

**T.C.  
BİNGÖL ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**BİYOYENİLENEBİLİR ENERJİ TABANLI MİKRO ŞEBEKENİN YÜK  
FREKANSI KONTROLÜ İÇİN BULANIK PID KONTROLÖR**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Gizem DOĞAN**

**YENİLENEBİLİR ENERJİ SİSTEMLERİ ANA BİLİM DALI**

**TEZ DANIŞMANI  
Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK**

**İKİNCİ TEZ DANIŞMANI  
Doç. Dr. Burak YILDIRIM**

**BİNGÖL-2022**

## ÖNSÖZ

Tez çalışmaları süresince yardımlarını ve bilgi birikimini esirgemeyen, çalışmaların tamamlanabilmesi için gerekli desteği veren değerli hocalarım Dr. Öğr. Üyesi Dursun ÖZTÜRK'e ve Doç. Dr. Burak YILDIRIM'a teşekkür ederim.

Son olarak bende büyük emekleri olan, benim için hiçbir fedakârlıktan kaçınmayan ve dualarını esirgemeyen anne ve babama, tezin hazırlanması sırasında gösterdiği sabır, fedakârlık ve desteklerinden dolayı eşime teşekkürü bir borç bilirim.

**Gizem DOĞAN**

**Bingöl 2022**

# İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ.....	i
İÇİNDEKİLER.....	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ .....	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ .....	vi
TABLolar LİSTESİ .....	vii
ÖZET .....	viii
ABSTRACT .....	ix
1. GİRİŞ .....	1
2. KAYNAK ÖZETLERİ .....	3
2.1. Mikro Şebekelerde Üretim ve Depolama Birimleri .....	9
2.2. Dinamik Enerji Kaynakları .....	9
2.2.1 Çok Küçük Güçlü Hidroelektrik Santraller .....	10
2.2.2. Rüzgâr Türbin Generatörleri .....	13
2.2.3. Volanlar .....	15
2.2.4. Birleşik (Kojenerasyon) Santraller .....	17
2.2.5. İçten Yanmalı Makineler .....	20
2.3. Statik Enerji Kaynakları .....	21
2.3.1. Güneş Enerjisi Sistemleri .....	21
2.3.2. Yakıt Pilleri .....	24
2.3.3. Ultrakapasitörler .....	25
2.3.4. Batarya Sistemleri .....	26
2.3.5. Süper İletken Manyetik Enerji Depolama Sistemleri .....	27
2.3.6. Elektrolizör .....	29
2.4. Yük Frekans Kontrolü .....	30
2.4.1 Birincil Kontrol .....	30
2.4.2. İkincil Kontrol .....	31
2.4.3. Üçüncül Kontrol .....	31

3. MATERYAL VE YÖNTEM .....	32
3.1. Mikro Şebeke Modeli .....	32
3.1.1. PV Ünitesi .....	32
3.1.2. Mikro-hidro türbin jeneratörü (MHTG) Ünitesi .....	33
3.1.3. Biyokütle yakıtlı kombine ısı ve güç (BCHP) ünitesi .....	33
3.1.4. Aqua-elektrolizör ve Yakıt hücresi üniteleri .....	33
3.1.5. Sistem Dinamiği ve Generatör modeli .....	34
3.1.6. Amaç fonksiyon formülasyonu .....	34
3.2. Kontrolör Yapısı .....	35
3.3. Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları .....	38
3.2.1. Lig Şampiyonası Optimizasyon Algoritması (LŞA) .....	39
3.2.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) .....	40
3.3.3. Karınca Koloni Algoritması (KKA) .....	40
4. BULGULAR VE TARTIŞMA .....	41
4.1. Benzetim Sonuçları .....	41
4.1.1. PSO İle Optimize Edilen Klasik PID ve Fuzzy PID Kontrolör .....	41
4.1.2. LŞA ile Optimize Edilen Klasik PID ve Fuzzy PID Kontrolör .....	43
4.1.3. KKA ile Optimize Edilen Klasik PID ve Fuzzy PID Kontrolör .....	46
4.1.4. PSO, LŞA ve KKA için Klasik ve Fuzzy PID Kontrolör Yanıtların Karşılaştırılması .....	48
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....	51
KAYNAKLAR .....	53
ÖZGEÇMİŞ .....	59

## SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

YFK	: Yük Frekansı Kontrolü
TCSC	: Tristör Kontrollü Seri Kompansatör
BESS	: Batarya Enerji Depolama Sistemleri
RFB	: Redox Akışkan Bataryası
HES	: Hidroelektrik Santral
VEDS	: Volan Enerji Depolama Sistemi
PSO	: Parçacık Sürü Optimizasyonu
KKA	: Karınca Koloni Algoritması
LŞA	: Lig Şampiyonası Algoritması
COA	: Guguk Kuşu Optimizasyon Algoritması
GOA	: Çekirge Optimizasyon Algoritması
GWO	: Gri Kurt Optimizasyonu
GA	: Genetik Algoritma
DEA	: Diferansiyel Evrim Algoritması
MVO	: Çoklu-Evre Optimizasyonu
ALO	: Karınca Aslanı Optimizasyonu
SSO	: Salp Sürü Optimizasyonu
SCA	: Sinüs Kosinüs Algoritması
MA	: Mayıs Sineği Algoritması
BFA	: Bakteri Arama Algoritması
HHO	: Harris Şahini Optimizasyonu
GDB	: Regülatör Ölü Bandı
PI	: Orantılı-İntegral
PID	: Orantılı-İntegral-Türev
ITAE	: Zaman Ağırlıklı Mutlak Hatanın Toplamı
ISE	: İntegral Kare Hatası
YEK	: Yenilenebilir Enerji Kaynakları
DEK	: Dağıtılmış Enerji Kaynakları
K	: Kelvin

T	: Mutlak sıcaklık (K)
$\gamma$	: Suyun birim hacim ağırlığı (9,81 kN/m <sup>3</sup> )
Q	: Debi (m <sup>3</sup> /s)
$\eta_H$	: Düşü verimi
P	: Güç (Watt)
$\eta_G$	: Generatör verimi
$\eta_T$	: Türbin verimi
MW	: Mega Watt
PV	: Fotovoltaik
EÜAŞ	: Elektrik Üretim Anonim Şirketi
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı
EIO	: Elektrik ısı oranı

## ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1.	Suyu biriktirme yapılarına göre HES'ler (a) Depolamalı sistem (b) Depolamasız sistem .....	12
Şekil 2.2.	Tipik bir rüzgar enerjisi üretim sistemi .....	14
Şekil 2.3.	Volan enerji depolama sistemi temel yapısı .....	16
Şekil 2.4.	Birleşik santraller (kojenerasyon) sistemi.....	20
Şekil 2.5.	Dizel jeneratör .....	21
Şekil 2.6.	Fotovoltaik hücre yapısı .....	23
Şekil 2.7.	Güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi .....	23
Şekil 2.8.	Yakıt pilinin şematik gösterimi .....	25
Şekil 2.9.	Bir batarya hücresinin yapısı .....	27
Şekil 2.10.	SMES sitemi .....	28
Şekil 3.1.	YFK için önerilen yenilenebilir mikro şebekenin blok diyagramı .....	32
Şekil 3.2.	Fuzzy PID kontrolörünün blok diyagramı.....	36
Şekil 3.3.	Girişe karşı çıkış için yüzey görünümleri.( a) $\Delta K_p$ - b) $\Delta K_I$ - c) $\Delta K_D$ .....	37
Şekil 3.4	Mikro şebeke sistemin YFK şeması.....	38
Şekil 4.1.	PSO Klasik PID için frekansın zamana göre değişimi.....	42
Şekil 4.2.	PSO Klasik PID ve Fuzzy PID için frekansın zamana göre değişimi....	42
Şekil 4.3.	LŞA Klasik PID için frekansın zamana göre değişimi.....	44
Şekil 4.4.	LŞA Klasik PID ve Fuzzy PID için frekansın zamana göre değişimi.....	45
Şekil 4.5.	KKA Klasik PID için frekansın zamana göre değişimi.....	47
Şekil 4.6.	KKA Klasik PID ve Fuzzy PID için frekansın zamana göre değişimi ...	47
Şekil 4.7.	Klasik PID LŞA, KKA ve PSO için frekansın zamana göre değişim ....	49
Şekil 4.8.	Fuzzy PID LŞA, KKA ve PSO için frekansın zamana göre değişimi ....	50

## TABLolar LİSTESİ

Tablo 2.1.	Büyükliklerine göre HES'lerin sınıflandırılması.....	10
Tablo 2.2.	Birleşik santrallerin olası uygulama alanları ve uygun birleşik santral teknolojileri .....	18
Tablo 3.1.	Önerilen mikro şebeke sisteme ait parametre değerleri .....	34
Tablo 3.2.	Fuzzy dilsel kural tabanı ve yüzey görünümü (a) $\Delta K_p$ - b) $\Delta K_I$ - c) $\Delta K_D$ ) ....	37
Tablo 4.1.	PSO için Kontrolör 1 ve Kontrolör 2'ye ait parametre değerleri .....	41
Tablo 4.2.	PSO için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörler ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması .....	43
Tablo 4.3.	LŞA için Kontrolör 1 ve Kontrolör 2 ye ait parametre değerleri .....	44
Tablo 4.4.	LŞA için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörler ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması .....	45
Tablo 4.5.	KKA için Kontrolör 1 ve 2 ye ait parametre değerleri .....	46
Tablo 4.6	KKA için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörler ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması .....	47
Tablo 4.7	Klasik PID için LŞA, KKA ve PSO ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması .....	48
Tablo 4.8	Fuzzy PID için LŞA, KKA ve PSO ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması .....	49



# BİYOYENİLENEBİLİR ENERJİ TABANLI MİKRO ŞEBEKENİN YÜK FREKANSI KONTROLÜ İÇİN BULANIK PID KONTROLÖR

## ÖZET

Günümüzde enerji tüketiminin giderek arttığı, çevre koruma bilincinin geliştiği ve enerji piyasalarındaki serbestleşmenin istikrarlı şekilde ilerlediği görülmektedir. Bu nedenle, yeni teknolojiler yardımı ile yenilenebilir enerji kaynaklarından (YEK) daha fazla yararlanmaya yönelik politikalar üretilmekte ve dağıtılmış üretim sistemlerine olan ilginin artması sağlanmaktadır. Mikro şebekeler, YEK'lerin şebekeye entegrasyonunda önemli avantajlar sağlayan bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Mikro şebekelerin yapılarında bulunan YEK'lerin değişken üretim yapıları gibi bazı belirsizliklere sahip olması, bu sistemlerde frekans kararlılığını önemli problemlerden biri haline getirir. Bir mikro şebeke modeline etkin bir yük frekansı kontrolünün (YFK) sağlanması, bu sistemlerin kararlılığı ile ilgili iyileştirmelere önemli ölçüde katkıda bulunur. Bu tez çalışmasında mikro şebekede, YFK'de karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek için bir fuzzy oransal integral türev (PID - Proportional-Integral-Derivative) kontrolör yapısı önerilmiştir. En uygun kontrol parametre değerlerinin belirlenmesi için lig şampiyonası algoritması (LŞA), karınca koloni algoritması (KKA) ve parçacık sürü optimizasyon (PSO) algoritmaları kullanılmıştır. Aynı zamanda, fuzzy PID kontrolörünün kazançlarının en uygun değerlerinin elde edilmesi için zaman ağırlıklı mutlak hatanın toplamı (ITAE - Integral Time-weighted Absolute Error) maliyet fonksiyonu kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, klasik PID ve fuzzy PID kontrolöre sahip sistemlerin frekans yanıtları karşılaştırıldığında üç farklı optimizasyon algoritması için fuzzy PID kontrolör daha iyi sonuçlar vermiştir. Bu sonuçlar hem frekansın zamana göre değişimleri hem de performans veri değerleriyle gösterilmiştir. Ayrıca çalışma sonuçlarında fuzzy PID kontrolörün parametre değerlerini ayarlamak için en uygun optimizasyon algoritmasının LŞA olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Biyoyenilenebilir enerji, mikro şebeke, yük frekans kontrol, (YFK), Fuzzy PID kontrolör.

# FUZZY PID CONTROLLER FOR LOAD FREQUENCY CONTROL OF BIORENEWABLE ENERGY BASED MICRO GRID

## ABSTRACT

Today, it is seen that energy consumption is increasing, environmental protection awareness is developing and liberalization in energy markets is progressing steadily. Therefore, with the help of new technologies, policies are produced to benefit more from renewable energy resources (RES) and the interest in distributed generation systems is increased. Microgrids have emerged as a solution that provides significant advantages in the integration of RES to the grid. The fact that RES in the structures of microgrids have some uncertainties such as variable generation structures makes frequency stability one of the important problems in these systems. Providing effective load frequency control (LFC) to a microgrid model contributes significantly to improvements in the stability of these systems. In this thesis, a fuzzy proportional integral derivative (PID - Proportional-Integral-Derivative) controller structure is proposed to overcome the difficulties encountered in the microgrid. League championship algorithm (LCA), ant colony algorithm (ACA) and particle swarm optimization (PSO) algorithms were used to determine the most appropriate control parameter values. At the same time, the cost function of the sum of the time-weighted absolute error (ITAE - Integral Time-weighted Absolute Error) is used to obtain the optimal values of the gains of the fuzzy PID controller. According to the results obtained in the study, when the frequency responses of systems with classical PID and fuzzy PID controllers are compared, the fuzzy PID controller gave better results for three different optimization algorithms. These results are shown with both frequency variation over time and performance data values. In addition, in the results of the study, it was determined that the most suitable optimization algorithm for adjusting the parameter values of the fuzzy PID controller was LCA.

**Keyword:** Biorenewable energy, micro grids, load frequency control (LFC), Fuzzy PID Controller.

## 1. GİRİŞ

Son yüzyıldaki hızlı nüfus artışı, ekonomik refah düzeyinin artması ile sanayi ve teknoloji alanındaki ilerlemeler dünyada enerji talebinin de artmasına neden olmuştur. Artan enerji talebine karşılık fosil enerji kaynaklarının yetersiz kaldığı görülmektedir. Bu durum ülkeler arasında siyasi çekişmelere ve hatta savaflara yol açabilmektedir. Ayrıca fosil enerji kaynaklarının çevresel yönden olumsuz etkileri de dikkate alındığında yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelim kaçınılmaz olmaktadır. Günümüzde başta gelişmiş ülkeler olmak üzere devletler yenilenebilir enerji kaynaklarından (YEK) daha çok faydalanmak için yeni teknolojiler ve politikalar geliştirmektedirler. Su, güneş ve rüzgar bugüne kadar en çok kullanılan YEK'ler olmuştur. Bu kaynakların yanında biyokütle enerjisi, jeotermal enerji, yakıt hücreleri gibi diğer yenilenebilir enerji türlerine de yönelim olmuştur. Yakıt hücreleri; çevre dostu olması, verimlerinin yüksek olması ve esnek yapıya sahip olması gibi üstün özelliklerinden dolayı gelecekte en önemli kaynaklardan biri olacağı beklenmektedir.

Günümüz dünyasında elektrik sistemlerinde aşağıdan yukarıya doğru merkezileşmeye gidildiği ve karbon salınımını azaltan teknolojilerin kullanımına yönelimin arttığı görülmektedir (Green, 2016). Bu yönelimin başlıca sebepleri şöyle sıralanabilir;

- Güncelliğini kaybetmiş sistemleri yenileme,
- Elektrik enerjisi maliyetlerini kontrol edebilme,
- Çevresel zararları en aza indirmek için karbondioksit salınımını azaltma,
- Uzaktaki kırsal alanlara elektrik enerjisi ulaştırma ve
- Sistemin dayanıklılığını ve güvenilirliğini artırma.

Mikro şebekeler, yönetim teknolojisi bakımından tek başına kontrol edilebilen ve dağıtılmış üretim kaynaklarıyla güç üretilen elektrik şebekeleridir. Dağıtılmış Enerji Kaynakları (DEK) mikro şebekelerde hem üretim hem de depolama birimleri şeklinde bulunabilirler. DEK'ler ; güneş panelleri, hidrolik türbinler, rüzgâr türbinleri, yakıt pilleri, jeotermal enerji, biokütle, gel-git ve dalga enerjisi ile ısı enerjisi, gaz türbinleri ve kombine çevrim gaz türbinleri gibi üretim birimleridir. Küçük güçlü hidrolik türbinler, yakıt pilleri, güneş panelleri, rüzgar türbinleri ve jeotermal kaynaklardan üretilen enerji miktarının gelecekte

diğer kaynaklara göre daha fazla olması beklenmektedir (Al-Dhaifallah, 2018). Dağıtılmış enerji depolama birimleri ise volanlar, süper iletken manyetik enerji depolama sistemleri, süper kapasitörler ve elektrokimyasal pillerdir (Parmar, 2012).

Mikro şebekeler ana şebekenin bir parçası olup şebekeden bağımsız veya şebeke ile bağlantılı olarak çalışabilir (Kocaman, 2014). Güç elektroniği temelli dönüştürücüler yardımıyla bir ara yüz üzerinden şebekeye bağlanırlar. Bu dönüştürücüler mikro şebekeleri ana şebekeye bağlarken hem bağladığı şebekenin güç kalitesini etkilemekte hem de ilave kontrol düzenlemeleri gerekmektedir (Subramanyan vd. 2014; Baykal ve Beyan, 2004).

Yapmış olduğumuz tez çalışması ile biyoyenilenebilir enerji tabanlı bir mikro şebekede YFK için Fuzzy PID kontrolör kullanılmış ve bu kontrolör parametrelerinin en uygun değerleri LŞA, KKA ve PSO optimizasyon algoritmaları yardımıyla belirlenmiştir. Her ne kadar literatürde farklı güç sistemleri ve mikro şebeke sistemlerde YFK için bu algoritmalar kullanılmışsa da (Bevrani ve ark., 2012; Özdemir ve ark., 2017; Özdemir ve Öztürk, 2017; Yıldırım, 2021) bu çalışma biyoyenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı mikro şebeke sistemlerin YFK için literatürde bir ilk olma özelliğini taşımaktadır. Ayrıca biyoyenilenebilir mikro şebeke sistem için Fuzzy PID kontrolör yapısının kullanımı bu çalışmanın diğer yeniliğidir.

Tez çalışması beş bölümden oluşmaktadır. Birinci bölüm olan giriş kısmında enerjinin önemi, yenilenebilir enerji kaynaklarının enerji ihtiyacını karşılamadaki rolü ile mikro şebekelerin yapısı hakkında kısa bilgiler verilmiştir. İkinci bölümde mikro şebekelerde YFK ile ilgili yapılan çalışmalar hakkında bir literatür özeti sunulmuştur. Üçüncü bölümde önce bu tezin konusu olan bir biyoyenilenebilir mikro şebekenin modeli sunulmuş daha sonra da yine bu tezde kullanılan sezgisel optimizasyon algoritmaları hakkında bilgiler verilmiştir. Dördüncü bölümde modelle ilgili elde edilen benzetim sonuçları tablolar ve grafikler halinde verilmiş ve karşılaştırılmıştır. Beşinci bölümde ise elde edilen sonuçlar yorumlanmış ve ileride bu konuda yapılacak çalışmalar için öneriler sunulmuştur.

## 2. KAYNAK ÖZETLERİ

Angel Xin Yee Mah ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, elektrik ve hidrojen yükleri ile bağımsız bir mikro şebekenin tasarımı ve işletimi için bir optimizasyon çerçevesi sunulmaktadır. İki enerji yönetim stratejisi önerilmiş ve optimizasyon modeli PSO kullanılarak çözülmüştür. Önerilen yöntem arayışı bir vaka çalışması aracılığıyla gösterilmiş ve temel durum senaryosu için seviyelendirilmiş enerji maliyeti 0,4551 USD/kWh ile 0,4572 USD/kWh arasında değişmektedir. Duyarlılık analizi sonuçları, önemli bir maliyet azalmasının sağlanabileceğini göstermiştir (Mah, 2021).

Xueping Li ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, çoklu mikro şebekeli aktif dağıtım sistemini dış güç ve iç güç şebekesi olmak üzere iki kısma ayırmışlar ve Diferansiyel Evrim Algoritması (DEA) uygulayarak en uygun değeri elde etmişlerdir. Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak için, test modeli IEEE 33 düğümlü ve 69 düğümlü dağıtım sistemlerine dayalı olarak oluşturulmuştur. Simülasyon sonuçları, önerilen yöntemin küresel en uygun çözümü elde edebileceğini ve ekonomisinin genel merkezi hesaplama yönteminden daha iyi olabileceğini göstermiştir (Li, 2022).

