

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANOŞEBEKELERİN OPTİMAL KONTROLÜ
VE GÜÇ PAYLAŞIMI

Onur TURAN

DOKTORA TEZİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Danışman

Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Eş Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU

Aralık, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

NANOŞEBEKELERİN OPTİMAL KONTROLÜ
VE GÜÇ PAYLAŞIMI

Onur TURAN tarafından hazırlanan tez çalışması 25.12.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, Elektrik Tesisleri Programı **DOKTORA TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Recep YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU
Yıldız Teknik Üniversitesi
Eş-Danışman

Jüri Üyeleri

Doç. Dr. Recep YUMURTACI, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mehmet BAYRAK, Üye
Sakarya Üniversitesi

Doç. Dr. Bedri KEKEZOĞLU, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Kürşat AYAN, Üye
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

Dr. Öğr. Üyesi Ramazan AYAZ, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Danışmanım Doç. Dr. Recep YUMURTACI sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “Nanoşebekelerin Optimal Kontrolü ve Güç Paylaşımı” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Onur TURAN



Çok Değerli Aileme...

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasında küçük güçlü, müstakil bir elektrik şebekesi olarak adlandırılan “nanoşebeke” konusu üzerinde derinlemesine sentezler yaparak literatüre katkılar sunulmuştur. Tekno-ekonomik analizlerin yanında bu küçük güçlü elektrik şebekesinin literatürdeki konumu derinlemesine araştırılmış, kurduğumuz optimizasyon modeli ile p2p enerji alışverişi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca bu sistemlerde kritik öneme sahip enerji depolama unsurları için sezgisel algoritmalar kullanılarak boyutlandırma çalışmaları yapılmıştır. Bu doktora çalışması sürecinde karşılaştığım zorluklar ve öğrendiğim değerli bilgiler hayatım boyunca bana yol gösterici olacaktır.

Bu tez çalışmasının gerçekleştirilmesinde en baştan literatürün gittiği yön bağlamında katkılarını sunan, ihtiyaç duyduğumda kilit dokunuşlar yaparak tezin gelişmesini sağlayan eş danışman hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Ali DURUSU’ya, kendisinden çok değerli bilgiler edindiğim tez danışmanım, Sayın Doç. Dr. Recep YUMURTACI’ya en derin teşekkürlerimi sunuyorum. Sağladıkları değerli katkıları her zaman hatırlayacağım.

Doktora öğrenimim boyunca kendilerinden çok değerli bilgiler öğrendiğim Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü hocalarımdan hepsine en içten duygularla teşekkürlerimi sunarım.

Desteklerini tüm hayatım boyunca hissettiğim, varlıklarıyla bana güç veren kıymetli anne ve babama en kalbi duygularım ile teşekkür ediyorum.

Son olarak; sabır ve anlayışlarıyla beni destekleyen, kendilerinden zaman zaman uzak kalarak ve genelde onların vakitlerinden çalarak ortaya çıkarabildiğim bu tez çalışması için değerli eşim Elif ve oğlum Göktuğ’a minnettarım. Her şey onlar içindi.

Onur TURAN

İÇİNDEKİLER

SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
HARİTA LİSTESİ	xii
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti.....	3
1.2 Nanoşebeke Karakteristiği.....	6
1.3 Çalışmanın Amacı ve Motivasyon.....	8
2 NANOŞEBEKELERİN ÜRETİM DAĞITIM KONTROL VE UYGULAMA DİNAMİKLERİ	11
2.1 NG Yapılarının Elektrik Üretimi ve Dağıtımı	13
2.2 Nanoşebekelerde Dönüştürücüler ve NG Kontrolü	16
2.3 Nanoşebeke Uygulamalarının Arkasındaki Motivasyonel Etki.....	20
2.4 Nanoşebeke Uygulamaları	22
3 NANOŞEBEKE TEKNOLOJİLERİNİN TÜRKİYE’DEKİ POTANSİYELİ-TEKNOEKONOMİK ANALİZLER VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ	28
3.1 Sunulan NG Sistemleri ve Literatürdeki HYES Çalışmaları.....	30
3.1.1 Sunulan Sistemler	30
3.1.2 Homer Parametreleri ve Sistemlerin Arka Planı.....	34
3.1.3 Sıcaklık Rüzgar ve Işınım Verileri.....	36
3.1.4 Sistemlerin Matematiksel Arkaplanı ve Optimizasyon Metodolojisi.....	40
3.1.5 Optimizasyon Metodolojisi.....	45
3.1.6 Yük Profilleri	46
3.1.7 Çalışılan NG Sistemleri İçin Optimal Sonuçlar	51
3.1.8 Optimal NG Sistemleri İçin Duyarlılık Analizleri.....	55

4 GWO – ABC ve PSO ALGORİTMALARIYLA BİR NANOŞEBEKENİN BESS KAPASİTE OPTİMİZASYONU	60
4.1 Gri Kurt Optimizasyon Algoritması	61
4.2 Yapay Arı Kolonisi Optimizasyon Algoritması	68
4.3 Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması.....	73
5 NANOŞEBEKELER ARASI (p2p) OPTİMAL ENERJİ TRANSFERİNİN MODELLENMESİ	78
5.1 Optimizasyon Modelinin Matematiksel Altyapısı	81
5.2 Test ve Sonuçlar.....	88
5.2.1 Giriş Verileri	89
5.2.2 Sonuçlar	91
6 SONUÇ	94
KAYNAKÇA	100
EK KODLAMALAR	116
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	118

SİMGE LİSTESİ

$\tau_{bess,chr}$	BESS'in saat cinsinden şarj süresi
C_{conv}	Dönüştürücü Gücü
D_f	Eskime Faktörü
f	Enflasyon Oranı
g_{best}	Global Optimum
p_{best}	Lokal Optimum
P_{mec}	Mekanik Rüzgar Gücü
i, t, l	Nanoşebeke ve Zaman Kümeleri
ω	Parçacıkların Atalet Momenti
$C_{1,2}$	PSO Sabiti
Y_{pv}	PV dizisi çıkış gücü
C_{opex}	Sistemin İşletme Maliyeti
$G_{T,stc}$	Standart Test Koşulları Altında Gelen Güneş Işınımı
$T_{c,stc}$	Standart Test Koşulları Altında Hücre Sıcaklığı
η	Verimlilik
M	Yeteri Kadar Büyük Bir Sayı
Δ_t	Zaman Çözünürlüğü

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif Akım
BESS	Bataryalı Enerji Depolama Sistemi
CONV	Dönüştürücü
DC	Doğru Akım
DÜ	Dağıtık Üretim
EMS	Enerji Yönetim Sistemi
EV	Elektrikli Araç
EVCS	Elektrikli Araç Şarj İstasyonu
GHG	Sera Gazı
HYES	Hibrit Yenilenebilir Enerji Sitemi
IEA	Uluslararası Enerji Ajansı
IRENA	Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı
LCOE	Seviyelendirilmiş Enerji Maliyeti
MG	Mikroşebeke
MILP	Karmaşık Tamsayılı Lineer Programlama
NG	Nanoşebeke
NPC	Net Şimdiği Değer
PV	Fotovoltaik
P2p	Uçtan uca
SOC	Şarj Durumu
YE	Yenilenebilir Enerji
YEK	Yenilenebilir Enerji Kaynağı
WT	Rüzgar Türbini

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1	Akıllı, mini, mikro ve nanoşebeke yapıları.....	5
Şekil 1.2	Net sıfır salınım yolunda küresel boyutta santral kurulum hedefleri....	7
Şekil 2.1	Küresel ölçekte düşük kapasiteli yenilenebilir kaynakların oranı	12
Şekil 2.2	DC ve AC nanoşebeke yapıları.....	13
Şekil 2.3	Geniştirilmiş NG yapısı.....	14
Şekil 2.4	Küme NG yapısı	15
Şekil 2.5	NG’lerden oluşturulan bir MG yapısı	15
Şekil 2.6	Nanoşebeke kontrol ve yönetim platformu (NG_CaMP) ile Hibrit Nanoşebekenin Fiziksel ve Yapısal Konfigürasyonu	17
Şekil 2.7	Evsel uygulamalar için hibrit NG gösterimi	18
Şekil 2.8	Solar pv ve bess ile oluşturulan NG uygulaması	23
Şekil 3.1	Sunulan NG yapılarının konumları ve çatı tiplerinin gösterimi.....	31
Şekil 3.2	Sunulan NG yapılarının konumları	32
Şekil 3.3	Sunulan optimizasyon çalışmasının akış diagramı	35
Şekil 3.4	Güneş ışınlımı ve açıklık indeksi değerleri.....	36
Şekil 3.5	NG1 ve NG2 için ortalama rüzgar hızı değerleri	37
Şekil 3.6	NG1 ve NG2 için ortalama güneşlenme süreleri	37
Şekil 3.7	NG1 ve NG2 için çalışılan durumların gösterimi	39
Şekil 3.8	NG3 - NG4 – NG5 - NG6 için çalışılan NG yapısı	40
Şekil 3.9	NG1 yük profili.....	48
Şekil 3.10	NG2 toplam yük profili.....	50
Şekil 3.11	NG1 optimal konfigürasyon sonuçları	53
Şekil 3.12	NG2 optimal konfigürasyon sonuçları	55
Şekil 3.13	NG1 optimal konfigürasyonu üzerinde enflasyon etkisi.....	56
Şekil 3.14	NG2 optimal konfigürasyonu üzerinde enflasyon etkisi.....	58
Şekil 4.1	Gri kurtların hiyerarşik düzeni.....	61
Şekil 4.2	Alfa, beta ve delta kurtların ava göre konumu.....	63
Şekil 4.3	GWO algoritması sözde kodu	64
Şekil 4.4	GWO – ABC – PSO ile sistemleri için yük profili.....	65

Şekil 4.5	GWO optimizasyon sisteminin akış diagramı	67
Şekil 4.6	GWO optimizasyon sonucu	67
Şekil 4.7	ABC algoritmasında arıların besin toplama davranışının tasviri	68
Şekil 4.8	ABC algoritması sözde kodu	70
Şekil 4.9	ABC optimizasyon sisteminin akış diagramı.....	72
Şekil 4.10	ABC optimizasyon sonucu	72
Şekil 4.11	PSO algoritması içinde parçacıkların hareketi.....	74
Şekil 4.12	PSO algoritması sözde kodu	74
Şekil 4.13	PSO optimizasyon sisteminin akış diagramı.....	76
Şekil 4.14	PSO optimizasyon sonucu	76
Şekil 5.1	Önerilen p2p modelinin genel şeması.....	80
Şekil 5.2	Önerilen modelinin akış diyagramı.....	81
Şekil 5.3	Önerilen modelin sonuçları.....	91
Şekil 5.4	Esnek modelin sonuçları	92

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Temel bir NG'in elektriksel enerji akış durumu	24
Tablo 3.1	Türkiye ve diğer ülkelerde son yıllarda yapılan HYES ve NG çalışmaları	33
Tablo 3.2	Verilen konumların meteorolojik verileri	38
Tablo 3.3	Verilen konumların aylık ortalama güneşlenme verileri	39
Tablo 3.4	NG1 için elektriksel yükler	47
Tablo 3.5	NG2 için elektriksel yükler	49
Tablo 3.6	NG3 NG4 NG5 ve NG6 için elektriksel yükler.....	51
Tablo 3.7	NG1 için bütün vaka çalışmalarında optimal sonuçlar	52
Tablo 3.8	NG2 için bütün vaka çalışmalarında optimal sonuçlar	54
Tablo 3.9	NG1 optimal konfigürasyonu üzerinde tarife fiyat artışı etkisi	57
Tablo 3.10	NG2 optimal konfigürasyonu üzerinde tarife fiyat artışı etkisi	58
Tablo 3.11	Türkiye'nin farklı bölgeleri için optimal NG konfigürasyonları	59
Tablo 5.1	Modellenen optimizasyon problemi için adlar dizgesi	82
Tablo 5.2	Modellenen NG kümesinin parametrik verileri	89

HARİTA LİSTESİ

Harita 1.1 WOS veritabanına göre yapılan yayınların anahtar kelimelerinin dağılımı ve yoğunluğu	4
Harita 1.2 WOS veritabanına göre yapılan yayınların konumları	4



Nanoşebekelerin Optimal Kontrolü ve Güç Paylaşımı

Onur TURAN

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programı

Doktora Tezi

Danışman: Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Eş-Danışman: Dr. Öğr. Üy. Ali DURUSU

Bu tez, nanoşebekelerin dağıtık enerji sistemlerindeki rolünü ve enerji yönetim stratejilerinin optimize edilmesini kapsamlı bir şekilde ele almaktadır. Nanoşebekeler, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin kullanımını sağlayan, enterkonnekte şebeke ile etkileşimi olan ve yerel enerji ihtiyaçlarını ihtiyacın bulunduğu yerde karşılama kabiliyeti olan küçük ölçekli enerji sistemleridir. Çalışmada, özellikle uçtan uca (p2p) enerji transferi stratejileriyle nanoşebekeler arası enerji akışının optimize edilmesi, enerji depolama sistemlerinin boyutlandırılması ve tekno-ekonomik analizler yapılmıştır.

Türkiye'nin farklı bölgelerinde yapılan analizlerde, coğrafi ve iklimsel faktörlere bağlı olarak yenilenebilir enerji potansiyeli değerlendirilmiş, farklı senaryolar üzerinden nanoşebekelerin ekonomik ve teknik uygulanabilirliği incelenmiştir. Enerji üretim kapasitesi, maliyetler ve depolama ihtiyaçlarına odaklanılarak, ilk yatırımın geri dönüş süresinin ne kadar sürede olabileceği ve diğer ekonomik indisler değerlendirilmiştir. Ayrıca, sezgisel algoritmalar kullanılarak enerji depolama sistemlerinin boyutlandırılması gerçekleştirilmiş ve şebekeden alınan enerjinin minimize edilmesi sağlanmıştır. Uçtan uca enerji transferine odaklanan

modelleme çalışmasında, beş farklı nanoşebeke arasında enerji alışverişi optimize edilmiş, enerji fazlası olan sistemlerden enerji açığı olan sistemlere transfer gerçekleştirilmiştir. Böylece şebekeden bir bütün olarak alınan enerji miktarı azaltılmış ve yerel enerji üretimi maksimize edilmiştir. Geliştirilen model, Gurobi optimizasyon yazılımı kullanılarak çözölmüş, enerji depolama sistemleriyle şebeke etkileşimleri incelenmiştir.

Sonuç olarak, nanoşebekelerin yenilenebilir enerji entegrasyonu ve enerji maliyetlerini optimize etme potansiyeli ortaya konmuş, p2p enerji transferinin dağıtık enerji yönetimindeki önemi vurgulanmıştır. Türkiye'ye özgü analizler, bu sistemlerin farklı bölgelerdeki uygulanabilirliğini ve sürdürülebilir enerji geleceğine katkılarını göstermiştir. Tez, nanoşebekelerin enerji politikalarına entegre edilmesi gerektiğini ve enerji verimliliği ile sürdürülebilirlik açısından kritik bir role sahip olduğunu vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Nanoşebeke, dağıtık enerji üretimi, p2p enerji paylaşımı

ABSTRACT

Optimal Control and Power Sharing of Nanogrids

Onur TURAN

Department of Electrical Engineering

Doctor of Philosophy Thesis

Supervisor: Assoc. Prof Dr. Recep YUMURTACI

Co-supervisor: Asist. Prof. Dr. Ali DURUSU

This thesis comprehensively examines the role of nanogrids in distributed energy systems and the optimization of energy management strategies within nanogrids. Nanogrids are small-scale energy systems designed to utilize renewable energy sources efficiently, interact with interconnected grids, and meet local energy demands at the point of consumption. The study focuses on optimizing energy flows between nanogrids through peer-to-peer (p2p) energy transfer strategies, sizing energy storage systems, and conducting techno-economic analyses.

Analyses conducted for different regions of Türkiye assessed renewable energy potential based on geographical and climatic factors. Economic and technical feasibility of nanogrids was evaluated under various scenarios, focusing on energy production capacity, costs, and storage requirements. Key economic indicators, such as payback periods of initial investments, were also considered. Moreover, heuristic algorithms were employed to size energy storage systems, minimizing energy drawn from the grid. The modeling study emphasized p2p energy transfer, optimizing energy exchanges among five distinct nanogrids. Energy surpluses from

some systems were transferred to others with deficits, reducing overall reliance on the grid and maximizing local energy production. The developed model was solved using Gurobi optimization software, exploring interactions between energy storage systems and the grid.

In conclusion, the potential of nanogrids to integrate renewable energy and optimize energy costs was demonstrated, highlighting the significance of p2p energy transfer in distributed energy management. Region-specific analyses for Turkey revealed the applicability of nanogrid systems across diverse areas and their contributions to a sustainable energy future. The findings underline the necessity of incorporating nanogrids into energy policies, emphasizing their critical role in enhancing energy efficiency and sustainability.

Keywords: Nanogrid, distributed energy generation, p2p energy sharing

1 GİRİŞ

Geleneksel elektrik şebekesi, alternatif akım (AC) iletimi üzerine kurulmuş olup, enerji santralleri ile son kullanıcılar arasındaki uzun mesafeler nedeniyle bazı zorluklarla karşı karşıyadır. Bu zorlukların başında, iletim hatlarının direnci nedeniyle yaşanan enerji kayıpları gelir. Uzun mesafelerde enerji iletilirken önemli miktarda kayıp meydana gelir ve bu da verimliliği düşürür. Ayrıca, iletim ve dağıtım altyapısının inşası, bakımı ve yenilenmesi her ne kadar teknolojik gelişmeler paralelinde düşme eğiliminde olsa da yüksek maliyetlidir. Diğer taraftan enerji talebinin anlık değişimlerine hızlı bir şekilde cevap verme gereksinimi talep ve arz arasında uyumsuzluklar oluşturabilmektedir. Uzun mesafeli elektrik iletimi yapan geleneksel elektrik şebekesi, arızalar ya da doğal afetler nedeniyle geniş çaplı enerji kesintilerine açık olup, merkezi bir yapıya sahip oldukları için kararlılık sorunları yaşayabilmektedir. Yük dengesizlikleri ve frekans sapmaları da, özellikle uzun mesafelerde daha belirgin hale gelir ve şebekenin genel güvenilirliğini etkiler. Anlık iletim gerektiren AC güç, transformatörler, direkler, seksiyoner ve kesicilerle birlikte birçok şalt malzemesini içeren karmaşık bir altyapı kullandığı bilinmektedir. Bu uzun mesafelerle birbirine bağlı enterkonnekte sistem sürdürülebilirlik, kararlılık ve güvenilirliği etkileyen kısıtlamaları beraberinde getirmektedir. Fosil yakıtlarla çalışan geleneksel şebeke generatörleri, emisyonlar yoluyla iklim değişikliğine önemli ölçüde katkıda bulunur. Uzun mesafelerdeki iletim, aktif güç kayıplarına ve verimsizliklere yol açar. Teknolojik gelişmelere rağmen geleneksel şebeke; teknik, ekonomik ve çevresel sınırlarına ulaştığı söylenebilmektedir [1-6]. Bu bahsedilen merkezi elektrik şebekesinin kısıtlamalarını aşmak için birbirini tamamlayan mikroşebeke (MG) ve nanoşebeke (NG) gibi alternatif yapılar ortaya çıkmıştır. Nanoşebekeler, tüketim noktasında veya yakınında kilowatt (kW) ölçeğinde elektrik üretimi sağlayan dağıtık elektrik

enerjisi üretim birimidir. Başlangıçta küçük, izole ve yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanan bir elektrik şebekesi olarak tasarlanan NG, merkezi elektrik şebekesinin eksikliklerini giderme noktasında enterkonnekte sisteme pozitif katkı sunacağı açıktır. NG'nin temel taşlarından biri olan dağıtık üretim, güneş ve rüzgar enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelerek geleneksel enerji santrallerine kıyasla maliyet etkin alternatifler sunmaktadır. Bu kavram, aynı zamanda kojenerasyon ve mikro türbin gibi teknolojileri de içermekte olup özellikle endüstri ve işletmelerin elektrik ihtiyaçlarına cevap verebilmektedir [7-11]. Özünde NG, merkezi olmayan elektrik enerjisi üretiminden yararlanarak güç sisteminin sürekli değişen yapısında verimliliği ve sürdürülebilirliği artırmayı hedefleyen yenilikçi bir yaklaşımdır. Dağıtık üretim (DÜ); esneklik, güvenilirlik ve sürdürülebilir enerji kullanımını beraberinde getirir. Güneş ve rüzgar enerjisi gibi kaynakları kullanan DÜ sistemleri, hava koşullarındaki değişimlerden dolayı dalgalanan elektrik çıktısı verebilir [12-13]. Ayrıca, NG yapısı içinde hem enerji üreten hem de tüketen "prosumer" (üreten tüketici) kavramının tanıtılması, bu enerji paradigmasına değerli bir boyut kazandırmaktadır.

