T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ TEMELLİ MİKRO ŞEBEKELERDE GÜÇ GEREKSİNİMLERİNİN MALİYET ve KAYIP PARAMETRELERİ DİKKATE ALINARAK OPTİMUM SÜPER KAPASİTÖR TAHSİSİ

Merve ÇELİK

Ağustos-2024
BATMAN

T.C.
BATMAN ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
ENERJİ YÖNETİMİ ANA BİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ TEMELLİ MİKRO ŞEBEKELERDE GÜÇ GEREKSİNİMLERİNİN MALİYET VE KAYIP PARAMETRELERİ DİKKATE ALINARAK OPTİMUM SÜPER KAPASİTÖR TAHSİSİ

Merve ÇELİK

Danışman
Dr. Öğr. Üyesi Davut SEVİM

Ağustos-2024
BATMAN

TEZ KABUL VE ONAYI

Merve ÇELİK tarafından hazırlanan "Sürdürülebilir Enerji Temelli Mikro Şebekelerde Güç Gereksinimlerinin Maliyet ve Kayıp Parametreleri Dikkate Alınarak Optimum Süperkapasitör Tahsisi" adlı tez çalışması 09/08/2024 Tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Batman Üniversitesi Lisansütü Eğitim Enstitüsü Enerji Yönetimi Anabilim Dalı'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Başkan Doç. Dr. Cafer BUDAK	……..
Danışman Dr. Öğr. Üyesi Davut SEVİM	……..
Üye Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR	……..

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Dr. Öğr. Üyesi Ömer Murat ÖTER
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza

Merve ÇELİK

Tarih: 09.08.2024

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

SÜRDÜRÜLEBİLİR ENERJİ TEMELLİ MİKRO ŞEBEKELERDE GÜÇ GEREKSİNİMLERİNİN MALİYET VE KAYIP PARAMETRELERİ DİKKATE ALINARAK OPTİMUM SÜPER KAPASİTÖR TAHSİSİ

Merve ÇELİK

Batman Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Enerji Yönetimi Ana Bilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Davut SEVİM

2024, 84 Sayfa

Jüri
Dr. Öğr. Üyesi Davut SEVİM
Doç. Dr. Mehmet Rıda TÜR
Doç. Dr. Cafer BUDAK

Elektrik güç sistemleri, kesintisiz güç tedariki için belirli depolama teknolojilerini kullanır ve bu teknolojilerin kapasiteleri optimal ve güvenilir olmalıdır. Bu şekilde, güç sistemi, belirli üretim birimlerinin ani kesintilerine veya beklenmedik yük artışlarına ihtiyaç duymadan düzenli ve sürdürülebilir bir şekilde işlemeye devam edebilir. Bu amaca ulaşmak için, sistemin öngörülemeyen arızaları engellemek için kullanılan kaynaklardan biri olan optimum kapasite seviyesi korunmalıdır. Bu çalışmada, süper kapasitörlerin ataması sırasında, üretim maliyetleri, hat kayıpları ve güvenilirlik gibi üç parametre dikkate alınarak en uygun depolama miktarı belirlenmektedir. 15 baralık bir sistemde, bu üç etken faktörün her biri ayrı ayrı hesaplanarak uygun depolama maliyeti analiz edilmiş ve sekiz farklı senaryo incelenmiştir. Yapılan hesaplamaların sonucunda, hat kayıplarının etkisinin oldukça düşük olduğu ve üretim maliyeti ile güvenilirlik açısından en uygun sonucun elde edildiği belirlenmiştir. Sonuç olarak, güç sistemlerinde birimlere depolama ayrılması durumunda, sürdürülebilir ve kesintisiz elektrik sağlanması için en uygun planlamanın doğru politikalarla yapılması gerektiği önerilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Mikro Şebeke, Sürdürülebilir Enerji, Süper Kapasitör.

ABSTRACT

MS THESIS

ALLOCATING OPTIMUM SUPER CAPACITORS IN SUSTAINABLE ENERGY-BASED MICROGRIDS CONSIDERING COST AND LOSS PARAMETERS

Merve ÇELİK

Batman University Graduate Education Institute

Department of Energy Management

Advisor: Asst. Prof. Dr. Davut SEVİM

2024, 84 Pages

Jury
Asst. Prof. Dr. Davut SEVİM
Assoc. Prof. Dr. Mehmet Rıda TÜR
Assoc. Prof. Dr. Cafer BUDAK

Electric power systems utilize specific storage technologies for uninterrupted power supply, and these technologies' capacities must be optimal and reliable. This way, the power system can continue to operate regularly and sustainably without the need for sudden interruptions from specific production units or unexpected increases in load. To achieve this goal, the optimal capacity level, which is one of the resources used by the system to prevent unforeseen failures, must be maintained. In this study, the optimum storage amount is determined by considering three parameters: production costs, line losses, and reliability, during the allocation of supercapacitors. In a 15-bar system, the appropriate storage cost is analyzed by separately calculating each of these three influencing factors and examining eight different scenarios. The calculations reveal that the impact of line losses is minimal, and the most suitable outcome is obtained concerning production costs and reliability. Consequently, it is recommended that the most appropriate planning for sustainable and uninterrupted electricity supply in power systems be made with the correct policies when allocating reserves to units.

Keywords: Microgrid, Sustainable Energy, Super Capacitor.

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının her aşamasında, kıymetli zamanını ayırıp değerli bilgilerini ve tecrübelerini benimle paylaşan, kendisine ne zaman danışsam büyük bir ilgiyle ve sabırla bana faydalı olabilmek için elinden gelenin fazlasını sunan kıymetli danışman hocam sayın Dr. Davut Sevim'e teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Eğitim-öğretim hayatım ve tüm yaşantım boyunca her zaman yanımda olan, maddi ve manevi desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen ve aldığım her kararda arkamda durup beni cesaretlendiren sevgili aileme en samimi duygularımla teşekkür ediyorum.

Merve ÇELİK
BATMAN-2024

İÇİNDEKİLER

ÖZET iv

ABSTRACT v

ÖNSÖZ vi

İÇİNDEKİLER vii

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xi

SİMGELER VE KISALTMALAR xii

1. GİRİŞ 1

1.1. Tezin Amacı 3

1.2. Literatür Araştırması 4

2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE GÜVENİRLİK 10

2.1. Güç Sistemlerine Güvenirlik 10

2.1.1. Güvenirliğin tanımı 10

2.1.2. Güvenirliğin önemi 11

2.1.3. Güvenilirlikte sistem türleri 13

2.1.3.1. Onarımsız sistemler 13

2.1.3.2. Onarımlı sistemler 14

2.1.4. Güvenilirlik analizinde güç sistemlerinin işlevleri bakımından kademleri 15

2.2. Güç Sistemlerine Sürdürülebilirik 16

2.3. Mikroşebekeler 17

2.3.1. Mikroşebeke kavramı 17

2.3.2. Mikroşebeke yapısı 19

2.3.3. Mikroşebekelerin sınıflandırılması 21

2.3.4. Mikroşebekelerde hiyerarşik kontrol 22

3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE ÜNİTE VE SÜPER KAPASİTÖR TAHSİSİ 25

3.1. Güç Sistemlerinde Ünite Tahsisi 25

3.1.1. Geleneksel yakıt bazlı yaklaşım 26
3.1.2. Kâra dayalı yaklaşım 26
3.2. Süper Kapasitörler ve Depolama Sistemleri 26
3.2.1. Süper kapasitörler 26
3.2.1.1. Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler (EDLC) 30
3.2.1.2. Psödokapasitörler 31
3.2.1.3. Hibrit kapasitörler 32
3.2.2. Enerji Depolama Sistemleri 34
3.2.3. Enerji depolamanın amacı ve faydaları 37
3.2.4. Süper kapasitör enerji depolama sistemleri 37
3.3. Ünite Tahsisi Teknikleri 39
3.3.1. Ünite tahsisi hakkında genel bilgiler 40
3.3.2. Geleneksel yakıt bazlı yaklaşım 40
3.3.3. Stokastik yaklaşım 40
3.3.4. Kâra dayalı yaklaşım 41
3.3.4.1. Ünite tahsisi için zamana dayalı kısıtlama 41
3.3.4.2. Ünite tahsisi için emisyona dayalı kısıtlama 42
3.3.4.3. Ünite tahsisi için yakıt bazlı kısıtlama 42
3.3.4.4. İletim kısıtlaması 42
3.3.4.5. Süper kapasitör planlaması 42
3.3.4.6. Sistem işletim sistemi gereksinimleri 42
3.3.5. Ünite tahsisi problem çözme teknikleri 43
3.3.5.1. Geleneksel teknikler 43
3.3.5.2. Geleneksel olmayan (klasik olmayan) teknikler 45
3.3.5.3. Temel hibrit algoritmalar 46
3.3.5.4. Hibrit karınca kolonisi optimizasyonu 46
3.3.5.5. Hibrit lagrange gevşemesi 47

3.3.5.6. Hopfield sinir ağı 47
3.3.5.7. Hibrit EP ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO) 48
3.3.5.8. Hibrit GA 48
3.3.5.9. Hibrit PSO 48
3.3.5.10. Hibrit bulanık mantık 48
3.3.5.11. Hibrit ACO Lagrange 49
3.3.5.12. Karışık kurbağa sıçrama algoritması 49
3.3.5.13. Bulanık ayarlı PSO (FTPSO) 50
3.3.5.14. Memetik algoritma 50
3.3.5.15. İkili/Gerçek kodlu PSO 50
4. MATERYAL VE YÖNTEM 52
4.1. Optimizasyonda Kullanılan Kısıtlar ve Maliyet Denklemleri 53
4.2. 15 Baralı Test Sistemi Parametreleri 54
4.3. Optimizasyon Algoritması ve Tahsis Kapasitesi 55
4.4. Sürdürülebilir enerji temelli güvenlik kısıtlı birim tahsis çözümü 58
5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA 63
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER 66
6.1. Sonuçlar 66
KAYNAKLAR 68
ÖZGEÇMİŞ 84

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2. 1. Koşullu sistemlerin arıza-çalışma durumu 14
Şekil 2. 2. Çalışma-arıza-tamir döngüsü. 15
Şekil 2. 3. Güç sistemleri güvenilirlik analizinde aşamalı seviyeler 16
Şekil 2. 4. Sürdürülebilir elektrik enerjisi sistemleri 17
Şekil 2. 5. Mikroşebeke yapısı 20
Şekil 2. 6. Mikroşebekenin sınıflandırılması 21
Şekil 2. 7. Mikroşebekelerde kontrol seviyeleri 24
Şekil 3. 1. Süper kapasitör yapısı ve basitleştirilmiş devre (H. Gualois, vd. 2008) 27
Şekil 3. 2. Süper kapasitörün şematik diyagramı 29
Şekil 3. 3. Süper kapasitörlerin sınıflandırılması. 30
Şekil 3. 4. Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitör (EDLC). 31
Şekil 3. 5. a) Psödokapasitör b) Hibrit süper kapasitör 33
Şekil 3. 6. EDLC, psödokapasitör ve hibrit kapasitörlerin belirli kapasitans değerleri (Shown I., *vd*. 2015) 34
Şekil 3. 7. Enerji depolama teknolojilerinin sınıflandırılması. 35
Şekil 3. 8. Kondansatör depolama sistemi. 38
Şekil 3. 9. Kapasitörlerin yapıları. 39
Şekil 4. 1. Sürdürülebilir enerji üzerinde güvenlik kısıtlı çözüm prosedürü 53
Şekil 4. 2. 15 Bara test sistemi modeli, 10 jeneratör,16 yük ve 5 süper kapasitör içerir. 55
Şekil 4. 3. Temel optimizasyonu akış şeması. 56
Şekil 4. 4. 3 bara, 3 generatör, 4 yük ve 1 süper kapasitör için test sistemi. 59
Şekil 4. 5. Bara kabul matrisinin sıfır olmayan noktaları. 62
Şekil 4. 6. P ve Vbus için program yakınsama grafiği. 62
Şekil 5. 1. Ünitelerin süper kapasitör miktarı dağılımı. 64
Şekil 5. 2. Süper kapasitör miktar maliyetleri. 64
Şekil 5. 3. Santrallerin yükleri, süper kapasitör ve sapma değerleri. 65

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1. 1. Süper kapasitörlerin elektriksel davranışını simüle eden model türlerinin özeti..... 8
Çizelge 2. 1. Uzun vadeli ve kısa vadeli güvenilirlik yöntemleri arasındaki temel farklar 13
Çizelge 3. 1. Enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması..... 36
Çizelge 4. 1. Generatör birimlerinin üretim kapasitesi bilgisi..... 57
Çizelge 4. 2. Kapasite kesinti olasılığı tablosu..... 58
Çizelge 4. 3. Hat verileri..... 60
Çizelge 4. 4. Vaka çalışması seçeneklerinin belirlenmesi..... 60
Çizelge 4. 5. Sekiz farklı vaka çalışmasının verileri..... 61

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

ε	: Dielektrik sabiti
A	: Yüzey alanı
C	: Kapasitans
d	: Kalınlık
F	: Farad
Fe_3O_4	: Demir
G_{SK}	: Süper Kapasitör Gücü
IrO_2	: İridyum
m^3	: metreküp
MnO_2	: Mangan
MW	: Megawatt
nm	: Nanometre
P_{max}	: En büyük Güçlü Santral
Q	: Elektrik Yükü
RuO_2	: Rutenyum
SK_{MM}	: Süper Kapasitör Marjinal Maliyet
t	: Çalışma Süresi
t_f	: Arızaya kadar süre
t_m	: Görev süresi
u_i	: Tahsis Edilen Ünite
V	: Voltaj
W	: Depolanan elektrostatik enerji
W	: Wat
W_h	: Wat-saat

Kısaltmalar

AC	: Alternatif Akım
ACO	: Karınca Kolonist Optimizasyonu
AG	: Alçak Gerilim
AK	: Aktif Karbon
AR	: Otomatik Regresyon
AS	: Karınca Sistemi
BPSO	: Binarize Parçacık Sürü Optimizasyonu
BT	: Elektrik Bataryaları
CNT	: Karbon Nanotüp
COPT	: Kritik Çalışma Noktası Eşiği
CPU	: Merkezi İşlem Birimi
DC	: Doğru Akım
DEK	: Dağıtık Enerji Kaynakları
DG	: Dağıtık Üretim
EDCL	: Elektrik Çift Katmanlı Kapasitör
EDS	: Enerji Depolama Sistemleri
EP	: Evrimsel Programlama
EYS	: Enerji Yönetim Sistemi
FAPSO	: Bulanık Uyarlamalı Parçacık Sürü Optimizasyonu
FC	: Yakıt Hücresi
FV	: Fotovoltaik
GA	: Genetik Algoritması
GENCO	: Generator Üretim Maliyeti
GKÜT	: Güvenlik Kısıtlı Ünite Tahsisi
GKÜT	: Güvenlik Kısıtlı Ünite Tahsisi
GSK	: Süper Kapasitör Gücü
HASP	: Hibrit Karınca Sistemi
HESS	: Hibrit Enerji Depolama Sistemleri
HGA	: Hibrit Genetik Algoritma
HRES	: Hibrit Yenilenebilir Enerji Sistemleri
ICA	: Emperyalist Rekabet Algoristması
ICGA	: İteratif Çaprazlamalı Genetik Algoritma
KDO	: Kesinti Değiştime Oranı

KIG : Kombine Isı ve Güç Üretimi
LCA : Hayat Boyu Değerlendirme
LOLE : Kayıp Fırsatlarının Beklenen Miktarı
LR : Hibrit Lagrangian Gevşeme Yöntemi
MA : Memetik Algoritma
MILP : Karma Tam Sayılı Doğrusal Programlama
NTPS : Net Termal Güç Santrali
PBÜT : Kar Fiyatına Dayalı Üretim Tahsisi
PCA : Temel Bileşen Analizi
PSO : Parçacık Sürü Optimizasyonu
PTS : Paralel Tabu Arama
RE : Yenilenebilir Enerji
RT : Rüzgâr Türbini
SA : Uyarılmış Tavlama Yöntemi
SFLA : Karışık Kurbağa Sıçrama Algoritması
SK : Süper Kapasitör
SMES : Süper İletken Manyetik Enerji Depolama
SO : Sistem Operatörleri
ÜB : Üretim Birimi
ÜK : Üretim Kapasitesi
ÜT : Ünite Tahsisi
ÜTP : Üretim Tahsisi Problemi
ÜTTE : Avrupa Aktarım Bağlantı Sistemi
VZA : Veri Zarflama Analizi
YEK : Yenilenebilir Enerji Kaynakları
YKB : Yük Kaybı Beklentisi
YSA : Yapay Sinir Ağları

1. GİRİŞ

Güç sistemlerinde, düşük maliyetli üretim için gerekli olan araştırmalar üretim planlaması ve yük dağıtımı dikkatlice yapılmalıdır çünkü etkili araştırma planları, bugün üretim yöntemlerinde yeni araştırmaların yerine geçmektedir. Bu planlarda etkili olan birçok etki parametresi bulunmaktadır, bu çalışmada üretim maliyeti, hat kayıpları ve güvenilirlik gibi parametreler dikkate alınarak en iyi sonuca çözüm bulunmuştur (Chiradeja, P., 2004; Zhiyuan, L., 2020). Bu parametrelerin yanı sıra, kayıp ve güvenilirliği dikkate almak sistemin daha sürdürülebilir çalışmasını sağlamaktadır. Güvenilirlik, bir sistemin veya öğenin belirli bir zaman aralığında tanımlanan bir görevi başarma yeteneğidir, sayısal bir özelliği vardır. Güvenilirlik temelli risk analizi sistemin önemli parçaları için yapılmalıdır (Kyu, H.J.. 2018). Bu analizler sayesinde, sistemi üretim maliyetleri, hat kayıpları ve güvenilirlik faktörleri doğrultusunda tasarlamak mümkündür. Bu çalışmada, iletim ve bakım planlaması, hizmet sürekliliğini sağlayarak gerçekleştirilebilir. Enerji üretim sistemlerinin güvenilirliğini artırmak için sistem güvenilirlik endeksleri hesaplanmalı ve derlenmelidir. Bu çalışma, günümüzün gelişen teknolojisiyle paralel olarak, en ekonomik ve zaman açısından en az kesinti sağlamak için bir durum çalışması yapmaktadır (Roy, B.. 2011). Bu durum, sistemin bileşenlerinin güvenilirliği, üretim maliyeti ve sistemdeki bu bileşenlerin kaybı ile ilgilidir. Sistemdeki öğelerin ve bağlantıların sayısı arttıkça, sistemin güvenilirliğini belirlemek daha zor hale gelir. Teknik faydalar, farklı parametrelerin iyileşme bileşik indeksini değerlendirerek nicelendirilebilir (Yun, W.J., 2009). Üretim ve dağıtımda etkili olan bu parametreleri dikkate alarak daha ekonomik ve güvenilir bir enerji arzı sağlanabilir. Ünite Tahsisi (ÜT) işleminde sadece üretim maliyetlerini değil, aynı zamanda hat kısıtlamalarını ve kayıplarını da dikkate alır. Ünite tahsisi problemi, optimum üretim birimlerinin başlatma ve durdurma koşullarını belirleyen bir optimizasyon problemidir, bu da güç üretimi planlamasında önemli bir husustur. Bu bağlamda, planlanan ünite tahsisi, üretim maliyetleri, hat kayıpları ve güvenilirlik faktörlerini dikkate alarak birimler arasında Süper Kapasitör (SK) miktarının optimal olarak tahsis edilmesine dayanmaktadır. Bu tahsisat yapılarak, ekonomik olduğu kadar güvenilir bir sonuç elde edilir. Bu sistemlerde, arz ve talep arasındaki dengesizliği önlemek için kullanılan süper kapasitör sistemi, en büyük sayıda senkron birim olarak alınır. Bu miktarı

ayarlamak için, bazı çalışmalarda geleneksel bir ölçüt olarak kullanılan süper kapasitör çevrim dışı en büyük jeneratörün kapasitesine eşit veya daha büyük olacak şekilde alınması planlanmaktadır. Bu kriter doğrultusunda, herhangi bir Üretim Birimi (ÜB) aniden devre dışı kalırsa, bu durumda yük kesintisi gerekli değildir. Ancak, bu kriter iki üretim birimi aynı anda devre dışı kalırsa yük kısıtının olmayacağını garanti etmez. Pi,max en büyük kapasiteli jeneratördür (MW). ui,t, dönem t (1: ayrılmış, 0: ayrılmamış) sırasında i birimin durumunu gösterir. Toplam Süper Kapasitör miktarı, aşağıdaki gibi sistemdeki süper kapasitör (MW) dönemi t ve i birimi olarak tanımlanır.

$$Süper\ Kapasitör\ (SK) = \max(u_{i,t}P_{i,max}) \tag{1.1}$$

Bu kriter, aynı anda kesintiler olabileceğini ve bu durumun iki jeneratör arasındaki ilişkiyi göz ardı ettiğini dikkate almaz (Chattopadhyay, D., 2002). Süper kapasitör gereksinimini belirlemek için çeşitli teknikler kullanılmaktadır (Shayesteh, E., 2010; Ahmadi, K. A., 2011). Çoğu çalışmada, süper kapasitörlerin en büyük ayrılmış üretim birimi kapasitesinde belirlenmesi esastır. Bu ölçüt üzerinde birçok varyasyon bulunmaktadır. Her sistemde, çevrim dışı birimler kabul edilebilir risk seviyesine ulaşmak için geliştirilmiştir (Kenneth B., 2017; Lannoye, E., 2015). Bu yöntem basit ve pratiktir, ancak süper kapasitör bu standartlara dayanarak belirlemek yetersizdir. En uygun taahhüt planlaması, doğrusal olmayan ve karmaşık tamsayılı optimizasyon problemlerinin analiz edilmesiyle formüle edilmiştir (Armando M. L., 2017). Kapasite maliyeti her zaman toplumsal ve ekonomik kayıplarla dengeleşmez. Eğer kapasite yeterli değilse, tüketiciler bu kayıplar karşısında zarar görebilirler. Başka bir yöntemde, süper kapasitör eşdeğerinin hesaplanmasındaki kesintiye önce olasılıksal hesaplamalarla yaklaşıldı (Zhao, B., 2006). Üretim biriminin zorunlu kesinti olasılığını dikkate alan bir hesaplama tekniği önerilmiştir, ünite tahsisi problemi üzerinde optimizasyonla ilgili ilk çalışmalar yapılmıştır (/Longlong, L., 2013). Bu yaklaşımın avantajı, depolama kısıtlarını ünite tahsisi formülasyonlarında hassas bir şekilde tutarak süper kapasitör optimize etmektir. Her dönemde, maliyet/fayda analizi, Süper Kapasitör Marjinal Maliyetinin (SK_{MM}) sağladığı fayda ile karşılaştırılır ve en uygun seviye hesaplanır. Başka bir amaç, sunulmayan enerjiye ilişkin beklenen toplumsal ve ekonomik maliyeti azaltmaktır. Bu yöntemin dezavantajı, hedef risk değerine

ulaşmadan önce birçok ünite tahsisi hesabı yapmak için yoğun dijital işlem gerektirmesidir (Wu, H., 1999). Birçok çalışmada, sistemde kullanılan malzemelerin güvenilirliği artırılarak güvenilirliğin karşılanması sağlanmaktadır. Böylece, bir arıza döneminde enerji üretim birimlerinin dağıtımı ve küçük üretim birimlerinin oluşturulmasıyla enerji arzının güvenilirliği artırılmaktadır (Deveikis, T., 2013). Bu geliştirilmiş yöntemde, üretim kaybı riskini analiz etmek için bir endeks kullanıldı; benzer çalışmalarda sadece hat kayıpları dikkate alınarak tahsisat yapılmıştır (Sobhy M. A.,2007), bu her zaman yeterli bir yaklaşım değildir. Çünkü bazen çok pahalı üretim maliyetlerinden enerji sağlamak sonucu olabilir, bu istenmeyen bir durumdur. Benzer şekilde, sadece güvenilirlik parametresi dikkate alınırsa (Ahmed A., 2014), bu yaklaşım çok popüler olsa da sonuç yine de tatmin edici olmayacaktır. Çünkü iyi güvenilirlik parametrelerine sahip bir sistemde, kayıplar ve maliyetler yüksek olmayacak ve ciddi yatırımlar gerektirmeyecektir. Son olarak, birimlerin üretim maliyetlerine dayalı tahsisatlar yapmak, sürdürülebilir enerji isteğine karşı gelerek kırılgan ve kesikli sistemlerin kullanılmasına neden olacaktır ve bu hiç tercih edilmez. Tüm bu olumsuzlukları önlemek ve etkili çözümler sunmak için, üretim maliyeti, hat kayıpları ve birim güvenilirlik parametrelerinin analiz edildiği bir yaklaşım geliştirilmiştir. Kesinti olasılığını azaltmanın yanı sıra, enerji üretimini daha makul bir maliyetle sağlamak ve uygun bir birim dengesi sağlamak da önemlidir. Bu çalışmanın ikinci bölümünde, elektrik sistemlerine taahhüt ve güvenilirliğin temel tanımları yapılmıştır; üretim maliyetlerinin hesaplanmasıyla ilgili açıklamalar da bulunmaktadır. Çalışmanın üçüncü bölümünde, güç sistemlerinde ünite tahsisi ve test sistemi bileşenleri hakkında bilgiler sunulmuş, SK_{MM} belirlenmesinde kullanılan akış diyagramı tanımlanmış, sürdürülebilir enerji temelli güvenlik kısıtlı birim taahhüdü için yeni bir yaklaşım ve her etki parametresi için bir vaka çalışması optimal olarak sunulmuştur. Dördüncü bölümde ise optimizasyon yöntemi açıklanmış ve yönteme ilişkin sonuçlar açıklanmıştır.

1.1. Tezin Amacı

Bu çalışmanın amacı, güç sistemlerinde düşük maliyetli üretimi sağlamak için üretim planlaması ve yük dağıtımı süreçlerinde, üretim maliyetleri, hat kayıpları ve birim güvenilirliği gibi kritik faktörlerin detaylı bir şekilde analiz edilerek dikkate alındığı bir

yöntem geliştirmektir. Bu yöntem, güç sistemlerinin sürdürülebilirliğini ve verimliliğini artırmak için tasarlanmıştır. Çalışmanın odak noktası, enerji üretim birimlerinin etkin bir şekilde tahsis edilmesi ve güvenilirlik temelli risk analizlerinin yapılarak sistemdeki en uygun üretim dengesinin sağlanmasıdır. Bunun yanı sıra, enerji üretim maliyetlerinin hesaplanması ve farklı etki parametrelerinin vaka çalışmaları yoluyla optimal bir şekilde sunulması da bu çalışmanın bir parçasıdır. Bu yöntemin güç sistemlerindeki etkinliği ve uygulanabilirliği üzerine ayrıntılı bir değerlendirme yapılmıştır.

1.2. Literatür Araştırması

Enerji sektörünün, enerji üretimi, iletimi ve kullanımı alanlarında benzeri görülmemiş bir büyüme ve zorluklarla karşılaşması beklenmektedir (Siddique, A., 2021; Armaroli, N., 2007). Çevre koruma konusundaki küresel farkındalığın artması ve enerji üretiminde fosil yakıtlara bağımlılığın azaltılması isteği, hükümetleri ve ana paydaşları geleneksel kaynaklar yerine yenilenebilir enerji kaynaklarıyla enerji üretimine yönelmeye zorlamıştır (Sen, S., 2017; Cantarero, M. M. V. 2020). Bu durum, çoğunlukla güneş, rüzgâr, jeotermal, mikro türbinler ve yakıt hücreleri gibi yenilenebilir kaynaklardan enerji üretimini içeren mikroşebeke kavramını ortaya çıkarmıştır. Mikroşebeke, ağırlıklı olarak dağıtık enerji kaynaklarından (DEK'ler) oluşur. Mikroşebekenin en önemli özelliklerinden biri, bu DEK'lerin bağımsız veya şebekeye bağlı konfigürasyonlarda özelleştirilmiş dağıtık üretim (DG) için gruplandırılabilmesidir (Muhtadi, A., 2021; Razmi, D., 2022).

Son on yılda, iklim değişikliği ve çevresel bozulma tüm dünya için büyük bir tehdit oluşturarak önemli bir uluslararası ilgi konusu haline gelmiştir. Araştırmacılar, dünya ekonomisini enerji kaynaklarının verimliliğini artırarak dönüştürecek ve sıfır emisyon seviyesine ulaşmayı ve sera gazı hedeflerini önemli ölçüde azaltmayı amaçlayan yeni bir büyüme stratejisi tanımlamayı hedeflemektedir (Gielen, D., 2019; Van Vuuren, D. P., 2017; Waisman, H., 2019) Bu hedeflere, yenilenebilir enerji kaynaklarını (YEK) kullanmaya odaklanan bir enerji dönüşüm süreci ile ulaşılabilir. Fosil kaynakların sınırlı bulunabilirliği, perakende elektrik fiyatlarındaki hızlı artış ve yenilenebilir enerji sektöründeki önemli gelişmeler, bu geçişi desteklemektedir.

Teknolojik gelişmeler sayesinde, sanayi ve konut kullanıcıları merkezi olmayan depolama yoluyla hem anlık hem de dolaylı olarak daha fazla enerji üretmekte ve

tüketmektedir (Alane, K., 2019; Tronchin, L.,2018). Ancak, YEK değişkenliği ve belirsizliği, arz ve talebin dengelenmesini zorlaştırmaktadır. Şebeke operatörlerinin bir önceliği, elektrik üretimi ve tüketiminin senkronizasyonudur (Jones, L. E. 2017). Kendi kendine yeterlilik kavramı, üretilen elektrik enerjisinin aynı yerde ya anında ya da depolama sistemlerini kullanarak tüketimini ifade etmektedir (Pötzinger, C., 2015). Yenilenebilir enerji üretim sistemleri ile depolama sistemlerinin bir arada kullanımı, kendi kendine yeterliliği önemli ölçüde artırabilmektedir.

Mevcut elektrik altyapısına mikroşebekelerin uygulanması, uzun iletim ve dağıtım hatlarına sahip büyük ölçekli enerji santrallerine dayalı geleneksel altyapıya kıyasla çok daha yüksek potansiyel faydalar sunmaktadır (Tur, M. N.,2024). Eskiden elektrik hizmetlerinin temel amacı, tüketicilere sadece güvenilir ve yüksek kaliteli enerji sağlamak olarak tanımlanırdı (Şenyapar, H. N. D., 2024). Ancak, enerji sektöründeki son teknolojik gelişmeler ve çevre konusundaki küresel farkındalık, elektrik hizmetlerini esnek, erişilebilir, güvenilir, ekonomik ve en önemlisi temiz ve yeşil enerji kaynaklarına dayalı enerji taleplerini karşılayan bir elektrik ağı sağlama zorunluluğuyla karşı karşıya bırakmıştır. Elektrik hizmetlerinin bu güncellenmiş hedeflerine ulaşmak için mikroşebekeler önemli bir rol oynayabilir; çünkü mikroşebekeler sadece karbon emisyonlarını azaltarak temiz enerji tedarikini sağlamakla kalmaz, aynı zamanda tüketicilerin fazla enerjiyi geri satabilmelerini sağlayarak onları prosumer (üreten tüketici) olarak güçlendirir (Sun, K., 2020).

