7.0’ da görüldüğü gibi K_p değerinin sistem üzerindeki etkisi daha somut bir şekilde gösterilmektedir.

$$P = K_p \times \text{Hata}$$



Şekil 7.0 K_p değerini grafik

5.2 İntegral (Integral)

PID kontrol algoritmasında kullanılan integral değeri hatanın alanını temsil etmektedir ve satürasyonu sönümleme etkisi yapmaktadır. İntegral alan hesabı olduğu için dinamik sistemlerde

yükselmesi çok muhtemeldir ve bunu önüne geçebilmek için sınır belirlemek alternatif bir çözüm sunabilmektedir. Bu hesaplanan alanın sürekli toplanarak katlandığı için integralin aşırı şişmesi durumunda sistemin kontrolü tamamen bozulması söz konusu olabilmektedir. Bu yüzden integrali sınırlamak sistemin sağlıklı çalışmasını ve çabuk toparlamasını sağlayacaktır. Kalıcı dutum hatasını ortadan kaldırmada etkili olur dezavantajı geçici cevabı daha kötü yapabilir.

dt = PID fonksiyonuna her girdiğindeki geçen zaman.

$$I = I + (K_i \times \text{Hata} \times dt)$$

5.3 Türev (Derivative)

Türev sistemin iki örnek arasındaki hata farkını temsil etmektedir. Eğer hatada bir değişim olmadıysa türev sıfır olur. Türevi arttırmak sistemi hatalarının hızlı şekilde telafi edilmesini sağlamaktadır.

Eski Hata = Bir önceki hatanın değeri

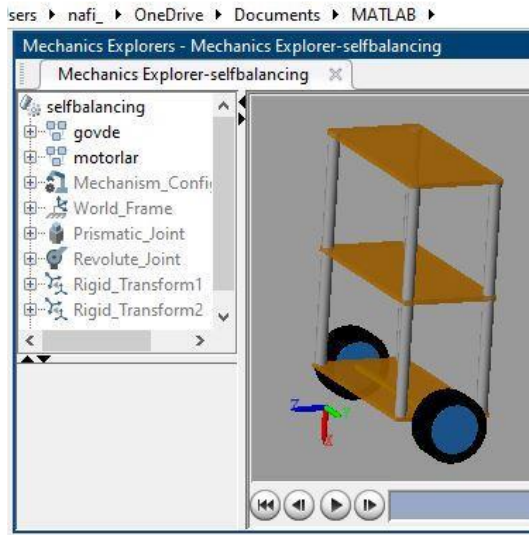
$$\text{HataDeğeri} = \text{Hata} - \text{Eski Hata}$$

$$D = K_d \times \text{HataDeğeri} \times dt$$

6. Deneysel çalışma

Bu çalışmada, robot kollu kendini dengeleyen robotun iç içe çalışan PID-PI kontrol algoritmasını, MPU 6050 jiroskop sensörü, enkoderli redüktörlü DC motor, Arduino Mega 2560 ve Raspberry Pi kullanarak gerçekleştirmeyi hedeflendi. İlk adım olarak, her bir bileşenin sisteme göre senkronize olacak şekilde donanımsal kurulumunu gerçekleştirildi. Bu dinamik sistemin fiziksel modelini MATLAB Simulink ortamında en uygun PID kontrol algoritmasını

uygulayıp entegre edip, MPU-6050 jiroskop sensöründen ve geri besleme (feed back) olarak enkoderden gelen verileri kullanarak robotun dengeleme yani tekerleklerin sistem gövdesine göre açısının istenilen değerlerde kontrol altına alınmasını sağlandı. Ayrıca, Raspberry Pi' yi kullanarak robotun kablosuz kontrolünü ve dış dünya verilerini alıp işleme kabiliyeti elde edilmiş oldu. Tüm bu donanımsal ve yazılımsal entegrasyon süreci boyunca, dengeleme algoritmasının geliştirilmesi ve ayarlanması için sayısız test ve deney gerçekleştirildi. Bu kontrol algoritmasının yanında tekerleklerin hız ve tekerleklerin arasındaki yönlendirme hareketi için PI kontrol algoritması kullanılarak robotun görev alanı içinde gerekli konumlara gitmesi planlanmıştır.

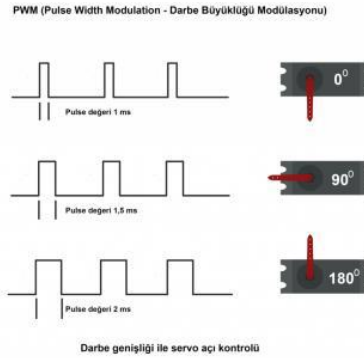


***Şekil 8.0** Kendini dengeleyen robotun MATLAB-Simulink ortamındaki görünümü*

6.1. PWM (Darbe Genişlik Modülasyonu)

Servo motorlar ve tekerleklerin hareket eylemini sağlayan redüktörlü DC motorların kontrolü için değişken genişlikte bir

elektrik darbesi veya darbe genişlik modülasyonu (PWM) gönderilerek kontrol edilmektedir. Servo motorlara gönderilen PWM, şaftın konumunu belirlemektedir ve kontrol teli aracılığıyla gönderilen darbenin süresine göre, rotor istenen konuma gelir. Servo motor her 20 milisaniyede bir darbe görmeyi bekler ve darbenin uzunluğu servo motorun ne kadar döneceğini belirlenmektedir.



Şekil 9.0 Servo motorun PWM sinyali ile açısı kontrolü

6.2 Enkoder

Enkoderli DC motorun hızını ve konumunu doğru bir şekilde okumak için gerekli kodları yazdık ve motorun istenen konuma doğru hareket etmesini sağladık. Enkoderin çalışması için düşük enerji gerektiği için harici bir güç kaynağına bağlamadan direkt Arduino Mega 2560 üzerinden 5v ve GND pinlerine delikli pertinaks yardımıyla güç devresi oluşturulmuştur. Bu sistemde kullanılan manyetik enkoder iki adet dijital çıkış sağladığı için saat yönü veya saat yönünün tersine dönüp dönmediği bunun yanında rotorun statora göre konumu ve hız verilerine erişim imkânı sağlamaktadır. Bu manyetik enkoderli motor PID kontrol algoritması çerçevesinde sensörden alınan geri beslemelerle (feed back) kontrolü

gerçekleştirilmiştir. Şekil 10.0' da redüktörlü DC motorun baş kısmında dahili manyetik enkoder gösterilmektedir.

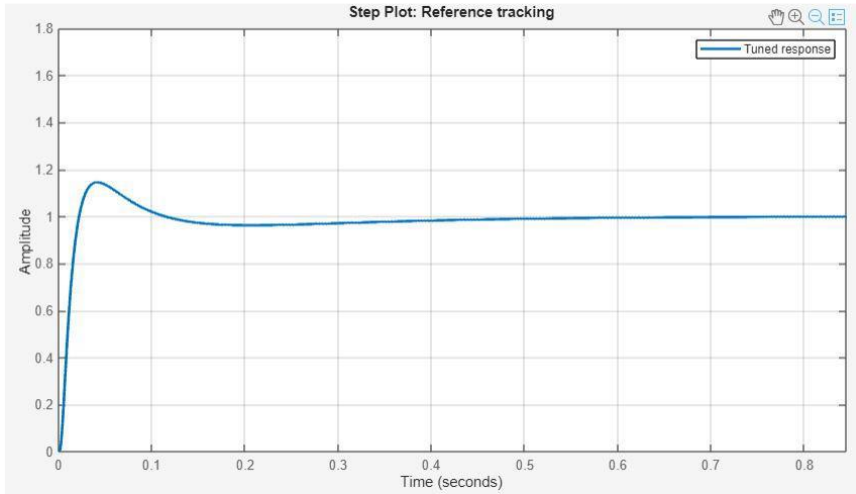


Şekil 10.0 Enkoderli redüktörlü DC motor

6.3 PID-PI kontrol algoritmaları

Bu sistemde iç içe kontrol algoritmaları kullanılması uygun görülüp uygulanmıştır. Bu blok diyagramları PID-PI kontrol algoritmalarının birbiri içinde etkileşim halinde robota verilen görevlerin yerine getirilmesi konusunda sağlıklı hizmet sağlamaktadır. İlk kontrol bloğunda, robotun dinamik denklemleri temel alınarak MATLAB-Simulink ortamının sayesinde açı geri beslemeli PID kontrol şeması ile sistemin denge kontrolü sağlanmıştır. İkinci kontrol bloğunda ise robotun dengesi kadar hassas bir kontrol sağlanmaya gerek duyulmadığı için bu aşamada PI kontrol algoritmasının sistemin hız ve yönlendirilme konusunda sistemin en az gereksinimlerini karşılayabileceği planlanmaktadır. Bu sistemin kontrolü, MPU 6050 açölçer sensörler yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Robotun gövdesinin düşey eksen ile yaptığı açı, sensörler aracılığıyla kontrolcüye anlık olarak sürekli iletilir. Kontrolcü, aldığı bu bilgiyi işleyerek robotun dengesini sağlamak

için tekerleklerle tahrik veren motorlara tork ve birbiri arasında tork farkı oluşturarak robotun yönelim hareketini sağlamaktadır. Böylece robot, üstlendiği görevleri başarılı bir şekilde yerine getirebilir. Sistem analizinde MATLAB-Simulink'den edinmiş olduğumuz bazı veriler sayesinde gerçek dünyada modelleme ve hesaplama konusunda çalışmaya oldukça uygulanabilirlik açısından ön adım olmuştur. Bu simülasyon ortamında ağırlık merkezi noktalarına göre yapılmış olan modele en uygun PID algoritma parametrelerin bulunması için Auto-Tune PID en uygun PID değeri hesaplayıcı sayesinde elde edilen sistemin grafiği Şekil 11.0' da görüldüğü gibidir. MATLAB-simulink'in bu Auto-Tune özelliği sayesinde sisteme en iyi uyum sağlayan PID değerlerine kolayca ulaşılmaktadır.