Jeffrey Marqusee ve arkadaşları, dağıtılmış enerji güvenilirliğinin ve değişkenliğinin bir mikro şebekenin performansı üzerindeki etkisini hesaplamak ve çoklu maliyet tasarrufları ile gelir akışlarını keşfetmek için REopt optimizasyon platformunun yeni bir kullanımını sunmuşlardır. California, Maryland ve New Mexico'daki mikro şebekelerin etkileri incelenmiş ve hibrit mikro şebekelerin dizel sistemlerden daha esnek ve uygun maliyetli bir çözüm olduğu gösterilmiştir. Bir hibrit mikro şebekenin net mevcut maliyetinin, dizel mikro şebekeye göre New Mexico'da %19 ve Maryland'de ise %35 daha düşük olduğu ifade edilmiştir (Marqusee, 2021).

Amar Kumar Barik ve arkadaşı, dağıtılmış üretim ile çevre dostu sürdürülebilir enerji tabanlı hibrit mikro şebekeler için uygun entegre kaynak planlamasının optimal tahsisini değerlendirmiştir. Yenilenebilir kaynakların kesintili olması ve bu mikro şebekelerin düşük ataletinden kaynaklanan sorunlar, uygun talep-tepki desteği (DRS) ve sanal atalet desteği

(VIS) sistemlerinin koordinasyonu ile hafifletilmiştir. Öncelikle, arz ve talep tarafı yönetimi için sırasıyla birleşik depolama tabanlı VIS ve Elektrikli-Araç şarj istasyonu tabanlı DRS birimleri dahil olmak üzere yerel olarak mevcut güneş/rüzgar/biyoenjerji kaynakları ile dağıtılmış eşit olmayan mikro şebekeler planlanmıştır. Planlanan sistem, gerçek zamanlı kaydedilen güneş/rüzgâr verileri dikkate alınarak 12 aylık yükleme ile MATLAB'da modellenmiş ve farklı kaynak ve yük değişim senaryolarında simüle edilmiştir. Öngörülen mikro şebekeler için frekans, gerilim ve bağlantı hattı yüklerinin koordinasyonu farklı kaynak ve aşırı yük senaryolarında araştırılmıştır. Son olarak yanıtlar, farklı mikro şebekelerde DRS ve VIS birimlerinin 22 farklı olası tahsisi için değerlendirilmiştir (Barik, 2021).

Tengpeng Chen ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları ve yük talebindeki belirsizlikler göz önünde bulundurularak, şebekeye bağlı çok enerjili bir mikro şebekede, optimal enerji yönetimi için yeni bir karar verme stratejisi önerilmiştir. Geleneksel optimizasyon yöntemlerine kıyasla önerilen stratejinin mikro şebekenin sağlamlığını arttırdığı ortaya konulmuştur. Ayrıca, mikro şebeke enerji yönetiminin tipik optimizasyon modeli, termal yükün talep yanıtı dikkate alınarak iyileştirilmiştir (Chen, 2022).

Md Mustafa Kamal ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Uttarakhand (Hindistan) eyaleti için güneş, rüzgar türbini, dizel jeneratör ve bataryadan oluşan bağımsız bir mikro şebeke tasarlamışlardır. Önerilen mikro şebekenin fizibilitesi ve tekno-ekonomik analizi yapılmıştır. Mikro şebekenin en ucuz enerji üretme performansı, DEA, PSO ve genetik algoritma (GA) kullanılarak araştırılmıştır. Bileşenlerin boyutlandırılması ve enerji sisteminin çeşitli parametrelerindeki değişikliklerle enerji maliyetinin duyarlılık analizi incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yenilenebilir tabanlı bir enerji sisteminin kırsal nüfusun elektrifikasyonu için daha etkili bir çözüm sağladığını göstermiştir (Md Mustafa Kamal, 2022).

Manzano ve arkadaşları, gerçek talep ve yenilenebilir enerji kaynakları verilerini kullanarak mikro şebekelerin çalışmasını incelemişlerdir. Mikro şebekeyi çalıştırmak için, tahmine dayalı bir strateji aracılığıyla ekonomik performansın artırılmasına izin veren karma bir tam sayılı doğrusal olmayan program önermişlerdir. Önerdikleri yöntemi diğer

yöntemlerle karşılaştırmışlar ve böylece yöntemlerinin daha iyi performansa sahip olduğunu göstermişlerdir. Vaka çalışması, önerilen stratejinin niteliksel yönlerini analiz ederek %10'dan fazla tasarruf sağladığını ortaya koymuştur (J.M. Manzano, 2022).

Gomes ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, depolama teknolojileri tarafından desteklenen özerk bir mikro şebekenin en uygun maliyetli yenilenebilir güç kapasitesi karışımını boyutlandıran yeni bir optimizasyon modeli önermişlerdir. Önerilen algoritma operasyonel, teknik ve arazi kullanımı kısıtlamalarını dikkate almaktadır. Problem doğrusal programlama kullanılarak formüle edilmiş, geçmiş hava durumu, yük talebi ve kurulum fiyatları verileri setleriyle test edilmiştir. Yöntem, Portekiz'in Azor takımadalarındaki bir ada olan Corvo'ya uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yaklaşım sayesinde yenilenebilir tabanlı mikro şebekelerin hem minimum arazi alanı kullanabileceklerini hem de dizel tabanlı bir alternatiften daha düşük bir değer ile optimal konfigürasyona sahip olabileceğini göstermektedir (J. Graça Gomes, 2021).

Mikro şebekelerde yük frekans kontrolüne yönelik yapılan çalışmalardan bazıları aşağıda verilmiştir.

Yaxin Wang ve arkadaşları tarafından sistem frekansını ve gerilim büyüklüğünü nominal değerler civarında tutmak için yeni bir çok amaçlı optimizasyon modeli önerilmiştir. Ayrıca çok amaçlı optimizasyon ile oyun problemleri arasındaki büyük benzerlikler nedeniyle oyun teorisi fikri ve yöntemi çözüme dahil edilmiştir. Gerilim ve frekans kontrolünü içeren tasarım değişkenleri, hiyerarşik kümeleme kullanan oyuncular için iki strateji alanında sınıflandırılmıştır. Son olarak, önerilen kontrolün etkinliği ve rasyonelitesi MATLAB'da doğrulanmıştır (Wang, 2021).

Kshetrimayum Millaner Singh ve arkadaşı yaptıkları çalışmada, bağlantı hattına sahip iki alanlı mikro şebekenin yük frekansı kontrolünü incelemişlerdir. Mikro şebekenin matematiksel modeli; biyodizel motor jeneratörü, batarya enerji depolama sistemi, PV sistem, mini hidroelektrik santral, biyogaz türbini jeneratörü ve çoklu yük pertürbasyonundan oluşmaktadır. Üretim kaynaklarının çoğu YEK'lerden oluşan bu sistemde çoklu yük değişimi, sistem frekansının sapmasına ve talep ile üretim dengesizliğine neden olmaktadır. Sistemin dinamik frekans yanıtını kontrol etmek ve talep

ile üretimi dengelemek için, ISE (integral kare hatası) bir amaç uygunluk fonksiyonu olarak düşünülerek gri kurt optimizasyonu (GWO) algoritması ile PID denetleyicisi kullanılmıştır. Denetleyici verimliliğini ve sağlamlığını doğrulamak için model, guguk kuşu optimizasyon algoritması (COA) ve PI (orantılı integral) denetleyicisi ile de çözülmüştür. Sonuçlar, PI denetleyicisi ve CS algoritmasına kıyasla PID denetleyicisi ve GWO algoritmasının üstünlüğünü ortaya koymaktadır (Singh,2021).

Dalia Yousri ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, yenilenebilir enerji kaynakları ile bağlantılı bir sistemin yük frekans kontrolü için PI denetleyicinin optimal parametrelerini hesaplayan Harris Şahini Optimizasyonu (HHO) önerilmiştir. Optimizasyon işlemi sırasında, ITAE (integral zaman mutlak hatası) amaç fonksiyonu olarak ele alınmıştır. Önerilen optimizasyonu diğer optimizasyon yöntemleri ve geleneksel kontrolörler ile karşılaştırmak için iki farklı birbirine bağlı güç sistemi incelenmiştir. Ele alınan sistemlerden birincisi, birbirine bağlı iki termal ile FV santral alanını içermektedir. İkinci sistemde ise dört PV santrali, rüzgar türbini ve iki termik santral bulunmaktadır. Farklı yük bozulma durumları incelenmiş ve HHO yöntemiyle elde edilen sonuçlar, Sinüs Kosinüs Algoritması (SCA), Çoklu-Evre Optimizasyonu (MVO), Karınca Aslanı Optimizasyonu (ALO) ve GWO ile karşılaştırılmıştır (Yousri, 2020).

Neda Jalali ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, birbirine bağlı çok alanlı güç sistemlerinde YFK için yeni bir bulanık PID denetleyici önerilmiştir. Önerilen algoritma; giriş ve çıkış üyelik fonksiyonlarının ölçekleme faktörlerini, model parametrelerini ve bulanık PID denetleyici kural değerlerinin ağırlıklarını ayarlamaktadır. Alan kontrol hatası, değişken bölümlenmesinin geçici tepkisine göre bulanık kural ağırlık değerleri elde edilmiştir. Ayrıca, yanıtın kalitesini artırmak için, bulanık PID denetleyicilerinin giriş ve çıkış üyelik fonksiyonlarının ölçekleme faktörleri ve model parametreleri Tribe-DE (TDE) algoritması ile optimize edilmiştir. (Jalali, 2020).

Seyyed Mostafa Nosratabadi ve arkadaşları, yeniden yapılandırılmış ortam altında çeşitli termik, hidroelektrik, rüzgar, doğal gaz ve dizel üretim birimlerini içeren güç sisteminin frekans kontrolünü incelemişlerdir. Bu çalışmada, geleneksel denetleyiciye kıyasla daha etkili olan yeni bir tahmine dayalı modifiye edilmiş PID (PFMPID) denetleyicisi önerilmiştir. Önerilen kontrol yönteminin optimizasyonu için uygun bir çözüm olarak



Çekirge Optimizasyon Algoritması (GOA) önerilmiştir. İncelenen sistemin performansını daha da iyileştirmek için enerji depolama birimi olarak Redox Akışkan Bataryalarının (RFB) kullanılması önerilmiştir. Önerilen yöntemin performansı çeşitli bozulmalar altında incelenmiş ve simülasyon sonuçları sunulmuştur (Nosratabadi, 2019).

Prakash Chandra Sahu ve arkadaşları tarafından önerilen iki alanlı mikro şebeke sistemi, birbirine bağlı mikro türbin, dizel motorlu jeneratör ve yakıt hücreleri gibi farklı mikro kaynakları içermektedir. Şebekeye bağlı modda mikro şebeke, şebekenin aktif varlığı nedeniyle daha düşük frekans kontrol sorunu olasılığına sahiptir. Adalı modda ise farklı yenilenebilir enerji kaynaklarının dinamik doğası nedeniyle büyük frekans kontrol sorunuyla karşı karşıya kalmaktadır. Bununla ilgili olarak, farklı belirsizlikler altında hem frekansı hem de bağlantı hattı gücünü nominal değerlerinde korumak için bir tip-II fuzzy PID kontrolörü önerilmiştir. Performans çalışması için, önerilen tip-II fuzzy PID kontrolör performansları, tip-I fuzzy kontrolör, PID ve PI kontrolörler ile karşılaştırılmıştır. Yukarıdaki kontrolörlerin optimal kazanç değerlerini elde etmek için Salp Sürü Optimizasyonu (SSO) algoritması uygulanmış ve performans değerleri PSO ve GA ile karşılaştırılmıştır. Son olarak, önerilen SSO ayarlı tip-II bulanık denetleyicinin, farklı belirsizlik koşulları altında çok alanlı adalı AC mikro şebeke sisteminde yük frekansı kontrolü için üstün performans gösterdiği belirtilmiştir (Sahu, 2018).

Meysam Gheisarnejad, guguk kuşu optimizasyon algoritmasını (COA) uyum arama (HS) algoritmasına dahil ederek (HSCOA), iki pratik yük frekansı kontrol modeli için ikincil bir kontrolör tasarlamak üzere bir hibrit algoritma geliştirmiştir. İlk olarak, iki bölgeyi yeniden ısıtmasız bir termik güç sistemi düşünülmüş ve önerilen ayarlama yöntemi ile PID ve bulanık PI/PID kontrolörlerinin kazançları ayarlanmıştır. Elde edilen sonuçlar literatürde yayınlanmış diğer bazı yaklaşımlar ile karşılaştırılarak HSCOA'nın üstünlüğü gösterilmiştir. Önerilen yöntem aracılığıyla tasarlanan yük frekans kontrolörünün performansı, değişen yükleme koşulları ve dikkate alınan enerji santrali ile ilgili bazı kritik parametreler altında kapsamlı bir şekilde doğrulanmıştır (Gheisarnejad, 2018).

Ankur Rai ve arkadaşı, yaptıkları çalışma ile yenilenebilir enerji kaynaklarına sahip çok alanlı mikro şebekeler için bir YFK tasarımını incelemiştir. Önerilen fuzzy tabanlı eğim-tümleşik-türev (FTID) kontrolör parametreleri, Yelken Balığı Optimizasyonu (SFO)

kullanılarak optimize edilmiştir. Kontrolör kazançları, uygunluk fonksiyonunun (ITAE) en aza indirilmesiyle belirlenmiştir. Yük dalgalanmaları, rüzgar hızı değişimleri ve güneş ışınımı, gerçek dünya verilerine dayanan senaryolara dahil edilmiştir. Son olarak, OPAL-RT kullanılarak, önerilen denetleyicinin mikro şebekelerdeki YFK için uygulanabilirliğini sistemik bir perspektiften doğrulamak amacıyla gerçek zamanlı bir döngü içi donanım simülasyonu gerçekleştirilmiştir. (Rai, 2022).

H. Shayeghi ve arkadaşları tarafından, , tamamen yenilenebilir kaynaklardan oluşan birbirine bağlı bir mikro şebekede, YFK için bir Fuzzy PD-(1+I) kontrolörü tasarlanmıştır. Fuzzy PD-(1+I) kontrolör, doğadan ilham alan bir Mayıs Sineği Algoritması (MA) kullanılarak tasarlanmıştır. Fuzzy PD-(1+I) kontrolör uygulanarak çalışılan iki alanlı adalı mikro şebeke, Fuzzy PID ve PD-(1+I) kademeli kontrolörler ile karşılaştırmalı olarak altı farklı durumda incelenmiştir. Tüm durumlarda sonuçlar, bulanık PD-(1+I) kontrolörünün belirleyici üstünlüğünü ve diğer kontrolörlere göre yüksek uyarlanabilirliğini göstermiştir. (Shayeghi, 2021).

Özdemir ve arkadaşları, ada tipi bir mikro şebekede yük dengesini incelemiştir. Günümüz güç sistemlerinde oluşan dengesizliklerden hemen sonra arz-talep dengesini sağlayabilecek yeteneğe sahip kontrolörlere ihtiyaç duyulmaktadır. Mikro şebekelerin yaygınlaşması nedeniyle bu ihtiyaç günümüzde daha çok artmaktadır. Mikro şebekeleri oluşturan üretim kaynaklarının birçoğu yenilenebilir kaynaklar olduğu için üretim miktarı anlık olarak bile değişkenlik gösterebilmektedir. Yapılan bu çalışmada PID kontrolör kullanılarak AA mikro şebeke sisteminde frekans kontrolü gerçekleştirilmiştir (Özdemir, 2017).

Hale Bakir ve Ahmet Afşin Kulaksız tarafından genetik algoritmalara (GA) ve Bakteri Arama Algoritmasına (BFA) dayalı STATCOM kontrol devresindeki dört PI kontrolörünün kazanç parametrelerinin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Sistem mimarisinin Simulink modelleri, bir rüzgar türbini modeli, bir güneş PV güç sistemi modeli ve bir STATCOM içerir. Bara sonundaki gerilim dalgalanmasının, geleneksel PI denetleyici kullanılarak %8, GA tabanlı PI denetleyici için %10 ve değişken yük altında BFA tabanlı PI denetleyici için %15 oranında azalttığı ortaya konulmuştur. PI

kontrolörlerin GA ve BFA tabanlı optimizasyonu ile elde edilen sonuçlar, geleneksel kontrolörlerinki ile karşılaştırılmıştır (Bakir, 2020).

Özdemir yaptığı çalışmada, üretim santrallerinden uzak yerleşim yerlerinin ya da şehirlerden uzak ücra küçük yerleşim birimlerinin elektrik ihtiyacının karşılanabilmesi için bir mikro şebeke tasarlamış ve bu mikro şebekenin yönetimini sağlamıştır. Geliştirilen model sayesinde yükün talep ettiği enerji, en uygun kaynaklardan karşılanmıştır (Özdemir, 2007).

Yukarıda bazıları verilen literatür çalışmaları mikro şebekeler yardımı ile YEK'lerden enerji üretimi ve tüketiminin her yerde mümkün olabileceğini göstermektedir.

### **2.1. Mikro Şebekelerde Üretim ve Depolama Birimleri**

Enerji yönetimi; enerji arz güvenliği ve verimliliğin sağlanmasını, kaynakların çeşitlendirilmesini, başta iletim ve dağıtım olmak üzere tüm kayıpların azaltılmasını hedefleyen çalışmalar bütünüdür. Mikro şebekelerde bu amaçlar doğrultusunda enerji yönetim stratejileri geliştirilir. Geliştirilen stratejilerle, hem kurulacak olan mikro şebekenin kurulum ve işletme maliyetlerinin minimum seviyede tutulması hem de sistemden beslenen tüketicinin enerji talebinin hızlı ve kesintisiz bir şekilde karşılanabilmesi hedeflenir.

Mikro şebekelerde kullanılan enerji üretim ve depolama kaynakları dinamik ve statik kaynaklar olarak sınıflandırılabilir. Dinamik enerji kaynaklarında dönen bir makine (jeneratör) bulunur ancak statik enerji kaynaklarında bulunmaz.

### **2.2. Dinamik Enerji Kaynakları**

Dönen makineler (jeneratörler) yardımıyla enerji üretimi gerçekleştirilen kaynaklara dinamik enerji kaynakları denir. Bu enerji kaynakları;

- Hidroelektrik santraller
- Rüzgar türbin jeneratörleri
- Dizel jeneratörler

- Volanlar
- Kojenerasyon sistemleridir.

### 2.2.1. Çok Küçük Güçlü Hidroelektrik Santraller

Hidrolik enerji, akmakta olan sudan elde edilen enerji olup önce basınçlı bir türbin içerisinde geçerek mekanik enerjiye ve daha sonra türbine bağlı olan jeneratörde elektrik enerjisine dönüşür. Jeneratörde üretilen enerji miktarı, suyun potansiyel enerjisine bağlı olarak değişir. Su düşüşü, suyun sisteme alındığı ve türbini terk ettiği noktalar arasındaki yükseklik farkı olup suyun potansiyel enerjisini belirler. Elektrik santrali ile türbinin gücü, düşü ve debi ile doğru orantılıdır.

Hidroelektrik santraller(HES)'in sınıflandırılmasında kabul edilmiş uluslararası bir sınıflandırma bulunmamasıyla birlikte, Kuzey Amerika'da önerilen ve Tablo 2.1'de verilen sınıflandırma giderek geniş kabul görmektedir (Özil, 2013).

Tablo 2.1. Büyüklüklerine göre HES'lerin sınıflandırılması

Piko	10 kW'tan az
Mikro	10-100 kW
Mini	100 kW – 1 MW
Küçük (integer)	1 MW – 10 MW
Orta	10 MW – 100 MW
Büyük	100 MW'tan büyük

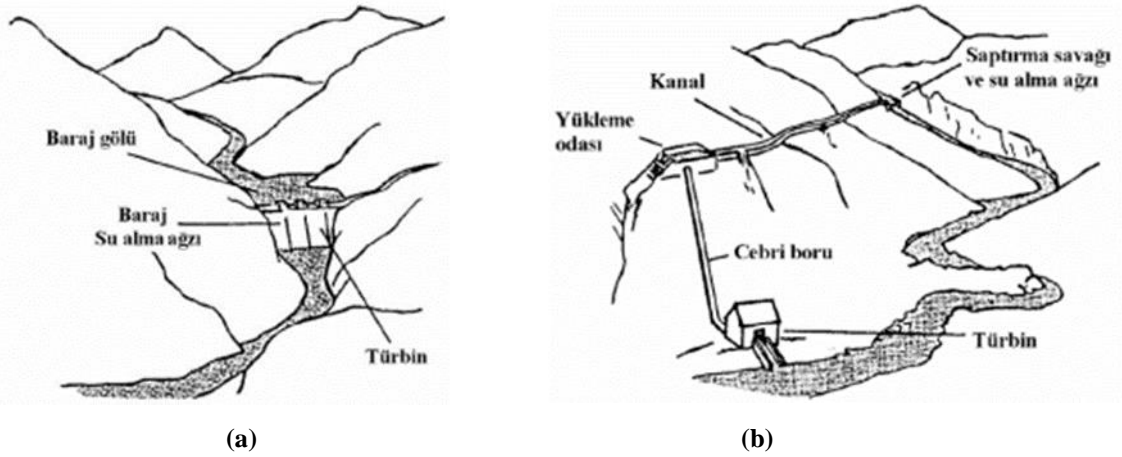
Modern hidrolik türbinlerin başlangıcı olarak 1800'lerin ortasında James Francis tarafından tasarlanan Francis türbini sayılabilir. Francis türbini 1800'lerin sonlarında Lester Pelton'ın tasarladığı Pelton türbini takip etmiştir. Tasarımcısı Victor Kaplan nedeniyle Kaplan türbini olarak adlandırılan ve başlangıçta sabit kanatlı pervane tipi olup daha sonra geliştirilen ayarlanabilir kanatlı pervane tipi türbinler 1900'lerin ilk yıllarına rastlar. Daha sonra diyagonal Deriaz türbini ve günümüzde Straflo türbini olarak bilinen düz akışlı ve çember jeneratörlü Harza türbini devreye girmişlerdir. Borulu, kuyu tipi (pit type) ve bulb (ampül) tipi türbinlerin tasarımı, geliştirilmeleri ve ticari olarak piyasaya sunulmaları ise 1950'lerde gerçekleştirilmiştir.