Farklı yenilenebilir enerji kaynakları arasında, fotovoltaik (FV) ve rüzgar türbini (RT) sistemleri, zaman açısından birbirlerini tamamlayıcı bulunabilirlikleri ve azalan satın alma maliyetleri nedeniyle en çok tercih edilenlerdir (Roy, P.,2022; Mehrjerdi, H. 2020). Bu yenilenebilir sistemler, tek başına veya birleştirilmiş olarak hibrit yenilenebilir enerji sistemi (HRES) oluşturmak için dünya çapında çeşitli kullanıcıları (konut ve konut dışı) hem bağımsız hem de şebekeye bağlı sistemlerde desteklemek için geniş ölçüde araştırılmıştır. İki yenilenebilir enerji kaynağının bir arada kullanımı, gereken depolama sisteminin genel olarak azalmasına yol açar. Yenilenebilir bir sistemde depolama sistemlerinin varlığı, yenilenebilir kaynakların kesintili bulunabilirliğini azaltmak için kritik öneme sahiptir.

Küresel enerji arzı senaryosu, enerji kalitesi, kesinti süreleri, iletim ve dağıtım ağındaki kayıplar ve sera gazı emisyonları gibi faktörleri göz önünde bulundurarak, gelişmiş ülkelerdeki insanların, gelişmekte olan ülkelere kıyasla çok daha iyi bir enerji

arzına sahip olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Güç dağıtım sistemine mikroşebekelerin tanıtılması, yenilenebilir enerji tabanlı kaynaklar aracılığıyla enerji üretimi alanında öncü olarak kabul edildiğinden, bu durumu değiştirmede önemli bir rol oynayabilir. Bu durum, sadece daha verimli ve güvenilir bir enerji arzını sağlamakla kalmaz, aynı zamanda tehlikeli ve kirletici emisyonlardan arınmış daha iyi bir yaşam sürme fırsatı sunmaktadır. (Omer, A. M. 2008; Çakmak, F., 2024).

Yenilenebilir enerji tabanlı mikroşebekeler için en uygun enerji depolama stratejilerinin belirlenmesi, bu sistemlerin güvenilirliğini ve verimliliğini artırmak açısından önemlidir (Hossain, E., 2018). 1995 yılından bu yana yayımlanan en önemli makaleler üzerine yapılan kapsamlı bir incelemeye göre, enerji depolama süreçlerinde kullanılan elektrik bataryaları (BT) %77,1 oranında iken, hidrojen tankları %15,4 oranında kullanılmaktadır. FV-RT sistemlerine ek olarak, daha az ölçüde hidrolik depolama, süper kapasitörler, volan bataryası ve sıkıştırılmış hava gibi diğer depolama sistemleri de bulunmaktadır. Ayrıca, bir HRES, sistem güvenliğini ve kendi kendine yeterliliğini artırmak amacıyla termal, hidro ve katı atık üretim birimleri ile birleştirilebilir (Oymak, A., 2022).

Bununla birlikte, yenilenebilir enerji kaynaklarının dalgalı doğasını göz önünde bulundurarak, elektrik batarya sistemlerinin verimliliği ve ömrü, şarj/boşaltma süreçlerinde büyük elektriksel stres nedeniyle önemli ölçüde azalır. Sonuç olarak, elektrik bataryaları en çok kullanılan ve yüksek enerji yoğunluğu ile karakterize edilmiş olmalarına rağmen, düşük ve sabit yük değişimlerinde çalışmaya uygundur, yani düşük güç yoğunlukları ile çalışır. Diğer yandan, süper kapasitörlerde yüksek verimlilik, uzun ömür ve yüksek güç yoğunlukları nedeniyle çeşitli uygulamalar için dikkat çekmektedir, ancak düşük enerji yoğunlukları ile karakterize edilir. Enerji depolama uygulamalarında elektrik çift tabakalı kapasitörlerin, yalancı kapasitörlerin ve hibrit süper kapasitörün arıza mekanizmaları, ömür modellemesi ve güvenilirlik odaklı tasarımı, son literatürde ayrıntılı olarak açıklanmıştır (Elmorshedy, M. F., 2021). FV-RT HRES'e benzer şekilde, elektrik batarya ve SK'nin hibrit enerji depolama sistemi (HESS), aynı anda sistem güvenilirliğini ve kendi kendine yeterliliği artıran tamamlayıcı özellikleri vurgular. Genel olarak, HRES'in BT-SK HESS ile kombinasyonu, yükleme için %100 yenilenebilir enerji tatmininin gelişimi için umut verici bir çözümdür. Entegre BT-SK HESS, rüzgar-güneş enerjisi üretimindeki pürüzsüz değişimleri sağlar ve kontrol edilebilir bir çıkış gücü garanti eder. Ghaib ve

diğerleri, kırsal elektrifikasyon için son derece güvenilir ve sürdürülebilir bir bağımsız FV sisteminin yeni bir tasarım yöntemini, depolama teknolojileri olarak sıkıştırılmış hava enerjisi depolama ile SK'yi karşılaştırarak özetlemiştir (Ghaib K.,2017). Benzer şekilde, yakın zamanda yapılan bir araştırmada, bir off-grid ve izole mikrogrida entegre edilen bir FV sistemi ile süper kapasitör ve elektrik batarya entegre edilmiş ve bu kaynaklar arasında koordinasyonu sağlamak için bir enerji yönetim stratejisi önerilmiştir (Yin C.,2017). Süper kapasitör, elektrik bataryasının hızlı şarj/boşaltma döngülerini engelleyerek, genel kullanımını azaltmış ve ömrünü uzatmıştır. Sonuç olarak, 20-25 yıllık bir ömür ile bir HRES yatırım projesinde, bir SK'nın varlığı elektrik batarya değişimlerini azaltabilir. Yenilenebilir sistemlerle ve diğer depolama sistemleriyle birleştirilen süper kapasitör kullanımına ilişkin olarak dergide, atıflarda ve ilişkili en önemli makaleleri 09/04/2021 tarihinde Scopus'tan alınan şekilde göstermektedir (Scopus, 2021). Sayısal, simülasyon ve deneysel analizlerin sonuçlarını rapor ederek, süper kapasitör ve geleneksel bataryaların kombinasyonunun, uzak bölgelerdeki RE güç kaynağı sistemlerinin enerji depolama performansını iyileştirdiğini göstermiştir (Ma T., 2014). Roy ve diğerleri, gerçek veriler kullanarak Oak Ridge Ulusal Laboratuvarı'nda 1 MW şebekeye bağlı bir FV sistemine bağlı BT-SCap HESS kullanarak dört farklı gün boyunca, her mevsimi temsil eden simülasyon gerçekleştirmiştir (Roy P.K.S., 2019). Bu amaç için, farklı algoritmalar ekonomik açıdan karşılaştırılmıştır. HESS topolojileri, ilgili güç tahsis stratejisi, kontrol sistemi ve bağımsız yenilenebilir sistemin simülasyonu ve mali analizinde deneysel doğrulama diğer önemli yönlerdi (Jing W., 2018). Başka bir araştırma, yeni bir optimizasyoncu olan parazitizm-yırtıcılık algoritmasına dayanan yeni bir enerji yönetim stratejisini, hidrojen tüketimini en aza indirmek ve hibrit FV-BT-SCap-yakıt hücresi (FC) sisteminde güç dayanıklılığını artırmak için kullanılan diğer geleneksel ve programlanmış durum makinesi kontrol yaklaşımlarıyla karşılaştırmıştır (Fathy A., 2021). Benzer şekilde, Chong ve diğerleri, yalnızca bataryalı geleneksel depolama sistemine kıyasla batarya tepe akımını ve gücünü azaltmak için BT-SCap HESS'li bağımsız bir FV sistemi için optimal bir kontrol stratejisi önermiştir (Chong LW., 2016). Vargas ve diğerleri, BT-SCap HESS ile bağımsız bir FV sisteminin geçici analizine yönelik başka bir model önermiştir. Önerilen harmonik alan tabanlı model, zaman alanı tabanlı modele ve geleneksel genişletilmiş harmonik alan tabanlı modellere kıyasla hesaplama yükünü azaltmış ve PSCAD/EMTDC simülasyon aracı ile doğrulanmıştır (Shayeghi H., 2021; Vargas U, 2019). Salameh ve diğerleri, BT-

SCap HESS ile bağımsız hibrit FV, elektrolizör, depolama tankı, FC ve dizel jeneratör güç sisteminden oluşan karmaşık bir sistemi analiz etmiştir (Salameh T.,2021) Dinamik, enerji, ekonomik ve çevresel göstergeler dikkate alınarak sistem optimize edilmiştir.

Süperkapasitörlerin (SC'lerin) elektriksel davranışını simüle eden dört farklı model, literatürde yaygın olarak incelenmekte ve çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Bu modellerin her biri, SC'lerin elektriksel özelliklerini farklı açılardan temsil etmekte ve belirli avantajlar ile sınırlamalara sahiptir. Çizelge 1. 1'de bu modeller, kapsamlı bir şekilde ele alınarak karşılaştırılmış ve değerlendirilmeleri için gerekli tüm kritik parametreler dikkate alınarak sistematik bir özet sunulmuştur. Bu tablo, kullanıcıların modeller arasındaki farkları kolayca anlamalarını ve belirli bir uygulama için en uygun modeli seçmelerini kolaylaştırmak amacıyla hazırlanmıştır. Modellerin davranışsal farklılıkları, doğruluk düzeyleri, hesaplama gereksinimleri ve pratikteki uygulanabilirlikleri gibi önemli kriterler de tabloya dahil edilmiştir. Bu sayede, SC'lerin farklı çalışma koşulları altında nasıl performans göstereceklerini öngörmek ve model seçiminde bilinçli kararlar vermek mümkün hale gelmiştir. (Zhang, L.,vd. 2018).

Çizelge 1. 1. Süper kapasitörlerin elektriksel davranışını simüle eden model türlerinin özeti

Model	Avantaj	Dezavantaj	Referans
Akıllı modeller	İyi modelleme yeteneği; istenen model çıktısını etkileyen faktörlerin açıklanması	Eğitim verisi kalitesine ve miktarına duyarlı; dayanıksız	Hu X, vd. 2022; Soualhi A, vd. 2018; Wu C, vd. 2022; Eddahech A, vd. 2021; Weigert T, 2021;
Kesirli sıralı modeller	Deneysel verilere daha iyi uyum sağlama yeteneği; az sayıda model parametresi	Yoğun hesaplama;	Martynyuk V, vd. 2015; Bertrand N, vd. 2020; Martín R, vd. 2018; Dzieliński A, vd. 2020; Freeborn TJ, 2013; Gabano J-D, vd. 2015
Eşdeğer devre modelleri	Fiziksel-kimyasal reaksiyonların iç açıklaması; Yüksek mümkün doğruluk	Karmaşık hesaplama; Bazı parametrelerin ölçülemezliği	Wang H., vd. 2011; Yu A., vd. 2013; Verbrugge M, vd. 2005; Allu S, vd. 2014;

Elektrokimyasal modeller	Orta düzeyde doğruluk; nispeten kolay uygulama ve model tanımlama	Fiziksel anlamların yokluğu; yaşlanma sürecine duyarlı	Rajani SV,vd.2015; Chai R,. vd. 2018; Weddell A, vd. 2011; Logerais P.O,. vd. 2015; Zhang L, vd. 2022; Musolino V, vd. 2021; Torregrossa D, vd. 2019; Zhang L, vd. 2021; Parvini Y, vd. 2022

Mikroşebekelerin dünya çapında geniş çapta benimsenmesinin temel nedeni, enerji üretimi için ağırlıklı olarak yenilenebilir enerji tabanlı kaynaklardan oluşmasıdır. Bu özellik, mikroşebekeyi olağanüstü kılarken, yenilenebilir kaynakların kesintili doğası nedeniyle mikroşebekenin entegrasyonunu ve işletimini de zorlaştırmaktadır. Bu sorunu aşmak için yerel olarak uygulanan topluluk mikroşebekeleri gibi farklı alternatifler vardır ve bu mikroşebekeler elektriğin depolanmasını ve dağıtımını kontrol edebilir. Diğer alternatifler arasında yüksek yoğunluklu enerji depolama tesislerinin kullanımı da bulunmaktadır. Bu alternatifler, sistemin genel güvenilirliğini artırmaktadır (Shaqsi, A. Z. A., 2020; Oymak, A., 2022; Shobol, A., 2019).

Mikroşebekelerde enerji depolama stratejilerinin en önemli bileşenlerinden biri olan süper kapasitörler, yüksek verimlilik, uzun ömür ve yüksek güç yoğunlukları gibi avantajlar sunmaktadır. Ancak, düşük enerji yoğunlukları nedeniyle yalnız başına yeterli olmayabilirler. Bu nedenle, enerji depolama sistemlerinin etkinliğini artırmak için batarya ve süper kapasitörlerin hibrit kullanımı önerilmektedir. Batarya-SK hibrit enerji depolama sistemleri (HESS), yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili doğasını dengeleyerek, mikroşebekelerin güvenilir ve sürekli bir enerji arzı sağlamasına yardımcı olmaktadır (Shobol, A., 2017).

Sürdürülebilir enerji temelli mikroşebekelerde, güç gereksinimlerinin maliyet ve kayıp parametreleri dikkate alınarak, optimum süperkapasitör tahsisi, mikroşebekenin genel performansını ve verimliliğini artırmak açısından kritik öneme sahiptir. Bu, mikroşebekenin maliyet etkinliğini artırırken, enerji kayıplarını minimize ederek çevresel faydalar sağlar. Bu bağlamda, süper kapasitörlerin optimum tahsisi, enerji depolama sistemlerinin maliyet etkinliğini ve performansını artırarak, mikroşebekelerin sürdürülebilir ve güvenilir bir enerji arzı sağlamasına katkıda bulunur.

2. GÜÇ SİSTEMLERİNDE SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK VE GÜVENİRLİK

Elektrik talebini karşılayacak şekilde sürdürülebilir ve kesintisiz elektrik üretip dağıtmak için bağlantı kriterlerinin sağlanması, tedarik güvenilirliğine katkıda bulunur. ÜTTE'nin (Avrupa Aktarım Bağlantı Sistemi) bağlantı kriterlerinin sağlanması, tedarik güvenilirliği açısından önemlidir. Tedarik güvenilirliği, elektrik enerjisinde kalite koruması için de önemlidir. Güç dengesi ve sistem frekansının kabul edilebilir aralıkta olması için tedarik güvenilirliği kritiktir. Frekans kontrolü sağlayarak kaliteli enerji sağlar. Dağıtım sistemlerinin yeniden yapılandırılması için ortak hedefler vardır, bu hedefler, iletim kayıplarını en aza indirmek ve/veya güvenilirliği ve optimal planlamayı artırmaktır (Tur M.R., 2019 ve Zhaolong, W., 2017). Bu çalışma, dağıtım sistemlerinde depolama planlamasını yeniden yapılandırmak için besleyici tabanlı birimlerin en iyi kombinasyonunu sağlar; bu, amaç fonksiyonunu minimize eden bir kombinasyonel optimizasyon problemdir. Bu süreçte kullanılan kısıtlamalar, maksimum ve minimum depolama kapasitesine sahip birimlerin planlama kısıtlamaları, hat kayıpları ve hat güvenilirliğidir.

2.1. Güç Sistemlerine Güvenirlik

2.1.1. Güvenirliğin tanımı

Güvenilirlik kavramı, genellikle bir cihazın veya sistemin belirli bir süre içinde belirli koşullar altında istenilen amacı yerine getirebilme olasılığı olarak tanımlanmaktadır. Bu tanım, birkaç önemli unsuru içermektedir. İlk olarak, güvenilirlik bir olasılık kavramıdır. Yani, bir cihazın veya sistemin güvenilirliği, belirli bir zamanda belirli bir koşul altında amacını yerine getirme olasılığıyla ilgilidir. Bu olasılık, genellikle yüzde cinsinden ifade edilir ve bir cihazın ne kadar güvenilir olduğunu değerlendirmek için kullanılmaktadır. İkinci olarak, güvenilirlik kavramı yeterli performansı içerir. Bir cihazın veya sistemin güvenilir olabilmesi için, istenilen amacı yerine getirme olasılığının yüksek olması gerekmektedir. Yani, cihazın veya sistemin beklenen performansı sergileme kapasitesi önemlidir. Üçüncü olarak, güvenilirlik zamanı kapsar. Bir cihazın veya sistemin güvenilir olabilmesi için, belirli bir süre içinde istenilen amacı yerine getirebilme olasılığının değerlendirilmesi

gerekmektedir. Bu süre genellikle bir cihazın ömrü boyunca veya belirli bir işlem süresi içinde ifade edilir. Son olarak, güvenilirlik kavramı çalışma koşullarını içerir. Bir cihazın veya sistemin güvenilirliği, belirli çalışma koşulları altında değerlendirilmektedir. Bu koşullar, cihazın kullanıldığı ortamın özellikleri, kullanım sıklığı ve diğer faktörler gibi unsurları içerebilir. Bu unsurların bir araya gelmesiyle, bir cihazın veya sistemin güvenilirliği değerlendirilir ve bu değerlendirme genellikle ürünün tasarımı, üretimi ve kullanımı sürecinde önemli bir rol oynamaktadır.

Genel olarak, güvenirlik, yük değişimleri ve geçmiş tecrübenin gelecekteki performansın önceden tahminlerini oluşturmasına yardımcı olduğu, bir sistemin görevini yerine getirme yeteneğini belirtmektedir (Billinton, R., 1991). Güvenirlik değerlendirmesinde kullanılan indisler olasılıksaldır ve dolayısıyla kesin tahminler sağlamazlar.

Güvenilirlik analizi için öncelikle sistemin önceki dönemdeki davranışının bilinmesi gerekmektedir. Analiz sırasında güvenilirliğin ölçütü olabilecek çeşitli değişkenler belirlenir ve ardından bu değişkenler çeşitli yöntemlerle hesaplanır. Bu yöntemlerin tamamında birimlerin gelecekteki davranışları detaylı bir şekilde incelenir. Elektrik güç sistemlerinde güvenilirliğin tanımı, yeterlilik ve güvenlik olarak yaygın bir şekilde yapılmaktadır (Kautz, K., 2014).

Yeterlilik, sistem bileşenlerinin planlı ve plansız kesintilerini göz önünde bulundurarak, üretim, iletim ve dağıtım tesislerinden kaynaklanan tüm ihtiyaçların sağlanması ve talebin karşılanmasının güvence altına alınması anlamına gelir. Beklenmedik durumların ardından, sistem, herhangi bir dinamiği ihmal etmeden bir durumdan diğerine geçişlerle ilgili olarak kararlı bir noktaya ulaşmış kabul edilmektedir (yani sistem kararlı durumdadır) (Billinton, R., 1996).

Güvenlik, bir sistemin arızalardan, kabloların, iletim hatlarının, jeneratörlerin ve diğer birçok bileşenin devre dışı kalmasından kaynaklanan bozulmalara ve beklenmedik durum koşullarına dayanma kabiliyetini ifade etmektedir. Güvenlik analizi, beklenmedik durum olaylarından sonra sistemin geçici tepkisini değerlendirir ve geçici dalgalanmalardan kaynaklanan her türlü aşamalı olayı dikkate alır.

2.1.2. Güvenirliğin önemi

Elektrik güç sisteminin güvenilirliği, güç dağıtım sisteminin planlanması, tasarımı ve işletilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Elektrik dağıtım şebekelerinin temel hedefi, tüketicilere kesintisiz elektrik enerjisi sunarken aynı zamanda kabul edilebilir bir hizmet kalitesi seviyesini sürdürmektir ve bunu mümkün olan en düşük maliyetle gerçekleştirmelidir. Güvenilirlik, başka bir açıdan bakıldığında, kesintilerin maliyetini ifade eder. Bir dağıtım sisteminin hizmet kalitesi, güvenilirlik endeksleri aracılığıyla değerlendirilebilir. Ayrıca, şebekelerde kullanılan otomasyon sistemleri, bu endekslerin istenilen seviyeye yükseltilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu sayede enerji kesintilerinde belirgin bir azalma sağlanabilir.

Sistem güvenilirliği bir güç sisteminin iki temel yönünü temsil eder: sistem yeterliliği ve sistem güvenliği. Bu iki terim en iyi şekilde şu şekilde tanımlanabilir. Yeterlilik, sistem içerisinde tüketici yük talebini karşılayacak yeterli tesislerin varlığıyla ilgilidir. Bunlar, yeterli enerji üretmek için gerekli tesisleri ve enerjiyi gerçek tüketici yük noktalarına taşımak için gereken ilgili iletim ve dağıtım tesislerini içermektedi. Bu nedenle yeterlilik, sistem bozukluklarını içermeyen statik koşullarla ilişkilidir. Güvenlik, sistemin sistem içinde ortaya çıkan aksaklıklara yanıt verme yeteneği ile ilgilidir. Bu nedenle güvenlik, sistemin tabi olduğu her türlü tedirginliğe verdiği tepkiyle ilişkilidir. Bunlar, hem yerel hem de yaygın rahatsızlıklarla ve büyük üretim ve iletim tesislerinin kaybıyla ilişkili koşulları içerir (Billinton, R., 1984).

Güvenirlik analizi çalışmaları iki amaç için yürütülmektedir. İlk olarak, sistem planlamasına yardımcı olmak için uzun vadeli değerlendirmeler yapılır. Daha sonra, kısa vadeli değerlendirmeler gündelik operasyon kararlarında yardımcı olur. Güç sistemleri değerlendirmesinde kullanılan tipik güvenirlik indisleri şunlardır (Prada, J. F., 1999):

- Yük kesme indeksleri: Ortalama yük, zaman periyodu boyunca kesilmesi,
- Yük olasılığı kaybı: Mevcut üretim miktarını aşma olasılığı,
- Frekans ve süre indeksleri: Ortalama dönem sayısı ve kesinti süresi.

Güç sistemi güvenilirliği, bir güç sisteminin güvenilirlik endekslerini değerlendirmek için olasılıksal tekniklerden yararlanmaktadır. Analiz dönemine bağlı olarak, güç sistemleri güvenilirliği uzun vadeli güvenilirlik değerlendirmesi ve kısa vadeli güvenilirlik değerlendirmesi olarak kategorize edilebilir. Uzun vadeli güvenilirlik değerlendirme teknikleri, üretim ve iletim genişleme planlaması gibi güç

sistemleri planlama problemlerinde uygulama alanı bulmaktadır (R. Billinton, 1996). Kısa vadeli güvenilirlik, bir güç sisteminin güç sistemlerinin çalışması sırasında bozulmalara dayanma yeteneğinin ölçer. Kısa vadeli güvenilirlik yöntemlerinin uygulamaları operasyonel planlamada ve gerçek zamanlı operasyonda bulunur.

Çizelge 2. 2. Uzun vadeli ve kısa vadeli güvenilirlik yöntemleri arasındaki temel farklar

Uzun Vadeli Güvenilirlik	Kısa Vadeli Güvenilirlik
Arıza olasılıkları zamandan bağımsızdır (kararlı durum olasılıkları)	Arıza olasılıkları zamana bağlıdır (geçici durum olasılıkları)
Sistemin başlangıç durumundan bağımsız	Sistemin başlangıç durumuna bağlı
Bileşenlerin onarım süreçleri modellenir	Bileşenlerin onarım süreçleri göz ardı edilir

2.1.3. Güvenilirlikte sistem türleri

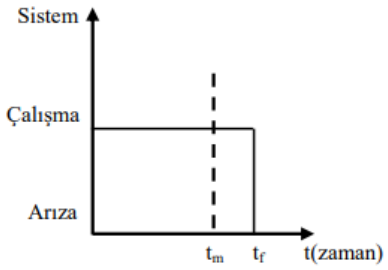
Belirli bir görevi yerine getirmek için yapılandırılan sistemlerde güvenilirlik analizi iki ayrı grupta değerlendirilmektedir.

1. Onarımsız, koşullandırılmış, sürekli devrede olmayan sistemler

2. Onarımlı, sürekli devrede olan sistemler (Ersalıcı, H. 2013; Chowdhury, A., & Koval, D. 2011).

2.1.3.1. Onarımsız sistemler

Bu sistemlerde, işletim koşulları içinde meydana gelebilecek eleman arızalarına rağmen sistem kesintiye uğramamaktadır. Bu tür sistemlerde, arızalanan bir eleman pasif hale getirilebileceği gibi, aynı zamanda yeni bir eleman ile değiştirilebilir. Onarımsız sistemlerde, seri elemanlardan oluşan yapılar arızalanan bir elemanın sistemin işleyişine zarar verme potansiyeli taşımaktadır. Öte yandan, paralel elemanlardan oluşan onarımlı sistemlerde ise arızalanan bir elemanın sistemin işleyişine zarar verme olasılığı daha düşüktür (Brown, R. E. 2017).



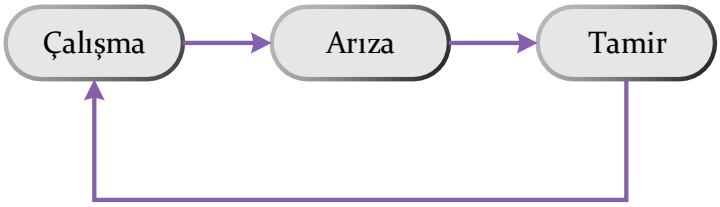
Şekil 2. 1. Koşullu sistemlerin arıza-çalışma durumu

Şekil 2.1'de, bir sistemin görev süresi boyunca meydana gelen arıza-çalışma durumu grafiksel olarak gösterilmektedir. Burada, tm görev süresini ve tf arızaya kadar olan süreyi ifade etmektedir; tf'nin tm'den büyük olduğu durumda sistem güvenilir olarak kabul edilmektedir (Brown, R. E. (2017)

2.1.3.2. Onarımlı sistemler

Bu tip sistemler, elemanlarının bakım, tamir, değiştirme veya arızalı bir elemanın yerine başka bir elemanın atanabilme özelliklerine sahiptir. Elektrik enerjisi üretim, iletim ve dağıtım sistemleri, bu kategoride yer alan örneklerden biridir. Özellikle kötü hava koşulları, kısa devre, gerilim bozuklukları gibi sebeplerle meydana gelebilecek bir arıza durumu, sistemin normal çalışmasını etkileyerek tüketicilere enerji sağlama sürecini sekteye uğratabilir. Bu tür sistemlerdeki arızalanan bir elemanın tamir edilmesi veya değiştirilmesiyle, enerji üretimi, iletimi veya dağıtımı tekrar sağlanabilir. Bu süreç, sistemin güvenilirliğini artırma amacını taşır ve tüketicilere kesintisiz bir enerji temini sağlama hedefiyle uyumludur. Elemanların esnek bir şekilde müdahale edilebilir olması, sistemin genel performansını artırarak, arızalara hızlı bir yanıt verme ve enerji sürekliliğini sağlama yeteneğini artırır.

Onarımlı sistemlerdeki elemanlar, çalışma süreleri içinde görevlerini şu şekilde devam ettirirler: Çalışma ➔ Arıza ➔ Tamir ➔ Çalışma ➔ Arıza ➔ Tamir ➔ … (Ersalıcı, H. (2013).

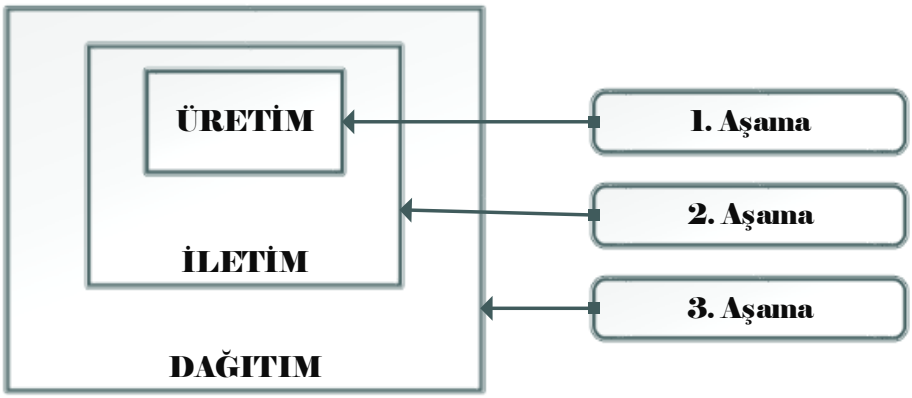


Şekil 2. 2. Çalışma-arıza-tamir döngüsü

Herhangi bir elemanın çalışma süresi boyunca nasıl davranacağı Şekil 2.2. ile gösterilebilir.

2.1.4. Güvenilirlik analizinde güç sistemlerinin işlevleri bakımından kademleri

Elektrik güç sistemleri, işlevsellik açısından üretim, iletim ve dağıtım bölgelerine ayrılarak incelenmektedir. Bu üç temel bölge, güç sistemlerinin karmaşık bir yapıya sahip olmalarını beraberinde getirmektedir. Her bir bölge, kendi özel güvenilirlik indislerine sahip olup, bu indisler sistemin sağlamlığını ve sürekliliğini değerlendirmek amacıyla kullanılmaktadır. Üretim, iletim ve dağıtım bölgelerinin farklı güvenilirlik özelliklerine sahip olmaları, güvenilirlik analizlerinin detaylı bir şekilde ele alınmasını gerektirmektedir. Bu bağlamda, güç sisteminin güvenilirliğini değerlendirmek için aşamalı bir analiz uygulanmalıdır. İlk aşama, üretim sürecini kapsarken, ikinci aşama üretim ve iletim süreçlerini içermekte, üçüncü aşama ise üretim, iletim ve dağıtım süreçlerini bir araya getirmektedir. Her aşama, sistemdeki özel güvenilirlik parametrelerini inceleyerek bölgesel farklılıkları anlamak ve analiz etmek için tasarlanmıştır. Bu yöntem, güç sistemlerinin genelinde güvenilirlik açısından kapsamlı bir değerlendirme sağlamak amacını taşımaktadır (Ersalıcı, H. (2013).



Şekil 2. 3. Güç sistemleri güvenilirlik analizinde aşamalı seviyeler

2.2. Güç Sistemlerine Sürdürülebilirik

Sürdürülebilirlik kavramı, çeşitli alanlarda geniş bir kullanım alanına sahiptir. Sürdürülebilirlik terimi, enerji üretim teknolojilerindeki ilerlemeler sonucunda özellikle enerji kaynağının yenilenebilirliği ile birlikte ele alınmıştır. Ancak, enerji dönüşümlerinin sürdürülebilirliği genellikle Hayat Boyu Değerlendirme (Life Cycle Analysis, LCA) ve ekserji (kullanılabilirlik) analizleri ile birlikte ele alınmaktadır. LCA, bir üretim sürecine giren ve bu süreç sonunda ortaya çıkan malzeme, enerji, madde salımı, katı atık ve maliyet gibi faktörlerin çevre ile etkileşimini değerlendirmektedir.

Sürdürülebilirlik, literatürde genellikle "gelecekte üretebilme yeteneğinin korunması" olarak tanımlanmaktadır (Solow, R. (2014). Enerji üretimi bağlamında, bu durum doğal kaynakların kullanılabilirliği ile doğrudan ilişkilidir. Bir başka tanıma göre, sürdürülebililik, "yeryüzündeki yaşamın bütünlüğünü sağlama ve iyileştirme" anlamına gelir (Onbaşıoğlu, S.U., 2022). Enerji üretiminin sürdürülememesi durumunda, bu bütünlüğün giderek bozulacağı açıktır. Bu bağlamda, LCA yaklaşımı ile "Kullanılabilirliğin Az Harcanması" birbirini tamamlayan metodolojilere dönüşebilir. İki yaklaşımın birleştirilmesi, örneğin, biyoyakıt kullanımının, bazen benzin kullanımından daha fazla kullanılabilirlik kaybına yol açabileceğini ortaya koyabilir (Rodríguez, M. R., vd. 2011). Bu durum, enerji kaynakları ve kullanımının sürdürülebilirliği üzerine daha geniş bir bakış açısını vurgulamaktadır.