NG yapıları, yalnızca enerji üretimini ve dağıtımını etkin bir şekilde optimize etmekle kalmaz, aynı zamanda yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu sağlayarak enerji sistemlerinin verimliliğini ve dayanıklılığını önemli ölçüde artırır. Özellikle merkezi elektrik şebekelerine duyulan bağımlılığı azaltma potansiyeline sahip olan NG, yerel düzeyde enerji üretimi ile tüketim arasında daha güçlü bir ilişki kurar ve bu sayede enerji arzında sürdürülebilirlik ve güvenilirlik sağlayabilmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, özellikle güneş ve rüzgar enerjisi NG'lerin temel bileşenleri olarak öne çıkmakta olup enerji üretiminde ortaya çıkabilecek olumsuz çevresel etkileri azaltırken, enerji üretim maliyetlerini düşürmeye ve elektrik iletimi sırasında yaşanan kayıpları en aza indirmeye olanak tanır. Bunun yanında, NG'lerin enerji depolama teknolojileri ile desteklenmesi, enerji arz-talep dengesizliklerinin yönetilmesini kolaylaştırarak sistemin esnekliğini artırır. Enerji depolama çözümleri, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının doğası gereği dalgalı üretim yapısına sahip olması durumunda, fazla enerjinin depolanarak daha sonra kullanılmasına olanak tanır ve böylece arz sürekliliği garanti altına alınmış olur. Ayrıca, üreten tüketici kavramı enerji sistemlerinde devrim niteliğinde bir değişimi temsil edebileceği değerlendirilmektedir. Bu kavram, bireylerin veya işletmelerin sadece enerji tüketicisi olmanın ötesine

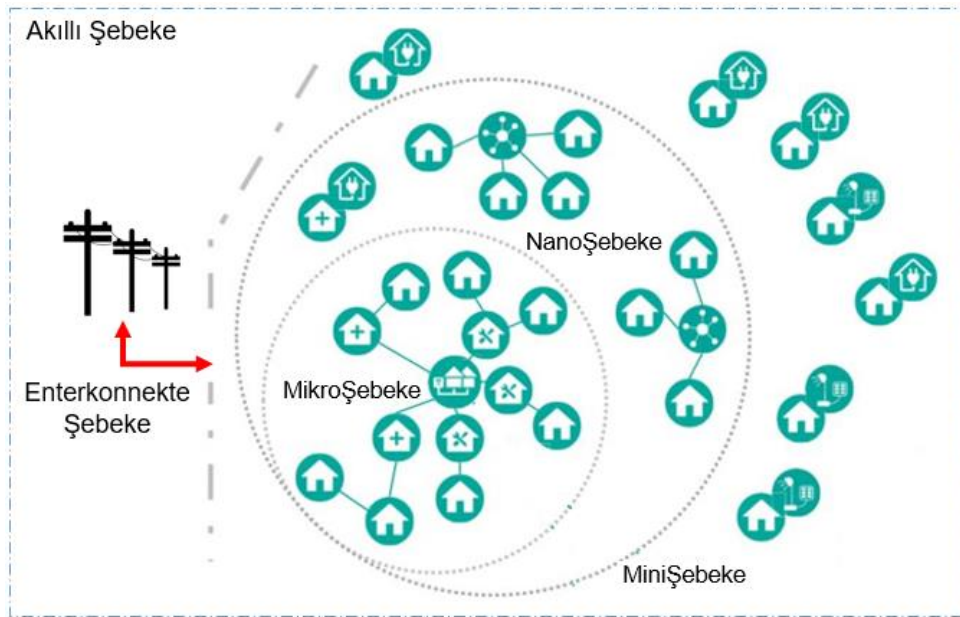
geçerek, aynı zamanda çok küçük bir güç ile bile olsa enerji üreticisi olarak da aktif bir rol almasını mümkün kılar. Prosumer'lar, kendi ürettikleri enerjiyi ihtiyaç fazlası olduğunda şebekeye geri satarak enerji piyasasına katkıda bulunabilirler. Bu, enerji yönetimini yerel düzeyde daha otonom hale getirirken, merkezi elektrik şebekesinin yükünü de hafifletebilir. Aynı zamanda, enerji ticaretinin yerel düzeyde gerçekleşmesi, şebeke üzerinde yük dengeleme ve enerji arz-talep uyumunu sağlama açısından önemli avantajlar sunar.

NG sistemlerinin gelişimi ve yaygınlaşması, elektrik enerji sisteminin geleceğinde kritik bir rol oynayabileceği değerlendirilmektedir. Artan enerji taleplerini karşılamada sürdürülebilir çözümler sunan bu sistem, esnek yapısı ve kolay kurulumu sayesinde geleneksel merkezi şebekenin sınırlamalarını aşarak enerji altyapılarının daha güvenilir ve verimli hale gelmesine katkıda bulunabilecektir. İklim değişikliği ile mücadelede de önemli bir araç olarak görülen temiz elektrik enerjisi üretimi NG'lerin karbon ayak izini azaltma potansiyeli ile birlikte, enerji üretim ve tüketim süreçlerinin daha temiz ve çevre dostu bir yapıya dönüşmesine zemin hazırlayabilecektir.

1.1 Literatür Özeti

Mevcut enterkonnekte sistem, uzun mesafelerde enerji iletimi sırasında ortaya çıkan verimlilik kayıpları, yüksek altyapı maliyetleri ve arz-talep dengesizlikleri gibi birçok zorlukla karşı karşıyadır. Bu sınırlamaları aşmak için nanoşebekeler gibi dağıtık enerji üretim sistemleri önemli bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. NG'ler, yenilenebilir enerji kaynaklarını ve enerji depolama çözümlerini entegre ederek, yerel düzeyde daha esnek ve sürdürülebilir bir enerji yönetimi sunmaktadır. Literatürde bu sistemlerin, merkezi elektrik şebekesine duyulan bağımlılığı azaltma, enerji güvenliğini artırma ve karbon ayak izini düşürme potansiyelleri üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır. Bu bölümde, NG yapılarının avantajları ve enerji sistemlerine katkılarına odaklanan çalışmalar incelenerek, bu teknolojinin gelecekteki rolü ve gelişimi hakkında mevcut literatür özetlenecektir. Bu tezin yazıldığı tarih itibarıyla WOS veritabanında; mühendislik, enerji vb. gibi NG konseptini içine alan alanlarda 269 adet yayımlanmış makale çalışması bulunduğu tespit edilmiştir. Bu makalelerin her biri incelenmiş literature katkıları bakımından irdelenmiştir. Aşağıda verilen Harita 1 ile WOS veritabanında bulunan nanoşebeke

literatüre ilk olarak 2003 yılında sunulmuştur [8]. Yapılan ilk çalışmalarda 20 kW'dan küçük ölçekli, doğru akımla (DC) çalışan, kısa mesafelerde ve yerel elektrik iletimi yapan, hem üreten hemde tüketen bileşenlere sahip yerel bir elektrik şebekesi olarak adlandırılmaktadır. Prensip olarak bir NG ile MG benzer bir yapıya sahiptir fakat NG çok daha küçük alana yayılmaktadır (örneğin, tek bir bina) ve daha düşük bir kapasiteye sahiptir. Nanoşebekeler, genellikle tek bir yükü beslemek, tek bir elektriksel gereksinimi karşılamak amacıyla tasarlanmıştır. Örneğin, bir hastane kampüsündeki ameliyathane binası ya da bir üniversite kampüsündeki laboratuvar gibi kritik operasyonlar NG olarak yapılandırılabilir. Nanoşebekelerin uygulanması, mikroşebekelere kıyasla daha az teknolojik zorluk barındırmaktadır. Özellikle tek bina, ofis veya benzin istasyonu vb. seviyesinde güneş enerjisi ve depolama sistemlerinin kullanımının artmasıyla birlikte nanoşebekeler, akıllı şebeke teknolojisinin ekonomik avantajları artırma, sürdürülebilirliği sağlama, güvenilirliği ve dayanıklılığı geliştirme hedeflerini karşılayarak zaman içinde yaygınlaşmaktadır [16-17]. DÜ kavramının literatürde yer almasıyla birlikte, bu yapının kontrolünü sağlayabilen akıllı şebeke (smartgrid), birbirine bağlı DÜ'lerden oluşan ve bir bölgenin elektrik ihtiyacını karşılamak üzere tasarlanan MG birimleri ile üreten tüketici kavramı doğrultusunda geliştirilen NG konsepti ortaya çıkmıştır. Bu yapılar birbirleriyle entegre bir sistem olarak çalışabilme potansiyeline sahip olup, Şekil 1'de gösterildiği gibi iç içe bir yapı oluşturduğu söylenebilmektedir.



Şekil 1.1 Akıllı, mini, mikro ve nanoşebeke yapıları

İlk NG çalışmalarında NG ve MG yapıları iç içe geçmiş olsa da [7-8,18-20] daha yeni araştırmalar NG'yi bağımsız bir sistem olarak ele almıştır. Mevcut çalışmalar, NG'nin kontrolü, güç ve enerji yönetimi ve şebeke yapısı gibi çeşitli yönlerine odaklanmıştır. NG, araştırmacıların ilgisini çeken ve gelişime açık yeni bir konu olduğu değerlendirilmektedir.

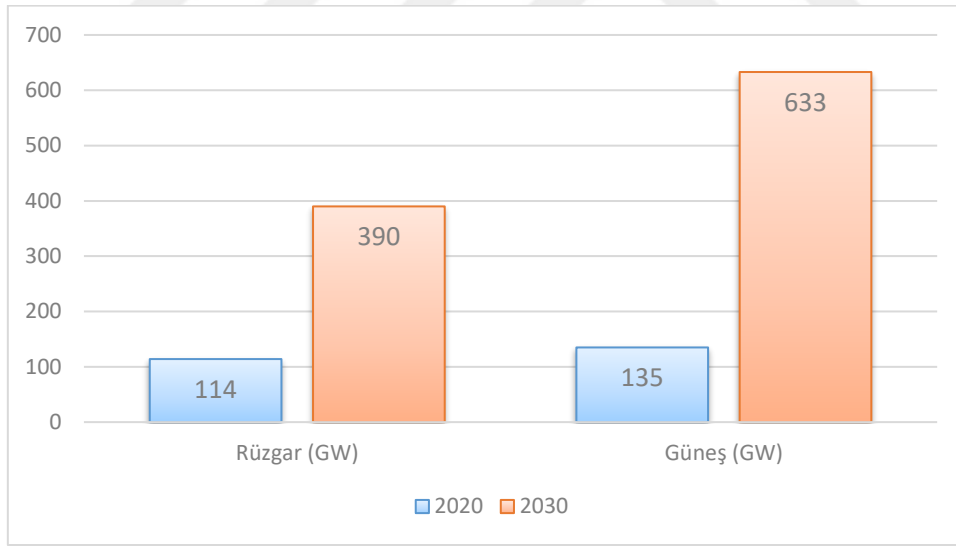
1.2 Nanoşebeke Karakteristiği

Nanoşebekeler genellikle bir enerji depolama birimi kullanan ve yenilenebilir enerji kaynakları aracılığıyla elektrik üretimi sağlayan, evlerin, ofislerin, binaların veya küçük yerel yüklerin elektrik enerjisi ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla oluşturulmuş bir enerji üretim ve dağıtım sistemidir [21-22]. NG yapıları, beslenecek yükün doğasına bağlı olarak AC/DC veya hibrit olarak kurulabilir ve şebekeye bağlı (on-grid) veya ada modunda (off-grid) çalışabilir. NG yapısı, küçük bir mikroşebeke olarak düşünülebilir, ancak MG'lerden farklı bazı avantajları bulunmaktadır:

- Daha küçük boyutlu oldukları için daha hızlı kurulabilir ve kolayca devreye alınabilirler.
- Yerel olarak kullanıldıkları için diğer NG'lerle bağlantı kurarak bir MG oluşturabilirler.
- Acil durumlarda ulusal şebekeye destek sağlayarak koordinasyon sağlayabilirler.
- Daha az altyapı gereksimi duyar ve farklı enerji kaynaklarının entegrasyonunu nispeten daha kolaydır.
- Enerji iletim ve dağıtım kayıpları yok denecek kadar azdır

Uzun iletim ve dağıtım hatlarıyla beslenme imkanı olmayan özellikle kırsal bölgelerde bulunan köy ve kasaba gibi yerleşim yerlerinin elektrik enerjisi ihtiyaçların yerel düzeyde karşılanmasının birçok teknik ve ekonomik avantajı bulunmaktadır. Ayrıca PV kullanılarak oluşturulan NG'lerin enerji çıktısı DC olacağından televizyon, aydınlatma, şarj cihazı vb. yüklerin beslenmesi için DC/AC dönüşümüne gereksinim duyulmadan direkt enerji kullanımına imkan sağlanabilecektir. Bu sayede dönüşüm kayıpları olmayacağından daha verimli enerji tüketiminden söz edilebilecektir [23-26]. Enerji sektörü, dünya genelindeki sera gazı emisyonlarının dörtte üçüne neden olurken, bu durum NG sistemlerinin

önemini artırmaktadır. NG'ler, enerji üretiminde yenilenebilir kaynakların kullanımını, enerji iletiminde verimliliği ve depolama sistemleri sayesinde enerji tüketiminde optimizasyonu sağlayarak iklim değişikliği ile mücadelede kritik bir rol oynayacağı değerlendirilmektedir. NG sistemlerinin verimli çalışması, merkezi şebekeye olan bağımlılığı azaltırken, karbon ayak izini düşürmeye de katkı sağlar. Bu bağlamda, Uluslararası Enerji Ajansı'nın (IEA) 2050 için belirlediği "net sıfır emisyon" hedefi doğrultusunda [27], NG sistemlerinin yaygınlaşması ve üreten tüketici kavramının özellikle ülkemiz için geliştirilmesi büyük bir önem taşımaktadır. NG'ler, enerjiyi üretme, ileme ve tüketme süreçlerinde tam bir iş birliği ve dönüşümü mümkün kılarak, enerji sektöründe sürdürülebilir bir geleceğin inşasında önemli bir rol üstleneceği değerlendirilmektedir. Şekil 1.2 ile küresel ölçekte yıllık güneş ve rüzgar santrali kurulumlarıyla sağlanan ek enerji miktarı verilmiştir. 2020 yılında yenilenebilir enerji kaynaklarından toplam yıllık 249 GW kapasitede ek tesis kurulmuşken, gelişen teknoloji ile 2030 yılına kadar yalnızca güneş enerjisi kaynaklı küresel olarak 633 GW ek santral kurulması beklenmektedir [27].



Şekil 1.2 Net sıfır salınım yolunda küresel boyutta santral kurulum hedefleri

Chandrasena ve ark. [28], şebekeye bağlı DÜ kaynaklarının yaygın bir şekilde kullanılacağını öngörmektedir. Bu öngörüye göre, enerji depolama birimlerinin eklenmesiyle NG sistemlerinin esnekliği önemli ölçüde artacaktır. DÜ kaynaklarının yaygınlaşması, enerji yönetiminde daha verimli, esnek ve sürdürülebilir bir yapı oluşturulmasını sağlayacaktır. Bu durum, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu kolaylaştırırken, şebeke

üzerindeki yükü azaltmaya ve enerji arz güvenliğini artırmaya katkı sunacaktır. Buna ek olarak, MG ve NG yapıları için geliştirilen otomasyon stratejileri, enerji yönetim sistemlerini akıllı (kendi kendine karar verebilen) ve etkin hale getirmektedir. Bu bağlamda, bulanık mantık denetleyicisi ile desteklenen hibrit dönüştürücüler, hem alternatif akım hem de doğru akım çıkışlarında güvenilir ve kompakt (az bileşenle daha fazla işlev) çözümler sunmaktadır [29-33]. Bu tür dönüştürücüler, enerji üretim ve tüketim süreçlerini optimize ederek, enerji depolama sistemleriyle uyum içinde çalışabilmekte ve şebekeye olan bağımlılığı azaltmaktadır. Fotovoltaik NG sistemlerinde çift yönlü enerji akışını sağlayan mikro-invertör ve dönüştürücü yapıları da son yıllarda önemli bir araştırma konusu haline gelmiştir [34-36]. Bu teknoloji, NG'lerin hem şebekeye enerji verebilmesini hem de enerji alabilmesini sağlayarak, enerji yönetiminde esneklik kazandırmaktadır. Chandrasena ve ark. [37], hibrit bir NG'nin çalışma prensiplerini detaylı bir şekilde ele alarak, gelecekte ticari işletmeler ve konutların elektrik ihtiyaçlarının karşılanmasında yenilenebilir enerji kaynaklarına olan bağımlılığın giderek artacağını öngörmektedir. Şebekeye bağlı NG'lerde gelişmiş enerji yönetim sistemleri kritik bir rol oynamaktadır. Bu sistemler, NG'nin şebekeye olan bağımlılığını en aza indirerek enerji arz ve talebini optimize eder. Örneğin, enerji yönetimi sırasında öngörülen enerji talebi ve mevcut hava koşulları gibi değişkenler dikkatlice analiz edilerek değerlendirilir. Bu sayede, NG'ler şebekeden enerji almak yerine, kendi depolama birimlerini ve üretim kaynaklarını daha verimli bir şekilde kullanarak enerji ihtiyacını karşılayabilir [38-39]. Referans [40]'da geleneksel şebeke yapısının ötesine geçerek, NG'lerle alt sistemler arasında enerji paylaşımını esas alan "açık enerji sistemi" adı verilen yeni bir yapı önerilmektedir. Bu sistem, NG'lerin sadece merkezi bir şebekeye bağlı kalmadan kendi aralarında enerji alışverişi yaparak daha otonom bir şekilde çalışabilmesini hedeflemektedir. Bu tür yapılar, enerji verimliliğini artırırken aynı zamanda daha sürdürülebilir ve esnek elektrik şekellerinin oluşturulmasına katkıda bulunur.

1.3 Çalışmanın Amacı ve Motivasyon

Nanoşebeke sistemleri, enerji üretimi, dağıtımı ve tüketimi süreçlerinde meydana gelen teknolojik gelişmelerin bir sonucu olarak elektrik enerjisi üretimi, yönetimi ve paylaşımında sürdürülebilir ve esnek çözümler sunan yeni nesil bir sistem olarak

karşımıza çıkmaktadır. Geleneksel enerji dağıtım sistemlerinin merkezi yapısı, artan enerji talebi, enerji verimliliği gereksinimleri ve iklim değişikliği gibi nedenlerle önemli sınırlamalarla karşı karşıya kalmıştır. Bu bağlamda, yerel enerji üretim ve tüketimini optimize eden, esnek ve dağıtık enerji yönetimi sistemlerine olan ihtiyaç giderek artmıştır. NG sistemleri, bu ihtiyaca yanıt olarak küçük ölçekli enerji yönetimlerinde çözüm sunan, enerji verimliliğini artıran ve karbon ayak izini azaltmaya katkı sağlayan sistemlerdir. Çalışmanın amacı, Türkiye'nin farklı bölgelerinde kullanılan NG sistemlerinin hem teknik hem de ekonomik performansını değerlendirmek ve bu sistemlerin karşılıklı enerji paylaşımı yöntemiyle nasıl daha verimli hale getirilebileceğini incelemektir. Bu doğrultuda, farklı coğrafi bölgelerdeki NG sistemleri için yapılacak tekno-ekonomik analizler, sistemlerin maliyet, enerji verimliliği, çevresel faydalar ve sistem entegrasyonu açısından ne gibi avantajlar sunduğunu gösterecektir. Özellikle enerji maliyetlerinin yüksek olduğu, şebeke bağlantısının zayıf veya sınırlı olduğu bölgelerde, NG sistemlerinin potansiyel faydalarını ortaya koymak çalışmanın temel motivasyon kaynaklarından biridir. Ayrıca, p2p enerji transferi ile NG'ler arasındaki enerji paylaşımının optimize edilmesiyle şebekeden alınan enerji miktarının nasıl minimize edilebileceği üzerinde durulmuştur. Uçtan uça enerji paylaşımı yapılırken sistem python'da matematiksel olarak modellenmiş ve gurobi çözücü ile çözülmüştür. Bu yönüyle bakıldığında çalışma literature sunulan ilk çalışma olarak ortaya konulmuştur. Ayrıca yapılan bu çalışmada meta-sezgisel yöntemler kullanılarak maliyet minimizasyonunu hedefleyen NG için enerji depolama sisteminin optimizasyonu da yapılmıştır. Bu çalışmada literature sunulan ilk çalışma olmuştur.

Bu çalışmanın ana motivasyonu, dünya genelinde giderek artan yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonunu destekleyerek, merkezi şebekeye olan bağımlılığı azaltmak ve enerji güvenliğini artırmaktır. NG sistemleri, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin bir şekilde kullanıldığı, yerel enerji üretim-tüketim dengesi üzerinde yoğunlaşan ve esnek bir yapı sunan bir enerji çözümü olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu esnek yapı sayesinde, enerji arz ve talebinin en iyi şekilde dengelenmesi, yerel elektrik enerjisi depolama ünitelerinin verimli kullanımı ve enerjinin ihtiyaç olan noktalara kesintisiz ve düşük maliyetle taşınması mümkün olmaktadır. Aynı zamanda NG sistemleri, toplumlar ve bireyler arasında enerji

paylaşımını teşvik ederek, enerji maliyetlerini düşürmek ve yerel ekonomilere katkıda bulunmak gibi sosyo-ekonomik faydalar sunmaktadır. Tez çalışmasının bir diğer önemli motivasyon kaynağı, Türkiye'nin enerji arz güvenliği açısından yenilenebilir enerji kaynaklarına ve dağıtık enerji sistemlerine olan ihtiyacını vurgulamaktır. Ülkenin farklı bölgelerinde yapılacak vaka analizleri, yerel enerji kaynaklarının kullanımının nasıl optimize edilebileceğini ve NG sistemlerinin, merkezi şebeke sistemlerine kıyasla ne gibi avantajlar sunduğunu ortaya koyacaktır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının yaygın olduğu, ancak şebeke altyapısının sınırlı olduğu kırsal veya yarı kırsal alanlarda NG sistemlerinin yaygınlaştırılması, enerji arz güvenliği sorunlarını azaltmaya ve sürdürülebilir enerji çözümlerine katkıda bulunmaya yönelik önemli bir adımdır.