Şekil 11.0 Auto-Tune ile elde edilen PID grafiği

7. Bulgular ve tartışma

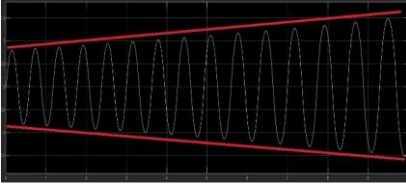
Deneylerimizin ve gözlemlerimizin sonucunda, PID kontrolünün kendini dengeleyen robotun istenen konumda durmasını sağlama kabiliyetini gözlemlenmektedir. MPU-6050

jiroskop sensörü sayesinde elde ettiğimiz verilerin Kalman filtresinden geçirilmesi, robotun daha hassas ve stabil bir şekilde dengelemesini sağladı. Ayrıca, enkoderli DC motorun doğru konum ve hız ölçümlerini yaparak, robotun istenen konuma hareket etmesinin kontrolü sağlanmaktadır. Raspberry Pi'nin entegrasyonu sayesinde, kablolu kontrol imkânı elde edildi ve robotun uzaktan yönetimini başarılı bir şekilde gerçekleştirildi. Bu robotun gerçek dünya uygulamalarında uzaktan kontrol edilebilme potansiyelini göstermektedir. Ancak, bazı parametrelerin robota uygun bir şekilde entegre edilmesi uygulama ve kullanım sıklığı ile aşılması çözümüyle karşılık bulunması planlandı.

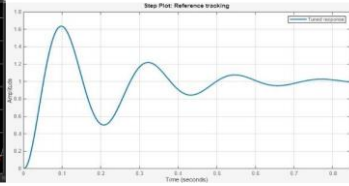
7.1 Denge sistemi

Özellikle, PID kontrol parametrelerinin ayarlanması sürecinde sistemin üzerine alınan görev yükü(kutu) sistemin dinamik modelini yeniden şekillendirilmesi ve uyum sağlaması zorlukları hassas hesaplamalar sayesinde aşıldı. Bu kısımda PID mantığının iyice sistem üzerindeki etkilerinin incelenip araştırılması ve sistemin nasıl yanıt verdiğini gözlemleyebilme açısından çeşitli parametre değerleri verilerek sistem test edilmiştir. Şekil 12.0' da görüldüğü gibi sadece K_p değeri verilerek hatayı sıfıra indirgeme metodumuz, sistemin satürasyona girip zaman geçtikçe sistemin tamamen kontrolden çıkması ile sonuçlanmıştır. Kırmızı çizgiler yardımıyla satürasyonun arttığı rahatça gözlemlenebilmektedir. Başka bir grafikte sistemin satürasyon halinden PID kontrol algoritması kullanılarak denge konumuna girme grafiği Şekil 12.1' de görüldüğü gibidir. Ancak bu grafikte denge konum grafiğinin daha iyi anlaşılabilmesi için görsel amaçlı en iyi sonucu görebileceğimiz PID parametreleri uygulanmıştır. Şekil 12.1' de ki

grafik aslında düşük maliyetli kendini dengeleyen robotun denge konumuna ulaşma grafiği denilebilir bunun nedeni motorlardan gelen yetersiz torkun tekerlekleri istenilen hızda ve ivmede hareket ettirememesinden kaynaklanmaktadır.



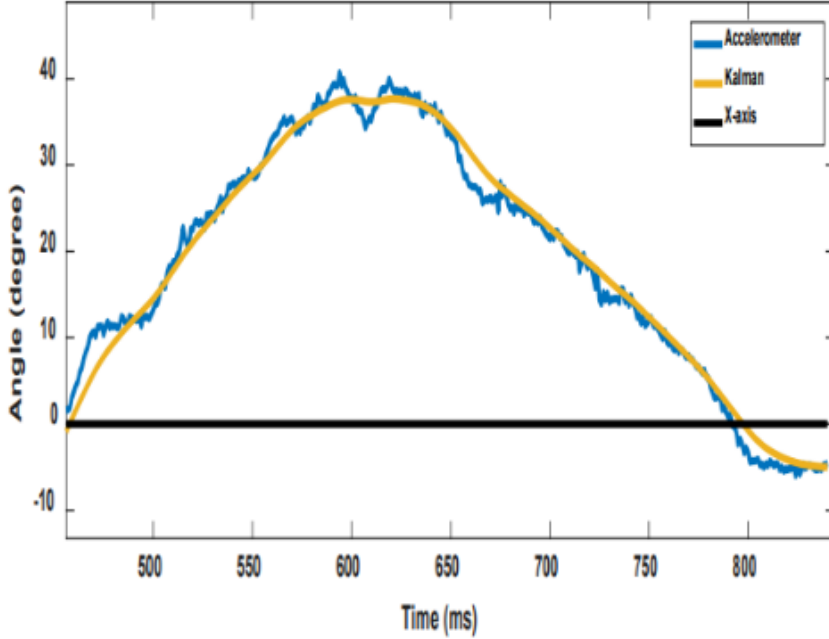
Şekil 12.0 P kontrol grafiği



Şekil 12.1 Salınlı PID kontrol grafiği

7.2 Kalman filtresi

MPU 6050 jiroskop sensörünün verilerini okurken sensörün hassas yapısında dolayı istenmeyen parazitler ve robotun yapı malzemesinden kaynaklı titreşim iletkenliğinin iletmiş olduğu istenmeyen salınımlar, Kalman filtresi kullanarak arındırılmaya çalışıldı ve hassas daha işlenebilir veriler elde edilmesi hedeflendi. Kalman filtresi, zaman içinde gözlemlenen durumların tekrarlayan tahminlerini hesaplayan bir algoritmadır (Miranda, 2010). Bu algoritmaya sayesinde sensörden alınan aşırı sapmış verilerin tutarlılığı sağlanmıştır. Kalman filtresi, gürültülü sensörler için oldukça uygundur. Bu denge kontrolü, diğer kontrol türlerinden daha hassas olduğundan dolayı fazla satürasyonda veya bozucu etkiler altında sistem kontrolden geri dönmeyecek şekilde çıkabilir. Şekil 13'te görüldüğü gibi mavi grafikte jiroskop sensöründen gelen ham veri grafiği çizilirken, sarı grafikte ise filtrelenmiş temiz kullanılabilir grafik verisi elde edilmiştir (Balasubramanian & Lathiff, 2011).



Şekil 13.0 Kalman filtresi grafiği

8. Sonuç

Bu çalışma kendini dengeleyen robotun PID kontrolü için MPU 6050 jiroskop sensörü, enkoderli DC motor, Arduino Mega ve Raspberry Pi gibi bileşenlerin başarıyla entegre edilmesini ve kullanılmasını göstermektedir. İki tekerlekli denge robotu için ters sarkaç prototipi temel alınmıştır ve ters sarkaç modeli benimsenerek çözümler sunulmuştur. Elde ettiğimiz bulgular, bu tür robot sistemlerinin karmaşık yapılarının kontrol edilebilir olduğunu ve gerçek dünya uygulamalarında kullanılabilir potansiyele sahip olduğunu göstermektedir. Ayrıca görev nesnesinin bulunması, takibi ve sistem içine alınması konusunda çalışmalarını günden güne geliştirmektedir. MPU 6050 sensörü çok fazla gürültüye ve titreşime sahiptir. Kalman filtresinin uygulanmasından sonra daha istikrarlı ve

daha az gürültülü hale getirilip daha rahat kullanılabilir veriye dönüştürülmüştür. Bu kontrol tasarımında Matlab-Simulink aracılığıyla gövde teker açısı oranı geri beslemeli ve gövde konum hız geri beslemeli PID-PI kontrol algoritması uygulanmıştır. Temel olarak ilk dengenin sağlanması ikinci olarak kendini dengeleyen robotun görev konumuna hesaplanan hızda ve yönde kararlı bir şekilde görevlerini yerine getirebilmektedir. Bu parametrelerin kısa ve sisteme en uygun şekilde entegre olması MATLAB-Simulink' in içinde barındırdığı Auto-Tune PID hesaplayıcı sayesinde saptanmıştır. Literatürde bu tarz benzer çalışmalardan ayrı olarak ortaya konulan en büyük fark tespit edilen görev nesnesinin, robot içine alınıp denge sisteminin bozulmadan görev nesnesini almasıdır. Bu nesnenin algılanması için Raspberry Pi geliştirici kartının kendi özel kamera modülü kullanılarak sağlanmaktadır. Takip edilecek bu görev nesnesi turuncu olarak belirlenmiştir. Kamera modülü sayesinde çevresini tarayıp nesnenin tespiti gerçekleştirildikten sonra robotun nesneye göre konumu ve ulaşma bilgisi hesaplanıp motorlara gerekli darbe genişlik modülasyonu (PWM) sinyalleri uygulanmaktadır. Bu otonom robotun yapımı sırasında birçok yöntem öğrenildi ve uygulandı.

Gelecekteki çalışmalar, PID kontrol parametrelerinin otomatik olarak ayarlanabilmesi için otomatik ayarlama algoritmalarının entegrasyonunu içerebilir. Ayrıca, daha gelişmiş dengeleme ve hareket algoritmalarının kullanılması ile robotun stabilitesinin artırılması hedeflenebilir. Bu çalışma, kendini dengeleyen robot teknolojisinin gelişmesine ve uygulama alanlarının genişlemesine katkıda bulunmayı amaçlamaktadır.