Sürdürülebilir elektrik güç sistemlerinin sistem operatörleri (SO'lar), karmaşık yapılarından kaynaklanan teknik zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır. Bu zorluklar, sistemlerin güvenilirliği ve ekonomik işletimi üzerinde etkili olmaktadır (Moslehi, K.,

& Kumar, R. 2010). Özellikle, büyük ölçekli YEK kullanımı, sistem işletimi sırasında belirsizliklerin artmasına neden olmakta ve üretim ile yük arasındaki dengeyi korumayı zorlaştırmaktadır. Bu durum, yük atma riskini artırarak sistem operatörlerini daha dikkatli ve etkili bir şekilde planlama yapmaya yönlendirmektedir (Makvand, S. B. (2014). Ayrıca, iletim sistemleri ve dağıtım şebekelerinden kaynaklanan ek belirsizlik kaynakları, sistemin güvenilirliği üzerinde ek bir katman oluşturmaktadır. Bu faktörlerin bir araya gelmesi, sistem operatörlerinin enerji kaynaklarını yönetirken daha uygun stratejiler geliştirmelerini gerektirmektedir. Bu bağlamda, sürdürülebilir enerji sistemlerinin operasyonel zorluklarını anlamak ve bu zorluklarla başa çıkmak için yeni stratejiler geliştirmek, güvenilir ve ekonomik bir elektrik güç sistemini sürdürülebilir kılmak için önemlidir.

Şekil 2. 4. Sürdürülebilir elektrik enerjisi sistemleri

2.3. Mikroşebekeler

2.3.1. Mikroşebeke kavramı

Mikroşebekeler; küçük ölçekli ticari bir bölge, bir toplu konut ya da bir banliyö mevkisinde, kamu topluluğu olarak küçük bir sanayi sitesinde, bir belediye bölgesinde elektrik enerjisi ve ısınma için tasarlanmış AG (alçak gerilim) sistemler, kombine ısı ve güç üretim (KIG) şebekeleri olarak tasarlanmıştır. Mikroşebekeler esasen aktif dağıtım şebekelerdir çünkü dağıtım gerilim seviyesinde dağıtık üretim (DG) sistemleri ve farklı yüklerin bir arada bulunduğu bir sistemdir. Jeneratörler veya mikrokaynaklar,

mikroşebekelerde genellik dağıtım geriliminde güç üretmek için konvansiyonel olmayan yenilenebilir DEK'lerin entegrasyonu olarak birlikte çalışırlar. Operasyonel açıdan bakıldığında ise mikrokaynakların tek birleştirilmiş bir sistem olarak çalışmasını sağlamak için gerekli esnekliği sağlamak ve belirtilen güç kalitesini ile enerji çıktısını korumak amacıyla mikroşebekenin güç elektroniği ara yüzleriyle ve kontolcüleriyle donatılmış olması gerekir. Bu kontrol eksikliği, mikroşebekenin güvenilirlik ve güvenlik için yerel enerji ihtiyaçlarını karşılayan bir birim olarak ana şebekeye bağlanmasına izin verecektir (Kabalcı, E., *vd*. 2021).

Mikroşebeke, gelişmiş otomasyon ve bilgi teknolojilerinin entegrasyonuyla oluşan küçük ölçekli bir elektrik ve iletişim altyapısını ifade eden bir terimdir. Bu altyapı, elektrik şirketleri, politika yapıcılar, tüketiciler ve diğer endüstriyel katılımcılar arasında elektrik tedariki ve ilgili hizmetlerde meydana gelen derin değişimleri tanımlamaktadır.

ABD Enerji Bakanlığı raporunda, mikroşebekeler için şu tanımı sunmuştur (Deru, M., *vd*. 2011): "Mikroşebeke, DEK ve yerel yüklerin entegrasyonunu sağlayan yerel bir enerji şebekesidir. Mikroşebekeler, şebekeye paralel veya ada modda çalışarak, elektrik şebekesindeki bozuculara karşı yüksek bir güvenilirlik ve dayanıklılık düzeyi sağlamak üzere özelleştirilmiş yapılardır. Bu gelişmiş entegre dağıtım sistemi, elektrik tedarik kısıtlarının olduğu yerlerde, uzak bölgelerde ve kritik yüklerin korunması ve ekonomik olarak kalkınmanın gerektiği yerlerde kullanım ihtiyacını karşılamaktadır."

Ayrıca Avrupa Birliği tarafından fonlanan ENK5-CT-2002-00610 nolu projedeki tanıma göre (Dimeas, A., & Hatziargyriou, N. 2004):
"Mikroşebekeler, volanlar, enerji kapasitörleri ve bataryalar gibi depolama sistemleri ve esnek yüklerle birlikte mikro türbinler, yakıt hücreleri, FV gibi DEK'lere sahip alçak gerilim dağıtım sistemlerini içermektedir. Bu tür sistemler şebekeye bağlıysa ada modda, ana şebekeden ayrılmış ise otonom olarak çalıştırılabilir. Şebekedeki mikrokaynakların çalışması, verimli bir şekilde yönetilir ve koordine edilirse genel sistem performansına fayda sağlayabilir."

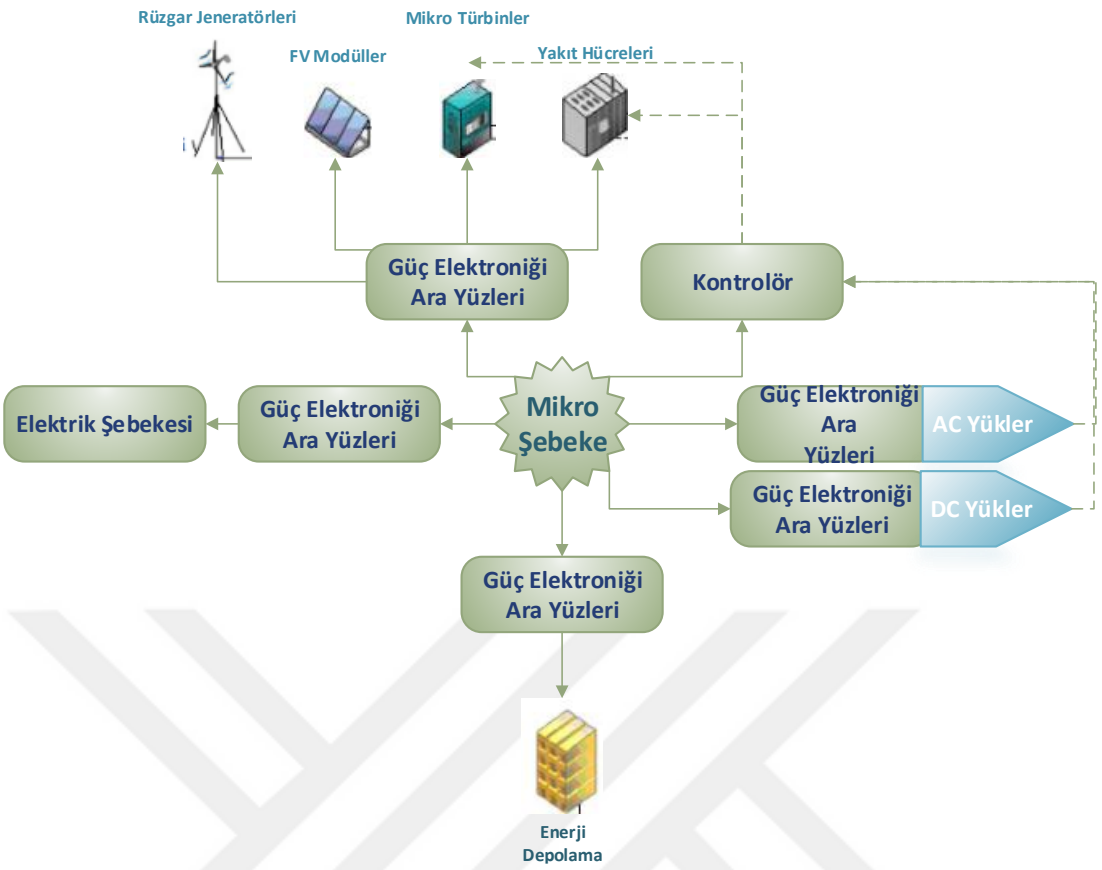
Günümüzde, geleneksel merkezi enerji üretim sistemlerine alternatif olarak, dağıtık üretim uygulamalarının sayısı sürekli bir artış göstermektedir. Dağıtık üretim terimi, kullanıcı tarafında yerleşik olarak faaliyet gösteren herhangi bir küçük ölçekli güç sistemini ifade etmektedir (Singh T., vd. 2017). Mikroşebekeler, yenilenebilir kaynaklar arasında güneş enerjisi (FV), rüzgâr türbinleri (RT) ve küçük ölçekli hidroelektrik türbinleri gibi kaynakları içermekte olup, ihtiyaç durumunda yenilenebilir olmayan kaynaklar arasında ise dizel türbinler bulunmaktadır (Zia R. vd. 2021). Mikroşebeke

yapıları, dağıtık üretimin sunduğu avantajlardan faydalanmak amacıyla bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır.

2.3.2. Mikroşebeke yapısı

Mikroşebekeler, enerji üretimindeki çeşitlilikleri ile birlikte enerji tüketiminde verimliliği artırarak düşük karbon salınımına katkı sağlamaktadır. Bu sistemler, enerji yönetimi konularını ele alarak kritik unsurları içermekte olup, enerji arzının talebe uygun şekilde düzenlenmesi, enerjinin etkili bir biçimde kullanılması ve güç kalitesinin korunması gibi hususları içermektedir. Bu nedenle, mikroşebekelerde etkili bir enerji yönetimi, sistem güvenilirliği, sürdürülebilirlik ve ekonomiklik açısından büyük bir öneme sahiptir.

Mikroşebeke sistemleri, temel şebekenin bir parçası olup endüstriyel/ticari tüketici uygulamalarını içerir ve şebeeden bağımsız veya şebeke bağlantılı modda işleyebilirler. Şekil 2.5'te, mikroşebeke yapısı ve bu yapının içerdiği rüzgâr türbinleri, mikro türbinler, yakıt hücreleri ve FV modüller gibi kaynaklar gösterilmektedir. Mikroşebeke sistemleri, güç elektroniği dönüştürücülerini içeren bir ara yüzey birimi üzerinden şebekeye bağlanır. Güç elektroniği dönüştürücülerinin sisteme entegrasyonu, bağlı olduğu sistemin güç kalitesini etkileyebilir ve yeni kontrol düzenlemelerini gerektirebilir (Basa Arsoy A., Perdahçı C., 2010).



Şekil 2. 5. Mikroşebeke yapısı

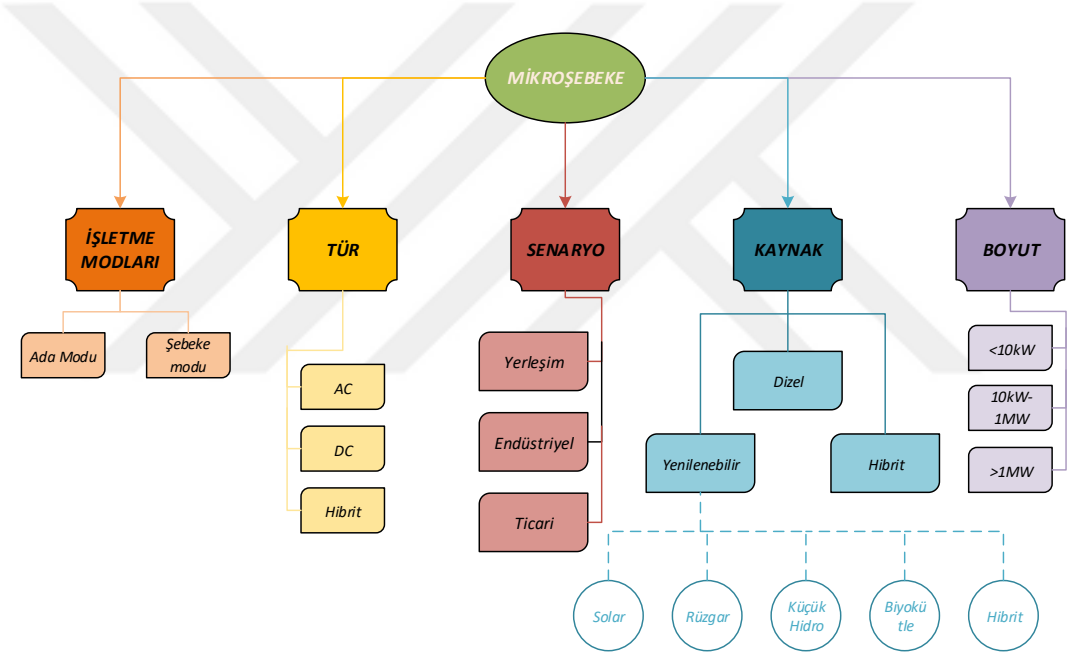
Dağıtık enerji kaynakları, mikroşebeke içinde hem dağıtılmış üretim hem de dağıtılmış depolama enerji olabilir. Dağıtık üretim teknolojileri; içten yanmalı motorlar, gaz türbinleri, kombine çevrim gaz türbinleri, mikro türbinler, yakıt hücreleri, rüzgâr türbinleri, FV güneş panelleri, güneş ısı, küçük hidroelektrik, jeotermal enerjisi, biyokütle, gel-git enerjisi ve dalga enerjisi gibi üretim birimleridir. Bu enerji üretim birimleri arasında, RT, FV sistemler, küçük hidrolik jeneratörler, jeotermal enerji ve yakıt hücreleri gibi teknolojilerin dünya genelinde toplam enerji üretimindeki pazar payını artırması beklenmektedir (Özdemir, E. 2007). Enerji depolama birimleri ise volanlar/uçan tekerlekler (flywheels), SK'ler (ultracapacitors), süper iletken manyetik enerji depolama (SMES) ve elektrokimyasal piller gibi teknolojileri içermektedir (Kocaman, B. 2013).

Mikroşebeke yaklaşımı, enerji kaynaklarının tüketicilere yakın konumlandırılabilmesi avantajından kaynaklanan etkin bir enerji dağıtım ve besleme sistemini içermektedir. Bu yaklaşım, rüzgâr türbinleri, fotovoltaik sistemler ve diğer enerji üretim birimlerini tüketicilere daha yakın bir şekilde yerleştirerek, güvenilir bir enerji besleme sistemi oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, tüketicilerin

teknolojik tercihleri ve güç kalitesi taleplerine dayalı olarak, kesintiler sırasında şebekeden bağımsız bir şekilde otonom bir işletme sağlamak üzere güvenilir bir besleme sistemi oluşturmayı hedefler. Bu amaç doğrultusunda, yeterli güç üretimi ve dengeleme kaynaklarına sahip bir şebeke yapısı gerekmektedir.

2.3.3. Mikroşebekelerin sınıflandırılması

Mikroşebeke yapıları, dağıtık üretimin sunduğu avantajlardan yararlanmak için bir seçenek olarak ortaya çıkmıştır. Mikroşebekelerin tipik sınıflandırılması Şekil 2.6'da görülmektedir.



Şekil 2. 6. Mikroşebekenin sınıflandırılması

Mikroşebeke yapısı, beş temel kategoriye ayrılarak incelenmektedir. Bu kategoriler işletme modları, tür, kaynak, senaryo ve boyut olarak adlandırılmaktadır. İşletme modları, ada ve şebeke bağlantılı olmak üzere iki sınıfa ayrılmaktadır. Yenilenebilir, dizel ve hibrit DEK birimleri ise kaynak kategorisinde sınıflandırılmaktadır. Mikroşebekeler, tür bakımından AC (alternatif akım), DC (doğru akım) ve her iki bağlantı türünü içeren hibrit yapılar şeklinde çeşitlilik göstermektedir. Ayrıca mikroşebekeler, senaryo ve boyut bakımından da kategorize edilmektedir.

Mikroşebeke kavramı, enerji üretiminden tüketimine kadar geniş bir yelpazede çeşitli unsurları entegre eden bir sistemdir. Aşağıda, mikroşebekenin temel özelliklerinin daha detaylı bir açıklaması bulunmaktadır:

1. **Enerji Kaynakları, Depolama ve Kontrol Edilebilir Yüklerin Entegrasyonu:** Mikroşebeke, yerel dağıtım şebekesinde bulunan mikro enerji kaynaklarını (rüzgâr türbinleri, güneş panelleri, küçük hidrolik jeneratörler vb.), enerji depolama birimlerini ve kontrol edilebilir yükleri (örneğin, elektrikli araçlar) entegre etmektedir. Bu entegrasyon, enerji üretimi ve tüketimi arasında optimize edilmiş bir denge sağlamaktadır.
2. **Çift Modda Çalışabilme Yeteneği:** Mikroşebeke, çift modda çalışabilme özelliğine sahiptir. Bir yandan ana enerji şebekesine bağlı olarak çalışabilirken diğer yandan da bağımsız bir şekilde, adanmış modda işleyebilmektedir. Bu özellik, şebeke kesintileri veya acil durumlar sırasında sürekli enerji sağlamaktadır.
3. **Enerji Yönetimi ve Koordinasyon:** Mikroşebeke, içerisinde bulunan enerji kaynakları arasında etkili bir enerji yönetimi ve koordinasyonu gerçekleştirmektedir. Bu, enerji üretimini, depolamayı ve tüketimi dengeli bir şekilde yöneterek sistem verimliliğini artırmaktadır. Aynı zamanda, enerji talebinin ve kaynaklarının dalgalanmalarına uyum sağlamaktadır.

Bu detaylar, mikroşebeke konseptinin daha geniş bir perspektiften incelenmesini sağlayarak, enerji sistemlerindeki gelişmiş esneklik ve sürdürülebilirlik açısından önemini vurgulamaktadır.

2.3.4. Mikroşebekelerde hiyerarşik kontrol

Mikroşebekeler, dağıtık enerji üretim altyapısının önemli bir unsuru olarak kabul edilmekte ve YEK şebeke entegrasyonunu yönetme amacı taşımaktadır. Bu sistem, son kullanıcıların enerji üretimi, depolama, kontrol ve yönetim süreçlerine katılımını mümkün kılarak, son kullanıcının sadece bir tüketici olmanın ötesinde, aynı zamanda şebeke yapısının bir parçası haline gelmesine olanak tanır. Mikroşebekelerin kontrol stratejilerindeki geliştirmeler, performans ve kararlılığın artırılmasına yönelik çabalar, kapalı döngü sistemlerinde geçici durum tepkisinin iyileştirilmesi, dengesizlik ve

harmonik izleme, hata durumlarında çalışma karakteristiklerinin geliştirilmesi ve ada modu ile şebeke etkileşimli mod çalışma koşullarında yeni kontrol şemalarının geliştirilmesi gibi konulara odaklanmaktadır (Kabalcı, E., vd. 2021).

Bir dağıtım sisteminin bileşen seviyesini yönetmeye yönelik çeşitli kontrol yöntemleri ve stratejileri bulunmaktadır. Her kontrol şeklinin, şebekelerin kontrol edilmesinde kendi avantajları vardır ve bu stratejiler, şebekelerin kullanım amaçlarına uygun olarak uygulanmaktadır. Şebeelerde kullanılan birkaç kontrol tekniği şunlardır:

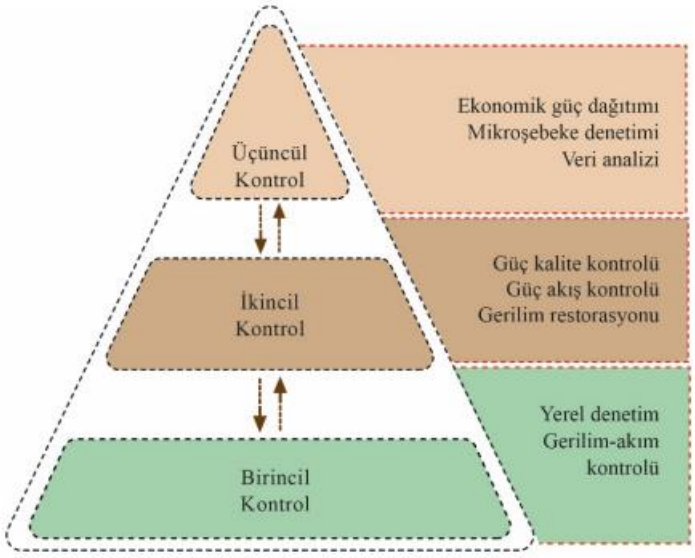
- Ana ve bağımlı kontrol: Ana kontrol, gerilim ve frekans değerlerini düzeltme görevini üstlenirken, bağımlı kontrol tekniği akım kaynaklarını yönetmektedir.
- Akım ve güç akışı kontrolü: Bu yöntem, kontrol sinyallerini kullanarak akım ve güç dağıtımını düzenlemektedir.
- Düşme kontrolü: Bu yöntem, önceki dönüştürücülerle birleştirilerek geliştirilmiştir, çünkü dönüştürücüler ideal olmayan voltaj kaynakları olarak hareket etmektedir.

Mikroşebeke ile dağıtık kaynaklardan oluşan dağıtım sistemini birbirinden ayıran en önemli olgu mikroşebekenin kontrol kabiliyetidir. Bu kontrol kabiliyeti, yüksek seviyede bir koordinasyon ve kontrol altyapısı sunmaktadır. Mikroşebekeler, geleneksel şebekelerden farklı olarak hiyerarşik bir kontrol yapısına sahiptir ve farklı katmanlarda yer alan kontrol tekniklerinin etkin bir şekilde kullanılmasını gerektirir. Mikroşebekelerin güvenli bir şekilde çalışması ve ana şebekeye başarılı bir şekilde entegre olması veya şebekeden ayrılması uygun kontrol tekniklerinin kullanımına bağlıdır. Şebeke bağlantılı modda, mikroşebeke geriliminin genliği ve frekansı elektrik şebekesine entegre olabilmelidir. Bu nedenle, mikroşebekelerin uygun kontrol döngülerine sahip olması ve şebekeyle uyumlu şekilde çalışması önemlidir. Ayrıca ada moduna geçiş yapılması durumunda, uygun ada mod tespit algoritmalarının kullanılması gerekmektedir. Bu algoritmalar, ardışık sorunların ortaya çıkmasını engelleyerek sistemlerin sorunsuz bir şekilde çalışmasını devam ettirir.

Mikroşebekenin kararlılığı ve performansının artırılması için farklı kontrol döngüleri bir arada kullanılmalıdır. Bu kontrol döngüleri arasında hem ada modunda hem de şebeke modunda kullanılan geri besleme bilgileri sağlayan akım, gerilim, frekans ve aktif/reaktif güç kontrolü yer almaktadır. Mikroşebekelerin hiyerarşik kontrol yapısı, yük paylaşımı ve DEK'lerin koordinasyonu ile birlikte gerilim/frekans

regülasyonundan sorumludur. Şebeke modunda ise mikroşebekenin senkronizasyonu, işletme maliyetlerinin optimizasyonu, güç akışının kontrolü, komşu şebekeler ve ana şebeke arasındaki etkileşim gibi görevleri üstlenmektedir.

Güç elektroniği altyapılarının yaygınlaşması ile birlikte hem şebeke modunda hem de ada modunda çalışabilen mikroşebeke sistemlerinin kontrol edilmesi ve enerji yönetiminin sağlanması için hiyerarşik kontrol ve Enerji Yönetim Sistemi (EYS) önemli bir gereksinim haline gelmiştir (Beus M. *vd*. 2020). Bu bağlamda, koordine edilmiş kontrol, frekans kontrolü ve üçüncül seviye kontrol gibi çeşitli kontrol yöntemleri üzerine çalışmalar yapılmakta ve yeni yöntemler önerilmektedir (Elmouatamid A. *vd*. 2020). Bununla birlikte DC mikroşebeke yapılarında gerilim kararlılığı her iki çalışma modunda esneklik sağlamak için önemli araştırmaları gerektirmektedir. Mikroşebekelerde kullanılan hiyerarşik kontrol yöntemlerinin seviyeleri ve işlevleri Şekil 2.7'de görülmektedir.



Şekil 2. 7. Mikroşebekelerde kontrol seviyeleri

Hiyerarşik kontrol, birincil, ikincil ve üçüncül olmak üzere üç kontrol seviyesinden oluşmaktadır. Bu üç seviyeli hiyerarşik kontrol yapısında, enerji dönüştürücülerin kontrolü, alt seviyede bulunan birincil kontrol seviyesinde gerçekleşmektedir. İkincil kontrol seviyesi, haberleşme ağı kullanılarak bara gerilim restorasyonunu sağlamakta ve aynı zamanda akım paylaşım doğruluğunu artırmak için kullanılmaktadır. Üçüncül kontrol seviyesinde ise çift yönlü güç akışı, optimum yük

paylaşımı ve veri analizi gibi işlemler gerçekleştirilmektedir. Bu sayede üretim maliyetinin en aza indirilmesi hedeflenmektedir. Mikroşebeke yapısının işletilmesinde, temel gerekliliklerin ölçek açısından farklı olmalarına rağmen, aynı zamanda paralel olarak yerine getirilmesi, sistem kararlılığı ve verimliliği açısından kritik bir öneme sahiptir.

3. GÜÇ SİSTEMLERİNDE ÜNİTE VE SÜPER KAPASİTÖR TAHSİSİ

Ünite tahsisi, değişen yükler ve farklı kısıtlamalar altında her saat için üretim birimlerinin çalışma programını belirleme sürecini içeren bir optimizasyon problemidir. Son elli yılda, ünite tahsisi probleminin çözümü için birçok algoritma geliştirilmiştir; ancak, araştırmacılar halen daha gerçekçi sonuçlar elde etmek için yeni hibrit algoritmaları bulmak için çaba sarf etmektedirler. Sürekli değişen taleplerle birlikte, ünite tahsisinin önemi artmaktadır. Bu sebeple, enerji sektöründe üretim birimlerinin çalışma kriterlerini daha da optimize etmek için en son metodolojileri takip etmek bir gereklilik arz etmektedir.

3.1. Güç Sistemlerinde Ünite Tahsisi

Ünite tahsisi problemi, bir üretim biriminin yük gereksinimlerini etkin bir şekilde karşılamak üzere her saat için optimal çalışma süresinin belirlenmesiyle ilgilidir. Bu optimizasyon süreci, kârı maksimuma çıkarmak için minimum kayıpla ve minimum yakıt tüketimiyle enerji sağlama amacını taşır. Minimum toplam üretim maliyetine ek olarak, bir üretim programının çeşitli işletme kısıtlamalarını da karşılaması gereklidir. Bu kısıtlamalar, üretim birimlerinin başlatılması ve kapatılması gibi kararlarını sınırlamaktadır. Az yoğun ve yoğun elektrik talepleri, farklı amaçlar doğrultusunda değişiklik gösterebilmektedir. Eğer tüketilen birimler düzenli olarak izlenirse, talebin daha az olduğu zaman dilimlerinde (örneğin, gece saatlerinde talebin daha az olduğu zamanlarda) bazı birimlerin kapatılması mümkün olabilir. Bu nedenle, çalışmanın esas amacı, farklı üretim birimlerinin kısıtlamaları karşılayacak şekilde çalışma sürelerini planlamaktır. Ünite tahsisi problemi, hem deterministik hem de stokastik yükler için uygulanabilir. Deterministik yaklaşım, kesin ve benzersiz sonuçlar sağlar. Ancak stokastik yükler için elde edilen sonuçlar kesin olmayabilir. Deterministik yük veri

zarflama analizi için temel bileşen analizi yaklaşımı kullanılmaktadır. VZA, öncelikle girdi ve çıktı değişkenlerinin tanımlandığı parametrik olmayan bir yöntemdir. Temel bileşen analizi ise kullanılan değişken sayısı minimuma indirilir. Ancak stokastik modellerde, kısıtlamalar belirli kısıtlamalara dönüştürülür ve daha sonra formülasyon, bilinen algoritmalardan herhangi biri ile çözülebilir. Farklı ortamlar için çeşitli amaç fonksiyonları aşağıda belirtilmiştir.

3.1.1. Geleneksel yakıt bazlı yaklaşım

Denklem (3.1)'de, en aza indirilmesi gereken üç maliyet vardır. Bunlardan ilki, i biriminin t zamanında üretimini ifade eden P(i, t) ve M(P(i, t)) ise i biriminin t zamanındaki yakıt maliyetidir. İkincisi işletmeye alma maliyeti (BM), üçüncüsü ise kapatma maliyetidir (DM).

$$min \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_0} M_i(P_{i,t}) I_{i,t} + BM + DM \tag{3.1}$$

3.1.2. Kâra dayalı yaklaşım

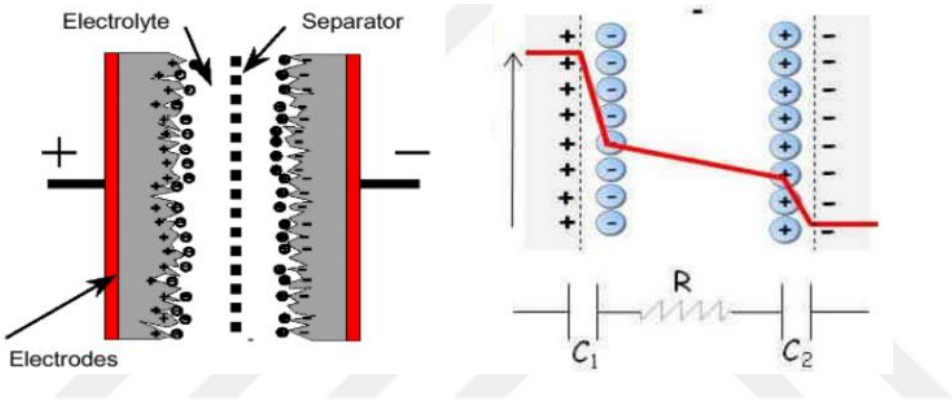
Kâra dayalı yaklaşım, temel amacın bireysel bir üretim şirketinin kârını en üst düzeye çıkarmak olduğu ortamdır. ÜT planının fiyat üzerinde dolaylı, ortalama maliyet üzerinde ise doğrudan etkisi vardır; dolayısıyla herhangi bir teklif stratejisinin önemli bir parçasıdır. Ayrıca ünite tahsisi programında esneklik vardır. Amaç fonksiyonu (2), GENCO'nun karı olan F(i,t)'yi maksimuma çıkararak tanımlanabilir.

3.2. Süper Kapasitörler ve Depolama Sistemleri

3.2.1. Süper kapasitörler

Süper kapasitörler, diğer şarj edilebilir enerji depolama cihazlarından önemli ölçüde farklıdır. Örneğin, şarj edilebilir piller kimyasal enerjiyi doğrudan elektrik enerjisine dönüştürürken, süper kapasitörler elektrokimyasal olarak enerji depolarlar. Bu özellikleri sayesinde hızlı şarj ve deşarj edebilme yetenekleriyle bilinirler. Temelde, süper kapasitörlerin yapısı şu şekilde oluşur: İki elektrot arasına yerleştirilmiş bir ayırıcı ile ayrılmış bir elektrolit içinde bulunan aktif karbon veya benzeri bir malzemeden yapılmış elektrotlardır. Bu elektrotlar üzerindeki yük depolama süreçleri, elektrotlar arasındaki elektrolit üzerinden gerçekleşir. Süper kapasitörlerin

performansı, kullanılan elektrot malzemelerinin özelliklerine, elektrolit tipine ve cihazın tasarımına bağlı olarak değişiklik gösterir. Örneğin, organik veya sulu elektrolitler kullanılarak yapılan süper kapasitörlerde, elektrotlar arasındaki enerji depolama süreçleri çok çeşitli kimyasal reaksiyonlara dayanabilir. Bu cihazlar genellikle yüksek güç yoğunluğu ve uzun ömür gibi avantajlar sunarlar. Elektrotların ve elektrolitin doğru seçimi, süper kapasitörün enerji depolama kapasitesini, şarj-deşarj performansını ve genel kararlılığını belirleyen önemli faktörlerdir (Simon, P. vd. 2011; Gualous, H.,vd. 2004). Süper kapasitörler temel yapısı ve eşdeğer devresi Şekil 3.1'de verilmiştir.