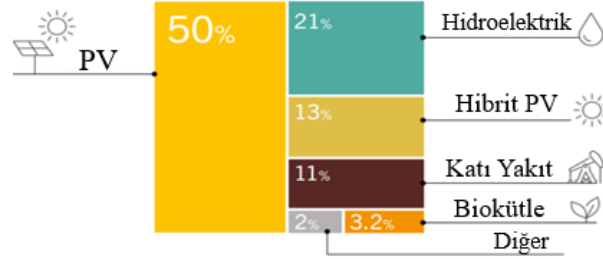
Sonuç olarak, bu çalışmada, NG sistemlerinin teknik, ekonomik ve çevresel faydalarının yanı sıra, bu sistemler arasında p2p enerji paylaşımı yoluyla enerji verimliliğinin nasıl artırılabilir ve şebekeden alınan enerji miktarının nasıl minimize edilebileceği ve meta-sezgisel yöntemlerle enerji depolama sisteminin nasıl optimize edilebileceği modellenmiş ve matematiksel olarak ortaya konulmuştur. Çalışma, hem akademik literatüre hem de enerji sektörüne önemli katkılar sunmayı amaçlamaktadır. Aynı zamanda, bu teknolojilerin yaygınlaştırılması yoluyla Türkiye'nin enerji politikalarına ve iklim hedeflerine ulaşılmasına destek sağlanacağı değerlendirilmektedir.

2

NANOŞEBEKELERİN ÜRETİM DAĞITIM KONTROL VE UYGULAMA DİNAMİKLERİ

Nanoşebekeler, yenilenebilir enerji kaynaklarıyla elektrik üretirler, bu sayede fosil yakıt kullanımını azaltarak çevresel etkileri en aza indirirler. NG'lerin temel özelliklerinden biri, enerji depolama sistemlerini entegre ederek enerji üretim ve tüketim süreçlerine esneklik kazandırmalarıdır. Bu depolama sistemleri, enerji arzı ve talebi arasındaki dengesizlikleri giderir ve genel sistem verimliliğini artırır. Küçük ölçekli bir MG olarak da adlandırılabilen NG'ler, hem alternatif akım AC hem de DC olarak çalışabilmektedirler. Hibrit yapıdaki NG'ler, hem şebekeye bağlı modda hem de ada modunda çalışabilme esnekliğine sahiptir. Bu özellik, enerji güvenliğini artırırken, olası şebeke arızalarında enerji sürekliliğini de sağlar. NG'ler, enerji piyasalarındaki dalgalanmalardan da faydalanabilir. Özellikle enerji fiyatlarının düşük olduğu zamanlarda depolama sistemlerini doldurarak, fiyatların yüksek olduğu dönemlerde bu enerjiyi şebekeye geri satarak arbitraj kazançları elde etme potansiyeline sahiptir. Bu şekilde, NG'ler sadece enerji tüketicisi olmaktan çıkıp aynı zamanda enerji sağlayıcısı haline gelebilirler. NG'ler şebekenin "güvenilirliğini" ve "dayanıklılığını" artırarak, enerji arz güvenliğine katkıda bulunabilirler. Birden fazla NG'nin birleşimiyle oluşan MG yapıları etkin ve verimli bir enerji yönetimi sağlar. Bu yapı, büyük enerji kesintileri veya şebeke arızalarında, enerjinin kesintisiz bir şekilde dağıtılmasına olanak sağlayabileceği ön görülmektedir. Böylece, NG'ler hem yerel enerji ihtiyaçlarını karşılar hem de genel enerji altyapısının dayanıklılığını artıran kritik bir unsur olarak işlev görür [41-44]. Yenilenebilir enerji kaynaklarından, özellikle rüzgar ve güneş enerjisinden elektrik üretimi, onlarca yıldır araştırmacıların odaklandığı bir konu olmuştur [45]. DÜ'nün elektrik enerji sektörüne tam olarak entegre olmasıyla, NG için yapılan çalışmalar da belirgin bir artış göstermektedir [22, 46-52]. Yenilenebilir enerji kaynakları

arasında, fotovoltaik sistemler NG ünitelerinde en yaygın kullanılan teknoloji olarak öne çıkmaktadır. En son yenilenebilir enerji durum raporu, küresel ölçekte kurulan yeni, küçük ölçekli enerji santrallerinin teknolojilerine dair önemli bilgiler sunmaktadır. Şekil 2.1'de de görüldüğü üzere, güneş enerjisi ve hibrit güneş enerjisi santralleri, toplam kurulu kapasitenin %63'ünü oluşturarak, NG teknolojisinin evrilen yapısındaki kritik önemini güçlü bir şekilde ortaya koymaktadır [53].



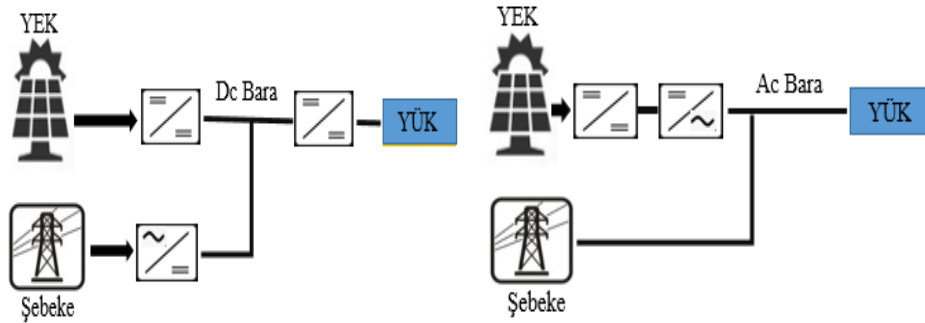
Şekil 2.1 Küresel ölçekte düşük kapasiteli yenilenebilir kaynakların oranı [53]

NG yapılarında depolama sistemlerinin entegrasyonu ve talep tarafındaki değişkenliklerin de göz önünde bulundurulmasıyla birlikte, özellikle etkili enerji yönetimi uygulamalarıyla desteklendiğinde, şebekeye bağlı sistemlere önemli bir esneklik sağlamaktadır [38, 54-58]. NG'lerin sağladığı avantajlar, özellikle gelişmemiş ya da gelişmekte olan bölgelerde, kırsal ve ada gibi enerji iletiminin AC-DC veya hibrit işletim nedeniyle teknik ve ekonomik zorluklar yarattığı alanlarda belirgin bir şekilde öne çıkmaktadır. Batarya enerji depolama sistemleri (BESS) ve güneş enerjisi teknolojilerindeki ilerlemeler, üretim maliyetlerinin düşmesiyle birlikte, PV/BESS içeren temel NG kurulumlarını son derece avantajlı hale getirmektedir [59-64]. Uluslararası Yenilenebilir Enerji Ajansı'na (IRENA) [65] göre, PV sistemlerinin maliyetlerinde son yıllarda yaşanan önemli düşüş, güneş enerjili NG tesislerini özellikle bol güneş alan az gelişmiş bölgeler için ekonomik olarak uygulanabilir bir çözüm haline getirmiştir. Bu bölgelerde elektrik altyapısının eksikliği ve geleneksel enerji kaynaklarının maliyeti göz önüne alındığında, PV tabanlı NG sistemleri enerji erişimini sağlamak için sürdürülebilir ve düşük maliyetli bir seçenek olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, AC iletim hatlarındaki enerji kayıpları ve kısa devre gücü noktasında ortaya çıkabilecek sorunlar nedeniyle oluşan endişeler, DC enerji dağıtım sistemlerine olan ilgiyi önemli ölçüde artırmıştır. DC sistemleri, enerji üretiminden tüketiciye kadar enerjinin daha az kayıpla taşınmasına olanak tanıyarak daha verimli bir enerji yönetimi sunmaktadır. Gerber ve arkadaşlarının [66] yürüttüğü çalışmalar, PV

sistemleri ve BESS sahip binaların DC enerji dağıtımını kullanarak %18'e kadar daha yüksek enerji verimliliği elde edebileceğini göstermiştir. Bu verimlilik artışı özellikle enerji talebi daha yüksek olan ticari işletmelerde daha önemlidir. DC sistemlerinin sunduğu düşük iletim kayıpları bu ortamlarda daha büyük fark yaratmaktadır. Ticari yapılar dışında konut ve ofis binalarına yönelik yapılan diğer çalışmalar da benzer sonuçlar ortaya koymakta olup, DC enerji sistemlerinin AC sistemlerine kıyasla tutarlı bir şekilde üstün verimlilik sağladığını kanıtlamıştır [67-69]. Bu çalışmalar, özellikle YEK ile entegre olan binalarda DC sistemlerin kullanımının enerji maliyetlerini düşürmekle kalmayıp, aynı zamanda şebekeye olan bağımlılığı da azalttığını göstermektedir. Bu bağlamda, güneş enerjili nanoşebekelerin ekonomik olarak uygulanabilirliği ve enerji verimliliği açısından DC sistemlerinin sağladığı avantajlar, hem gelişmiş hem de gelişmekte olan ülkeler için enerji yönetimi çözümlerinin geliştirilmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Özellikle elektrik erişiminin sınırlı olduğu veya altyapının yetersiz olduğu bölgelerde, güneş enerjili nanoşebeke sistemleri, sürdürülebilir enerji dağıtımı açısından büyük bir potansiyele sahiptir.

2.1 NG Yapılarının Elektrik Üretimi ve Dağıtım

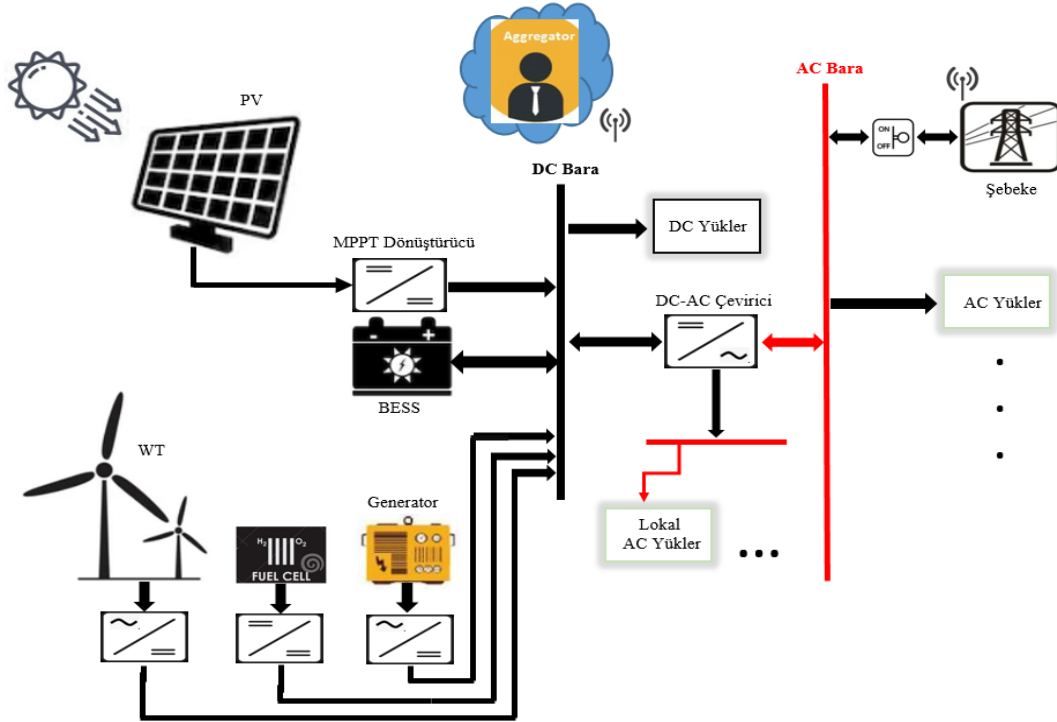
Şekil 2.2'de sırasıyla AC ve DC nanoşebekenin basitleştirilmiş yapısı verilmiştir. Elektrik enerjisinin depolanması için BESS sistemleri nanoşebekelerde sıkça kullanılmaktadır. Güç elektroniği teknolojisi ve depolama sistemlerindeki gelişmelere paralel olarak, bir elektrikli aracın bataryası da çift yönlü enerji alışverişi kullanılarak nanoşebeke yapısında bir BESS olarak hizmet verebilir [70].



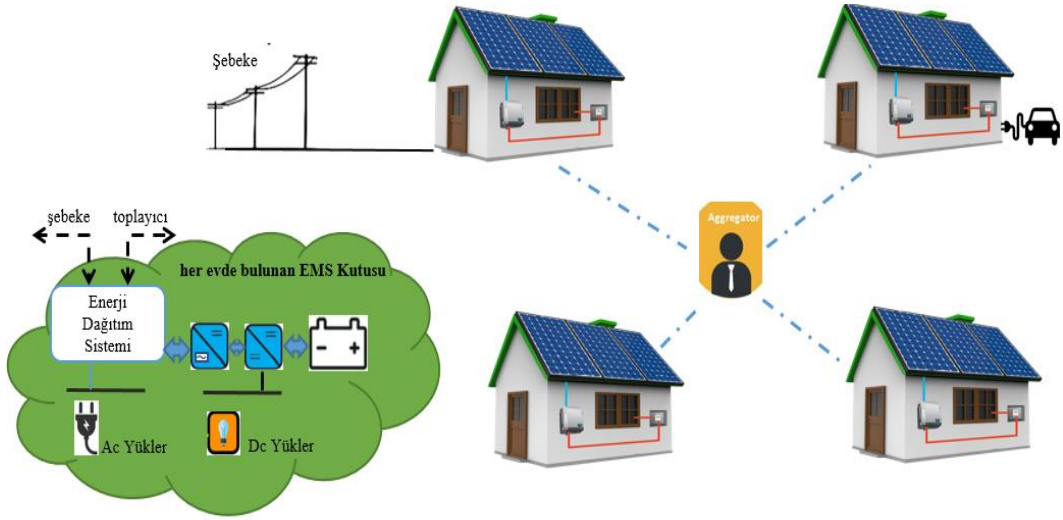
Şekil 2.2 DC ve AC nanoşebeke yapıları

Şekil 2.3 ile bir NG'nin genişletilmiş yapısını göstererek sistemin çok yönlülüğü vurgulanmıştır. NG toplayıcı (aggregator), şebeke ile iletişimi kolaylaştırarak,

enerji talebinin en yüksek olduğu dönemlerde finansal kazançlar elde etmek için çift yönlü enerji alışverişine olanak tanır. Çok katmanlı hiyerarşik enerji yönetim algoritmalarının, PV'nin hava koşullarına bağlı güç üretimi nedeniyle tahmin ve maliyet kısıtlarını dikkate alarak uygulanması kritik öneme sahiptir [71]. DC NG'ler elektrikli araç şarj istasyonları (EVCS) bulunan noktalarda popülerlik kazanmaktadır. Ancak ev aletleri, ofis gereksinimleri vb. hâlâ büyük ölçüde AC voltaj kullanmakta olduğundan, DC NG yapılarının daha geniş bir şekilde benimsenmesinin önünde büyük bir engel olarak durduğu söylenebilir. Ayrıca, nanoşebekelerin şebekeye bağlı senaryolarda uygulanması üzerine yapılan çalışmalar, NG'de kullanılmayan fazla elektriğin şebekeye katkıda bulunabileceğini ortaya koymaktadır [72-73]. NG'ler küçük mikroşebekeler olarak kabul edilebilir. Bu nedenle, birden fazla NG yapısı birleştirilerek bir MG oluşturulabilir. Güçlü bir enerji yönetimi, şebekeyi destekleyebilir ve NG kümesinden elde edilen büyük güçle çift yönlü enerji alışverişini sağlayabilir [62, 74-76]. Şekil 2.4 birbirine bağlı NG küme yapısını göstermektedir; bu yapıda "toplayıcı" (aggregator), şebeke ve NG kurulu evlerle bilgi alışverişi için bir iletişim altyapısı ile kontrolör olarak görev yapar. Verilen şekilde NG'lerin bulunduğu hanelerdeki AC ve DC yüklerine güç sağlayan bir enerji yönetim sistemi "EMS kutusu" bulunmaktadır.

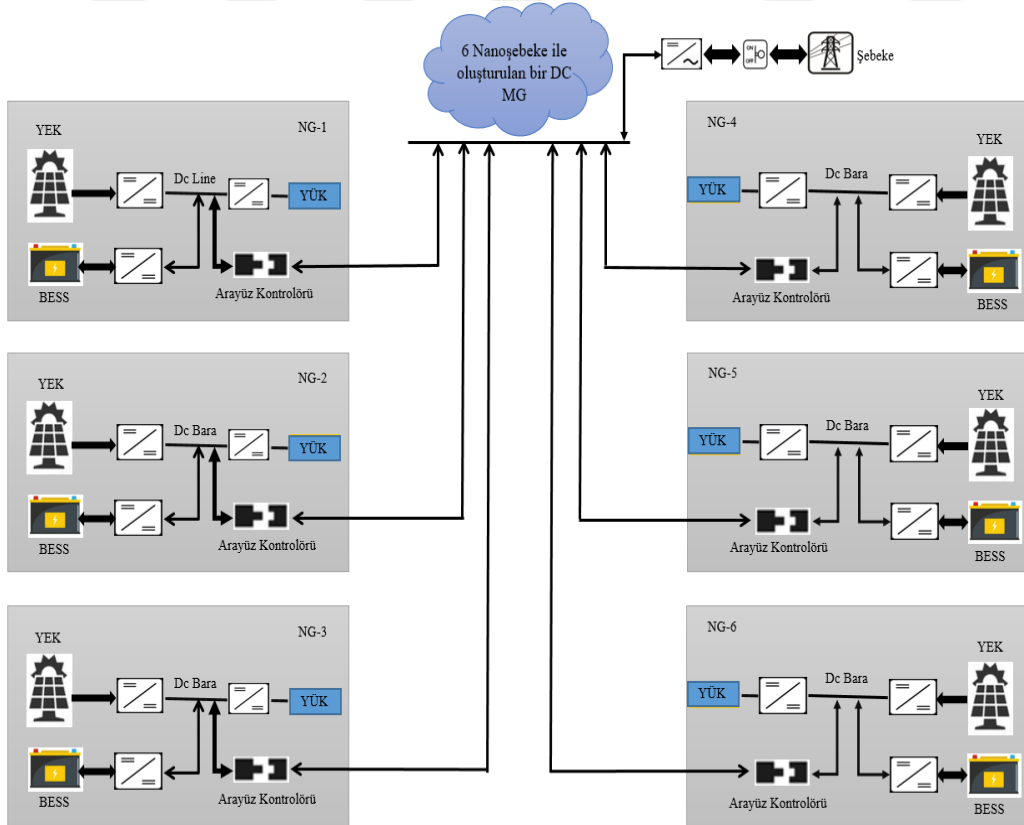


Şekil 2.3 Genişletilmiş NG yapısı



Şekil 2.4 Küme NG yapısı

Geleneksel yukarıdan aşağıya doğru çalışan elektrik şebekesi yapısının aksine, sunulan bu yeni küçük güçlü şebeke yapısı, MG ve NG uygulamalarında enerji yönetimi ve kontrol için aşağıdan yukarıya doğru bir yaklaşımı benimsemektedir. Birden fazla nanoşebekenin entegre edilmesiyle mikroşebeke yapılarının oluşturulabileceği literature sunulmuştur [22, 77-78]. Şekil 2.5 bu yapıyı göstermektedir.