Kaynakça

Balasubramanian, S., & Lathiff, M. N. (2011). Self-balancing robot. Undergraduate Thesis, Engineering Physics Project Laboratory, The University Of British Columbia, Vancouver. (Balasubramanian & Lathiff, 2011)

Ding, Y., Gafford, J., & Kunio, M. (2012). Modeling, Simulation and Fabrication of a Balancing Robot. *Advanced Dynamics and Control*, 151, 22. (Ding et al., 2012)

Enginoğlu, O. (2012). Design and control of balancing robot. Master Thesis, DEÜ Institute of Science and Engineering. (Enginoğlu, 2012)

Fakharian, A., Gustafsson, T., & Mehrfam, M. (Conference Year). Adaptive Kalman Filtering Based Navigation: An IMU/GPS Integration Approach. *IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*, 11-13. (Fakharian et al., Conference Year)

Gani, A., Kılıç, E., Keçecioğlu, Ö. F., Açıkgöz, H., & Şekkeli, M. (2016). PID and Fuzzy Logic Controller Design for the Level and Temperature Control of Mixing Tank Used in Industrial Applications. *Engineer & the Machinery Magazine*, 57(675), 41-48. (Gani et al., 2016)

Grasser, F., D'arrigo, A., Colombi, S., & Rufer, A. C. (2002). JOE: a mobile, inverted pendulum. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(1), 107-114. (Grasser, 2002)

Juang, H. S., & Lum, K. Y. (2013, June). Design and control of a two-wheel self-balancing robot using the Arduino

microcontroller board. In 2013 10th IEEE International Conference on Control and Automation (ICCA) (pp. 634-639). IEEE. (Juang & Lum, 2013)

Kwon, S., Kim, S., & Yu, J. (2014). Tilting-type balancing mobile robot platform for enhancing lateral stability. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(3), 1470-1481. (Kwon et al., 2014)

Martins, R. S., & Nunes, F. (2017, June). Control system for a self-balancing robot. In 2017 4th Experiment@ International Conference (exp. at'17) (pp. 297-302). IEEE. (Martins & Nunes, 2017)

Miranda, J. L. C. (2010). Application of Kalman Filtering and PID Control for Direct Inverted Pendulum Control. Master Thesis, Electrical and Computer Engineering, California State University, California. (Miranda, 2010)

Sun, L., & Gan, J. (2010, May). Researching of two-wheeled self-balancing robot base on LQR combined with PID. In 2010 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications (pp. 1-5). IEEE. (Sun & Gan, 2010)

Xu, J. X., Guo, Z. Q., & Lee, T. H. (2012). Design and implementation of a Takagi–Sugeno-type fuzzy logic controller on a two-wheeled mobile robot. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60(12), 5717-5728. (Xu et al., 2012)

BÖLÜM III

Pid Kontrol Sistemi ve Çita Optimizasyon Algoritmasını Kullanarak Dron Kalkış Stabilitesini Artırma

**Beytullah BOZALI¹
Doğukan TEKİNER²**

Giriş

1.1. Amaç ve Kapsam

Elektrik Güç Sistemlerinin (EGS) temel amacı, elektrik enerjisini tüketicilere ekonomik ve verimli bir şekilde iletmektir. EGS işletimi içindeki önemli konulardan biri, optimal güç akışı (OPF) problemini içerir ve bu da elektrik dağıtımının ekonomik yönünü kapsar. Araştırmacılar tarafından yaygın olarak incelenen bir

¹ Beytullah BOZALI, Öğretim Görevlisi Dr. Düzce Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği, Orcid: 0000-0002-3633-5780

² Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, dogukantekiner2013@gmail.com, Orcid: 0009-0008-9750-0269

konudur (Mandal & Kumar Roy, 2014; Naderi et al., 2019). Üretim ve yük talebi arasındaki uyumsuzluklar, öngörülemeyen iç ve dış bozulmalar veya yük değişiklikleri nedeniyle sistem çalışma frekansının ve değişim hattı güç akışının planlanan limitlerinden sapmaya yol açabilir. Bu durum, EGS modellemesinde Yük Frekansı Kontrolü (YFK) olarak adlandırılan doğru, verimli ve hızlı bir kontrol mekanizması tasarlanmasını gerektirir, böylece sistem performansını, yani alan frekansı ve değişim bağlantı hattı gücünü, planlanan değerlerde tutabiliriz. YFK, EGS 'nin sorunsuz ve güvenli çalışması için en karlı yan hizmetlerden biridir (Guha et al., 2016, 2017; Singh et al., 2017). EGS 'lerin YFK 'sinde iyileştirmeler yapmak için dünya çapındaki araştırmacılar, kontrolcü yapısı ve kazanımlarını optimize etmek için farklı yöntemler üzerinde çalışıyorlar. Bazı çalışmalar, klasik PI/PID tekniklerinin kazanımlarını artırmak için yeni yüksek performanslı optimizasyon algoritmalarının kullanıldığını gösteriyor. Diğer araştırmalar ise, yanıltıcı kontrol performansını önlemek için kontrolcü parametrelerini temel arama algoritmalarıyla ayarlayarak yeni kontrol şemaları öneriyor. Son olarak, araştırmacılar yeni bir kontrolcü yapısı sunuyor ve parametrelerini üstün arama performansı sağlayan bir optimize edici kullanarak ayarlıyorlar. Bu üç yaklaşımdan, orijinal kontrol şemasına ve yeni arama algoritmalarına dayanan sonuncusu, daha iyi bir YFK mekanizması geliştirme potansiyeli taşıyor (Guha et al., 2017a). YFK probleminin doğrusal olmayan davranışını ele almak ve sistemin kararlılığını sağlamak için, stokastik yük modeli ve bozucu girdiler altında alternatif kontrol yaklaşımları da incelenmiştir. Bunlar arasında yapay sinir ağı yaklaşımları, bulanık mantık teorisi ve uyarlanabilir

nöro bulanık çıkarım sistemi gibi yeni kontrol yaklaşımları yer almaktadır (Khuntia & Panda, 2012). Yeni kontrol yaklaşımları, hesaplama açısından maliyetli ve tasarımı zor olabilir; ancak geleneksel yöntemlerin kısıtlamalarını ortadan kaldırarak önemli performans artışları sağladıkları görülmektedir. Bir çalışmada, enerji üretim sistemlerinde kontrol problemlerini çözmek için farklı yaklaşımlar sunulmuş ve geleneksel yöntemlere kıyasla daha iyi performans ve daha hızlı yakınsama sağladığı vurgulanmıştır (Guha et al., 2016; Hota & Mohanty, 2016). Enerji üretim sistemlerinde, Yapay Sinir Ağları (YSN) doğrusal olmayan kontrol problemlerini ele almak için önemli bir yöntemdir.

YSN'ler, enerji üretim sistemlerinde PID veya PI/PID denetleyicileri yerine doğrudan kontrol sağlayarak daha etkili ve verimli çözümler sunduğunu belirtmişlerdir (Saikia et al., 2011). Enerji üretim sistemlerindeki YFK problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılır, özellikle belirsizliklerin ve karmaşıklıkların olduğu durumlarda Bulanık Mantık Teorisi (BMT), etkili olduğunu belirtmişlerdir (Guha et al., 2017b; Sahu et al., 2015). Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System (ANFIS), veri setlerindeki kalıpları tanımak ve öğrenmek amacıyla kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, enerji üretim sistemlerindeki YFK problemlerini çözmek için kullanılabilir ve sistemin dinamik doğasına uyum sağlama yeteneğine sahip olduğunu belirtmişlerdir (Sahu et al., 2015; Saikia et al., 2011). Bir diğer çalışmada Kesirli Dereceli Analiz (FDA) YFK problemlerini ele almak için kullanılabilir ve karmaşık sistem dinamiklerini yakalamak için yararlı olduğunu belirtmektedirler (Mohanty et al., 2014). Kontrol stratejisinin önemli bir yönü, istenen dinamik performansı sağlarken parametre belirsizlikleriyle başa

çıkma yeteneğidir. Bu nedenle, tasarlanan kontrolcüler mümkün olduğunca karmaşık olmamalı ve pratik uygulamaya uygun olması gerektiğini belirtmektedirler (Guha et al., 2017a).

EGS modellemesinde YFK kontrolü için farklı algoritmalar ile çalışmalar yapılmaktadır. Bunlara örnek olarak, Yarı-karşıt Gri Kurt Optimizasyon Algoritması (QOGWO) tabanlı PID (Guha D, 2016). Yarı-karşıt Simbiyotik Organizma Arama (QOSOS) Algoritması tabanlı PI/PID (Guha D, 2017). Bakteriyel Yiyecek Arama Optimizasyon Algoritması (BFOA) tabanlı PI denetleyici (Ali ES, 2011). Yapay Arı Kolonisi (ABC) Tekniği tabanlı PI/PID (Gözde H, 2012). Hibrit BFOA ve Parçacık Sürüsü Optimizasyonu (PSO) (hBFOA-PSO) Algoritma tabanlı PI (Panda S, 2013). Diferansiyel Evrim (DE) Algoritma tabanlı I/PI/PID (Mohanty B, 2014). Geri İzleme Arama Algoritması (BSA) tabanlı PI/PID (Guha D, 2018). Yarı-karşıt Uyum Arama Algoritması (QOHS) tabanlı PID (Shiva CK, 2015). Diferansiyel Arama Algoritması (DSA) tabanlı PID (Guha D, 2017). Hibrit Ateşböceği Algoritması-Örüntü Araması (hFA-PS) Teknik tabanlı PI/PID (Sahu RK, 2015). Gri Kurt Optimizasyonu (GWO) tabanlı PI/PID (Guha D, 2016). Ayrıca, Yarasa Algoritması tabanlı çift modlu PI (Sathya ve Ansari 2015), hibrit stokastik fraktal arama ve yerel tek modlu örnekleme (hSFS-LUS) tabanlı çok aşamalı PID (Sivalingam et al.,2017), GWO gibi PID kontrol şemalarının değiştirilmiş versiyonlarına dayalı kademeli PI-PD denetleyici (Padhy ve ark. 2017), Çiçek Tozlaşma Algoritması (FPA) tabanlı PI-PD kademeli denetleyici (Dash ve ark. 2016) ve iki serbestlik derecesine dayalı farklı optimizasyon teknikleri (2DOF) kontrolörleri (Sahu ve ark. 2013, 2016; Dash ve ark. 2014; Patel ve ark. 2019) gibi öneriler bulunmaktadır.

Bu çalışmanın amacı, beklenmedik yük kesintileri ve diğer olası aksaklık durumlarında sistemin istikrarını sağlamak ve kontrol altında tutmaktır. Sistem frekansı ve bağlantı hattı güç dalgalanmalarının istenilen seviyede tutulması ve sistem kararlılığının korunması hedeflenmektedir. Adım yük değişimlerinin ardından alan kontrol hatasının en aza indirilmesi ve her bir alanın kararlı durumdayken kendi yükünü idare edebilmesi sağlanacaktır. Geçici durumlarda güç talebi artan alanların birbirleriyle iş birliği yaparak, sistemin daha etkin ve verimli bir şekilde yönetilmesine katkı sağlanması amaçlanmaktadır.

2. Materyal ve Yöntem

2.1. Tek Alanlı Yük Frekans Kontrolü

Çalışmamızda tek alanlı YFK kontrol sistemi kullanılmaktadır. Tek alanlı yük frekans kontrolü, elektrik enerjisinin dağıtımında ve kullanımında önemli bir rol oynayan bir sistemdir. Bu sistem, elektrik ağlarında gerilim ve frekansın istikrarını sağlamak için kullanılır. Temel olarak, elektrik ağlarındaki yük değişikliklerine hızlı bir şekilde yanıt vererek frekansın istikrarını korur (Saadat, 1999). Bu kontrol sistemi, enerji talebindeki ani değişikliklere uyum sağlamak için tasarlanmıştır.