Şekil 3. 1. Süperkapasitör yapısı ve basitleştirilmiş devre (H. Gualois, vd. 2008)

Süper kapasitörler, yüksek güçlü elektriği hızlı ve çok sayıda döngü boyunca depolayıp sağlayabilen elektrokimyasal cihazlardır. Temelde iki elektrot ve bir elektrolitten oluşurlar. Elektrik yükleri, elektrot/elektrolit arayüzünde düzenlenir ve kimyasal oksidasyon-redüksiyon işlemleri görülmez. Süper kapasitörler, yüksek kapasiteye sahip olmalarına rağmen, çift katmanlı bir kondansatör olarak düşük gerilim limitlerine sahiptirler. Kapasitörlerle karşılaştırıldığında, daha geniş bir farad (F) aralığında daha fazla şarj depolayabilirler ve elektrolitik kapasitörlere kıyasla daha fazla enerji depolarlar. Bununla birlikte, düşük kaçak akımlarına sahip olmaları ve 1,8V ile 2,5V aralığında çalışabilen birçok uygulama için uygun olmaları avantajları arasındadır. Genellikle 10 ila 20 yıl arasında bir ömre sahip olsalar da, özellikle 8 ila 10 yıl sonra kapasiteleri genellikle %100'den %80'e düşebilir.

Elektrik enerjisi, kondansatörler aracılığıyla depolanabilir. Kondansatörler, pozitif ve negatif elektrostatik yüklerin ayrışmasıyla enerjiyi depolayan cihazlardır. Bu cihazlar, iki iletken plaka arasında yer alan ve dielektrik olarak adlandırılan yalıtkanlar

ile oluşur. Dielektrik malzeme, iki plaka arasında bir ark oluşumunu önleyerek daha fazla şarj depolanmasına olanak tanır. Klasik kapasitörlerin güç yoğunluğu genellikle çok yüksektir (yaklaşık olarak 1012 W/m³). Ancak, enerji yoğunluğu oldukça düşüktür (yaklaşık olarak 5 Wh/m³).

Süper kapasitörler, elektrik enerjisinin depolanmasını sağlayan elektrokimyasal çift katmanlı bir yapıya dayanmaktadır. Bu yapı, çok sayıda yüzeysel elektrot ve bir ayırıcı yüzeyden oluşur. Ayırıcı yüzey, elektrotlar arasında fiziksel teması engellerken, iyon geçişine izin vermektedir. Süper kapasitörün yapısındaki yüzeysel elektrotlar nano boyutlarda olup yüzey alanını ve buna bağlı olarak kapasite değerini çok yüksek değerlere çıkarmaktadır (Kötz, R., 2000). Süper kapasitörler, olağanüstü düşük iç dirençleri ve içyapılarında herhangi bir kimyasal reaksiyon gerçekleşmemesi nedeniyle çok hızlı şarj-deşarj olabilmektedirler. Bunun yanı sıra, dayanıklılık, uzun ömür, yüksek çevrim sayısı ve hava şartlarına daha az duyarlı olması diğer avantajları olarak sıralanabilmektedir. Düşük enerji yoğunlukları ve yüksek self-deşarj oranları, SK'ler uzun vadeli depolama kapasitesini sınırlayan ve maliyetlerini artıran önemli dezavantajlar olarak öne çıkmaktadır (International Electrotechnical Commission 2011, Electrical energy storage).

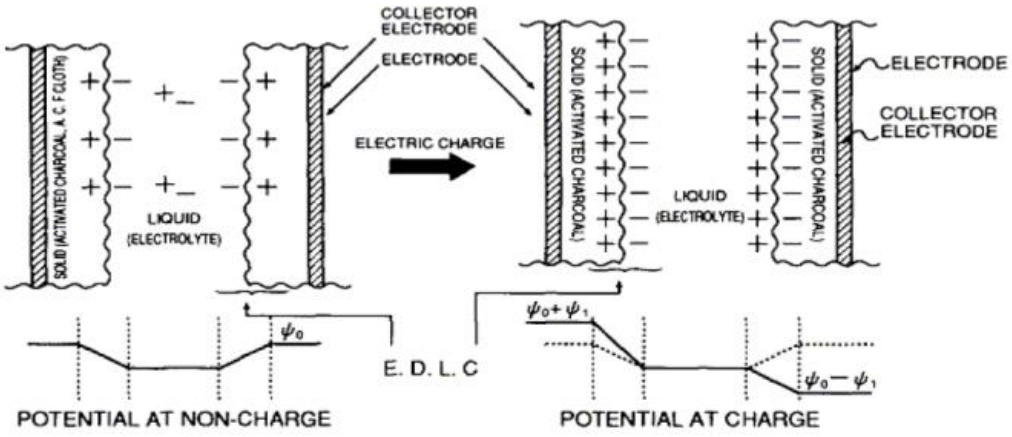
Süper kapasitörler, yüksek güç yoğunluğu ve uzun çevrim ömrü gibi özelliklere sahip oldukları için, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanılması için enerji depolama birimlerinde kullanılmaktadır. Bu özellikleri sayesinde süperkapasitörler, ani güç talebi olan uygulamalarda, taşınabilir elektronik cihazlarda, kesintisiz güç kaynaklarında ve hibrit/elektrikli araçlarda da kullanılmaktadır.

Süper kapasitörlerin temel işleyiş prensibi, bir elektrolit ve geniş bir yüzey alanının olarak sınırlandırılabilir. Elektrotlar arasındaki ara yüzeyde, elektrokimyasal tabakaların oluşumuyla ilişkilendirilen bir çift tabakanın meydana gelmesine dayanmaktadır. Bu cihaza potansiyel fark uygulandığında, elektrostatik olarak yük depolanması, iki elektrot-elektrolit ara yüzeyi arasında seri olarak gerçekleşir, her biri iki kapasitörün işlevini yerine getirmektedir. Sistem, her döngüde mükemmel şarj, tam deşarj ve yüksek verimlilik sağlamaktadır. Özellikle, süper kapasitörlerde voltaj uygulandığında, her iki elektrot-elektrolit ara yüzeyinde bir boşluk yükü biriktirme bölgesi oluşmaktadır, bu da elektriksel çift tabaka oluşumunu sağlamaktadır. Bu nedenle, enerji depolama süreci elektrostatiktir ve geleneksel pillerde olduğu gibi elektrokimyasal reaksiyonlarla ilişkilendirilmez (Vlad, A., 2014; Yu, P., 2018).

Geleneksel kapasitörlerden önemli ölçüde daha geniş bir aktif yüzey alanına sahip olan süper kapasitörler, aktif karbon tabanlı bir anot-katot yapı üzerine kurulmuştur. Bu özellik, (1 ila 5000F aralığında) oldukça yüksek kapasite değerlerinin elde edilmesine olanak tanımaktadır. SK'lerin önemli bir potansiyeli, piller veya yakıt hücreleri gibi enerji depolama sistemlerine ideal bir tamamlayıcı unsur olmalarıdır. Yüksek voltaj ve yüksek çıkış akımı gereksinimlerini karşılamak için, bir dizi SK hücresinin seri ve paralel kombinasyonları kullanılabilir. Temel ilişkiler, Denklem 3.2'de doğrusal kapasite için matematiksel olarak ifade edilmiştir:

$$C = \frac{Q}{V} = \varepsilon \frac{A}{d} \text{ ve } W = \frac{1}{2}CV^2 \tag{3.2}$$

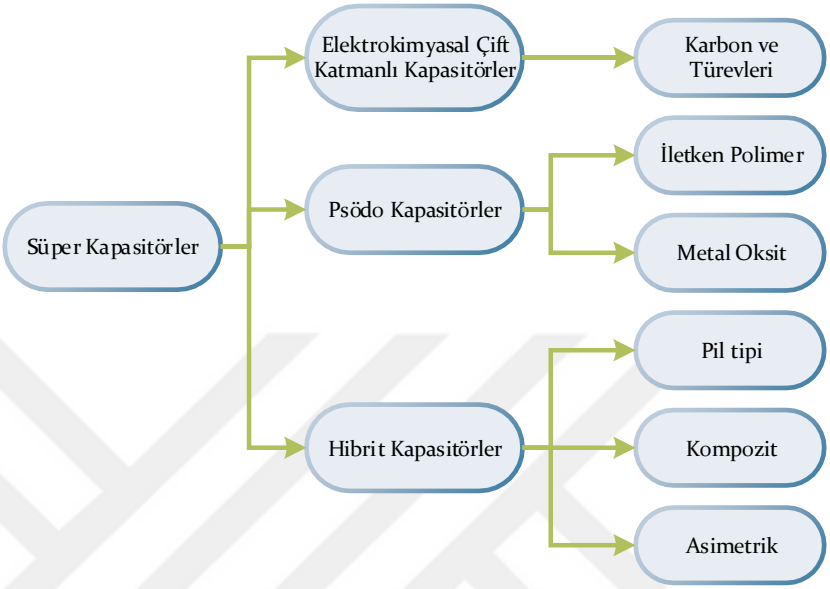
Burada C kapasitans, Q elektrik yükü, V uygulanan voltaj, ε yalıtım malzemesinin dielektrik sabiti, A yüzey alanı, d kalınlığı ve W depolanan elektrostatik enerjidir. SK'lerde enerji depolama benzer şekilde yapılır, ancak Şekil 3.2'de gösterildiği gibi, elektrot (elektronik iletken) ve elektrolit (iyonik iletken) arasındaki ara yüz klasik kapasitörlerden farklıdır.



Şekil 3. 2. Süper kapasitörün şematik diyagramı

Bu nedenle, bir süper kapasitör, Şekil 3.3'te şematik olarak gösterildiği gibi, elektrokaplama ile emdirilmiş bir yalıtkan ve gözenekli zar (iyon iletimi sağlamak için) ile ayrılmış iki gözenekli elektrotta oluşturulur. SK'ler, hücre tasarımları, elektrot malzemeleri ve temel çalışma prensiplerindeki farklılıklar nedeniyle üç kategoriye ayrılır:

elektrokimyasal çift katmanlı kapasitör (EDCL), psödo kapasitörler ve hibrit kapasitörler (Conte, M., 2010). Süperkapasitörler, elektrostatik kapasitörlerin çok daha gelişmiş bir versiyonudur. Bir süperkapasitör, hem faradaik hem de faradaik olmayan süreçleri içerir. Cihaz uygulamalarında kullanılan enerji depolama sistemlerinin öncülerindendir.

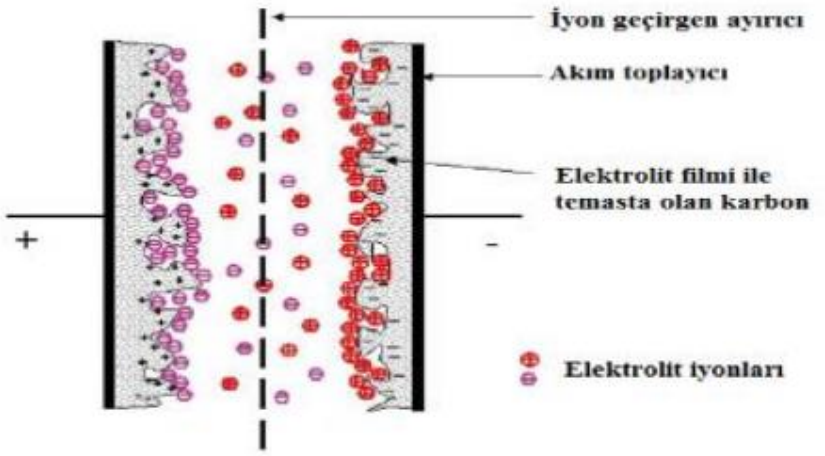


Şekil 3. 3. Süper kapasitörlerin sınıflandırılması

3.2.1.1. Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler (EDLC)

Karbon ve benzeri malzemeler, kapasitörlerin elektrotları olarak yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bu malzemeler, yüksek yüzey alanı ve iletkenlikleri sayesinde elektrostatik enerjinin depolanmasında etkilidir (Shi, H. ve diğerleri, 1996). Şekil 3.4'te görüldüğü gibi, EDLC kapasitörlerinin yapısı gösterilmiştir. Pozitif elektrotlar, Coulomb kuvvetleriyle elektrolit içindeki zıt yükleri kendilerine çekerler. Bu süreç sırasında elektrolitte ısı dalgalanmaları meydana gelir, bu da elektrot yakınındaki bölgelerde negatif yüklerin artmasına yol açar. Elektrot ile çözelti arasındaki yük dengesi, elektriksel çift tabaka oluşumuna neden olur. Benzer süreç negatif elektrotlar için de geçerlidir ve ikinci bir çift tabaka oluşur. Sonuç olarak, kapasitörün performansını belirleyen iki elektriksel çift tabaka ortaya çıkar (Yu, A. ve diğerleri, 2013). Bu kapasitörlerde kullanılan karbon ve türevleri arasında grafen ve karbon nanotüpler (CNT) gibi grafik tabakalarının çeşitli formları yer alır. CNT'ler tek atom kalınlığında karbon tabakaları olarak bilinir ve süper iletken özellik gösterirler. Karbon aerojeller ise iletken karbon nanoparçacıklarının sürekli bir ağ oluşturduğu ve dağınık mezogözenek yapısına sahip

malzemelerdir (Arico, A. 2005). Aktif karbon (AK) ise geniş bir yüzey alanına sahip olan geleneksel fakat modern bir malzemedir. Yapısı, düzensiz altı halkalı karbondan oluşur. Aktif karbonun mikro, mezo ve makro gözenekleri bulunur; mikro gözenekler 2 nm'den küçük, mezo gözenekler 2 nm'den büyük ve makro gözenekler ise 50 nm'den büyük boyutlardadır. Yüzey gözeneklilik analizi ile ağırlıklı gözenek boyutu belirlenerek uygun iyon çapına sahip çözeltiler seçilir.



Şekil 3. 4. Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitör (EDLC)

3.2.1.2. Psödokapasitörler

Kapasitans değeri, elektrotların yüzeyindeki iyonların oksidasyon ve indirgenme süreçleri ile birlikte çift tabakada yüklerin ayrılması sonucunda oluşur. Bu kapasitans değeri, sisteme uygulanan akım ile değişebilir (Arbizzani, C. ve diğerleri, 1996). Psödokapasitörlerin elektrotlarında üç farklı türde faradaik süreç gözlemlenir: 1. Geri dönüşümlü adsorpsiyon (örneğin, platin veya altın yüzeyinde hidrojen adsorpsiyonu), 2. Geçiş metali oksitlerinin redoks reaksiyonları (örneğin RuO2), 3. İletken polimer esaslı elektrotlarda, katkı iyonlarının polimer zincirinden ayrılması ve yeniden zincire bağlanması (undoping-doping) ile tersinir elektrokimyasal reaksiyonlar (Yu A. ve diğerleri, 2012). Bu faradaik süreçler, çalışma voltajını artırarak spesifik kapasitansı artırır (Zhang L.L. ve diğerleri, 2009). Psödokapasitörlerde faradaik reaksiyonlar, faradaik olmayan reaksiyonlara göre daha yavaş ilerlediği için EDLC'lere göre daha düşük güç yoğunluğuna sahiptir (Chuang ve diğerleri, 2010). Psödokapasitörlerde, iletken polimerler ve metal oksitler olmak üzere iki farklı türde elektrot malzemesi kullanılır.

İletken Polimerler, ilk kez Mac Diarmid ve ekibi tarafından keşfedilmiştir. Bu kavram, polimer içindeki elektronların iletkenliği artırmasından dolayı bu ismi almıştır. İletkenlikleri, zincirlerinde bulunan tek ve çift bağlardan kaynaklanmaktadır. Yüksek iletkenlik ve spesifik kapasitansa sahip, düşük maliyetli, çevre dostu ve katkılanarak yüksek iletkenliğe ulaşabilen geniş voltaj aralığında çalışabilen elektrot malzemeleridir. Polimer ve metal özelliklerinin birleştirilmesiyle oluşturulurlar (Coşkun, K., 2009). Ayrıca konjuge polimer olarak da bilinirler (Wang G. ve diğerleri, 2012).

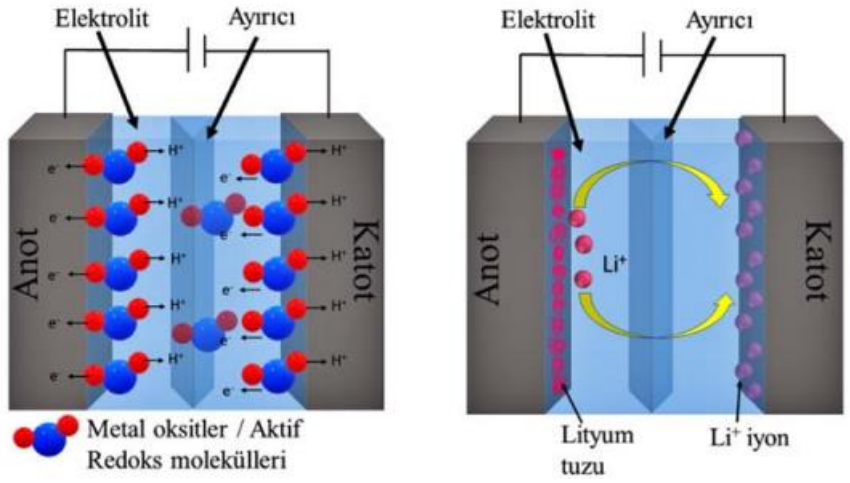
Metal Oksitler, bir metal katyonu ve bir oksit anyonu içeren kristal yapılar olarak tanımlanırlar. Su ile tepkimeye girdiklerinde baz oluştururlar, asitlerle tepkimeye girdiklerinde ise asit oluştururlar. Süper kapasitör uygulamalarında, karbon malzemelerden daha yüksek enerji yoğunluğuna ve polimer malzemelerden çok daha üstün elektrokimyasal kararlılığa sahiptirler. Enerjiyi elektrostatik olarak depolamanın yanı sıra, elektrot ile çözelti arasında faradaik süreçler de meydana gelebilir. Mangan (MnO_2), Demir (Fe_3O_4), İridyum (IrO_2) ve Rutenyum (RuO_2) gibi geçiş metallerinin oksitleri, düşük dirençle birlikte güçlü faradaik elektron transfer reaksiyonları oluştururlar.

3.2.1.3. Hibrit kapasitörler

Pil benzeri bir elektrotun enerji kaynağı ve kapasitör benzeri bir elektrotun güç kaynağı olarak birleştirildiği elektrot türleridir (Iro Z.S. ve diğerleri, 2016). Karbon (polarize olabilen) ve metal oksit/iletken polimer (polarize olmayan) malzemelerle kullanılan, elektrotların çift katmanlı kapasitansı ile psödokapasitans (anot malzeme) özelliklerini gösteren kapasitörlerdir (Halper M.S. ve diğerleri, 2006; Ho, M.Y. ve diğerleri, 2014). Hem faradaik hem de faradaik olmayan süreçler yüksek enerji depolamada kullanılır. Şarj sırasında, anottaki serbest negatif yükler, elektrotlara uygulanan potansiyel ile pozitif elektrota doğru çekilir; deşarj sırasında ise işlem tersine döner (Beguin L. ve diğerleri, 2013). Tüm süreçler pozitif elektrotta gerçekleşir ve bu elektrot cihazın kullanım ömrünü belirler. Farklı malzemelerin güçlü yönlerinin birleştirilmesiyle oluşturulan bu kapasitörler, uzun döngü ömrüne, yüksek enerji ve güç yoğunluğuna, güçlü iyonik iletkenliğe sahiptir (Yu A. ve diğerleri, 2013). Kullanılan elektrotlara ve reaksiyonların türüne göre simetrik ve asimetrik olarak ikiye ayrılırlar. Elektrotların ve reaksiyon türlerinin aynı olduğu ancak zıt yönlerde reaksiyonların gerçekleştiği kapasitörler simetrik; anotta redoks (faradaik) ve katotta çift katman oluşturulan kapasitörler ise asimetrik olarak adlandırılır (Tao T. ve Li Y., 2014). Şekil

3.5'te psödokapasitörler ile hibrit kapasitörlerin çalışma mekanizması şematik olarak gösterilmiştir. Hibrit süperkapasitörler; pil tipi, kompozit ve asimetrik hibrit olarak üçe ayrılırlar.

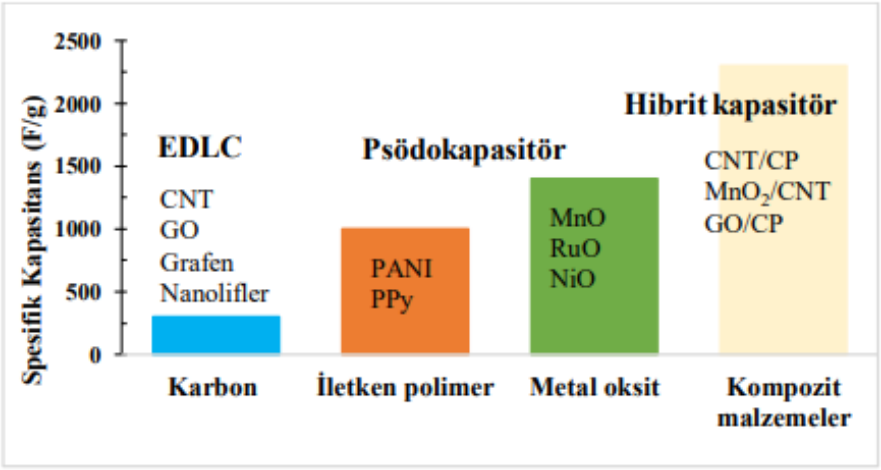
- **Pil tipi hibrit süper kapasitörler,** Bir pil ve süperkapasitör elektrot malzemelerinden oluşur. Süperkapasitörlerin hızlı şarj-deşarj, yüksek güç ve uzun ömür özellikleri, bataryaların yüksek enerji kapasitesi ile birleştirilir (Halper M.S. ve diğerleri, 2006).
- **Kompozit süper kapasitörler** Karbon, metal oksit veya iletken polimer elektrotlardan oluşur. Yüksek iletkenlik ve geniş yüzey alanına sahip karbon, kapasitif çift katman yükünü sağlarken, psödokapasitif malzemeler faradaik reaksiyonlar aracılığıyla yüksek kapasite sunar (Frackowiak E. ve diğerleri, 2005).
- **Asimetrik hibrit süper kapasitörler** Faradaik (psödokapasitans) ve faradaik olmayan (EDCL) süreçlerin birleşimiyle oluşur (Arbizzani C. ve diğerleri, 2001).



a) Psödokapasitör b) Hibrit Süperkapasitör

Şekil 3. 5. a) Psödokapasitör b) Hibrit süper kapasitör

Şekil 3.6'da EDLC, psödokapasitör ve hibrit kapasitörlerin belirli kapasitans değerleri verilmiştir. EDLC'den hibrit kapasitöre doğru ilerledikçe kapasite değerlerinin arttığı gözlemlenmiştir. Bu artış, sırasıyla faradaik olmayan, faradaik ve faradaik olmayan+faradaik mekanizmaların etkisiyle açıklanmaktadır.



Şekil 3. 6. EDLC, psödokapasitör ve hibrit kapasitörlerin belirli kapasitans değerleri (Shown I., *vd*. 2015)

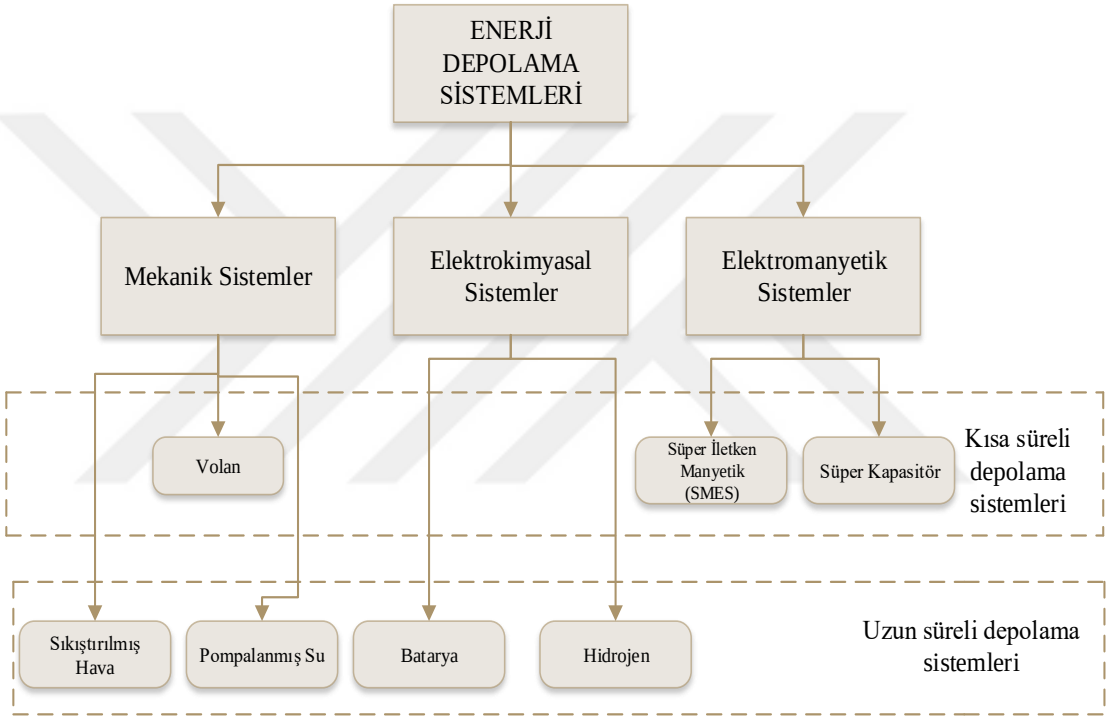
3.2.2. Enerji Depolama Sistemleri

Günümüzde güç sistemlerinde kullanılan çeşitli enerji depolama teknolojileri bulunmaktadır. Bu teknolojiler arasından en uygun olanının belirlenmesi sürecinde maliyet, ömür, güvenilirlik, depolama sisteminin boyutu, depolama kapasitesi ve çevresel etki gibi birçok parametre detaylı olarak incelenmelidir. Bu parametrelerin değerlendirilmesi aşamasında enerji depolama sisteminin sağlayacağı toplam fayda önemli bir kriterdir.

Enerji Depolama Sistemleri (EDS), elektriğin ihtiyaç duyulduğunda üretilmesini ve üretimin talebi aşması durumunda depolanmasını sağlar. Düşük talep, düşük üretim maliyeti veya mevcut enerji kaynaklarının kesintili olduğu dönemlerde depolama büyük fayda sağlar. Aynı şekilde, depolanan enerji yüksek talep, yüksek üretim maliyeti veya alternatif üretim olmadığında tüketilebilir (Medina P. vd., 2014).

Dünya genelinde enerji talebi artmaya devam etmektedir, bu durum enerji fiyatlarında artışlara ve geleneksel enerji üretim yöntemlerinin piyasa dengesizlikleri, güç kalitesi sorunları ve karbondioksit emisyonları gibi sorunlara çözüm arayışlarına neden olmuştur (Chen H. vd., 2009). EDS ayrıca frekans düzenleme, geçici kararlılık, voltaj desteği, kesintisiz güç kaynağı gibi birçok avantaj sunar (Hadjipaschalis I. vd., 2009). Enerji depolama sistemleri, elektrik enerjisi arz ve talebini dengelemek, elektrik sistemlerinin verimliliğini artırmak ve elektrik şebekelerinin istikrar ve kalitesini iyileştirmek için kritik bir araç olarak görülmektedir.

Enerji depolama teknolojileri genellikle mekanik, elektrokimyasal ve elektromanyetik depolama olmak üzere üç ana başlık altında incelenebilir. Mekanik enerji depolama teknolojileri arasında pompalanmış su tabanlı enerji depolama sistemleri, sıkıştırılmış hava enerji depolama sistemleri ve volanlar bulunur. Elektrokimyasal enerji depolama teknolojileri ise batarya ve hidrojen tabanlı enerji depolama sistemlerini içerir. Elektromanyetik enerji depolama teknolojileri ise SK'ler ve süper iletken manyetik enerji depolama sistemlerini kapsar.



Şekil 3. 7. Enerji depolama teknolojilerinin sınıflandırılması

Enerji depolama teknolojileri, birkaç saniyeden birkaç güne kadar değişen geniş bir yelpazede enerji sağlayabilmektedir. Bu açıdan bakıldığında enerji depolama sistemleri, Şekil 3.7'de gösterildiği gibi kısa süreli ve uzun süreli enerji depolama sistemleri olarak sınıflandırılabilir.

Çizelge 3. 2. Enerji depolama sistemlerinin karşılaştırılması

Depolama Teknolojisi	Avantajı	Dezavantajı	Kullanım Alanı
Pompalanmış su tabanlı depolama	Yüksek kapasite, düşük birim enerji maliyeti	Büyük ve özel alana ihtiyaç olması	Zaman kaydırma enerji uygulamaları, Büyük güçlü yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu
Sıkıştırılmış hava tabanlı depolama	Yüksek kapasite, düşük birim enerji maliyeti	Büyük yeraltı alanına ihtiyaç olması, ek yakıt maliyeti	Zaman kaydırma enerji uygulamaları, Büyük güçlü yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu
Hidrojen	Çevresel etkilerinin olmaması	Düşük verim, yüksek maliyet, depolama üniteleri sorunları	Yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu, elektrikli taşıt uygulamaları
Batarya	Olgunlaşmış teknoloji, yüksek güç ve enerji yoğunluğu	Çevresel etkilerinin olumsuz olması, yüksek üretim maliyeti, orta ya da düşük çevrim ömrü	Taşınabilir cihazlar, elektrikli taşıtlar, küçük güçlü yenilenebilir enerji sistemleri
Volan	Yüksek güç yoğunluğu, hızlı cevap süresi, yüksek çevrim ömrü	Düşük enerji yoğunluğu, yüksek maliyet	Güç kalitesi uygulamaları
Süper kapasitör	Yüksek güç yoğunluğu, hızlı cevap süresi, yüksek çevrim ömrü	Düşük enerji yoğunluğu, yüksek maliyet	Elektrikli taşıtlar, güç kalitesi uygulamaları
Süper iletken manyetik depolama	Yüksek güç yoğunluğu, hızlı cevap süresi, yüksek çevrim ömrü	Düşük enerji yoğunluğu, yüksek maliyet	Güç kalitesi uygulamaları

Her bir enerji depolama teknolojisi, Çizelge 1.'de belirtildiği gibi maliyet, güç, tepki süresi ve depolama kapasitesi gibi ölçütler göz önünde bulundurulduğunda belirli özelliklere sahiptir.

