İSTANBUL TİCARET ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ DERGİSİ

İstanbul Commerce University Journal of Science

http://dergipark.org.tr/ticaretfbd



Araştırma Makalesi / Research Article

GAMS YAZILIMI İLE BİR MİKROŞEBEKENİN ADA MODUNDA OPTİMUM İŞLETİMİ: BİR KIRSAL BÖLGE ÖRNEĞİ

OPTIMUM OPERATION OF A MICROGRID IN ISLAND MODE WITH GAMS SOFTWARE: A RURAL AREA EXAMPLE

Umut ÜZÜLMEZ[1] **Burak ŞAFAK**[2] **Alper ÇİÇEK**[3]

https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1713304

Sorumlu Yazar
(Corresponding Author)
alpercicek@trakya.edu.tr

Geliş Tarihi
(Received)
03.06.2025

Revizyon Tarihi
(Revised)
06.11.2025

Kabul Tarihi
(Accepted)
13.12.2025

Öz

Bu çalışmanın bilimsel amacı, ada modunda işletilen bir mikroşebekede (MG) enerji yönetimini optimize ederek yenilenebilir enerji kaynaklarının (RES) kullanımını en üst düzeye çıkarmak, fosil yakıt tüketimini ve işletme maliyetlerini en aza indirmektir. Kritik (hastane), yarı kritik (okul) ve esnek (konut) yükleri içeren sistemde fotovoltaik (PV), rüzgâr türbini (WT), batarya enerji depolama sistemi (BESS) ve dizel jeneratörün (DG) koordineli çalışması analiz edilmiştir. Çalışmada, "RES, BESS ve DG'nin koordineli optimizasyonu ada modunda işletilen bir MG'nin enerji maliyetini ve karbon emisyonunu ne ölçüde azaltabilir?" sorusuna yanıt aranmıştır. Bu kapsamda çalışma, MG enerji yönetiminde gerçek meteorolojik verilerin kullanıldığı senaryo analizi, yüklerin kritik düzeyine göre önceliklendirilmesi ve karma tamsayılı doğrusal programlama (MILP) tabanlı operasyonel optimizasyonun birlikte uygulanması açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Model GAMS/CPLEX ortamında çözülmüş ve iki farklı senaryo altında değerlendirilmiştir. İlk senaryoda üretim kapasitesi %30 ile sınırlandırılmış, ikinci senaryoda ise Antalya bölgesine ait gerçek meteorolojik veriler kullanılarak sistem tam kapasitede çalıştırılmıştır. Sonuçlar, ikinci senaryonun DG kullanımını ve karbon emisyonunu %14,2, toplam işletme maliyetini ise %7,5 oranında azalttığını göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Optimum enerji yönetimi, karbon emisyonu, mikroşebeke, ada modu, yenilenebilir enerji.

Abstract

The scientific objective of this study is to optimize energy management in an islanded microgrid (MG) to maximize the utilization of renewable energy sources (RES) while minimizing fossil fuel consumption and operating costs. The system incorporates critical (hospital), semi-critical (school), and flexible (residential) loads, and analyzes the coordinated operation of photovoltaic (PV) panels, wind turbines (WT), a battery energy storage system (BESS), and a diesel generator (DG). The study addresses the research question: To what extent can the coordinated optimization of RES, BESS, and DG reduce the energy cost and carbon emissions of an islanded MG? In this context, the work contributes to the literature by integrating scenario analysis based on real meteorological data, load prioritization according to criticality levels, and a Mixed Integer Linear Programming (MILP)-based operational optimization approach for MG energy management. The model was developed and solved using the GAMS/CPLEX platform and evaluated under two scenarios. In the first scenario, the generation capacity was limited to 30%, whereas in the second, the system operated at full capacity using real meteorological data from the Antalya region. The results demonstrate that the second scenario reduced DG utilization and carbon emissions by 14.2%, and total operating costs by 7.5%.

Keywords: Optimal energy management, carbon emissions, microgrid, island mode, renewable energy.

[*] *Bu yayın Umut ÜZÜLMEZ isimli öğrencinin Trakya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü lisans bitirme projesinden üretilmiştir.*

[1] Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Edirne, Türkiye. umutuzulmez@trakya.edu.tr.
[2] Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Edirne, Türkiye. buraksafak@trakya.edu.tr.
[3] Trakya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Edirne, Türkiye. alpercicek@trakya.edu.tr.

KISALTMALAR VE SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

A. Kısaltmalar

Kısaltma	Açıklama
PV	Fotovoltaik sistem (Photovoltaic System)
WT	Rüzgâr türbini (Wind Turbine)
DG	Dizel jeneratör (Diesel Generator)
BESS	Batarya enerji depolama sistemi (Battery Energy Storage System)
MILP	Karma tamsayılı doğrusal programlama (Mixed Integer Linear Programming)
SOC	Batarya doluluk oranı (State of Charge)
GAMS	Genel cebirsel modelleme sistemi (General Algebraic Modeling System)
CPLEX	Doğrusal Programlama Çözücüsü (CPLEX Optimizer)
CO_2	Karbondioksit (Carbon dioxide)
EMS	Enerji yönetim sistemi (Energy Management System)
DER	Dağıtık enerji kaynakları (Distributed Energy Resources)
EV	Elektrikli araç (Electric Vehicle)
PCC	Ortak bağlantı noktası (Point of Common Coupling)
CB	Devre kesici (Circuit Breaker)
MG	Mikroşebeke (Microgrid)
RES	Yenilenebilir enerji kaynakları (Renewable Energy Sources)
LV / MV	Alçak gerilim (Low Voltage) / Orta gerilim (Medium Voltage)
DSM	Talep tarafı yönetimi (Demand Side Management)
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
PSO	Parçacık sürücü optimizasyonu (Particle Swarm Optimization)
GA	Genetik algoritma (Genetic Algorithm)
MPC	Model öngörülü kontrol (Model Predictive Control)
DE	Diferansiyel evrim (Differential Evolution)
SG	Akıllı şebeke (Smart Grid)
ICT	Bilgi ve İletişim Teknolojileri (Information and Communication Technologies)
AI	Yapay zekâ (Artificial Intelligence)
VSG	Sanal senkron jeneratörler (Virtual Synchronous Generator)
AMI	İleri ölçüm altyapısı (Advanced Metering Infrastructure)
SCADA	Gözetleyici Kontrol ve Veri Toplama Sistemi (Supervisory Control and Data Acquisition)

B. Parametreler

Sembol	Açıklama	Birim
$P_h(t)$	Hastane yükü	kW
$P_{sch}(t)$	Okul yükü	kW
$P_{ev}(t)$	Konut yükü	kW
$P_{max}(t)$	PV üretim üst sınırı	kW
$WT_{max}(t)$	WT üretim üst sınırı	kW
$P_{dg,max}$	DG maksimum gücü	kW
$P_{dg,min}$	DG minimum gücü	kW
$P_{bch,max}$	Batarya şarj gücü sınırı	kW
$P_{bde,max}$	Batarya deşarj gücü sınırı	kW
$E_{b,max}$	Batarya maksimum kapasitesi	kWh
$E_{b,init}$	Başlangıç batarya enerjisi (SOC)	kWh
η_{ch}	Şarj verimliliği	%
η_{de}	Deşarj verimliliği	%
C_{pv}	PV üretim maliyeti	$/kWh - TL/kWh
C_{wt}	WT üretim maliyeti	$/kWh - TL/kWh
C_{dg}	DG üretim maliyeti	$/kWh - TL/kWh
C_{bch}	Batarya şarj maliyeti	$/kWh - TL/kWh
C_{bde}	Batarya deşarj maliyeti	$/kWh - TL/kWh
EF_{dg}	DG emisyon faktörü	kg CO_2/kWh
SOC_{min}	SOC alt sınırı	%
SOC_{max}	SOC üst sınırı	%

C. Karar Değişkenleri

Sembol	Açıklama	Tip	Birim
$p_{pv}(t)$	PV üretim gücü	Sürekli	kW
$p_{wt}(t)$	WT üretim gücü	Sürekli	kW
$p_{dg}(t)$	DG üretim gücü	Sürekli	kW
$p_{bch}(t)$	Batarya şarj gücü	Sürekli	kW
$p_{bde}(t)$	Batarya deşarj gücü	Sürekli	kW
$E_b(t)$	Batarya enerji seviyesi (SOC)	Sürekli	kWh
$served_h(t)$	Karşılanan hastane yükü	Sürekli	kW
$served_s(t)$	Karşılanan okul yükü	Sürekli	kW
$served_c(t)$	Karşılanan konut yükü	Sürekli	kW
$\delta(t)$	DG çalışma durumu (0=kapalı, 1=açık)	İkili	-
Obj	Amaç fonksiyonu (toplam işletme maliyeti)	Sürekli	$ / TL

1. GİRİŞ

1.1. Yenilenebilir Enerjinin Önemi ve Mikroşebekeler

Küresel ısınma, iklim değişikliği ve fosil yakıt rezervlerindeki azalma, enerji sektörünü yenilenebilir enerji kaynaklarına (Renewable Energy Sources, RES) yöneltmektedir. Fosil yakıt temelli üretim süreçlerindeki maliyet artışı ve çevresel etkiler, sürdürülebilir enerji politikalarının geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Bu nedenle RES yatırımları hızla artmakta; ancak sistem güvenilirliği ve maliyet etkinliği açısından yeni kontrol ve işletme stratejilerine ihtiyaç duyulmaktadır (Arslan ve ark., 2019; Çetinbaş ve ark., 2018).

Mikroşebekeler (Microgrids, MG), farklı üretim ve depolama birimlerinin koordineli entegrasyonu sayesinde enerji arz güvenliğini ve ekonomik verimliliği artırır. Fotovoltaik (Photovoltaic, PV) sistemler ve rüzgâr türbinleri (Wind Turbine, WT), yakıt gereksinimi olmadan enerji üretmeleri ve geniş erişilebilirlik sunmaları nedeniyle önemli avantaj sağlar (Ramenah ve ark., 2023). Ancak PV ve WT gibi değişken kaynakların doğası, düşük gerilimli ağlarda gerilim yükselmesi, ters güç akışı ve güç kalitesi problemleri oluşturabilir (Malekpour, 2011). Bu etkilerin dengelenmesi için batarya enerji depolama sistemi (Battery Energy Storage System, BESS) ve dizel jeneratörlerin (Diesel Generator, DG) koordineli biçimde çalışması kritik öneme sahiptir. Özellikle hastaneler gibi kritik yüklerin kesintisiz beslenmesi için DG-BESS koordinasyonu gereklidir.

Bu çalışmanın bilimsel amacı, ada modunda işletilen bir MG'de enerji yönetimini optimize ederek RES kullanımını en üst düzeye çıkarmak, fosil yakıt tüketimini ve işletme maliyetlerini en aza indirmektir. Çalışmada şu temel araştırma sorusuna yanıt aranmıştır: RES, BESS ve DG'nin koordineli optimizasyonu, ada modunda işletilen bir MG'nin enerji maliyeti ve karbon emisyonunu ne ölçüde azaltabilir?

1.2. Mikroşebekelerde Enerji Yönetimi ve Optimizasyon Yaklaşımları

MG'lerde enerji optimizasyonu, özellikle yüksek RES üretimi ve düşük talep dönemlerinde üretimi kısıtlamak yerine depolama ve güç akışı stratejileriyle kaynakların verimli kullanımını sağlar. Böylece şebeke kısıtlarından kaynaklanan geçici üretim sınırlamaları azaltılır ve hem ekonomik hem çevresel açıdan daha verimli bir işletme elde edilir (Ramakrishna & Rao, 1999).

Enerji yönetim sistemi (Energy Management System, EMS), MG'nin üretim-tüketim dengesini, güç akışı ve SOC (State of Charge) sınırlarını dikkate alarak optimize eden temel kontrol mimarisidir. Şebekeye bağlı ve ada modunda, gerilim ve frekans kararlılığının sağlanması EMS'nin temel sorumlulukları arasındadır. Bu nedenle EMS tabanlı optimizasyon, PV, WT, DG ve BESS kaynaklarının saatlik veya alt-saatlik planlamasını ve hizmet önceliklendirmesini içermelidir (Bektaş ve ark., 2023).

Bu çalışma, yeni bir fiziksel yapı önermek yerine mevcut bileşenlerin operasyonel optimizasyonuna odaklanmaktadır. Sistem davranışı, farklı üretim-talep koşullarını temsil eden iki senaryo üzerinden karşılaştırmalı biçimde değerlendirilmiştir.