Özellikle, elektrik tüketiminin yüksek olduğu bölgelerde, mesela büyük şehirlerde veya sanayi bölgelerinde, yük frekans kontrolü önemli bir unsur haline gelir. Ani yük artışları veya azalışları, frekansın dengesini bozabilir ve bu da elektrik sistemlerinde ciddi sorunlara yol açabilir (Öztürk et al., 2016). Tek alanlı yük frekans kontrolü genellikle enerji üretim ve dağıtım şirketleri tarafından kullanılan sofistike sistemlerle sağlanır. Bu

sistemler, frekansı sabit tutmak için enerji üretimini anında ayarlayabilir ve ağıdaki yük değişikliklerine adapte olabilir. Ayrıca, akıllı şebeke teknolojileri ve dijital kontrol sistemleri, yük frekans kontrolünün etkinliğini artırmak için kullanılır (Öztürk et al., 2016). Sonuç olarak, tek alanlı yük frekans kontrolü, elektrik ağlarının güvenliğini ve istikrarını sağlamak için kritik bir öneme sahiptir. Bu sistemler, enerji tedarikinin sürekliliğini ve elektrik sistemlerinin güvenilirliğini artırırken, aynı zamanda enerji verimliliğini ve sürdürülebilirliğini de destek sağlamaktadır (Laghari, 2024).

İzole edilmiş bir güç istasyonu aşağıdaki parametrelere sahiptir.

Türbin Zaman Sabiti: T_t 0,05 saniye

Governör Zaman Sabiti: T_g 0,2 saniye

Jeneratör Atalet Sabiti: H 5saniye

Regülatör Hız düzenleyicisi R birim başına

Frekanstaki %1'lik bir değişiklik için yük yüzde 0,8 oranında değişmektedir. $D = 0,8$. Governor hız regülasyonu birim başına $R = 0,05$ olarak ayarlanmıştır. Türbin anma gücü 60 Hz nominal frekansta 250 MW 'tır. 50 MW 'lık ani yük değişimi (ΔPL birim başına 0,2saniye) meydana gelir (Saadat, 1999).

Simulink blok diyagramını oluşturun ve frekans sapma yanıtını elde edin. Regülatör hız regülasyonu R birim başına 0,05. Bu nedenle $1/R$ olur. $1/R$ denklemi Denklem (1)'de verilmektedir (Laghari, 2024; Öztürk Ali et al., 2016).

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{0.05} = 20 \quad (1)$$

Örnekte hesaplandığı gibi kararlı durum frekans sapması Denklem (2)'de verilmektedir (Öztürk et al., 2016; Saadat, 1999).

$$\Delta_f = -0,0096 \quad (2)$$

Kararlı durum frekans sapma denklemi Denklem (3) ve (4)'te verilmektedir (Laghari, 2024; Saadat, 1999).

$$\Delta_{f_{Actual}} = \Delta_{f_{p.u.}} \times \Delta_{f_{base}} \quad (3)$$

$$\Delta_{f_{Actual}} = -0,0096 \times 60 = -0,576 \quad (4)$$

Hertz cinsinden kararlı durum frekansı denklemi, Denklem (5 ve 6)'da ifade edilmektedir (Laghari, 2024; Öztürk Ali et al., 2016).

$$f_{Actual} = f_{original} + \Delta_{f_{Actual}} \quad (5)$$

$$f_{Actual} = 60 - 0,576 = 59,424 \text{ Hz} \quad (6)$$

50 MW Yük Değişimi Türbin nominal gücü 250 MW' tır. 50 MW' lık ani yük değişimi olduğu kabul edilmiştir. Adım giriş fonksiyonunun değeri Denklem (7, e ve 9)'da verilmektedir (Saadat, 1999).

$$\Delta P_L = \frac{50}{250} = 0,2 \text{ p.u.} \quad (7)$$

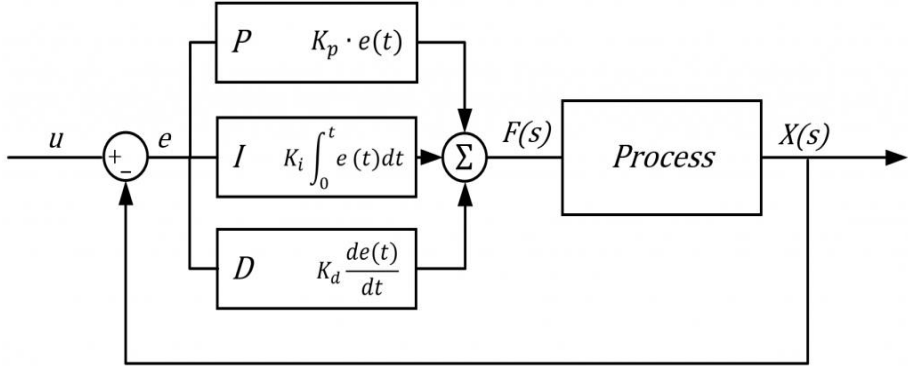
$$\Delta P_L = 0,2 \times 250 = 50 \text{ MW} \quad (8)$$

$$P_L = 250 + 50 = 300 \text{ MW} \quad (9)$$

2.2 Proportional-Integral-Derivative (PID)

PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolcüsü, endüstriyel otomasyon ve kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir geri besleme mekanizmasıdır. PID kontrolcüsü, oransal (P), integral (I) ve türev (D) terimlerini kullanarak bir proses değişkeninin istenen değerde kalmasını sağlar. Bu üç terimin

birleşimi, sistemin kararlı, hızlı ve doğru bir şekilde kontrol edilmesini sağlar (Öztürk Ali et al., 2016; Saadat, 1999). Şekil 1’de PID blok diyagram gösterimi verilmiştir.



Şekil 1. PID blok diyagram

2.2.1 Oransal (P) Kontrol

Oransal kontrol, hatanın (set noktası ile mevcut ölçüm arasındaki fark) anlık değerine bağlı olarak bir çıkış üretir. Bu terim, hatayı hızlı bir şekilde azaltmak için kullanılır ancak tek başına kalıcı bir hata bırakabilir (Öztürk Ali et al., 2016; Saadat, 1999).

2.2.2 İntegral (I) Kontrol

İntegral kontrol, hatanın zaman içindeki birikimini dikkate alır. Bu terim, oransal kontrolün bıraktığı kalıcı hatayı ortadan kaldırmak için kullanılır ve uzun vadede hatayı sıfıra indirmeye çalışır (Saadat, 1999).

2.2.3 Türev(D) Kontrol

Türev kontrol, hatanın değişim hızına göre tepki verir. Bu terim, sistemin aşırı tepkisini azaltmak ve stabiliteyi artırmak için kullanılır (Öztürk Ali et al., 2016).

Matematiksel Temel

PID kontrolörünün işleyişinin ifadesi Denklem (10)'da ifade edilmiştir. Uygun K_p, K_i ve K_d kontrol kazançlarının bulunması için maliyet fonksiyonunun seçimi oldukça önemlidir. Bu seçim, hedeflenen sistem bütünlüğüne ulaşmak için kritik bir şekilde sunulmaktadır (Kumarakrishnan et al., 2020).

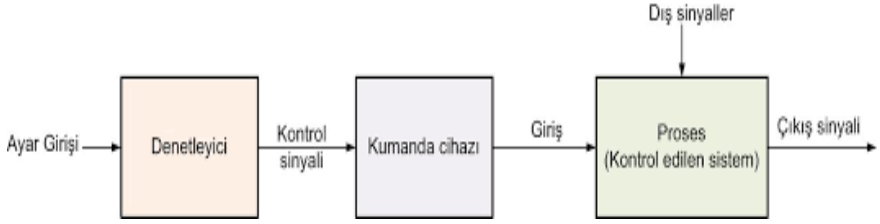
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (10)$$

Denklem (10)'da u(t)= Kontrol çıkışı, e(t)= Hata (set noktası-Proses değişkeni), K_p= Oransal Kazanç, K_i= İntegral Kazanç, K_d= Türevsel Kazancı ifade etmektedir (Kumarakrishnan et al., 2020).

PID kontrolcüler, farklı sistemler için optimize edilmelidir. Bu süreç genellikle deneysel yöntemlerle veya belirli algoritmalar kullanılarak gerçekleştirilir. Ayarlama, her bir terimin kazanç değerlerinin belirlenmesini içerir ve bu değerler, sistemin performansını doğrudan etkiler (Saadat, 1999).

2.2.4 Açık Çevrim Kontrol

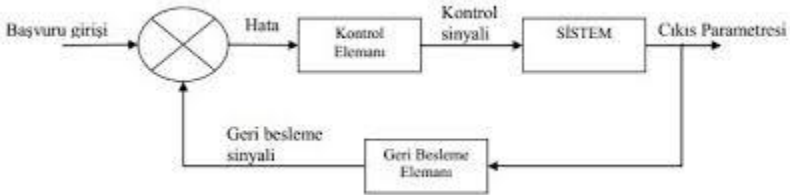
Açık çevrim kontrol sistemi, giriş sinyali ile çıkış sinyali arasında geri besleme döngüsünün bulunmadığı bir kontrol yöntemidir. Sistem, önceden belirlenmiş bir kontrol stratejisine göre çalışır ve dışarıdan gelen herhangi bir geri bildirim dikkate alınmaz. Açık çevrim sistemler, genellikle basit ve ucuzdur, ancak sistemdeki değişikliklere veya bozulmalara karşı duyarlıdır (Öztürk Ali et al., 2016; Saadat, 1999). Şekil 2' açık çevrim blok diyagramı gösterimi verilmektedir.



Şekil 2. Açık çevrim blok diyagramı

2.2.5 Kapalı Çevrim Kontrol

Kapalı çevrim kontrol sistemi, çıkış sinyalini sürekli olarak ölçen ve geri besleyen bir kontrol yöntemidir. Bu geri besleme bilgisi, kontrol stratejisini ayarlamak için kullanılır. PID kontrolcüsü, tipik olarak kapalı çevrim kontrol sisteminde kullanılır ve sistem performansını optimize eder (Saadat, 1999). Şekil 3'te kapalı çevrim blok diyagram gösterimi verilmektedir.