3.2.3. Enerji depolamanın amacı ve faydaları

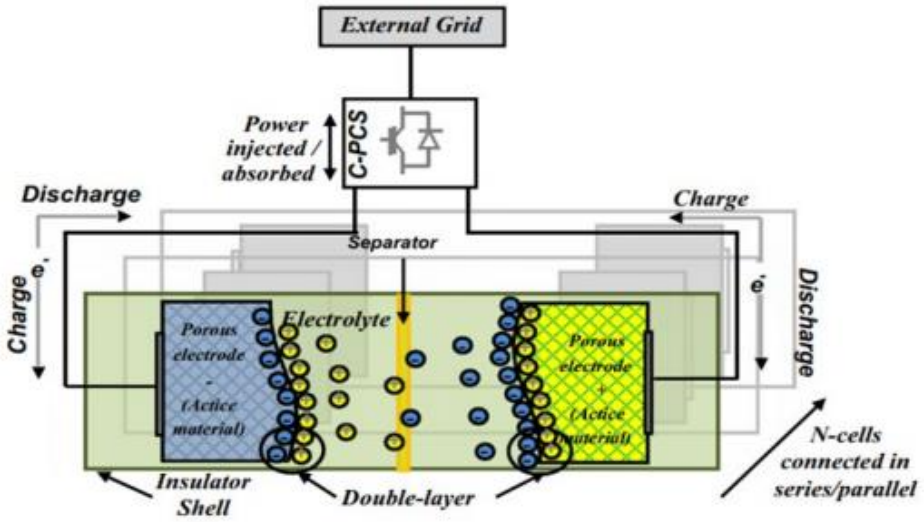
Enerji depolama, enerji kullanımı alanlarında oluşan atık enerjiyi depolamayı içerir (örneğin, sanayide ve endüstrideki atık ısının depolanması gibi). Ayrıca, yalnızca belirli zamanlarda enerji üretebilen yenilenebilir enerji kaynaklarının enerjisini depolayarak, enerji arzı ile talebi arasındaki farkı gidermeyi hedefler. Bu süreç, enerji üretimi için kullanılan yakıtların çevresel etkilerini azaltmada önemli bir rol oynar. Azalan fosil yakıt tüketimi sera gazı emisyonlarının düşmesine ve daha temiz hava koşullarına katkıda bulunur. Ayrıca, küresel ısınma ile mücadelede önemli destek sağlar. Elektrikle ısıtılan evlerde gece boyunca tüketilen enerjinin fazlasının depolanması, gündüz saatlerinde ısıtma sistemlerinin daha az kullanılmasını sağlayabilir. Bu durum bireysel ekonomiye de katkı sağlar, çünkü gündüz kullanılan enerji genellikle gece kullanılandan daha pahalıdır. Ülkemizdeki fosil yakıtlara olan dış bağımlılık düşünüldüğünde, enerji depolama ile sağlanacak enerji tasarrufunun ülke ekonomisine önemli katkılar sağlayacağı açıktır. Bu nedenle, enerji depolama konusundaki çalışmalar sadece enerji ithalatı yapan ülkelerde değil, aynı zamanda birçok gelişmiş ülkede de büyük ilgi görmektedir.

3.2.4. Süper kapasitör enerji depolama sistemleri

Kapasitörler, genellikle iki plaka veya elektrot arasında bir dielektrik malzeme ile ayrılmış elektrik yüklerini depolayan elektrik cihazlarıdır. Bir plaka doğrudan bir enerji kaynağından şarj edildiğinde, diğer plaka ters işarette yüklenir. Kapasitörün kapasitansı, plakaların boyutu, aralarındaki mesafe ve kullanılan dielektrik malzemesine bağlıdır. Depolanan enerji, elektrokimyasal hücrenin terminalleri arasındaki gerilimin karesiyle doğru orantılıdır, kapasite ise elektrotlar arasındaki mesafeye bağlıdır. Kapasitörler genellikle genel amaçlı güç kontrol uygulamalarında kullanılmaktadır, ancak düşük enerji yoğunluğu büyük kapasitörlerin ekonomik ve pratik olmayan kullanımını sınırlamaktadır (Chen H. vd., 2009). Süper kapasitörler, diğer kapasitör türlerinden önemli ölçüde daha yüksek kapasitans değerine sahip olup, elektrolitik kapasitörler ile şarj edilebilir piller arasındaki boşluğu doldurmaktadır. Birim hacim veya kütleye göre elektrolitik kapasitörlere kıyasla 10 ila 100 kat daha fazla enerji depolayabilmektedir, hızlı şarj/deşarj sağlayabilmektedir ve uzun ömürlüdürler. Süperkapasitörler, geleneksel katı dielektrikler

yerine elektrostatik çift katmanlı kapasitans ve elektrokimyasal psödokapasitans kullanılmaktadır. Bu özellikler, toplam kapasitansa büyük katkı sağlamaktadır (Villela, T. vd., 2019).

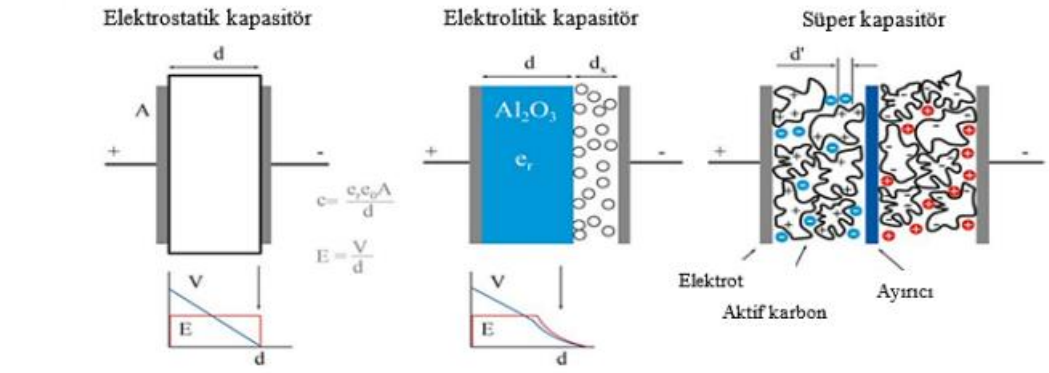
- Elektrokimyasal çift katmanlı kapasitörler (EDLC), elektrokimyasal psödokapasitansa kıyasla daha yüksek elektrostatik çift katmanlı kapasitanslı karbon veya karbon türevi elektrotlar kullanır. Bu kapasitörler, elektrodun yüzeyi ile elektrolit arasındaki Helmholtz çift katmanında yüklerin ayrılmasını sağlar. Bu ayrılma mesafesi, geleneksel kapasitörlere kıyasla çok daha küçük birkaç ångström (0.3–0.8 nm) arasındadır.
- - Elektrokimyasal psödokapasitörler, çift katmanlı kapasitansın yanı sıra yüksek miktarda elektrokimyasal psödokapasitans içeren metal oksit veya iletken polimer elektrotlar kullanır. Psödokapasitans, redoks reaksiyonları, interkalasyon veya elektrosorpsiyon gibi Faradaik elektron şarj transfer mekanizmaları ile sağlanır.
- - Hibrit kapasitörler ise farklı özelliklere sahip elektrotları bir arada kullanır: Bir elektrot genellikle elektrostatik kapasitans gösterirken, diğer elektrot çoğunlukla elektrokimyasal kapasitans sergiler. Şekil 3.8'de bir kondansatör depolama sistemi gösterilmektedir.



Şekil 3. 8. Kondansatör depolama sistemi

Süper kapasitörler, moleküler düzeyde ince bir elektrolit tabakası kullanır ve geniş yüzey alanına sahip aktif karbon yapılarıyla karakterizedir (Wagner, L., 2007). Bataryalara kıyasla çok daha verimli şarj ve deşarj özellikleri gösterirler (Emeksiz, C. ve

Burak, K., 2022). Süper kapasitörlerin enerji depolama kapasiteleri, geleneksel kapasitörlere göre önemli ölçüde yüksektir (Chen, H. vd., 2009). Bu kapasitörlerin enerji depolama mekanizması, elektrokimyasal pil sistemlerinden farklı olarak statik şarj ile gerçekleşir. Grafen kullanılarak üretilen süper kapasitörlerin ise daha hafif ve kullanışlı olması beklenmektedir. Grafenin elektrostatik şarj kapasitesi, yüzey alanı ile doğru orantılı olarak değişir ve mevcut karbon bazlı süper kapasitörlerin yerini alabileceği düşünülmektedir (Emeksiz, C. ve Burak, K., 2022). Aynı enerji depolama kapasitesine sahip olmalarına rağmen, grafen süper kapasitörler on binlerce kez şarj edilebilme özelliği sunar (Emeksiz, C. ve Burak, K., 2022). Grafen süper kapasitörlerin ticari ölçekte üretilmesi durumunda enerji depolama teknolojisinde önemli bir ilerleme sağlanması muhtemeldir (Petrovan, B., 2021).



Şekil 3. 9. Kapasitörlerin yapıları

3.3. Ünite Tahsisi Teknikleri

Ünite tahsisi problemi, yük gereksinimlerini etkili bir şekilde karşılamak için bir üretim ünitesinin saat başına çalıştırılması gereken optimum süre miktarıyla ilgilidir. Bu optimizasyon sayesinde kârı maksimuma çıkarmak için mümkün olan en az kayıpla ve minimum yakıt tüketimiyle güç sağlamak mümkündür. Minimum toplam üretim maliyetine ulaşmanın yanı sıra, bir üretim programının bir dizi işletme kısıtlamasını da karşılaması gerekmektedir. ÜT probleminin yüksek boyutluluğu ve kombinatoryal doğası, herhangi bir gerçek boyutlu sistem için problemin tamamını çözebilecek herhangi bir titiz matematiksel optimizasyon yöntemi geliştirme girişimlerini kısıtlamaktadır. Bununla birlikte literatürde bir tür yaklaşım ve basitleştirme kullanan birçok yöntem önerilmektedir. Bu çalışma, hem stokastik hem de deterministik yükler için farklı

kısıtlamalar altında ünite tahsisi için en son optimizasyon tekniklerinin ayrıntılı bir özetini sunmaktadır.

3.3.1. Ünite tahsisi hakkında genel bilgiler

Yoğun olmayan ve yoğun elektrik talepleri farklı amaçlara göre değişiklik gösterebilmektedir. Tüketilen birimler düzgün bir şekilde izlenirse, talebin daha az olduğu zamanlarda (örneğin yükün gece gündüze göre daha az olduğu) bazı birimlerin tasarruf edilmesi mümkün olabilir. Bu nedenle, bu çalışmanın temel amacı, farklı üretim birimlerinin çalışma sürelerini kısıtlamaları karşılayacak şekilde planlamaktır. Ünite tahsisi problemi hem deterministik hem de stokastik yükler için uygulanmaktadır. Deterministik yaklaşım kesin ve benzersiz sonuçlar sağlamaktadır. Ancak stokastik yükler için elde edilen sonuçlar kesin olmayabilir. Deterministik yük VZA için temel bileşen analizi (PCA) yaklaşımı kullanılır. VZA, öncelikle girdi ve çıktı değişkenlerinin tanımlandığı parametrik olmayan bir yöntemdir. PCA'da kullanılan değişken sayısı minimuma indirilmektedir. Ancak stokastik modellerde kısıtlamalar belirli kısıtlamalara dönüştürülür ve daha sonra formülasyon bilinen algoritmalardan herhangi biri ile çözülebilmektedir. Çeşitli ortamlar için çeşitli amaç fonksiyonları aşağıdaki gibidir.

3.3.2. Geleneksel yakıt bazlı yaklaşım

Denklem (3.3)'de, en aza indirilmesi gereken üç maliyet vardır. Bunlardan ilki, i biriminin t zamanında üretimini ifade eden P(i, t) ve M(P(i, t)) ise i biriminin t zamanındaki yakıt maliyetidir. İkincisi işletmeye alma maliyeti, üçüncüsü ise kapatma maliyetidir (Skelton, R. E. 1980).

$$min \sum_{t=1}^{N_t} \sum_{i=1}^{N_0} M_i\left(P_{i,t}\right) I_{i,t} + BM + DM \tag{3.3}$$

3.3.3. Stokastik yaklaşım

Stokastik ortam, rastgeleliğin amaç fonksiyonuna veya kısıtlamalara dahil edildiği ortamdır. Denklem (3.4)'de ikinci kısım rüzgar üretiminin eklenmesinden dolayı rastgelelik yaratmaktadır. Günümüzde güneş, rüzgâr vb. yenilenebilir kaynakların büyük ölçekte entegrasyonu nedeniyle güç sistemlerinde belirsizlik ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla stokastik ortam olarak da adlandırılan belirsizlik ortamında sistemin başarılı ve güvenilir çalışması için arz ve talep de farklılaşabilmektedir (Govindan, K., *vd*. 2017).

$$(P_{i,min})I_{i,t} \leq (P_{i,t}) \leq (P_{i,max})I_{i,t} \quad (3.4)$$

$$\sum_{i=1}^{N} P_{i,t} + \sum_{k=1}^{N_w} W_{k,t} = Talep_t \quad (3.5)$$

$$(P_{i,min}) \leq \sum_{i=1}^{N} F_{i-1}P_{i,t} + \sum_{k=1}^{N_w} G_{i-k}w_{i,t} - \sum_{k=1}^{N_w} G_{i-k\,i,t} - D_{i,t} \leq (P_{i,max}) \quad (3.6)$$

$$g_I(I_{i,t}) \leq 0 \quad (3.7)$$

$$g_r(P_{i,t}I_{i,t}) \leq 0 \quad (3.8)$$

$$g_c(BMI_{i,t}) \leq 0 \quad (3.9)$$

$$g_c(DMI_{i,t}) \leq 0 \quad (3.10)$$

Amaç fonksiyonu (3.3), termik generatörlerin işletme ve başlatma/kapama maliyetlerinin yanı sıra beklenen rüzgâr enerjisi yayılımından oluşur; Denklem (3.4 ve 3.5), sistem güç dengesi kısıtlamalarına karşılık gelir; Denklem (3.6), DC iletim kısıtlamalarına karşılık gelir; Denklem (3.7)'teki g, minimum çevrimiçi/çevrimdışı zaman sınırları gibi yalnızca tamsayı değişkenlerle ilişkili kısıtlamaları belirtir; Denklem (3.8)'deki g_r, artış ve azalış kısıtlarını belirtir; Denklem (3.9 ve 3.10)'daki g_c, termik generatörlerin işletme ve başlatma/kapama maliyetine ilişkin kısıtlamaları belirtir.

3.3.4. Kâra dayalı yaklaşım

Kâra dayalı ortam, temel amacın bireysel bir üretim şirketinin kârını en üst düzeye çıkarmak olduğu ortamdır. ÜT planının fiyat üzerinde dolaylı, ortalama maliyet üzerinde ise doğrudan etkisi vardır; dolayısıyla herhangi bir teklif stratejisinin önemli bir parçasıdır. Ayrıca ünite tahsisi programında esneklik vardır.

3.3.4.1. Ünite tahsisi için zamana dayalı kısıtlama

Bu kısıtlama altında asıl zorluk, optimal mimariyi elde etmek için gereken süreyi en aza indirmektir. Zaman kısıtlamalı ünite tahsisi problemi, her ünite için minimum çalışma ve çalışma süresi gibi doğrusal olmayan kısıtlamalardan oluşur (Storti, G. L., *vd*. 2015). Ünite çalışmaya başladıktan sonra hemen kapatılmamalı, kapatıldığında ise tekrar açılamayacağı minimum bir süre vardır. Dolayısıyla bu kısıtlamayı karşılamak için operasyon planlaması, üretim birimlerinin çalışma ve çalışmama sürelerine göre yapılmalıdır. Burada, algoritmayı tam olarak harcanan toplam CPU zamanının izin

verilen süreyi aştığı anda durdurmak için, durdurma kriteri olan Toplam CPU süresi izin erilen süreden büyük veya ona eşit eklenir (Mohammadi, A., *vd*. 2005).

3.3.4.2. Ünite tahsisi için emisyona dayalı kısıtlama

Emisyonun %50'den fazlası fosil yakıt bazlı güç sistemlerinden kaynaklanmaktadır (Feron, P., *vd.* 2019). Dolayısıyla GENCO'ların kârının maksimuma çıkarılması ve emisyonların minimuma indirilmesinin birbiriyle çelişen iki hedef olduğu sonucuna varılabilir. Bu nedenle, optimal çözümler olmasa bile optimalin altında çözümlere ulaşmak için çok amaçlı bir yaklaşım izlenebilir (Shukla, P. K., and Deb, K. 2007). Her iki durum da göz önüne alındığında, küçük bir maliyet tasarrufu sağlanacak, bu da yakıt tüketimini ve dolayısıyla emisyon oranını azaltacaktır.

3.3.4.3. Ünite tahsisi için yakıt bazlı kısıtlama

Mevcut senaryo, kaynakların doğru şekilde kullanılmasıyla verimli enerji üretimini gerektirmektedir. Yakıt maliyeti de önemli bir ekonomik sorundur. Yoğun olmayan yük koşullarında, üretim üniteleri yönetilebilirse yakıt gereksinimleri azaltılabilecektir.

3.3.4.4. İletim kısıtlaması

Ünite tahsisi programıyla GENCO'ların müşteri yük taleplerini karşılaması ve iletim akışlarını ve veri yolu voltajlarını izin verilen sınırlar dahilinde tutması gerekir. Tüm bu kısıtlamaların tek bir optimizasyon tekniği kullanılarak karşılanması mümkün olmadığından, bunu başarmak için hibrit bir algoritma yaklaşımı kullanılabilir.

3.3.4.5. Süper kapasitör planlaması

üper kapasitör, sistem operatörünün kararıyla aktif hale getirilebilen, şebekeye senkronize çalışan ve aktif güce etki edebilen cihazlar tarafından sağlanan, kullanılmayan kapasitedir.

$$\sum_{i=1}^{N} I_{i,t}\, SK_{i,t} = SK \tag{3.11}$$

Burada SK(i,t), t zamanındaki Süper Kapasitör gereksinimidir.

3.3.4.6. Sistem işletim sistemi gereksinimleri

Sistem çalışma Süper Kapasitör Gereksinimi (SK_O), belirli bir ünitenin kapalı durumdan hızlı başlatma yeteneği için gereken süreyi vermektedir. Açık kalma süresi boyunca süper kapasitör kapasitesini dikkate alacaktır.

$$\sum_{i=1}^{N} I_{i,t}\, SK_{i,t} = SK_O \tag{3.12}$$

3.3.5. Ünite tahsisi problem çözme teknikleri

Ünite Tahsisi, cihaz ve çalışma kısıtlamalarına bağlı olarak bir güç sistemi içindeki üretim birimlerinin zamanlamasını belirleme sorunudur. Termal ÜT problemine çözüm bulmak için çeşitli optimizasyon teknikleri uygulanmıştır. Mevcut çözümler geleneksel teknikler, geleneksel olmayan teknikler ve hibrit algoritma olarak sınıflandırılmaktadır.

3.3.5.1. Geleneksel teknikler

Geleneksel optimizasyon teknikleri arasında kapsamlı numaralandırma, öncelik listeleme, dinamik programlama, dal ve sınır, tamsayı programlama, benzetilmiş tavlama, Lagrange gevşemesi, tabu arama ve iç nokta optimizasyonu bulunmaktadır. Bu teknikler, farklı problem türlerine ve gereksinimlere uygun çeşitli yaklaşımlar sunar. Kapsamlı numaralandırma yöntemi, kombinatoryal optimizasyon tekniklerinin en basit ve temel olanıdır. Bu yöntemin prensibi, ayrık değişkenlerin tüm olası kombinasyonlarını sistematik olarak değerlendirmektir. Bu yaklaşım, amaç fonksiyonunun global optimumunu garanti eder; çünkü tüm olasılıklar incelenir. Ancak, bu yöntemin en büyük dezavantajı hesaplama süresinin çok uzun olmasıdır. Problem boyutu arttıkça, değerlendirilmesi gereken kombinasyon sayısı üstel olarak artar, bu da pratikte uygulanabilirliğini sınırlayan bir faktördür (Jones, D. R., vd., 1998). Öncelik listeleme yöntemi, belirli bir öncelik sırasına göre kararların alındığı bir yaklaşımdır. Dinamik programlama ise, problemleri alt problemlere bölerek çözen ve bu alt problemleri tekrar kullanarak optimal çözümü bulan bir yöntemdir. Dal ve sınır yöntemi, büyük ve karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılır ve çözüm alanını dallara ayırarak belirli sınırlar içinde çözüm arar. Tamsayı programlama, değişkenlerin tamsayı değerler aldığı optimizasyon problemlerine odaklanır. Benzetilmiş tavlama, fiziksel tavlama sürecinden esinlenerek geliştirilmiş bir yöntemdir ve global optimumu bulmaya çalışırken yerel minimumlardan kaçınmak için kullanılır. Lagrange gevşemesi, zor kısıtlı optimizasyon problemlerini daha basit alt problemlere dönüştürerek çözmeyi amaçlar.

Tabu arama, yerel arama yöntemlerine dayanır ve belirli bir süre için daha önce ziyaret edilen çözümleri tabu listesine alarak tekrar ziyaret edilmesini engeller. İç nokta optimizasyonu ise, doğrusal olmayan programlama problemlerini çözmek için kullanılan bir tekniktir ve çözümleri iteratif olarak bulur. Bu yöntemlerin her biri, farklı problem türleri ve gereksinimler için uygun olup, çeşitli avantaj ve dezavantajlara sahiptir. Uygun yöntemin seçimi, problemin doğasına ve çözümde istenen doğruluk ve hesaplama süresine bağlıdır. Dal ve sınır (BB veya B&B), özellikle ayrık ve kombinatoryal optimizasyonda çeşitli optimizasyon problemlerinin optimal çözümlerini bulmaya yönelik genel bir algoritmadır. Bu yöntem ilk olarak Land ve Doig tarafından önerilmiştir (Guida, A., *vd*. 2015). Dinamik programlama, çok adımlı bir problemde çok sayıda olası kararı sistematik olarak değerlendiren metodik bir prosedürdür. Mevcut geleneksel dinamik programlama yöntemi kullanıldığında, çözümü doğru ve optimal değere sahip olmasına rağmen, optimal çözüme ulaşmak çok fazla bellek alır ve çok zaman alır (Liu, R. *vd*. 2024). Karışık Tam Sayılı Doğrusal Programlama (MILP), çözüm uzayının önemli ölçüde azaltılmasına yardımcı olur ve doğrusal olmayan kısıtlamaların kolaylıkla doğrusallaştırılmasına imkân tanır. Chang ve çalışma arkadaşları tarafından geliştirilen MILP amaç fonksiyonu (Thomas, M., & Sela, L. 2024), enerji piyasasında teklif stratejilerini destekleyen oldukça büyük ölçekli sistemlerde uygulanabilir. Uyarılmış tavlama (SA) yöntemi, çalışma alanının hızlı bir şekilde aranmasını kolaylaştırır ancak geniş sıcaklık değişimi durumunda düzgün çalışmaz. Orijinal SA yönteminde, hesaplama süresinin büyük bir kısmı, mümkün olmadığı ortaya çıkan çözümlerin rastgele üretilmesi ve değerlendirilmesi için harcanıyordu (Martín-Santamaría, R., *vd*. 2024). Performansı artırmak için 2003 yılında Purushothama ve diğerleri tarafından SA ve yerel aramanın bir melezi geliştirildi (Xu, K., *vd*. 2024) ve sonuçlar C++ kullanılarak doğrulandı. Bu basit değişiklik, her sıcaklıkta gereken yineleme sayısını azaltmayı mümkün kılar ve önceki algoritmalar kullanılarak elde edilenlerden daha düşük maliyetli çözümler üretir. Lagrange gevşemesi, ilk kez 1977 yılında Muckstadt ve çalışma arkadaşları tarafından Üretim Kapasitesi (ÜK) problemine uygulanmıştır (Jewell, W. S. 1977). Problem, her biri tek bir üniteyi içeren terimlerin toplamı olarak formüle edilmiştir ve bu formülasyon, her bir üniteye ait kısıtlamalar, bir dizi bağlantı kısıtlaması (üretim ve depolama gereksinimleri) ve her saat için bir maliyet fonksiyonunu içermektedir. Bu maliyet fonksiyonu, çalışma dönemindeki tüm üniteleri kapsamaktadır. Güç sistemi ÜT'yi çözmek için Lagrangian gevşeme temelli yöntemler uygulandığında, özdeş birimlerle ilişkili alt problemlerin aynı çözümleri, ikili çözümün optimal çözümden uzak olmasına

neden olabilmektedir (Zhai, Q., *vd*. 2002). Tabu arama, mahalle her güncellendiğinde en iyi çözümü yinelemeli olarak değerlendiren ve maliyet fonksiyonunu en aza indirecek şekilde çözüm iyileştirilmediği takdirde duran tepe tırmanma yöntemine dayanmaktadır. En büyük dezavantajı yerel minimumlara takılıp kalmasıdır. Yukarıdaki sorunların üstesinden gelmek için paralel tabu arama (PTS) geliştirilmiştir. Bu fikir, farklı yönlerden daha iyi bir çözüm bulmayı mümkün kılmaktadır (Costa, A., *vd*. (2015).

3.3.5.2. Geleneksel olmayan (klasik olmayan) teknikler

Uzman sistemlerde, belirli bir yük modeli için, Ouyang ve diğerleri tarafından arayüz kuralları formunda öncelik listesi tabanlı bir buluşsal model önerilmiştir (Ouyang Z,. *vd*. 1991). Ouyang ve diğerleri tarafından dinamik yük modeli eşleştirme arayüzü ve taahhüt çizelgesi veritabanından oluşan bir uzman sistem tasarlanmıştır (Ouyang Z,. *vd*. 1990). Bulanık sistemde bulanık mantığın ÜT probleminde kullanımı Saneifard ve diğerleri tarafından gösterilmiştir (Saneifard S,. *vd*. 1997). Bunu kullanarak sistemin özellikleri ve tepkisi herhangi bir matematiksel hesaplamaya gerek kalmadan bulunabilir. Beklenmeyen yük değişimi yetersiz taahhüt kapasitesine yol açar, bu nedenle Zhai ve ark. yük değişiminin ünite tahsisi üzerindeki etkisini incelemek için bir teknik ortaya koymuştur (Zhai D,. *vd*. 1994) Hopfield sinir ağı, Sasaki ve arkadaşları tarafından ünite tahsisi problemlerini çözmek için kullanıldı ve tatmin edici sonuçlar elde etti, ancak doğruluk büyük bir endişe kaynağı olmaktadır (Sasaki H, 192). Ortalama alan tavlama sinir ağı yaklaşımının bir uzantısı Liang ve Kang tarafından gösterilmiştir (Liang R H,. *vd*. 2000). Walsh ve Mallry hem ayrık hem de sürekli terimleri içeren bir enerji denklemi üretmek için nöronları birbirine bağlamanın yeni bir yolunu tasarladılar (Walsh M P,.1997). Kurban ve Filik 2008 yılında yapay sinir ağı (YSA) modelini otomatik regresyon (AR) kullanarak yük tahminini ünite tahsisi problemi ile birleştirerek üretim maliyetini düşürmek için bir yöntem önermişlerdir (Kurban M,.2008). Ant sistemi Salam ve diğerleri tarafından geliştirilmiştir (Salam S..2007). Ayrıca bir karınca kolonisinin yuva ile besin kaynağı arasındaki en kısa yolu bulma görevini başarabileceği fikrine dayanmaktadır. Bu yol güçlendirilir ve birçok karınca en kısa yola ulaşmak için yolu takip eder.

Genetik algoritma (GA), doğal seçilim ve doğal genetiğin mekaniğini temel alan, genel amaçlı, basit ve sağlam, stokastik ve paralel bir arama yöntemidir. GA bir kromozom popülasyonu ile çalışır. Bir kromozom, 0 ve 1 bitlerinden oluşan bir dizidir. Ma ve ark. 2011 yılında C++ derlemesini kullanan geliştirilmiş bir GA yöntemi önerdi

(Ma R,.2011). Bu yöntem, 6 saatlik bir planlama periyodunda 6 üniteli bir sistemde C++ kullanılarak test edildi. 2009 yılında etkili bir arama ve dolayısıyla daha fazla ekonomi sağlayan yapılandırılmış ve geliştirilmiş bir GA'da gerçekleştirilemezlik sorununu çözmek için paralel bir yapı geliştirdiler (Abookazemi K,.2009). Bu yöntem, C# programı kullanılarak geliştirilmiş ve test edilmiştir. Testler 10 ve 20 üniteli sistemlerde 24 saatlik bir planlama süresi boyunca gerçekleştirildi. Atashpaz-Gargari ve diğerleri, emperyalist rekabet algoritmasını (ICA) ilk kez 2007'de tanıttı. ICA'da başlangıç popülasyonu bireyleri (ülkeler) iki tiptedir: emperyalistler ve hep birlikte bazı imparatorlukları oluşturan koloniler (Atashpaz-Gargari E,. 2007).

3.3.5.3. Temel hibrit algoritmalar

Withironprasert ve ark. t. saatte seçilebilecek farklı yollara sahip birçok birimin bulunduğu yeni bir yöntem olan hibrit karınca sistemi öncelik listesi (HASP) geliştirdi (Withironprasert K,. 2007). Bu aşamada m. karınca olasılıksal olarak i birimini seçer ve ünite tahsisi kısıtlarını sağlamak için bunu '1' statüsünde kabul eder. Öncelik listesi yöntemi için Karınca Sistemi (AS) arama uzayı, ünite tahsisi arama uzayının boyutu göz önüne alındığında, önerilen yaklaşımın t saatinde m. karınca tarafından seçilecek maksimum yol sayısı birim sayısına eşit olan N'dir. Öncelik listesi yöntemi olmadan AS algoritması kullanılarak seçilecek yollar 2N-1 kombinasyonunu içermektedir (Sum-im T,.2003). N'nin arama uzayının 2N-1 kombinasyonlarından çok daha küçük olduğu açıktır, dolayısıyla önerilen yaklaşıma dayalı ünite tahsisi arama uzayı önemli ölçüde azaltılmıştır. Bu yöntem daha fazla esnekliğe sahiptir ve hesaplama süresinden tasarruf ederek daha fazla ekonomik tasarruf sağlar. Sum-im T ve Ongsakul, algoritmalarını 10 birimlik sistemle test ettiler ve toplam işletme maliyetini 24 saat için 564324 $ olarak buldular. Ayrıca sonuçlarını LR (565825 $), GA (565825 $), evrimsel programlama (EP) (564551 $) ve İteratif Çaprazlamalı Genetik Algoritma (ICGA) (566404 $) ile karşılaştırarak doğruluyorlar.

3.3.5.4. Hibrit karınca kolonisi optimizasyonu

Yu ve diğerleri, 2010 yılında ünite tahsisi problemi için karınca kolonisi optimizasyonu (ACO) ve lambda yineleme yöntemini içeren hibrit bir yöntem önermiştir (Yu D R,.2010). ACO algoritması, üst seviyedeki birimlerin açık/kapalı durum planlamasını optimize etmek için kullanılırken, lambda yineleme yöntemi ise şu şekildedir: Daha düşük seviyede ekonomik yük dağıtımını optimize etmek için kullanılır.

Önerilen yöntemin etkinliğini doğrulamak için 10 birimden oluşan bir test sistemine uygulanmıştır (Kazarlis S,.1996). 20, 40 ve 60 üniteli sistemler için temel 10 üniteli sistem kopyalanır. Önerilen yöntem GA, EP ve PL'ye göre daha iyi sonuçlar vermektedir. 10 üniteli bir sistem için toplam işletme maliyeti 564950 $ (PL), 565825 $ (GA) ve 564551 $ (EP) ile karşılaştırıldığında 562989 $ olmuştur.