1.3. Literatür Özeti ve Kullanılan Yöntemler

MG enerji yönetimi literatüründe deterministik ve stokastik yöntemlerin yanı sıra meta-sezgisel algoritmalar ve öngörü tabanlı kontrol stratejileri geniş biçimde kullanılmaktadır. Başlıca yöntemler arasında Genetik Algoritma (Genetic Algorithm, GA), Parçacık Sürü Optimizasyonu (Particle Swarm Optimization, PSO), Diferansiyel Evrim (Differential Evolution, DE) ve Model Öngörülü Kontrol (Model Predictive Control, MPC) bulunmaktadır (Amar & Yusupov, 2025; Esparza ve ark., 2025; Eyimaya & Altın, 2024; Yaghoubi ve ark., 2025; Zhang ve ark., 2024). PSO ve MPC temelli yaklaşımlar, BESS'in şarj-deşarj döngülerini optimize ederek sistem kararlılığını ve batarya ömrünü korumada etkilidir. Ayrıca hibrit algoritmalar (ör. PSO-MPC, PRO, Cheetah-PSO), maliyet minimizasyonu ve batarya ömrü yönetiminde yüksek performans sağlar (Gbadega & Sun, 2022; Mohamed ve ark., 2024; Mquqwana & Krishnamurthy, 2024; Wang ve ark., 2021).

Karma Tamsayılı Doğrusal Programlama (Mixed-Integer Linear Programming, MILP) yöntemi, deterministik yapısı sayesinde hızlı, tekrarlanabilir ve doğrulanabilir çözümler üretir. Bu özellikleri nedeniyle ada modunda ekonomik performans değerlendirmeleri ve kısa dönemli işletim stratejilerinin belirlenmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır (Babatunde ve ark., 2025; Zelaschi ve ark., 2025).

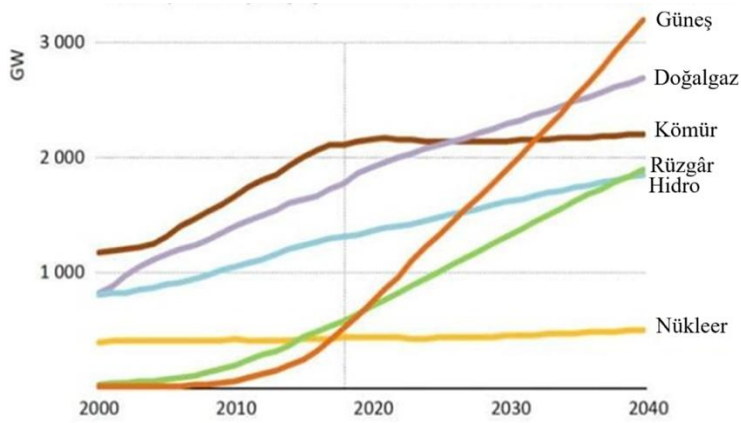
Deterministik MILP yaklaşımı, model parametrelerinin sabit kabul edilmesi sayesinde tekrarlanabilir ve küresel optimal çözümler üretir. Bu özellik, kısa dönemli işletim analizlerinde güvenilir sonuçlar sağlar. Buna karşılık, stokastik ve meta-sezgisel yöntemler belirsizlikleri daha gerçekçi şekilde modelleyebilse de, yüksek hesaplama yükü ve parametre ayar hassasiyeti nedeniyle gerçek zamanlı MG işletiminde sınırlı uygulanabilirliğe sahiptir. Bu nedenle çalışma kapsamında, hesaplama verimliliği ve çözüm kararlılığı avantajları nedeniyle deterministik MILP yöntemi tercih edilmiştir.

Çalışmanın literatüre katkıları şu şekilde özetlenebilir. (I) Gerçek meteorolojik verilere dayalı senaryo analizi gerçekleştirilerek ada modunda MG performansı incelenmiştir. (II) Yüklerin kritik, yarı kritik ve esnek olarak sınıflandırılması yoluyla enerji yönetimi sürecinde önceliklendirme yapılmıştır. (III) MILP tabanlı operasyonel optimizasyon yaklaşımı uygulanarak sistemin maliyet ve enerji dengesi açısından optimum çözümler elde edilmiştir. (IV) BESS'in yük dengeleme performansı mühendislik düzeyinde ayrıntılı biçimde analiz edilmiştir.

1.4. Yeni Yaklaşımlar ve Teknolojik Entegrasyon

Güncel araştırmalarda MG optimizasyonunda yapay zekâ (Artificial Intelligence, AI) tabanlı kontrol stratejileri, sanal senkron jeneratörler (Virtual Synchronous Generator, VSG) ve hibrit optimizasyon yöntemleri ile elektrikli araç (Electric Vehicle, EV) entegrasyonu öne çıkmaktadır (Allwyn ve ark., 2025; Shrivastav & Dutta, 2025; Xiao ve ark., 2025; Xu ve ark., 2025).

Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) raporları, önümüzdeki on yıllarda RES payının küresel elektrik üretiminde önemli ölçüde artacağını öngörmektedir (IEA, 2019). Şekil 1'de özetlenen küresel yenilenebilir enerji kapasitesindeki artış eğilimi, MG entegrasyonunun stratejik önemini ortaya koymaktadır.



Şekil 1. Küresel Enerji Görünümü ve Tahmini Yenilenebilir Güç Kapasitesi

1.5. Akıllı Şebekeler ve Mikroşebeke Entegrasyonu

Akıllı şebekeler (Smart Grids, SG), bilgi ve iletişim teknolojilerinin (Information and Communication Technologies, ICT) elektrik dağıtım sistemlerine entegrasyonu ile oluşan modern altyapılardır. SG'ler, üretim ve tüketim arasında çift yönlü veri akışı sağlayarak sürdürülebilir, güvenli ve verimli enerji yönetimini mümkün kılar. Bu yapı sayesinde RES ve BESS entegrasyonu daha etkin hale gelir ve karbon emisyonları önemli ölçüde azalır (Fei, 2025; Thorp ve ark., 1986; Tür & Yaprdakdal, 2020).

SG otomasyon sistemleri, üretim ve dağıtım katmanlarında ileri izleme ve kontrol fonksiyonları sunar. Böylece arz-talep dengesi gerçek zamanlı optimize edilir, kayıpların düşürülür ve sermaye harcamalarının etkin yönetimi sağlanır. Mevcut ağların modernizasyonu ve regülasyon uyumu teknik ve idari zorluklar doğurduğundan, MG düzeyinde optimizasyon tabanlı kontrol stratejilerinin geliştirilmesi kritik önem taşır.

Türkiye'de Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu (EPDK) ve Lisanssız Elektrik Üretim Yönetmeliği, MG uygulamalarına yasal çerçeve kazandırarak BESS ve ada modunda işletim konularını desteklemektedir. Bu bağlamda çalışma, ulusal enerji politikalarıyla da uyum göstermektedir.

1.6. Mikroşebeke Çalışma Modları

MG'ler iki temel işletim modunda faaliyet gösterir: şebekeye bağlı mod ve ada modu. Şebekeye bağlı modda gerilim ve frekans ana şebeke tarafından kontrol edilirken, ada modunda bu kontrol MG içinde sağlanır (Jiayi ve ark., 2008; Khamis ve ark., 2018; Worku ve ark., 2020) Kasıtsız ada oluşumlarının hızlı biçimde tespit edilmesi ve güvenli geçişlerin sağlanması, koruma sistemleri açısından kritik öneme sahiptir (Ghalavand ve ark., 2018; Issa ve ark., 2015).

1.7. Makalenin Yapısı

Bu çalışmada, ada modunda işletilen bir mikroşebekede enerji yönetiminin optimizasyonu amacıyla deterministik bir MILP modeli tasarlanmıştır. Model, yüksek çözüm doğruluğu ve kararlı yakınsama özellikleri nedeniyle Genel Cebirsel Modelleme Sistemi (General Algebraic Modeling System, GAMS) ortamında Doğrusal Programlama Çözücüsü (CPLEX Optimizer) kullanılarak uygulanmıştır. Literatürde sıkça kullanılan diğer çözücüler (GLPK, GUROBI, MATLAB/MOST vb.) ile yapılan karşılaştırmalar, bu altyapının büyük ölçekli doğrusal programlama problemlerinde daha verimli sonuçlar ürettiğini göstermektedir. GAMS'in modüler yapısı, karma tamsayılı değişkenleri ve doğrusal kısıtları sistematik biçimde modelleme olanağı sunarken; CPLEX çözücüsü, dallanma-sınırlandırma algoritmasıyla optimal çözüme hızlı ve tutarlı biçimde ulaşmaktadır. Diğer çözücülerle kıyaslandığında, bu kombinasyonun özellikle enerji sistemleri gibi çok kısıtlı ve zaman bağımlı problemlerde daha kararlı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Seçilen yöntem sayesinde geliştirilen model, enerji dengelemesi, batarya dinamikleri ve kaynak etkileşimlerini doğrusal optimizasyon prensipleri çerçevesinde güvenilir, kararlı ve yüksek hesaplama verimliliğiyle analiz etme olanağı sunmuştur.

Makale şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2'de SG kavramı ve enerji altyapısındaki dönüşüm, Bölüm 3'te MG yapısı ve teknik özellikler, Bölüm 4'te ada modunun avantajları ve tespit yöntemleri, Bölüm 5'te GAMS tabanlı MILP modeli, Bölüm 6'da senaryo bazlı sonuçlar ve performans değerlendirmeleri, Bölüm 7'de tartışmalar ve politika önerileri sunulmuştur.

2. AKILLI ŞEBEKELERİN TEMEL KAVRAMLARI VE ENTEGRASYONU

Akıllı şebekeler (SG), ICT entegrasyonu sayesinde elektrik dağıtım sistemlerinde izleme, kontrol ve otomasyon fonksiyonlarını geliştirir. SG'ler, çift yönlü veri akışı aracılığıyla dağıtık üretim kaynaklarının (Distributed Energy Resources, DER) sisteme etkin entegrasyonunu sağlar. Böylece RES ve EV entegrasyonu kolaylaşır, fosil yakıt tüketimi azalır ve karbon emisyonları düşer (Fei, 2025; Aslan ve ark., 2017).

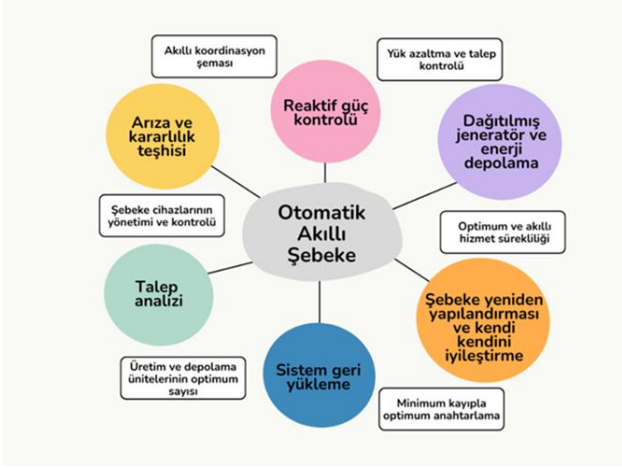
SG'lerin ana bileşenleri arasında dağıtım otomasyonu, talep yanıtı, ileri ölçüm altyapısı (Advanced Metering Infrastructure, AMI), enerji yönetim sistemleri ve siber-fiziksel güvenlik yer alır. Tablo 1'de özetlendiği üzere, geleneksel ağlar ile SG'ler arasındaki temel farklar; özellikle otomasyon ve veri yönetimi açısından SG'lerin sağladığı avantajları ortaya koymaktadır (Aslan ve ark., 2017).

Tablo 1. Geleneksel Şebekeler ile Akıllı Şebekeler Arasındaki Temel Farklar

Konvansiyonel Ağ	**Akıllı Şebeke**
Müşteri elektrik kesintilerini çağrı merkezi aracılığıyla bildirir.	Enerji şirketi kesintiyi otomatik olarak algılar, izole eder ve uzaktan yeniden devreye alır.
Enerji şirketi, zirve talebi karşılamaya çalışır.	Şirket, zirve talebi yönetir ve sermaye harcamalarını azaltır.
RES veya DER entegrasyonu zordur.	RES ve DER için gerekli altyapı hazırdır.

Orta gerilim / Alçak gerilim (MV/LV) kayıpları yaklaşık %10'dur.	MV/LV kayıpları %7-8 oranında azaltılabilir.

SG dönüşümü; altyapı yatırımları, standartların uygulanması ve regülasyon uyumu gerektirdiğinden geçiş süreci teknik ve kurumsal zorluklar içermektedir. Bu nedenle MG düzeyinde optimizasyon temelli çözümlerin geliştirilmesi teknik ve politik açıdan stratejik önem taşımaktadır (Fei, 2025). SG dönüşümü; altyapı yatırımları, standartların uygulanması ve regülasyon uyumu gerektirdiğinden geçiş süreci teknik ve kurumsal zorluklar içermektedir. Bu nedenle MG düzeyinde optimizasyon temelli çözümlerin geliştirilmesi teknik ve politik açıdan stratejik önem taşımaktadır (Fei, 2025). Şekil 2'de gösterilen akıllı şebeke otomasyon fonksiyonları da, bu dönüşümün teknik altyapısındaki kilit bileşenleri yansıtmaktadır.