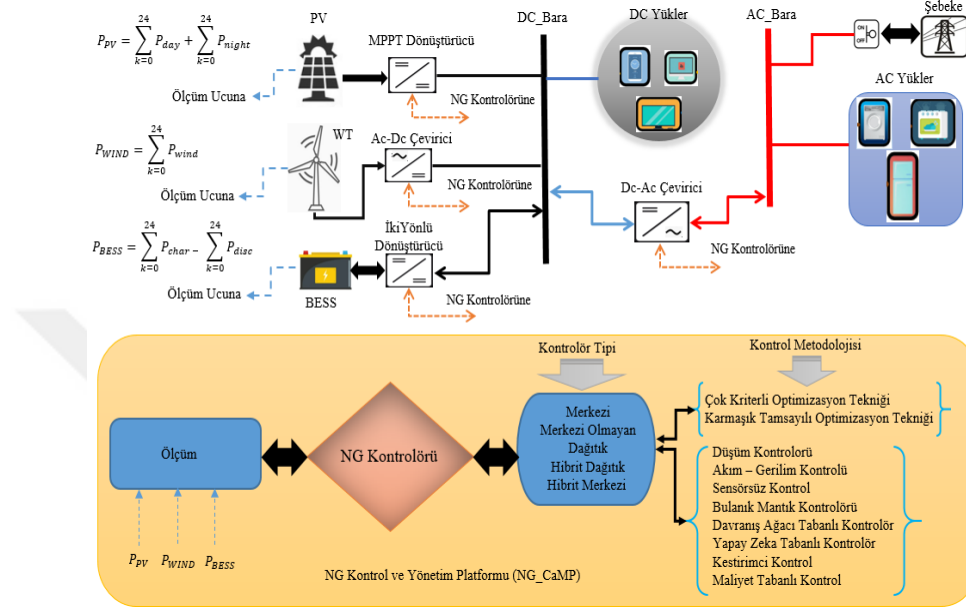
Şekil 2.5 NG'lerden oluşturulan bir MG yapısı

2.2 Nanoşebekelerde Dönüştürücüler ve NG Kontrolü

Artan enerji taleplerine ve çevresel değişiklikler ile iklim değişikliği konularına verilen yanıt olarak, DÜ tesislerinin kullanımı giderek daha yaygın hale gelmektedir. Rüzgar türbinleri, güneş enerji santralleri, biyokütle, jeotermal ve biyogaz gibi çeşitli yenilenebilir kaynaklar, dağıtık üretimde merkezi bir rol oynamaktadır. Özellikle PV tesisleri, üretim maliyetlerinin düşmesiyle birlikte geniş çapta popülerlik kazanmıştır. DC nanoşebeke yapılarında, özellikle güneş enerjisine dayalı sistemlerde, DC-DC dönüştürücülerin verimliliği ve performansı üzerine kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Bu konuya ilişkin geniş bir literatür bulunmaktadır [80-87]. Güneş enerji santrallerinde kullanılan güneş panelleri genellikle düşük voltaj seviyesinde enerji üretir ve bu voltaj, DC nanoşebekeye bağlı çeşitli yükler için yetersiz olabilir. Bu durumu çözmek için, nanoşebekelerde yüksek verimli DC-DC dönüştürücüler oldukça önemlidir. YEK nanoşebeke yapılarında enerji üretiminde baskın olduğundan, üretilen enerjinin voltaj seviyesi yük tipleri, şebeke bağlantısı ve genel sistem gereksinimleri dikkate alınarak dikkatlice değerlendirilmelidir. Ayrıca, inverter topolojileri üzerine yapılan araştırmalar, NG ile şebeke arasında çift yönlü enerji alışverişi sağlamayı ve AC yüklere elektrik enerjisi sağlamayı amaçlamaktadır [88-91].

2040 yılına kadar küresel enerji talebinin %30 oranında artacağı öngörülmektedir [92]. Bu durum, geleneksel fosil yakıtlı enerji santralleriyle ilgili olumsuz etkiler ve düzenleyici kısıtlamalar nedeniyle enerji üretiminde yenilenebilir kaynaklara yönelme gerekliliğini vurgulamaktadır [93]. IRENA'dan alınan verilere göre [94], yenilenebilir enerji (YE) kaynakları, halihazırda küresel enerji üretiminin %38'ine katkıda bulunmaktadır. Bol miktarda kaynak, rekabetçi pazarlar ve fosil yakıtlara kıyasla daha maliyet etkin enerji arzı ile desteklenen rüzgar ve PV teknolojilerinin, enerji sektöründe yenilenebilirlerin yükselişine öncülük etmesi beklenmektedir [104]. Ayrıca, IRENA'nın projeksiyonlarına göre [94,95], YE kaynaklarının 2050 yılına kadar dünya enerji üretiminin yaklaşık %85'ini oluşturacağı öngörülmektedir. İşletmeler ve konut yapıları da dahil olmak üzere binalar, küresel enerji tüketiminde merkezi bir rol oynamaktadır. [96]'te vurgulandığı üzere, evsel kullanım tek başına dünya genelinde kullanılan toplam enerjinin yaklaşık %40'ını tüketmektedir. Evsel tüketimin toplam enerji tüketiminin %40'ından sorumlu olduğu ve dünya genelindeki karbon dioksit emisyonlarının %36'sına katkıda

bulunduğu göz önüne alındığında [96], evlerde kullanılan elektrik enerjisi üretimini karbondan arındırmak, iklim değişikliğiyle mücadelede kritik bir önlem haline gelmektedir. Yenilenebilir enerjiye geçiş ve binalardaki enerji tüketimini ele alma gerekliliği, nanoşebekeler ve sürdürülebilir enerji sistemlerindeki rolleri hakkındaki tartışmalarla yakından ilişkilidir.



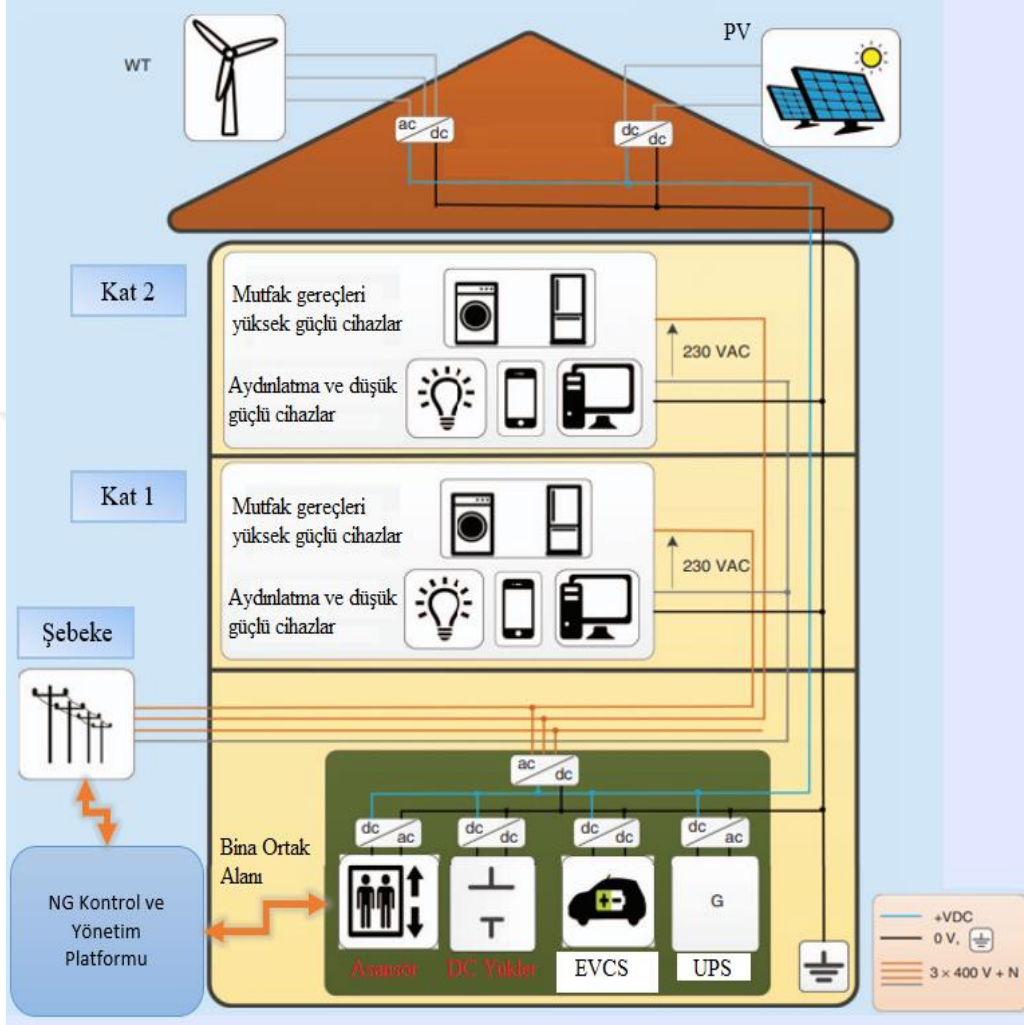
Şekil 2.6 Nanoşebeke kontrol ve yönetim platformu (NG_CaMP) ile hibrit nanoşebekenin fiziksel ve yapısal konfigürasyonu

Şekil 2.6. hibrit bir NG yapısını ve NG kontrolörünü içeren NG_CaMP yapısını göstermektedir. Bu Nanoşebeke Kontrol ve Yönetim Platformu (NG_CaMP), NG içerisindeki yükler ve şebeke arasındaki enerji akışını düzenlerken, YEK'leri yöneterek belirli hedeflere ulaşmayı amaçlar. Bu hedefler arasında NG'nin işletme maliyetlerini azaltmak, genel verimliliği artırmak, şebekeden alınan enerjiyi minimize etmek ve emisyonları düşürmek yer alabilir [97-98]. Şekil 2.3'te gösterilen genişletilmiş NG şemasında, DÜ kaynakları uygun dönüştürücüler aracılığıyla DC baraya bağlanır ve hem 12V, 24V, 48V gibi DC yüklerine hem de evlerde kullanılan 220V AC yüklerle enerji sağlar [15,99]. Sunulan yapı ada modunda çalıştığında, güç dengesi Denklem (2.1) ile ifade edilmektedir. Bu durumda, sistemde fazla enerji varsa depolama sistemi bu enerjiyi depolar ve sistemdeki denge bozulduğunda, NG_CaMP aracılığıyla YEK birimleri devre dışı bırakılır. Hibrit yapı şebekeye bağlı modda çalışırken ise güç dengesi Denklem (2.2) ile tanımlanır. Denklem (2.3)'de verilen P_{NG} NG tarafından sağlanan güç ifadesidir.

$$P_{WIND} + P_{PV} + P_{BESS} - P_{LOAD_{dc}} - P_{LOAD_{ac}} = 0 \quad (2.1)$$

$$P_{\text{ŞEBEKE}} + P_{WIND} + P_{PV} + P_{BESS} - P_{LOAD_{dc}} - P_{LOAD_{ac}} = 0 \quad (2.2)$$

$$P_{NG} = P_{PV} + P_{BESS} + P_{WIND} \quad (2.3)$$



Şekil 2.7 Evsel uygulamalar için hibrit NG gösterimi

Şekil 2.7 ile bir binada kullanılan YEK'e dayalı NG sisteminin genel yapısını göstermektedir. Şemada NG sistemi, enerji arzı ve talebi arasında dinamik bir denge kurmak üzere tasarlanmış olup, çeşitli güç dönüşümleri (DC-AC ve AC-DC) ile hem düşük hem de yüksek güçlü yükleri beslemektedir. Güneş panelleri doğrudan DC enerji sağlarken, rüzgar türbini AC enerjiyi üretir ve bu enerji, RT dönüştürücüsü aracılığıyla DC'ye dönüştürülür. Bu iki yenilenebilir kaynak, binanın enerji gereksinimlerini karşılamak üzere dönüştürücüler üzerinden entegre edilir. Bina içinde özel dairelerde bulunan mutfak aletleri gibi yüksek güçlü yükler ve aydınlatma ile elektronik cihazlar gibi düşük güçlü yükler, 230 VAC ile çalıştırılmakta olup, bu yüklerin ihtiyaçları NG sistemi tarafından karşılanır.

Bina ortak kullanım alanları, asansör, bess, elektrikli araç şarj istasyonu ve bilgisayar gibi yükleri içerir. Bu yükler, nanoşebeke kontrol sistemi tarafından yönetilen ve hem AC hem de DC yükleri besleyen bir yapı ile desteklenir. Özellikle bess sistemi, YEK'den elde edilen fazla enerjiyi depolayarak, gerektiğinde binanın yüklerinin karşılanmasında kullanılacak enerjiyi sağlar. Enerji yönetimi, şebeke ile çift yönlü bir bağlantı içerir ve bu bağlantı, NG kontrol ve yönetim platformu aracılığıyla optimize edilir. Bu platform, enerji fazlası olduğunda şebekeye enerji aktarımını sağlarken, enerji açığı olduğunda şebekeden enerji alımını yönetir. Bu sistem, nanoşebeke teknolojisinin enerjinin yerel düzeyde üretilmesi, depolanması ve yönetilmesi süreçlerinde nasıl etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır. Özellikle, yenilenebilir enerji kullanımını artırmak, enerji maliyetlerini düşürmek ve merkezi bir şebekeye bağımlılığı azaltmak adına NG yapıları bina ölçeğinde önemli bir uygulama alanı bulmaktadır. Böylece, hem enerji verimliliği hem de sürdürülebilir enerji kullanımı optimize edilebilir. NG'lerde, enerjinin daha verimli kullanılması, şebekeden daha az enerji alınması, talep üzerine enerji üretiminin optimize edilmesi ve YEK entegrasyonu ile sağlanır. Enerji yönetim sistemleri (EYS), özellikle YEK'lerdeki dengesizlikleri ve kesintileri yöneterek, enerji maliyetlerini düşürmede kritik bir rol oynar. EYS, şebekeden alınan enerjiyi azaltarak minimuma indirir ve çoklu tarife kullanılan bir faturalandırılma durumunda yüksek talep dönemlerinde oluşan fiyat artışlarına maruz kalmayı engeller. Aynı zamanda, şebekeye geri satılabilecek fazla enerjiyi optimize eder ve enerji depolama sistemlerini etkin bir şekilde kullanarak maliyetlerin düşürülmesini sağlar. Örneğin, düşük maliyetli veya fazla üretilmiş yenilenebilir enerji, BESS sistemlerinde depolanabilir ve daha yüksek fiyatlı talep dönemlerinde kullanılabilir. Bu da enerji maliyetlerinin dengelenmesine ve uzun vadede önemli ölçüde tasarruf edilmesine olanak tanır. Son olarak, EYS'nin sağladığı optimizasyon ile enerji kullanımının genel verimliliği artırılır, bu da enerji kayıplarının azalmasına ve dolayısıyla enerji maliyetlerinde düşüşe yol açar. EYS'nin bu maliyet azaltıcı etkileri, özellikle ticari ve endüstriyel işletmelerde önemli finansal avantajlar sağlar. NG yapılarında, EYS'nin bu işlevleri sayesinde verimlilik, güvenilirlik ve sürdürülebilirlik sağlanırken, aynı zamanda enerji maliyetlerinin düşürülmesi maliyet etkinliği açısından büyük önem taşır [100].

2.3 Nanoşebeke Uygulamalarının Arkasındaki Motivasyonel Etki

Enerji üretimindeki dinamik değişimle birlikte, fosil yakıtlara dayanan iletim hatlarına bağlı geleneksel enerji santralleri, yüklü bakım onarım maliyetleriyle eski yapılar olarak karşımıza çıkmaktadır. Ancak, güneş ve rüzgar gibi YEK'lerinin potansiyelini açığa çıkaran teknolojik gelişmelerin ışığında, DÜ ile yeni bir dönem başlamaktadır. Bu yenilikçi yaklaşım, elektrik üretimini hem daha ekonomik hem de erişilebilir hale getirmekte olup, geleneksel elektrik şebekesine kıyasla daha düşük yatırımlar gerektirmektedir. DÜ geleneksel elektrik şebekesinin kısıtlamalarından arı bir çözüm olarak öne çıkmaktadır [101-102]. Özellikle elektriğe erişimin zor ya da imkansız olduğu kırsal bölgelerde, elektrik enerjisi fosil yakıt kullanan jeneratörler aracılığıyla sağlanmaktadır. Ancak, jeneratörlerde kullanılan yakıtların bu bölgelere taşınması da oldukça zor olmaktadır. Bunun bir sonucu olarak, yakıt maliyetine ek olarak taşımacılık maliyeti de genel maliyete eklenmektedir. Bu nedenle üretilen enerjinin maliyetinin oldukça yüksek olacağı açıktır. Elektrik enerjisi, en temel insan ihtiyaçlarından biri olup, özellikle az gelişmiş bölgelerde ve ülkelerde büyük krizlere yol açabilmektedir. Dünya Bankası'nın [103] araştırmasına göre, 2010 yılında dünyada elektriğe erişimi olmayan insan sayısı 1,2 milyar iken, bu sayı 2019 yılında 759 milyona düşmüştür. Bununla birlikte, mevcut ve öngörülen politikalar altında, COVID-19 krizinin de etkisiyle, 2030 yılında çoğu Sahra Altı Afrika'da yaşayan tahmini 660 milyon insanın hâlâ elektriğe erişimi olmayacağı tahmin edilmektedir. Nanoşebeke özellikle elektriğe erişimin zor olduğu kırsal ve az gelişmiş bölgeler için önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu bölgelerdeki enerji altyapısı eksiklikleri ve merkezi şebekelere olan bağımlılık, insanların temel ihtiyaçlarını karşılamada büyük zorluklar yaratmaktadır. NG sistemleri, yerel düzeyde enerji üretimini ve tüketimini optimize ederek bu sorunlara çözüm getirebilir. Aynı zamanda, bu sistemler yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılmasıyla fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltabilir ve daha sürdürülebilir bir enerji modeli sunabilir.

Avrupa Komisyonu'nun [104] 2030 yılına kadar "neredeyse sıfır enerji tüketen binalar"dan "sıfır emisyonlu binalar"a geçiş hedefi, NG sistemlerinin bu sürece nasıl katkı sağlayabileceğine de işaret etmektedir. Bu hedefler doğrultusunda, yenilenebilir enerji kaynaklarının avantajlarından yararlanan, aynı zamanda elektrik üreten ve tüketen sistemlerin yaygınlaştırılması büyük bir önem

taşımaktadır. Referans [22], [40], [61], [105] açıklandığı üzere, NG sistemlerini bir mikroşebeke olarak tanımlamak mümkündür. Ancak NG'ler, daha küçük boyutları ve esnek yapıları sayesinde özellikle bireysel binalar veya küçük yerleşim alanları için daha uygun çözümler sunmaktadır. Bu sistemler, merkezi şebekeye bağımlı olmadan çalışabilme yetenekleriyle, enerji arz güvenliğini artırmakta ve enerji altyapısının olmadığı ya da yetersiz olduğu bölgelerde kritik bir rol oynamaktadır. Bunun yanı sıra, yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı bu sistemler, enerji tüketimini ve karbon ayak izini azaltma konusunda önemli bir potansiyele sahiptir. Avrupa Komisyonu'nun sıfır emisyon hedeflerine ulaşmada NG'lerin yaygınlaşması, sürdürülebilir bir geleceğe doğru atılmış güçlü bir adım olacaktır. Nanoşebekelerin tesis edilmesinin önemi, motivasyonel etkileri ve çeşitli avantajları özetle aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- **Doğal afetler sırasında enerji güvenliği:** Fırtınalar, sel felaketleri ve yangınlar gibi afetler sırasında geleneksel elektrik şebekesi geniş çaplı elektrik kesintilerine (blackout) veya kısmi güç kesintilerine (brownout) neden olabilir. Bu tür durumlarda NG'ler, genel elektrik kesintileri sırasında yerel olarak şebekeyi destekleyebilir. Bu, afet zamanlarında bile kritik hizmetlerin ve enerji taleplerinin karşılanmasını sağlar.
- **Enerji verimliliği ve sıfır enerji binalara katkı:** NG'ler, müstakil konutlarda veya binalarda enerji üretim ve tüketimini optimize ederek, her hanenin enerji yönetimine katkıda bulunmasını sağlar. Aynı zamanda, fazla enerjiyi uygun altyapı ile şebekeye satarak "net sıfır enerji bina" hedeflerine ulaşılmasına yardımcı olur.
- **Şebeke bağlantısının olmadığı bölgelerde jeneratör ihtiyacının ortadan kaldırılması:** NG'ler, yenilenebilir enerji kaynakları ve enerji depolama üniteleri ile jeneratör kullanımına olan ihtiyacı ortadan kaldırır. Şebeke bağlantısının olmadığı veya sınırlı olduğu bölgelerde, bu sistemler çevre dostu ve kullanıcı dostu yeni teknolojik çözümler sunarak enerji üretimini sürdürülebilir hale getirir.
- **Üreten tüketici için enerji yönetimi:** NG'ler, enerji tasarrufu sağlamak isteyen prosumer'lara, uygun kontrol yöntemleriyle enerji üretim ve tüketimlerini yönetme imkânı sunar. Üretim ve tüketim tahminlerine dayalı

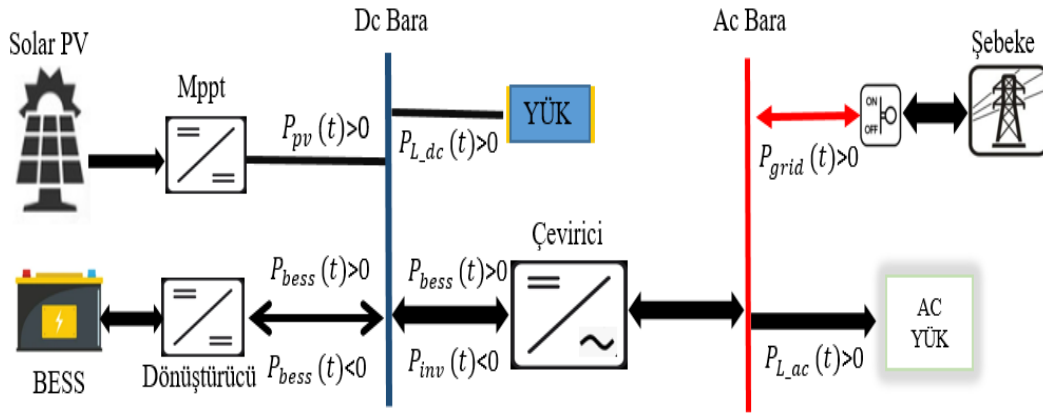
bir yönetim ile prosumer'lar enerji tüketimlerini optimize edebilir ve tasarruflarını yönlendirebilir.