1880 yılında ABD'nin Grand Rapids kentinde, su türbinlerinden elde edilen güçle elektrik üreten bir dinamo yardımıyla iş yerlerinin aydınlatılması sağlanmıştır. Türkiye'de 1902 yılında Tarsus'ta ilk hidroelektrik üretim gerçekleştirilmiştir. 1913 yılında İstanbul'da ilk büyük ölçekli hidroelektrik santralinin inşasına başlanmıştır ve 1933 yılında Ödemiş'te hidroelektrik enerjiyle beslenen elektrik şebekesi kurulmuştur.

Dünyada 2020 yılı itibariyle toplam hidroelektrik kurulu kapasitesi 1330 GW'a, toplam üretim miktarı ise 4.370 TWh'e ulaşmıştır. Bu rakam Amerika Birleşik Devletlerinin yıllık tüketim değerine eşittir. Türkiye'de ise Elektrik Üretim Anonim Şirketinin (EÜAŞ) 2020 yılı faaliyet raporuna göre hidrolik kurulu güç 30.983 MW olup toplam kurulu gücün %32,29'unu oluşturmaktadır. Üretim miktarı ise 78.095.879 MWh olup toplam üretimin %25,64'üne karşılık gelmektedir (EÜAŞ, 2020).

Hidroelektrik enerji; temiz, güvenilir ve yenilenebilir enerji kaynağıdır. Bu santrallerde üretim aşamasında atık oluşumu ve kirlilik söz konusu değildir. Barajlarda depolanan su sayesinde enerji talebine hızlı bir şekilde cevap verebilir. Bu üstün özelliklerine karşılık bilhassa kurulum maliyetinin yüksek olması ve uzun vadede kurulduğu çevrenin iklimini değiştirebilmesi önde gelen dezavantajlarıdır.

Hidroelektrik santraller farklı açılardan sınıflandırılmaktadır. Suyu biriktirmelerine göre depolamasız ve depolamalı olarak sınıflandırılmaktadırlar (Şekil 2.1). Depolamalı sistemde suyun önü bir baraj gövdesi ile kapatılır. Baraj gövdesi yardımıyla su yağışlı mevsimde tutularak depolanır ve yağışın olmadığı mevsimlerde enerji üretiminde kullanılır. Böylece yılın her mevsiminde üretim gerçekleştirilerek enerji arzının sürekliliği sağlanır. Ancak bu sistemlerin özellikle kurulum maliyetleri oldukça pahalıdır. Ayrıca baraj gölü yağmur suları ve sellerin taşıyacağı kum ve çakıllarla dolacağından bir süre sonra baraj ömrünü tamamlar.



Şekil 2.1 Suyu biriktirme yapılarına göre HES'ler (a) Depolamalı sistem (b) Depolamasız sistem (Hidroelektrik Enerji, 2022).

Depolamasız sistemlerde suyun akışı devam eder. Ancak saptırma savağı ve su alma ağzından kanala alınan bir miktar su bir yüklemeye odasına getirilir. Cebri boru denilen basınçlı borudan geçirilerek türbine verilir. Türbinde suyun enerjisi mekanik enerjiye dönüşür. Türbin miline generatör bağlıdır ve türbinden iletilen mekanik enerji generatörde elektrik enerjisine çevrilir. Mikro ve mini HES'ler genellikle bu şekilde kurulmaktadır. Suyun debisi, yüklemeye odasında yapılan günlük ayarlamalarla kontrol edilir. Aşağıda bir hidroelektrik santralinden elde edilen gücün ( $P$ ) denklemi verilmiştir.

$$P = \gamma \cdot H \cdot Q \cdot \eta \quad (2.1)$$

$\gamma$ : Suyun birim hacim ağırlığı ( $9,81 \text{ kN/m}^3$ ),

$H$ : Düşü (m),

$Q$ : Debi ( $\text{m}^3/\text{s}$ )'dir.

Elde edilen verim ise aşağıda verilmiştir.

$$\eta = \eta_H \cdot \eta_G \cdot \eta_T \quad (2.2)$$

$\eta_H$ : Düşü verimi

$\eta_G$ : Jeneratör verimi

$\eta_T$ : Türbin verimi (Lucas, 2000).

Mikro hidroelektrik santraller güçleri en fazla  $100 \text{ kW}$ 'a kadar çıkabilen küçük ölçekli santraller olup yerleşim alanlarına uzak çiftlik ve evler için enerji sağlanabilir. Bu sistemler

akarsular üzerine inşa edildiklerinden bir baraja gerek yoktur. Böylece baraj inşaatı sırasında ortaya çıkabilecek çevresel sorunlar da önlenmiş olur (Aslan, 2004). Bu santrallerde, su hızının çok düşük olduğu durumlarda bile verimli bir şekilde enerji üreten pelton türbinler kullanılır. Şebekeden bağımsız tasarlanan sistemlerde üretilen fazla enerji akülerde depolanır. Üretimin yapılmadığı durumlarda akülerde depolanan elektrik enerjisi kullanılır. Şebekeye bağlı sistemlerde ise aküye gerek yoktur. Üretilen enerjinin tüketimden fazla olduğu zamanlarda artan enerji ana şebekeye aktarılırken üretimin olmadığı veya yetersiz olduğu zamanlarda ise şebekeden besleme sağlanır.

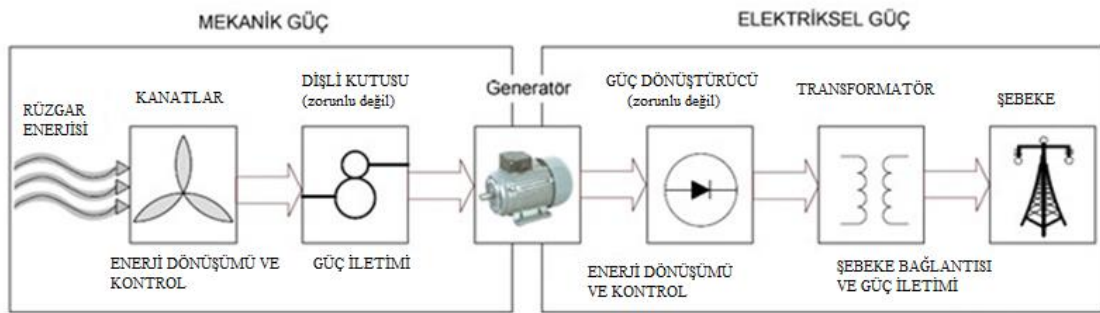
### 2.2.2. Rüzgâr Türbin Generatörleri

Rüzgâr enerjisi, yenilenebilir ve temiz bir enerji türüdür. İnsanlar rüzgâr enerjisinden başlıca iki amaç için faydalanmıştır. Bunlardan birincisi mekanik güç üretimi, ikincisi ise elektrik üretimidir. Mekanik güç üretiminin en bilinen şekli yel değirmenleridir ve yaklaşık 3000 yıllık bir geçmişi vardır. Rüzgâr türbinlerinden elektrik üretimi ise ilk olarak 1890 yılında Danimarka'da gerçekleştirilmiştir. Ticari olarak iki veya üç kanatlı rüzgâr türbinleri 1925'lerden itibaren üretilmeye başlanmıştır. 1970'li yıllarda yaşanan petrol krizi sonrası yenilenebilir enerji kaynaklarına ilgi artmış ve rüzgâr enerjisi teknolojilerine yönelik çalışmalar hız kazanmıştır. Sonraki dönemlerde de ülkeler Kyoto Protokolü çerçevesinde yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretim miktarını arttırma yoluna gitmişler ve böylece yüksek kapasiteli türbinler ve yeni üretim teknolojileri ortaya çıkmıştır. 2020 yılında küresel toplam rüzgâr kurulum gücü 743 GW değerine ulaşmıştır (küresel ruzgar raporu, 2021). Türkiye'nin 2020 yılı sonu kurulu rüzgâr gücü 8,74 GW yıllık üretilen enerji miktarı ise 24.812.088 MWh olup bu değer toplam üretilen enerjinin %8,15'ine karşılık gelmektedir (EÜAŞ, 2020).

Rüzgâr santrallerinin kurulum maliyetleri yüksek işletme maliyetleri ise düşüktür. Günümüzdeki üretim teknolojileri ve inşaat endüstrisindeki ilerlemeler sayesinde türbin yükseklikleri 150 metreyi, bir türbinde elde edilen güç değeri ise 5 MW'ları aşmıştır (Özil, 2013). Tüm bu gelişmeler sayesinde gün geçtikçe hem rüzgâr santrallerine olan ilgi artmakta hem de kurulum maliyetleri azalmaktadır.

Yukarıda bahsedilen üstünlüklerin yanında rüzgâr santrallerinin bazı dezavantajları da bulunmaktadır. Özellikle atmosferik şartların değişkenliğinden dolayı üretilen enerjinin belirsiz olması en önemli dezavantajdır. Ayrıca göç yolu üzerinde olan türbinlerin kanatlarına çarpacak göçmen kuşlarının ölümlerine sebep olması, gürültülü çalışmaları ve radar sistemleri ile televizyon alıcılarını bozucu yönde etkilemesi diğer önemli dezavantajlarıdır.

Rüzgâr türbinleri, hareket halindeki havanın kinetik enerjisini mekanik enerjiye dönüştürerek jeneratöre aktarmaktadır. Jeneratörde ise bu mekanik enerji elektrik enerjisine dönüştürülmektedir. Rüzgâr enerjisinden en verimli bir şekilde faydalanmak için çeşitli türbin tasarımları gerçekleştirilmiştir. Türbinler kanat sayıları ve dönme eksenlerine göre gruplandırılmaktadır. Dönme eksenlerine göre rüzgâr türbinleri yatay eksenli ve dikey eksenli olarak sınıflandırılmaktadır. Yatay eksenli türbinlerde dönme eksenleri yere göre yatay, rüzgârın akışına ise paralel konumdadır. Bunlar yüksek güç katsayısına sahip verimli sistemler olup günümüzde ticari olarak yaygın kullanılmaktadır. Kanat sayısına göre yatay eksenli türbinler tek kanatlı, iki kanatlı, üç kanatlı ve çok kanatlı olarak dört gruba ayrılmaktadır. Ayrıca bu türbinler rüzgârı karşılama yönlerine göre; rüzgâr üstü türbinler ve rüzgâr altı türbinler olarak ikiye ayrılmaktadır. Elektrik üretiminde kullanılan rüzgâr türbinleri genellikle yatay eksenli ve üç kanatlı olarak tasarlanır (enerji.gov.tr, 2021). Şekil 2.2’de tipik bir rüzgar enerjisi üretim sistemi görülmektedir.



Şekil 2.2. Tipik bir rüzgar enerjisi üretim sistemi (Özel, 2016)

Rüzgârdan elde edilen güç değeri Denklem 2.3’e göre hesaplanmaktadır.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3 \quad (2.3)$$



Burada P rüzgâr gücüdür (watt).  $\rho$  havanın yoğunluğu olup 15 °C sıcaklık ve normal basınç altında 1.225 kg/m<sup>3</sup>'tür.  $v$  rüzgar hızı (m/s),  $r$  ise rotor yarıçapıdır (m).

Denklem 2.3 kullanılarak rüzgârın gücü hesaplanabilir. Ancak rüzgârın türbin kanatları üzerinde bıraktığı güç miktarının hesaplanması için türbin öncesi ve sonrasındaki rüzgâr hızlarının dikkate alınması gerekir. Rüzgar türbininde elde edilen güç Denklem 2.4'te gösterilmiştir.

$$P_T = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_p \cdot \pi \cdot r^2 \cdot v^3 \quad (2.4)$$

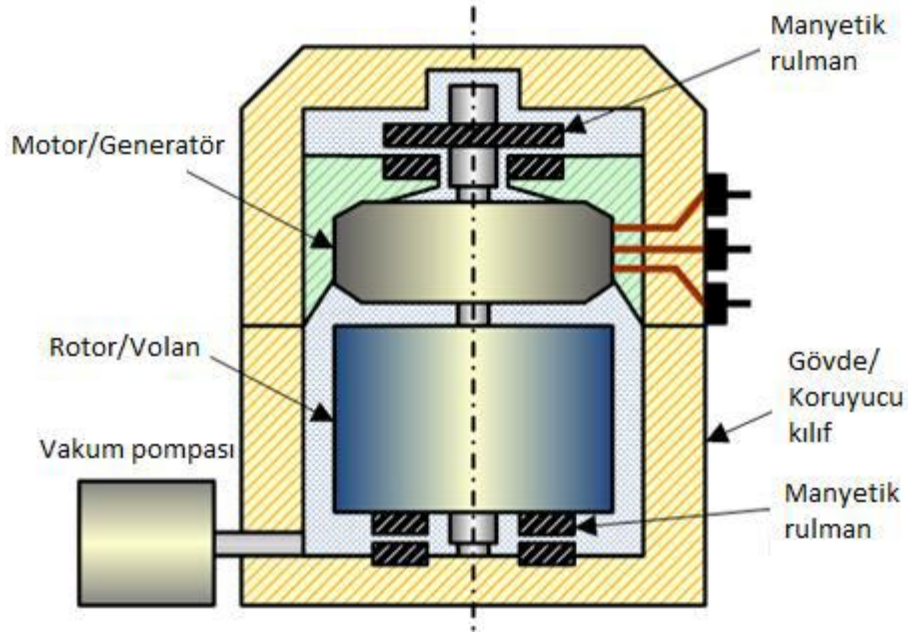
$C_p$ , 0,59 değerine sahip olup rüzgârın kinetik enerjisinin sadece 16/27'sinin yani %59'unun rüzgâr türbininde mekanik enerjiye dönüşebileceğini anlatan Betz Kanunu ile açıklanmaktadır. Sistemin ürettiği enerji miktarı (kWh) ise Denklem(3.5) ile hesaplanır.

$$W = P_T \cdot t \quad (2.5)$$

Burada  $t$  zamanı ifade eder ve birimi saattir.

### 2.2.3. Volanlar

Volan enerji depolama sistemi (VEDS), enerjinin yüksek hızlarda dönen bir kütleyle kinetik olarak depolanması prensibiyle çalışan bir enerji depolama teknolojisidir (Erhan, 2018). Volana enerji depolanırken döner kütle, yani sistemin rotor kısmı devir kazanır. Deşarj sırasında ise döner kütleyle bağlı olduğu generatör çıkış uçlarından elektrik enerjisi alınır (Akhil, 2013). Şekil 2.3'de volan enerji depolama sisteminin temel yapısı verilmektedir.



Şekil 2.3. Volan enerji depolama sistemi temel yapısı (Segundo, 2011)

VEDS'lerin tasarımında iki farklı yapı ortaya çıkmaktadır. İlk tasarımda dönen kısım ağır olup dönüş hızı dakikada 10000 devire kadar çıkabilmektedir. Kütlenin ağırlığı ile doğru orantılı olarak enerji depolanır. Bu tip tasarımlar birden fazla VEDS'in paralel bağlanmasıyla oluşturulan şebeke bazlı santral uygulamalarında kullanılmakta olup gerektiğinde yükü birkaç saat besleyebilirler. İkinci tasarımda ise dönen kısım çok daha hafiftir. Genellikle dayanımı yüksek kompozit malzemeler rotor yapımında kullanılmaktadır. Bu tip VEDS'lerin dakikadaki devir sayıları 10000–100000 arasında değişmektedir. Depolanan enerji rotor hızının karesi ile orantılı olarak artmaktadır. Bu nedenle daha gelişmiş üretim teknolojileri gerektirmektedir. Uzay ve havacılık uygulamalarında, elektrikli araçlarda ve savunma sanayinde kullanılmaktadırlar (Erhan, 2018).

Enerji kaynağı olarak volanların bazı önemli avantajları şöyle sıralanabilir. Yüksek güç yoğunluğuna sahiptirler. Teorik olarak özgül güçleri 5-10 kW/kg civarındadır. Enerji depolama verimleri oldukça yüksektir (%90 üzeri). Çok hızlı şarj olabilirler. Bakım masrafları çok azdır. Oldukça çevrecidirler. Bu avantajların yanında bazı dezavantajları da vardır. Volanlarda sistemin çalışması için ilave donanımlara ihtiyaç duyulmaktadır. Ekstra donanımlar hem araca ek ağırlık getirmekte hem de maliyeti yükseltmektedir. Ayrıca boştaki kayıpları fazla olduğundan uzun süreli depolamalar için kullanılamazlar.

Volanlarda depolanan enerji Denklem (2.6) ve(2.7) ile hesaplanır.

$$E = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (2.6)$$

Burada; I rotorun eylemsizlik momenti,  $\omega$  ise volanın dönme hızıdır. Görüldüğü volanda gibi depolanan enerji, rotorun eylemsizlik momentine ve volanın dönme hızının karesine bağlı olarak değişmektedir. Eylemsizlik momenti Denklem (3.7)'de verilmiştir.

$$I = \frac{r^2 \cdot m \cdot h}{2} \quad (2.7)$$

Burada; r yarıçap, m kütle ve h rotor uzunluğudur. Her iki denklem birlikte değerlendirildiğinde depolanan enerjinin, volan sistem tasarımının yapısına bağlı olduğu ve bu yapı değiştirilerek depolanan enerjinin değiştirilebileceği anlaşılmaktadır. Volanın dönme hızının, kullanılan malzemenin dayanıklılığına bağlı olarak ulaşabileceği bir sınır değeri vardır. Bu hız sınırı, depolama kapasitesini de sınırlandırır.

Volanda birim kütle başına depolanabilecek maksimum enerji ( $E_{max}$ ) miktarı Denklem (3.8) ile hesaplanır;

$$E_{max} = \frac{1}{2} \left( \frac{\sigma_{max}}{\rho} \right) \quad (2.8)$$

Burada;  $\sigma_{max}$  malzemesinin en fazla çekme dayanımı,  $\rho$  ise malzeme yoğunluğunu gösterir. Denklem (3.8)'e bakıldığında  $E_{max}$ 'in büyük değerlere ulaşması, çekme dayanımı yüksek olan düşük yoğunluklu malzemelerin kullanılması ile mümkün olacaktır (Talaq, 1999).

#### 2.2.4. Birleşik (Kojenerasyon) Santraller

Uluslararası Enerji Ajansına (IEA) göre santraller;

- Yalnız elektrik üreten santralleri
- Yalnız ısı üreten santraller,
- Birleşik ısı ve güç üreten santraller

olmak üzere 3 sınıfa ayrılmaktadır. Kojenerasyon santralleri de denilen birleşik santrallerde aynı anda elektrik ve ısı üretimi gerçekleştirilmektedir. Bu santrallerde bir veya daha fazla

üretim birimi olabilir. Eğer iki üretim birimi varsa birinci üretimin çıktısı olan ısı enerjisi ikinci üretimin girdisidir.

Doğalgaz, kömür gibi fosil yakıt kullanılan termik santrallerde, yakıtın yakılması sonucu elde edilen basınçlı karışım ya doğrudan türbine gönderilir veya ortaya çıkan ısı enerjisi yardımıyla buhar elde edilerek üretilen basınçlı buhar türbine püskürtülür. Türbinde elde edilen mekanik enerji türbine bağlı jeneratöre aktararak elektrik enerjisine dönüştürülür. Türbinden çıkan atık enerji ya bacadan veya soğutma kulelerinden dış ortama salınmaktadır. Bu santrallerde verim %35-45 aralığındadır. Dış ortama salınan bu atık enerji birleşik santrallerde buhar veya sıcak su olarak tekrar kullanılabilir. Böylece verim %90'lara kadar çıkabilmektedir. Ayrıca bu sistemlerde egzoz gazları değerlendirildiği için daha çevrecidirler (Özil, 2013).