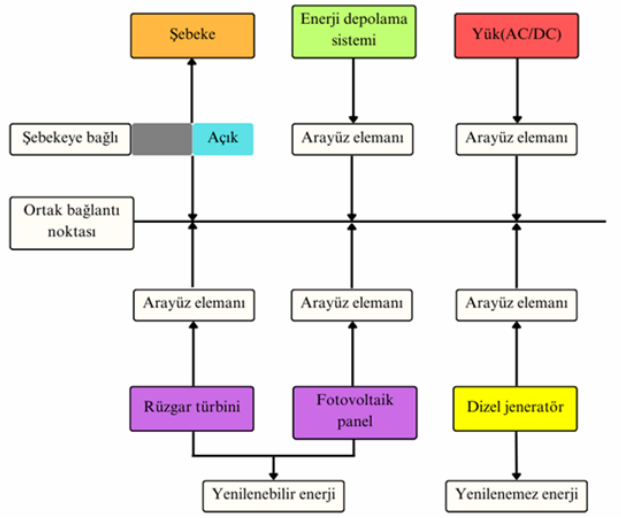


Şekil 2. Akıllı Şebeke Otomasyon Fonksiyonları

3. MİKROŞEBEKELERİN YAPISI VE ÖZELLİKLERİ

MG'ler, PV, WT, yakıt hücresi, BESS, DG ve farklı yük tiplerini tek bir yönetim birimi altında bütünleştiren sistemlerdir. Çift yönlü enerji akışı ve gelişmiş kontrol mekanizmaları sayesinde arz sürekliliği sağlanır, işletme maliyetleri azaltılır ve çevresel sürdürülebilirlik desteklenir (Jiayi ve ark., 2008).

MG'ler genellikle LV / MV seviyelerinde konumlanır. Şekil 3'te gösterildiği üzere, tipik bir RES tabanlı MG yapısı; üretim birimleri, enerji depolama elemanları ve yükleri bir arada bulundurarak sistemin bağımsız çalışmasını mümkün kılar (Esparza ve ark., 2025; Jiayi ve ark., 2008).



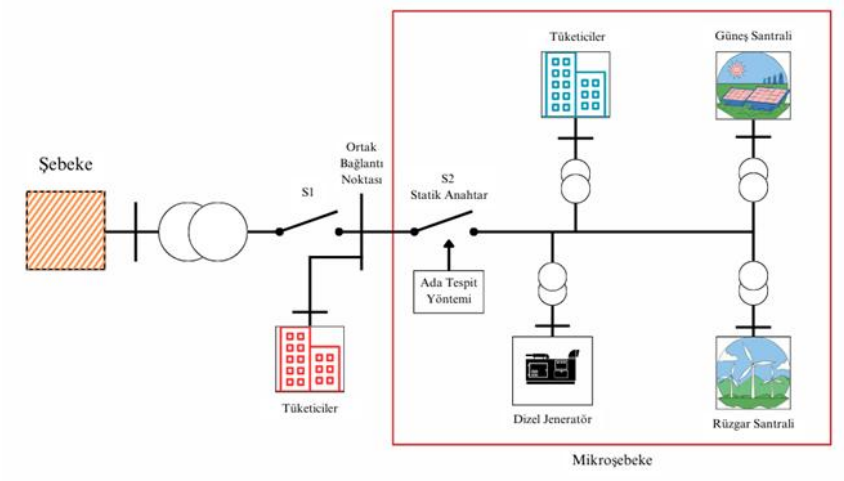
Şekil 3. Yenilenebilir Enerji Tabanlı Tipik Mikroşebeke Yapısı

Bu çalışmada fiziksel tasarımdan ziyade bileşenlerin işletme optimizasyonu ele alınmıştır. Farklı üretim koşullarında sistem performansı ve kritik yüklerin sürekliliği değerlendirilmiştir.

4. ADA MODU: AVANTAJLAR, RİSKLER VE TESPİT YÖNTEMLERİ

Ada modu, MG'nin ana şebekeden bağımsız olarak çalıştığı işletim biçimidir. Bu modda MG, üretim ve tüketimi kendi içinde dengeleyerek bağımsız bir güç sistemi gibi davranır. Arıza, şebeke kesintisi veya acil durumlarda ada moduna hızlı ve güvenli geçiş sağlanması, sistem dayanıklılığı açısından önemlidir. Ada modunun performansı, RES kapasitesi, BESS büyüklüğü ve kontrol stratejilerinin etkinliğine bağlıdır. RES'in yetersiz kaldığı durumlarda DG destek kaynağı olarak devreye girer (Ghalavand ve ark., 2018).

Şekil 4'te sunulan statik anahtar ile donatılmış çok kaynaklı bir MG yapısı, ada geçişinde hızlı anahtarlama yaparak MG'nin kararlılığını korumaktadır. Ada tespiti genellikle ortak bağlantı noktası (Point of Common Coupling, PCC) ölçümleri üzerinden yapılır; PCC tabanlı yöntemler düşük maliyetli ve uygulanması kolay yöntemlerdir (Ghalavand ve ark., 2018; Issa ve ark., 2015).



Şekil 4. Ada Modunda İşletilen Mikroşebeke Yapısı

4.1. Ada Modunun Sistem Performansına Katkıları

Ada modu, enerji güvenliği ve sistem dayanıklılığı açısından önemli avantajlar sunmaktadır. Bu mod sayesinde MG, ana şebekeden bağımsız olarak kritik yükleri besleyebilir ve enerji arzını kesintisiz biçimde sürdürebilir. BESS ve DG'nin koordineli çalışması üretim-tüketim dengesini koruyarak sistemin kararlılığını artırırken, RES'in etkin kullanımı karbon emisyonlarını azaltmaktadır. Ayrıca, ada modu bölgesel karar verme süreçlerini güçlendirir ve dağıtılmış enerji kaynaklarının daha verimli kullanılmasına olanak tanır. Bu avantajların en üst düzeye çıkarılabilmesi için EMS stratejilerinin doğru şekilde tasarlanması ve batarya kapasitesinin uygun biçimde boyutlandırılması büyük önem taşımaktadır.

4.2. Ada Modunun Teknik Riskleri

Ada modunda izole çalışmanın teknik riskleri arasında; hatlarda kalan enerjinin bakım personeli için tehlike oluşturması, gerilim ve frekans kararlılığının bozulması, koruma sistemlerinin yanlış tetiklenmesi, harmonik distorsiyon ve reaktif güç salınımları yer alır. Ayrıca ekipman aşınması ve güç kalitesi sorunları ekipman ömrünü kısaltabilir (Worku ve ark., 2019). Bu risklerin azaltılması, doğru boyutlandırılmış BESS, uygun yük sınıflandırması ve hızlı kontrol algoritmalarıyla mümkündür.

4.3. Ada Tespit Yöntemleri

Ada tespiti yöntemleri genel olarak üç ana grupta sınıflandırılmaktadır. Pasif yöntemlerde, PCC üzerinden gerilim, frekans veya faz kayması izlenerek ada oluşumu belirlenir. Bu yöntem düşük maliyetli ve basit bir uygulama sunmasına rağmen, küçük değişimlere karşı duyarlılığı sınırlıdır. Aktif yöntemler, üretim kaynaklarından şebekeye küçük genlikli sinyaller göndererek sistemin tepkisini ölçer; daha yüksek doğruluk sağlamakla birlikte sistem kararlılığını olumsuz etkileyebilir. Hibrit yöntemler ise pasif ve aktif yaklaşımların birleştirilmesiyle geliştirilmiş olup hem

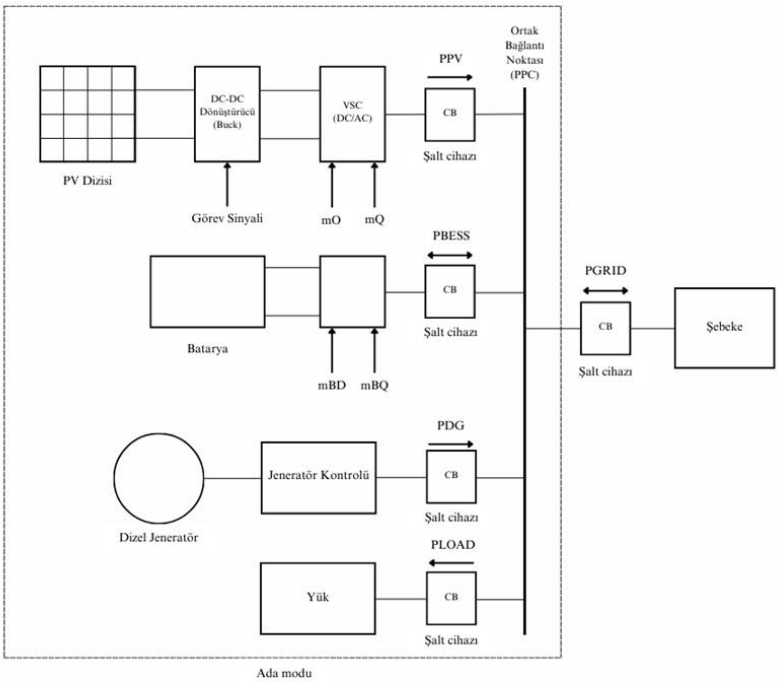
güvenilirlik hem de doğruluk açısından üstün performans sunar. Günümüzde, gözetleyici kontrol ve veri toplama sistemi (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) tabanlı AI destekli sistemler de hibrit yöntemler kapsamında değerlendirilmekte, hızlı ada tespiti ve otomatik izolasyon olanağı sağlayarak MG'nin işletim güvenliğini artırmaktadır (Worku ve ark., 2019).

4.4. Ada Durumunun Görselleştirilmesi

Şekil 5'te MG'nin şebeke bağlantılı ve ada modundaki çalışma durumları karşılaştırmalı olarak gösterilmektedir. Noktalı çizgiler ada modunu temsil etmektedir. Bu durumda üretim, depolama ve yük bileşenleri arasındaki güç akışı MG içinde dengelenmekte, PCC üzerinden ana şebeke ile güç alışverişi tamamen kesilmektedir. Böylece sistem, dış şebekeden bağımsız olarak kendi enerji dengesini sürdürebilmektedir.

Şekilde kullanılan değişkenler:

PPV: PV sisteminin ürettiği aktif güç
PBESS: BESS'in şarj/deşarj gücü
PDG: DG çıkış gücü
PLOAD: Toplam yük talebi
PGRID: Ana şebeke ile MG arasındaki güç alışverişi
PCC: Ortak bağlantı noktası
CB: Devre kesici



Şekil 5. Enerji Depolamalı Mikroşebekenin Ada Modu Diyagramı

BESS performansı, SOC üzerinden izlenir. SOC eğrisi ve ada modunun sistem kararlılığına etkileri, Bölüm 6'da nicel olarak analiz edilmiştir.

5. MİKROŞEBEKE OPTİMİZASYONU: YÖNTEM VE MATEMATİKSEL MODELLEME

5.1. Mikroşebeke Bileşenleri ve Yük Profilleri

Tasarlanan MG, kritik (hastane), yarı kritik (okul) ve esnek (konut) olmak üzere üç farklı yük grubundan oluşmaktadır. Enerji üretimi PV, WT, DG ve BESS tarafından sağlanmaktadır. Sistem, tamamen ada modunda işletilmek üzere modellenmiş ve dış şebeke bağlantısı bulunmamaktadır. Bu nedenle tüm yükler yalnızca yerel üretim ve depolama birimlerinden karşılanmaktadır.

EMS, saatlik bazda üretim ve tüketim dengesini sağlamak amacıyla MILP yöntemiyle modellenmiştir. Yük profilleri, doğrudan saha ölçümlerine değil, literatürde raporlanan tipik tüketim eğilimlerine dayalı olarak oluşturulmuştur. PV ve WT üretim profilleri, 21 Temmuz 2019 tarihine ait Antalya meteorolojik verileri kullanılarak Renewables.ninja veri tabanından elde edilmiştir. DG'ye ait maliyet ve emisyon katsayıları ise literatürde verilen ortalama değerlere dayandırılmıştır.

MG optimizasyonu genel olarak iki düzeyde incelenmektedir: ilki, üretim ve depolama birimlerinin kapasite boyutlandırılmasını kapsayan konfigürasyon optimizasyonu; ikincisi ise mevcut kapasite değerleri sabitken üretim ve depolama stratejilerinin belirlenmesine odaklanan operasyonel optimizasyondur. Bu çalışmada yalnızca operasyonel optimizasyon gerçekleştirilmiş ve sistemin saatlik işletim stratejileri değerlendirilmiştir.

5.2. Optimizasyon Senaryoları ve Veri Kaynakları

Modelin zaman çözünürlüğü saatlik olarak belirlenmiştir. Daha kısa periyotlar (ör. 15 veya 30 dakika) teorik olarak daha yüksek zaman hassasiyeti sağlasa da bu durumda modelin karmaşıklığı ve hesaplama yükü önemli ölçüde artmaktadır. Ayrıca kullanılan meteorolojik veri tabanları (ör. Renewables.ninja) güvenilir saatlik veri sağlamaktadır. Bu nedenlerle çalışmada saatlik çözünürlük tercih edilmiş ve böylece hem hesaplama verimliliği hem de saha verileriyle uyumluluk sağlanmıştır.