- **Çift yönlü enerji alışverişi:** NG'ler, çift yönlü enerji alışverişine imkân tanır. Bu sayede, enerji depolama sistemleri aracılığıyla enerji, fiyatların yüksek olduğu saatlerde şebekeye satılabilir ve fiyatların düşük olduğu saatlerde şebekeden enerji satın alınabilir. Bu durum, enerji maliyetlerinin azaltılmasına ve gelir elde edilmesine yardımcı olur.
- **NG'ler arası enerji alışverişi:** NG'ler arasında optimum kontrol ile gerçekleştirilen enerji alışverişi, bu sistemlerin şebekeye olan bağımlılığını neredeyse sıfıra indirir. Böylece, NG'ler hem kendi kendine yeten sistemler haline gelir hem de enerji güvenliği artırılarak merkezi şebeke üzerindeki baskı azaltılır.

2.4 Nanoşebeke Uygulamaları

Nanoşebekeler, özellikle YEK kullanımını artırmak ve enerji üretim ve tüketiminde sürdürülebilir çözümler sunmak için geliştirilen modern enerji yönetim sistemleridir. Merkezi olmayan yapıları sayesinde, hem kırsal hem de kentsel alanlarda enerji üretimi, depolanması ve dağıtımını optimize ederek enerji verimliliğini artırır. NG'ler konutlardan, ofislere, apartmanlara ve benzin istasyonlar vb. yapılara kadar farklı ölçeklerde uygulanabilir ve bu sayede enerji bağımsızlığını teşvik ederler. Literatürde, NG'lerin uygulanabilirliği ve çeşitli kullanım alanlarına yönelik birçok çalışma bulunmaktadır. Örneğin, bir spor salonunda ekipmanların kinetik enerjisini elektrik enerjisine çevirerek bir NG'nin yıllık 1003 kW enerji üretebileceği ortaya konulmuştur [106]. Ammous ve ark. [107], ev tipi NG'lerde güneş PV sistemlerinin verimliliğini artırmak amacıyla, PV çıkış gücünün doğrudan yükler için kullanıldığı bir sistem tanıtmışlardır. Bu yaklaşım, DC yükler için %6, AC yükler için ise %20'lik bir verimlilik artışı sağlamıştır. Başka bir çalışmada [108], ev içi yüklerin, PV çıkışında maksimum güç noktası izleyici (MPPT) kullanılmadan, doğrudan bir dc/dc dönüştürücü aracılığıyla beslendiği belirtilmiştir. NG, MG ve küme NG (cluster-cNG) gibi esnek iç topolojiye ve dış sınıra sahip sistemlerin kurulması güvenilir, dayanıklı ve esnek bir enerji sistemi sağlayabilecektir. Şebeke bağlantılı NG'ler, DÜ kaynakları etkin bir şekilde koordine ederek polis merkezleri, hastaneler, telekom kuleleri ve veri

merkezleri gibi kritik tesislerin enerji ihtiyacını karşılayabilir. Esnek yapıya sahip NG, MG ve cNG sistemleri, çeşitli YEK'lerin entegrasyonunu sağlayarak, adalı, şebeke bağlantılı ve kümelenmiş modlarda çalışabilme yeteneği sunar. Farklı çalışma modlarını yönetmek için NG'ler, MG'ler ve cNG'ler için farklı kontrol teknikleri gereklidir [109-110]. Nijerya'da yapılan bir solar NG çalışmasında, ilk yatırım maliyeti kısıtlamalarına vurgu yapılarak, mevcut solar PV ve BESS sistemlerinin genişletilmesinde uyumluluk ve yaşlanma sorunlarını ele alan protokoller ve tasarım ilkeleri uygulanmıştır [111]. PV/RÜZGAR/BESS konfigürasyonlarını kullanan konut tipi NG'ler için, enerji kullanımını optimize eden, güvenlik ve güvenilirliği ön planda tutan, kullanıcı konforunu artıran talep yanıtı ve voltaj/frekans tabanlı talep tarafı yönetim stratejileri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin enerji tüketim maliyetlerini ve sera gazı emisyonlarını azaltması beklenmektedir [112-115]. NG'ler genellikle bireysel yapılar için kurulsun da, bir üniversite kampüsünde yapılan fizibilite çalışması, PV/RÜZGAR/BESS içeren bir NG'nin başarılı bir şekilde kurulumunu ve yüksek uygunlukta elektrik enerjisi çıktısı sağladığını göstermiştir [116].



Şekil 2.8 Solar pv ve bess ile oluşturulan NG uygulaması

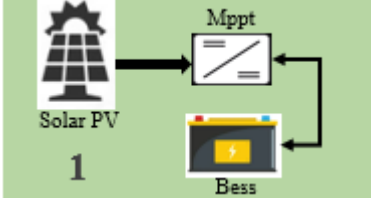
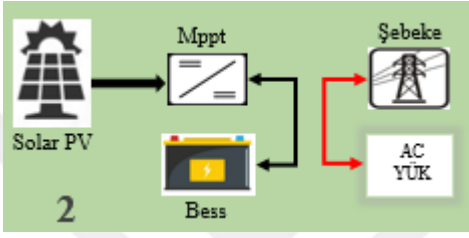
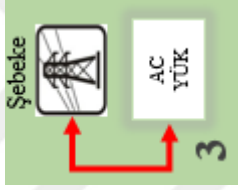
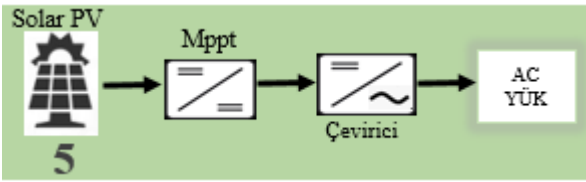
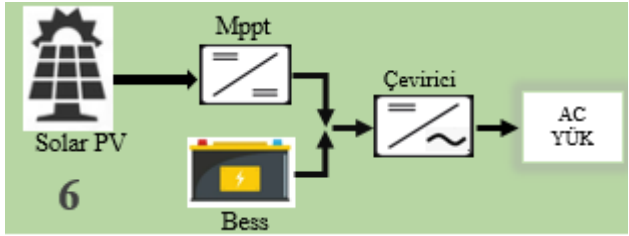
Şekil 2.8 ile temel solar NG uygulaması verilmiştir. NG, şebekeye bağlı veya ada modunda çalışabilen bir PV ve BESS'i içermektedir. Sistem, hibrit yapısı nedeniyle DC ve AC baralara sahiptir. MPPT evirici, PV gücünü DC baraya aktarmaktadır. Sistem ada modunda çalışırken güç dengesi Denklem (2.4) ile verilmiştir. Ayrıca, şebekeye bağlı sistemin güç dengesi ifadesi Denklem (2.5) ile verilmiştir.

$$P_{pv}(t) = P_{bess}(t) + P_{L_{dc}} \quad (2.4)$$

$$P_{pv}(t) + P_{grid}(t) = P_{bess}(t) + P_{L_{dc}}(t) + P_{L_{ac}}(t) \quad (2.5)$$

Bu temel yapıda sistemde meydana gelebilecek tüm enerji akışlarının olasılıkları Tablo 2.1 ile verilmiştir.

Tablo 2.1 Temel bir NG'in elektriksel enerji akış durumu

Durum	Tanımlama
	Bess, mppt üzerinden depolanıyor. NG'nin geri kalanı bekleme modunda.
	Bess, mppt üzerinden depolanıyor. AC yük, şebeke üzerinden besleniyor. NG devrede değil. Sistem, iki bağımsız sistem gibi çalışıyor.
	NG kapalı durumda AC yük şebekeden besleniyor.
	NG ada modunda, AC yük bess üzerinden besleniyor.
	NG ada modunda, AC yük PV üzerinden besleniyor.
	AC yük pv ve bess üzerinden besleniyor. Bess deşarj oluyor.

Tablo 2.1 Temel bir NG'in elektriksel enerji akış durumu (devamı)

7	AC yük pv tarafından besleniyor. Arta kalan güç ile bess şarj ediliyor.
8	AC yük bess ve şebeke tarafından besleniyor.
9	AC yük pv ve şebeke tarafından besleniyor.
10	AC yük pv, bess ve şebeke tarafından besleniyor. Bu durumda bess deşarj oluyor.
11	AC yük pv ve şebeke tarafından besleniyor. Bess, pv'den gelen ve şebekeye ileilmeyen fazla enerji ile şarj ediliyor.
12	Ac yük şebekeden gelen güç ile besleniyor. Aynı şekilde bess'de şebekeden besleniyor.

Tablo 2.1 Temel bir NG'in elektriksel enerji akış durumu (devamı)

13	Bess şebeke ve solar pv üzerinden şarj oluyor.
14	Bess enerjisi şebekeye iletiliyor.
15	Solar pv ile üretilen güç direct şebekeye iletiliyor.
16	Bess ve solar pv gücü şebekeye iletiliyor.
17	Solar pv enerjisi şebekeye gönderilirken aynı zamanda bess şarj ediliyor.

Temel bir nanoşebeke yapısında 17 farklı durum tanımlanmış olup, bu durumlar sistemin çalışma modlarını sınıflandırmak için belirli kategorilere ayrılmıştır. Bu modlar, NG'nin enerji akışı ve yönetim stratejilerine göre açıklanmaktadır. MPPT modu (Durum 1), sistemde yalnızca mppt şarj cihazının devrede olduğu ve PV'nin bataryayı şarj ettiği bir durumu ifade ederken, çevirici devrede değildir. Geçiş modu (Durum 1 ve 2), AC yüklerin şebekeden doğrudan beslendiği, çeviricinin AC güç sağlamadığı bir çalışma modudur. Çevirici modu (Durum 4-7), NG'nin adalı modda

olduğu ve AC yüklerin tamamen çevirici tarafından beslendiği durumlardır. Bu mod, şebekeden bağımsız çalışma senaryosunu temsil etmektedir. Şebeke destek modu (Durum 8-11), AC yüklerin hem çevirici hem de şebeke tarafından birlikte beslendiği, yani hem NG'nin hem de şebekenin sisteme katkıda bulunduğu bir durumu ifade eder. Şarj modu (Durum 12-13) ise çeviricinin hem DC hem de AC güç ürettiği, bu esnada bataryanın şarj edildiği moddur. Son olarak, Satış modu (Durum 14-17) NG gücünün şebekeye satıldığı ve yine enerji fazlasının depolamaya yönlendirildiği durumlardır. En temel nanoşebeke yapısında bile 17 farklı çalışma durumu varken, bu sistemlerin karmaşıklığı ve enerji yönetiminin ne kadar kritik olduğu açıkça görülmektedir. Her bir durum, sistemin farklı koşullar altında nasıl enerji yönettiğini ve hangi kaynakları önceliklendirdiğini belirler. Nanoşebekelerde enerji yönetimi, özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken yapısı göz önünde bulundurulduğunda, büyük önem taşımaktadır. Batarya şarjı, enerji fazlasının değerlendirilmesi ve şebeke ile uyumlu çalışma gibi unsurlar, sistemin verimliliğini doğrudan etkiler. Bu nedenle, enerji yönetiminin doğru kontrolü, hem maliyetleri azaltmak hem de enerji güvenliğini sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Etkin bir kontrol stratejisi olmadan, bu kadar çok farklı durumu yönetmek ve enerji kaynaklarını verimli şekilde kullanmak zor olacaktır. Bu yüzden, karmaşık tam sayılı lineer programlama (MILP) vb. gibi optimizasyon teknikleri, enerji yönetiminde doğru kararlar alınmasını sağlamak ve sistemin güvenilirliğini artırmak için önemli araçlar sunmaktadır.

3

NANOŞEBEKE TEKNOLOJİLERİNİN TÜRKİYE’DEKİ POTANSİYELİ- TEKNOEKONOMİK ANALİZLER VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

Elektrik, gelişen ve değişen dünyada kilit bir unsur olup ekonomik büyüme, istihdam yaratma, eğitime ve sağlık hizmetlerine erişim, tarımsal verimlilik, altyapı geliştirme, teknolojik ilerleme ve çevresel sürdürülebilirlik gibi birçok kritik alanı etkilemektedir. Elektriğin sürdürülebilir kaynaklardan üretilmesi, çevrenin korunması ve iklim değişikliğiyle mücadele için hayati öneme sahiptir. Elektriğe olan erişim ve kişi başına düşen kullanım miktarı Türkiye gibi gelişmekte olan bir ülke için önemli bir göstergedir. Projeksiyonlar, nüfus artışı, teknolojiye erişim ve artan refah nedeniyle küresel elektrik talebinde istikrarlı bir artış olduğunu göstermektedir [117–119]. Bu artışı karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanılması esastır; bu kaynaklar temiz, maliyet açısından etkili ve çevresel etkileri asgari düzeydedir. Türkiye Ulusal Enerji Planı [120], elektrik tüketiminin 2035 yılına kadar %3,5 oranında artarak 510,5 TWh'ye ulaşacağını öngörmektedir. Yenilenebilir enerji kaynaklarının ise kurulu kapasitedeki payının 2035 yılına kadar %52'den %64,7'ye çıkması beklenmektedir. Ayrıca, Türkiye'deki elektrikli araç sayısının Ağustos 2024 itibarıyla 137.009 adete ulaştığı, bu sayının iki yıl önceye kıyasla on kat gibi önemli bir artış gösterdiği bilinmektedir [121]. Artan elektrik enerjisi talebini karşılamak ve elektrik üretimini desteklemek amacıyla NG'ler küçük, kurulumu kolay ve umut vaat eden bir çözüm olarak öne çıkmaktadır. Temel NG konfügirasyonunda verildiği gibi güneş enerjisi gibi tek bir YE kaynağını kullanarak oluşturulabilen bu sistemler, kilovatlar düzeyinde elektrik enerjisi üretebilmektedir. Özellikle Türkiye gibi güneş açısından zengin bölgelerde, NG'lerin enterkonnekte şebekeye önemli bir katkı

sağlayabileceği değerlendirilmektedir [122]. Türkiye'nin elektrik enerjisi ihtiyacının yaklaşık %50'si halen ithalat yoluyla karşılanmaktadır bu nedenle ülkemiz enerji politikasının başlıca hedeflerinden biri, elektrik üretiminde yerli ve yenilenebilir enerji kaynaklarının payını artırmaktır [123]. Türkiye, 2015 yılında imzaladığı ve 2016'da yürürlüğe giren Paris İklim Anlaşması'yla, "net sıfır CO_2 emisyonu" ve "sera gazı (GHG) nötrlüğü" gibi temel kavramları benimsemiştir [124]. Bu taahhüt, YEK'lerin iklim değişikliğiyle mücadelede ve sürdürülebilir çevre hedeflerine ulaşmada artan önemini yansıtmakta olup, karbon emisyonlarını azaltmak ve iklim değişikliğiyle mücadele etmek amacıyla küresel toplumun çabalarıyla uyumludur. Türkiye, elektrik sektöründe yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımında önemli ilerlemeler kaydetmiş olsa da hâlâ fosil yakıtlara büyük ölçüde bağımlı bir ülke konumundadır. Net sıfır emisyon hedefine ulaşmak için, Türkiye'nin de bu hedefi belirleyen diğer ülkeler gibi özellikle elektrik sektöründe kayda değer ilerlemeler kaydetmesi gerekecektir [125]. Yukarıda belirtilen hedeflerle uyumlu bir elektrik altyapısının inşası ve yenilenebilir enerji kaynaklarının kapasitesinin kullanımı, şebekeye bağlı tek veya çoklu enerji sistemlerinin yaygın kullanımıyla mümkün olabilecektir. Türkiye'nin büyüyen nüfusu ve elektrikli araçlara (EV) olan artan ilgisi göz önüne alındığında, her bina için 5-10 kW aralığında NG'lerin kurulumu, EV şarj yüklerinin şebeke üzerindeki etkisini azaltmada önemli bir katkı sağlayacaktır. Referans [126]'de belirtildiği gibi 2020 yılında Türkiye'de yaklaşık 11.598.446 adet bina bulunmaktadır. Bu sayının yalnızca beşte biri bile potansiyel NG olarak değerlendirildiğinde, şebekeye yapılacak katkı inanılmaz derecede büyük olacaktır.

Nanoşebeke çalışmalarında, araştırmacılar genellikle yalnızca güneş enerjisine dayalı YEK'leri kullanmaktadır. Ancak, bu sistemlere küçük rüzgar türbinlerinin eklenmesiyle bir hibrit yenilenebilir enerji sistemi (HYES) oluşturmak mümkündür. Bu yaklaşım, özellikle güneş sistemlerinin elektrik üretmediği gece saatlerinde sürekli enerji üretimini sağlar ve bu da sürdürülebilirlik açısından HYES'in önemini artırır [127]. Literatürde, batarya enerji depolama sistemlerine sahip HYES'lerin, sürdürülebilirlik ve güvenilirlik açısından en uygun sistemler olduğunu tartışılmaktadır [128-131]. HYES sistemleri, kırsal alanlarda ada modunda çalışarak şebekeye erişimi olmayan bölgelerde, köyler gibi yerlerin biyoyakıt kullanımıyla elektrik erişimini kolaylaştırarak esneklik, süreklilik ve

güvenilirlik sağlar. Ayrıca, bu sistemlerin eşdeğer miktarda elektrik üreten elektrik santralleriyle karşılaştırıldığında, şebeke bağlantısına bakılmaksızın sera gazı emisyonlarının azaltılmasına ve net sıfır emisyon hedefine ulaşılmasına katkı sağlayacağı öne sürülmektedir. Bu sistemlerin, halen dış kaynaklara bağımlı olan Türkiye enerji sektörünü, tekno-ekonomik açıdan destekleyeceği de belirtilmelidir. Türkiye’de 2022 yılında, büyük rüzgar türbini ve güneş enerjisi santrallerinin merkezi gücüne eşit bir depolama sistemi kurulumu için destek mekanizması getirilmiştir [132]. Bu mekanizma, özellikle sanayi bölgeleri gibi yüksek enerji talebine sahip yerlerde depolama sistemlerinden daha fazla fayda sağlanmasına olanak tanıyacaktır. Türkiye’de, yalnızca 10 kW gücündeki çatı tipi güneş enerjisi sistemleri için FIT (feed-in tariff / şebekeye satış tarifesi), NEM (net metering / mahsuplaşma) ve vergi muafiyeti gibi teşvikler mevcuttur [133]. Bu teşvikleri güçlendirmek ve bürokratik süreçleri hızlandırmak amacıyla, lisanssız şebekeye bağlı çatı güneş enerjisi sistemleri için sınır 10 kW'dan 25 kW'a çıkarılmıştır [134]. Bu sayede, PV–BESS yapısı ile bir hane ya da binanın kendi tüketim ihtiyaçlarını karşılayacak, aynı zamanda da finansal kazanç sağlamanın yanı sıra ülkenin elektrik şebekesine katkıda bulunacak küçük ama güçlü nanoşebekeler kurulabilir [22]. Türkiye’nin yüksek güneş ve rüzgar enerjisi potansiyeli elverişli iklim kuşağı ile birlikte, bu kaynakların etkin bir şekilde kullanılmasını mümkün kılmaktadır. Türkiye, konutlarda kullanılan elektrik enerjisinin üretiminde referans [123]’de ortaya konulduğu gibi %50 oranında fosil yakıtlı santrallerle enerji üretimi sağlandığından ve üretim aşamalarında doğaya salınan emisyonları azaltma konusunda zorluklarla karşılaşırken, yeni konutlara NG entegrasyonu sürdürülebilir ve emisyonları azaltan çözümler sunabilir. Bu nedenle, NG odaklı bir yaklaşım benimseyerek, NG’lerin her bölgenin sunduğu spesifik zorluklar ve fırsatlara nasıl yanıt verebileceği araştırılabilir ve bu sayede daha dayanıklı ve sürdürülebilir bir enerji geleceği teşvik edilebilir.

3.1 Sunulan NG Sistemleri ve Literatürdeki HYES Çalışmaları

3.1.1 Sunulan Sistemler

Binalar, tükettikleri elektrik enerjisinin üretim yöntemi olarak bakıldığında günümüzde karbon emisyonlarının neredeyse %40’ını oluşturmakta ve enerji sorununa yönelik herhangi bir çözüm, binalardaki enerji kullanımını ele alması

gerektiği değerlendirilmektedir. Akıllı bina teknolojilerindeki son gelişmeler, gelecekteki binaların aktif ve enerji açısından kendine yeterli yapılar olma potansiyeline sahip olduğunu, diğer aktif binalarla veya şebekeyle bağlantılı olduğunda enerji ticareti yapabileceğini göstermektedir [20, 61]. Bu çalışmada ilk olarak Türkiye/İstanbul'un farklı ilçelerinde bulunan iki bina incelenmiştir. Bu binalardan birinde ana odak, NG konsepti kapsamında konut ve elektrikli araç yük ihtiyaçlarının değerlendirilmesi olmuştur. Burada ana amaç, standart bir binanın NG potansiyelini belirlemek amacıyla sistem on-grid durumdayken bu yüklerin optimal şekilde nasıl besleneceğini belirlemektir. Diğer tip binada ise hem konut yükleri hem de asansörler, EV şarjı, bahçe sulama pompaları ve ortak alan aydınlatması gibi ek ihtiyaçlar bulunmaktadır ve bu binaya gerekli enerjiyi sağlamak için bir NG sistemi tasarlanmıştır. Her iki sistem içinde ortak amaç optimum teknik ve ekonomik çalışma koşullarını belirlemektir. Şekil 3.1 ile bu NG binalarının konumları verilmiştir.