Birleşik santral uygulamaları Avrupa'da hızla artmaktadır. Danimarka, Hollanda, Finlandiya ve Letonya birleşik santralleri en yaygın şekilde kullanan ülkelerdir. Buralarda birleşik santrallerin toplam ısı ve elektrik üretimindeki oranı %50'ye kadar çıkmaktadır. Avrupa'daki birleşik santrallerde en çok kullanılan yakıt doğalgazdır. İkinci sırada kömür, üçüncü sırada ise yenilenebilir enerji kaynakları gelmektedir. Baltık ülkelerinde kömür ve linyit kullanımı yaygınken yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında Finlandiya öne çıkmaktadır (De Wit, 2011). Türkiye'de en çok kullanılan yakıt doğalgazdır. Birleşik santraller sanayi tesisleri, hastaneler, okullar ile oteller, alışveriş merkezleri gibi ticari işletmelerde yaygın olarak kullanılmakta ve yüksek verimler elde edilmektedir. Ülkemizde ise başta tekstil, kâğıt ve seramik gibi sektörler başta olmak üzere sanayi ve endüstride kullanılır. Birleşik santrallerin uygulama alanlarına göre sınıflandırılması Tablo 2.2'de verilmiştir.

Tablo 2.2. Birleşik santrallerin olası uygulama alanları ve uygun birleşik santral teknolojileri (Özil, 2013)

Uygulama Alanları	Önerilen Birleşik Santral Türü
Büyük Birleşik Santral Uygulamaları (>20 MW)	
Büyük elektrik santralleri	Buhar türbinli veya gaz türbinli birleşik santraller
Sanayi kuruluşları, organize sanayi bölgeleri	Gaz türbinli birleşik santraller
Üniversite kampüsleri	Gaz türbinli birleşik santraller

Bölgesel ısıtma alanları	Gaz türbinli birleşik santraller
Orta Kapasiteli Birleşik Santraller (1-20 MW)	
Hızlı büyüyen sanayi uygulamaları	Gaz türbinli birleşik santraller, içten yanmalı dizel makineli birleşik santral
Üretim ve montaj tesisleri	Gaz türbinli birleşik santraller, içten yanmalı dizel makineli birleşik santral
Kamu ve belediye tesisleri	Gaz türbinli birleşik santraller, içten yanmalı dizel makineli birleşik santral
Askeri tesisler	Gaz türbinli birleşik santraller, içten yanmalı dizel makineli birleşik santral
Alış veriş merkezleri	İçten yanmalı dizel makineli birleşik santral
Bölgesel ısıtma alanları	Gaz türbinli birleşik santraller, içten yanmalı dizel makineli birleşik santral
Küçük Kapasiteli Birleşik Santraller (<1 MW)	
Küçük ticari binalar	İçten yanmalı dizel makineli birleşik santral
Kamu binaları	İçten yanmalı dizel makineli birleşik santral
Apartmanlar	İçten yanmalı dizel makineli birleşik santral
Konutlar	İçten yanmalı dizel makineli birleşik santral

Birleşik santrallerde gaz türbini, gaz motoru ve dizel motoru olmak üzere 3 farklı farklı motor kullanılmaktadır. 1MW ve üstü güçlerde gaz türbinleri, 50-3500 kW güç aralığında gaz motorları, 200-22000 kW güç aralığında ise dizel motorlar kullanılır.

Birleşik santrallerde elde edilen ısı verim ( $\eta$ ) Denklem (2.9)'da verilmiştir.

$$\eta = \frac{W}{Q_H} \quad (2.9)$$

Burada 'W' üretilen gücü, 'Q<sub>H</sub>' ise alınan ısı enerjisini göstermektedir. Bu santrallerde enerjiden yararlanma oranı ( $\epsilon_Y$ ) ise Denklem (3.10)'da verilmiştir.

$$\epsilon_Y = \frac{\text{Üretilen güç} + \text{Proses ısı}}{\text{Girilen toplam ısı}} = \frac{W_{\text{net}} + Q_p}{Q_g} \quad (2.10)$$

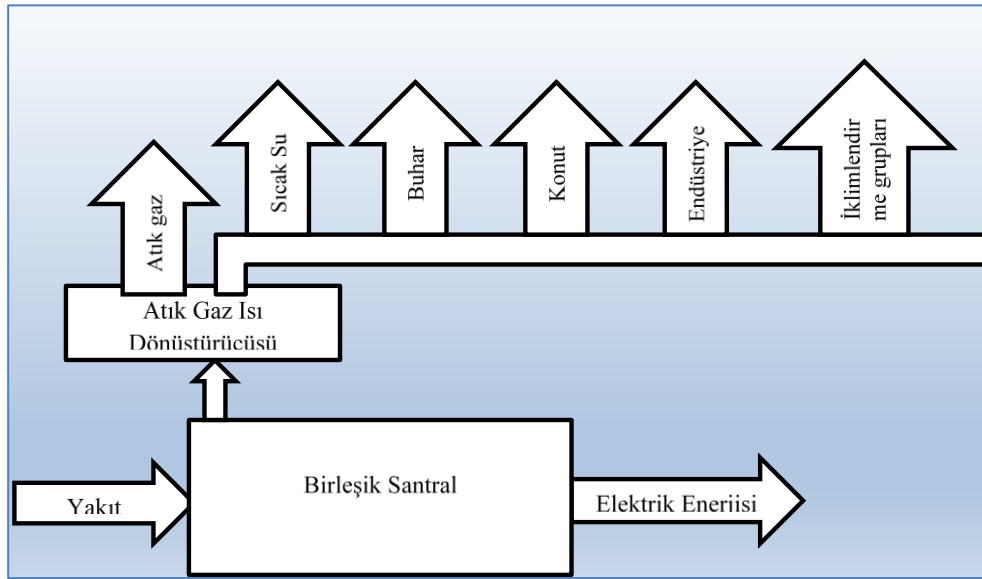
$$\epsilon_Y = 1 - \frac{Q_c}{Q_g} \quad (2.11)$$

Burada  $Q_c$  çıkan yani çevreye salınan ısı,  $Q_g$  ise toplam girilen ısıdır.

Birleşik santrallerde üretilen elektrik enerjisinin faydalanılan ısı enerjisine oranı, elektrik ısı oranı (EIO) olarak tanımlanır ve ısıl verim olarak da ifade edilebilir (Denklem 2.12).

$$EIO = \frac{W}{Q_c} = \frac{\eta}{1-\eta} \quad (2.12)$$

Şekil 2.4’de bir kojenerasyon sistem modeli gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Birleşik santraller (kojenerasyon) sistemi

### 2.2.5. İçten Yanmalı Makineler

İçten yanmalı makineler ile çalışan dalgalı akım jeneratörleri, ABD ve Avrupa’da dağıtık üretim teknolojileri arasında en büyük paya sahiptir. 500W-7MW arasında değişen güçlere sahip olabilen bu sistemlerde verim yaklaşık %40 civarındadır. Benzin, motorin, gazyağı, biyodizel, doğalgaz, LPG, çöplük gazı gibi çok çeşitli yakıtlar ile kullanılabilir.

İçten yanmalı motorlarda kıvılcım ateşlemeli ve sıkıştırma ateşlemeli olmak üzere iki farklı motor türü kullanılmaktadır. Kıvılcım ateşlemeli motorlarda yakıt-hava karışımı dışardan bir kıvılcım ile yanmaya başlarken, sıkıştırma ateşlemeli motorlarda ise sıkıştırma sonrası yüksek basınçla silindire püskürtülen yakıt belirli bir sıcaklığa ulaştığında aniden

patlayarak yanmaya başlar. Birinci tip motorlarda benzin ve doğalgaz gibi yakıtlar kullanılırken ikinci tip motorlarda ise dizel veya fueloil kullanılır. İkinci tip motorlarda yanma sırasında oluşan patlamalar nedeniyle motor gövdesi daha sağlam ve ağır olması gerekirken bu dezavantaja karşılık verimleri daha yüksek ve ucuz olabilmektedir. İçten yanmalı dizel motorların teorik verim üst sınır değeri %75,6'dır. Benzinli makinelerde ise bu oran %40 civarındadır. Aynı gücü üreten bir dizel makinenin maliyeti, benzinli makinenin maliyetinin yarısı kadardır. Benzinli makinelere göre gerek verimin iki kat yüksek olması gerekse de maliyetinin yarısı kadar olması nedeniyle elektrik üretiminde kullanılan içten yanmalı makinelerin hemen hemen tamamı dizel makinelerdir.

Günümüzde 1,5kW-25MW arasındaki güçlerde içten yanmalı dizel makineler üretilmektedir. Bu makinelerin devreye alınması çok kolaydır. Ayrıca bakım onarım maliyetleri de oldukça düşüktür. Şekil 2.5'de bir dizel jeneratör görülmektedir.



Şekil 2.5. Dizel jeneratör ([www.genon.com.tr](http://www.genon.com.tr), 2022)

### 2.3. Statik Enerji Kaynakları

Dönen bir makina olmadan enerji üreten ve depolayan kaynaklara statik enerji kaynakları denir. Başta fotovoltaik sistemler olmak üzere yakıt hücreleri, ultra kapasitörler ve batarya sistemleri statik enerji kaynaklarına örnek gösterilebilir.

#### 2.3.1. Güneş Enerjisi Sistemleri

Güneş, kendi adı ile anılan sistemdeki gezegenlere ve uydularına sürekli enerji sağlayan devasa bir kaynaktır. Kütlesinin %70'i hidrojen, %27'si helyum ve kalan kısmı ise 90 farklı

elementten oluşmaktadır. Çekirdeğindeki çok yüksek sıcaklık ve basınç altında hidrojen atomları birleşerek girerek helyumu oluştururlar. Füzyon denilen bu nükleer reaksiyon sonucu ısı ile ışık üretilir.

Günümüzde güneş enerjisinden iki farklı yöntemle elektrik enerjisi üretilmektedir. Birinci tür sistemlerde güneş enerjisi yardımıyla su buhar haline getirilir. Elde edilen buhar, önce buhar türbinine gönderilerek mekanik enerjiye, sonra da jeneratörde elektrik enerjisine dönüştürülür. Parabolik oluk tipi toplayıcılar, parabolik çanak sistemler ve merkezi alıcılı sistemler bu yöntemle elektrik üreten sistemlerdir. İkinci tür sistem ise güneş enerjisini doğrudan elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaik sistemlerdir. İngilizce photo ve voltaic kelimelerinin kısalması olan PV ülkemizde güneş pili veya hücresi olarak adlandırılmaktadır.

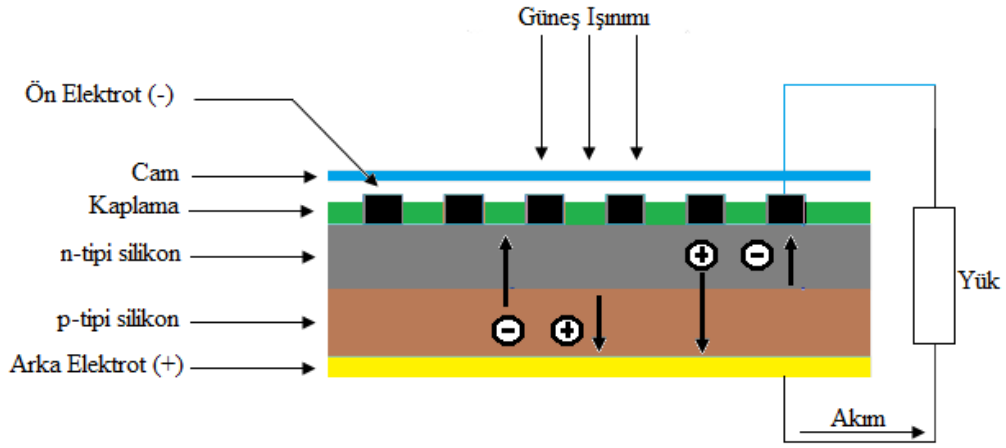
PV etkisi; katı, sıvı ve gazların tümünde belirli miktarda olmakla beraber yeterli akımın akmasını sağlamak için yarıiletken malzemeler kullanılmaktadır. PV etkisini ilk olarak Fransız fizikçi Alexandre Edmond Becquerel 1839 yılında gözlemlemiştir. Becquerel'in bir öğrencisi olan Willoughby Smith 1873 yılında selenyum ile platin arasındaki bir bağıntının ışık altında PV etkisi gösterdiğini belirlemiştir. 1918 yılında Polonyalı Jan Czochralski tarafından ilk monokristalize güneş pili üretilmiştir. 1932 yılında Schottky, Lange ve Grondahl tarafından günümüzde kullanılan verimli kadmiyum ve selenyum bileşikleri, 1954 yılında ise kullanılabilir güç üreten p-n eklemli silisyum güneş pili üretilmiştir. 1982 yılında Arco Solar Inc. tarafınan Kaliforniya eyaletinde 1 MW gücünde ilk güneş pili santrali kurulmuştur. Güneş enerjisinden daha fazla elektrik üretmek için başta pil veriminin artırılması olmak üzere birçok alanda çalışmalar devam etmektedir.

Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı 2021 yılı verilerine göre, 2021'de dünyada PV kurulu güç kapasitesi 843 GW'a ulaşmıştır. Yine aynı ajans 2019 yılında dünyada PV elektrik üretiminin 678.999 GWh olduğunu açıklamıştır. Türkiye'nin 2012 yılında 12 MW olan kurulu gücü 2021 yılında 7.816 MW'a yükselirken 2012 yılında 17 GWh olan üretim miktarı ise 2019 yılı sonu itibariyle 9.250 GWh'e ulaşmıştır ([www.irena.org/solar](http://www.irena.org/solar), 2022).

Fotovoltaik hücre yapısı Şekil 2.6'da verilmiştir. Yarıiletkenler, bir yasak enerji aralığı ile iki enerji bandına (valans bandı ve iletkenlik bandı) ayrılmıştır. Yarıiletken tarafından

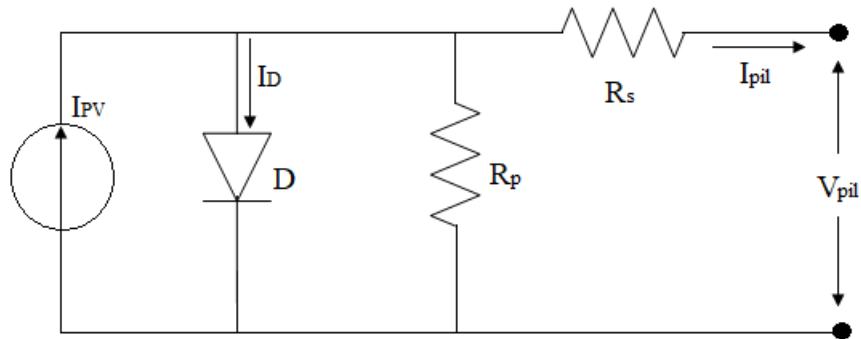


yasak enerji aralığına eşit veya daha büyük enerjiye sahip bir foton soğurulursa, valans bandındaki bir elektron fotondaki bu enerjiyi alarak iletim bandına geçer. Bunun sonucunda elektron-boşluk çifti meydana gelir. PN eklem güneş pilinin ara yüzeyinde oluşan elektron boşluk çiftleri elektrik alan yardımıyla birbirlerinden ayrılırlar. Yani elektronlar n bölgesine, boşluklar da p bölgesine gönderilir. Böylece güneş pilinin uçlarında bir güç çıkışı elde edilir. Yeni bir fotonun soğurulmasıyla süreç kendini tekrarlar.



Şekil 2.6. Fotovoltaik hücre yapısı

Bir PV'nin eşdeğer elektrik devresi Şekil 2.7'de, matematiksel ifadesi ise Denklem (2.13)'te verilmiştir. Eşdeğer devrede akım kaynağı ile gösterilen PV'nin üzerine gelen güneş ışığı miktarı arttıkça, akan akım da artacaktır. Eşdeğer devrede gösterilen diyot, PV sistemin gövdesini sembolize etmektedir. Sistemdeki kayıpları ise direnç göstermektedir.



Şekil 2.7. Güneş pilinin elektriksel eşdeğer devresi

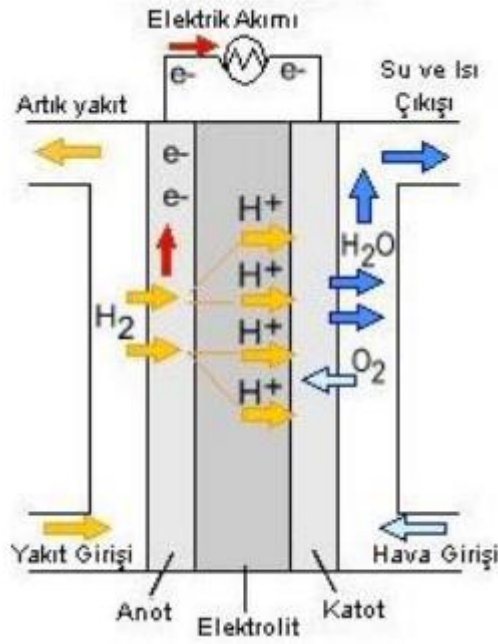
$$I_{pil} = I_{PV} - I_0 \left[ \exp \left( \frac{e}{k \cdot T_{pil}} (V_{pil} + R_s \cdot I_{pil}) \right) - 1 \right] \quad (2.13)$$

### 2.3.2. Yakıt Pilleri

İlk yakıt pilinin 1839'da İngiliz fizikçi William Robert Grove tarafından yapıldığı bilinmekle beraber 1952 yılında NASA'nın uzay çalışmalarında enerji üretici olarak seçmesiyle günlük hayatımıza girmesi hızlanmıştır. Uzay uygulamalarından sonra başta ABD ve Japonya gibi ülkelerin öncülük ettiği otomotiv sanayisindeki uygulamalar takip etmiştir. En son olarak da elektrik üretim sistemleri gerçekleştirilmiştir.

Yakıt pillerinin temel prensibi, bir yakıttaki kimyasal enerjinin doğrudan elektrik enerjisine dönüştürülmesidir. Konvansiyonel sistemlerde yakıtın enerjisinden önce ısı sonra elektrik elde edilirken, yakıt pillerinde doğrudan elektrik enerjisi elde edilmektedir. Bu doğrudan dönüşüm sayesinde yakıt pillerinin verimi konvansiyonel sistemlerin yaklaşık iki katıdır. Yüksek verim dışında modüler yapıya sahip olması, minimum düzeyde kükürt oksit ve azot oksit salınımı yapması, sessiz olması, farklı yakıt türleriyle üretim yapabilmesi gibi başka üstünlüklere de sahiptir. En büyük dezavantajları ise ilk yatırım maliyetinin yüksek olması, ömürlerinin belirsiz olması ve güvenirliliğidir.

Yakıt pilinin şematik gösterimi Şekil 2.8'de verilmiştir. Görünüşünün aksine tasarımı oldukça karmaşık olan yakıt pillerinin yapısı da türlerine göre değişiklik gösterir. Ancak esas olarak dört temel elemanı vardır ve bunlar modül, yakıt işlemcisi, elektrik akımı dönüştürücüsü ve düzenleyicisi ile ısı geri kazanım sistemidir.



Şekil 2.8. Yakıt pilinin şematik gösterimi (Kahraman, 2015)

Yakıt pili, elektroliz işleminin tam tersi olarak hidrojeni yakıt olarak kullanır ve elektron, proton, ısı enerjisi ile su üretir. Anot ve katotta gerçekleşen reaksiyonlar sırasıyla Denklem (2.14) ve (2.15)'te, gerilim denklemi ise (2.16)'te verilmiştir.



$$V_{\text{cell}} = E - V_{\text{act}} - V_{\text{ohm}} - V_{\text{conc}} \quad (2.16)$$

Burada  $V_{\text{cell}}$  yakıt pilinin gerilimini,  $E$  yüksüz gerilimi,  $V_{\text{act}}$  gerilim düşümünü (aktivasyon gerilimi),  $V_{\text{ohm}}$  ise omik gerilimi göstermektedir.

### 2.3.3. Ultrakapasitörler

Süperkapasitör olarak da adlandırılan ultrakapasitörler, elektrik enerjisinin elektrostatik formda depolayan yüksek kapasite değerine sahip kondansatörlerdir. Doğrudan elektrik enerjisini depolayabilme özelliklerinden dolayı çok hızlı şarj veya deşarj olabilirler.

Becker tarafından 1957 yılında geliştirilen elektro-kimyasal kapasitörler, ultrakapasitörlerin de başlangıcı olarak kabul edilmektedir. 1982 yılında askeri uygulamalarda kullanılmaya başlanan ultrakapasitörler günümüzde başta elektrikli taşıt sistemleri olmak üzere birçok sistemde kullanılmaktadır.

Normal kapasitörlere göre çok daha yüksek güç yoğunluğuna (10-20 kW/kg) sahip ultrakapasitörler, güç sistemine kısa zamanda yüzlerce amper akım verebilme özelliğine sahiptirler. Bu yeteneği sayesinde şebekenin güç kalitesini iyileştirmede önemli katkı sağlayabilmektedir. Özellikle güç sistemlerinde meydana gelen geçici durumlarda önemli görevler üstlenmektedir.