Model iki farklı senaryo altında değerlendirilmiştir. İlk senaryo olan Sınırlı Kapasite Senaryosu (%30), PV ve WT üretim kapasitelerinin nominal değerlerin %30'u ile sınırlandırıldığı durumu temsil etmektedir. Bu kapsamda PV üretimi 09:00-16:00 saatleri arasında 60 kW, WT üretimi ise gün boyunca sabit 45 kW olarak kabul edilmiştir. İkinci senaryo olan Gerçek Veri Senaryosu (%100)'nda ise PV ve WT üretim profilleri gerçek meteorolojik verilere dayalı olarak tanımlanmış, üretim üst sınırları $\mathrm{PV}_{max}(t) = 200.\,\mathrm{PV}_{kW}(t)$, $\mathrm{WT}_{max}(t) = 150.\,\mathrm{WT}_{kW}(t)$ şeklinde ifade edilmiştir. Bu iki senaryo, kapasite sınırlamaları ve gerçek veri koşulları altında MG performansının karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine olanak sağlamaktadır.

5.3. Model Parametreleri ve Karar Değişkenleri

Modelde kullanılan parametreler ve karar değişkenleri, enerji akışı, depolama davranışı ve üretim planlaması üzerinde doğrudan etkilidir.

Tablo 2'de tüketici yük profilleri, Tablo 3'te üretim birimleri ve batarya parametreleri, Tablo 4'te ekonomik ve çevresel katsayıları, Tablo 5'te ise karar değişkenleri özetlenmiştir.

Tüm maliyet hesaplamalarında 1$ = 41,6 TL (2025 yılı güncel ortalama döviz kuru) olarak alınmıştır.

Tablo 2. Mikroşebeke Tüketici Yük Profilleri

Parametre	**Açıklama**	**Değer [kW]**	**Zaman Aralığı**
$\mathrm{P_h}(t)$	Hastane yükü (kritik)	30	24 saat sabit
$\mathrm{P}_{sch}(t)$	Okul yükü (yarı kritik)	30	09:00-16:00
$\mathrm{P}_{ev}(t)$	Konut yükü (esnek)	30 taban / 90 akşam pik	18:00-23:00

Kritik yük (hastane) sürekli olarak karşılanırken, yarı kritik yük (okul) yalnızca mesai saatlerinde aktiftir. Konut yükü ise akşam saatlerinde pik yaparak sistemin esnekliğini test etmektedir.

Tablo 3. Üretim Birimleri ve Batarya Parametreleri

Parametre	**Açıklama**	**Değer / Notlar**
$\mathrm{PV}_{max}(t)$	PV üretim üst sınırı [kW]	S1: 60 (09:00-16:00), S2: ölçüm tabanlı
$WT_{max}(t)$	WT üretim üst sınırı [kW]	S1: 45, S2: ölçüm tabanlı
$\mathrm{P}_{dg,max}$	DG maksimum güç [kW]	100
$\mathrm{P}_{dg,min}$	DG minimum güç [kW]	20
$\mathrm{P}_{bch,max}$	Batarya şarj gücü [kW]	100
$\mathrm{P}_{bde,max}$	Batarya deşarj gücü [kW]	100
$E_{b,max}$	Batarya kapasitesi [kWh]	500
$E_{b,init}$	Başlangıç SOC [kWh]	150
η_{ch}	Şarj verimliliği [%]	95
η_{de}	Deşarj verimliliği [%]	90
SOC_{min}	SOC alt sınırı [%]	20
SOC_{max}	SOC üst sınırı [%]	90

Tablo 4. Ekonomik ve Çevresel Parametreler

Değişken	Açıklama	Maliyet [$/kWh]	Maliyet [TL/kWh]	Emisyon [kg CO_2/kWh]
C_{pv}	PV üretim maliyeti	0,020	0,832	-
C_{wt}	WT üretim maliyeti	0,015	0,624	-
C_{dg}	DG üretim maliyeti	0,250	10,40	-
C_{bch}	Batarya şarj maliyeti	0,002	0,083	-
C_{bde}	Batarya deşarj maliyeti	0,003	0,125	-
EF_{dg}	DG emisyon faktörü	-	-	0,8

Tablo 5. Karar Değişkenleri ve Türleri

Değişken	Açıklama	Tür	Rol
$p_{pv}(t)$	PV üretim gücü [kW]	Sürekli	Üretim
$p_{wt}(t)$	WT üretim gücü [kW]	Sürekli	Üretim
$p_{dg}(t)$	DG üretim gücü [kW]	Sürekli	Üretim
$p_{bch}(t)$	Batarya şarj gücü [kW]	Sürekli	Depolama
$p_{bde}(t)$	Batarya deşarj gücü [kW]	Sürekli	Depolama
$E_b(t)$	Batarya SOC [kWh]	Sürekli	Durum
$served_h(t)$	Hastane yükü karşılaması [kW]	Sürekli	Hizmet
$served_s(t)$	Okul yükü karşılaması [kW]	Sürekli	Hizmet
$served_c(t)$	Konut yükü karşılaması [kW]	Sürekli	Hizmet
δ(t)	DG durumu (0=kapalı, 1=açık)	İkili	Sistem durumu
Obj	Toplam işletme maliyeti [$ / TL]	Sürekli	Amaç fonksiyonu

5.4. Amaç Fonksiyonu

Optimizasyonun amacı, 24 saatlik zaman ufku boyunca toplam üretim ve depolama maliyetini minimize etmektir. Amaç fonksiyonu Denklem (1)'de verilmiştir:

$$Obj = \sum_{t=1}^{24} (C_{pv}.p_{pv}(t) + C_{wt}.p_{wt}(t) + C_{dg}.p_{dg}(t) + C_{bch}.p_{bch}(t) + C_{bde}.P_{bde}(t)) \quad (1)$$

PV ve WT en düşük maliyetli üretim kaynakları iken, DG en yüksek maliyetli birimdir. Batarya şarj-deşarj maliyetleri modele dâhil edilmiştir. Karbon emisyonu ayrı olarak hesaplanmış, ancak amaç fonksiyonuna dahil edilmemiştir.

5.5. Model Kısıtları

5.5.1. Enerji dengesi

Sistemin enerji dengesi Denklem (2)'de tanımlanmıştır. Her saat için toplam üretim ve batarya deşarjı, toplam yük ve batarya şarjına eşit olmalıdır:

$$p_{pv}(t) + p_{wt}(t) + p_{dg}(t) + p_{bde}(t) = served_h(t) + served_s(t) + served_c(t) + p_{bch}(t), \quad \forall t \tag{2}$$

MG dış şebekeye bağlı olmadığından tüm yükler yerel kaynaklar tarafından karşılanmaktadır.

5.5.2. Batarya dinamiği ve başlangıç koşulu

Bataryanın başlangıçtaki enerji durumu Denklem (3)'te, saatlik güncellemesi ise Denklem (4)'te tanımlanmıştır:

$$E_b(1) = E_{b,init} \tag{3}$$

$$E_b(t) = E_b(t-1) + \eta_{ch} * p_{bch}(t) - \frac{1}{\eta_{de}}.p_{bde}(t), \quad t > 1 \tag{4}$$

Batarya, başlangıçta %30 doluluk oranı SOC ile başlatılmıştır. Şarj ve deşarj işlemleri, ilgili verimlilik katsayılarına göre her saat için güncellenmektedir.

5.5.3. Yüklerin karşılanması

Kritik, yarı kritik ve esnek yüklerin karşılanması sırasıyla Denklem (5), (6) ve (7) ile ifade edilmiştir:

$$served_h(t) = p_h(t) \tag{5}$$

$$served_s(t) = p_{sch}(t) \tag{6}$$

$$served_c(t) = p_{ev}(t) \tag{7}$$

Kritik yükler her zaman karşılanırken, yarı kritik ve esnek yükler yalnızca belirlenen zaman aralıklarında sağlanmaktadır.

5.5.4. Üretim ve depolama kapasiteleri

PV, WT ve BESS güç çıkışlarına ilişkin minimum ve maksimum değerler sırasıyla Denklem (8)-(11)'de verilmiştir:

$$0 \leq p_{pv}(t) \leq PV_{max}(t) \tag{8}$$

$$0 \leq p_{wt}(t) \leq WT_{max}(t) \tag{9}$$

$$0 \leq p_{bch}(t) \leq P_{bch,max} \tag{10}$$

$$0 \leq p_{bde}(t) \leq P_{bde,max} \tag{11}$$

PV, WT ve batarya güçleri teknik sınırlar dâhilinde sınırlandırılmıştır.

5.5.5. DG limitleri

DG'ye ait minimum ve maksimum güç kısıtlaması ile çalışma durumu Denklem (12)'de tanımlanmıştır:

$$P_{dg,min}.\,\delta(\mathrm{t}) \leq p_{dg}(t) \leq P_{dg,max}.\,\delta(\mathrm{t}) \tag{12}$$

DG yalnızca aktif durumda ($\delta(\mathrm{t}) = 1$) enerji üretmektedir; kapalı durumda ($\delta(\mathrm{t}) = 0$) üretim sıfır kabul edilmiştir.

5.5.6. Batarya SOC güvenlik kısıtı

Bataryanın enerji durumu yalnızca belirlenen alt ve üst sınırlar arasında tutulmak zorundadır. Bu koşul Denklem (13)'te sunulmuştur. Bu denklem, bataryanın aşırı deşarj veya aşırı şarj olmasını önlemektedir.

$$0{,}2.\,E_{b,max} \leq E_b(t) \leq 0{,}9.\,E_{b,max} \tag{13}$$

5.5.7. Karbon emisyonu

Diğer kirleticiler ihmal edilmiştir. Toplam karbon emisyonu DG üretimiyle orantılı olup Denklem (14)'te ifade edilmiştir:

$$Emissions = \sum_{t=1}^{24} p_{dg}(t).\,EF_{dg} \tag{14}$$

5.6. Çözüm Yöntemi ve Model Çıktıları

Model, 24 saatlik zaman ufkunda GAMS ortamında CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülmüştür.
Elde edilen çıktı kümeleri şu şekildedir:

Saatlik üretim ve depolama değerleri: $p_{pv}, p_{wt}, p_{dg}, p_{bch}, p_{bde}, E_b$
İkili değişkenler: δ
Performans göstergeleri: toplam işletme maliyeti ve toplam karbon emisyonu

5.7. Çözüm Algoritmasının Pseudo-code Gösterimi

Başla

1. Zaman ufkunu tanımla (t = 1..24 saat)
2. Yük profillerini ata:
   - Kritik yük (hastane)
   - Yarı kritik yük (okul, 09:00-16:00)
   - Esnek yük (konut)
3. Yenilenebilir enerji üretim sınırlarını belirle:
   - Senaryo 1 (S1): %30 kapasite ile sınırlı üretim
   - Senaryo 2 (S2): %100 kapasite ile gerçek meteorolojik verilere dayalı üretim
4. Parametreleri tanımla:
   - DG kapasite ve yakıt parametreleri
   - BESS kapasite, şarj-deşarj verimi, SOC(min) ve SOC(max)
   - Maliyet katsayıları ve emisyon faktörü
5. Karar değişkenlerini ata $(p_{pv}, p_{wt}, p_{dg}, p_{bch}, p_{bde}, E_{b,}, \delta)$
6. Kısıtları oluştur:
   - Enerji dengesi denklemleri
   - Batarya dinamikleri ve SOC sınırları [0,2 – 0,9]
   - DG kapasite sınırları ve yük karşılama kısıtları
7. Amaç fonksiyonunu tanımla (toplam maliyetin minimizasyonu)
8. MILP modelini kur ve GAMS/CPLEX ile çöz
9. Çıktıları hesapla ve kaydet:
   - PV, WT ve DG üretimleri
   - BESS şarj/deşarj profili
   - Karşılanan yükler
   - Toplam işletme maliyeti ve toplam karbon emisyonu

Bitir

5.8. Modelin Avantajları ve Sınırlılıkları

Model, kritik yüklerin kesintisiz olarak beslenmesini garanti altına almakta ve DG-BESS koordinasyonuyla enerji sürekliliğini sağlamaktadır. Senaryo tabanlı yapı, farklı üretim koşulları altında sistem davranışının karşılaştırmalı analizine olanak tanımaktadır.

Modelin başlıca sınırlılıkları; DG rampa oranı, minimum çalışma süresi, BESS yaşlanma maliyeti, inverter verimliliği ve hat kayıplarının modele dâhil edilmemiş olmasıdır. Ayrıca karbon emisyonu yalnızca CO_2 bazında değerlendirilmiştir.

Deterministik MILP yaklaşımı, stokastik modellere göre belirsizlikleri doğrudan temsil etmese de yüksek hesaplama verimliliği ve çözüm kararlılığı sayesinde ada modunda enerji yönetimi için uygun bir yöntem sunmaktadır.