Şekil 3.1 Sunulan NG yapılarının konumları ve çatı tiplerinin gösterimi

NG_1 olarak tanımlanan yapı, gölge etkisi olmayan, 80 m^2 çatı üzerine kurulu PV–ŞEBEKE bileşenlerinden oluşan bir NG'dir. Diğer taraftan, NG_2 olarak tanımlanan yapı, 800 m^2 çatı üzerine kurulu, PV–WT–ŞEBEKE yapısına sahip NG'yi temsil etmektedir. Türkiye'de farklı konumlar için HOMER (Hybrid Optimization Model for Electric Renewables) programı kullanılarak çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Ancak bu çalışmaların hiçbiri EV yüklerini sisteme entegre etmemiştir. Bu tez çalışması kapsamında yapılan diğer çalışmada, Türkiye'nin çeşitli bölgelerinde bulunan dört binayı incelemekte ve HOMER yazılımı kullanılarak analiz etmektedir. Çalışmanın amacı, incelenen NG'ler için net bugünkü maliyet (NPC)

ve seviyelendirilmiş enerji maliyeti (LCOE) gibi faktörler göz önünde bulundurularak en avantajlı teknik ve ekonomik çalışma koşullarını belirlemektir. Şekil 3.2 ile klasik apartman tarzı konut yerleşkeleri için yapılan tekno ekonomik analizlerin ve optimizasyon çalışmalarının gerçekleştirildiği NG'lerin konumlarını göstermektedir. Ele alınan binaların, gölge etkisi olmayan 80 m² çatı alanına sahip olduğu varsayılmıştır.



Şekil 3.2 Sunulan NG yapılarının konumları

Yapılan bu çalışmada PV-BESS-ŞEBEKE ve konfigürasyonundan oluşan temel çatı tipi NG yapısı bütün bölgeler için analiz edilmiştir. Bu çalışmada incelenen apartman tipi konut binaları, Türkiye'nin coğrafi çeşitliliği dikkate alınarak, batıdan doğuya ve kuzeyden güneye uzanan bölgelerden seçilmiştir. İzmir, Mersin, Sinop ve Iğdır illeri örnek şehirler olarak belirlenmiştir. Çalışmanın ana odağı, NG sistemlerinin rekabetçiliğini artırmak amacıyla, makul bir NPC ve düşük LCOE hedefleyen dengeli bir NG tasarımını gerçekleştirmektir. Araştırma, NG bileşenlerinin boyutlandırılması, kapasite planlaması, farklı sistem konfigürasyonlarının incelenmesi ve maliyet-fayda analizi yapılarak optimal ekonomik koşulların belirlenmesini kapsamaktadır. Özellikle NG sistemlerinin yerel enerji üretim kapasitelerinin doğru bir şekilde hesaplanabilmesi, çatı tipi güneş enerjisi sistemleri için bölgeye özgü sıcaklık ve radyasyon verilerinin detaylı bir şekilde analiz edilmesine dayanmaktadır. Tablo 3.1 ile Türkiye ve diğer bazı ülkelerde gerçekleştirilen son çalışmaları özetlemektedir. Bu çalışmalar, konut binaları, bir üniversite kampüsü binası, fabrikalar ve hatta bir kasaba gibi çeşitli elektrik yüklerini içermektedir. Bu çalışmalar HYES ve yenilenebilir enerji kaynakları kullanan

farklı sistemler olarak sınıflandırılrsa da, yapılan bütün çalışmalar NG bağlamında değerlendirilmemiştir.

Tablo 3.1 Türkiye ve diğer ülkelerde son yıllarda yapılan HYES ve NG çalışmaları

Ref.	Yıl	Mod	Türü	Yük Türü	Talep Güç (kWh/yıl)	NPC (\$)	LCOE (\$/kWh)
135	2022	On-grid	PV/ŞEBEKE	Apartman	6546	5974	0,034
136	2023	On-grid	PV/WT/BESS/ŞEBEKE	Endüstri B.	8760000	9,46 M	0,073
137	2019	On-grid	PV/WT/DG/BESS/ŞEBEKE	Endüstri B.	8773505	135 M	0,119
138	2021	Off-grid	PV/WT/BESS	Konut B.	54750000	176 M	0,182
139	2022	Off-grid	PV/BESS	Tekstil Fab.	25721412	151,654 M	0,012
140	2022	Off-grid	PV/WT/DG/BESS	Şarap Fab.	3832,5	12458	0,264
141	2021	On-grid	PV/DG/BESS/ŞEBEKE	Fabrika	365000	7,81 M	0,0457
142	2019	On-grid	PV/WT/BESS/ŞEBEKE	Okul	44453	42837	-
143	2021	Off-grid	PV/WT/BESS	Sulama	27466	99768	0,172
144	2023	Off-grid	PV/DG	Kırsal Ev	2920	16157	0.4280
145	2022	Off-grid	PV/HFC/BESS	Kırsal Topl.	257284,85	7,01 M	0,244
146	2020	Off-grid	WT/FC/BESS	Konut	3650	59611	1,278
147	2022	On-grid	PV/FC/ŞEBEKE	Konut	3759,5	10166	0,23
148	2020	On-grid	WT/BG/BESS	Konut	1679	14507	0,588
149	2023	On-grid	PV/WT/ŞEBEKE	Kırsal Yük	253440	6,92 M	0,0715
150	2023	Off-grid	PV/WT/DG/BESS	Telekom	31025	85673	0,214
151	2024	Off-grid	PV/WT/DG/BESS	Konut	825995	889314,25	0,13
152	2024	On-grid	PV/BESS	Konut	15000	12814	0,061
153	2024	Off-grid	PV/WT/BIO/DG/BESS	Ziraat	506200	1782602	0,26
154	2023	On-grid	PV/WT/ŞEBEKE	Konut	15695	36457	0,153

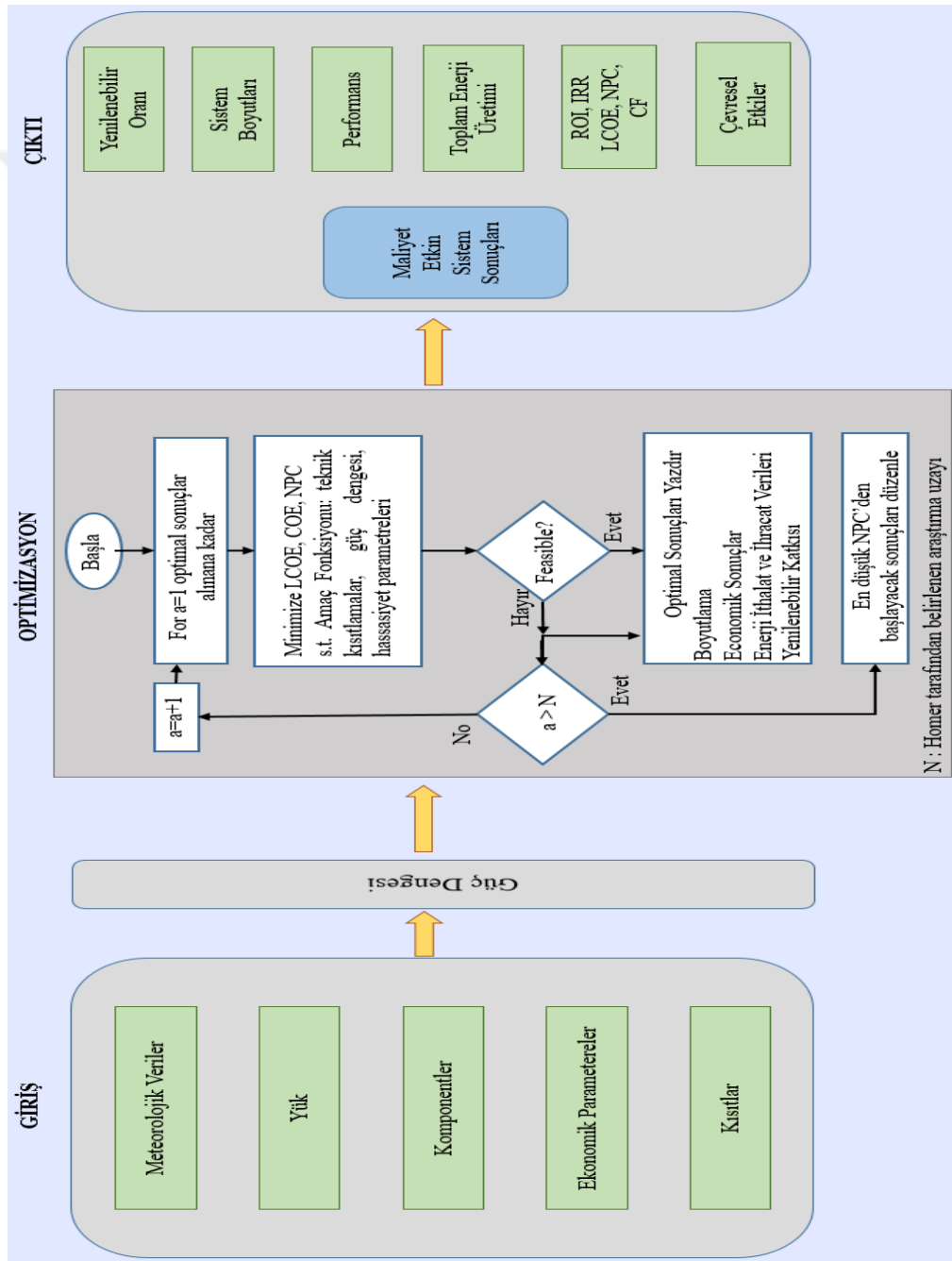
Tablo 3.1’de yer alan araştırmalar, genellikle en düşük birim enerji maliyeti ve net bugünkü maliyete sahip seçenekleri incelemiş olmasına rağmen, NG yapıları içerisinde YEK veya HYES’lere yönelik kapsamlı tekno-ekonomik analizlerin eksik olduğu gözlemlenmektedir. Bu çalışma, NG ve HYES yapıları üzerine yapılan güncel

çalışmaları ele alarak, söz konusu boşluğu gidermeyi hedeflemektedir. Çalışmanın bu bölümünde HOMER Grid yazılımı gibi geniş çapta kabul gören bir simülasyon ve optimizasyon aracı kullanılarak optimizasyon çalışmaları yürütülmüştür. Bu sayede, NG yapıları için hem teknik hem de ekonomik açıdan derinlemesine analizler sunulmuş, bu analizlerin literatüre önemli katkılar sağlaması amaçlanmıştır. Türkiye'de özellikle nanoşebeke yapılarının entegrasyonuna odaklanan bilimsel çalışmaların yetersizliği göz önünde bulundurulduğunda, İstanbul'da iki konut yapısında gerçekleştirilen bu vaka çalışmaları ve Türkiye'nin farklı coğrafi bölgelerinde analizi yapılan NG yapıları için ve bunların entegrasyonunun teknik ve ekonomik etkilerini detaylandırarak bu alandaki araştırma açığının kapatılması amaçlanmıştır. Çalışma, Türkiye'nin enerji ihtiyaçlarına ve sürdürülebilirlik hedeflerine yönelik özel çözümler sunmakta ve bu sonuçların, ülke genelinde enerji verimliliği ile sürdürülebilirlik uygulamalarının iyileştirilmesi adına önemli bir referans kaynağı olacağı öngörülmektedir.

3.1.2 Homer Parametreleri ve Sistemlerin Arka Planı

HOMER, yenilenebilir ve konvansiyonel enerji kaynaklarının, depolama sistemlerinin ve şebeke entegrasyon seçeneklerinin modellenmesi ve değerlendirilmesi için kapsamlı bir platform sunarak, enerji sistemlerinin tasarım ve optimizasyonu açısından önemli bir programdır. Yazılımın önemi, kullanıcıların maliyetleri minimize etmesine, enerji verimliliğini artırmasına ve çevresel etkileri azaltacak konfigürasyona sahip seçenekleri sunmaya olanak tanınmasıdır. Bununla birlikte, enerji talebi ve güvenilirlik gereksinimlerini karşılarken sürdürülebilir ve maliyet-etkin enerji çözümlerine ulaşılmasının sağlanması, bu programı işletmeler, araştırmacılar ve politika yapıcılar için değerli bir araç haline getirmektedir [155-158]. Şekil 3.3 ile NG sistemlerinin optimal yapılandırma ve tasarımı için yapılan modelleme ve optimizasyonun akış diagramı sunulmaktadır. Optimizasyon aşamasını besleyen girdi kısmında, vaka çalışmasına ait elektrik tüketim talebi, meteorolojik veriler, seçilen teknolojiler ve bu teknolojilere dair teknik kısıtlar yer almaktadır. Ayrıca, her bir teknolojiye ilişkin sermaye maliyetleri, bakım ve işletme maliyetleri, yedekleme maliyetleri gibi fiyatlandırma bilgileri de bu bölümde değerlendirilmiştir. Optimizasyon aşamasında, HOMER, en ekonomik ve çevresel olarak sürdürülebilir çözümü belirlemek için bir dizi enerji sistemi bileşenini ve konfigürasyonunu dikkatlice inceler. HOMER, sistem parametrelerini ince ayar

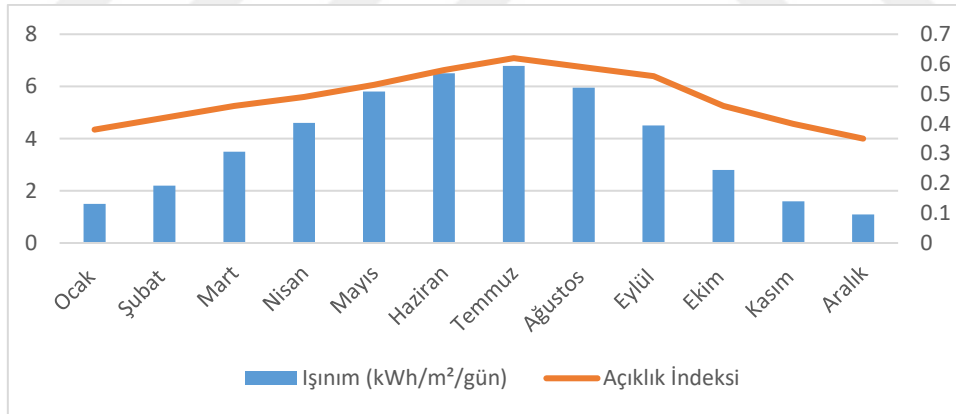
yaparak, nihai tasarımın maliyetinin en aza indirilmesi, güvenilirliğin en üst düzeye çıkarılması ve çevresel etkinin azaltılması gibi belirli kriterleri karşıladığından emin olmak için yinelemeli bir süreç uygular. Bu yinelemeli yaklaşım, kullanıcıların geniş bir olasılık yelpazesini keşfetmelerine ve nihayetinde kendilerine özgü ihtiyaç ve kısıtlamaları karşılayan enerji sistemini bulmalarına olanak tanır. Optimizasyon aşamasında HOMER, entegrasyon için özel olarak tasarlanmış, "türev içermeyen" bir optimizasyon algoritması olan HOMER optimizer'ı kullanarak optimizasyon süreçlerinde hassasiyeti artırır.



Şekil 3.3 Sunulan optimizasyon çalışmasının akış diagramı

3.1.3 Sıcaklık Rüzgar ve Işınım Verileri

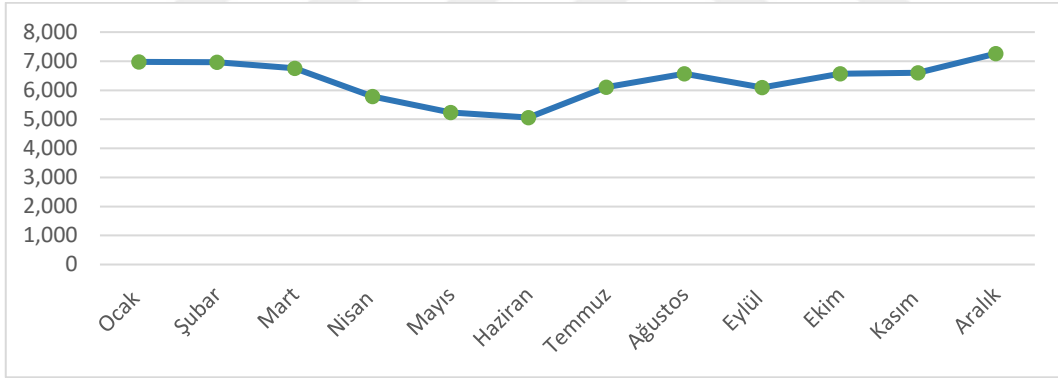
Bu çalışmanın amacı, bir nanoşebeke için yenilenebilir enerji sistemleri ve hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin optimal boyutlandırılması ve yapılandırılmasını belirlemektir. Çalışmanın temel odak noktası, makul bir NPC, uzun vadeli işletme ve bakım maliyetleri ile rekabet gücünü artırmak amacıyla düşük bir LCOE gibi faktörleri göz önünde bulundurarak dengeli bir nanoşebeke tasarımına ulaşmaktır. Araştırma, güneş panelleri ve rüzgar türbinleri gibi bileşenlerin boyutlandırılması ve kapasite planlamasını kapsamaktadır. Farklı enerji kaynakları ve depolama teknolojileri ile çeşitli sistem yapılandırmaları incelenmekte ve maliyet-fayda analizleri yapılarak ekonomik değerlendirmeler gerçekleştirilmektedir. Ayrıca, doğru enerji üretim hesaplamaları, fotovoltaik ve HYES sistemleri için uygulama sahalarının spesifik rüzgar, ısıtım ve sıcaklık özelliklerinin anlaşılmasına dayanmaktadır. NASA'nın küresel enerji kaynağı tahmini (POWER) veritabanından alınan güneş ısıtım ve rüzgar verileri çalışmalarda kullanılmıştır. Belirtilen konumda, hem NG_1 hem de NG_2 yıllık ortalama günlük 3.94 kWh/m²/gün güneş ısıtımını kaydetmektedir. Şekil 3.4 ile yıl boyunca alınan güneş ısıtım ve açıklık indeksine ilişkin bilgiler verilmiştir.



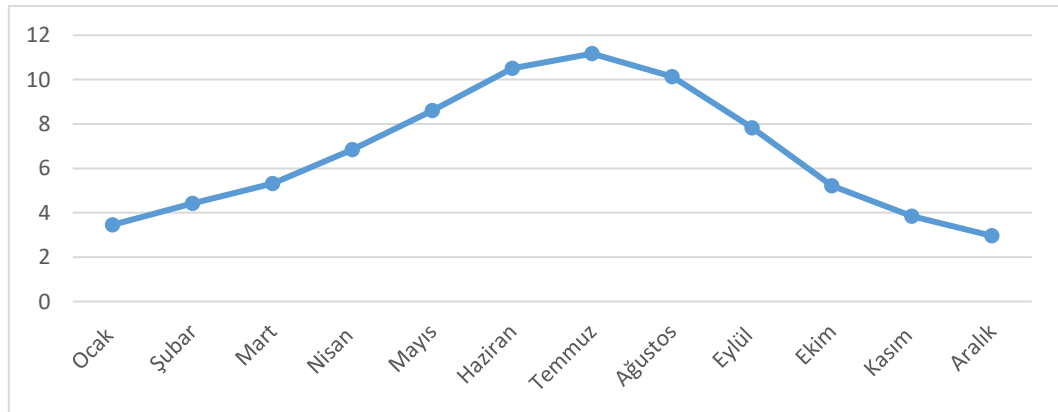
Şekil 3.4 Güneş ısıtım ve açıklık indeksi değerleri

Açıklık indeksi, atmosferin açıklığını temsil eder ve yüksek olduğunda havanın güneşli olduğu bilinmektedir. Açıklık indeksi 0,3 ile 0,8 arasında olan bölgeler, güneşli ve açık gökyüzüne sahip olarak kabul edilir [159]. En düşük açıklık indeksine sahip dönemin Aralık ve Ocak aylarına denk geldiği gözlemlenmiştir. Benzer şekilde en yüksek açıklığın olduğu dönem ise yaz ayları olduğu görülmüştür. Şekil 3.5 yılın farklı aylarında rüzgar hızlarının nasıl değiştiğini göstermektedir. Bu veri, NG sistemlerindeki rüzgar türbinlerinin tasarım ve

işletimini optimize etmek amacıyla kullanılmaktadır. İlgili sahada, ölçeklendirilmiş yıllık ortalama rüzgar hızı 6,33 (m/s) olarak kaydedilmiştir ve en yüksek rüzgar hızları genellikle kış aylarında görülmektedir. Şekil 3.6 çalışmanın yapıldığı lokasyondaki aylık güneşlenme sürelerini göstermektedir. Bölgenin en yüksek güneş ışımasını yaz aylarında aldığı görülmektedir. Benzer şekilde, bölge en düşük güneş ışımasını kış aylarında almakta olup, Aralık ve Ocak aylarında sırasıyla 2,96 ve 3,46 saatlik güneşlenme süreleri kaydedilmiştir [160]. Bu çalışmada, NG_1 için yalnızca konut yükleri ve elektrikli araç yükleri dikkate alınarak, PV/ŞEBEKE, PV/BESS/ŞEBEKE, PV/WT/ŞEBEKE ve PV/WT/BESS/ŞEBEKE gibi farklı durumlar değerlendirilmiş ve optimal sonuçlar araştırılmıştır. NG_2 için ise havuz, sulama motorları, çevre aydınlatması ve EV şarj istasyonları yükleri dahil edilerek PV/ŞEBEKE, PV/BESS/ŞEBEKE, PV/WT/ŞEBEKE ve PV/WT/BESS/ŞEBEKE konfigürasyonları oluşturulmuş ve sistem işletimini ayrıntılı bir şekilde incelemek için duyarlılık analizleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.7 bu çalışmada değerlendirilecek NG yapılarını göstermektedir. Her biri ilgili çatıya kurulan sekiz farklı NG yapısı, farklı senaryolar (case) dikkate alınarak değerlendirilmiştir.