Ultrakapasitörlerin öne çıkan diğer üstünlüklerini şöyle sıralayabiliriz;

- Çalışma esnasında meydana gelen sıcaklık değişimlerinden neredeyse hiç etkilenmezler.
- Uzun işletim ömrüne sahiptirler.
- Yüklerdeki değişimlere hızlı cevap verebilirler.

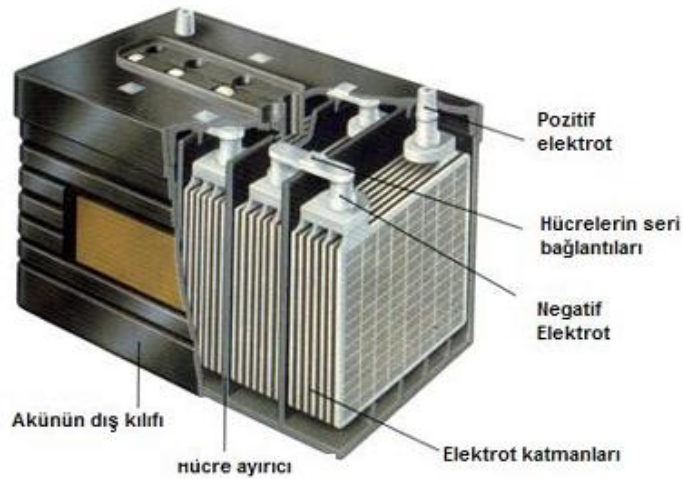
Ancak ultrakapasitörlerin enerji yoğunlukları güç yoğunluklarının aksine çok düşüktür. Mesela 3000 F değerinde bir ultrakapasitör, 1.2 V-2400 mAh değerine sahip bir kalem pil kadar enerji depolayabilmektedir. Boyut olarak karşılaştırıldığında ise 3000 F'lık ultrakapasitörün boyutu aynı enerjiyi depolayan kalem pilin yaklaşık on katıdır (Taşdemirci, 2021). Ultrakapasitörlerde depolanan veya çekilen enerji, ultrakapasitörün kapasitans değerine ve uç gerilimine bağlıdır (Denklem (2.17)).

$$E_{uk} = \frac{1}{2} \cdot c \cdot (V_0^2 - V_s^2) \quad (2.17)$$

#### 2.3.4. Batarya Sistemleri

Piller, elektrik enerjisini kimyasal enerji türünden depolar ve gerektiğinde tekrar elektrik enerjisine çevirirler. Birden çok pilin birbirine seri veya paralel bağlanmasıyla da bataryalar oluşur. En eski depolama teknolojilerinden biri olan batarya sistemleri şarj edilebilen ve edilemeyen olarak ikiye ayrılır. Batarya hücresi, biri anot ucuna diğeri ise katot ucuna bağlanana iki farklı kimyasaldan oluşur. Devredeyken anottan katoda doğru yük

üzerinden elektron akışı olur. Şarj durumunda ise tersi bir akış söz konusudur. Günümüzde yaygın olarak kullanılan batarya türü kuşun asit bataryalardır. Diğer batarya türleri ise Nikel Kadmiyum (NiCd), Nikel metal hidrat (NiMH), Sodyum sülfür (NaS), Sodyum nikel klorit (NaNiCl<sub>2</sub>) ve Lityum İyon (Li-ion) bataryalardır. Akışkan bataryalar olarak isimlendirilen yeni nesil bataryalar ise yüksek enerji potansiyellerine sahiptirler. En yaygın türü demir vanadyum bataryalarıdır. Şekil 2.9'da bir batarya hücresinin yapısı verilmiştir.



Şekil 2.9. Bir batarya hücresinin yapısı (Özel, 2016)

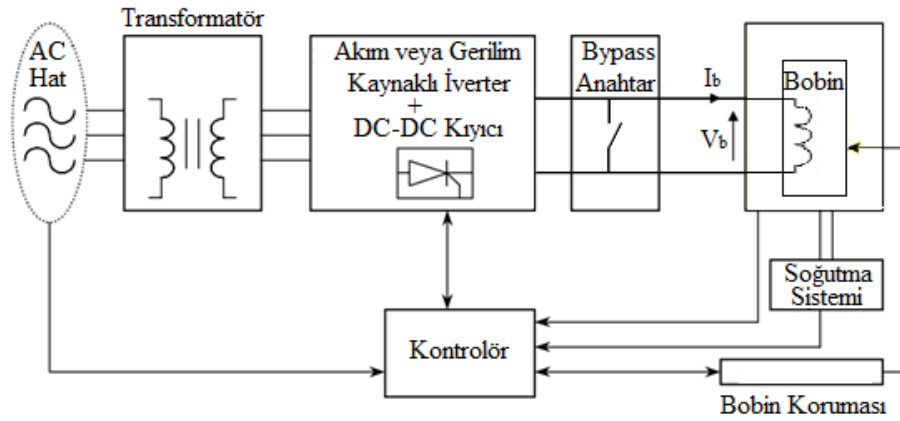
PV sistemlerde elde edilen elektrik enerjisinin depolanması için NiCd tip bataryalar kullanılmakla beraber yaygın olarak derin deşarjlı kurşun asit batarya türleri (VRLA, AGM, Jel) kullanılmaktadır. Hem düşük sürekli akımla derin deşarja cevap verebildiği için hem de yatay olarak kullanılabilen jel aküler- bu alanda tercih edilmektedir (Mazman, 2019). Çalışma sıcaklığı, deşarj derinliği, enerji yoğunluğu ve şarj- deşarj çevrim sayısı bataryanın verimliliğini belirleyen en önemli faktörlerdir (Kundur, 1993).

### 2.3.5. Süper İletken Manyetik Enerji Depolama Sistemleri

Süper İletken Manyetik Enerji Depolama Sistemleri (Super Conducting Magnetic Energy Storage, SMES) günümüzde en önemli enerji depolama yöntemlerinden biridir. Süper iletken kavramı, direnci sıfır (idealde) veya sıfıra yakın olan malzemeler için kullanılmaktadır. Çok düşük sıcaklıklarda bazı malzemelerin dirençleri azalarak süper

iletken olmaktadır. Sıvı helyum içerisinde yerleştirilmiş süper iletken bobinlerde akım akıtılarak bir manyetik alan oluşturulur ve enerji oluşan bu manyetik alanda depolanır.

Şekil 2.10'da bir SMES sistemi görülmektedir. Sistemin merkezi helyum sıvısı içerisinde yerleştirilmiş süper iletken bobindir. Kriyojenik sistemin görevi sıcaklık değerini süper iletken için kritik değerin altında tutmaktır. Bir konvertör yardımıyla DC/AC dönüşüm sağlanır. Çıkış gerilimi bir transformatör yardımıyla istenilen değere ayarlanarak iletim hatlarına verilir (Arsoy, 2000).



Şekil 2.10. SMES sistemi (Arsoy, 2000)

SMES'lerin başlıca avantajları şunlardır;

- Verimleri oldukça yüksektir (%90-95)
- Uzun ömürlüdürler.
- Taleplere çok hızlı cevap verebilirler (20-30 ms)
- Şebekelerde puant yüklerin karşılanması, frekans kontrolü, sistem kararlılığı ve yük akış kontrolü amacıyla kullanılabilirler.
- Aktif ve reaktif güçler bağımsız olarak kullanılabilir.

Sistemde depolanan enerji miktarı ve güç değeri sırasıyla Denklem 2.18 ve 2.19'de verilen eşitlikler yardımıyla hesaplanabilir.

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2 \quad (2.18)$$

$$P = \frac{dE}{dt} = L \cdot I \cdot \frac{dI}{dt} = V \cdot I \quad (2.19)$$

### 2.3.6. Elektrolizör

Faraday'ın 1800'lü yıllarda suyun ayrışmasını gerçekleştirmesiyle beraber elektroliz olayı bilinmekte olup günümüze kadar üzerinde çalışmalar yapılagelmiştir. Günümüzde verimleri %80'lere varan ve kompakt yapıya sahip elektrolizörler, son yıllarda ticarileşmişlerdir. Elektrolizörlerin gelecekte maliyetlerinin azalmasıyla beraber çok daha önemli hale geleceği tahmin edilmektedir (Yılancı, 2008).

Elektrolizörler, kullanılan elektrolitin katı veya sıvı olmasına göre sınıflandırılırlar. Katı elektrolit, PEM (Proton Geçirgen Membran Proton Exchange Membrane) elektrolizöründe kullanılırken sıvı elektrolit ise yaygın olarak alkali elektrolizörlerde kullanılmaktadır. Üçüncü bir elektroliz türü ise katı-oksit elektrolizlerdir ancak henüz ticarileşme aşamasına gelmemiştir (Genç, 2018).

Alkali elektrolizörler; günümüzde yaygın olarak kullanılmakla beraber düşük verimli olmaları, üretilen hidrojen ve oksijen gazlarının tamamen saf olmaması ve çalışma sırasında elektrotlarda korozyon oluşumu gibi dezavantajları bulundurmaktadır (Becerikli, 2011).

PEM elektrolizör; yüksek basınç altında ve saflık derecesi yüksek hidrojen üretebilmesi, kompakt yapıda olması gibi üstün performansları nedeniyle daha yaygındırlar. Elektrolizöre güç kaynağı üzerinden elektrik verilerek suyun hidrojen ile oksijene ayrışması gerçekleştirilir. Hidrojen, yakıt pilinde hava ile birleştirilerek elektrik enerjisi üretilir. PEM'lerde suyun ayrışması sonucu anotta hidrojen iyonu, oksijen gazı ve elektronlar oluşmaktadır. Oluşan elektronlar güç kaynağından çekilir. Hidrojen iyonları ise polimerik membran üzerinde katoda geçmektedir. Güç kaynağından gelen elektronlarla bu hidrojen iyonları katotta birleşerek hidrojen gazı oluşturmaktadır. Böylece anotta oksijen gazı katotta ise hidrojen gazı oluşmaktadır (Özel, 2016).

## 2.4. Yük Frekans Kontrolü (YFK)

Güç sistemlerinin çalışmasını ve kontrolünü sağlamak amacıyla YFK gerçekleştirilmektedir. Tüketicilere sürekli kaliteli ve güvenilir elektrik enerjisi sağlanması bakımından YFK çok önemlidir.

Güç sistemlerinde tüketici taleplerinde ani değişimler meydana gelmesi durumunda; sistem frekansının nominal değerinden sapması ve en nihayetinde sistemin kararsızlığa gitmesi gibi istenmeyen sonuçlar ortaya çıkabilir.

Sistemdeki eşzaman jeneratörlerin güç çıkışları ile anlık yük değişimleri arasında bir fark oluşması durumunda, saymaca frekansın değiştiği görülmektedir. Yani üretilen güç miktarı ile talep edilen miktar arasında bir denge kurulamazsa frekans artmakta veya azalmaktadır. Üretilen olan güç miktarı talep edilenden büyük olursa jeneratörlerin çalışma hızı artacak ve sonuç olarak frekans yükselecektir. Tersisi durumunda yani sistemde talep edilen güç miktarının üretim değerinden büyük olması durumunda ise frekans azalacaktır.

YFK, kontrol işlemlerini gerçekleştirmek üzere birincil, ikincil ve üçüncül kontrol çevrimleri olmak üzere üç farklı kontrol çevrimi içerir (Kueck, 2006).

### 2.4.1. Birincil Kontrol

Birincil kontrolün amacı, bağlısımlı güç sisteminde üretilen aktif güç ile tüketilen aktif gücü dengelemektir. Birincil kontrol ünitesi, sistemin aktif güç dengesi bozulduğunda saptmaya başlayan sistem frekansını olabildiğince en kısa sürede durduracak ve belli bir değerde sabit tutmak için hız guvernörünün düşüm karakteristiği oranında üretim ünitesi rezerv kapasitesini sisteme aktaracaktır. Birincil kontrolün sonunda, sistemdeki aktif güç dengesi yeniden sağlanır fakat frekans saymaca değerine döndürülemez. Birincil kontrol sonunda, frekansı yeniden anma değerine getirecek ikincil kontrol mekanizmasına gereksinim vardır (Kueck, 2006) (Hingorani , 1999).



### 2.4.2. İkincil Kontrol

Birincil kontrolün sonunda frekansta meydana gelen sürekli durum hatasını minimize eder. İkincil kontrol, enterkonnekte sistemde SCADA sistemi üzerinden merkezi olarak işletilmekte ve aşağıda belirtilen görevleri yerine getirmektedir;

- Kontrol alanları arasında yapılan güç alışverişini istenen değerlerde tutmak.
- Sistem frekansında sapmalar meydana geldiği zaman, frekansı tekrar saymaca değerine getirmek.
- Birincil kontrol rezerv kapasitesini tekrar kullanıma hazır hale getirmek (Kueck, 2006)(Hingorani , 1999).

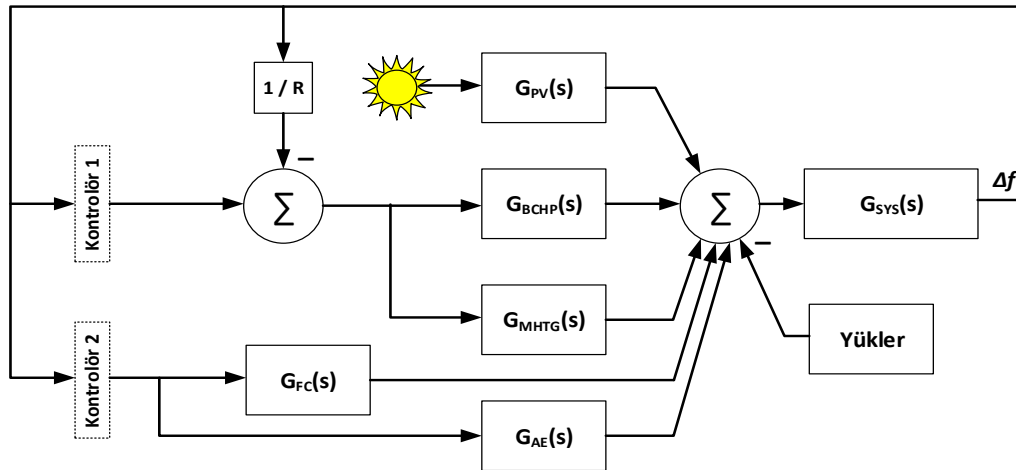
### 2.4.3. Üçüncül Kontrol

İkincil kontrolün sonuca ulaşamadığı durumlarda sözlü talimat ile gerçekleştirilen önlemleri içerir. Üretim sürecinin ekonomik veya sistem güvenliği açısından yeniden programlanması amacıyla gerçekleştirilir. Ayrıca yeterli ikincil kontrol rezerv gücünün sağlanması da hedeflenmektedir. Enterkonnekte sistem üzerinde ikincil kontrol ile aynı etkiyi gösterir ve süresi yeniden programlamanın süresine bağlı olarak değişir (Hingorani, 1999).

### 3. MATERYAL VE YÖNTEM

#### 3.1. Mikro Şebeke Modeli

Bu çalışmada kullanılan çok birimli izole biyo-yenilenebilir mikro şebeke modeli, yenilenebilir kaynakların optimum kullanımı ile ekolojik yönler ve ekonomik operasyon göz önünde bulundurularak oluşturulmuştur. Bu mikro şebeke sistemi Mikro-hidro türbin jeneratörü (Micro-hydro turbine generator - MHTG) ünitesine, Biyokütle yakıtlı kombine ısı ve güç (Biomass fired combined heat and power - B CHP) ünitesine, Aqua-elektrolizör ( Aqua-electrolyser - AE ) ünitesine, Yakıt hücresi (Fuel cell - FC) ünitesine, Fotovoltaik (Photovoltaic - PV) ünitesine ve yüklere sahiptir. Optimal yük frekans kontrol (YFK) için mikro şebekenin doğrusallaştırılmış modeli Şekil 3.1'de görülmektedir. Her birimin matematiksel modellemesi ayrıca bu bölümde ayrı ayrı kısaca açıklanmıştır (Barik, 2018).



Şekil 3.1. YFK için önerilen yenilenebilir mikro şebekenin blok diyagramı

##### 3.1.1. PV Ünitesi

PV ünitesi, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren PV paneli dizilerinden oluşmaktadır. PV ünitesinin düşük frekans alan analizi için doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonuna ait denklem aşağıda verilmiştir.

$$G_{PV}(s) = \frac{1}{1+sT_{PV}} \quad (3.1)$$

### 3.1.2. Mikro-Hidro Türbin Generatör (MHTG) Ünitesi

Atık su bazlı MHTG ünitesinin doğrusallaştırılmış transfer fonksiyon modeli, hız regülatörü, cebri boru ve hidro türbin fonksiyonları göz önünde bulundurularak geleneksel düşük düşü hidroelektrik üretim sistemine referansla aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

$$G_{MHTG}(s) = \left( \frac{1}{1+sT_{HG}} \right) \left( \frac{1+sT_{RS}}{1+sT_{RH}} \right) \left( \frac{1-sT_{HT}}{1+0.5sT_{HT}} \right) \quad (3.2)$$

### 3.1.3. Biyokütle Yakıtlı Kombine Isı ve Güç (BCHP) Ünitesi

Katı atık bazlı BCHP ünitesinin doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonu modeli, hız regülatörü, yeniden ısıtıcı ve buhar türbini fonksiyonları göz önünde bulundurularak geleneksel fosil yakıtlı termik üretim sistemine referansla aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

$$G_{BCHP}(s) = \left( \frac{1}{1+sT_{BSG}} \right) \left( \frac{1+sK_{BR}T_{BR}}{1+sT_{BR}} \right) \left( \frac{1}{1+0.5sT_{BCT}} \right) \quad (3.3)$$

### 3.1.4. Aqua-Elektrolizör ve Yakıt Hücresi Üniteleri

AE ünitesi, Hidrojen (H<sub>2</sub>) gazları üretmek için yoğun olmayan saatlerde mikro şebekenin fazla gücünü çeker. Bu H<sub>2</sub> gazları, yoğun saatlerde güç üretmek için FC ünitesinde yakıt olarak kullanılmak üzere depolanır. AE ve FC birimlerinin doğrusallaştırılmış transfer fonksiyonu modelleri aşağıdaki gibi formüle edilebilir.

$$G_{AE}(s) = \frac{1}{1+sT_{AE}} \quad (3.4)$$

$$G_{FC}(s) = \frac{1}{1+sT_{FC}} \quad (3.5)$$

### 3.1.5. Sistem Dinamiği ve Generatör Modeli

Önerilen biyo-yenilenebilir mikro şebeke sistem için herhangi bir anda güçteki net değişim, denklem (3.6) daki gibi ifade edilebilir;

$$\Delta P_e = P_{PV} + P_{MHTG} + P_{BCHP} + P_{FC} - P_{AE} - P_L \quad (3.6)$$

Burada, karşılık gelen alt simge, ilgili birimler için gücü tanımlar ve mikro şebekenin genel sistemi için eşdeğer jeneratör dinamiği modeli denklem (3.7) ile formüle edilebilir.

$$\frac{\Delta f}{\Delta P} = \frac{1}{D+sM} = G_{SYS}(s) \quad (3.7)$$

### 3.1.6. Amaç Fonksiyon Formülasyonu

Güç sistemleri incelendiğinde bunların analiz ve tasarımı içerisinde kontrolörün performansını belirleyen indeksler kullanılmaktadır. Burada özellikle sistem değişkenlerinin farklı kombinasyonlarının kullanılmasıyla birçok performans indeksi oluşturulabilmektedir. Bunların içerisinde en yaygın olarak kullanılanları ise ISE, IAE, ITSE ve ITAE indeksleridir (Kılıç, 2019). ITAE'ye ait hesaplama formülü Denklem 3.8'de verilmiştir.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (3.8)$$

Önerilen sistem iki kontrolörden oluşmaktadır; Kontrolör1, MHTG ve BCHP birimlerinin güç çıkışını kontrol ederken, Kontrolör2, AE ve FC birimlerinin işlevini kontrol eder. Amaç fonksiyonu, önerilen sistem için PID kontrolör parametrelerini ayarlamak için ITAE kriteri dikkate alınarak olarak formüle edilmiştir. Önerilen mikro şebeke sisteme ait parametre değerleri Tablo 3.1'de verilmiştir.