6. BULGULAR VE PERFORMANS ANALİZİ

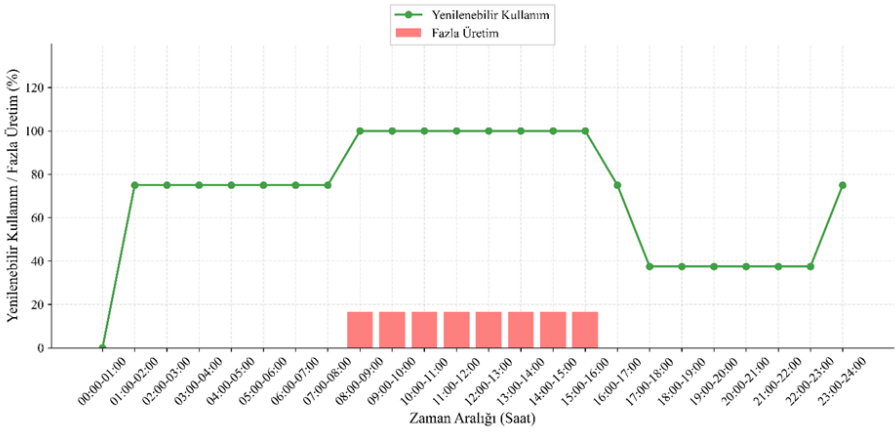
Geliştirilen MG optimizasyon modeli, 24 saatlik işletim süresi boyunca RES kullanım oranı, BESS performansı, DG katkısı, toplam işletme maliyeti ve karbon emisyonu göstergeleri açısından değerlendirilmiştir. Model, deterministik bir MILP yaklaşımıyla GAMS/CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Çalışma, deneysel bir kurulum yerine 21 Temmuz 2019 tarihli Antalya meteorolojik verilerine dayalı olarak gerçek saha koşullarını temsil edecek biçimde yürütülmüştür.

Analizler iki senaryo üzerinden gerçekleştirilmiştir: Senaryo 1, PV ve WT üretim kapasitelerinin nominal değerlerinin %30'una düşürüldüğü sınırlı üretim koşulunu; Senaryo 2 ise PV ve WT'nin tam kapasitede (%100) ve gerçek meteorolojik verilere dayalı olarak işletildiği durumu temsil etmektedir.

6.1. Senaryo 1: Sınırlı Kapasite Koşulları (%30 Üretim Kapasitesi)

6.1.1. Yenilenebilir enerji üretim profili

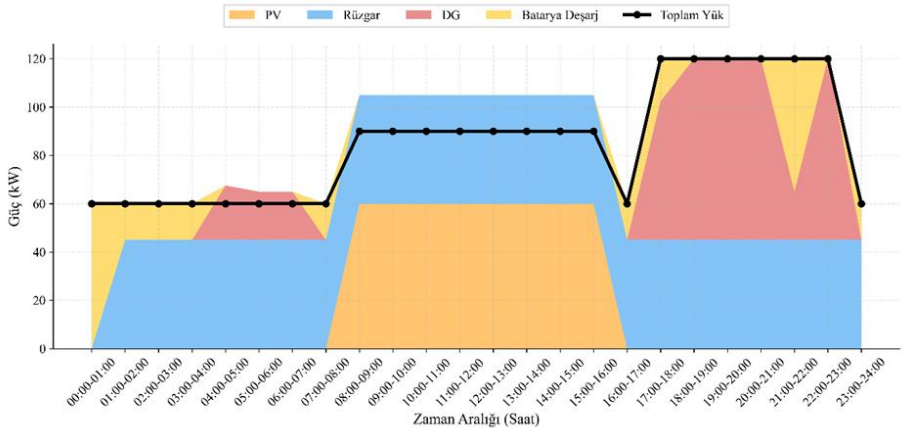
Şekil 6'da sunulan üretim profili, sınırlı kurulu güç altında günlük toplam 1515 kWh yenilenebilir enerji elde edildiğini göstermektedir. PV üretiminin sabah ve akşam saatlerinde sıfıra düşmesi, yükün karşılanmasında belirgin bir dalgalanma yaratmış ve yenilenebilir katkı özellikle günün yaklaşık üçte birlik bölümünde %40'ın altına gerilemiştir. Gün ortasında PV ve WT'nin eşzamanlı çalışmasıyla toplam güç 105 kW seviyesine ulaşarak 90 kW'lık yükü yaklaşık %16 oranında aşmıştır. Grafikte kırmızı bölge ile gösterilen 15 kW'lık üretim fazlası batarya tarafından depolanmış ve MG öğle saatlerinde kısa süreli de olsa tam yenilenebilir işletim kabiliyeti göstermiştir. PV kapasitesindeki sınırlama nedeniyle bu avantajlı süre günün geri kalan bölümüne yayılmamış ve sistem genel olarak DG ağırlıklı bir işletim karakteri sergilemiştir.



Şekil 6. Senaryo 1: Yenilenebilir Enerji Kullanım Etkinliği

6.1.2. Toplam enerji üretimi ve yük dengesi

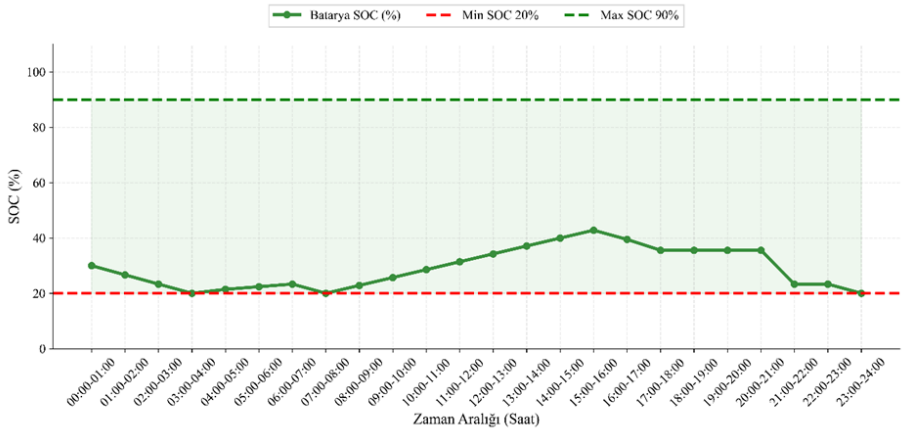
Şekil 7'de sunulan dağılım, günlük üretimin %77'sinin yenilenebilir kaynaklardan, %23'ünün ise DG'den sağlandığını ortaya koymaktadır. Yük talebinin akşam saatlerinde 90 kW düzeyine ulaşmasıyla DG'nin yüksek güçte uzun süre devrede kaldığı görülmektedir. Yenilenebilir üretimdeki yetersizlik, DG'yi yalnızca tamamlayıcı değil aynı zamanda sistem kararlılığı açısından zorunlu bir bileşen hâline getirmiştir. Yük eğrisi ile üretim arasındaki uyumsuzluk, sınırlı kapasite işletiminin enerji yönetimi üzerindeki kısıtlarını açık biçimde göstermektedir.



Şekil 7. Senaryo 1: Sistem Enerji Akışı ve Kaynak Katkısı

6.1.3. Batarya doluluk oranı (SOC)

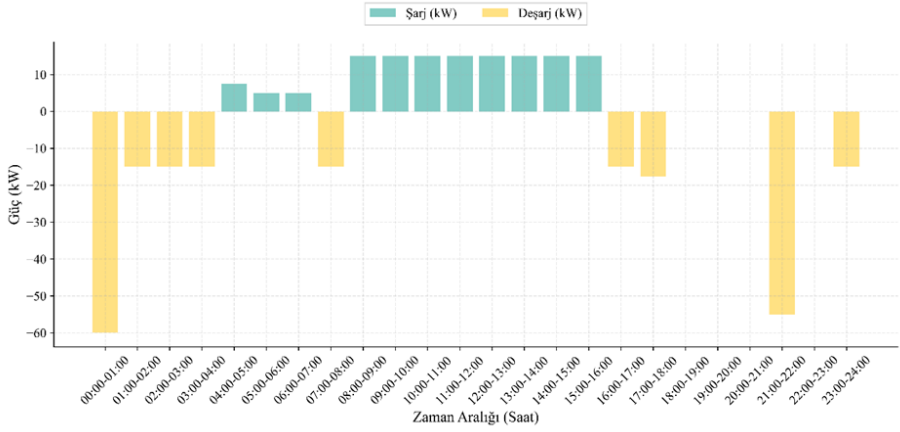
Şekil 8'de sunulan SOC eğrisi, bataryanın gün boyunca yenilenebilir üretim değişimine duyarlı bir çalışma düzeni izlediğini göstermektedir. Başlangıçta %30 SOC'ye sahip bataryanın seviyesinin öğle saatlerinde %42,8'e yükselmesi, PV'nin sağladığı üretim fazlasının depolanma kapasitesinin sınırlı olduğunu göstermektedir. %90'lık üst SOC sınırına erişilememesi, PV kapasitesinin bataryayı tam doluma yaklaştıracak seviyede güç üretmediğini göstermektedir. Akşam saatlerinde artan yükle birlikte SOC hızla düşmüş ve alt sınır olan %20'ye kadar gerilemiştir. Enerji açığının yüksek olduğu dönemlerde bataryanın neredeyse sürekli deşarjda kalması, DG üzerindeki yükün kısmen hafifletilebildiğini göstermektedir.



Şekil 8. Senaryo 1: Batarya Doluluk Oranı (SOC)

6.1.4. Batarya şarj ve deşarj güçleri

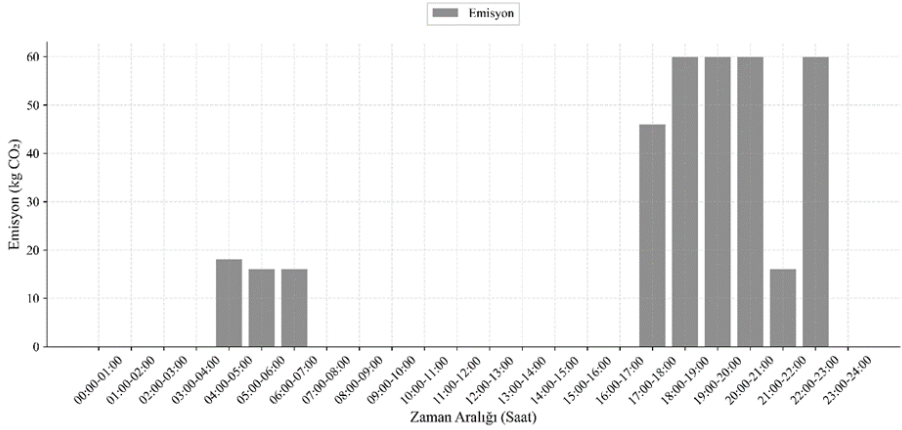
Şekil 9'da sunulan güç akışı, bataryanın sistem içindeki dengeleme rolünü ayrıntılı biçimde ortaya koymaktadır. Günlük toplam şarj 137,544 kWh, deşarj ise 222,6 kWh olarak belirlenmiştir. PV'nin fazla üretim sağladığı 09:00–16:00 saatleri arasında şarj gücü 15 kW düzeyinde sabit kalmıştır. Akşam saatlerinde ise talebin artmasıyla deşarj gücü 18:00'de 17,6 kW'a, 22:00'de 55 kW'a ulaşmıştır. Deşarj gücündeki bu yüksek değerler, bataryanın kritik yük anlarında doğrudan sistem dengeleme aracı olarak kullanıldığını göstermektedir. Şarj-deşarj profile bakıldığında bataryanın Senaryo 1'de net tüketici konumunda olduğu görülmektedir; bu da sınırlı kapasite işletiminde depolama sisteminin ağır yük altında olduğunu göstermektedir.



Şekil 9. Senaryo 1: Batarya Güç Akışı

6.1.5. Karbon emisyonu profili

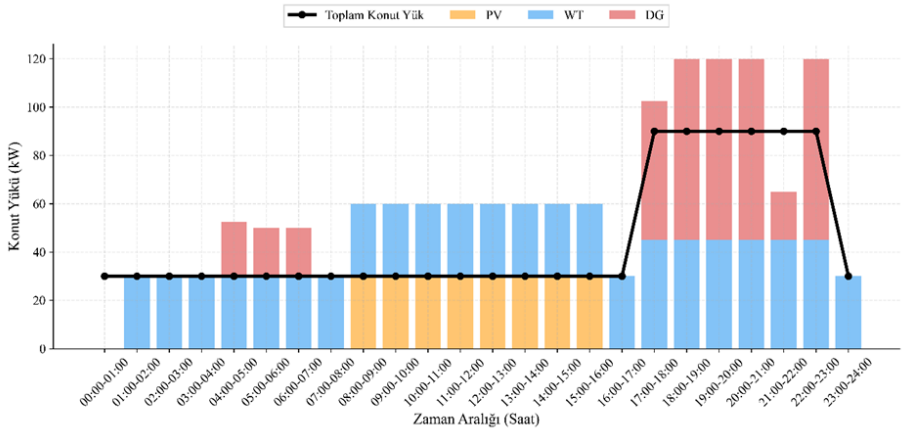
Senaryo 1'e ait karbon emisyonu sonuçları Şekil 10'da sunulmuştur. DG'nin akşam saatlerinde yüksek güçte çalışmasıyla emisyon değerlerinin 60 kg/saat seviyesine kadar yükseldiği görülmektedir. Günlük toplam emisyon 351,955 kg CO_2 olarak hesaplanmıştır. Yenilenebilir üretimdeki sınırlamalar nedeniyle DG'nin uzun süreli devrede kalması, emisyon yoğunluğunu artıran temel etken olarak ortaya çıkmaktadır. DG'nin yüklenme eğrisinin emisyon profili ile birebir uyumlu olması, senaryonun çevresel etkiler açısından dezavantajlı yapısını göstermektedir.