Şekil 3.5 NG_1 ve NG_2 için ortalama rüzgar hızı değerleri



Şekil 3.6 NG_1 ve NG_2 için ortalama güneşlenme süreleri

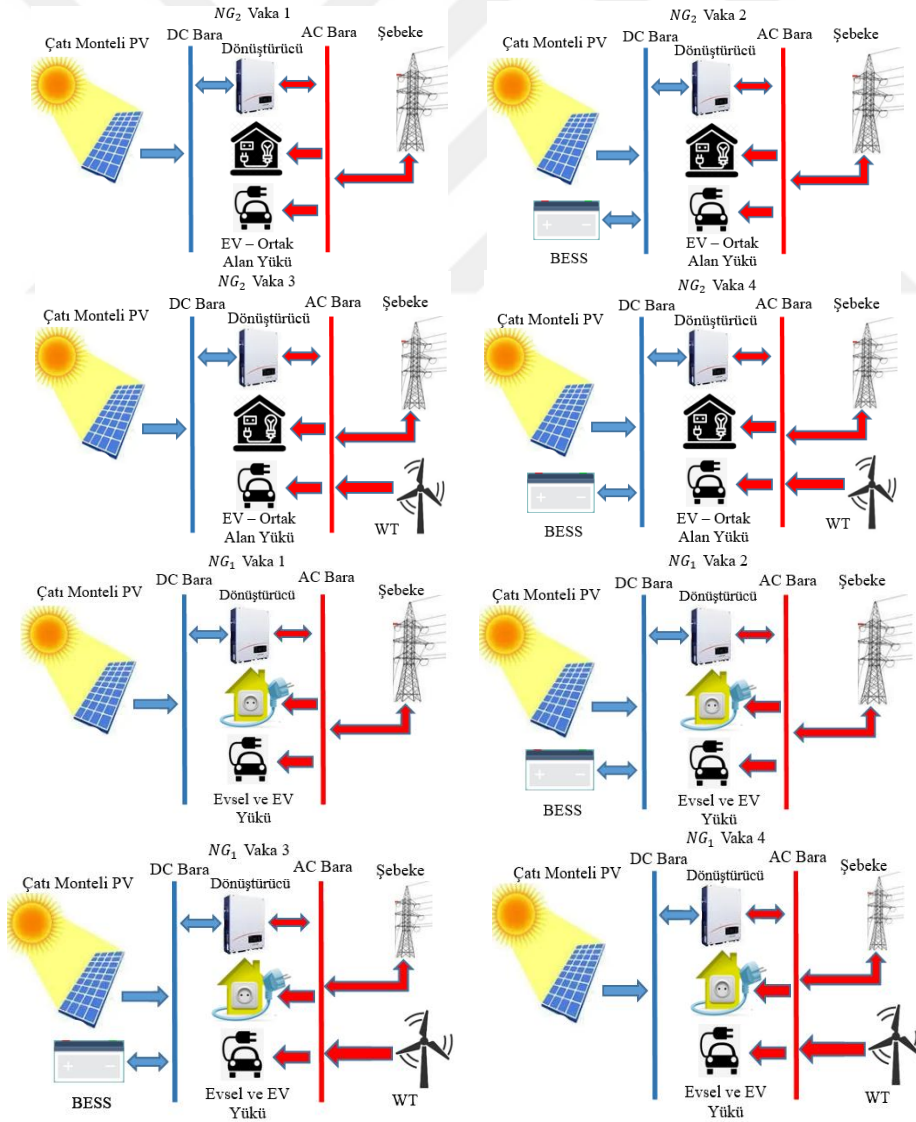
Tablo 3.2 ile Şekil 3.2 ile konumları verilen NG'lerin bulunduğu lokasyonlarda ortalama aylık ışınlım, açıklık indeksi ve sıcaklık değerlerini verilmiştir. Tüm konumlar için en düşük açıklık indeksine sahip dönemin kış aylarında gerçekleştiği gözlemlenmiştir. Buna karşılık, Temmuz ve Ağustos aylarında havanın açık ve güneşli olduğu çıkarımı yapılabilir. Ayrıca, Mersin ve İzmir'in en yüksek günlük sıcaklıklara sahip konumlar olarak kaydedildiği belirtilmiştir. Diğer taraftan, Iğdır'ın ise en düşük sıcaklıklara sahip konum olduğu gözlemlenmiştir. Tablo 3.3 çalışılan konumlar için günlük güneşlenme sürelerini göstermekte olup, yaz aylarında en yüksek güneş ışınlımının meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Buna karşılık, Ocak ve Aralık aylarında ise en düşük güneş ışınlımının gözlemlendiği belirtilmiştir [140].

Tablo 3.2 Verilen konumların meteorolojik verileri

Aylar	SINOP			MERSİN			İZMİR			IGDIR		
	Açıklık İndeksi	Aylık Işınım kWh/m ²	Aylık Ortalama Sıcaklık °C	Açıklık İndeksi	Aylık Işınım kWh/m ²	Aylık Ortalama Sıcaklık °C	Açıklık İndeksi	Aylık Işınım kWh/m ²	Aylık Ortalama Sıcaklık °C	Açıklık İndeksi	Aylık Işınım kWh/m ²	Aylık Ortalama Sıcaklık °C
Ocak	0.375	1.46	6.66	0.475	2.27	8.57	0.48	2.17	11.27	0.522	2.22	-2.51
Şubat	0.427	2.27	5.84	0.514	3.15	9	0.514	3.03	11.09	0.545	3.08	-0.81
Mart	0.482	3.55	6.84	0.551	4.41	11.65	0.566	4.43	12.44	0.531	4.05	3.91
Nisan	0.499	4.72	9.98	0.548	5.39	15.48	0.597	5.82	15.3	0.504	4.85	10.01
Mayıs	0.558	6.12	14.42	0.579	6.41	19.89	0.658	7.28	19	0.526	5.8	14.94
Haziran	0.62	7.19	19.49	0.644	7.45	24.47	0.72	8.34	23.09	0.589	6.83	20.45
Temmuz	0.652	7.34	22.68	0.668	7.55	27.8	0.729	8.23	25.18	0.601	6.78	24.03
Ağustos	0.635	6.35	23.42	0.659	6.77	28.13	0.719	7.34	25.34	0.615	6.22	23.76
Eylül	0.597	4.81	20.31	0.638	5.5	25.28	0.692	5.86	22.84	0.622	5.16	18.87
Ekim	0.506	2.99	16.49	0.577	3.85	20.75	0.63	4.07	19.22	0.58	3.61	11.92
Kasım	0.424	1.78	12.32	0.505	2.56	14.86	0.531	2.56	15.54	0.505	2.3	4.63
Aralık	0.355	1.23	8.69	0.447	1.95	10.3	0.443	1.82	12.52	0.465	1.78	-0.84

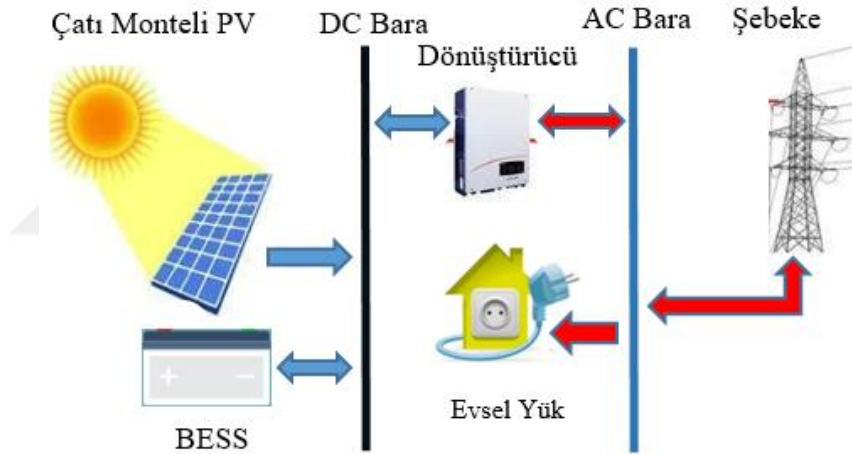
Tablo 3.3 Verilen konumların aylık ortalama güneşlenme verileri

AYLAR	SINOP	MERSİN	İZMİR	IGDIR
Ocak	4.16	4.87	4.92	3.74
Şubat	5.82	5.83	6.21	4.95
Mart	6.23	7.17	7.39	6.14
Nisan	8.1	8.19	8.5	7.1
Mayıs	8.81	9.89	10.26	8.35
Haziran	10.77	11.18	12.22	10.37
Temmuz	10.83	11.59	12.34	11.06
Ağustos	9.84	11.12	11.6	10.73
Eylül	8.66	10.16	10.25	8.66
Ekim	6.21	7.9	8.04	6.88
Kasım	5.41	6.05	5.74	5.17
Aralık	4	4.45	4.61	3.44



Şekil 3.7 NG_1 ve NG_2 için çalışılan durumların gösterimi

Şekil 3.7 ile sunulan şemalar, sekiz farklı NG vaka çalışmasının konfigürasyonlarını göstererek, yenilenebilir enerji entegrasyon stratejilerini, enerji depolama sistemlerini ve yük yönetimi yaklaşımlarını vurgulamaktadır. Her bir nanoşebeke, bir dönüştürücü aracılığıyla DC bara bağlantısı yapılan çatı montajlı PV paneller ile donatılmıştır. Farklı vakalar, enerji depolama sistemleri, rüzgar türbini entegrasyonu, elektrikli araç yükleri ve ev ihtiyaçlarını karşılamak için şebeke bağlantısını içermektedir. Bu vaka çalışmalarında, yenilenebilir enerji kaynaklarının etkili bir şekilde kullanımı ve enerji depolama çözümlerinin entegrasyonu ile şebekeden enerji alımının nasıl optimize edilebileceği analiz edilmiştir. Şemadaki her bir konfigürasyon, enerji arzı ve talebi arasında denge kurmak için farklı kombinasyonlarla PV, BESS ve WT'nin nasıl entegre edilebileceğini göstermektedir. Her NG için dört adet vaka çalışması ile optimum çözüm aranmış ve sonuçları tartışılmıştır.



Şekil 3.8 NG_3 - NG_4 - NG_5 - NG_6 için çalışılan NG yapısı

Şekil 3.8 ile NG_3 - NG_4 - NG_5 - NG_6 için yapılan dört NG vaka çalışmasının elektriksel konfigürasyonu verilmiştir. Her bir NG, çatı montajlı PV paneller ve batarya enerji depolama sistemleri ile donatılmış olup, dönüştürücü aracılığıyla şebeke entegrasyonu sağlanmıştır. Bu çalışmalarda, enerji arzı ve talebi göz önünde bulundurularak tüm sistemler NPC ve LCOE açısından optimize edilmiştir. Sonuçlar, en düşük maliyetli ve sürdürülebilir yapılandırmaların nasıl elde edilebileceğini göstermektedir.

3.1.4 Sistemlerin Matematiksel Arkaplanı ve Optimizasyon Metodolojisi

Bu bölümde, güneş PV, rüzgar türbinleri, batarya depolama, dönüştürücüler ve şebeke için matematiksel modeller sunulmaktadır. Ayrıca, NPC ve LCOE gibi

ekonomik göstergeler ile maliyet etkin ve verimli sistem performansını sağlamak için kullanılan optimizasyon metodolojisi açıklanmaktadır. Bu bileşenlerin entegrasyonu, enerji arz ve talebini dengelemeyi ve sistem maliyetlerini ile şebekeye bağımlılığı en aza indirmeyi amaçlamaktadır.

3.1.4.1 Güneş Panelleri

PV paneller, güneş ışınımını kullanarak elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerdir. PV panellerin güç çıkışı; gelen güneş ışınımı, panelin sıcaklığı ve verimiyle birlikte güç düşüş faktörü gibi birçok değişkene bağlıdır. Güç düşüş faktörü (derating factor), PV modülünün teorik olarak beklenen ideal performansından kaynaklanan çeşitli kayıp nedenlerini hesaba katmak ve bu kayıpları niceliksel olarak ifade etmek için kullanılan bir skaler faktördür [161-162]. HOMER yazılımında, fotovoltaiik güç çıkışı Denklem (3.1) ile hesaplanmaktadır [163].

$$P_{pv} = Y_{pv} D_f \left\{ \frac{G_T}{G_{T,stc}} \right\} [1 + \alpha_p (T_c - T_{c,stc})] \quad (3.1)$$

Bu çalışmada, standart test koşulları altında PV dizisinin çıkış gücü Y_{pv} , güç düşüş faktörü oranı D_f ile temsil edilmektedir. G_T ve $G_{T,stc}$ sırasıyla nominal ve STC (standart test koşulları) koşullarındaki gelen güneş ışınımını kW/m² cinsinden ifade etmektedir. α_p sıcaklık katsayısını temsil ederken, T_c ve $T_{c,stc}$ sırasıyla nominal ve STC koşulları altındaki PV hücre sıcaklıklarını göstermektedir. Bu çalışmada, tüm tasarlanan nanoşebeke sistemlerinde, 45°C nominal hücre sıcaklığına sahip, %17.49 verimli, 340 W gücündeki Canadian Solar CS6U-340M monokristalin düz plaka paneller (1960 x 992 x 40 mm boyutlarında) kullanılmıştır. Her bir kW'lık PV paneli için birim fiyatını günümüz piyasa koşullarında 12.500 TL olduğu görülmüştür. Ancak çalışmalar PV sistemlerindeki yeni gelişmelerle birlikte bu fiyatın önemli ölçüde düşeceğini öngörmektedir [164]. Ayrıca, kirlenme, gölgelenme, kar örtüsü, kablo kaybı, yaşlanma vb. nedenlerle oluşan kayıpları dikkate alan güç düşüş faktörü %88 olarak alınmış ve PV panellerinin ömrü 25 yıl olarak belirlenmiştir.

3.1.4.2 Rüzgar Türbinleri

Önerilen NG modellerinde kullanılan rüzgar türbinleri, rüzgar gücüyle elektrik enerjisi elde edilmesini sağlamaktadır. Türbin kanatları, elektrik üretimini gerçekleştiren jeneratöre bağlı tahrik milini döndürerek enerji üretir. Mevcut

çalışmada, 8 m² süpürme alanına ve 3.2 m rotor çapına sahip küçük 1 kW Aeolos türbinleri kullanılmıştır. Küçük fakat güçlü rüzgar türbinlerinin seçilmesinin ana nedeni, sunulan NG çalışmaları için uygun olmaları ve daha düşük bakım gereksinimlerine sahip olmalarıdır. Bu rüzgar türbininin birim fiyatı 116.000 TL olarak belirlenmiştir. Türbinin ömrü 20 yıl olarak varsayılmış ve jeneratör verimi 0.96 olarak alınmıştır. Mekanik rüzgar gücü P_{mec} Denklem (3.2) ile ifade edilmektedir [165].

$$P_{mec} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V_w^3 \quad (3.2)$$

3.1.4.3 Enerji Depolama Sistemleri

BESS'ler NG'lerde enerji depolama çözümü olarak önemli bir rol oynar. YEK'lerde üretilen fazla enerjiyi depolarak kesintisiz güç sağlar ve enerji arz-talep dalgalanmalarına karşı tampon görevi görerek kararlılığı artırır ve enerji yönetim sistemleriyle entegre olarak yenilenebilir kaynakların kullanımını optimize edebilirler. Acil durumlarda yedek güç sağlayarak NG'nin dayanıklılığını artırır ve sürdürülebilir enerji entegrasyonuna katkıda bulunur. BESS'in şarj ve deşarj süreci Denklem (3.3) ile verilmektedir.

$$P_{BESS} = \eta P_{bess,chr} \tau_{bess,chr} \quad (3.3)$$

Bu denklemde $P_{bess,chr}$ BESS'in şarj gücünü, η şarj verimliliğini ve $\tau_{bess,chr}$ BESS'in saat cinsinden şarj süresini ifade etmektedir. Bu çalışmada, 1 kW kapasiteli, rack-mounted (raf tipi) Li-On batarya enerji depolama sistemi kullanılmıştır. Raf tipi tasarım, ek BESS gerektiğinde sisteme kolayca eklenebilme avantajı sunar ve bakım ile onarımı basitleştirir. Bir birimin fiyatı 14.200 TL olarak alınmış, kullanım ömrü 7 yıl olarak belirlenmiş ve minimum şarj durumu %20 olarak kabul edilmiştir.

3.1.4.4 Dönüştürücüler

NG sistemlerinde dönüştürücüler, üç temel enerji dönüşümünü sağlar. İlk olarak, fotovoltaik panellerden üretilen DC güç, şebeke ve yüklerle uyumlu hale getirilerek AC'ye dönüştürülür. İkinci olarak, rüzgar türbinlerinden gelen AC güç, DC bara üzerinde DC'ye çevrilir ve yük ihtiyacı karşılandıktan sonra BESS'i şarj eder. Son olarak, BESS'ten gelen DC enerji, yükleri beslemek için AC'ye dönüştürülür,

böylece kesintisiz güç iletimi sağlanmış olur [166]. Dönüştürücü kapasitesi Denklem (3.4) ile belirlenir [167].

$$C_{conv} = \frac{L_{AC,DC}}{\eta} \sigma_s \quad (3.4)$$

Bu denklemde, $L_{AC,DC}$ en yüksek AC veya DC yükü, η dönüştürücünün verimliliğini ve σ_s güvenlik faktörünü temsil eder. Bu çalışmada, birim maliyeti 6700 TL olan 1 kW'lık genel bir dönüştürücü tercih edilmiştir. Dönüştürücünün ömrü 15 yıl ve verimliliği %95 olarak alınmıştır.

3.1.4.5 Şebeke Elektrik Fiyatları

Bu çalışmada, sunulan bütün NG konfigürasyonları sürekli olarak on-grid olarak çalışmaktadır. Bütün nanoşebeke yapılarında yükler beslendikten sonra, fazla enerji şebekeye ihraç edilir. Benzer şekilde, NG içinde üretilen enerji yük talebini karşılayamazsa, enerji şebekeden ithal edilir. Türkiye Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu Temmuz 2024 fiyatlarına göre şebekeden enerji alış ve satış fiyatları sırasıyla 1,85 TL ve 0,68 TL birim enerji başına belirlenmiştir [168].