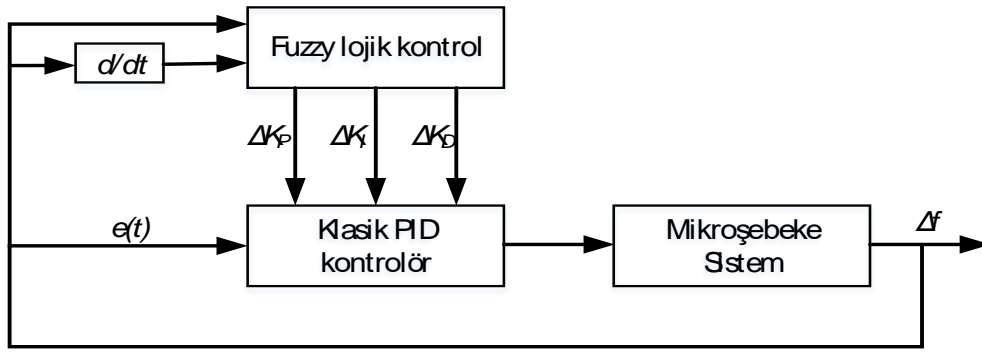
Tablo 3.1. Önerilen mikro şebeke sistemine ait parametre değerleri

Semboller	Değerleri
$T_{PV}$	1,8s

$T_{HG}, T_{HT}$	0,2s, 1,0s
$T_{RS}, T_{RH}$	5s, 28,75s
$T_{BSG}, T_{BCT}$	0,08s, 0,3s
$K_{BR}, T_{BR}$	0,3, 10s
$T_{FC}, T_{AE}$	4s, 0,5s
$M, D, R$	0,2, 0,012, 2,4

### 3.2. Kontrolör Yapısı

Kural tabanlı fuzzy küme teorisi, sistemleri tasarlamada ve takip etmesi kolay dilsel gösterimde gözlemleri ifade etmede daha fazla esneklik sağlar. Ayrıca, girişleri ve çıkışları arasında doğrusal ilişki olmayan sistemler için fuzzy mantık kapalı çevrim kontrol uygulamalarında kontrolör parametrelerinin ayarlanmasında daha iyi performans gösterir. Klasik kontrolörler, orantısal, integral ve türev terimleri için sabit kazanç değerine sahip hataların girdileri temelinde çalışır. Bu nedenle, doğrusal olmayan ve karmaşık sistemler için kontrolör performansı beklenen düzeyde değildir. Sabit kazanç yerine orantısal, integral ve türev terimleri için dinamik kazanç değeri dahil edilmeye çalışılabilir. Bir klasik PID kontrol yapısındaki kazancı dinamik olarak değiştirmek, kontrolör performansını artıracak ve yük değişimi ve harici rahatsızlıklar sırasında sistem çıkışını hızlı bir şekilde kararlı duruma getirecektir. Bu hususlar göz önünde bulundurularak, bu çalışmada, klasik PID kontrol şeması ile birleştirilmiş bir fuzzy mantık yapısı önerilmiştir. FPID (Fuzzy PID) kontrol yapısı, PID kontrolör ile kural tabanlı fuzzy denetimin bir birleşimidir. Bu kontrol stratejisinde FLC (Fuzzy Logic Control), orantısal, integral ve türev terimlerinin ölçekleme faktörünü elde etmek için sistem hatası ve türev hatası girdilerini kullanmak üzere tasarlanmıştır. Bu ölçekleme faktörlerini kullanarak, kontrolör kazanç büyüklüğü her örnekleme periyodunda güncellenecektir. Tipik bir FPID kontrol yapısının çerçevesi Şekil 3.2'de gösterilmektedir.



Şekil 3.2. Fuzzy PID kontrolörünün blok diyagramı

Önerilen kontrol yapısında FLC, hata ve hatanın türevi girdilerini kullanır ve orantısal, integral ve türev terimleri için ölçekleme faktörünü hesaplar ve daha sonra bu değerler klasik PID kontrolörünün kazanç parametrelerini güncellemek için kullanılır. Dolayısıyla, klasik PID denetleyicisi için  $K_P$ ,  $K_I$  ve  $K_D$ 'nin nihai kazanç değerleri aşağıdaki ifadeden hesaplanır:

$$k_p = K_p + \Delta K_p \quad (3.9)$$

$$k_i = K_i + \Delta K_i \quad (3.10)$$

$$k_d = K_d + \Delta K_d \quad (3.11)$$

Burada  $K_P$ ,  $K_I$  ve  $K_D$  klasik PID kontrolörün başlangıç değerleridir.  $\Delta K_P$ ,  $\Delta K_I$  ve  $\Delta K_D$  ise fuzzy lojik kontrol tarafından hesaplanan ölçeklendirme faktörleridir. Giriş ve çıkış fuzzy kümeleri için üçgen üyelik fonksiyonları kullanılmış ve Mamdani tipi fuzzy çıkarım sistemi uygulanmıştır. Girdiler ve kesin çıktı üretmek için üç üyelik fonksiyonu, çıktılar için ise beş üyelik fonksiyonu seçilmiştir. Her bir çıktı için kullanılan kural tabanı Tablo 3.2'de gösterilmektedir. Bu tabloda N (Negatif), S (Sıfır), P (Pozitif), NK (Negatif küçük), NB (Negatif büyük), PK (Pozitif küçük) ve PB (Pozitif büyük) dil değişkenlerini ifade eder. Her bir durumun girdileri ve çıktıları arasındaki ilişki, Şekil 3.3'te yüzey görünümünde gösterilmektedir. Yüzey görünümü, ölçekleme faktörü değerinin giriş hatasına ve hata büyüklüğündeki değişikliğe bağlı olarak nasıl değişebileceğini belirtir (Al-Dhaifallah, 2018).

Tablo 3.2. Fuzzy dilsel kural tabanı ve yüzey görünümü (a) $\Delta K_P$  - b) $\Delta K_I$  - c) $\Delta K_D$ 

$\Delta e$			
$\Delta K_P e$	N	S	P
N	NB	NK	S
S	NB	NK	NK
P	PK	PK	PB

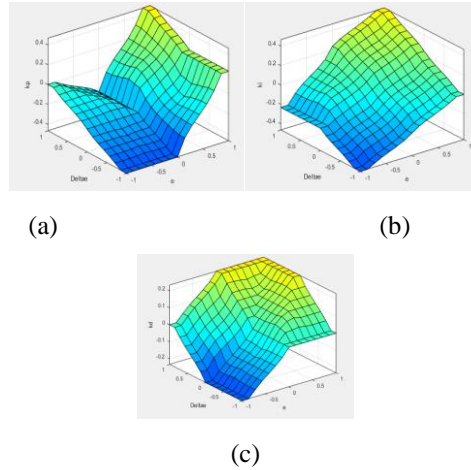
(a)

$\Delta e$			
$\Delta K_I e$	N	S	P
N	NB	NK	NK
S	NK	S	PK
P	S	PK	PB

(b)

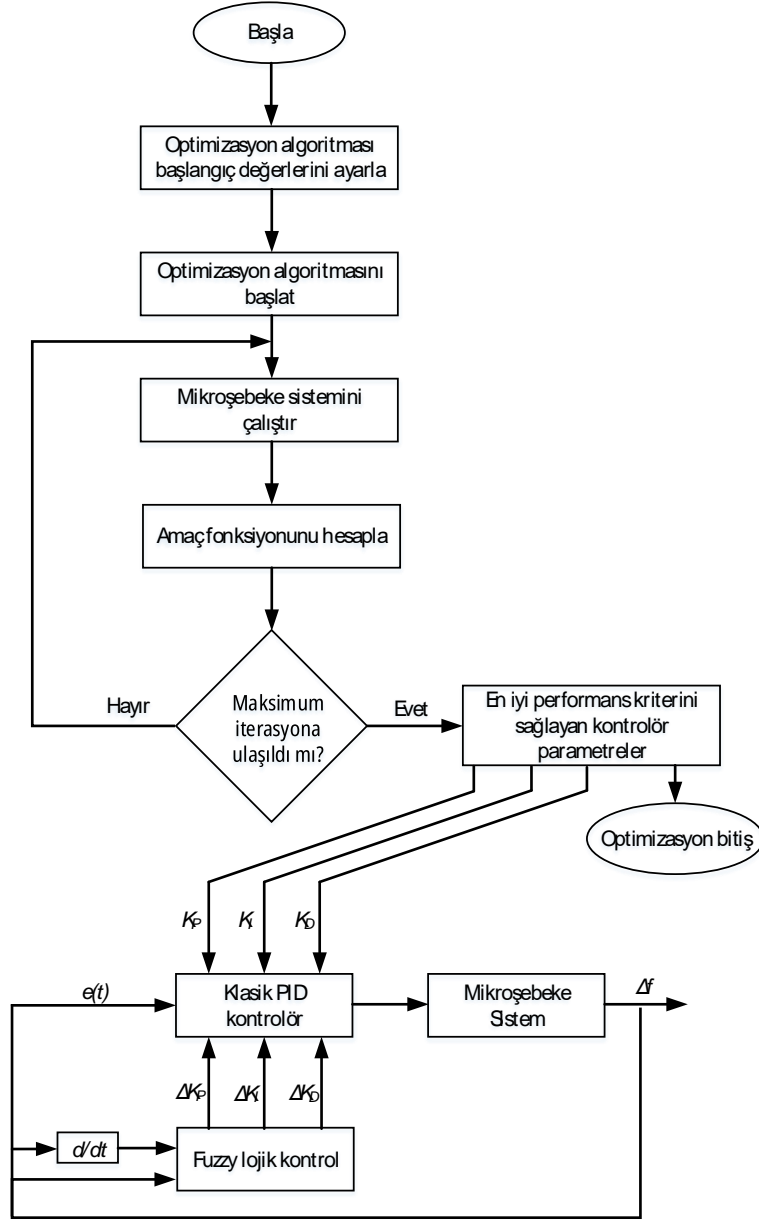
$\Delta e$			
$\Delta K_D e$	N	S	P
N	NK	NK	S
S	S	S	PK
P	S	PK	PK

(c)

Şekil 3.3. Giriş karşı çıkış için yüzey görünümleri. (a) $\Delta K_P$  - b) $\Delta K_I$  - c) $\Delta K_D$ 

Bu tez çalışmasında modellenen mikro şebekenin YFK'sını gerçekleştiren kontrol yapısına ait genel akış şeması Şekil 3.4'te verilmiştir. Optimizasyon algoritmalarının başarısını gösterirken adil bir karşılaştırma yapmak için algoritmaların iterasyon sayısı birbirine uygun olacak şekilde seçilmiştir. Bu amaçla PSO için sürünün büyüklüğü 50, sürü adım

sayısı 100 alınmıştır. KKA için karınca sayısı 50, tur sayısı 100 seçilmiştir. LŞA için ise lig boyutu 8, sezon sayısı 90 olarak ayarlanmıştır.



Şekil 3.4. Mikro şebeke sistemin YFK şeması

### 3.3. Sezgisel Optimizasyon Algoritmaları

Dünyada teknolojinin gelişmesine bağlı olarak bilgi kullanım miktarı artmış ve dolayısıyla problemler çok boyutlu hale gelmiştir. Bu nedenle problemleri çözme hızı büyük önem kazanmıştır. Bilim adamları problemlerin en uygun ve hızlı çözümünü bulmak için sürekli



çalışmakta ve yeni yöntemler geliştirmektedir. Optimizasyon kavramı bu çalışmalar sonucu ortaya çıkmış ve kullanılmaya başlanmıştır.

Klasik optimizasyon algoritmalarının çok boyutlu çalışmalarda ve karmaşık problemlerin çözümünde yetersiz kaldığı görülmüştür. Bu nedenlerden dolayı sezgisel algoritmalara yönelim söz konusu olmuş ve çalışmalar yapılmıştır. Sezgisel algoritmalar kullanılan metaforlara göre farklı açılardan sınıflandırılabilir. Bu metaforlara örnekler şu şekilde sıralanabilir;

- Doğadan esinlenen algoritmalar (PSO, KKA)
- Sosyal olaylardan esinlenen algoritmalar (LŞA, Tabu arama)
- Politik olarak esinlenen algoritmalar (Yayılmacı rekabet algoritması)

Doğadan esinlenilmiş olan algoritmalarda; genel yakınsama, doğadaki fiziksel ve ekolojik işlemler ile algoritmanın kendi optimizasyon mekanizmalarının simülasyonu yoluyla gerçekleştirilmektedir. Bunun sonucunda da etkin sonuçlar elde edilmektedir (Karaboga, 2005; Husseinzadeh, 2009).

### **3.3.1. Lig Şampiyonası Optimizasyon Algoritması (LŞA)**

Bir meta sezgisel algoritma olan LŞA, spor liglerindeki şampiyonluk sürecinden esinlenerek geliştirilmiştir (Husseinzadeh, 2009). Yapay spor takımları, yapay bir ligde sezon sonuna kadar mücadele ederler (iterasyon). Numaralandırılan takım çiftleri haftalık lig programına bağlı olarak oynarlar ve sonuçlar kazanan, kaybeden ve beraberlik olarak belirlenir. Her takımın geliştirilmeyi hedeflediği oyun gücü, takımın kazanıp kaybetmesini yakından belirleyen bir faktördür. Takımlar, belirli takım formasyonuna/düzenlemesine (çözüme) sahiptirler ve bir sonraki oyunu kazanabilmek için bir önceki oyun tarzında yapılması gereken değişiklikleri (yeni bir çözüm) yaparlar. Böylece şampiyona sezon sonuna (durma koşuluna) kadar devam eder. Popülasyona dayalı bir algoritma olan LŞA'da takımlar PSO'daki parçacıklara benzetmekle beraber çok farklı arama yoluna sahiptirler. Bireylerin karşılaştırılmasına odaklanan LŞA, arama fikrini içeriye ve dışarıya doğru etkileyerek kazanacak veya kaybedecek bireyleri belirler. Böylece daha iyi çözüme sahip takımın kazanma oranının daha büyük olması sağlanır. Bu şekilde arama doğrultusunun

kazanan takıma yaklaşması ve kaybeden takımdan uzaklaşması beklenir (Husseinzadeh, 2009; Özdemir ve ark., 2017; Bingöl ve Alataş, 2015; Yıldırım, 2021).

### **3.3.2. Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO)**

Parçacık sürü optimizasyonu 1995 yılında James Kennedy ve Russel Eberhart tarafından kuş ve balık sürülerinin besin bulma davranışlarından esinlenerek geliştirilen sürü zekâsına dayalı bir optimizasyon algoritması olarak tanımlanmaktadır (Kennedy ve Eberhard, 1995).

Bu optimizasyonda çözüm uzayında dolaşan sürünün her bir bireyi, optimizasyon probleminin birer aday çözümünü göstermektedir. Optimizasyonun, arama uzayında tüm parçacıkların rasgele bir konum alması sonucunda başladığı ve devam eden adımlarda hem komşularının en iyi koordinatlarına hem de kendi en iyi koordinatlarına göre pozisyonlarını güncellendikleri görülmektedir. En iyi sonuç bulunana kadar (iterasyon sonuna kadar) arama işlemi bu şekilde devam etmektedir.

### **3.3.3. Karınca Koloni Algoritması (KKA)**

Karınca kolonisi algoritması; popülasyon temelli meta sezgisel bir algoritmadır. Karınca kolonisi algoritmasının temel ilkeleri ilk olarak Marco Dorigo ve arkadaşları tarafından özellikle ayrık optimizasyon problemlerini çözmek için ortaya konulmuştur. Bu algoritma, Karınca kolonileri salgıladıkları feromon hormonu yardımıyla yiyecek ile yuvaları arasındaki en kısa yolu bulabilirler. Bu algoritma da karıncaların bu yeteneklerinden ilham alınarak geliştirilmiştir (Dorigo ve ark., 1999).

Dorigo; karınca davranışlarının matematiksel modelleri üzerine temellendirdiği algoritmasını önce gezgin satıcı problemi üzerinde uygulamış ve başarılı sonuçlar ortaya koymuştur. Bunun üzerine önerilen algoritmanın diğer araştırmacılar tarafından kullanımı günümüze kadar yaygınlaşmıştır (Dorigo ve Gambardella, 1997).

## 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

### 4.1. Benzetim Sonuçları

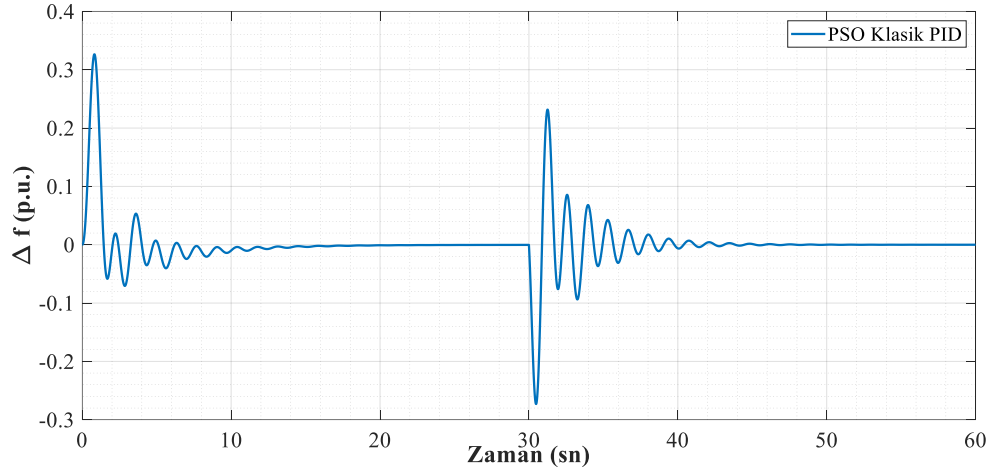
#### 4.1.1. PSO İle Optimize Edilen Klasik PID ve Fuzzy PID Kontrolör

Bu bölümde PSO kullanılarak mikro şebeke sistemde YFK için kullanılan Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlerin en iyi frekans yanıtını veren parametre değerlerinin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar yardımı ile mikro şebeke sistemde YFK'de Klasik PID kontrolör ve Fuzzy PID kontrolörün sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz çalışmalarında sisteme  $t=30$  sn.'de  $\Delta P=0.1$  p.u.'luk bir yük değişikliği uygulanmıştır. Mikro şebeke sistem için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlere ait elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

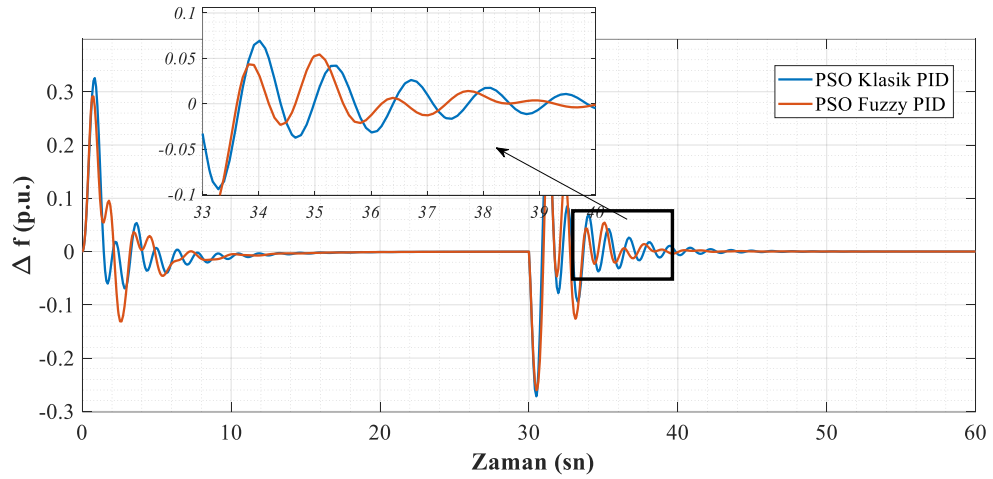
Şekil 4.1.'de PSO ile optimizasyon işlemi gerçekleştirilen Klasik PID kontrolör için mikro şebeke sisteme ait frekansın zamana göre değişimi gösterilmiştir. Burada optimizasyon işlemi sonucunda elde edilen en iyi ITAE performans kriteri için elde edilen PID kontrolör parametrelerine ait değerler Tablo 4.1'de verilmiştir. Benzer biçimde Şekil 4.2'de ise PSO algoritması ile optimizasyon işlemi gerçekleştirilen hem klasik PID hem de fuzzy PID kontrolör için mikro şebeke sisteme ait frekansın zamana göre değişimleri gösterilmiştir.

Tablo 4.1. PSO için Kontrolör 1 ve Kontrolör 2'ye ait parametre değerleri

Kp1	1,38668534	1. kontrolör Kp değeri
Ki1	3,00947908	1. kontrolör Ki değeri
Kd1	0,85619338	1. kontrolör Kd değeri
Kp2	8,28458295	2. kontrolör Kp değeri
Ki2	-35,11750388	2. kontrolör Ki değeri
Kd2	-24,19755357	2. kontrolör Kd değeri



Şekil 4.1. PSO Klasik PID için frekansın zamana göre değişimi



Şekil 4.2. PSO Klasik PID ve Fuzzy PID için frekansın zamana göre değişimi

Şekil 4.1. ve Şekil 4.2.'te verilen frekansın zamana göre değişimleri karşılaştırıldığında zaman genel olarak Fuzzy PID kontrolör bulunan sistemin frekans yanıtı dinamik olarak daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekiller incelendiğinde Fuzzy PID kontrolörü sistemin hem maksimum aşma yönünden hem de sürekli duruma erişme zamanı açısından daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.