Şekil 10. Senaryo 1: Karbon Emisyonu

6.1.6. Konut yükü kaynak dağılımı

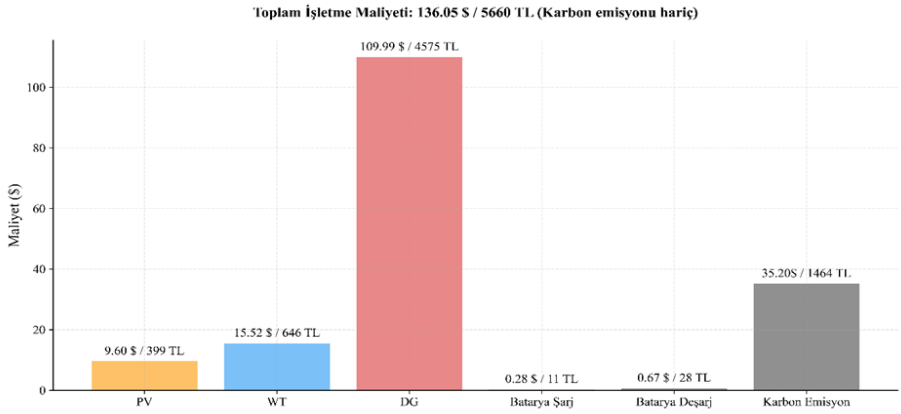
Şekil 11'deki sunulan dağılım, konut yükünün gün ortasında tamamen yenilenebilir kaynaklarla karşılandığını, geri kalan saatlerde ise DG'nin baskın hâle geldiğini göstermektedir. Günlük toplam yükün %67'sinin yenilenebilir, %33'ünün DG kaynaklı olması, sınırlı kapasite koşullarında dahi yenilenebilir enerjinin önemli bir katkı sunduğunu ortaya koymaktadır. Yük profilinin PV üretimiyle örtüştüğü saatlerde MG yüksek yenilenebilir penetrasyonuna ulaşmış olsa da sabah ve akşam dönemlerinde kapasite kısıtının etkisi belirgin şekilde hissedilmiştir.



Şekil 11. Senaryo 1: Konut Yükü Kaynak Dağılımı

6.1.7. İşletme maliyeti

Şekil 12'de görülen 136,05$ (5660 TL) günlük maliyet, DG'nin yüksek birim maliyeti nedeniyle büyük ölçüde yakıt tüketiminden kaynaklanmaktadır. Günlük enerji ihtiyacının yaklaşık dörtte birinin DG tarafından karşılanması, maliyet düzeyinin yükselmesine yol açmaktadır. Yenilenebilir üretim sınırlı kaldığı sürece DG maliyetinin toplam işletme giderlerine hâkim olduğu görülmektedir. Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde Senaryo 1, kapasite artırılmadıkça sürdürülebilir bir işletme modeli sunmamaktadır.



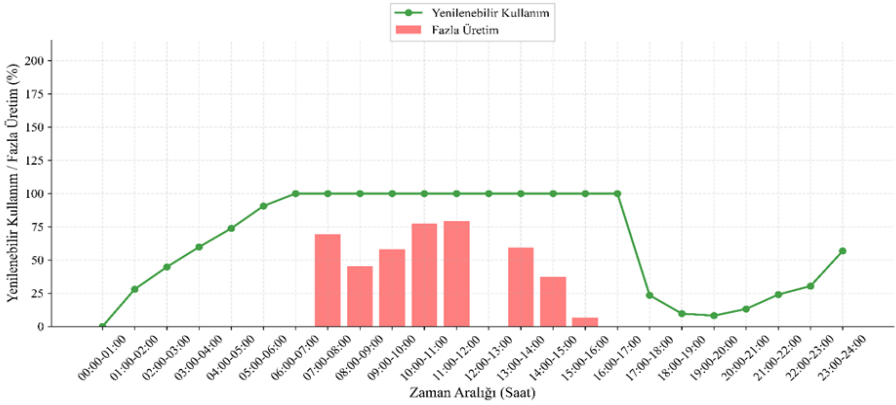
Şekil 12. Senaryo 1: Toplam İşletme Maliyeti

6.2. Senaryo 2: Gerçek Meteorolojik Veriler (%100 Üretim Kapasitesi)

6.2.1. Yenilenebilir enerji üretim profili

Şekil 13'te sunulan üretim profili, tam kapasite kurulumunda yenilenebilir enerjinin sistem üzerindeki etkisini açık biçimde göstermektedir. Günlük toplam üretimin

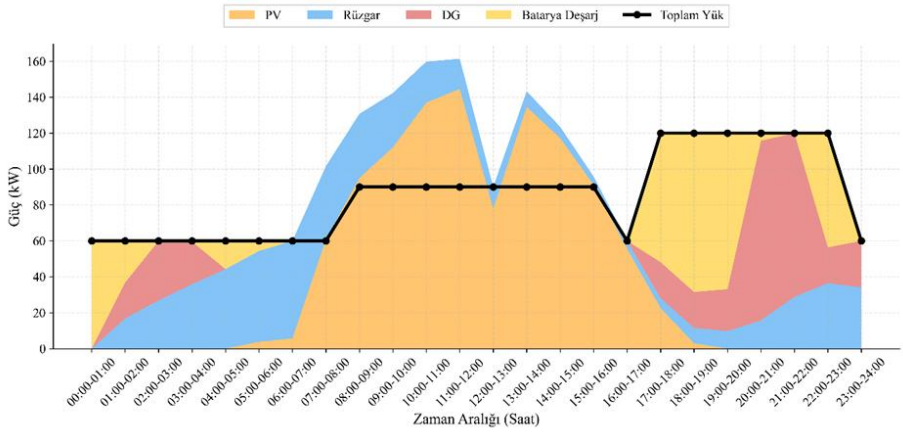
1611,021 kWh seviyesine çıkması, Senaryo 1'e göre yaklaşık %6,4'lük bir artış sunmaktadır. PV üretiminin öğle saatlerinde 145 kW seviyesini aşarak uzun süre yükün üzerinde kalması, günün geniş bir kısmında %100'ün üzerinde yenilenebilir penetrasyonu sağlamıştır. Artan enerji fazlası batarya tarafından etkin biçimde depolanmış ve SOC %88 seviyesine yükselmiştir. Yenilenebilir üretimdeki süreklilik DG'ye olan bağımlılığı belirgin şekilde azaltarak sistem verimliliğini artırmıştır.



Şekil 13. Senaryo 2: Yenilenebilir Enerji Kullanım Etkinliği

6.2.2. Toplam enerji üretimi ve yük dengesi

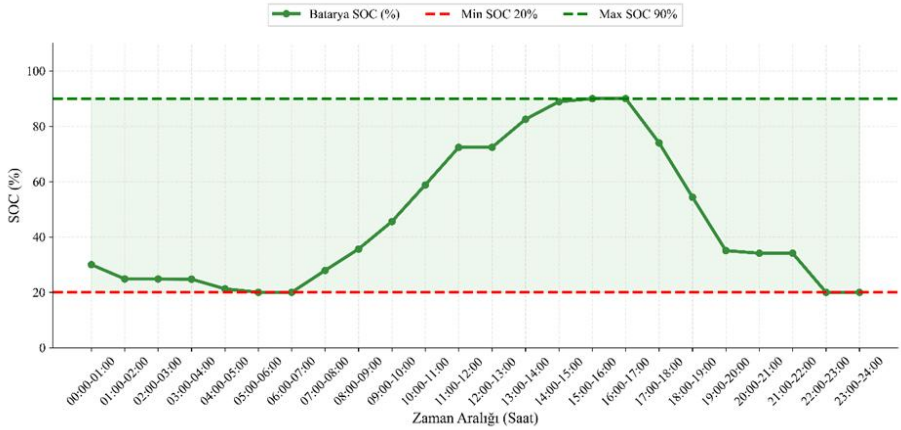
Şekil 14, Senaryo 2'de günlük toplam üretimin %81'inin yenilenebilir kaynaklardan sağlandığını ortaya koymaktadır. PV üretimi 08:00–16:00 saatleri arasında yaklaşık 130–145 kW aralığında istikrarlı bir şekilde devam etmiş, rüzgâr türbini ise aynı zaman diliminde 20–55 kW bandında seyrederek PV üretimini desteklemiştir. Stackplot grafiğinde görülen 160 kW civarındaki üst sınır, WT'nin tek başına ulaştığı bir seviye olmayıp PV ve WT'nin toplam anlık gücünün görsel yansımasıdır. Gün ortasındaki bu birleşik üretim fazlası batarya tarafından etkin biçimde şarj edilerek depolanmış ve akşam saatlerinde 90 kW'a kadar ulaşan deşarj gücüyle DG'nin yükü önemli ölçüde hafifletilmiştir. Yenilenebilir üretimin gün boyunca süreklilik göstermesi, yalnızca tüketimin karşılanmasını kolaylaştırmakla kalmamış; aynı zamanda akşam saatlerinde bataryanın daha güçlü bir katkı sunmasını sağlayarak MG'nin genel dengeleme performansını belirgin şekilde iyileştirmiştir.



Şekil 14. Senaryo 2: Sistem Enerji Akışı ve Kaynak Katkısı

6.2.3. Batarya doluluk oranı (SOC)

Şekil 15'te sunulan SOC profili, tam kapasite senaryosunda bataryanın daha verimli çalıştığını göstermektedir. SOC'nin %88 seviyesine ulaşması, depolama sisteminin gün ortasındaki yüksek PV üretiminden tam olarak yararlandığını ortaya koymaktadır. Akşam saatlerinde SOC'nin minimum %20 değerine inmesi, bataryanın talep yoğun saatlerde DG'yi önemli ölçüde desteklediğini göstermektedir. Senaryo 1'e göre bataryanın daha geniş bir enerji çevrimi gerçekleştirdiği ve sistem esnekliğini artırdığı görülmektedir.

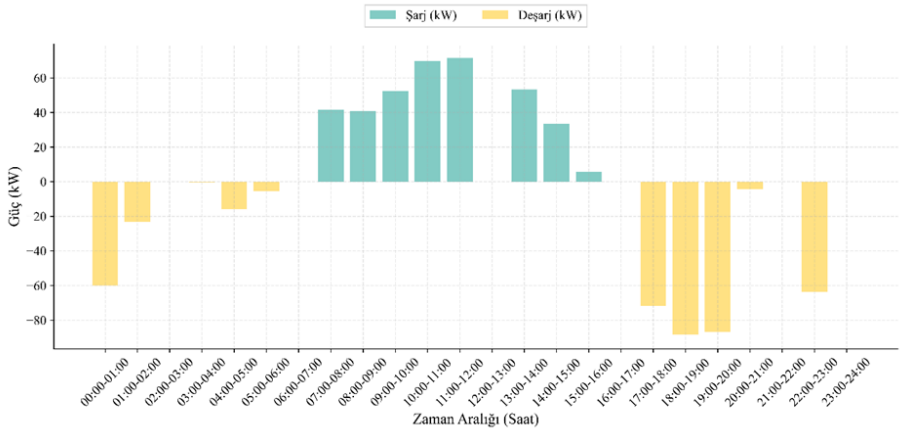


Şekil 15. Senaryo 2: Batarya Doluluk Oranı (SOC)

6.2.4. Batarya şarj ve deşarj güçleri

Şekil 16'da sunulan güç profiline göre günlük toplam şarj 368,421 kWh, deşarj ise 420 kWh düzeyine ulaşmıştır. En yüksek şarj gücünün 70 kW'ın üzerinde olması, PV üretimindeki artışın depolama sistemine güçlü bir katkı sağladığını göstermektedir. Deşarj gücünün 90 kW seviyesine çıkması, bataryanın akşam yük profilini karşılamada

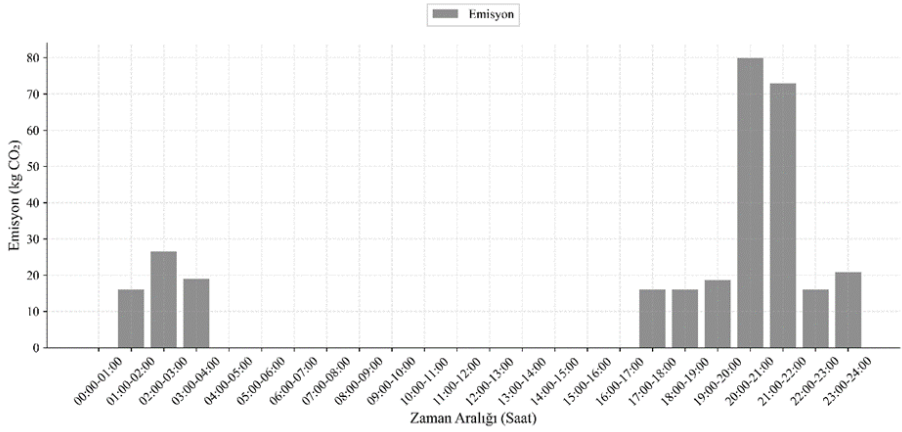
belirleyici bir rol üstlendiğini ortaya koymaktadır. Depolama çevrimlerinin Senaryo 1'e kıyasla çok daha dengeli ve yüksek hacimli olması, kapasite artışının sistem dinamiğini olumlu yönde etkilediğini göstermektedir.