3.3.5.5. Hibrit lagrange gevşemesi

Hibrit Lagrangian gevşeme yöntemi (LR), Zhang ve arkadaşları tarafından tasarlandı (Zhang X H,.2009). Büyük ölçekli güç sistemleriyle baş etmede LR'ın, Dinamik Programlama eksikliğini gidermede GA'nın avantajlarından yararlanılmıştır. Sistem genelindeki talep ve depolama kısıtlamalarını gevşetmek için Lagrangian çarpanları kullanılarak ünite tahsisi problemi ayrıştırılır ve iki seviyeli bir optimizasyon problemine dönüştürülür. Tek bir birimin optimal bağlılığı, düşük seviyeli problemde GA kullanılarak çözülür. Çaprazlama ve mutasyon GA'nın yakınsamasının bağlı olduğu çok önemli işlemlerdir. İyi yakınsama oranına sahiptir ve daha hızlıdır ve yüksek kalitede çözüm sağlar. Geliştirilen algoritma 10 birimli sistem ile test edilmiş ve toplam işletme maliyeti 557726,4 $ olarak hesaplanmıştır; bu rakam 565825 $ (LR), 565825 $ (GA) ve 564551 $ (EP) ile karşılaştırıldığında nispeten daha düşüktür.

3.3.5.6. Hopfield sinir ağı

Kumar ve Palanisamy, nöronlar için doğrusal bir girdi çıktı modeli kullanan bir yöntem tasarladı; bu yöntem, daha önce bildirilen tüm Hopfield yöntemlerinden son derece farklıdır; çünkü önceki yöntemler, doğru çözümlere yakınsama için büyük miktarda hesaplama gerektiren yinelemeli prosedürleri uygular. Ancak geliştirilen formülasyonlara dayanarak önerilen yöntem, çözümlerini analitik olarak hesaplamaktadır ve çözüm sürecinde herhangi bir yinelemeye ihtiyaç duyulmamaktadır. Sonuç olarak, 10- ve 20-birimli sistemlerde kullanımıyla kanıtlandığı gibi, hesaplama çabaları büyük ölçüde azalır. Sinir ağı üzerinde çalışmasına rağmen herhangi bir eğitim gerektirmez. LR'a göre 32 kat daha az CPU (Merkezi İşlem Birimi) zamanı gerektirir (Kumar S S,.2006). Bu nedenle, 10 üniteli bir sistem için toplam işletme maliyeti 565508 $, 565825 $ (GA) ve 565475 $ (LR) ile karşılaştırıldığında 564959 $ oldu.

3.3.5.7. Hibrit EP ve parçacık sürüsü optimizasyonu (PSO)

Lal Raja Singh ve Christober Asir Rajan tarafından Haziran 2001'de Üretim Tahsisi Problemi (ÜTP) için önerilen bu hibrit istihbarat tekniği, Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) algoritmasını ve EP'yi kullanır (Lal raja Singh R,.2011). PSO, belirli bir talep için minimum maliyetle üniteleri ve bunların optimum üretim programını belirlemek için kullanılır. PSO tarafından desteklenen evrimsel programlama (EP), farklı olası talepler için maliyeti en aza indiren ünite tahsisini belirlemek için kullanılır. Bu nedenle, 7 üniteli bir Net Termal Güç Santrali (NTPS) için toplam işletme maliyeti (p.u. cinsinden) 0,93690 (PSO), 0,97483 (LR) ve 0,93461 (EP) ile karşılaştırıldığında 0,7516'dır.

3.3.5.8. Hibrit GA

Chang ve Luo "birim planlanmış" kararını çözmek için öncelik listesi sıralama şeması içeren ikili kodlu genetik algoritmayı kullandılar (Chang W P, 2008). Genetik algoritma, başlangıç popülasyonunun bir parçası olarak programlanan öncelik listesi birimi tarafından üretilen çözümü içerir; bu, alan bilgisini arama alanına enjekte eder. Planlanan liyakat sırası birimi başlangıç popülasyonunun bir parçasını oluşturduğundan, hibrit genetik algoritmanın küresel bir çözüm sağlaması garanti edilir. Önerilen yöntemin uygulanabilirliği 10 birimlik bir sistem için gösterilmiştir ve sonuç, basit GA (SGA), PSO ve Binarize Parçacık Sürü Optimizasyonu (BPSO) ile elde edilenlerden daha iyi sonuçlar üreten Hibrit Genetik Algoritma (HGA). Bu nedenle, 10 üniteli bir sistem için toplam işletme maliyeti 565804 ABD Doları (BPSO), 581450 ABD Doları (PSO) ve 609023 ABD Doları (SGA) ile karşılaştırıldığında 556760 ABD Dolarıdır.

3.3.5.9. Hibrit PSO

Alshareef, 2011 yılında sistemi yakınsamak için PSO'nun bazı kısımlarının değiştirildiği (örneğin bakteri toplama operasyonlarını içeren) gelişmiş bir PSO tasarladı. Ayrıca sistemin hızlı yakınsaması için bir onarım yöntemi uygulandı. Hibrit PSO, 24 saatlik bir planlama süresi boyunca 135 üniteli bir sistem üzerinde test edildi. Sorunun boyutu dikkate alındığında yürütme süresi hızla artmaktadır (Alshareef A. 2011).

3.3.5.10. Hibrit bulanık mantık

Hibrit bulanık mantık, 2002 yılında Mantawy ve Abdel-Magid tarafından geliştirildi; burada ÜTP, yük talebindeki belirsizliklerle başa çıkmak için bir FL (bulanık

mantık) çerçevesinde formüle edildi (Mantawy A H,.2002). SA algoritması, ÜTP'nin kombinatoryal optimizasyonunu çözmek için kullanılır. Bu hibrit bulanık mantık, 10 üniteli bir sistemle test edildi ve 536260 ABD Doları tutarında bir toplam işletme maliyeti elde edildi; bu, sonucu 536622 ABD Doları (SA) ile doğruladı.

3.3.5.11. Hibrit ACO Lagrange

Nascimento ve arkadaşları tarafından 2011 yılında önerilen hibrit ACO (Hibrit Karınca Kolonisi Optimizasyonu) Lagrange metodolojisinin, literatürde bulunan karınca kolonisinin davranışından biyolojik olarak ilham alan, kaliteli çözümleri uzlaştıran ve koloniyi azaltan optimizasyon teknikleri ile ilgili olarak rekabetçi olduğu kanıtlanmıştır; Termal ünite tahsisi probleminin ayrık değişkenleriyle ilişkili Lagrange çarpanlarının kullanımı, karınca kolonisi algoritması için bir bilgi kaynağı görevi görür (Nascimento F R,.2011). Bununla birlikte, hesaplamalı simülasyon süresinin önemli ölçüde artması, bu alternatifi özellikle orta ila büyük boyutlu sistemlerde ve/veya büyük programlama periyotlarında uygulanamaz hale getirmektedir. Hibrit ACO Lagrange metodolojisinin, literatürde bulunan karınca kolonisinin davranışından biyolojik olarak ilham alan, kaliteli çözümleri uzlaştıran ve koloniyi azaltan optimizasyon teknikleri ile ilgili olarak rekabetçi olduğu kanıtlanmıştır. 10 üniteli bir sistemle test edilmiştir ve toplam işletme maliyeti 563937 ABD Dolarıdır ve bu maliyet, 564049 ABD Doları (ACSA), 563977 ABD Doları (DACO) ve 563977 ABD Doları (RACO) ile karşılaştırıldığında daha düşüktür.

3.3.5.12. Karışık kurbağa sıçrama algoritması

Karışık kurbağa sıçrama algoritması (SFLA), Ebrahimi ve arkadaşları tarafından geliştirildi (Ebrahimi J,.2011). SFLA, bir grup kurbağanın maksimum miktarda mevcut yiyeceğe sahip konumu ararken davranışını gözlemlemeye, taklit etmeye ve modellemeye dayanan bir meta sezgisel optimizasyon yöntemidir (Eusuff M M,.2006). SFLA, bir günlük ve yedi günlük planlama dönemleri dikkate alınarak 10'dan 100'e kadar üretim ünitesine uygulanmıştır. SFLA'nın en önemli özelliği yüksek yakınsama hızıdır. SFLA'nın simülasyon sonuçları, Lagrange gevşemesi, genetik algoritma, parçacık sürüsü optimizasyonu ve bakteriyel yiyecek arama gibi algoritmaların sonuçlarıyla karşılaştırılamakdır. Bu nedenle, 10 üniteli bir sistem için toplam işletme maliyeti 566404 ABD Doları (ICGA), 564842 ABD Doları (BF) ve 565475 ABD Doları (LR) ile karşılaştırıldığında 564769 ABD Dolarıdır.

3.3.5.13. Bulanık ayarlı PSO (FTPSO)

PSO, bir kuş sürüsünün yiyecek arama faaliyetlerinin matematiksel modellenmesi ve simülasyonudur. Her parçacık optimal noktaya doğru farklı hızlarla hareket eder. Bir parçacığın hızı üç bileşenle hesaplanır: atalet, bilişsel ve sosyal. Parçacıklar en uygun çözümü bulana kadar çok boyutlu arama uzayında hareket ederler. Atalet ağırlığını ve öğrenme faktörlerini en iyi uygunluk (BF) ile ayarlamak için bulanık bir sistem kullanılır. Bu FTPSO, MATLAB'da 10 ve 20 veri yolulu bir sisteme uygulanmıştır ve sistemin güvenilirliğini arttırdığı kanıtlanmıştır. ACO ve BP'den daha hızlıdır ve hem küçük hem de büyük ölçekli problemleri çözme yeteneğine sahiptir (Kumar C,.2011). Bu nedenle, 10 üniteli bir sistem için toplam işletme maliyeti 565825 ABD Doları (GA), 564551 ABD Doları (EP) ve 565475 ABD Doları (LR) ile karşılaştırıldığında 557952 ABD Dolarıdır.

3.3.5.14. Memetik algoritma

Memetik algoritma (MA), iki kaynağın hibrit bir hesaplama modelidir. İlk kaynak, biyolojik veya Darwinci evrimi taklit eden bir GA tarafından modellenmiştir ve ikinci kaynak, kültürel evrimi veya fikirlerin evrimini taklit eden yerel bir arama algoritması tarafından modellenmiştir. GA'daki bilgi birimine gen, MA'da ise mem adı verilir. Genler, bir GA'nın parçası olan çaprazlama ve mutasyon operatörleri ile iyileştirilir ve memler, yerel bir arama operatörü tarafından geliştirilir. Bu yöntem fiyat bazlı ünite tahsisi için kullanışlıdır (Dimitroulas D K,.2011). Yöntem 110 birime kadar test sistemleri üzerinde uygulanmıştır ve sonuçlar, incelenen her durumda MA'nın, genetik algoritma, simüle edilmiş tavlama ve Lagrangian gevşeme yönteminden daha yüksek Kar Fiyatına Dayalı Üretim Tahsisi (PBÜT) programlarına yakınsadığını göstermektedir. Dolayısıyla, 10 birimlik bir sistem için ortalama kâr, 1898,85 $ (SA) ve 1899,21 $ (GA) ile karşılaştırıldığında 1899,39 $ oldu.

3.3.5.15. İkili/Gerçek kodlu PSO

PSO, diğer stokastik optimizasyon yöntemlerine göre daha kısa sürede ve kararlı yakınsama özelliğiyle daha kaliteli çözüm üretebilmektedir. PSO modeli, olası problem çözümlerinin D boyutlu gerçek değerli uzayında hareket eden bir parçacık sürüsünden oluşur (Chandrasekaran K,.2012). Bu özel algoritmada, ikili PSO'nun parçacık arama performansını arttırmak için tanh fonksiyonu uygulanır. İkili/gerçek kodlu PSO metodolojisi 24 saatlik planlama için 3-, 17-, 26- ve 38-üretim ünitesi sisteminde test edilmiş ve doğrulanmıştır ve dolayısıyla büyük ölçekli bir güç sistemi için

uygulanabileceği sonucuna varılmıştır. Algoritma 38 birimlik bir sistem için test edildi ve toplam işletme maliyeti (milyon Dolar cinsinden) 196,73 (FAPSO), 207,8 (SA) ve 209 (LR) ile karşılaştırıldığında 196,10 oldu. Bu durumda, FAPSO (Bulanık Uyarlamalı Parçacık Sürü Optimizasyonu) yöntemi, 196,10 olarak hesaplanan toplam işletme maliyeti açısından en düşük performansa sahiptir.

4. MATERYAL VE YÖNTEM

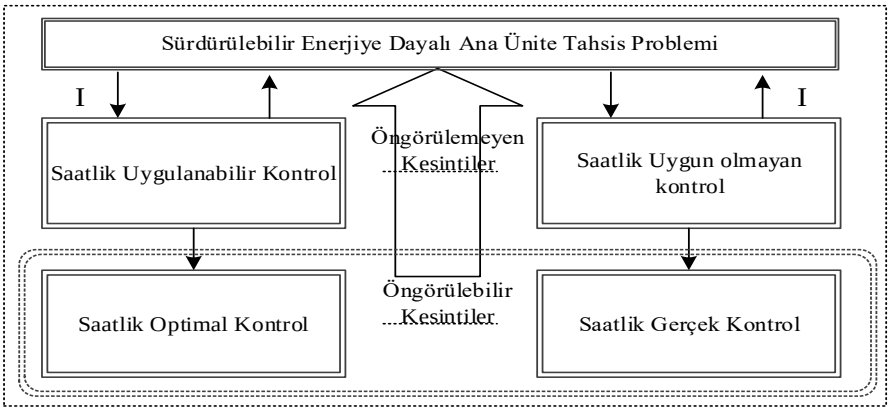
Güvenilirlik, dış mekan ve güç sistemleri işletim ortamında beklenmedik olaylarla karşılaşıldığında kesintisiz ve kaliteli enerji sağlamak için optimal planın etkileyebileceği birçok faktörden etkilenmektedir. Güç dağıtım sistemleri rekonstrüksiyon yöntemi kullanılarak yük noktalarındaki güvenilirliği değerlendirmek için bir güvenilirlik modeli tasarlanmıştır (Amanulla, B.,2012). Güç kaynağı sistemlerinde üretim-iletim-dağıtım arızaları ve ani yük değişiklikleri gibi beklenmedik olaylarla birlikte, elektrik talebinin miktarının değişmesi kaçınılmazdır (Savier J. S., 2007; Raghavendra, C. S., 1989). Bu değişikliğin miktarına bağlı olarak, elektrik arzı elektrik sisteminin dinamik işleyişini sağlamaktadır. Genellikle basitleştirilmiş bir sistemde frekans kontrolü için Tersiyer, İkincil ve Birincil kontrol olarak adlandırılan üç kontrol birimi kullanılmaktadır (Chen, C. S., 2006; Das, D. A.,2006). Ünite Tahsisi, kontrollü bir elektrik güç sisteminde talep edilen gücü karşılarken üretim biriminin maliyetlerini içeren bir plan olarak tanımlanmaktadır. Ünite tahsisi problemleri, üretim maliyet fonksiyonunun amaç fonksiyonu olarak belirlenmektedir (Jeon Y. J., 2020; Prasad, K., 2005). Ayrıca, maliyet tabanlı ünite tahsisi problemi ile birlikte çözülmesi gereken güvenilirlik problemi, maliyet-güvenilirlik temelli ünite tahsisi problemi olarak ünite tahsisi problemine dahil edilmektedir (Hossain, E., 2018; Tur, M. R., 2017). Bu tür bir ünite tahsisi problemi üç ana amaca hizmet etmektedir: Maliyetin minimize edilmesi, arz gücünün sağlanması ve güvenilirlik kısıtlarının sağlanmaktadır (Salazar, H., 2006). Ünite tahsisi problemleri, üretim biriminin en ekonomik koşullarda çalıştırılacağı planları belirlerken ortaya çıkarmaktadır (Bo, H., 2015). Bu çalışmada, sistem güvenilirliği için istikrarlı bir yapı gereklidir. Dolayısıyla, bu planlama ile uygun miktarda süper kapasitörün tahsis edilmesi gerekmektedir. Süper kapasitör minimum maliyet ve birimlerin kısa vadeli talebi karşılayacak uygun üretim seviyeleri sağlanmalıdır (Gopalakrishnan, R., 2013; Tur M. R., 2020). Belirli ölçek optimizasyon problemlerini çözmek için bir çözüm yöntemi olarak önerilen bir test sisteminde Benders ayrışması kullanılmıştır (Shahidehpour, M.,2002). Bu teknik kullanılırken dikkate alınması gereken ana faktör, sürdürülebilir enerji temelli kesintisiz elektrik kullanımını en ekonomik şekilde gerçekleştirecek planlamaların yapılmasıdır (Padhy, N. P., 2004; Junjie Jia.,2019). Kullanılan yöntemde, büyük bir problemdeki tüm karar değişkenleri ve kısıtlamaların aynı anda düşünülmesi yerine, problem birkaç küçük probleme bölünerek optimal yük dağıtımı sağlanmıştır (Gallardo, A. C., 2009; Moradi, A., 2008). Bu küçük problemlerin çözülmesi, üretim

birimlerinin başlama maliyetleri, durma maliyetleri ve üretim maliyeti gibi değişkenler kullanılarak tek büyük bir problemi çözmekten daha verimli olabilir (Falaghi, H., 2009; Madriga, M.,2000).

4.1. Optimizasyonda Kullanılan Kısıtlar ve Maliyet Denklemleri

Güvenlik Kısıtlı Ünite Tahsisi (GKÜT) çözüm prosedürü, Şekil 4.1'de detaylı olarak gösterilmiştir. Bu diyagram, en uygun algoritmanın birim taahhüdü için nasıl yapılacağına dair akış şemasını göstermektedir. İlk GKÜT ana problemi (AP1), denklem (2) içinde gösterilmiştir. GKÜT ana problemi iterasyon numarası "AP_{lower}" olarak tanımlanır, N ünite numarasını (1-8), T dönemi (24 saat), bm_i başlangıç maliyetini, dm_i durdurma maliyetini ve $üm_i$ üretim maliyetini tanımlar. Bu denklemde, hangi enerji santralinin çalışacağına ve/veya enerji sağlamanın maliyetinin en düşük olduğu AP_{lower} değerini sağlamak için iterasyonlar yapılarak optimizasyon gerçekleştirilir.

$$min\ AP1, AP_{lower} \geq \sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N} dm_i\alpha_{it} + bm_i + \text{ü}m_{i,t} \qquad (2)$$



Şekil 4. 1. Sürdürülebilir enerji üzerinde güvenlik kısıtlı çözüm prosedürü

Enerji üretim maliyetleri analiz edildiğinde, termal enerji santrallerinin üretim maliyet fonksiyonunun (3) genellikle konkav olmayan bir fonksiyon olduğu sonucuna varılır. Bu nedenle, bu fonksiyonlar ekonomik dağıtım için tasarlanmış planlarda konveks dörtgenler oluştururlar. ü$m_{i,t}$ üretim maliyetini, ü$k_{i,t}$üretim kapasitesini, $c_i, b_i\ ve\ a_i$ üretim maliyeti katsayılarını ifade eder.

$$üm_{i,t}(b_{i,t}ük_{i,t}) = b_{i,t}(c_i + b_i ük_{i,t} + a_i(ük_{i,t})^2 \quad (3)$$

Bir termal enerji santralinin işletim dışı durumdan işletim durumuna geçişi sırasında bir maliyet ortaya çıkar, bu da kapalı bir santral için geçerli olan ve başlangıç maliyeti olarak adlandırılır. Başka bir deyişle, elektrik üreten bir birimin maliyeti, elektrik üretmeyen bir birimden daha ucuzdur. Hidroelektrik santraller için başlangıç maliyeti yoktur. üretim biriminin dönem t süresince başlangıç maliyeti (4):

$$üm_{i,t}(b_{i,t}) = (1 - b_{i,t-1})k_1 b_{i,t} \quad (4)$$

t=1 olduğunda, başlangıç maliyeti, birim $b_{i,t}$ geçmişine bağlı olacaktır; eğer $b_{i,t}$ = 1 ise, başlangıç maliyeti sıfır olacaktır çünkü birim önceden taahhüt edilmiştir. Eğer $b_{i,t}$ = 0 ise, başlangıç maliyeti k1 olacaktır. Şekil 2'de kullanılan hatların maliyet fonksiyonu denklem (5) ile gösterilmiştir. Pk, Hat 1 için Hat kayıpları ve α_i ise i hat adıdır.

$$P_k = \sum_{i=1}^{n} \alpha_i {P_i}^2 \quad (5)$$

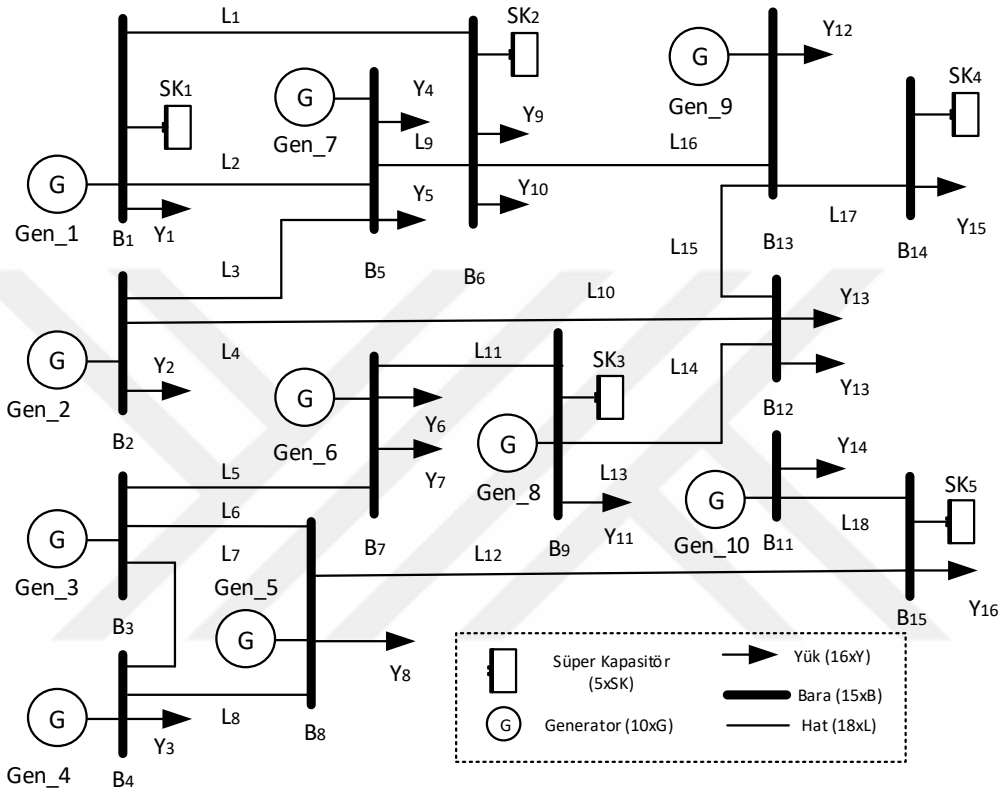
Güç sistemlerinde kesintiler durumunda değiştirilecek birimlerin maliyetini hesaplamak için benders ayrışma yöntemi kullanılarak tahsis planlamasının amaç fonksiyonu aşağıdaki gibi tanımlanır: (6).

$$AP_{lower} = 112st_{üb11} + 135st_{üb12} + 143st_{üb21} + 42st_{üb22} + \cdots + 19sd_{11} + 24sd_{12} + 31sd_{21} + 11sd_{22} + \cdots + 6595c_{üb11} + 7290c_{üb12} + 6780c_{üb21} + 1159c_{üb22} \ldots \quad (6)$$

4.2. 15 Baralı Test Sistemi Parametreleri

Son yıllarda, dağıtım ağlarını yeniden yapılandırırken güvenilirlik sorunlarını ele alma konusunda bir çalışma yapılmıştır, bunların çoğu sistem güvenilirliğini maksimize eden optimal bir yapılandırma elde etmek için zeka temelli yöntemlerdir (Tur. MR. 2021). Bu çalışma, işletme depolamalamaların "gerçek dünya" modelini temsil edecek kadar büyük olan bir sistemi çözmek içindir. Hızla analiz edilen üç parametrenin hassasiyeti göz önüne alındığında, parametreleri mümkün olduğunca küçük bir etki faktörüyle

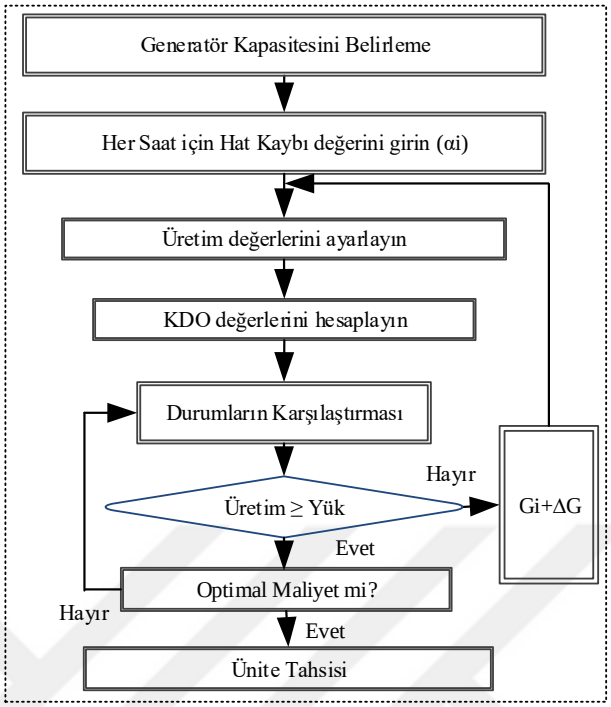
değerlendirmek uygun görülmüştür. Şekil 4.2'de 15 bara Test sisteminin 10 generatör ve 16 yükten oluştuğunu göstermektedir. Ayrıca, test sisteminin genişletilmesi basit bir algoritma ile gerçekleştirilebilir. Test sistemi, üretim kapasiteleri olan jeneratörler, kısıtlamalarla tanımlanan iletim hatları ve yük bilgileri içeren bir sistemden oluşur (The IEEE reliability test system, 1996).



Şekil 4. 2. 15 Bara test sistemi modeli, 10 jeneratör,16 yük ve 5 süper kapasitör içerir

4.3. Optimizasyon Algoritması ve Tahsis Kapasitesi

Jeneratör ve hat giriş verileri Çizelge 4.1'de verilmiştir. Sorun aşağıdaki gibi tanımlanmıştır: G1-G10'un başlangıç durumu KAPALI'dır. Minimum yukarı/aşağı süre bir saattir. Rampalama kısıtları dikkate alınmamıştır. Şekil 4.3'te gösterilen akış diyagramında, test sistemindeki üretim birimleri G1-G10'un kapasite değerleri minimum ve maksimum arasında belirlenir. Daha sonra sistem yük değeri her saat için oluşturulur. Kesinti Değiştirme Oranı (KDO) değerleri, bu yük değerine göre üretim birimlerinin değeri ayarlanarak hesaplanır. Bu hesaplamanın sonucunda, sekiz farklı vaka çalışması için üretim değeri yükten daha yüksek olarak ayarlanır ve en uygun SK_{MM} elde edilir.



Şekil 4. 3. Temel optimizasyonu akış şeması

Çizelge 4.1'de ifade edilen "k" sayısı, en büyük güçlü birim olan Gi'nin maksimum gücünün diğer birimlere eşit şekilde dağılmasını sağlayan katsayıdır. Tüm ünitelerin toplam kapasitesi elde edilmiş ve k sayısı (0,199) ile çarpılarak her ünite için tutulacak SK_{Gi} kapasitesi belirlenmiştir.

$$k = P_{max} \div \sum_{i=1}^{n=8} P_{i,max} \; and \; SK_{Gi} = k.P_{i,max} \tag{7}$$

Çizelge 4. 1. Generatör birimlerinin üretim kapasitesi bilgisi

Birim *i* (MW)	***$P_{i,min}$* (MW)**	***$P_{i,max}$* (MW)**	***$P_{gerçek}$* (MW)**	***SK_{Gi}* (MW)** ***P_{real}*0,199**	**Maliyet Fonksiyonları**
G_1	10	22	21	4,179	$0.022P_1^2+6.5P_1+6595$
G_2	12	24	20	3,98	$0.018P_2^2+7.5P_2+7290$
G_3	14	28	18	3,582	$0.015P_3^2+5.8P_3+6780$
G_4	16	32	22	4,378	$0.021P_4^2+3.3P_4+1159$
G_5	18	34	28	5,572	$0.013P_5^2+3.3P_5+1697$
G_6	20	38	26	5,174	$0.014P_6^2+3.7P_6+1822$
G_7	22	42	35	6,965	$0.076P_7^2+6.2P_7+5134$
G_8	24	46	30	5,97	$0.066P_8^2+3.9P_8+4256$
G_9	26	50	35	6,965	$0.016P_8^2+2.1P_8+2581$
G_{10}	28	54	40	7,96	$0.026P_8^2+3.2P_8+6314$

Çizelge 4.2'de gösterilen şekilde hesaplanan COPT (Kritik Çalışma Noktası Eşiği), birimler için hesaplanan KDO değeri, santralların sağlayamadığı güç miktarını belirler. Test modelinde, KDO taahhüt riski, olasılıksal bir kriter sağlamak için bu yöntemde uygulanır. Yük Kaybı Beklentisi (YKB), tedarik güvenliğini ölçmek ve bir güvenilirlik standartına ulaşmak için kullanılabilecek bir indeksi tanımlar. Sekiz üretim biriminin (G1-G10) 32.768 farklı durumda çalışacağı göz önüne alındığında, KDO değeri her bir birim için önceden tanımlanır ve Kayıp Fırsatlarının Beklenen Miktarı (LOLE) değerleri 32.768 farklı durum için hesaplanır.

$$YKB = \sum_{i=1}^{T} p_i t_i \quad (\frac{saat}{100d} periyot) \tag{8}$$

Çizelge 4. 2. Kapasite kesinti olasılığı tablosu

Durum	**G_1**	**G_2**	**G_3**	**G_n**	KDO	**YKB**
1	0	0	0	.	0.931	214.13
2	1	0	0	.	0.019	2.09
3	0	1	0	.	0.049	5.88
4	1	1	0	.	0.028	4.67
.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.
32.768	1	1	1	.	1	0.000001

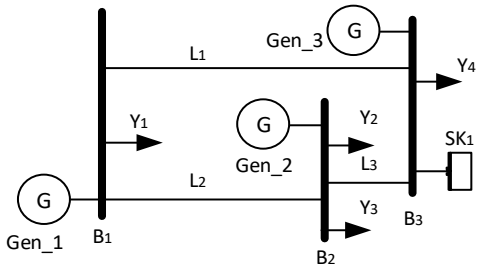
Geliştirilmiş maliyet, güvenilirlik ve kayıp analizi ile çoklu risk analizi yöntemi, bu çalışma için optimal SK_{MM} bulmak amacıyla yeni bir model önermek için genişletilmiştir. Özellikle, net talep tahmin hatası için tek taraflı yetki, değişken üretim tahmin hatasının alışılmadık olasılık dağılımını dikkate almak için ilgili birim tahsisini genişletir ve yenilenebilir enerji gelişiminde ve sistemin Beklenen Enerji Sunulmaması (BES) (9) hesaplamasında değişken üretim tahmin hatasının alışılmadık olasılık dağılımını dikkate almak için ilgili birim tahsisini genişletir. Her senaryo altında üç farklı parametrenin hesaplanmasının ardından, sistem SK_{MM} optimal bir şekilde belirlenebilir. Test sistemi için önerilen tahsis modelinin, karma tamsayılı lineer programlama kullanarak en iyi sonucu verdiği düşünülmektedir.

$$\sum_{i=1}^{N} BES^t = (KDO) \times (YKB) \times (Süre) \tag{9}$$

4.4. Sürdürülebilir enerji temelli güvenlik kısıtlı birim tahsis çözümü

15 baralı test sistemi için temel olasılık ve güvenilirlik kavramları üzerine bir analiz yapılmıştır. Bu analizde, güçlü ve zayıf besleyicilerin karşılaştırması yapılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda, bu besleyicinin kullanımı tercih edilmeyecektir. SK kapasitesi, karşılaştırmada kullanılan diğer kriterlerle en uygun ve faydalı şekilde kullanılacaktır. Test sisteminin güvenilirliği için, tüm bileşenlerin güvenilirliği 0.9 ise

(10) sistem güvenilirliğini hesaplayın. Şekil 4.4'te gösterilen kullanılan test sistemi için 3 bara için bir analiz yapılmıştır.