Tablo 4.2. PSO için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörler ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması

Kontrolör	Tepe değeri	Yerleşme zamanı	ITAE	Sürekli durum hatası
Klasik PID	0,2731	40,92	17,8984	0,0073
Fuzzy PID	0,2637	38,05	17,4987	0,002

Tablo 4.2’de Klasik PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistem ile Fuzzy PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistemlerde frekans değişimi için hesaplanan performans verilerine ait değerler verilmiştir. Burada tepe değeri, yerleşme zamanı ve sürekli durum hata değeri 30. sn’de gerçekleştirilen yük değişimi sonrasında ait değerlerdir. ITAE değeri ise  $t=0$ ’dan simülasyon sonuna kadar süredeki hataya aittir. ITAE performans kriter değerleri karşılaştırıldığı zaman Fuzzy PID kontrolöre sahip sistemin ITAE performans kriter değerinin daha küçük olduğu görülmüştür. Performans kriter değerinin küçük olması bu kontrolöre sahip mikro şebeke sistemin performansının daha iyi olduğunu göstermektedir. Burada elde edilen değerler ayrıca yukarıda açıklanan maksimum aşma ve yerleşme zamanı gibi diğer dinamik analiz sonuçları ile uygundur. Ayrıca sürekli durumdaki hata değerleri karşılaştırıldığı zaman Fuzzy PID kontrolör kullanılması durumunda daha düşük bir sürekli durum hatası elde edildiği görülmektedir. Yukarıda gösterilen veriler sonucunda mikro şebeke sistemde PSO ile parametre değerleri belirlenen Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlerin kullanımını açısından Fuzzy PID kontrolör kullanımının sistemde daha iyi bir dinamik yanıt sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Bulanık mantık kullanan Fuzzy PID kontrol şemasındaki çevrimiçi kazanç modifikasyonu nedeniyle, oransal, integral ve türev terimlerinin kazanç faktörü, kontrolörün daha iyi performans göstermesini sağlayacak şekilde her örnekleme zamanında güncellenir. Buradaki analiz sonuçlarından, Fuzzy PID kontrolörünün bu çalışmada verilen mikro şebeke sistemin YFK için daha uygun olduğu rahatlıkla söylenebilir.

#### 4.1.2. LŞA ile Optimize Edilen Klasik PID ve Fuzzy PID Kontrolör

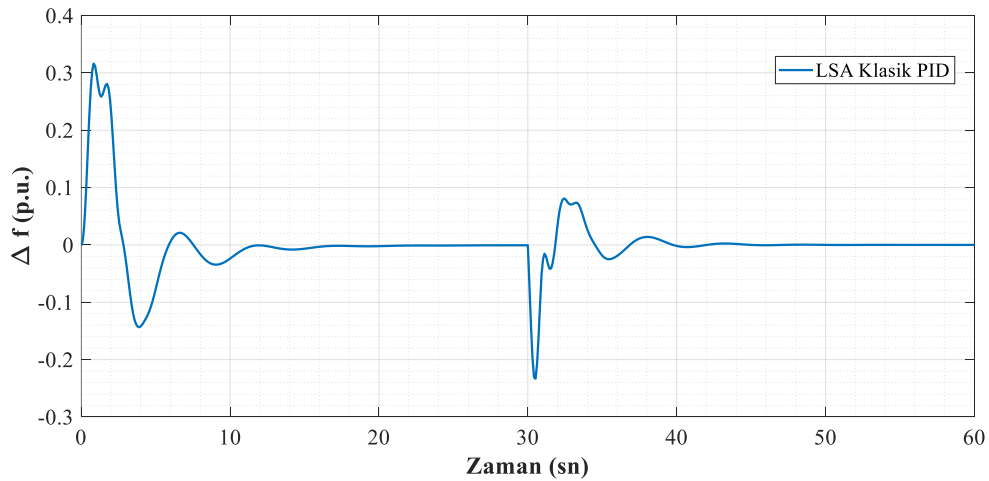
Bu bölümde LŞA algoritması kullanılarak biyoyenilenebilir mikro şebeke sistemde YFK için kullanılan Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlerin en iyi frekans yanıtını veren parametre değerlerinin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar yardımı ile

mikro şebeke sistemde YFK için Klasik PID kontrolör ve Fuzzy PID kontrolörün sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz çalışmalarında sisteme  $t=30$  sn.'de  $\Delta P=0.1$  p.u.'luk bir yük değişikliği uygulanmıştır. Mikro şebeke sistem için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlere ait elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. . Tablo 4.3'te kontrolörlere ait parametre değerleri verilirken Tablo 4.4'te performans verilerine ait sonuçlar verilmiştir.

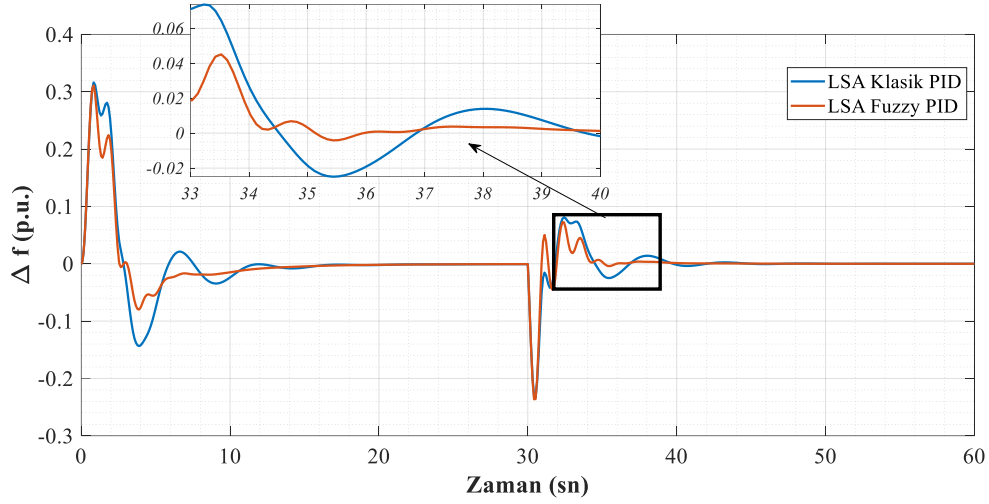
Tablo 4.3. LŞA için Kontrolör 1 ve Kontrolör 2 ye ait parametre değerleri

Kp1	0,65980542	1. kontrolör Kp değeri
Ki1	1,54979079	1. kontrolör Ki değeri
Kd1	0,90730012	1. kontrolör Kd değeri
Kp2	1,54664092	2. kontrolör Kp değeri
Ki2	5,78725279	2. kontrolör Ki değeri
Kd2	-6,99802265	2. kontrolör Kd değeri

Şekil 4.3 ve Şekil 4.4'te verilen frekansın zamana göre değişimleri karşılaştırıldığı zaman genel olarak Fuzzy PID kontrolör bulunan sistemin frekans yanıtı dinamik olarak daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekiller incelendiğinde Fuzzy PID kontrolörlü sistemin hem maksimum aşma yönünden hem de sürekli duruma erişme zamanı açısından daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.



Şekil 4.3. LŞA Klasik PID için frekansın zamana göre değişimi



Şekil 4.4. LŞA Klasik PID ve Fuzzy PID için frekansın zamana göre değişimi

Tablo 4.4. LŞA için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörler ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması

Kontrolör	Tepe değeri	Yerleşme zamanı	ITAE	Sürekli durum hatası
Klasik PID	0,2333	39,2628	15,9513	0,0004
Fuzzy PID	0,2362	34,92	11,3876	0,00006

Tablo 4.4’de Klasik PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistem ve Fuzzy PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistemlerde frekans değişimi için hesaplanan performans verilerine ait değerler verilmiştir. Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolöre sahip sistemlere ait ITAE performans kriter değerleri karşılaştırıldığı zaman Fuzzy PID kontrolöre sahip sistemin ITAE performans kriter değerinin daha küçük olduğu görülmüştür. Burada Fuzzy PID kontrolör yapısı kullanılması maksimum aşma yönünden klasik PID kontrolöre göre daha kötü bir performansa sahip iken yerleşme zamanı açısından sisteme önemli bir iyileştirme gerçekleştirmiştir. Ayrıca sürekli durum hatası değerleri incelendiği zaman sistemde bu açıdan da Fuzzy PID kontrolör yapısının kullanılması önemli bir iyileştirme sağlamıştır. Yukarıda elde edilen veriler sonucunda mikro şebeke sistemde LŞA ile parametre değerleri belirlenen Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlerin kullanımı açısından Fuzzy PID kontrolör kullanımının sistemde daha iyi bir dinamik yanıt sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

### 4.1.3. KKA ile Optimize Edilen Klasik PID ve Fuzzy PID Kontrolör

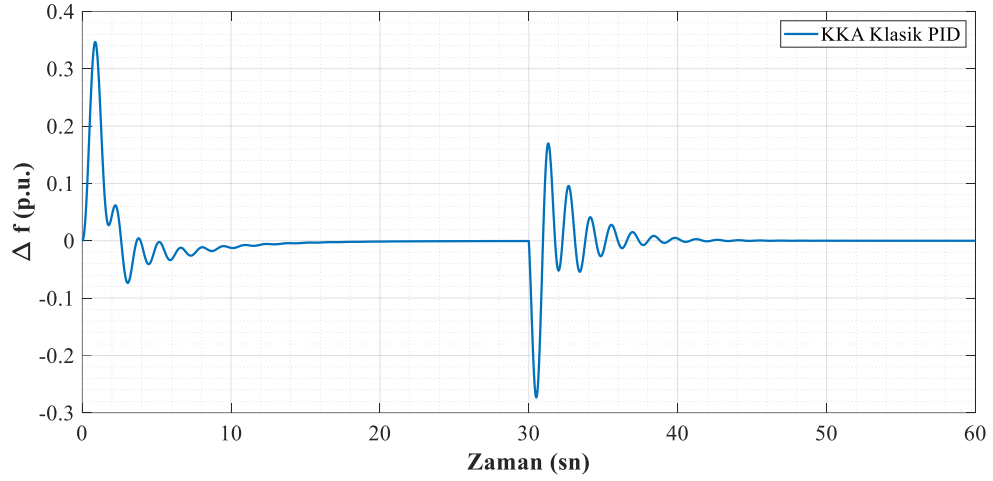
Bu bölümde KKA algoritması kullanılarak biyoyenilenebilir mikro şebeke sistemde yük frekans kontrolü için kullanılan Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlerin en iyi frekans yanıtını veren parametre değerlerinin hesaplanması gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar yardımı ile mikro şebeke sistemde YFK için Klasik PID kontrolör ve Fuzzy PID kontrolörün sonuçları karşılaştırılmıştır. Analiz çalışmalarında sisteme  $t=30$  sn.'de  $\Delta P=0.1$  p.u'luk bir yük değişikliği uygulanmıştır. Mikro şebeke sistem için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlere ait elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir. Tablo 4.5'te kontrolörlere ait parametre değerleri verilirken Tablo 4.6'da performans verilerine ait sonuçlar verilmiştir.

Tablo 4.5 KKA için Kontrolör 1 ve 2 ye ait parametre değerleri

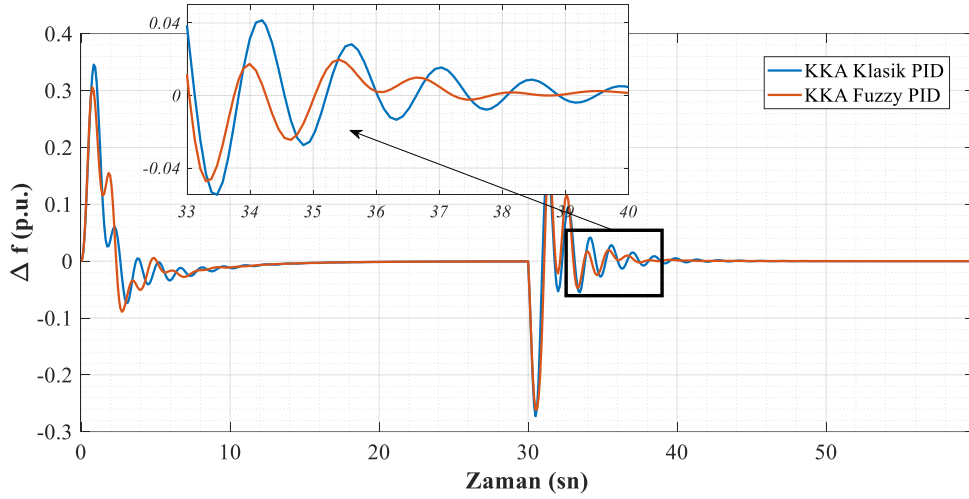
Kp1	1,24242424	1. kontrolör Kp değeri
Ki1	2	1. kontrolör Ki değeri
Kd1	0,75757575	1. kontrolör Kd değeri
Kp2	2	2. kontrolör Kp değeri
Ki2	2	2. kontrolör Ki değeri
Kd2	-1	2. kontrolör Kd değeri

Şekil 4.5 ve Şekil 4.6'da verilen frekansın zamana göre değişimleri karşılaştırıldığı zaman genel olarak Fuzzy PID kontrolör bulunan sistemin frekans yanıtı dinamik olarak daha iyi sonuç verdiği görülmektedir. Şekiller incelendiğinde Fuzzy PID kontrolörü sistemin hem maksimum aşma yönünden hem de sürekli duruma erişme zamanı açısından daha iyi bir performans sergilediği görülmektedir.





Şekil 4.5. KKA Klasik PID için frekansın zamana göre değişimi



Şekil 4.6. KKA Klasik PID ve Fuzzy PID için frekansın zamana göre değişimi

Tablo 4.6. KKA için Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörler ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması

Kontrolör	Tepe değeri	Yerleşme zamanı	ITAE	Sürekli durum hatası
Klasik PID	0,2733	38,64	15,1015	0,0021
Fuzzy PID	0,2604	36,95	14,6865	0,00026

Tablo 4.6'da Klasik PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistem ve Fuzzy PID kontrolöre sahip mikro şebeke sistemlerde frekans değişimi için hesaplanan performans verilerine ait

değerler verilmiştir. Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolöre sahip sistemlere ait ITAE performans kriter değerleri karşılaştırıldığı zaman Fuzzy PID kontrolöre sahip sistemin ITAE performans kriter değerinin daha küçük olduğu görülmüştür. Burada elde edilen değerler ayrıca yukarıda açıklanan maksimum aşma ve yerleşme zamanı gibi diğer dinamik analiz sonuçları ile uygundur. Sürekli durum hatası performans değerine göre karşılaştırma yapıldığı zaman Fuzzy PID kontrolör kullanımı sistemi önemli ölçüde iyileştirmektedir. Yukarıda elde edilen veriler sonucunda mikro şebeke sistemde KKA ile parametre değerleri belirlenen Klasik PID ve Fuzzy PID kontrolörlerin kullanımını açısından Fuzzy PID kontrolör kullanımının sistemde daha iyi bir dinamik yanıt sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

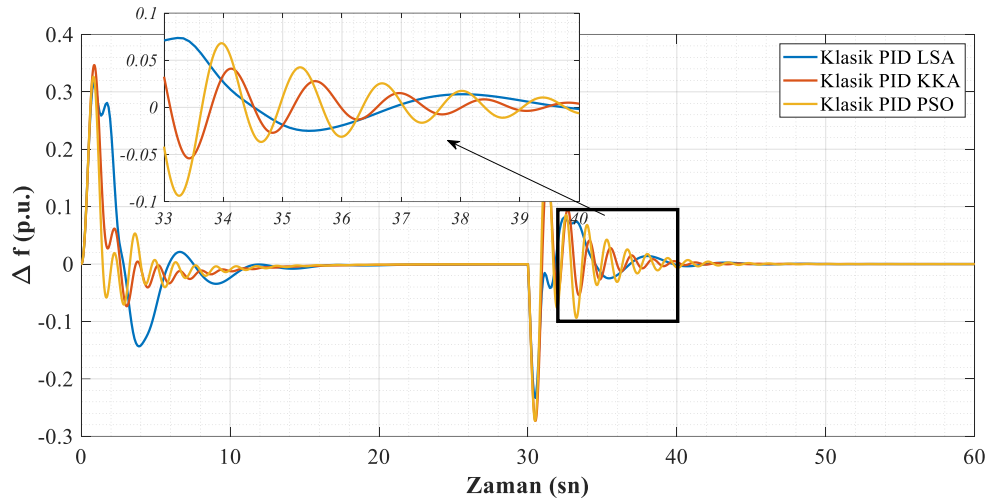
#### 4.1.4. PSO, LŞA ve KKA için Klasik ve Fuzzy PID Kontrolör Yanıtlarının Karşılaştırılması

Biyoyenilenebilir mikro şebeke sistemi, ITAE maliyet fonksiyonu kullanılarak hem Klasik PID kontrolör hem de Fuzzy PID kontrolör durumları için 3 farklı optimizasyon algoritması ile ayrı ayrı optimize edilmiştir. Bu bölümde bu işlemlere ait elde edilen şekiller ve değerler verilmiştir. Burada Tablo 4.7. ve 4.8.'deki tepe değeri, yerleşme zamanı ve sürekli durum hata değerleri 30. sn'de gerçekleştirilen yük değişimi sonrasında ait değerlerdir. ITAE değeri ise  $t=0$ 'dan simülasyon sonuna kadar süredeki hataya aittir.

Tablo 4.7. Klasik PID için LŞA, KKA ve PSO ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması

Optimizasyon yöntemi	Tepe değeri	Yerleşme zamanı	ITAE	Sürekli durum hatası
LŞA	0,2333	39,2628	15,9513	0,0004
KKA	0,2733	38,64	15,1015	0,0021
PSO	0,2731	40,92	17,8984	0,0073

Tablo 4.7'de mikro şebeke sistemde YFK işleminin bir klasik PID kontrolör tarafından gerçekleştirildiği duruma ait performans veri değerleri verilmiştir. Tablo 4.7'nin verileri incelendiği zaman en iyi maliyet değeri KKA için elde edilirken en kötü sonuç PSO algoritmasında elde edilmiştir. En iyi tepe ve sürekli durum hata değeri LŞA ile elde edilirken en iyi yerleşme zamanı değeri ise KKA ile elde edilmiştir.



Şekil 4.7. Klasik PID LŞA, KKA ve PSO için frekansın zamana göre değişimi

Şekil 4.7'de 3 farklı optimizasyon yöntemleri ile parametre değerleri optimize edilen klasik PID kontrolör için mikro şebekenin frekansının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Şekil incelendiğinde ilk 10 saniyelik frekans değişimi esnasında her ne kadar LŞA ile optimize edilmiş sistemin frekans değişimi negatif yönde büyük bir aşma gerçekleştirmişse de genel olarak sistemin daha az salınıma sahip olması ve özellikle 30. sn'de meydana gelen yük değişimi sonrası göstermiş olduğu daha iyi bir dinamik cevap nedeniyle PSO'ya göre daha düşük bir ITAE performans değerine sahiptir. Şekilde ayrıca KKA ve PSO ile optimize edilen sistemler için frekans değişimleri incelendiği zaman elde edilen sonuçların Tablo 4.7 değerleri ile uygun olduğu görülmektedir. Şekil 4.7'de görüleceği üzere klasik PID kontrolörler KKA algoritması ile elde edilen değerlere sahip iken en iyi dinamik zaman yanıtına sahiptir.

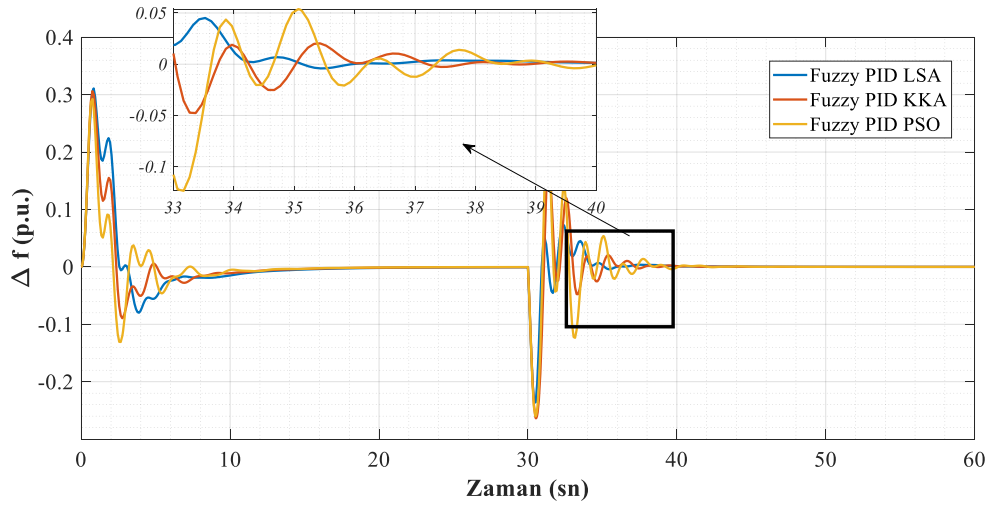
Tablo 4.8. Fuzzy PID için LŞA, KKA ve PSO ile elde edilen performans verilerinin karşılaştırılması

Optimizasyon yöntemi	Tepe değeri	Yerleşme zamanı	ITAE	Sürekli durum hatası
LŞA	0,2362	34,92	11,3876	0,00006
KKA	0,2604	36,95	14,6865	0,00026
PSO	0,2637	38,05	17,4987	0,002

Tablo 4.8'de mikro şebeke sistemde YFK işleminin bir Fuzzy PID kontrolör tarafından gerçekleştirildiği duruma ait performans veri değerleri verilmiştir. Tablo 4.8'in verileri

incelendiği zaman en iyi maliyet değeri LŞA için elde edilirken en kötü sonuç PSO için elde edilmiştir. En iyi tepe, sürekli durum hata değeri ve yerleşme zamanı değeri LŞA ile elde edilmiştir.