Şekil 3. Kapalı çevrim blok diyagram

2.2.6 Tepe Zamanı (Peak Time) T_p

Sistemin ilk hareketinde en yüksek noktaya çıkması için geçen süreye Tepe Zamanı denir. Denklem (11)'deki gibi ifade edilir.

$$T_p = \frac{\pi}{\omega d} = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1-\xi^2}} \quad (11)$$

Denklem (11)'de ξ =Sönüm oranı, ω_n = doğal fekans, ω_d =sönümlü doğal frekans olarak ifade etmektedir (Öztürk Ali et al., 2016).

2.2.7 Ayarlama Süresi (Setting Time) T_s

T zamanı sonsuza giderken fonksiyon değeri $C_{final}=C_f$ olmaktadır. Bu duruma sistem değeri, $C_f (1\pm0,02)$ sınırları içerisine girene kadar geçen zamana Ayarlama Süresi veya Yerleşme Zamanı denir. Denklem (12)'de T_s değeri verilmiştir (Saadat, 1999).

$$T_s = \frac{-\ln(0,02 \times \sqrt{1-\xi^2})}{\xi \times \omega_n} = \frac{4}{\xi \times \omega_n} \quad (12)$$

2.2.8 Yükselme Zamanı (Rise Time) T_r

Sistemin son değeri olan C_f değerinin %10 'undan(T_1) başlayıp %90 değerine(T_2) varana kadar geçen süreye yükselme zamanı denir. Denklem (13)'te yükselme zaman ifadeleri verilmektedir (Öztürk Ali et al., 2016).

$$T_2=0,9 \times C_f, \quad T_1=0,1 \times C_f \quad T_r=T_2-T_1 \quad (13)$$

2.2.9 Maksimum Aşma (OverShoot) %OS

T zamanından sonsuza giderken $C_{final}=C_f$ olmaktadır. Bu durumda sistem değeri $C_f(1\pm0,02)$ Sınırına girene kadar geçen süreye denir, Denklem (14)'te Maksimum Aşma ifadesi verilmiştir (Öztürk Ali et al., 2016).

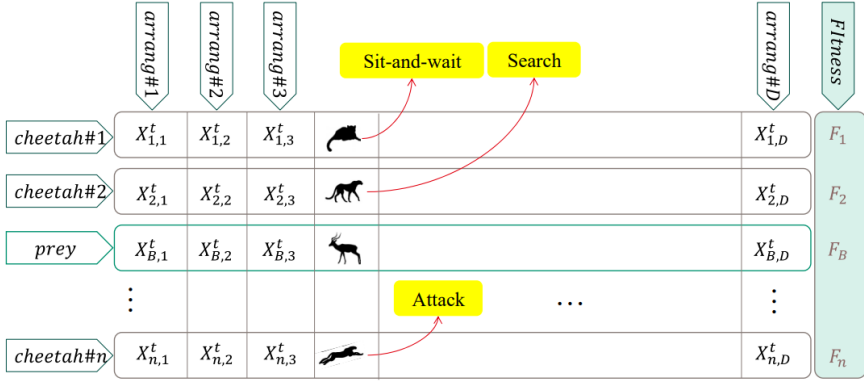
$$\%OS = \frac{C_{max} \times C_f}{C_f} \times 100 \quad (14)$$

2.3 Çita Optimizasyonu (CO)

Çita Optimizasyon Algoritması (CO), çitaların avlanma davranışlarından türetilen, doğadan ilham alan bir optimizasyon tekniğidir. Bu algoritma çitaların stratejik avlanma taktiklerini taklit

ediyor ve dört temel aşamayı içeriyor: arama, bekleme, saldırma ve yaşam alanına geri dönme. Bu aşamalar toplu olarak algoritmanın keşif ve kullanım yeteneklerini geliştirerek çeşitli sorun alanlarında etkili optimizasyon sağlar (Akbari et al., 2022). Bir çita, devriye sırasında ya da çevresel gözlem yaparken potansiyel bir avı fark edebilir. Avı gözlemlediğinde, çita, avın daha yakın bir mesafeye gelmesini beklemek için oturabilir ve bu süre zarfında saldırı için uygun anı kollar. Saldırı, hızlı bir koşu ve avı ele geçirme evrelerini içerir. Çeşitli sebeplerle, örneğin enerji sınırlamaları veya avın hızla uzaklaşması gibi durumlarda, çita avlanmayı terk edebilir ve dinlenmek üzere yuvasına geri dönebilir.

Daha sonra, yeni bir av arayışına başlayabilir (Öztürk et al., 2016) Çita, avının konumunu, çevresindeki alanı ve kendisine olan mesafesini değerlendirerek, görselde gösterilen stratejilerden birini seçer. Genel olarak, Çita Optimizasyonu (CO) algoritması, bu avlanma stratejilerini avlanma sürecinde etkin bir şekilde kullanmaya dayanır (Öztürk et al., 2016). CO algoritması, Akbari ve diğerleri tarafından çitaların avlanma stratejilerini taklit etmek amacıyla etkili bir optimizasyon algoritması olarak geliştirilmiştir. CO algoritması, avlanma sürecinde üç ana strateji kullanır: av arama, oturma ve bekleme ve saldırı. Algoritmanın yerel optimum noktalarda sıkışmasını önlemek için, avdan ayrılma ve eve dönme tanımlanmıştır. Çita popülasyonlarının farklı düzenlemeleri Şekil 4'te verilmiştir (Akbari et al., 2022; Memon et al., 2023).



Şekil 4. CO algoritması farklı düzenleme gösterimi

Şekil (4) de anlatılmak verilen CO algoritmasının, avlanma sürecinde üç ana strateji ifadeleri aşağıdaki gibi tanımlanmaktadır.

Arama stratejisi: Çitalar ava ulaşmak için otururken ve beklerken çevreyi gözlemlemesinin matematiksel modellemesidir (Akbari et al., 2022).

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t + \hat{r}_{i,j}^{-1} \cdot \alpha_{i,j}^t \quad (15)$$

Denklem (15) de $x_{i,j}$ vektörü çitanın mevcut konumunu, j çitanın bir sonraki arama konumunu, $X_{i,j}^{t+1}$ ve $X_{i,j}^t$ çitanın i ve j koordinatındaki ve sonraki arama konumunu temsil eder. T maksimum avlanma zamanını, t mevcut avlanma zamanını temsil eder, $X_{i,j}^t$ randomize bir parametredir, $\alpha_{i,j}^t$ avlanmak için adım uzunluğudur (Memon et al., 2023; Öztürk Ali et al., 2016).

Otur ve bekle stratejisi: Çitaların avlanırken pusuya yatmasıdır. Otur ve bekle stratejisinin denklemi Denklem (16)'da verilmektedir.

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{i,j}^t \quad (16)$$

Denklem (16)'da, j her adımda güncellenmiş konum, i her çitanın çözüm arayışını temsil eder (Akbari et al., 2022; Memon et al., 2023).

Saldırı stratejisi: Denklem (17)'de çitalar avlarına saldırmaya karar verdiğinde hız ve esneklik üstünlüklerini kullanırlar. Av, çitayı fark edip kaçmaya başladığı esnada çita avı kaçırmamak için değişir (Akbari et al., 2022).

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{B,j}^t + \hat{r}_{i,j}^{-1} \cdot B_{i,j}^t \quad (17)$$

$\alpha_{i,j}^t$ avın mevcut konumu, $\alpha_{i,j}^t$ çitanın hızlı yer değiştirmesi, $\alpha_{i,j}^t$ dönüş faktörünü temsil eder (Memon et al., 2023). Denklem (18)'de etkileşim faktörü formülü verilmektedir.

$$X_{i,j}^{t+1} = X_{B,j}^t + \hat{r}_{i,j}^{-1} \cdot B_{i,j}^t \quad (18)$$

2.4 Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)

Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bir hesaplamalı yöntemdir. İlk olarak 1995 yılında Kennedy ve Eberhart tarafından geliştirilmiştir. Doğada kuş sürülerinin ya da balık sürülerinin davranışlarını taklit eder. PSO' nun temel özelliklerini ve çalışma prensibini açıklayayım (Kennedy James & Eberhart Russel, 2011). Parçacık (Particle): Optimizasyon probleminin çözüm uzayında bir aday çözümdür. Her parçacığın belirli bir konumu ve hızı vardır. Bu konum ve hız, parçacığın optimizasyon sürecindeki durumunu ve hareketini tanımlar. Sürü (Swarm): Parçacıkların oluşturduğu topluluktur. Bu topluluk, parçacıkların etkileşim ve iş birliği yaparak daha iyi çözümler bulmasına olanak tanır.

Fitness Değeri: Her parçacığın çözümünün ne kadar iyi olduğunu belirleyen bir ölçüttür. Fitness değeri, optimizasyon probleminin amacına göre minimize edilmeye ya da maksimize edilmeye çalışılır. Bu değer, parçacığın mevcut çözümünün kalitesini yansıtır ve algoritmanın performansını değerlendirmek için kullanılır (Reeves, 1983).

PSO'nun Çalışma Prensibi Başlangıç: PSO, belirli sayıda parçacığın rastgele konumlandırılmasıyla başlar. Hareket ve Güncelleme: Her bir parçacık, kendi en iyi konumunu ($pBest$) ve tüm sürünün en iyi konumunu ($gBest$) dikkate alarak hız ve konumunu günceller. Hız Güncelleme: Parçacığın yeni hızı, mevcut hızına, kendi en iyi konumuna ve sürünün en iyi konumuna olan uzaklıklarla orantılı olarak güncellenir.