Şekil 4. 4. 3 bara, 3 generatör, 4 yük ve 1 süper kapasitör için test sistemi

$$Güvenirlik\ (G_s) = [\partial_s(\partial_3\partial_9)(\partial_s\partial_4) + \partial_4 - \partial_s\partial_3\partial_9\partial_4)$$
$$G_s = [0.91(0.92)(0.94) + 0.97 - 0.8719) = 0{,}8850 \quad (10)$$

Sistemdeki her bir bileşenin arıza oranı: 5 f/yıl ve ortalama tamir süresi: 94,2 saat ise sistemin kullanılabilirliği (11) ve (12) hesaplanır.

$$G_s = [\propto_s (3\ iyi\ değeri)(\propto_3)\ \propto_s (3\ kötü\ değeri)(SKU_3) \quad (11)$$

$$Sistemin\ Kullanılmazığı\ (SKU) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} = \frac{5}{5 + 95} = 0.05 \quad (12)$$

$$Sistem\ Uygunluğu = (0.95)[0.99275] + (0.05)[0.986094] = 0.992417$$
$$Sistem\ Uygunsuzluğu = 1 - 0.99241 = 0.00759$$

Test sisteminde tedarikin ortalama onarım süresi, yılda 0.5 f/arızadır, yani 2 saat olarak kabul edilir. Hat verileri Tablo 3'te gösterildiği gibidir. Model için üretim maliyeti, hat kayıpları ve güvenirlik parametreleri dikkate alınarak Karar Denklemi oluşturulmuştur (Denklem 13).

Çizelge 4. 3. Hat verileri

Hat	Arıza oranı (arıza/yıl)	Ortalma Tamir Süresi (saat)
1	3.0	4
2	4.0	6
3	5.0	8

$$Karar\ Denklemi\ (KD)_n = \left[\left[\sum_{i=1}^{n} \frac{m_{i+1}}{m_i + m_{i+1}}\right]\left[\sum_{i=1}^{n} \frac{G_i}{G_{i+1}}\right]\left[\sum_{i=1}^{n} \frac{\propto_{i+1}}{\propto_i + \propto_{i+1}}\right]\right] \quad (13)$$

Denklem (14)'te gösterilen üç farklı parametre için Çizelge 4.4'te gösterildiği gibi, 2^3=8 vaka analizi yapılacaktır. GSK, toplam süper kapasitör miktarıdır ve GSK 1, birim 1 için süper kapasitör miktarıdır.

$$G_{SK_n} = \sum_{i=1}^{n} \frac{KD_i}{KD_i + KD_{i+1}} G_{SK} \quad (14)$$

Eşitlik (13) tarafından verilen KD değerlerinin hesaplanmasının ardından, denklem (14) tarafından verilen Süper Kapasitör Gücü olarak G_{SK} değeri, sekiz farklı durum için Çizelge 4.4'te gösterildiği gibi hesaplanır. Üç durumu maliyet, kayıp ve güvenilirlik olarak düşünerek, 2^3 = 8 sayıda durum karşılaştırması yapılacaktır.

Çizelge 4. 4. Vaka çalışması seçeneklerinin belirlenmesi

Durumlar	Durum 1	Durum 2	Durum 3	Durum 4	Durum 5	Durum 6	Durum 7	Durum 8
Güvenirlik	-	-	-	+	-	+	+	+
Maliyet	-	+	-	-	+	+	-	+
Kayıp	-	-	+	-	+	-	+	+

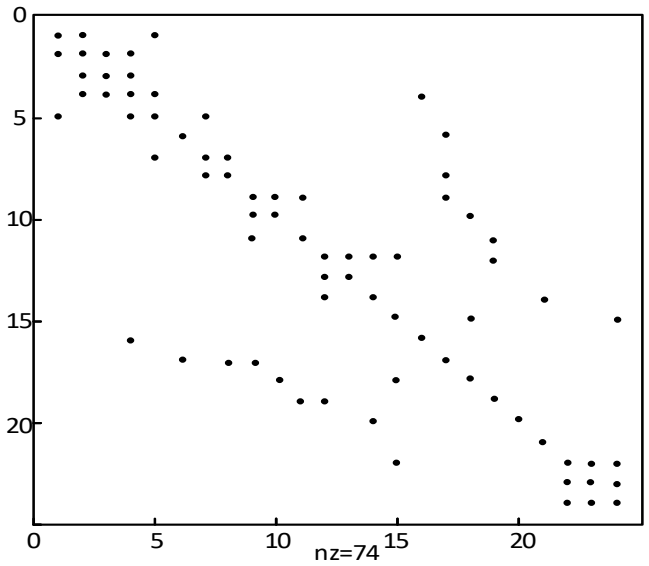
Kullanılan IEEE test modelinde: Hat1, Hat2 ve Hat3'ün güvenilirliği sırasıyla 0,95, 0,99 ve 0,94'tür, Hat kayıpları α1=0,0001 ve α2=0,0002 ve α2=0,0004 olarak verilmiştir (Çizelge 4.5). Şekil 4.1'e göre, yük miktarının üretim toplamından çıkarılmasıyla süper kapasitör miktarı 50 MW olarak elde edilmiştir.

Çizelge 4. 5. Sekiz farklı vaka çalışmasının verileri

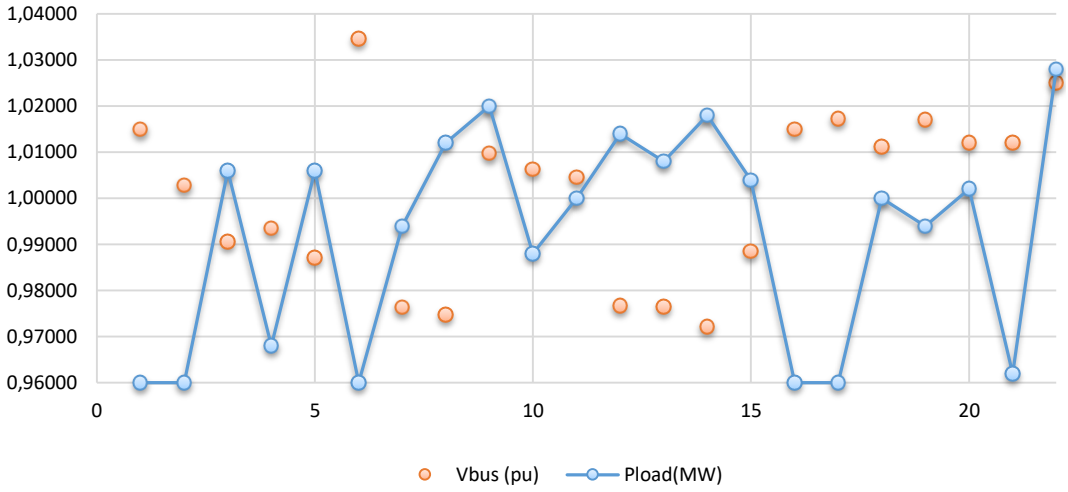
Birim	**Maliyet (m)**	**Kayıp (α)**	**Güvenirlik (G)**	**SK (MW)**
G1	8	0.0001	0.95	50
G2	12	0.0002	0.99	50
G3	10	0.0004	0.94	50

	β1	**β2**	**GSK**	**Toplam Üretim Maliyeti ($/MWh)**
Durum1	0	0	50	1400
Durum2	0.45	0.48	55.55	1388.88
Durum3	0.43	0.66	33.33	1433.33
Durum4	1.05	0.97	51.06	1397.87
Durum5	0.18	0.29	38.46	1423.07
Durum6	0.56	0.43	56.60	1386.79
Durum7	0.34	0.65	34.28	1431.42
Durum8	0.18	0.29	39.47	1421.05
Ortalama			44.84	1410.30

Güvenirlik, Maliyet ve kayıp (α) değerleri kullanılarak, 15 bara sisteminin bara kabul matrisi oluşturulmuştur. Bu matrisin boyutu 10*10 'dir. Şekil 4.5, bara kabul matrisinin sıfır olmayan elemanlarının bulunduğu noktaları göstermektedir. Sistem özellikleri Çizelge 4.5'te verilmiştir. P değerleri için program yakınsama grafiği Şekil 4.6'da gösterilmiş ve program sonuçları Çizelge 4.5'te verilmiştir. Programın sonucunda, ortalam GS_K güç miktarı 44.84 MW olarak hesaplanmış. Sistem kayıp katsayıları B, güç akışı analizi sonucu hesaplanmış ve santraller MATLAB® ile yazılan programın yardımıyla ekonomik bir şekilde yüklenmiştir. Ekonomik Dağıtım Analizi'nin akış diyagramı Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4. 5. Bara kabul matrisinin sıfır olmayan noktaları



Şekil 4. 6. P ve Vbus için program yakınsama grafiği

5. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Önerilen planlamanın önceki SK_{MM} (süper kapasitör marjinal maliyet) tahsisi yöntemleriyle karşılaştırıldığında, enerji kalitesini iyileştirdiği ve güvenilir bir hizmet sağladığı görülmektedir, çalışmanın genel katkılarını aşağıda özetlenmiştir:

• Maliyet katkısı temelli maliyet muhasebesi yöntemi, SK_{MM} ağ güvenliği, üretim maliyeti ve hat kayıplarına olan etkilere göre tahsis edebilir.

• Algoritmanın geliştirilmesi durumunda, yenilenebilir enerji kaynaklarının gelişiminin ağ güvenliği üzerindeki etkileri ölçülebilir ve geleneksel ünitelerle karşılaştırılabilir.

Çizelge 4.5'te gösterilen vaka çalışmaları aşağıda tanımlandığı gibi hesaplanmıştır.

• İlk vaka çalışmasında, herhangi bir parametre dikkate alınmadan SK miktarı birimlere eşit olarak dağıtıldı.

• İkinci vaka çalışmasında, sadece üretim maliyeti parametresi dikkate alındı.

• Üçüncü ve dördüncü vaka çalışmalarında sırasıyla hat kayıpları ve güvenilirlik parametreleri dikkate alındı.

• Beşinci vaka çalışmasında, üretim maliyeti ve hat kayıpları parametreleri birlikte dikkate alındı.

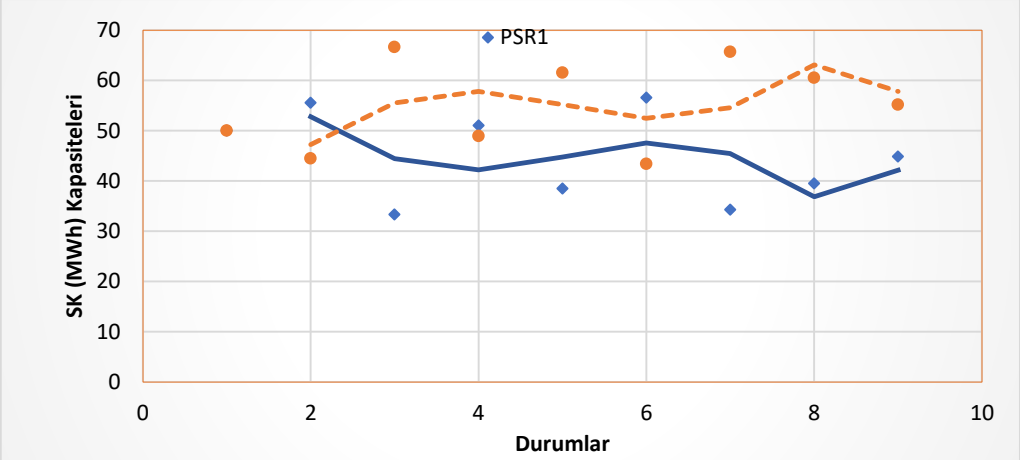
• Altıncı vaka çalışmasında, üretim maliyeti ve güvenilirlik parametreleri birlikte dikkate alındı.

• Yedinci vaka çalışmasında, hat kayıpları ve güvenilirlik parametreleri birlikte dikkate alındı.

• Son vaka çalışmasında, tüm üretim maliyeti, hat kayıpları ve güvenilirlik parametreleri dikkate alındı.

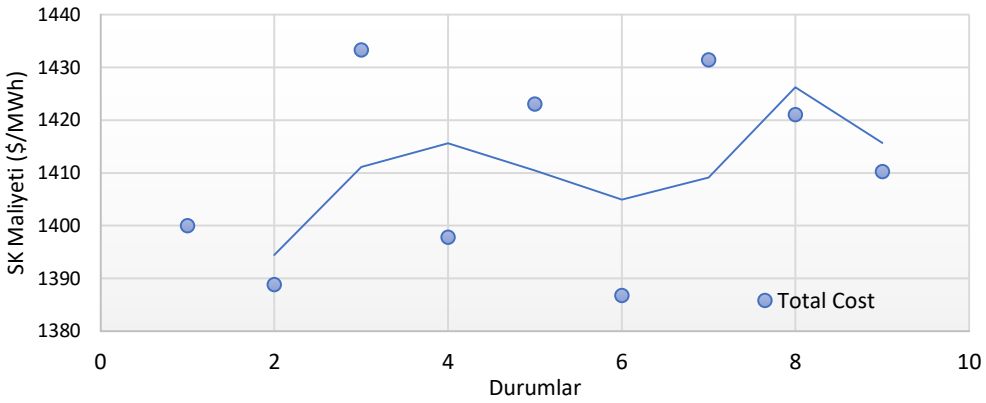
Çizelge 4.5'e göre elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında, en düşük maliyet tüm vaka çalışmaları arasında altıncı durumda 1386.79 $/MWh olarak elde edilmiştir. Bu vaka çalışmasında dikkate alınan parametreler üretim maliyeti ve güvenilirliktir. Bu, birimlere dağıtılan üretim miktarlarının, maliyet ve güvenilirlik parametrelerini dikkate almanın sonucu olarak en güvenilir ve ekonomik olduğunu açıklar. Böylece, süper kapasitör dağıtımı, MATLAB GKÜT sonucundan daha makul bir maliyetle elde edilmiştir. Ayrıca, yalnızca hat kayıpları ve/veya hat kayıpları ve güvenilirliğin dikkate alındığı durumlarda çok ekonomik olmadığı görünmektedir. Vaka çalışmalarında, iki birim arasında çizilen doğru çizgi ve süper kapasitör miktarları ile durumun incelenmesi sonucunda, Şekil 5.1'de gösterilen tüm miktarlarla karşılaştırıldığında altıncı durumun en uygun olduğu

görülmektedir. Birimler arasındaki yapılan dağılımdaki en büyük fark üçüncü vaka çalışmasında görülmektedir. Bu durumda, hesaplamaya dahil edilen tek parametrenin hat kayıpları olduğu görülmektedir.



Şekil 5. 1. Ünitelerin süper kapasitör miktarı dağılımı

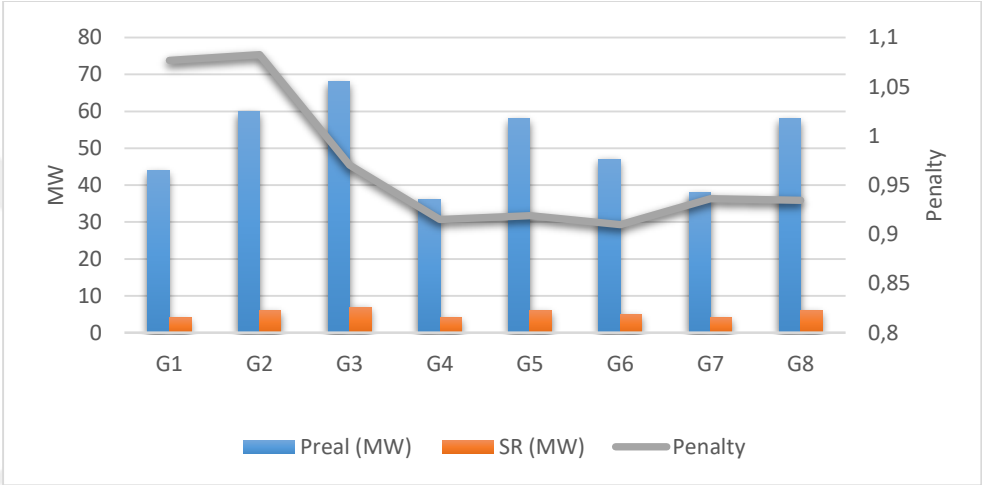
Miktarlar, iki doğru çizginin dışında olduğu durumlarda toplam maliyet ortalamasından daha yüksektir. Şekil 5.2'de gösterildiği gibi, doğru çizgiye göre en düşük maliyet 6. durumda elde edilir. Vaka çalışmalarının ortalaması GKÜT maliyeti olan 1400'e kıyasla 1410'dur, bu da GKÜT'un iyi bir dağıtım yaptığını göstermektedir. Ancak, çalışmada maliyet ve güvenilirlik parametrelerinin dikkate alındığı sonucun, en uygun maliyet olduğu gerçeğidir.



Şekil 5. 2. Süper kapasitör miktar maliyetleri

İterasyonların sonucunda sistemdeki kayıp miktarları gösterilmiştir. Burada, sistemdeki kayıp miktarının ilk durumda 14 MW olduğu ve iterasyonlarla azalarak denge

halinde 12 MW'ye düştüğü görülmüştür. Kayıpların azalması nedeniyle, iterasyonların sonucunda sistemdeki toplam üretilen güç miktarının değiştiği gözlemlenmiştir. Buna göre, her iterasyonda santrallerin çıkış gücü değişmiştir. İterasyonların sonucunda toplam üretilen güç miktarının değişmiştir. Santrallerin çıkış gücü ve sapma değerleri Şekil 5.3'te verilmiştir. G1,G2 ve G3 termal santrallerinde sapma değeri 1'in üzerindedir ve diğer birimlerde 1'in altında olduğu görülmektedir. Sapma değeri 1'den büyük olması, üretilen güce kıyasla kayıp miktarının arttığını gösterir. Bu nedenle, bu jeneratörler hem maliyet hem de süper kapasitör tahsisi için tercih edilmez.



Şekil 5. 3. Santrallerin yükleri, süper kapasitör ve sapma değerleri

6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

6.1. Sonuçlar

Geleneksel maliyet odaklı planlama en iyi sonuçları elde etmek için yetersizdir. En iyi sonuç için, test sisteminde kullanılan üretim maliyeti, hat kayıpları ve güvenilirlik gibi parametreler dikkate alınır. Hatların kayıpları ve güvenilirliği tahmin edilirse, sonuç daha ekonomik ve sürdürülebilir olacaktır. Bir yardımcı hizmet olarak süper kapasitör değerinin maliyet-kayıp-güvenilirliği, elektrik enerjisi piyasasında kullanılan mevcut yöntemlere yeni bir yaklaşım savunmaktadır. Kullanılan yöntemlerde, tahsis sürecinde sadece maliyet parametresi kullanılır. Bu parametrelerin yanı sıra, kayıp ve güvenilirliğin dikkate alınması, sistemin daha sürdürülebilir bir şekilde işletilmesini sağlayacaktır.

Ekonomik dağılımın sonucunda, kayıpların dikkate alındığı durumlarda üretim maliyetinin arttığı gözlemlenmiştir. Kayıpların olduğu durumlarda, yakıt maliyetindeki artış, kayıp miktarı, sistemdeki toplam güç, her santralin çıkış gücü ve sistem toplam maliyetinin değişimi grafiklerde gösterilmiştir. Ekonomik dağılımların sonucunda, düşük maliyetli santrallerin G4, G5, G6 ve G8'den daha fazla pay aldığı ve böylece sistem maliyetinin azaldığı gözlemlenmiştir. Güç akışının ve ekonomik dağılım analizinin, artan elektrik talebini karşılamak için yapılacak planlama çalışmalarında önemi ortaya çıkmıştır. Ekonomik dağılım analizi yaparak, santraller uygun şekilde yüklenerek birim enerji üretim maliyeti azaltılacak ve sürdürülebilir enerjiye dayalı ekonomiye katkı sağlanacaktır. Beklenmeyen olaylar, örneğin üretim, iletim ve dağıtım kısımlarında arızalar veya ani yük değişiklikleri sırasında süper kapasitör devreye alınacak ve modeller olarak gösterilen iki jeneratör ve yük sistemleri için en uygun dağılım elde edilmiştir. Bu, üç parametre, yük dağılımı, üretim maliyeti, hat kayıpları ve güvenilirlik dikkate alınarak yapılmıştır. Bu üç parametre dikkate alınarak sekiz farklı vaka çalışması gerçekleştirilmiştir. 3. durumdaki hesaplamanın sonucunda, sadece hat kayıpları dikkate alındığı için toplam üretim maliyetinin çok yüksek bir değerde 1433 $/MWh olduğu görülmüştür. Bu, üretim maliyeti ve güvenilirlik parametrelerinin dikkate alınması gerektiğini göstermektedir. Ancak, 6. durumda, üretim maliyeti ve güvenilirlik kriterleri ile ardışık hesaplamaların GKÜT sonuçlarında en ekonomik olduğu görülmektedir. Son olarak, jeneratörlerin üretim maliyeti ve güvenilirlik kriterleri ile elde edilen sonuçlar için diğer sekiz durumla karşılaştırıldığında en ekonomik yük dağılımının belirlendiği görülmüştür. Ardından, her geçen gün artan yenilenebilir kapasiteye oldukça duyarlı olan

gelişen ağlara göre bu yöntemi güncellemek ve iyileştirmek amaçlanmaktadır. Çünkü değişken üretim kapasitesi olarak öngörülen yenilenebilir enerji, daha fazla depolama tutulmasını gerektirmektedir.

KAYNAKLAR

Abdelkader, S. M. (2007). Allocating transmission loss to loads and generators through complex power flow tracing. *IET Generation, Transmission & Distribution*, *1*(4), 584-595.

Abookazemi, K., & Mustafa, M. W. (2009). *Unit commitment optimization using improved genetic algorithm* (pp. 1-6). IEEE.

Abookazemi, K., Mustafa, M. W., & Ahmad, H. (2009). Structured genetic algorithm technique for unit commitment problem. *International Journal of Recent Trends in Engineering*, *1*(3), 135.

Ahmadi-Khatir, A., & Cherkaoui, R. (2011). A probabilistic spinning reserve market model considering DisCo'different value of lost loads. *Electric power systems research*, *81*(4), 862-872.

Alanne, K., & Cao, S. (2019). An overview of the concept and technology of ubiquitous energy. *Applied energy*, *238*, 284-302.

Allu, S., Asokan, B. V., Shelton, W. A., Philip, B., & Pannala, S. (2014). A generalized multi-dimensional mathematical model for charging and discharging processes in a supercapacitor. *Journal of Power Sources*, *256*, 369-382.

Alshareef A. An application of artificial intelligent optimization techniques to dynamic unit commitment for the western area of Saudi Arabia. *In: Proceedings of 3rd International Conference on Computational Intelligence*, Communication Systems and Networks, Bali, Indonesia, (2011), 17–21

Amanulla, B., Chakrabarti, S., & Singh, S. N. (2012). Reconfiguration of power distribution systems considering reliability and power loss. *IEEE transactions on power delivery*, *27*(2), 918-926.

Arbizzani, C., Mastragostino, M., & Meneghello, L. (1996). Polymer-based redox supercapacitors: A comparative study. *Electrochimica Acta*, *41*(1), 21-26.

Arico, A. S., Bruce, P., Scrosati, B., Tarascon, J. M., & Van Schalkwijk, W. (2005). Nanostructured materials for advanced energy conversion and storage devices. *Nature materials*, *4*(5), 366-377.

Armaroli, N., & Balzani, V. (2007). The future of energy supply: challenges and opportunities. *Angewandte Chemie International Edition*, *46*(1-2), 52-66.

Atashpaz-Gargari, E., & Lucas, C. (2007, September). Imperialist competitive algorithm: an algorithm for optimization inspired by imperialistic competition. In *2007 IEEE congress on evolutionary computation* (pp. 4661-4667). Ieee.

Awad, A. S., El-Fouly, T. H., & Salama, M. M. (2014). Optimal ESS allocation and load shedding for improving distribution system reliability. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *5*(5), 2339-2349.

Basa Arsoy, A., & Perdahçı, C. (2010). Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Dağıtılmış Üretim. *Uluslararası Enerji ve Çevre Fuarı ve Konferansı (ICCI)*, *13*.

Beguin, L., Vernier, A., Chicireanu, R., Lahaye, T., & Browaeys, A. (2013). Direct measurement of the van der Waals interaction between two Rydberg atoms. *Physical review letters*, *110*(26), 263201.

Bertrand N., Sabatier J, Briat O, Vinassa JM (2020). Fractional non-linear modelling of supercapacitors. *Commun Nonlinear Sci Numer Simul* (2020); 15(5):1327–37.

Beus, M., Banis, F., Pandžić, H., & Poulsen, N. K. (2020). Three-level hierarchical microgrid control—model development and laboratory implementation. *Electric Power Systems Research*, *189*, 106758.

Billinton, R., & Allan, R. N. (1984). Power-system reliability in perspective. *Electronics and Power*, *30*(3), 231-236.

Billinton, R., & Karki, B. (2011). Well-being analysis of wind integrated power systems. *IEEE Transactions on Power Systems*, *26*(4), 2101-2108.

Billinton, R., Allan, R. N., & Salvaderi, L. (1991). Applied reliability assessment in electric power systems.

Billinton, R., Allan, R. N., Billinton, R., & Allan, R. N. (1996). Generating capacity—Basic probability methods. *Reliability evaluation of power systems*, 18-82.

Brown, R. E. (2017). *Electric power distribution reliability*. CRC press.

Bruninx, K., & Delarue, E. (2016). Endogenous probabilistic reserve sizing and allocation in unit commitment models: Cost-effective, reliable, and fast. *IEEE Transactions on Power Systems*, *32*(4), 2593-2603.

Cantarero, M. M. V. (2020). Of renewable energy, energy democracy, and sustainable development: A roadmap to accelerate the energy transition in developing countries. *Energy Research & Social Science*, *70*, 101716.

Cárcamo-Gallardo, A., García-Santander, L., & Pezoa, J. E. (2008). Greedy reconfiguration algorithms for medium-voltage distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *24*(1), 328-337.

Chai, R., & Zhang, Y. (2014). A practical supercapacitor model for power management in wireless sensor nodes. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *30*(12), 6720-6730.

Chandrasekaran, K., & Simon, S. P. (2012, January). Binary/real coded particle swarm optimization for unit commitment problem. In *2012 International Conference on Power, Signals, Controls and Computation* (pp. 1-6). IEEE.

Chang, W., & Luo, X. (2008, November). A solution to the unit commitment using hybrid genetic algorithm. In *TENCON 2008-2008 IEEE Region 10 Conference* (pp. 1-6). IEEE.

Chattopadhyay, D., & Baldick, R. (2002, January). Unit commitment with probabilistic reserve. In *2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No. 02CH37309)* (Vol. 1, pp. 280-285). IEEE.

Chen, C. S., Lin, C. H., Chuang, H. J., Li, C. S., Huang, M. Y., & Huang, C. W. (2006). Optimal placement of line switches for distribution automation systems using immune algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, *21*(3), 1209-1217.

Chen, H., Cong, T. N., Yang, W., Tan, C., Li, Y., & Ding, Y. (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in natural science*, *19*(3), 291-312.

Chong, L. W., Wong, Y. W., Rajkumar, R. K., & Isa, D. (2016). An optimal control strategy for standalone PV system with Battery-Supercapacitor Hybrid Energy Storage System. *Journal of Power Sources*, *331*, 553-565.

Chowdhury, A., & Koval, D. (2009). Practical Methods and Applications. *IEEE Series on Power Engineering, Power Distribution System Reliability*.

Chuang, C. M., Huang, C. W., Teng, H., & Ting, J. M. (2010). Effects of carbon nanotube grafting on the performance of electric double layer capacitors. *Energy & Fuels*, *24*(12), 6476-6482.

Conte, M. (2010). Supercapacitors technical requirements for new applications. *Fuel cells*, *10*(5), 806-818.

Costa, A., Alfieri, A., Matta, A., & Fichera, S. (2015). A parallel tabu search for solving the primal buffer allocation problem in serial production systems. *Computers & Operations Research*, *64*, 97-112.

Coşkun, K. (2009). *Kimyasal ve elektrokimyasal yöntemlerle İletken polimerlerin sentezi ve Membran Uygulamaları* (Doctoral dissertation, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).

Çakmak, F., Aydoğmuş, Z., & Tür, M. R. (2024). Analysis of Open Circuit Voltage MPPT Method with Analytical Analysis with Perturb and Observe (P&O) MPPT Method in PV Systems. *Electric Power Components and Systems*, *52*(9), 1528-1542.

Da Silva, A. M. L., da Costa Castro, J. F., & Billinton, R. (2017). Probabilistic assessment of spinning reserve via cross-entropy method considering renewable sources and transmission restrictions. *IEEE Transactions on Power Systems*, *33*(4), 4574-4582.

Das, D. (2005). A fuzzy multiobjective approach for network reconfiguration of distribution systems. *IEEE transactions on power delivery*, *21*(1), 202-209.

Deru, M., Field, K., Studer, D., Benne, K., Griffith, B., Torcellini, P., ... & Crawley, D. (2011). US Department of Energy commercial reference building models of the national building stock.

Deveikis, T., Miliune, R., & Nevardauskas, E. V. (2013). Reliability of divided small electric energy system. *Elektronika ir Elektrotechnika*, *19*(10), 21-24.

Dimeas, A., & Hatziargyriou, N. (2004, May). A multi-agent system for microgrids. In *Hellenic Conference on Artificial Intelligence* (pp. 447-455). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.

Dimitroulas, D. K., & Georgilakis, P. S. (2011). A new memetic algorithm approach for the price based unit commitment problem. *Applied energy*, *88*(12), 4687-4699.

Dzieliński, A., Sarwas, G., & Sierociuk, D. (2010, December). Time domain validation of ultracapacitor fractional order model. In *49th IEEE Conference on Decision and Control (CDC)* (pp. 3730-3735). IEEE.

Ebrahimi, J., Hosseinian, S. H., & Gharehpetian, G. B. (2010). Unit commitment problem solution using shuffled frog leaping algorithm. *IEEE Transactions on Power Systems*, *26*(2), 573-581.

Eddahech, A., Briat, O., Ayadi, M., & Vinassa, J. M. (2014). Modeling and adaptive control for supercapacitor in automotive applications based on artificial neural networks. *Electric power systems research*, *106*, 134-141.

Elmorshedy, M. F., Elkadeem, M. R., Kotb, K. M., Taha, I. B., & Mazzeo, D. (2021). Optimal design and energy management of an isolated fully renewable energy system integrating batteries and supercapacitors. *Energy Conversion and Management*, *245*, 114584.

Elmouatamid, A., Ouladsine, R., Bakhouya, M., El Kamoun, N., Khaidar, M., & Zine-Dine, K. (2020). Review of control and energy management approaches in micro-grid systems. *Energies*, *14*(1), 168.

Emeksİz, C., & Kara, B. (2022). Enerji Depolama Teknolojilerinin İncelenmesi ve Karşılaştırmalı Analizi. *International Journal of Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies*, *6*(2), 134-142.