Şekil 16. Senaryo 2: Batarya Güç Akışı

6.2.5. Karbon emisyonu profili

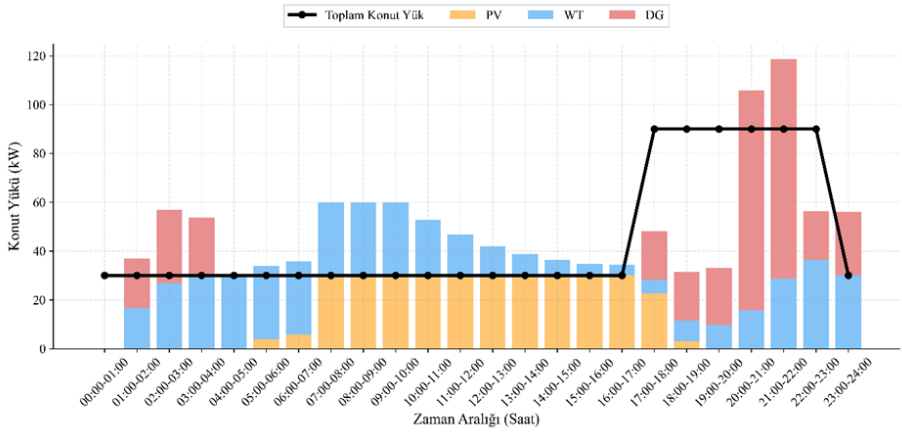
Şekil 17'deki hesaplamalar günlük toplam emisyonun 301,920 kg CO_2 olduğunu göstermektedir. Gündüz saatlerinde DG'nin devre dışı kalması, emisyonun neredeyse sıfır düzeyine inmesini sağlamıştır. Emisyonların Senaryo 1'e göre %14,2 azalması, yenilenebilir kapasite artışının çevresel açıdan belirleyici bir kazanım sunduğunu göstermektedir. DG'nin daha az süre ve düşük güçte devreye girmesi, MG'nin karbon yoğunluğunu kayda değer biçimde düşürmüştür.



Şekil 17. Senaryo 2: Karbon Emisyonu

6.2.6. Konut yükü kaynak dağılımı

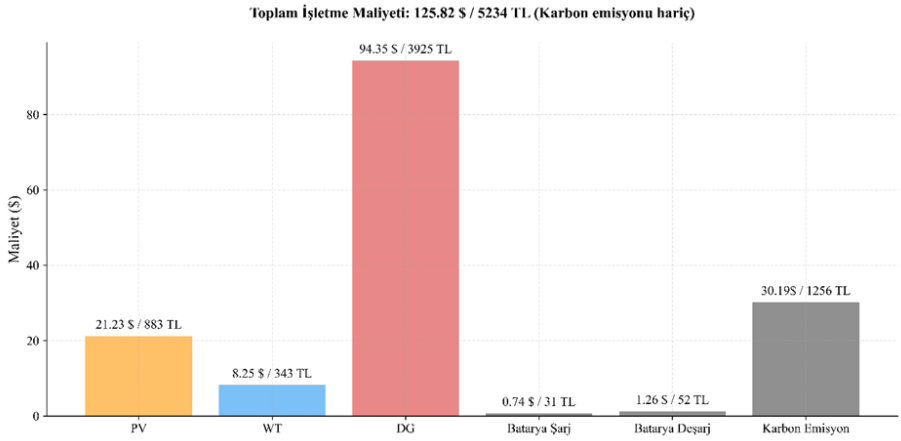
Şekil 18'e göre günlük konut yükünün %75'i yenilenebilir, %25'i DG tarafından karşılanmıştır. Yenilenebilir katkısındaki artış, yük profilinin gün ortası boyunca kesintisiz şekilde PV tarafından desteklenmesinden kaynaklanmaktadır. DG'nin yalnızca sınırlı bir zaman aralığında devreye girmesi, MG'nin kapasite artışıyla birlikte daha sürdürülebilir bir yapıya kavuştuğunu göstermektedir.



Şekil 18. Senaryo 2: Konut Yükü Kaynak Dağılımı

6.2.7. İşletme maliyeti

Şekil 19'da görülen 125,82 $ (5234 TL) günlük maliyet, Senaryo 1'e göre %7,5 oranında daha düşüktür. DG kullanım süresinin azalması, yakıt tüketiminde belirgin bir düşüş yaratmış ve işletme giderlerini aşağı çekmiştir. Yenilenebilir üretimdeki artışın ekonomik performansı doğrudan iyileştirmesi, MG'nin kapasite artışıyla birlikte maliyet açısından daha rekabetçi ve sürdürülebilir bir yapıya ulaştığını göstermektedir.



Şekil 19. Senaryo 2: Toplam İşletme Maliyeti

7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Ada modunda işletilen MG'lerde kritik, yarı kritik ve esnek yüklerin kesintisiz karşılanması; PV, WT, DG ve BESS bileşenlerinin koordineli enerji yönetimiyle mümkün olmuştur. Geliştirilen MILP tabanlı optimizasyon modeli, saatlik enerji dengesi, batarya dinamikleri ve DG operasyon kısıtlarını bütüncül biçimde ele alarak MG'nin ekonomik, Teknik ve çevresel performansını değerlendirmiştir. Bulgular, enerji kaynakları arasındaki senkronizasyonun sistem esnekliği, güvenilirliği ve sürdürülebilirliği üzerinde belirleyici bir rol oynadığını ortaya koymaktadır. Farklı üretim kapasitesi düzeyleri altında yürütülen optimizasyon analizleri, yenilenebilir enerji üretim oranının ve meteorolojik veri doğruluğunun sistem performansı üzerindeki etkisini açık biçimde ortaya koymuştur. Tablo 6, iki senaryonun temel performans göstergelerini özetlemekte ve yenilenebilir üretim artışının işletme maliyeti, emisyon ve DG bağımlılığı üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Tablo 6. Senaryolar Arasında Mikroşebeke Performans Göstergelerinin Karşılaştırılması

Gösterge	**Senaryo 1 (S1, %30 Kapasite)**	**Senaryo 2 (S2, Gerçek Veri, %100 Kapasite)**	**Açıklama**
Toplam PV Üretimi [kWh]	480	1061,27	PV üretimi S2'de yaklaşık 2,2 kat artmıştır.
Toplam WT Üretimi [kWh]	1035	549,75	Meteorolojik değişkenlik nedeniyle WT üretimi dalgalıdır.
Toplam DG Üretimi [kWh]	439,94	377,4	DG bağımlılığı %14,2 azalmıştır.

Batarya Şarj [kWh]	137,54	368,42	S2'de fazla üretim BESS'e etkin biçimde depolanmıştır.
Batarya Deşarj [kWh]	222,6	420	Akşam piklerinde yük dengelemede belirleyicidir.
Toplam İşletme Maliyeti [$ / TL]	136,05 $ / 5650 TL	125,82 $ / 5235 TL	Maliyet S2'de %7,5 azalmıştır.
Karbon Emisyonu [kg CO_2]	351,95	301,92	Emisyon %14,2 azalmıştır.
Kritik Yük Karşılama [%]	%100	%100	Hastane yükü kesintisiz karşılanmıştır.
Yarı Kritik Yük Karşılama [%]	%100	%100	Okul yükü tamamen karşılanmıştır.
Esnek Yük Karşılama [%]	%100	%100	Konut yükü BESS ve DG desteğiyle dengelenmiştir.

Senaryo 1'de sınırlı yenilenebilir kapasite nedeniyle DG devreye sıkça girmiş ve fosil yakıt bağımlılığı artmıştır. Buna karşılık, Senaryo 2'de artan PV ve WT üretimi sayesinde BESS çevrim verimliliği yükselmiş, DG kullanım süresi azalmış, toplam işletme maliyeti düşmüş ve karbon salımı önemli ölçüde azalmıştır. BESS, özellikle akşam saatlerindeki zirve yüklerinde sistem kararlılığını koruyan temel bileşen olmuştur. Senaryo 2'de artan şarj ve deşarj döngüleri, depolama kapasitesinin daha verimli kullanıldığını göstermektedir.

Gündüz saatlerinde PV üretim fazlasının depolanması, akşam döneminde DG'ye olan bağımlılığı azaltmış ve yük dengeleme esnekliğini artırmıştır. Bu sonuç, BESS kapasite planlamasının ada modunda enerji güvenliği için kritik bir unsur olduğunu ortaya koymaktadır. DG'nin yüksek yakıt maliyeti ve karbon yoğunluğu, sistemin toplam işletme maliyetini belirleyen temel faktör olmuştur. RES payının artmasıyla DG devreye girme süresi azalmış; bu da işletme maliyeti ve karbon salımında belirgin azalma sağlamıştır. Gerçek meteorolojik veriye dayalı modelleme, yenilenebilir üretimin daha doğru temsil edilmesini sağlayarak sistemin ekonomik ve çevresel performansını güçlendirmiştir. Böylece veri odaklı enerji yönetiminin ada modunda uygulanabilirliği kanıtlanmıştır.

Geliştirilen MILP tabanlı deterministik model, kritik yüklerin her koşulda karşılanmasını sağlayarak sistem güvenilirliğini garanti etmiştir. Batarya doluluk oranı (SOC) kısıtları ve DG minimum güç sınırlarının modele dahil edilmesi, EMS'nin operasyonel dayanıklılığını artırmıştır. Modelin farklı üretim profillerine kolaylıkla uyum sağlayabilmesi, MG'nin saatlik bazda optimum işletim stratejilerini belirlemesine olanak tanımıştır. Bu durum, önerilen yöntemi mühendislik uygulamalarında etkin bir karar destek aracı haline getirmektedir. Yenilenebilir enerji kapasitesinin artırılması, DG'ye bağımlılığı azaltarak karbon salımını ve yakıt

maliyetlerini düşürmekte, aynı zamanda enerji arz güvenliğini güçlendirmektedir. Ada modunda işletilen MG'ler, özellikle afet sonrası enerji arzı, izole bölge elektrifikasyonu ve kırsal kalkınma gibi alanlarda stratejik bir çözüm potansiyeli taşımaktadır. Bu çalışma, ulusal enerji politikalarında yenilenebilir entegrasyonun önceliklendirilmesinin teknik, ekonomik ve çevresel açıdan çok boyutlu faydalar sağladığını göstermektedir. Model, DG'nin rampa hızı, minimum çalışma süresi, BESS yaşlanma maliyeti, inverter ve hat kayıplarını kapsam dışı bırakmıştır. Ayrıca karbon emisyonu yalnızca CO_2 bileşeni üzerinden değerlendirilmiştir. Bu sınırlılıklar, mutlak sonuçları kısmen etkileyebilse de sistem davranışı ve senaryolar arası karşılaştırmalı eğilimler üzerinde belirleyici bir değişikliğe yol açmamaktadır.

Gelecekte yapılacak çalışmalarda, yüksek kapasiteli batarya sistemleri ve alternatif BESS teknolojileri (örneğin lityum-iyon veya akışkan bataryalar) ile EV entegrasyonunun MG performansına etkileri incelenmelidir. Uzun dönemli (mevsimsel ve yıllık) senaryo analizleri, sistem sürekliliği açısından önem arz etmektedir. Ayrıca hibrit optimizasyon algoritmaları ve gerçek zamanlı EMS uygulamalarıyla sistem esnekliği artırılabilir. Stokastik veya öngörü tabanlı modelleme yaklaşımlarının entegrasyonu, belirsizliklerin daha gerçekçi biçimde temsil edilmesini sağlayacaktır. MG projelerinin başarısı yalnızca teknik optimizasyona değil, aynı zamanda topluluk katılımı, finansal teşvik mekanizmaları ve kurumsal destek altyapısına bağlıdır. Yerel enerji kooperatiflerinin güçlendirilmesi, kamu desteklerinin artırılması ve yatırım politikalarının teşvik edilmesi, MG'nin uzun vadeli finansal sürdürülebilirliği açısından kritik öneme sahiptir. Senaryo 2'de elde edilen dizel DG bağımlılığındaki azalma ve batarya çevrim yoğunluğundaki artış, güncel literatürde raporlanan eğilimlerle paralellik göstermektedir. Çok aşamalı stokastik MILP yaklaşımlarını inceleyen Babatunde ve ark. (2025), yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonuna sahip MG'de enerji depolama birimlerinin etkin kullanımının şebeke veya dış kaynak bağımlılığını azalttığını ve işletme maliyetlerini düşürdüğünü ortaya koymuştur. Bu bulgu, çalışmamızın Senaryo 2 kapsamında gözlenen DG kullanımındaki azalma ve toplam işletme maliyetlerindeki düşüşle uyum içindedir.