Hız güncelleme formülü Denklem (19)'da verilmektedir (Minsky, 1954).

$$v_i(t + 1) = w \times v_i(t) + c_1 \times r_1 \times (pBest_i - x_i(t)) + c_2 \times r_2 \times (gBest - x_i(t)) \quad (19)$$

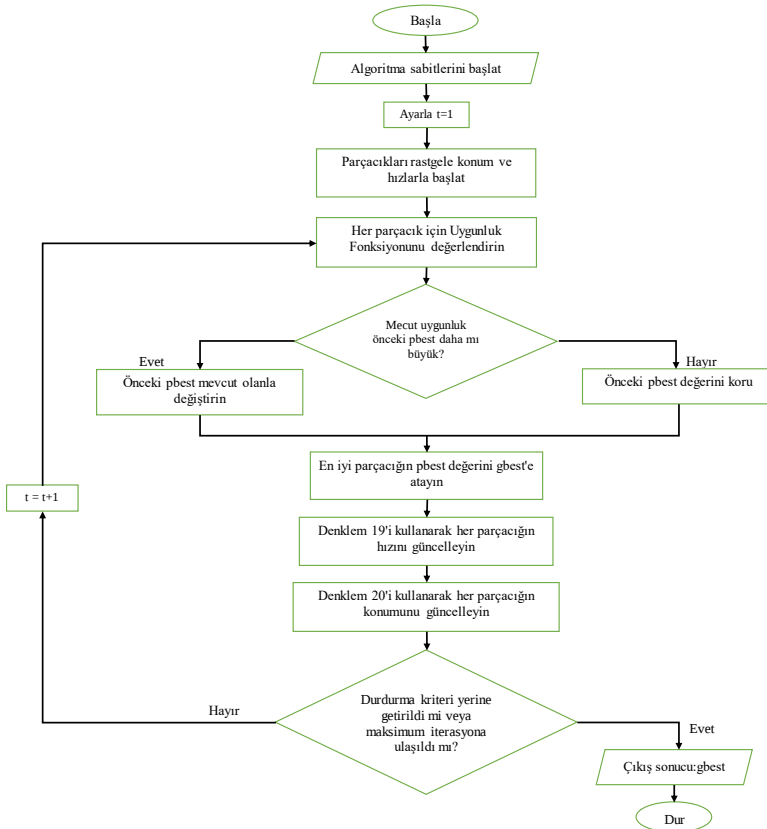
Denklem (19)'da $v_i(t)$: Parçacığın t anındaki hızı, $v_i(t)$:Parçacığın t anındaki konumu, w : Atalet ağırlığı (inertia weight), c_1, c_2 : Öğrenme faktörleri (genellikle sabit sayılar), r_1, r_2 : Rastgele sayılar (0-1 arasında), $pBest_i$: Parçacığın bulunduğu en iyi konum, $gBest$: Sürünün bulunduğu en iyi konumu belirtir.

PSO konum güncellenmesi, parçacığın yeni konumu, mevcut konumuna yeni hızının eklenmesiyle bulunur. Konum güncelleme formülü Denklem (20)'da verilmiştir (Minsky, 1954; Reeves, 1983)

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \quad (20)$$

Döngü, adımlar belirli bir iterasyon sayısına ulaşana kadar veya durdurma kriteri karşılanana kadar tekrarlanır (Minsky, 1954).

PSO'nun avantajı olarak, Kolay Anlaşılır ve Uygulanabilir olmasıdır. PSO'da ayarlanması gereken parametre sayısı azdır. Küresel en iyiyi bulma eğilimi, lokal minimumlara takılma olasılığı düşük olan küresel bir arama stratejisi kullanır (Kennedy James & Eberhart Russel, 2011). Şekil 5'te PSO algoritması akış şeması vermiştir (Kennedy et al, 2011; Minsky, 1954).



Şekil 5. PSO Akış Şeması

3. Bulgular

YFK, Matlab 2023b sürümü ile 1650 ekran kartı ve i7 11. nesil işlemci bulunan bir bilgisayardan simüle edilmiştir. Yük frekans kontrolü, elektrik güç sistemlerinde frekansın nominal değerinde (genellikle 50 Hz veya 60 Hz) sabit tutulmasını ve jeneratörler arasında yük paylaşımının dengeli bir şekilde gerçekleştirilmesini amaçlayan bir kontrol mekanizmasıdır. Elektrik üretimi ve tüketimi arasındaki dengenin bozulması, frekans sapmalarına yol açar. Bu sapmaların minimumda tutulması, sistemin kararlılığı ve güvenilirliği için hayati önem taşır. YFK, frekans sapmalarını algılayarak, jeneratörlerin giriş gücünü ayarlamak suretiyle gerekli düzeltmeleri yapar. Birincil Frekans Kontrolü: Hız düzenleyicileri (governors) kullanarak ani frekans değişimlerine hızlı tepki verir (Saadat, 1999).

Jeneratörlerin hız düzenleyicileri, sistem frekansındaki değişiklikleri algılar ve giriş gücünü ayarlayarak tepki verir. Denklem (21)'de Frekans sapması (Δf) Sistemin frekansı, nominal frekanstan sapar denklem verilmiştir (Saadat, 1999).

$$\Delta f = f_{\text{nominal}} - f \quad (21)$$

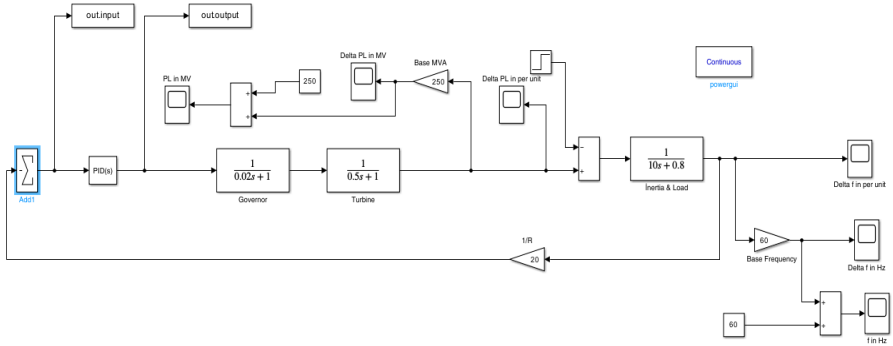
Jeneratör güç değişimi (ΔP): Hız düzenleyicisinin tepkisi Denklem (22)'deki gibi ifade edilir (Laghari, 2024; Saadat, 1999). Denklem (22)'de K_d , düzenleyicinin frekans duyarlılık katsayısını ifade eder.

$$\Delta P = -K_d \Delta f \quad (22)$$

İkincil Frekans Kontrolü: Otomatik Üretim Kontrolü (AGC) sistemleri aracılığıyla daha yavaş ve hassas düzeltmeler yapar. AGC, birincil kontrolün ardından gelen kalıcı sapmaları düzeltir ve sistem

frekansını nominal değere döndürür (Saadat, 1999). AGC denklemi denklem (23)'te verilmektedir.

$$\Delta P_{AGC} = K_p \Delta_f + K_i \int \Delta_f dt + K_d \frac{d(\Delta_f)}{dt} \quad (23)$$



Şekil 6. Tek alanlı yük frekans kontrolü blok diyagramı

Şekil 6'da yer alan bu diyagram, elektrik güç sisteminde frekans sapmalarını kontrol etmek için kullanılan bir kontrol sistemini göstermektedir. Add1 (Toplama Bloğu), bu blok, giriş sinyallerini toplar. Bu modelde, frekans hatasını ve yük değişimlerini toplar. PID Kontrolcüsü, toplama eğiliminden gelen hata alanı ve bu hata ayıklama kullanarak bir kontrol sinyali üretimi kontrolcüsü. PID kontrolcüsü, sistemi istenilen referans birleştirmelerle çalıştırılır. Governor (Regülatör) Bloku, PID kontrolcüsünden gelen teklifi alır ve türbin parçalarının kontrolünü yapar. Bu blok, genellikle zaman sabitine (0,02s) ve kazanca sahip bir transfer fonksiyonu içerir. Türbin (Türbin) bloğu, regülatörden gelen sinyali alır ve jeneratör milinin mekanik gücünü sağlar. Türbinin zaman sabiti (0,5s) ve kazanç burada gerçekleşir (Laghari, 2024; Öztürk Ali et al., 2016; Saadat, 1999).

Atalet ve Yük (Atalet ve Yük) bloku, türbinden gelen mekanik gücü alır ve sistem ataletini birlikte ve temsil eder. Bu blok, sistem frekans dinamiklerini çalıştıran bir transfer fonksiyonuna sahiptir ($10s + 0.8$). Frekans Hesabı (Frekans Hesaplama), atalet ve yk düşüşünden çıkan frekans değişimini hesaplar. Delta f (frekans değişimi) başına birim olarak hesaplamalar ve bu değer baz frekans (60 Hz) ile çarpılarak gerçek frekans değişimi (Hz cinsinden Delta f) elde edilir. Delta PL (Gc Yükü Değişimi), sisteme uygulanan gc yükü değişimini temsil eder. Bu, referans olarak 250 MW birleştirilerek birim başına bölünerek (birim değeri) olarak normalleştirilir. 1/R Bloku, regülatör verimini temsil eden ters çevrilmiş R'de bulunur (1/R). Bu değer, sistem frekans tepkisini belirlemede kullanılır ve genellikle hız regülasyonunu temsil eder.

MW cinsinden Baz MVA ve PL, sistemdeki megavat (MW) eşitlerinin özellikleri ve baz yük (250 MW) ile karşılaştırılması yapılır. Powergui, bu blok, Simulink modelinde gc ölçümlerinin performansını yönetir. Sürekli zaman simülasyonları için kullanılır (Laghari, 2024; ztrk Ali et al., 2016; Saadat, 1999).

3.1 Tek Alanlı Yük Frekans Kontrolü PID Optimizasyon Sonuçları

3.1.1. PSO-PID Sonuçları

Parçacık Srs Optimizasyonu (PSO) tabanlı PID kontrolü, dinamik sistemlerde hassas ve etkili bir kontrol mekanizması sağlamak için kullanılan modern bir yöntemdir. PSO, doğada sürü davranışlarından esinlenen bir optimizasyon algoritmasıdır ve parametre ayarlama problemlerinde oldukça etkilidir. Geleneksel PID (Proportional-Integral-Derivative) kontrolörünün kazanç değerlerinin optimal ayarları, sistem performansını büyük ölçüde

etkileyebilir. PSO, bu kazanç değerlerini optimize ederek, PID kontrolörünün performansını iyileştirir. PSO algoritması, birçok aday çözümün aynı anda değerlendirilmesi ve güncellenmesi yoluyla, global optimuma daha hızlı ve daha güvenilir bir şekilde ulaşılmasını sağlar. Bu yöntem, özellikle karmaşık ve doğrusal olmayan sistemlerde, geleneksel yöntemlere kıyasla daha üstün performans sergileyebilir ve sistemin istenen cevabı vermesi için gerekli kontrol parametrelerini etkin bir şekilde belirleyebilir.

Tablo 1. PSO-PID Parametreleri

PID Parametreleri	PSO-PID
K_p	0.87
K_i	0.45
K_d	0.98

Tablo 1’de oluşturmuş olduğumuz YFK sisteminin PSO algoritması yardımı ile daha kararlı hale getirebilmemiz için bulmuş olduğumuz parametrelerdir.