Ersalıcı, H. (2013). Elektrik Dağıtım Sistemlerinin Güvenilirlik Analizi (Doctoral dissertation, *Fen Bilimleri Enstitüsü*).

Eusuff, M., Lansey, K., & Pasha, F. (2006). Shuffled frog-leaping algorithm: a memetic meta-heuristic for discrete optimization. *Engineering optimization*, *38*(2), 129-154.

Falaghi, H., Haghifam, M. R., & Singh, C. (2008). Ant colony optimization-based method for placement of sectionalizing switches in distribution networks using a fuzzy multiobjective approach. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *24*(1), 268-276.

Fathy, A., Yousri, D., Alanazi, T., & Rezk, H. (2021). Minimum hydrogen consumption based control strategy of fuel cell/PV/battery/supercapacitor hybrid system using recent approach based parasitism-predation algorithm. *Energy*, *225*, 120316.

Feron, P., Cousins, A., Jiang, K., Zhai, R., Thiruvenkatachari, R., & Burnard, K. (2019). Towards zero emissions from fossil fuel power stations. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, *87*, 188-202.

Frackowiak, E., Khomenko, V., Jurewicz, K., Lota, K., & Béguin, F. (2006). Supercapacitors based on conducting polymers/nanotubes composites. *Journal of Power Sources*, *153*(2), 413-418.

Freeborn, T. J., Maundy, B., & Elwakil, A. S. (2013). Measurement of supercapacitor fractional-order model parameters from voltage-excited step response. *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, *3*(3), 367-376.

Gabano, J. D., Poinot, T., & Kanoun, H. (2015). LPV continuous fractional modeling applied to ultracapacitor impedance identification. *Control Engineering Practice*, *45*, 86-97.

Ghaib, K., & Ben-Fares, F. Z. (2017). A design methodology of stand-alone photovoltaic power systems for rural electrification. *Energy Conversion and Management*, *148*, 1127-1141.

Gielen, D., Boshell, F., Saygin, D., Bazilian, M. D., Wagner, N., & Gorini, R. (2019). The role of renewable energy in the global energy transformation. *Energy strategy reviews*, *24*, 38-50.

Gopalakrishnan, R., & Krishnan, A. (2013). An efficient technique to solve combined economic and emission dispatch problem using modified Ant colony optimization. *Sadhana*, *38*, 545-556.

Govindan, K., Fattahi, M., & Keyvanshokooh, E. (2017). Supply chain network design under uncertainty: A comprehensive review and future research directions. *European journal of operational research*, *263*(1), 108-141.

Grid, S. (2003). 2030: A national vision for electricity's second 100 years. *United States of America Department of Energy*.

Gualous, H., Gallay, R., & Berthon, A. (2004). Utilisation des supercondensateurs pour le stockage de l'énergie embarquée: applications transport. *REVUE DE L ELECTRICITE ET DE L ELECTRONIQUE*, (8), 83-90.

Guida, A., Sciandrone, M., Schoen, F., & Cartis, C. (2015). *A branch and bound algorithm for the global optimization and its improvements* (Doctoral dissertation, Universita degli Studi di Firenze).

Hadjipaschalis, I., Poullikkas, A., & Efthimiou, V. (2009). Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications. *Renewable and sustainable energy reviews*, *13*(6-7), 1513-1522.

Halper, M. S., & Ellenbogen, J. C. (2006). Supercapacitors: A brief overview. *The MITRE Corporation, McLean, Virginia, USA*, *1*.

Hatziargyriou, N., Jenkins, N., Strbac, G., Lopes, J. P., Ruela, J., Engler, A., & Oyarzabal, J. (2004). Microgrids-large scale integration of micro-generation to low voltage grids. *EU Contract ENK5-CT-2002-00610, Technical Final Version, Deliverable_DC1, Part*, *1*, 1-8.

Ho, M. Y., Khiew, P. S., Isa, D., Tan, T. K., Chiu, W. S., & Chia, C. H. (2014). A review of metal oxide composite electrode materials for electrochemical capacitors. *Nano*, *9*(06), 1430002.

Hossain, E., Tür, M. R., Padmanaban, S., Ay, S., & Khan, I. (2018). Analysis and mitigation of power quality issues in distributed generation systems using custom power devices. *Ieee Access*, *6*, 16816-16833.

Hu, B., Zheng, Y., Yang, H., & Xia, Y. (2015). Reliability evaluation of power system operations considering time-varying features of components. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, *10*(4), 1422-1431.

Hu, X., Li, S. E., & Yang, Y. (2015). Advanced machine learning approach for lithium-ion battery state estimation in electric vehicles. *IEEE Transactions on Transportation electrification*, *2*(2), 140-149.

Ike, I. S., Sigalas, I., Iyuke, S., & Ozoemena, K. I. (2015). RETRACTED: an overview of mathematical modeling of electrochemical supercapacitors/ultracapacitors. *Journal of Power Sources*, *273*, 264-277.

Iro, Z. S., Subramani, C., & Dash, S. S. (2016). A brief review on electrode materials for supercapacitor. *International Journal of Electrochemical Science*, *11*(12), 10628-10643.

Jeon, Y. J., Kim, J. C., Kim, J. O., Shin, J. R., & Lee, K. Y. (2002). An efficient simulated annealing algorithm for network reconfiguration in large-scale distribution systems. *IEEE transactions on power delivery*, *17*(4), 1070-1078.

Jeong, Y. W., Lee, W. N., Kim, H. H., Park, J. B., & Shin, J. R. (2009). Thermal unit commitment using binary differential evolution. *Journal of Electrical Engineering and Technology*, *4*(3), 323-329.

Jewell, W. S. (1977). The analytic methods of operations research. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, *287*(1346), 373-404.

Jia, J., Yang, N., Xing, C., Chen, H., Liu, S., Huang, Y., & Zhu, B. (2019). An improved constrained order optimization algorithm for uncertain SCUC problem solving. *Energies*, *12*(23), 4498.

Jing, W., Lai, C. H., Wong, W. S., & Wong, M. D. (2018). A comprehensive study of battery-supercapacitor hybrid energy storage system for standalone PV power system in rural electrification. *Applied energy*, *224*, 340-356.

Jo, K. H., & Kim, M. K. (2018). Stochastic unit commitment based on multi-scenario tree method considering uncertainty. *Energies*, *11*(4), 740.

Jones, D. R., Schonlau, M., & Welch, W. J. (1998). Efficient global optimization of expensive black-box functions. *Journal of Global optimization*, *13*, 455-492.

Jones, L. E. (2017). *Renewable energy integration: practical management of variability, uncertainty, and flexibility in power grids*. Academic press.

Kabalcı, E., Bayındır, R., & Tür, M. R. (2021). Mikroşebekeler ve dağıtık üretim sistemleri. *Ankara: Nobel Akademik Yayıncılık.*

Kautz, K., Johanson, T. H., & Uldahl, A. (2014). The perceived impact of the agile development and project management method scrum on information systems and software development productivity. *Australasian Journal of Information Systems*, *18*(3).

Kazarlis, S. A., Bakirtzis, A. G., & Petridis, V. (1996). A genetic algorithm solution to the unit commitment problem. *IEEE transactions on power systems*, *11*(1), 83-92.

Kocaman, B. (2013). Akıllı şebekeler ve mikro şebekelerde enerji depolama teknolojileri. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *2*(1), 119-127.

Kötz, R., & Carlen, M. J. E. A. (2000). Principles and applications of electrochemical capacitors. *Electrochimica acta*, *45*(15-16), 2483-2498.

Kumar, C., & Alwarsamy, T. (2011). A novel algorithm unit commitment problem by a fuzzy tuned particle swarm optimization. *European Journal of Scientific Research*, *64*(1), 157-167.

Kumar, S. S., & Palanisamy, V. (2006, December). A new dynamic programming based hopfield neural network to unit commitment and economic dispatch. In *2006 IEEE International Conference on Industrial Technology* (pp. 887-892). IEEE.

Kurban, M. E. H. M. E. T., & Filik, U. B. (2008, May). Unit commitment scheduling by using the autoregressive and artificial neural network models based short-term load forecasting. In *Proceedings of the 10th International Conference on Probablistic Methods Applied to Power Systems* (pp. 1-5). IEEE.

Lannoye, E., Flynn, D., & O'Malley, M. (2014). Transmission, variable generation, and power system flexibility. *IEEE Transactions on Power Systems*, *30*(1), 57-66.

Li, L., & Zhao, D. (2013). Optimal spinning reserve for power system with wind integrated. *Energy and Power Engineering*, *5*(4), 1011-1015.

Li, Y., & Dai, H. (2014). Recent advances in zinc–air batteries. *Chemical Society Reviews*, *43*(15), 5257-5275.

Liang, R. H., & Kang, F. C. (2000). Thermal generating unit commitment using an extended mean field annealing neural network. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, *147*(3), 164-170.

Liu, R., Zhang, Y., & Zhou, B. (2024). Solving a Real-Life Stochastic Car Batching and Sequencing Problem With Dynamic Programming Approaches. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*.

Liu, Z., Yu, H., Liu, R., Wang, M., & Li, C. (2020). Configuration optimization model for data-center-park-integrated energy systems under economic, reliability, and environmental considerations. *Energies*, *13*(2), 448.

Logerais, P. O., Camara, M. A., Riou, O., Djellad, A., Omeiri, A., Delaleux, F., & Durastanti, J. F. (2015). Modeling of a supercapacitor with a multibranch circuit. *international journal of hydrogen energy*, *40*(39), 13725-13736.

Ma, R., Huang, Y., & Li, M. (2011, March). Unit commitment optimal research based on the improved genetic algorithm. In *2011 Fourth International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation* (Vol. 1, pp. 291-294). IEEE.

Ma, T., Yang, H., & Lu, L. (2015). Development of hybrid battery–supercapacitor energy storage for remote area renewable energy systems. *Applied Energy*, *153*, 56-62.

Madrigal, M., & Quintana, V. H. (2000). An analytical solution to the economic dispatch problem. *IEEE power engineering review*, *20*(9), 52-55.

Makvand, S. B. (2014). *Probabilistic power transmission system reliability evaluation* (Doctoral dissertation, Toronto Metropolitan University).

Mantawy, A. H., & Abdel-Magid, Y. L. (2002, June). A new fuzzy unit commitment model and solution. In *Proceedings of 14th Power System Computation Conference (14th PSCC), Sevilla, Spain* (pp. 1-6).

Martin, R., Quintana, J. J., Ramos, A., & De La Nuez, I. (2008). Modeling of electrochemical double layer capacitors by means of fractional impedance.

Martín-Santamaría, R., Cavero, S., Herrán, A., Duarte, A., & Colmenar, J. M. (2024). A practical methodology for reproducible experimentation: an application to the Double-row Facility Layout Problem. *Evolutionary Computation*, *32*(1), 69-104.

Martynyuk, V., & Ortigueira, M. (2015). Fractional model of an electrochemical capacitor. *Signal Processing*, *107*, 355-360.

Medina, P., Bizuayehu, A. W., Catalão, J. P., Rodrigues, E. M., & Contreras, J. (2014, January). Electrical energy storage systems: technologies' state-of-the-art, techno-economic benefits and applications analysis. In *2014 47th Hawaii International Conference on System Sciences* (pp. 2295-2304). IEEE.

Mehrjerdi, H. (2020). Modeling, integration, and optimal selection of the turbine technology in the hybrid wind-photovoltaic renewable energy system design. *Energy Conversion and Management*, *205*, 112350.

Mohammadi, A., & Akl, S. G. (2005). Scheduling algorithms for real-time systems. *School of Computing Queens University, Tech. Rep*.

Moradi, A., & Fotuhi-Firuzabad, M. (2007). Optimal switch placement in distribution systems using trinary particle swarm optimization algorithm. *IEEE Transactions on power delivery*, *23*(1), 271-279.

Moslehi, K., & Kumar, R. (2010). A reliability perspective of the smart grid. *IEEE transactions on smart grid*, *1*(1), 57-64.

Muhtadi, A., Pandit, D., Nguyen, N., & Mitra, J. (2021). Distributed energy resources based microgrid: Review of architecture, control, and reliability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *57*(3), 2223-2235.

Musolino, V., Piegari, L., & Tironi, E. (2012). New full-frequency-range supercapacitor model with easy identification procedure. *IEEE transactions on industrial electronics*, *60*(1), 112-120.

Nascimento, F. R., Silva, I. C., Oliveira, E. J., Dias, B. H., & Marcato, A. L. (2011, June). Thermal Unit Commitment using improved ant colony optimization algorithm via Lagrange multipliers. In *2011 IEEE Trondheim PowerTech* (pp. 1-5). IEEE.

North American Electric Reliability Corporation, "Task 1.6 Probabilistic Methods," NERC, Atlanta, GA, ABD, Temmuz (2014).

Omer, A. M. (2008). Energy, environment and sustainable development. *Renewable and sustainable energy reviews*, *12*(9), 2265-2300.

Onbaşioğlu, S. U. Enerji Dönüşümlerinin Kullanilabilirlik Ve Sürdürülebilirlik Açisindan Değerlendirilmesi, X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi – 13/16 Nisan (2011)/İzmir.

Ouyang, Z., & Shahidehpour, S. M. (1990). Short-term unit commitment expert system. *Electric power systems research*, *20*(1), 1-13.

Ouyang, Z., & Shahidehpour, S. M. (1991). An intelligent dynamic programming for unit commitment application. *IEEE Transactions on power systems*, *6*(3), 1203-1209.

Oymak, A., & Tür, M. R. (2022). An Evaluation of Pumped Hydroelectric Storage Systems. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, *6*(2), 205-214.

Oymak, A., Altun, M., Çakmak, F., Atiç, S., Tür, M. R., & Bayındir, R. (2022, June). Distributed generation system planning based on renewable energy source. In *2022 10th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)* (pp. 368-373). IEEE.

Özdemir, E. (2007). Dağılmış Enerji Üretim Sistemleri ve Yardımcı Hizmetler. *12. Elektrik, Elektronik, Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Ulusal Kongresi*, 14-18.

Padhy, N. P. (2004). Unit commitment-a bibliographical survey. *IEEE Transactions on power systems*, *19*(2), 1196-1205.

Parvini, Y., Siegel, J. B., Stefanopoulou, A. G., & Vahidi, A. (2015). Supercapacitor electrical and thermal modeling, identification, and validation for a wide range of temperature and power applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *63*(3), 1574-1585.

Petrovan, B. (2021). Alternatives to lithium-ion batteries: which new tech will power the future?'. *Green Authority*, 28.

Pötzinger, C., Preißinger, M., & Brüggemann, D. (2015). Influence of hydrogen-based storage systems on self-consumption and self-sufficiency of residential photovoltaic systems. *Energies*, *8*(8), 8887-8907.

Prada, P. R. (1999). *The value of reliability in power systems: pricing operating reserves*. Energy Laboratory, Massachusetts Institute of Technology.

Prasad, K., Ranjan, R., Sahoo, N. C., & Chaturvedi, A. (2005). Optimal reconfiguration of radial distribution systems using a fuzzy mutated genetic algorithm. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *20*(2), 1211-1213.

Raghavendra, C. S., & Varma, A. (1987). Reliability and fault-tolerance in multistage interconnection networks. *Sadhana*, *11*, 111-128.

Rajani, S. V., Pandya, V. J., & Shah, V. A. (2016). Experimental validation of the ultracapacitor parameters using the method of averaging for photovoltaic applications. *Journal of Energy Storage*, *5*, 120-126.

Razmi, D., & Lu, T. (2022). A literature review of the control challenges of distributed energy resources based on microgrids (MGs): past, present and future. *Energies*, *15*(13), 4676.

Reliability Test System Task Force, The IEEE reliability test system, *IEEE Trans. Power Syst.*, (1996), *Vol. 14*, 3, 1010–1020

Rodríguez, M. R., De Ruyck, J., Diaz, P. R., Verma, V. K., & Bram, S. (2011). An LCA based indicator for evaluation of alternative energy routes. *Applied energy*, *88*(3), 630-635.

Roy, P. K. S., Karayaka, H. B., Yan, Y., & Alqudah, Y. (2019). Investigations into best cost battery-supercapacitor hybrid energy storage system for a utility scale PV array. *Journal of Energy Storage*, *22*, 50-59.

Roy, P., He, J., Zhao, T., & Singh, Y. V. (2022). Recent advances of wind-solar hybrid renewable energy systems for power generation: A review. *IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society*, *3*, 81-104.

Salam, S. (2007, December). Unit commitment solution methods. In *Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology* (Vol. 26, pp. 600-605).

Salameh, T., Abdelkareem, M. A., Olabi, A. G., Sayed, E. T., Al-Chaderchi, M., & Rezk, H. (2021). Integrated standalone hybrid solar PV, fuel cell and diesel generator power system for battery or supercapacitor storage systems in Khorfakkan, United Arab Emirates. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(8), 6014-6027.

Salazar, H., Gallego, R., & Romero, R. (2006). Artificial neural networks and clustering techniques applied in the reconfiguration of distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *21*(3), 1735-1742.

Saneifard, S., Prasad, N. R., & Smolleck, H. A. (1997). A fuzzy logic approach to unit commitment. *IEEE Transactions on Power Systems*, *12*(2), 988-995.

Sasaki, H., Watanabe, M., Kubokawa, J., Yorino, N., & Yokoyama, R. (1992). A solution method of unit commitment by artificial neural networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, *7*(3), 974-981.

Savier, J. S., & Das, D. (2007). Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, *22*(4), 2473-2480.

Scopus, Available from: https://www.scopus.com/. (Accessed April 2021).

Sen, S., & Ganguly, S. (2017). Opportunities, barriers and issues with renewable energy development–A discussion. *Renewable and sustainable energy reviews*, 69, 1170-1181.

Shahidehpour, M., Yamin, H., & Li, Z. (2002). *Market operations in electric power systems: forecasting, scheduling, and risk management*. John Wiley & Sons.

Shaqsi, A. Z. A., Sopian, K., & Al-Hinai, A. (2020). Review of energy storage services, applications, limitations, and benefits. *Energy reports*, *6*, 288-306.

Shayeghi H, Monfaredi F, Dejamkhooy A, Shafie-khah M, Catal˜ ao JPS. Assessing hybrid supercapacitor-battery energy storage for active power management in a wind-diesel system. *Int J Electr Power Energy Syst* (2021); 125:106391. https://doi.org/10.1016/j.ijepes. (2020).106391.

Shayesteh, E., Yousefi, A., & Moghaddam, M. P. (2010). A probabilistic risk-based approach for spinning reserve provision using day-ahead demand response program. *Energy*, *35*(5), 1908-1915.

Shi, H. (1996). Activated carbons and double layer capacitance. *Electrochimica Acta*, *41*(10), 1633-1639.

Shobol, A., Ali, M. H., Wadi, M., & TüR, M. R. (2019, November). Overview of big data in smart grid. In *2019 8th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)* (pp. 1022-1025). IEEE.

Shobole, A., Wadi, M., Tür, M. R., & Baysal, M. (2017, November). Real time active power control in smart grid. In *2017 IEEE 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA)* (pp. 585-590). IEEE.

Shown, I., Ganguly, A., Chen, L. C., & Chen, K. H. (2015). Conducting polymer-based flexible supercapacitor. *Energy Science & Engineering*, *3*(1), 2-26.

Shukla, P. K., & Deb, K. (2007). On finding multiple Pareto-optimal solutions using classical and evolutionary generating methods. *European Journal of Operational Research*, *181*(3), 1630-1652.

Siddique, A., Shahzad, A., Lawler, J., Mahmoud, K. A., Lee, D. S., Ali, N., ... & Rasool, K. (2021). Unprecedented environmental and energy impacts and challenges of COVID-19 pandemic. *Environmental Research*, *193*, 110443.

Simon, P. (2011). Supercondensateurs: principes et évolutions. In *Conférence du Collège de France, Chaire Développement durable, Environnement, Énergie et Société,(2010–2011). www. college-de-france. fr/media/jean-marie-tarascon/UPL19317_P_Simon_2F_vrier. pdf*.

Singh, B., Pal, C., Mukherjee, V., Tiwari, P., Yadav, M. K., & Member, I. S. (2017). Distributed generation planning from power system performances viewpoints: A taxonomical survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *75*, 1472-1492.

Singh, R. L. R., & Rajan, C. C. A. (2011, September). A hybrid approach based on PSO and EP for proficient solving of Unit Commitment Problem. In *2011 International Conference & Utility Exhibition on Power and Energy Systems: Issues and Prospects for Asia (ICUE)* (pp. 1-7). IEEE.

Singh, T., Sharma, S., & Nagesh, S. (2017). Socio-economic status scales updated for 2017. *Int J Res Med Sci*, *5*(7), 3264-7.

Skelton, R. E. (1980). Cost decomposition of linear systems with application to model reduction. *International Journal of Control*, *32*(6), 1031-1055.

Solow, R. (1993). An almost practical step toward sustainability. *Resources policy*, *19*(3), 162-172.

Soualhi, A., Sari, A., Razik, H., Venet, P., Clerc, G., German, R., ... & Vinassa, J. M. (2013, November). Supercapacitors ageing prediction by neural networks. In *IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society* (pp. 6812-6818). IEEE.

Storti, G. L., Paschero, M., Rizzi, A., & Mascioli, F. M. F. (2015). Comparison between time-constrained and time-unconstrained optimization for power losses minimization in smart grids using genetic algorithms. *Neurocomputing*, *170*, 353-367.

Sum-Im, T., & Ongsakul, W. (2003, December). Ant colony search algorithm for unit commitment. In *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2003* (Vol. 1, pp. 72-77). IEEE.

Sun, K., Xiao, H., Liu, S., You, S., Yang, F., Dong, Y., ... & Liu, Y. (2020). A review of clean electricity policies—from countries to utilities. *Sustainability*, *12*(19), 7946.

Şenyapar, H. N. D., & Tür, M. R. Turkey's Domestic Car TOGG in the Framework of New Trends in Electric Vehicles and Consumer Ethnocentrism. *Balkan Journal of Electrical and Computer Engineering*, *11*(2), 115-128.

Tao, Y., & Li, Z. (2014, September). Study on modeling and application of ultracapacitor. In *2014 IEEE Workshop on Advanced Research and Technology in Industry Applications (WARTIA)* (pp. 999-1002). IEEE.

Thomas, M., & Sela, L. (2024). A Mixed-Integer Linear Programming Framework for Optimization of Water Network Operations Problems. *Water Resources Research*, *60*(2), e2023WR034526.

Torregrossa, D., Bahramipanah, M., Namor, E., Cherkaoui, R., & Paolone, M. (2013). Improvement of dynamic modeling of supercapacitor by residual charge effect estimation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, *61*(3), 1345-1354.

Tronchin, L., Manfren, M., & Nastasi, B. (2018). Energy efficiency, demand side management and energy storage technologies–A critical analysis of possible paths of integration in the built environment. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *95*, 341-353.

Tur, M. N., Ertuğrul, Ö. F., & Tür, M. R. (2024). Solution for Integration of Renewable Energy Power Plants into Smart Grids with Active Power Control. *Journal of Science, Technology and Engineering Research*, *5*(1), 11-23.

Tur, M. R. (2020). Reliability assessment of distribution power system when considering energy storage configuration technique. *IEEE Access*, *8*, 77962-77971.

Tur, M. R. (2021). Deployment of reserve requirements into the power systems considering the cost, lost, and reliability parameters based on sustainable energy. *The International Journal of Electrical Engineering & Education*, *58*(2), 621-639.

Tur, M. R., Ay, S., Erduman, A., Shobole, A., Baysal, M., & Wadi, M. (2017). Impact of demand side management on spinning reserve requirements designation. *International Journal of Renewable Energy Research*, *7*(2), 946-953.

Tür, M., Ay, S., Shobole, A., & Wadi, M. (2019). Calculation of optimal value of spinning reserve requirement for unit commitment in power systems by considering lost parameters Güç sistemlerinde ünite tahsisi için döner rezerv gereksinimi optimal değerinin kayip parametrelerin dikkate alinarak hesaplanmasi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, *34*.

Van Vuuren, D. P., Stehfest, E., Gernaat, D. E., Doelman, J. C., Van den Berg, M., Harmsen, M., ... & Tabeau, A. (2017). Energy, land-use and greenhouse gas emissions trajectories under a green growth paradigm. *Global environmental change*, *42*, 237-250.

Vargas, U., Lazaroiu, G. C., Tironi, E., & Ramirez, A. (2019). Harmonic modeling and simulation of a stand-alone photovoltaic-battery-supercapacitor hybrid system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *105*, 70-78.

Verbrugge, M. W., & Liu, P. (2005). Microstructural analysis and mathematical modeling of electric double-layer supercapacitors. *Journal of the Electrochemical Society*, *152*(5), D79.

Villela, T., Costa, C. A., Brandão, A. M., Bueno, F. T., & Leonardi, R. (2019). Towards the thousandth CubeSat: A statistical overview. *International Journal of Aerospace Engineering*, *2019*(1), 5063145.

Vlad, A., Singh, N., Rolland, J., Melinte, S., Ajayan, P. M., & Gohy, J. F. (2014). Hybrid supercapacitor-battery materials for fast electrochemical charge storage. *Scientific reports*, *4*(1), 4315.

Wagner, L. (2007). Overview of energy storage methods. *Analyst*.

Waisman, H., Bataille, C., Winkler, H., Jotzo, F., Shukla, P., Colombier, M., ... & Trollip, H. (2019). A pathway design framework for national low greenhouse gas emission development strategies. *Nature Climate Change*, *9*(4), 261-268.

Walsh, M. P., & O'malley, M. J. (1997). Augmented Hopfield network for unit commitment and economic dispatch. *IEEE Transactions on Power Systems*, *12*(4), 1765-1774.

Wang, G., Zhang, L., & Zhang, J. (2012). A review of electrode materials for electrochemical supercapacitors. *Chemical Society Reviews*, *41*(2), 797-828.

Wang, H., & Pilon, L. (2011). Accurate simulations of electric double layer capacitance of ultramicroelectrodes. *The Journal of Physical Chemistry C*, *115*(33), 16711-16719.

Weddell, A. S., Merrett, G. V., Kazmierski, T. J., & Al-Hashimi, B. M. (2011). Accurate supercapacitor modeling for energy harvesting wireless sensor nodes. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, *58*(12), 911-915.

Weigert, T., Tian, Q., & Lian, K. (2011). State-of-charge prediction of batteries and battery–supercapacitor hybrids using artificial neural networks. *Journal of Power Sources*, *196*(8), 4061-4066.

Withironprasert, K., Chusanapiputt, S., Nualhong, D., Jantarang, S., & Phoomvuthisarn, S. (2009, February). Hybrid ant system/priority list method for unit commitment problem with operating constraints. In *2009 IEEE International Conference on Industrial Technology* (pp. 1-6). IEEE.

Wu, C. H., Hung, Y. H., & Hong, C. W. (2012). On-line supercapacitor dynamic models for energy conversion and management. *Energy Conversion and Management*, *53*(1), 337-345.

Wu, H., & Gooi, H. B. (1999, January). Optimal scheduling of spinning reserve with ramp constraints. In *IEEE Power Engineering Society. 1999 Winter Meeting (Cat. No. 99CH36233)* (Vol. 2, pp. 785-790). IEEE.

Wu, Z., Ding, J., Wu, Q. H., Jing, Z., & Zheng, J. (2017). Reserve constrained dynamic economic dispatch with valve-point effect: A two-stage mixed integer linear programming approach. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, *3*(2), 203-211.

Xu, K., Gong, W., Li, Y., Purushothama, J. M., Goussetis, G., McLaughlin, S., ... & Ding, Y. (2024). FM Rider: Two-FSK Modulation-Based Ambient FM Backscatter Over 100 m Distance. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*.

Yin, C., Wu, H., Locment, F., & Sechilariu, M. (2017). Energy management of DC microgrid based on photovoltaic combined with diesel generator and supercapacitor. *Energy conversion and management*, *132*, 14-27.

Yu, A., Chabot, V., & Zhang, J. (2013). *Electrochemical supercapacitors for energy storage and delivery: fundamentals and applications* (p. 383). Taylor & Francis.

Yu, A., Chabot, V., & Zhang, J. (2013). Fundamentals of electrochemical double-layer supercapacitors. *Electrochemical Supercapacitors for Energy Storage and Delivery*, 37-98.

Yu, D., Wang, Y., & Guo, R. (2010, December). A hybrid ant colony optimization algorithm based Lambda-iteration method for unit commitment problem. In *2010 Second WRI Global Congress on Intelligent Systems* (Vol. 1, pp. 19-22). IEEE.

Yu, P., Liu, X., Zhang, Y., Hu, X., Kong, G., Zhao, P., ... & Sun, S. (2018). Battery–supercapacitor hybrid energy storage system for wind power suppression based on the turbulence model of wind speed. *The Journal of Engineering*, *2018*(17), 1922-1929.

Zhai, D., Breipohl, A. M., Lee, F. N., & Adapa, R. (1994). The effect of load uncertainty on unit commitment risk. *IEEE transactions on power systems*, *9*(1), 510-517.

Zhai, Q., Guan, X., & Cui, J. (2002). Unit commitment with identical units successive subproblem solving method based on Lagrangian relaxation. *IEEE Transactions on Power Systems*, *17*(4), 1250-1257.

Zhang, L. L., & Zhao, X. S. (2009). Carbon-based materials as supercapacitor electrodes. *Chemical society reviews*, *38*(9), 2520-2531.

Zhang, L., Hu, X., Wang, Z., Sun, F., & Dorrell, D. G. (2018). A review of supercapacitor modeling, estimation, and applications: A control/management perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *81*, 1868-1878.

Zhang, L., Wang, Z., Hu, X., Sun, F., & Dorrell, D. G. (2015). A comparative study of equivalent circuit models of ultracapacitors for electric vehicles. *Journal of Power Sources*, *274*, 899-906.

Zhang, L., Wang, Z., Sun, F., & Dorrell, D. G. (2014). Online parameter identification of ultracapacitor models using the extended Kalman filter. *Energies*, *7*(5), 3204-3217.

Zhang, X., Zhao, J., & Chen, X. (2009, April). A hybrid method of lagrangian relaxation and genetic algorithm for solving UC problem. In *2009 International Conference on Sustainable Power Generation and Supply* (pp. 1-6). IEEE.

Zhao, B., Guo, C. X., Bai, B. R., & Cao, Y. J. (2006). An improved particle swarm optimization algorithm for unit commitment. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *28*(7), 482-490.

Zia, M. F., Elbouchikhi, E., & Benbouzid, M. (2018). Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects. *Applied energy*, *222*, 1033-1055.

Zia, R., Nawaz, M. S., Siddique, M. J., Hakim, S., & Imran, A. (2021). Plant survival under drought stress: Implications, adaptive responses, and integrated rhizosphere management strategy for stress mitigation. *Microbiological research*, *242*, 126626.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı **:** Merve ÇELİK
Uyruğu **:** T.C.

EĞİTİM

Derece			
Üniversite	:	Batman Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği	**2020**
Yüksek Lisans	:		
Doktora	:		

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	**Kurum**	**Görevi**
Haziran 2017-Temmuz 2017	Diyarbakır TRT Bölge Müdürlüğü	Stajyer
Haziran 2018- Temmuz 2018	Diyarbakır Türk Telekom İl Müdürlüğü	Stajyer
Eylül 2020 - Aralık 2022	Özel Bismil Teknoloji Koleji	Elektrik Öğretmenliği

UZMANLIK ALANI

YABANCI DİLLER: İngilizce (İyi seviye)

YAYINLAR : Çelik, M., & Sevim, D. (2024). Placement of Optimum Supercapacitors Considering Cost and Loss Parameters in Reliability-based Sustainable Energy-Based Grid. *Journal of Engineering and Technology*, *5*(1), 1-10.