Güvenilirlik kriterlerini (örneğin N-1 koşulu) ve rezerv gereksinimlerini dikkate alan MILP tabanlı modeller, BESS'in artırılmasının sistem kararlılığını güçlendirdiğini, BESS'in ise rezerv ve dengeleme amaçlı daha yoğun biçimde çalıştığını göstermektedir. Zelaschi ve ark. (2025) tarafından raporlanan bu bulgular, çalışmamızda gözlenen batarya çevrim yoğunluğundaki yükselişle teknik olarak örtüşmektedir. Artan RES kapasitesiyle birlikte bataryaların daha aktif biçimde kullanılması ve DG çalışma süresinin azalması, sistemin hem ekonomik hem de çevresel performansını iyileştiren bir eğilimdir. Elde edilen sonuçlar, literatürdeki stokastik operasyonel yaklaşımlar ile güvenilirlik odaklı MILP tasarım modellerinin vardığı genel yönelimlerle uyumlu bir mühendislik perspektifi sunmaktadır. Modelleme yaklaşımı bakımından bazı farklar bulunmaktadır. Babatunde ve ark. (2025) çalışması, belirsizlikleri temsil eden çok senaryolu stokastik MILP çerçevesi üzerine kuruludur; bizim çalışmamız ise deterministik MILP temelli operasyonel analiz yaklaşımıyla çözüm sağlamıştır. Bu farklılık, mutlak sonuç değerlerinde küçük sapmalara yol açabilse de eğilimsel benzerliği etkilememektedir. Analiz sonuçları, deterministik MILP yaklaşımının yüksek hesaplama verimliliği ve kararlılığı sayesinde ada modunda enerji sürekliliğinin güvenilir biçimde sağlanabileceğini doğrulanmıştır. Gerçek veriye dayalı tam kapasite üretim senaryosu, MG'nin işletme maliyetini %7,5,

karbon emisyonunu ise %14,2 oranında azaltmıştır. Toplam işletme maliyeti 136,05$'dan 125,82$'a (yaklaşık olarak 5650 TL'den 5235 TL'ye) düşerken, karbon salımı 351,95 kg CO_2'den 301,92 kg CO_2'ye gerilemiştir. DG'nin devreye girme süresi kısalmış, PV ve WT üretimindeki artış batarya çevrim yoğunluğunu yükseltmiş, böylece yük talebi büyük ölçüde yenilenebilir kaynaklar ve depolama sistemi tarafından karşılanmıştır. BESS, özellikle akşam saatlerindeki yük piklerinde enerji sürekliliğini sağlamış ve DG'nin devreye girme ihtiyacını azaltarak sistemin operasyonel esnekliğini artırmıştır. Bu durum hem yakıt tüketimini düşürmüş hem de DG'nin aşınma oranını azaltarak sistem ömrü açısından dolaylı bir ekonomik fayda yaratmıştır. Batarya ve DG entegrasyonu sayesinde kritik yüklerin kesintisiz karşılanması sağlanmış; sistemin operasyonel esnekliği artırılmıştır. Sonuç olarak, elde edilen bulgular MG yatırımlarının yalnızca teknik değil, aynı zamanda ekonomik, çevresel ve stratejik açılardan da sürdürülebilir enerji sistemlerinin geliştirilmesinde kilit rol oynadığını göstermektedir.

Yazarların Katkısı

Yazarların makaleye katkıları eşit orandadır.

Çıkar Çatışması Beyanı

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

KAYNAKÇA

Allwyn, R. G., Al-Hinai, A., & Margaret, V. (2023). A comprehensive review on energy management strategy of microgrids. *Energy Reports*, *9*, 5565-5591. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.360

Amar, A., & Yusupov, Z. (2025). Real-Time Capable MPC-Based Energy Management of Hybrid Microgrid. *Processes*, *13*(9), 2883. https://doi.org/10.3390/pr13092883

Arslan, G., Bayhan, B., & Yaman, K. (2019). Mersin / Türkiye için Ölçülen Global Güneş Işınımının Yapay Sinir Ağları ile Tahmin Edilmesi ve Yaygın Işınım Modelleri ile Karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, *7*(1), 80-96. https://doi.org/10.29109/gujsc.419473

Aslan, E., Beşli, N., & Gümüşçü, A. (2017). İnşaat Güneş Enerjisi Santrallerinin Akıllı Şebekelere Entegrasyonu. *Turkish Journal of Scientific Reviews*, *10*(2), 10-13.

Babatunde, O., Fasesin, K., Dosa, A., Ighravwe, D., Ogbemhe, J., & Olanrewaju, O. (2025). Multi-Stage Stochastic MILP Framework for Renewable Microgrid Dispatch Under High Renewable Penetration: Optimizing Variability and Uncertainty Management. *Applied Sciences*, *15*(19), 10303. https://doi.org/10.3390/app151910303

Bektaş, E., Bayındır, K. Ç., Terciyanlı, A., Tan, A., Canbolat, H., & Yılmaz, H. (2023). Mikro Şebekeler için Enerji Yönetimi ve Gerilim Kontrol Algoritmalarının Geliştirilmesi: Alçak Gerilim Seviyesinde Statik Voltaj Regülatörü Örneği. *Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik ve Tasarım Dergisi*, *5*(1), 31-54. https://doi.org/10.47898/ijeased.1247046

Çetinbaş, İ., Tamyürek, B., & Demirtaş, M. (2018). Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Kampüsünde Elektrik Tüketim Maliyetinin Azaltılmasına Yönelik FV Üretim ve Enerji Depolama Biriminden Oluşan bir Mikro Şebekenin Optimal Tasarımı. *EMO Bilimsel Dergi*, *8*(1), 33-38.

Esparza, A., Blondin, M., & Trovão, J. P. F. (2025). A Review of Optimization Strategies for Energy Management in Microgrids. *Energies*, *18*(13), 3245. https://doi.org/10.3390/en18133245

Eyimaya, S. E., & Altin, N. (2024). Review of Energy Management Systems in Microgrids. *Applied Sciences*, *14*(3), 1249. https://doi.org/10.3390/app14031249

Fei, M. (2025). Optimization of Microgrid Operation Control Strategy under New Energy Integration. *Journal of Electronic Research and Application*, *9*(4), 242-247. https://doi.org/10.26689/jera.v9i4.11461

Gbadega, P. A., & Sun, Y. (2022). A hybrid constrained Particle Swarm Optimization-Model Predictive Control (CPSO-MPC) algorithm for storage energy management optimization problem in micro-grid. *Energy Reports*, *8*, 692-708. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.10.035

Ghalavand, F., Al-Omari, I., Karegar, H. K., & Karimipour, H. (2018). Hybrid Islanding Detection for AC/DC Network Using DC-link Voltage. *2018 IEEE International Conference on Smart Energy Grid Engineering (SEGE)*, 216-221. https://doi.org/10.1109/SEGE.2018.8499479

IEA. (2019, Kasım 23). *Data – World Energy Outlook 2019 – Analysis*. IEA. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019/data

Issa, W. R., Abusara, M. A., & Sharkh, S. M. (2015). Control of Transient Power During Unintentional Islanding of Microgrids. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *30*(8), 4573-4584. https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2359792

Jiayi, H., Chuanwen, J., & Rong, X. (2008). A review on distributed energy resources and MicroGrid. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *12*(9), 2472-2483. https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.06.004

Khamis, A., Xu, Y., Dong, Z. Y., & Zhang, R. (2018). Faster Detection of Microgrid Islanding Events Using an Adaptive Ensemble Classifier. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *9*(3), 1889-1899. https://doi.org/10.1109/TSG.2016.2601656

Malekpour, A. R., & Niknam, T. (2011). A probabilistic multi-objective daily Volt/Var control at distribution networks including renewable energy sources. *Energy*, *36*(5), 3477-3488.

Mohamed, M. A. E., Mahmoud, A. M., Saied, E. M. M., & Hadi, H. A. (2024). Hybrid cheetah particle swarm optimization based optimal hierarchical control of multiple microgrids. *Scientific Reports*, *14*(1), 9313. https://doi.org/10.1038/s41598-024-59287-x

Mquqwana, M. A., & Krishnamurthy, S. (2024). Particle Swarm Optimization for an Optimal Hybrid Renewable Energy Microgrid System under Uncertainty. *Energies*, *17*(2), 1-21.

Ramakrishna, G., & Rao, N. D. (1999). Adaptive neuro-fuzzy inference system for volt/var control in distribution systems. *Electric Power Systems Research*, *49*(2), 87-97. https://doi.org/10.1016/S0378-7796(98)00073-X

Ramenah, H., Khoodaruth, A., Oree, V., Coya, Z., Murdan, A., Bessafi, M., & Doseeah, D. (2023). Johansen model for photovoltaic a very short term prediction to electrical power grids in the Island of Mauritius. *Clean Technologies and Recycling*, *3*(2), 107-118. https://doi.org/10.3934/ctr.2023007

Renewables.ninja. (t.y.). *Renewables.ninja*. Geliş tarihi 09 Ekim 2025, gönderen https://www.renewables.ninja/

Shrivastav, A. K., & Dutta, S. (2025). Multi-objective optimization of hybrid microgrid for energy trilemma goals using slime mould algorithm. *Scientific Reports*, *15*(1), 29242. https://doi.org/10.1038/s41598-025-15207-1

Thorp, J. S., Ilic-Spong, M., & Varghese, M. (1986). An optimal secondary voltage-VAR control technique. *Automatica*, *22*(2), 217-221. https://doi.org/10.1016/0005-1098(86)90083-X

Tür, M. R., & Yaprdakdal, F. (2020). Yenilenebilir Enerji Kaynaklarına Dayalı Bir Sistemde Güç Kalitesi Analizi, Kontrolü ve İzlemesi. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, *8*(3), 572-587. https://doi.org/10.29109/gujsc.722014

Wang, J., Li, K.-J., Liang, Y., & Javid, Z. (2021). Optimization of Multi-Energy Microgrid Operation in the Presence of PV, Heterogeneous Energy Storage and Integrated Demand Response. *Applied Sciences*, *11*(3), 1005. https://doi.org/10.3390/app11031005

Worku, M. Y., Hassan, M. A., & Abido, M. A. (2019). Real Time Energy Management and Control of Renewable Energy based Microgrid in Grid Connected and Island Modes. *Energies*, *12*(2), 276. https://doi.org/10.3390/en12020276

Worku, M. Y., Hassan, M. A., & Abido, M. A. (2020). Real Time-Based under Frequency Control and Energy Management of Microgrids. *Electronics*, *9*(9), 1487. https://doi.org/10.3390/electronics9091487

Xiao, G., Zhang, M., Huang, W., Mo, Z., Xie, H., & Tang, X. (2025). A data-driven hybrid robust optimization approach for microgrid operators in the energy reserve market considering different wind power producers' strategies. *Applied Energy*, *386*(C). https://ideas.repec.org//a/eee/appene/v386y2025ics0306261925002946.html

Xu, T., Meng, X., Zheng, F., Zhang, Y., Wu, X., & Li, M. (2025). Multi-objective operation optimization method of microgrid considering the influence of electric vehicle. *Scientific Reports*, *15*(1), 20416. https://doi.org/10.1038/s41598-025-01083-2

Yaghoubi, E., Yaghoubi, E., Maghami, M. R., Rahebi, J., Zareian Jahromi, M., Ghadami (Melisa Rahebi), R., & Yusupov, Z. (2025). A Systematic Review and Meta-Analysis of Model Predictive Control in Microgrids: Moving Beyond Traditional Methods. *Processes*, *13*(7), 2197. https://doi.org/10.3390/pr13072197

Zelaschi, A., Pliotti, L., Betti, G., Tonno, G., Sgrò, D., & Martelli, E. (2025). An effective MILP model for the optimal design of microgrids with high-reliability requirements. *Applied Energy*, *383*, 125359. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125359

Zhang, H., Ma, Y., Yuan, K., Khayatnezhad, M., & Ghadimi, N. (2024). Efficient design of energy microgrid management system: A promoted Remora optimization algorithm-based approach. *Heliyon*, *10*(1). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e23394