Bu parametreler YFK’ yi PSO kullanarak en kararlı şekilde çalıştırmamızı sağladı. Şekil 6’da simüle ettiğimiz YFK PSO kullanarak Tablo 1’de belirttiğimiz parametreler yardımı ile kararlı hale getirmeye çalıştığımız YFK’ nin kararlılığını gösterir.

3.1.2. Matlab Tuned-PID Sonuçları

PID kontrolörleri, sistemlerin istenen performansa ulaşması için belirli parametrelerle ayarlanması gereken kontrol cihazlarıdır. Bu parametreler, oransal (P), integral (I) ve türev (D) kazançlardır. "Tuned PID" ise bu parametrelerin optimize edilerek ayarlandığı durumu ifade eder. Sonuç olarak, "Tuned PID" kontrolörü, belirli performans kriterlerini karşılayacak şekilde optimize edilmiş P, I ve

D kazançlarına sahip bir kontrolör anlamına gelir. Bu, sistemin daha hızlı, daha kararlı ve daha doğru bir şekilde çalışmasını sağlar.

Tablo 2. Tuned-PID Parametreleri

PID Parametreleri	Tuned-PID
K_p	0.5728
K_i	0.2548
K_d	0.9566

Tablo 2’de oluşturmuş olduğumuz sistemin PID ye Matlab Simulink uygulamasının kendi içinde bulunan Tuned seçeneği ile yapabildiği en kararlı hale getirmesi için uygulama tarafından verilen PID parametreleridir. Şekil 6’da simüle ettiğimiz YFK’ nin Turned kullanarak Tablo 2 de belirttiğimiz parametreler yardımı ile kararlı hale getirmeye çalıştığımız YFK’ nin kararlılığını gösterir.

3.1.3. CO-PID Sonuçları

Çita Optimizasyonu temelli PID (CO-PID) kontrolü, özellikle karmaşık endüstriyel süreçlerde yüksek performans ve hassasiyet sağlamak için kullanılan gelişmiş bir kontrol yöntemidir. Çita Optimizasyonu, doğadan ilham alan bir optimizasyon algoritmasıdır ve çitaların avlarını yakalarken sergiledikleri hızlı ve etkin hareketleri model alır. Bu algoritma, PID kontrolörünün parametrelerini optimize ederek sistemin performansını artırmayı hedefler.

Tablo 3. CO-PID Parametreleri

PID Parametreleri	CO-PID
K_p	1.42
K_i	0.952
K_d	0.922

Tablo 3'te oluşturmuş olduğumuz YFK CO algoritması yardımı ile daha kararlı hale getirebilmemiz için bize bulmuş olduğu parametrelerdir. Bu parametreler YFK'yi CO kullanarak en kararlı şekilde çalıştırmamızı sağladı. Şekil 6 da simüle ettiğimiz YFK' nin CO kullanarak Tablo 3 de belirttiğimiz parametreler yardımı ile kararlı hale getirmeye çalıştığımız YFK' nin kararlılığını gösterir.

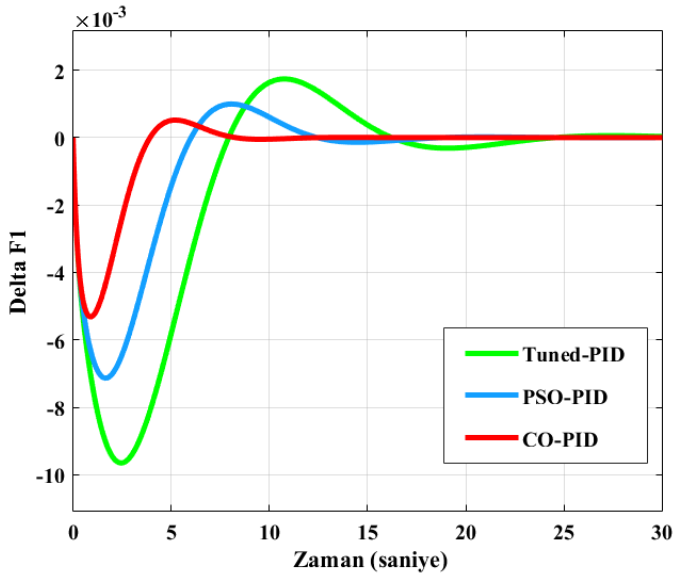
3.1.4. Matlab Simülasyon Sonucunda $\Delta F1$, Delta Ftie ve Hertz Cinsinden Gerçek Frekans Değerlerinin Bulunması

$\Delta F1$ kontrol stratejileri, frekans sapmalarını izleyerek ve düzelterek sistemin nominal frekansta çalışmasını sağlar (Laghari, 2024; Saadat, 1999). Delta Ftie, güç sistemlerinin kararlılığını ve güvenilirliğini korumak için izlenmesi ve kontrol edilmesi gereken önemli bir parametredir. Kontrol stratejileri, bu sapmayı minimuma indirerek sistem performansını iyileştirmeyi amaçlar (Saadat, 1999). Frekans sapmaları, çeşitli kontrol stratejileri kullanılarak minimize edilir ve bu sapmaların izlenmesi, sistem kararlılığı ve güvenilirliği için kritiktir (Laghari, 2024; Saadat, 1999).

Yerleşme zamanı (t_s), maksimum aşma ($M-(Hz)$), maksimum düşme ($M+(p.u.MW)$), sinyal statikleri olan maksimum aşma ($M+(Hz)$) ve maksimum düşme ($M+(p.u.MW)$) gibi parametreler bu sürecin önemli göstergeleridir (Laghari, 2024).

Tablo 4. $\Delta F1$ için Sistem Performans Değerleri

Kontrolör Tipi	t_s (s)	M^+ (Hz)	M^+ (p.u. MW)	M^- (Hz)	M^+ (p.u. MW)
Tuned- PID	27,383	10,754	2,458	4,138	17,059
PSO-PID	20,938	1,655	8,062	1,658	14,368
CO-PID	13,901	0,888	5,213	9,341	0,549



Şekil 7. Delta F1 zamana göre grafiği

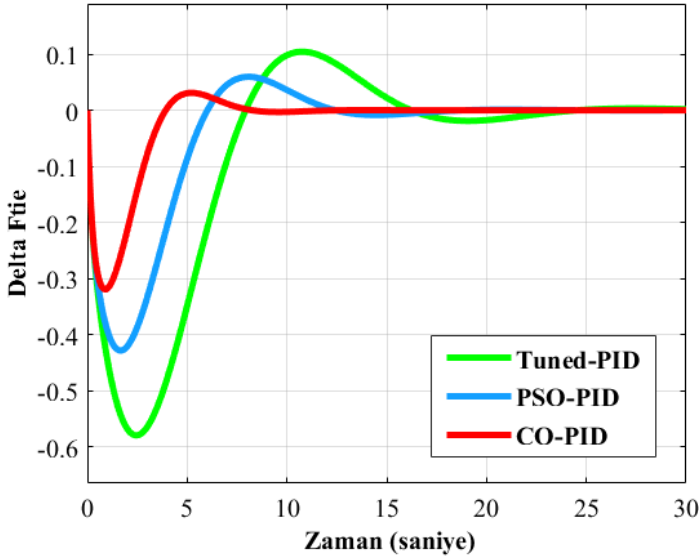
Delta F1, belirli bir bölgedeki veya jeneratör grubundaki frekans sapmasını ifade eder ve güç sistemlerinin kararlılığı için önemli bir parametredir. Frekans sapmalarını minimize etmek, sistemin güvenilirliğini ve performansını artırır.

Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'te göstermiş olduğumuz K_p , K_i , K_d değerlerini PID üzerinde yerlerine yazdığımızda ve simülasyonu çalıştırdığımız zaman Delta F1'in sistem performans değerlerini Tablo 4'te verilmiştir. Burada t_s yerleşme zamanını, $M^-(Hz)$ maksimum aşmayı, $M^+(p.u.MW)$ maksimum düşmeyi, $M^-(Hz)$ ve $M^+(p.u. MW)$ sinyal statiklerini göstermektedir. Bu sonuçların alındığı grafik ise Şekil 7'de gösterilmiştir.

Tablo 4'deki değerlere ve Şekil 7'ye göre; CO-PID kontrolörü, yerleşme zamanı, frekans sapması ve güç sapmasında en iyi performansı göstermiştir. PSO-PID kontrolörü, frekans düşüşü açısından en iyi performansı sergiler ve genel olarak iyi bir denge sağlamıştır. Tuned-PID kontrolörü, en uzun yerleşme zamanına sahip olup frekans sapmasında daha düşük performans sergiler, ancak bazı güç sapmalarında diğer kontrolörlere göre daha iyi olabilir. Bu sonuçlara göre, CO-PID kontrolörünün genel olarak en iyi performansa sahip olduğunu, ancak belirli durumlarda PSO-PID kontrolörünün de tercih edilebileceğini göstermektedir.