Şekil 4.8’de 3 farklı optimizasyon yöntemleri ile parametre değerleri optimize edilen Fuzzy PID kontrolör için mikro şebekenin frekansının zamana göre değişimi gösterilmiştir. Şekil incelendiği zaman hem ilk 10 sn. lik frekans değişimi esnasında hem de 30. sn’de meydana gelen yük değişimi sonrasında en iyi dinamik cevap LŞA ile optimize edilen sisteme aittir. Şekilde ayrıca KKA ve PSO ile optimize edilen sistemler için frekans değişimleri incelendiği zaman elde edilen sonuçların Tablo 4.8 değerleri ile uygun olduğu görülmektedir. Şekil 4.8’de görüleceği üzere Fuzzy PID kontrolör LŞA ile elde edilen değerlere sahip iken en iyi dinamik zaman yanıtına sahiptir.



Şekil 4.8. Fuzzy PID LŞA, KKA ve PSO için frekansın zamana göre değişimi

## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Günümüzde enerji tüketiminin giderek arttığı, çevre koruma bilincinin geliştiği ve enerji piyasalarındaki serbestleşmenin istikrarlı şekilde ilerlediği görülmektedir. Bu nedenle, yeni teknolojiler yardımı ile yenilenebilir enerji kaynaklarından daha fazla yararlanmaya yönelik politikalar üretilmekte ve dağıtılmış üretim sistemlerine olan ilginin artması sağlanmaktadır. Mikroşebekeler yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunda önemli avantajlar sağlayan bir çözüm olarak ortaya çıkmıştır. Ayrıca, artan nüfus, sanayileşme ve modern yaşam tarzındaki değişiklikler nedeniyle dünya çapında meydana gelen aşırı enerji talebi, ekosistemimizi tahrip eden zararlı atıkları çoğaltmaktadır. Bu durum, atıkları kullanan biyoenerji gibi yenilenebilir yeşil enerji üretimine yönelik bazı alternatif çözümlere yönelimi zorunlu kılmaktadır. Uzak ve küçük yerleşim yerleri, rüzgar/güneş-biyoenerji kojenerasyon tabanlı hibrit mikro şebekeler ile kendi güç gereksinimlerini üretebilirler.

Mikroşebekelerin yapılarında bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken üretim yapıları gibi bazı belirsizliklere sahip olması, bu sistemlerde frekans kararlılığını önemli problemlerden biri haline getirir. Bir mikroşebeke modeline etkin bir yük frekansı kontrolünün sağlanması, bu sistemlerin kararlılığı ile ilgili iyileştirmelere önemli ölçüde katkıda bulunur. Yapılan bu tez bu çalışmada biyoyenilenebilir enerji tabanlı mikro şebekede yük frekans kontrolünde karşılaşılan zorlukların üstesinden gelmek için fuzzy tabanlı bir kontrolör yapısı önerilmiş ve bu kontrolörün en iyi parametre değerlerinin belirlenmesinde 3 farklı optimizasyon algoritmasının başarısı gösterilmiştir. Bu çalışmada yük frekans kontrolü için klasik PID kontrolör ile fuzzy PID kontrolör kullanılmasına ait sonuçlar karşılaştırılarak incelenmiştir. Bu çalışmada, klasik PID kontrolör ve fuzzy PID kontrolörün en uygun parametre değerlerinin belirlenmesi için LŞA, KKA ve PSO algoritmaları kullanılmıştır. Farklı optimizasyon algoritmaları ile en uygun parametre değerlerinin belirlenmesi için ITAE maliyet fonksiyonundan yararlanılmıştır.

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre, klasik PID ve fuzzy PID kontrolöre sahip sistemlerin frekans yanıtları karşılaştırıldığında 3 farklı optimizasyon algoritması içinde fuzzy PID

kontrolör daha iyi dinamik zaman yanıtı sonuçları vermiştir. Bu sonuçlar hem frekansın zamana göre değişimleri hem de performans veri değerleriyle gösterilmiştir. Çalışma sonuçlarında klasik PID kontrolörün parametre değerlerinin ayarlanmasında KKA'nın en uygun optimizasyon algoritması olduğu belirlenmiştir. Klasik PID kontrolör için bunun yanında LŞA ile belirlenen değerler için sistemin frekans yanıtının PSO ile belirlenen değerlere ait sistemin frekans yanıtından daha iyi bir dinamik zaman yanıtına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca çalışma sonuçlarında fuzzy PID kontrolörün parametre değerlerini ayarlamak için en uygun optimizasyon algoritmasının LŞA olduğu belirlenmiştir. Fuzzy PID kontrolör bulunan sistem için KKA ve PSO algoritmaları ile elde edilen kontrolör parametre değerleri için sistem frekans yanıtları karşılaştırıldığında KKA ile elde edilen kontrolör parametrelerine sahip sistemin daha iyi bir frekans yanıtına sahip olduğu görülmüştür.

Sonraki çalışmalarda, özellikle biyoyenilenebilir mikro şebeke sistemde meydana gelebilecek parametre değişimleri göz önünde bulundurularak farklı gürbüz kontrolör yapılarına yönelik çalışmalar gerçekleştirilebilir. Ayrıca bu çalışmada kullanılan fuzzy yapısındaki literatürde gerçekleştirilen yeni yapılar bu mikro şebekelerin yük frekans kontrolü yapılarında kullanılabilir.

## KAYNAKLAR

Green, M. (2016). Community power. *Nat Energy*, 1: 16014.

Özdemir, M. T., Yıldırım, B., Gülan, H., Gençoğlu, M. T., Cebeci, M. (2017). İzole Bir AA Mikroşebekede Lig Şampiyonası Algoritması İle Optimum Otomatik Üretim Kontrolü. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 29(1): 109-120.

Barker P., Johnson B., Maitra A. (2001). Investigation of the technical and economic feasibility of micro-grid based power systems. Palo Alto, CA.: EPRI.

Lovins A.B. (2002). Rocky Mountain Instituteeditors. Small is profitable. 1st ed.Snowmass, CO: Rocky Mountain Institute.

Gummerman E. Z., Bharvirkar R. R., La Commare K. H., Marnay C. (2003). Evaluation framework and tools for distributed energy resources. Lawrence Berkeley Natl Lab, 73.

Iannucci J. J., Cibulka L., Eyer J. M., Pupp R. L. (2003). DER benefits analysis studies: final report. National Renewable Energy Laboratory.

Farmer B. K., Wenger H., Hoff T. E., Whitaker C. M. (1995). Performance and value analysis of the Kerman 500 kW photovoltaic power plant. In: Proceedings of Am Power Conference Chic. IL.

Hoff T. E., Wenger H. J., Farmer B. K. (1996). Distributed generation: an alternative to electric utility investments in system capacity. *Energy Policy*, 24:137–47.

Kocaman, B. (2014). Mikro Şebekeler İçin Örnek Bir Enerji Yönetimi Uygulaması. *BEÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 3(1), 35-52.

Subramanyam, M. V., Satyaprasad, K., Gopi Krishna Rao, P. V. (2014) Study on PID Controller Design and Performance Based on Tuning Techniques. *International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies*, p.1411-1417.

Baykal, N., Beyan, T. (2004) Bulanık Mantık İlke ve Temelleri. Ankara: Bıçaklar Kitabevi, 2004.

Al-Dhaifallah, M., Kanagaraj, N., Nisar, K. S. (2018). Fuzzy Fractional-Order PID Controller for Fractional Model of Pneumatic Pressure System. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. Article ID 5478781, 9 pages.

Parmar, K. P. S., Majhi, S., Kothari, D. P. (2012). Load Frequency Control of a realistic power system with multi-source power generation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume: 42, Issue:1, 426-433.

Mah, A. X. Y., Ho, W. S., Hassim, M. H., Hashim, H., Ling, G. H. T., Ho, C. S., Muis, Z. A. (2021). Optimization of a standalone photovoltaic-based microgrid with electrical and hydrogen loads. *Energy*, Volume 235, 1212-1218, 2021.

Li, X., Zeng, Y., Lu, Z. (2022). Decomposition and coordination calculation of economic dispatch for active distribution network with multi-microgrids. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 135, 1076-117.

Marqusee, J., Becker, W., Ericson, S. (2021). Resilience and economics of microgrids with PV, battery storage, and networked diesel generators. *Advances in Applied Energy*, Volume 3, 100049.

Barik, A. K., Das, D. C. (2021). Integrated resource planning in sustainable energy-based distributed microgrids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Volume 48, 101622.

Chen, T., Cao, Y., Qing, X., Zhang, J., Sun, Y., Amaratunga, G. A.J. (2022). Multi-energy microgrid robust energy management with a novel decision-making strategy. *Energy*, Volume 239, Part A, 121840.

Md Mustafa K., Intiaz A., Eugene F. (2022). Planning and optimization of microgrid for rural electrification with integration of renewable energy resources. *Journal of Energy Storage*, Volume 52, Part A, 104782, ISSN 2352-152X.

Manzano, J. M., Salvador, J. R., Romaine, J. B., Alvarado-Barrios, L. (2022). Economic predictive control for isolated microgrids based on real world demand/renewable energy data and forecast errors. *Renewable Energy*, Volume 194, Pages 647-658, ISSN 0960-1481.

Graça Gomes, J., Xu, H. J., Yang, Q., Zhao, C. Y. (2021). An optimization study on a typical renewable microgrid energy system with energy storage *Energy*, Volume 234, 121210, ISSN 0360-5442.

Wang, D., Zhang Qi, J. (2021). Multi-objective optimization for voltage and frequency control of smart grids based on controllable loads. *Global Energy Interconnection*, Volume 4, Issue 2, 136-144.



Singh, K. M., Gope, S. (2021). Renewable energy integrated multi-microgrid load frequency control using grey wolf optimization algorithm. *Materials Today: Proceedings*, Volume 46, Part 7, 2572-2579.

Yousri, D., Babu, T. S., Fathy, A. (2020). Recent methodology based Harris Hawks optimizer for designing load frequency control incorporated in multi-interconnected renewable energy plants. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 22, 100352.

Jalali, N., Razmi, H., Doagou-Mojarrad, H. (2020). Optimized fuzzy self-tuning PID controller design based on Tribe-DE optimization algorithm and rule weight adjustment method for load frequency control of interconnected multi-area power systems. *Applied Soft Computing*, Volume 93, 106424.

Nosratabadi, S. M., Bornapour, S. M., Gharaei, M. (2019). Grasshopper optimization algorithm for optimal load frequency control considering Predictive Functional Modified PID controller in restructured multi-resource multi-area power system with Redox Flow Battery units. *Control Engineering Practice*, Volume 89, 204-227.

Sahu, P. C., Mishra, S., Prusty, R. C., Panda, S. (2018). Improved-salp swarm optimized type-II fuzzy controller in load frequency control of multi area islanded AC microgrid. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, Volume 16, 380-392.

Gheisarnejad, M. (2018). An effective hybrid harmony search and cuckoo optimization algorithm based fuzzy PID controller for load frequency control. *Applied Soft Computing*, Volume 65, 121-138.

Ankur R., Dushmanta K. D. (2022). The development of a fuzzy tilt integral derivative controller based on the sailfish optimizer to solve load frequency control in a microgrid, incorporating energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, Volume 48, 103887, ISSN 2352-152X.

Shayeghi, H., Rahnama, A., Alhelou, H.H. (2021). Frequency control of fully-renewable interconnected microgrid using fuzzy cascade controller with demand response program considering. *Energy Reports*, Volume 7, Pages 6077-6094, ISSN 2352-4847.

Hale Bakir, Ahmet Afsin Kulaksiz. (2020). Modelling and voltage control of the solar-wind hybrid micro-grid with optimized STATCOM using GA and BFA. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Volume 23, Issue 3, Pages 576-584, ISSN 2215-0986.

Özdemir, E. (2007). Dağılmış Enerji Üretim Sistemleri ve Yardımcı Hizmetler. *Elektrik Elektronik -Bilgisayar Mühendisliği 12. Ulusal Kongresi ve Fuarı*.

Özil E., Şişbot S., Özpınar A., Olgun B. (2013). Elektrik Enerjisi Teknolojileri ve Enerji Verimliliği. 3. Cilt-Konvansiyonel Elektrik Santrallerinde Elektrik Üretimi, sayfa 20, TESAB.

2020 Yılı Faaliyet Raporu, EÜAŞ Genel Müdürlüğü.

[https://www.erbakan.edu.tr/storage/files/department/elektrikelektronikmuhendisligi/Editor/DERS/YElkEnrUrt/Hidroelektrik\\_Enerji\\_T%C3%BCrbinleri.pdf](https://www.erbakan.edu.tr/storage/files/department/elektrikelektronikmuhendisligi/Editor/DERS/YElkEnrUrt/Hidroelektrik_Enerji_T%C3%BCrbinleri.pdf) (Erişim Tarihi: 18.05.2022)

Lucas, K. (2000). On the Thermodynamics of Cogeneration. Int. J Therm Sa, 1039-1046.

Aslan, Y., Yaşar, C., Karabörk, M. Ç. (2004). Bir mikro-hidro örneği: Kayaboğazı Barajı. ELECO 2004, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 20-25.

<https://www.dunyaenerji.org.tr/2021-kuresel-ruzgar-raporu/>. (Erişim Tarihi: 18.05.2022)  
Özil E., Şişbot S., Özpınar A., Olgun B. (2013). Elektrik Enerjisi Teknolojileri ve Enerji Verimliliği. 4. Cilt-Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Elektrik Üretimi ve Çevre, sayfa 40, TESAB.

<https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-ruzgar#:~:text=Tarihi%3A%2004.01.2022-,%R%C3%BCzg%C3%A2r%20t%C3%BCrbinleri%2C%20r%C3%BCzg%C3%A2r%20enerji%20santrallerinin%20ana%20yap%C4%B1%20eleman%C4%B1%20olup%20hareket,d%C3%BC%59Fey%20eksenli%20olarak%20imal%20edilirler.> (Erişim Tarihi: 18.05.2022)

Özel S. (2016). Alternatif Akım Mikro Şebekelerde Sezgisel Yöntemlerle Yük Frekans Optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Erhan, Koray. (2018). Hibrit ve Elektrikli Araçlarda Volan ve Ultrakapasitör Teknolojilerinin Kullanımının İncelenmesi ve Volan Enerji Depolama Ünitesinin Prototip Üretimi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Akhil A., Huff G., Currier B., Kaun B. C., Rastler M., Chen S. B., Cotter A. L., Bradshaw D. T., Gauntlett W. D. (2013). DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA. SANDIA Report, SANDIA2013- 5131, 1-150.

Segundo H. B. S. (2011). Energy Storage Systems Integration PV Power Plants. PhD Thesis, University of Polytechnic Catalunya, Department of Electrical Engineering, Spain.

Bryan, B. P., Andrews, J. A. (2004). Advence in Flywell Energy Storages Systems. Tezas.

Elzinga D., Heinen S., Munuera L., Remme U. (2014). Energy Storage Technology Roadmap. International Energy Agency, IEA-2014, 1-46.

Elektrikli Araçlar. TÜBİTAK- Marmara Araştırma Merkezi Enerji Sistemleri ve Çevre Araştırma Enstitüsü, Gebze-2003.

Talaq , J. and Al-Basri F. (1999). Adaptive Fuzzy Gain Scheduling for Load Frequency Control. IEEE Transactions on power systems, 14, No. 1, 145-150.

Özil E., Şişbot S., Özpınar A., Olgun B.(2013). Elektrik Enerjisi Teknolojileri ve Enerji Verimliliği. 3. Cilt-Konvansiyonel Elektrik Santrallerinde Elektrik Üretimi, sayfa 145, TESAB.

De Wit, J., Näslund, M. (2011). Mini and Micro Cogeneration. Danish Gas Technology Centre. ICCI

Özil E., Şişbot S., Özpınar A., Olgun B. (2013). Elektrik Enerjisi Teknolojileri ve Enerji Verimliliği. 3. Cilt-Konvansiyonel Elektrik Santrallerinde Elektrik Üretimi, sayfa 149, TESAB.

<https://www.genon.com.tr/dizel-jenerator-kullanmanin-avantajlari-nelerdir/> (Son Erişim Tarihi: 18.05.2022)

<https://www.irena.org/solar> (Son Erişim Tarihi:18.05.2022)

Kahraman, H., Çevik, I., Coşman, S. (2014). Sıkıştırma basıncının PEM yakıt pili performansına etkisi. 2. Uluslararası Mühendislik ve Bilim Alanında Yenilikçi Teknolojiler Sempozyumu, Karabük, 1008-1015.

Taşdemirci Ç., Özkan A. (2021). Elektrikli araçlarda ultra kapasitör kullanımı ve uygulanabilirlik durumunun değerlendirilmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 9, 712-722.

Mazman M., Yılmaz C.H. (2019). Enerji depolama çözümleri ve genel eğilimler. Elektrik Mühendisliği, Sayı 466.

Kundur, P.(1993). Power System Stability And Control. Mc Graw-Hill Press., New York, 581-626.

Basa Arsoy, A. (2000). Electromagnetic Transient and Dynamic Modeling and Simulation of a StatCom-SMES Compensator in Power Systems. Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University, Thesis of PhD., Blacksburg, Virginia.

Yıllancı, A. (2008). Güneş-hidrojenli bir sisteminin kurulması ve performansının analizi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

Genç Ö., Kallioğlu M.A. (2018). Proton elektrolit membranlı (pem) elektrolizörün sayısal incelenmesi ve deneysel doğrulanması. Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 7, Sayı 1, 370-380.

Becerikli, F. (2011). Yüksek Basıncılı PEM (Proton Geçirgen Membran) Elektrolizör Geliştirilmesi ve Çalışma Parametrelerinin Performansa Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 60s.

Kueck, J., Kirby, B., Rizy, T., Li, F., Fall, N. (2006). Reactive power from distributed energy. The Electricity Journal, 19(10), 27-38.

Hingorani, N. G., Gyuyi, L. (1999). Understanding Facts–Concepts and Technology of Flexible AC. Transmission Systems: Inst. Elect.

Barik, A. K. and Das, D. C. (2018). Active power management of isolated renewable microgrid generating power from Rooftop solar arrays, sewage waters and solid urban wastes of a smart city using Salp swarm algorithm. Technologies for Smart-City Energy Security and Power (ICSESP), p. 1-6.

Kılıç, E. ve Özdemir, M. T. (2019). Güç Sistemlerindeki Optimum Otomatik Gerilim Regülasyonu için Çoklu Amaç Fonksiyonunun Belirlenmesi. Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi, c. 10, sayı. 1, s. 1-12.

F. Martin-Martínez, A. Sánchez-Miralles, M. Rivier. (2016). A literature review of microgrids: a functional layer based classification. Renew Sustain Energy Rev, 62:1133–53.

Karaboga, D. (2005). An idea based on honey bee swarm for numerical optimization. Technical Report TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department.

Husseinzadeh, K. A. (2009). League Championship Algorithm: A New Algorithm for Numerical Function Optimization. International Conference of Soft Computing and Pattern Recognition., pp. 43-48.

Bingöl, H. ve Alataş, B. (2015). Metasezgisel Optimizasyon Tekniklerine Spor Tabanlı Yeni Bir Yaklaşım: Lig Şampiyonası Algoritması. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi 27(1): 1-11.

Yıldırım, B. (2021). Bir Mikro Şebekenin Yük Frekans Kontrolü İçin Tamsayı Derece Yaklaşımli Kesir Dereceli PID Kontrolörün Optimizasyonu. DÜMF Mühendislik Dergisi, 12:1: 79-87.

Kennedy, J., Eberhard, R. C. (1995). Particle swarm optimization. In: Proceedings of IEEE international conference on neural networks. Piscataway, NJ, USA, 1942–1948.

Dorigo M., Dicaro G. Gambardella L. M. (1999). Ant Algorithms For Discrete Optimization. in Artificial Life 5(2), 137-172.

Dorigo M., Gambardella L. M. (1997). Ant Colonies For The Travelling Salesman Problem. Biosystems, 43 (2), 73–81