Tablo 5. ΔF_{tie} için Sistem Performans Değerleri

Kontrolör Tipi	t_s (s)	M^+ (Hz)	M^+ (p.u. MW)	M^- (Hz)	M^+ (p.u. MW)
Tuned- PID	27,383	10,754	2,458	4,138	17,059
PSO-PID	20,938	1,655	8,062	1,658	14,368
CO-PID	13,901	0,888	5,213	9,341	0,549



Şekil 8. Delta F_{tie} zamana göre grafiği

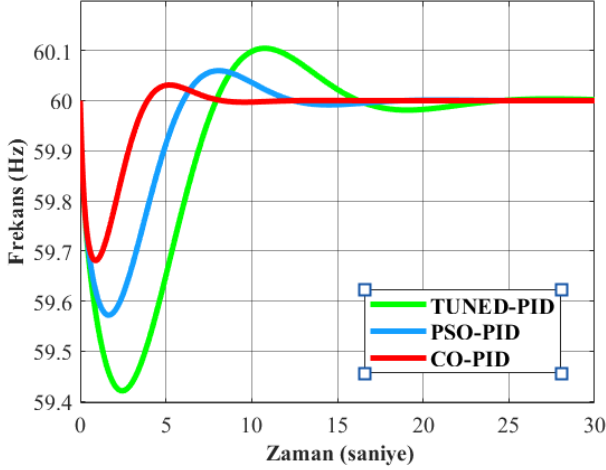
Delta F_{tie} güç sistemlerinin kararlılığını ve güvenilirliğini korumak için izlenmesi ve kontrol edilmesi gereken önemli bir parametredir. Bu sapmanın minimize edilmesi, sistemin nominal frekansta çalışmasını ve bölgesel güç dengesinin korunmasını sağlar. Tablo 5 ve şekil 8'e göre, CO-PID kontrol stratejisi, en kısa kararlılık süresine (ts) sahip olup, pozitif frekans sapmasında (M+) en düşük değeri ve negatif güç sapmasında (M-) en düşük değeri göstermektedir. Ancak, negatif frekans sapmasında (M-) en yüksek değere sahiptir. PSO-PID kontrol stratejisi, genelde frekans sapmalarında düşük değerlere sahiptir ve negatif frekans sapmasında (M-) en düşük değeri göstermektedir. Güç sapmalarında orta derecede değerlere sahiptir. Tuned-PID kontrol stratejisi, en uzun kararlılık süresine (ts) sahip olup, pozitif ve negatif güç

sapmalarında (M^+ ve M^-) en düşük değerleri göstermektedir. Ancak, frekans sapmalarında (M^+ ve M^-) yüksek değerlere sahiptir. Bu sonuçlara göre, seçilecek kontrol stratejisi sistemin hangi parametresinin daha kritik olduğuna bağlıdır. Eğer kararlılık süresi ve pozitif frekans sapması kritikse CO-PID; frekans sapmalarında genel bir denge aranıyorsa PSO-PID; güç sapmalarını minimize etmek öncelikliyse Tuned-PID tercih edilebilir.

Tablo 6 Hertz Cinsinden Gerçek Frekans Değerleri

Kontrolör Tipi	t_s (s)	M^+ (Hz)	M^+ (p.u. MW)	M^- (Hz)	M^+ (p.u. MW)
Tuned- PID	27,383	10,754	2,458	4,138	17,059
PSO-PID	20,938	1,655	8,062	1,658	14,368
CO-PID	13,901	0,888	5,213	9,341	0,549

Şekil 9’da gösterilmiştir. Hertz (Hz) cinsinden gerçek frekans, bir elektrik güç sisteminde belirli bir anda ölçülen frekans değeridir ve nominal frekans (genellikle 50 Hz veya 60 Hz) etrafında değişiklik gösterebilir. Gerçek frekans, sistemin dengede olup olmadığını ve güç üretimi ile tüketimi arasındaki dengenin sağlanıp sağlanmadığını belirler.



Şekil 9. Hertz cinsinden gerçek frekans

Tablo 6 ve Şekil 9 göre; Tuned-PID kontrol stratejisi en yüksek pozitif frekans değerine (60.754 Hz) ve oldukça düşük negatif frekans değerine (45.862 Hz) sahiptir. PSO-PID kontrol stratejisi daha dengeli sonuçlar vermekte olup, pozitif frekans (51.655 Hz) ve negatif frekans (48.342 Hz) değerleri daha nominal frekansa yakındır. CO-PID kontrol stratejisi en düşük pozitif frekans değerine (50.888 Hz) ve en düşük negatif frekans değerine (40.659 Hz) sahiptir. Bu sonuçlar, sistemin gerçek frekans performansını analiz ederken hangi kontrol stratejisinin daha uygun olduğunu belirlemede yardımcı olabilir. Frekans sapmalarının minimize edilmesi hedeflendiğinde, PSO-PID stratejisi dengeli ve nominal frekansa yakın frekans değerleri sağladığı için tercih edilebilir.

4. Sonuçlar

Bu çalışma, Matlab Simulink ortamında modeli oluşturulan tek alanlı bir güç sistemi için Yük Frekans Kontrolü (YFK) amacıyla

PID kontrolör tasarımı ve optimizasyonunu ele almaktadır. Çalışmanın odak noktası, CO (Çıta Optimizasyonu), PSO (Parçacık Sürü Optimizasyonu) ve Tuned gibi farklı optimizasyon algoritmalarının PID kontrolör performansı üzerindeki etkilerini değerlendirmektir. CO-PID kontrolörü, CO algoritması kullanılarak optimize edilmiştir ve frekans dalgalanmalarının hızlı bir şekilde yerleşmesi, sınırlı tepe aşımı ve yeterli sönümlleme değerleri açısından en iyi performansı göstermiştir. Öte yandan, PSO-PID kontrolörü genel bir frekans sapması denge sağlarken, Tuned-PID kontrolörü ise güç sapmalarını minimize etme konusunda daha başarılıdır. Elde edilen sonuçlar, kontrol stratejisinin seçiminde kritik parametrelere bağlı olarak rehberlik sağlar. Kararlılık süresi ve pozitif frekans sapması kritikse, CO-PID kontrolörü tercih edilebilirken, genel bir frekans sapması denge aranıyorsa PSO-PID kontrolörü uygun olabilir. Güç sapmalarını minimize etmek öncelikliyse, Tuned-PID kontrolörü tercih edilebilir. Öte yandan, bu çalışma enerji verimliliği açısından da önemli sonuçlar ortaya koymuştur. Yük frekans kontrolünde kullanılan CO, PSO ve Tuned gibi algoritmalar, sistem kararlılığını artırarak enerji verimliliğini artırır. Bu algoritmalar, elektrik enerjisi iletim sistemlerinde ve benzeri uygulamalarda daha güvenilir, esnek ve verimli çözümler sunmak için önemli bir araç olarak değerlendirilebilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, tek alanlı bir güç sistemi için Yük Frekans Kontrolü amacıyla farklı PID kontrolör optimizasyonlarının performansını değerlendirerek, kontrol stratejisi seçiminde rehberlik sağlamış ve enerji verimliliğini artırmak için önemli bir adım atmıştır. Gelecekte, daha geniş kapsamlı güç sistemleri üzerinde benzer analizlerin yapılması ve farklı optimizasyon algoritmalarının

kullanılması, bu alandaki araştırmaların derinleştirilmesine katkı sağlayabilir.

Kaynakça

Akbari, M. A., Zare, M., Azizipanah-abarghooee, R., Mirjalili, S., & Deriche, M. (2022). The cheetah optimizer: a nature-inspired metaheuristic algorithm for large-scale optimization problems. *Scientific Reports*, 12(1), 1–20. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14338-z>

Guha, D., Roy, P., & Banerjee, S. (2017a). Quasi-oppositional symbiotic organism search algorithm applied to load frequency control. *Swarm and Evolutionary Computation*, 33(June 2016), 46–67. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.10.001>

Guha, D., Roy, P. K., & Banerjee, S. (2016). Load frequency control of interconnected power system using grey Wolf optimization. *Swarm and Evolutionary Computation*, 27, 97–115. <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2015.10.004>

Guha, D., Roy, P. K., & Banerjee, S. (2017b). Study of differential search algorithm based automatic generation control of an interconnected thermal-thermal system with governor dead-band. *Applied Soft Computing Journal*, 52, 160–175. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2016.12.012>

Kennedy James, & Eberhart Russel. (2011). Particle Swarm Optimization. *The Industrial Electronics Handbook - Five Volume Set*, 1942–1948. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46173-1_2

Khuntia, S. R., & Panda, S. (2012). Simulation study for automatic generation control of a multi-area power system by ANFIS approach. *Applied Soft Computing Journal*, 12(1), 333–341. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2011.08.039>

Kumarakrishnan, V., Vijayakumar, G., Boopathi, D., Jagatheesan, K., Saravanan, S., & Anand, B. (2020). Optimized PSO technique based PID controller for load frequency Control of single area power system. *Solid State Technology*, 63(5), 7979–7990.

Laghari. (2024). How To Design Load Frequency Control of Thermal / Hydro Power Plant Using Transfer. <https://youtu.be/9Aocf1sAtdY?Si=eaWdEnLvnh6iItUW>.

Mandal, B., & Kumar Roy, P. (2014). Multi-objective optimal power flow using quasi-oppositional teaching learning based optimization. *Applied Soft Computing Journal*, 21, 590–606. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.04.010>

Memon, Z. A., Akbari, M. A., & Zare, M. (2023). An Improved Cheetah Optimizer for Accurate and Reliable Estimation of Unknown Parameters in Photovoltaic Cell and Module Models. *Applied Sciences* (Switzerland), 13(18). <https://doi.org/10.3390/app13189997>

Minsky, M. L. (1954). The Annals of Human Genetics has an archive of material originally published in print format by the Annals of Eugenics. *Nucl. Phys.*, 13(1), 104–116.

Mohanty, B., Panda, S., & Hota, P. K. (2014). Differential evolution algorithm based automatic generation control for interconnected power systems with non-linearity. *Alexandria Engineering Journal*, 53(3), 537–552. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2014.06.006>

Naderi, E., Pourakbari-Kasmaei, M., & Abdi, H. (2019). An efficient particle swarm optimization algorithm to solve optimal

power flow problem integrated with FACTS devices. *Applied Soft Computing Journal*, 80, 243–262.
<https://doi.org/10.1016/j.asoc.2019.04.012>

Öztürk Ali, Bozali Beytullah, & Tosun Salih. (2016). Investigating voltage and frequency stability problems in the electrical power system using gravitational search algorithms. *JOURNAL OF OPTOELECTRONICS AND ADVANCED MATERIALS*, 18(1-2 JANUARY), 153–159.

Reeves, W. T. (1983). Particle systems - Technique for modeling a class of fuzzy objects. *Proceedings of the 10th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques, SIGGRAPH* 1983, 2(2), 359–376.
<https://doi.org/10.1145/800059.801167>

Saadat, H. (1999). Power Flow Analysis. In *Fundamentals of Power Systems Analysis* 1 (pp. 528–542).
<https://doi.org/10.1201/9781003394433-4>

Sahu, R. K., Panda, S., & Padhan, S. (2015). A hybrid firefly algorithm and pattern search technique for automatic generation control of multi area power systems. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 64, 9–23.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2014.07.013>

Saikia, L. C., Mishra, S., Sinha, N., & Nanda, J. (2011). Automatic generation control of a multi area hydrothermal system using reinforced learning neural network controller. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 33(4), 1101–1108.
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2011.01.029>

Singh, S. P., Prakash, T., Singh, V. P., & Babu, M. G. (2017). Analytic hierarchy process based automatic generation control of multi-area interconnected power system using Jaya algorithm. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 60(September 2016), 35–44. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2017.01.008>