3.1.4.6 Ekonomik İndisler

Bu tezde, NG sistemlerinin tekno-ekonomik değerlendirmesi için NPC ve LCOE kullanılmaktadır. NPC, yaşam döngüsü maliyeti olarak da adlandırılır ve bir projenin ömrü boyunca meydana gelen kurulum ve işletme maliyetlerinin bugünkü değerini, aynı dönem boyunca elde edilen gelirlerin bugünkü değerinden çıkararak hesaplar. HOMER Grid yazılımı, NPC hesaplamasını Denklem (3.5) ile gerçekleştirmektedir [169-170].

$$NPC = \frac{C_a}{CRF_t^i} \quad (3.5)$$

Burada, CRF (sermaye geri kazanım faktörü), C_a ise sistemin yıllık maliyeti olup, Denklem (3.6) ve Denklem (3.7) ile hesaplanmaktadır [171]. CRF, sermaye yatırımının yıllık maliyetini belirlemek için kullanılır ve belirli bir dönem boyunca yapılan yatırımın geri ödemesini temsil eder. Sistemin yıllıklandırılmış maliyeti C_a projedeki bileşenlerin toplam maliyetini belirli bir faiz oranı ve sistemin kullanım ömrü boyunca yayarak hesaplar [122].

$$C_a = C_{capex} + C_{repl} + C_{o-m} + C_{opex} - C_{salvage} \quad (3.6)$$

$$CRF_{i,N} = \frac{i(i+1)^N}{(i+1)^N - 1} \quad (3.7)$$

Burada, C_{repl} bileşenlerin yenileme maliyeti, C_{o-m} işletme ve bakım maliyeti, C_{capex} sistemin sermaye maliyeti, C_{opex} sistemin işletme maliyeti, $C_{salvage}$ ise bileşenin kullanım ömrünün sonunda kalan değeri veya geri kazanılabilir değerini temsil etmektedir. LCOE, kullanılan enerji başına kWh cinsinden ortalama maliyet olarak tanımlanır. LCOE, enerjinin kullanım ömrü boyunca tüm maliyetleri geri kazanmak için satılması gereken minimum fiyatı gösterir ve farklı enerji sistemlerinin maliyet açısından karşılaştırılmasında önemli bir ölçüt sağlar. LCOE, HOMER Grid algoritması tarafından üretilen yıllık maliyet ile üretilen kullanılabilir elektrik miktarı karşılaştırılarak hesaplanır. LCOE, Denklem (3.8) ile hesaplanabilmektedir [172-173].

$$LCOE = \frac{C_{capex} + CRF + C_{opex}}{E_{gen}} = TL/kW \quad (3.8)$$

Burada E_{gen} yıllık elektrik üretimini temsil eder. Gerçek iskonto oranının uygulanması, tek seferlik maliyetlerin yıllıklandırılmış maliyetlere dönüştürülmesini sağlar. HOMER Grid, gerçek iskonto oranını i elde etmek için enflasyon oranı f ve nominal iskonto oranını i' kullanır. Bu oran, Denklem (3.9) ile verilmiştir [174].

$$i = \frac{i' - f}{1 + f} \quad (3.9)$$

Türkiye Cumhuriyet Merkez Bankası'nın verilerine göre [175], son yirmi yıllık dönemde ortalama yıllık enflasyon oranı %14,98 olarak gerçekleşmiştir. Bu çalışmada, 25 yıllık öngörülen proje ömrü için, Türkiye'deki enflasyon oranının %15 olacağı varsayılmaktadır. Türkiye'deki ortalama iskonto oranı ise son 12 yıllık veriler temelinde %12,31 olarak belirlenmiştir. Ancak, bu çalışmada uzun vadeli projeksiyon dikkate alınarak daha muhafazakar bir yaklaşım benimsenmiş ve Türkiye için önümüzdeki 25 yıllık süreçte ortalama %9,5'lik bir iskonto oranı öngörülmüştür. Bu varsayımlar, ekonomik analizlerdeki belirsizlikleri minimize

etmek ve gelecekteki maliyet hesaplamalarını daha güvenilir hale getirmek amacıyla kullanılmaktadır.

3.1.5 Optimizasyon Metodolojisi

Bu bölümde verilen vaka çalışmalarının optimizasyonu için, ileri düzey matematiksel optimizasyon algoritmalarını kullanan HOMER Grid yazılımından faydalanılmıştır. HOMER Grid, iki optimizasyon seçeneği sunmaktadır. Bunlar, arama uzayındaki tüm olası sistem yapılandırmalarını sistematik olarak değerlendiren “grid search” (ağ arama) algoritması ve türev gerektirmeyen, maliyet etkin çözümler sunan yenilikçi HOMER Optimizasyon algoritmasıdır. Optimizasyon süreci; sistem yapılandırması, optimizasyon hedeflerinin belirlenmesi, kısıtların tanımlanması, uygun algoritmanın seçilmesi, çalıştırma ve net bugünkü değer ile en düşük enerji maliyetine göre sıralanmış yapılandırmalar listesinin oluşturulmasını içermektedir [176,177]. Yapılan çalışmaların, amaç fonksiyonu Denklem (3.10) ile verilmiştir.

$$\min F = \sum_{t=1}^N C_{NPC} \quad (3.10)$$

Optimizasyon sürecinde P_{PV}^{NG1} , P_{PV}^{NG2} ve $P_{PV}^{NG3,4,5,6}$ kW olarak fotovoltaik kapasitesini, P_{BESS}^{NG1} , P_{BESS}^{NG2} ve $P_{BESS}^{NG3,4,5,6}$ kW olarak depolama sistemi kapasitesini P_{WT}^{NG1} ve P_{WT}^{NG2} ise adet olarak rüzgar türbini sayısını temsil etmektedir. Bu karar değişkenleri, NG tasarımında optimize ettiğimiz temel unsurları temsil etmektedir. Karar değişkenlerine ait alt ve üst sınırların belirlenmesi, özellikle küçük ölçekli bu NG sistemi göz önüne alındığında, mevcut kurulum alanı, güneş ışıınımı, rüzgar hızı ve kullanılan bileşenlerin ekonomik göstergeleri gibi faktörlerden önemli ölçüde etkilenmektedir. PV ve WT için alt ve üst sınırlar NG_1 , NG_2 ve $NG_{3,4,5,6}$ için sırasıyla Denklem (3.11) (3.12) (3.13) (3.14) (3.15) ve (3.16) ile verilmiştir.

$$0 < P_{PV}^{NG1} \leq 7 \quad (3.11)$$

$$0 < P_{WT}^{NG1} \leq 2 \quad (3.12)$$

$$0 < P_{PV}^{NG2} \leq 90 \quad (3.13)$$

$$0 < P_{WT}^{NG2} \leq 6 \quad (3.14)$$

$$0 < P_{PV}^{NG3,4,5,6} \leq 10 \quad (3.15)$$

$$0 < P_{BESS}^{NG3,4,5,6} \leq 5 \quad (3.16)$$

Kullanılacak PV, WT ve BESS kapasitesinin dönüştürücü kapasitesini etkileyeceği bilindiğinden bütün NG yapıları için dönüştürücü kapasitesinin (P_{CONV}^{NG}) Denklem (3.17) ile verilen şekilde bir ilişki içerisinde olacağı bilinmektedir.

$$P_{CONV}^{NG} \leq k.P_{PV}^{NG} + m.P_{BESS}^{NG} + l.P_{WT}^{NG} \quad (3.17)$$

Burada, k, m ve l sırasıyla güneş panelleri, batarya depolama sistemleri ve rüzgar türbinleri birimlerinin dönüştürücü kapasitesi üzerindeki etkisini belirleyen katsayılarıdır. Dönüştürücü kapasitesinin sıfırdan büyük olması gerektiği bilindiğinden, P_{CONV}^{NG} Denklem (3.18) ile verilen sınırlara sahip olacaktır.

$$0 < P_{CONV}^{NG} \leq k.P_{PV}^{NG} + m.P_{BESS}^{NG} + l.P_{WT}^{NG} \quad (3.18)$$

Bu optimizasyon modeli, NG sistemlerinin enerji verimliliğini artırma ve sürdürülebilir enerji kaynaklarını etkin bir şekilde kullanma amacını taşımaktadır. Güneş panelleri, batarya depolama sistemleri ve rüzgar türbinleri gibi bileşenlerin dönüştürücü kapasitesi üzerindeki etkileri, sistem tasarımının en önemli unsurlarını oluşturmaktadır. Belirlenen alt ve üst sınırlar ile optimizasyon kısıtları, sistemlerin performansını maksimize ederken, çevresel faktörler ve ekonomik göstergelerle de uyumlu bir şekilde çalışmayı hedeflemektedir. Bu yaklaşım, hem enerji kapasitesinin güvenli bir şekilde karşılanmasını sağlamak hem de yenilenebilir enerji payının artırılmasına katkıda bulunmaktadır.

3.1.6 Yük Profilleri

NG'lerde, konut yük profillerinin dinamiklerini dikkate almak son derece önemlidir. Akıllı sayaçlar kullanılarak yapılan son çalışmalarda ölçümler, konut yük profillerini tahmin etmenin ve modellemenin zorluklarını ortaya koymaktadır. Bu öngörülemezlik, bireylerin elektrikli cihazları farklı zamanlarda kullanmalarından kaynaklanmakta olup, bu durum bireylerin farklı süreçlerini yaşam tarzlarını yansıtmaktadır. Bu nüansların anlaşılması, kullanıcı davranışlarına ve enerji tüketim durumlarına özel olarak uyarlanmış NG sistemlerinin etkili bir şekilde tasarımı ve optimizasyonu için hayati öneme sahiptir [178].

NG_1 'de bulunan beş haneli ve beş katlı binanın günlük elektrik yük profile HOMER ile modellenmiştir. Tablo 3.4. bu beş kat ve her katında bir daireden oluşan apartmanın evsel elektrik yüklerini göstermektedir. Ana enerji tüketen ev aletleri

arasında aydınlatma, televizyon, klima, buzdolabı, ocak, kurutucu, bulaşık makinesi, çamaşır makinesi ve küçük elektrikli cihazlar yer almaktadır. Ayrıca bir adet elektrik araç şarj cihazıda modellenerek yük profiline eklenmiştir.

Tablo 3.4 NG_1 için elektriksel yükler

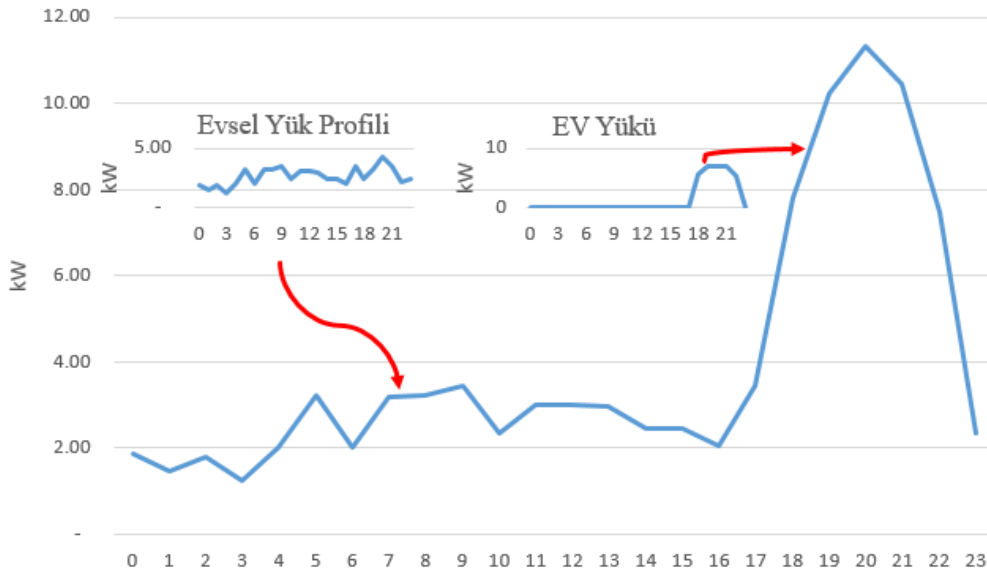
Tüketici	Sayısı	Güç Tüketimi (W)	Kullanım Süresi (s)	Ortalama Kullanım (W/s)	Günlük Toplam Kullanım (kW/gün)
Led Aydınlatma	5	15	1.5	112,5	0.5625
Aydınlatma	2	20	2	80	0.4
TV	1	160	3	480	2.4
Fırın	1	2200	0.5	1100	5.5
Buzdolabı	1	150	24	3600	18
Klima	1	1400	1.2	1680	8.4
Çamaşır M.	1	840	1.5	1260	6.3
Kurutucu	1	1800	1	1800	9
Süpürge	1	600	0.5	300	1.5
Su Isıtıcı	1	1600	0.5	800	4
Bulaşık M	1	1200	1	1200	6
Küçük Güçlü Gereçler	2	30	3	180	0.9
EVCS	1	7000	4	28000	28

NG_1 için analiz edilen konut ortamında, kümülatif ortalama elektrik yükü günde bir daire için 12.59 kW olarak hesaplanmıştır. Beş katlı binanın tamamının elektrik tüketimi EVCS dahil 91.96 kW/gün olmaktadır. Bu özel bina için yük talebinin belirlenmesi, referans [179] ve [180]'de belirtilen Denklem (3.19) ile verilmektedir.

$$P_{LOAD} = \sum_{k=1}^{N_{house}} \left[\sum_{i=1}^{N_{component}} D_p P_c U_t \right] \quad (3.19)$$

Burada, D_p , P_c ve U_t sırasıyla cihaz sayısını, kullanılan cihazın güç tüketimini (W) ve kullanım süresini (s) temsil etmektedir. Türkiye'deki Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği gereği, konut yük profillerinin oluşturulmasında eşzamanlılık (talep)

katsayılarının dikkate alınması zorunludur [128]. HOMER yazılımı tarafından, üretilen yük verilerinin gerçek hayattaki senaryolarla mümkün olduğunca örtüşmesini sağlamak amacıyla belirli parametreler eklenmiştir. Referans [181] ve [182]'de belirtildiği gibi bu parametreler, günlük yükte %14 ve zamansal kullanımda %21 olacak şekilde ayarlanmıştır. Bu varyasyonların entegrasyonu sayesinde, daha gerçekçi ve simülasyonlarımızın konutlardaki elektrik tüketim dinamikleri ile uyumlu hale getirilmesini sağlanmıştır. Bu yapılandırmadan elde edilen birleşik yük profili, Şekil 3.9'da görsel olarak verilmiştir. HOMER yazılımında elektrikli araç şarj verilerinin doğruluğunu artırmak amacıyla, modelleme sürecine değişkenlik katmak üzere belirli parametreler eklenmiştir. Bu, batarya kapasitesi ve bireysel tercihler gibi çeşitli faktörler nedeniyle gerçek dünyadaki EV şarj sürelerinin değişkenlik gösterebileceğini kabul ederek %30'luk bir şarj süresi değişkenliği faktörünü içermektedir. Ayrıca, elektrikli araç şarj yüklerinin kısa zaman dilimleri içindeki dinamik doğasını yakalamak amacıyla %10'luk bir zaman adımı değişkenliği faktörü de eklenmiştir; bu, kesintili bağlantılar gibi durumları dikkate almaktadır. Bu değişkenlik parametrelerini entegre ederek, amacımız gerçek dünya şarj davranışının öngörülemezliğini yakın bir şekilde taklit eden EV şarj verileri oluşturmaktır.



Şekil 3.9 NG_1 yük profili

NG_2 çalışmasının bir parçası olarak, bir konut binası için günlük elektrik yük profili geliştirilmiştir. Bu yük profili, asansörler, sulama sistemleri, aydınlatma ve çeşitli evsel ve bina ile ilgili elektrik talepleri de dahil olmak üzere geniş bir yelpazede

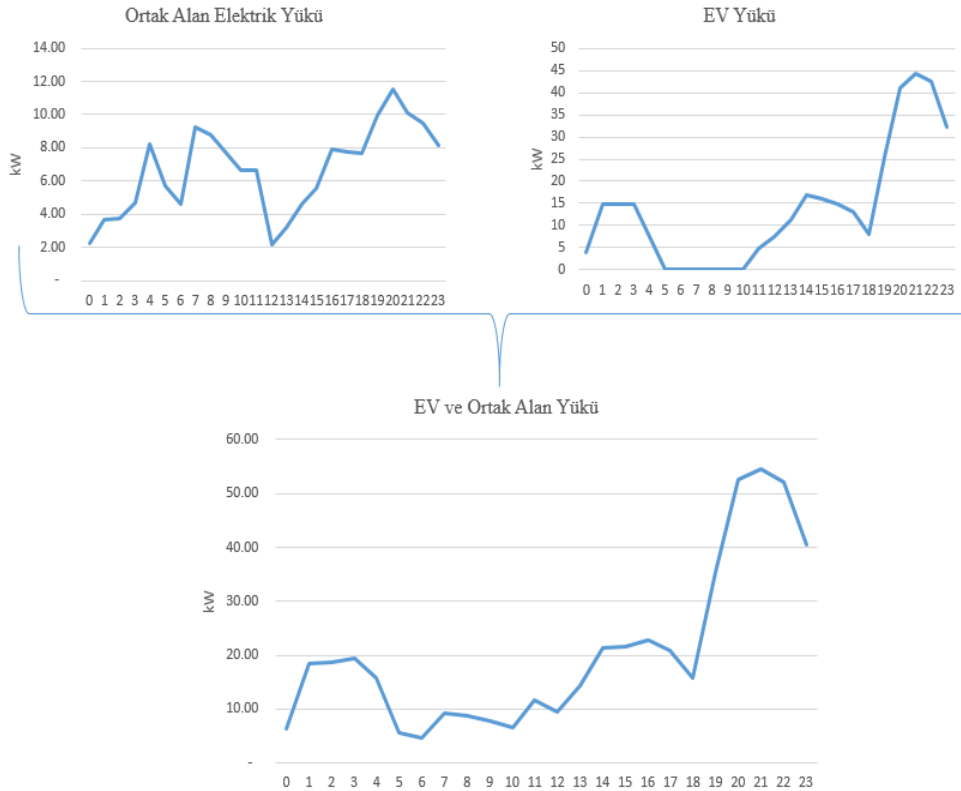
elektrik yüklerini içermektedir. Kapsamlı yük profili, analiz ve simülasyon için HOMER modeline entegre edilmiştir. Farklı türdeki elektrik yüklerini dahil ederek, bu konut tarzı binanın enerji gereksinimleri ve tüketim alışkanlıklarına ilişkin bütüncül bir anlayış elde etmek amaçlanmıştır. Tablo 3.5, analiz edilen binaya ilişkin elektrik yüklerine genel bir bakış sunmaktadır.

Tablo 3.5 NG_2 için elektriksel yükler

Tüketici	Sayısı	Güç Tüketimi (W)	Kullanım Süresi (s)	Ortalama Kullanım (W/s)	Günlük Toplam Kullanım (kW/gün)
Çevre Aydınlatması	50	20	8	8000	8
Zayıf Akım	25	15	24	9000	9
Genel Kat Gereksinimleri	1	780	8	6240	6,24
Otopark Aydınlatması	180	20	4	14400	14,4
Asansörler	3	6200	4	74400	74,4
Sulama	8	600	1	4800	4,8
Spor Merkezi	1	3000	12	36000	36
Havuz	1	1100	6	6600	6,6
EVCS	8	7000	6	336000	336
Bariyerler	3	120	1	360	0,36

NG_2 için analiz edilen toplu konut binasında, toplam ortalama elektrik yükü 495,80 kW/gün olarak alınmıştır. Bu kümülatif elektrik yükü, asansörler, sulama sistemleri, aydınlatma, EVCS ve diğer elektrikli yükler dahil olmak üzere çeşitli bina sistemleri ve cihazlarının toplam enerji tüketimini temsil etmektedir. Bu ortalama yükün doğru bir şekilde hesaplanması, binanın enerji taleplerinin anlaşılması, enerji yönetimi stratejilerinin optimize edilmesi ve binada yaşayanların çeşitli ihtiyaçlarına yönelik kesintisiz enerji sağlanması açısından önemlidir. NG_2 elektrikli araç şarj süreleri, günlük, haftalık ve adım bazlı değişkenlik sırasıyla %30, %20 ve %10 olarak belirlenmiştir. Bu parametreleri dahil ederek, gerçek elektrikli araç şarj davranışlarının çeşitliliğini ve öngörülemezliğini gerçeğe en yakın şekilde simüle etmek amaçlanmıştır. Böylece, karar alma süreçleri, yük yönetimi ve altyapı planlaması için daha isabetli analizler yapılması hedeflenmektedir. NG_2 konfigürasyonuna bağlı olarak oluşturulan yük profili Şekil 3.10'da görsel olarak sunulmuştur. Bu yük profilinde özellikle dikkat çeken unsur, elektrik tüketiminde

belirgin bir artışın gözlenmesidir. Bu artış, sistemde entegre edilmiş elektrikli araçların şarj taleplerinden kaynaklanmaktadır. Önemle belirtmek gerekir ki, bu NG sistemleri için gerekli olan tüm bileşenler yapılan piyasa araştırmaları neticesinde Türkiye pazarında kolayca temin edilebilen ekipmanlardan seçilmiş ve ilgili optimizasyon süreçlerine teknik ve ekonomik parametreleri dahil edilmiştir. Türkiye'deki yerel piyasada bu bileşenlerin bulunabilirliği, bu sistemlerin uygulanabilirliğini önemli ölçüde desteklemektedir. Böylelikle, dışa bağımlılığı azaltarak maliyetlerin daha öngörülebilir ve kontrol edilebilir olmasına olanak sağlanmakta, aynı zamanda tedarik sürelerinin kısaltılması mümkün olmaktadır. Ayrıca, maliyetlerin yerel pazar koşullarına göre belirlenmesi, sistemlerin uygulanmasında ekonomik ve teknik açıdan daha gerçekçi ve uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır. Bu süreç, Türkiye'de nanoşebeke sistemlerinin yaygınlaştırılması ve sürdürülebilir enerji çözümleri ile enerji üretiminde ve yönetiminde yerli - milli imkanlarla daha verimli sonuçlar elde edilmesini de desteklemektedir.



Şekil 3.10 NG₂ toplam yük profili

Ayrıca Türkiye'nin farklı bölgeleri için çalışılan diğer NG sistemleri olan NG₃ NG₄ NG₅ ve NG₆ için yük profili Tablo 3.6 ile verilmiştir. HOMER Grid

yazılımında yük verilerinin gerçek dünya koşullarıyla uyumlu hale getirilmesi ve doğruluğunun artırılması amacıyla belirli parametreler yine bazı parametreler ayarlanmıştır. Bu parametreler, referans [183] ve [184]'de belirtilen şekilde günlük yükte %10 ve zaman bazlı yükte %20'lik bir değişkenliği ifade etmektedir.

Tablo 3.6 NG_3 NG_4 NG_5 ve NG_6 için elektriksel yükler

Tüketici	Sayısı	Güç Tüketimi (W)	Kullanım Süresi (s)	Ortalama Kullanım (W/s)	Günlük Toplam Kullanım (kW/gün)
Aydınlatma	5	15	1.5	112.5	0.45
Fırın	1	2200	0.5	1100	4.4
Aydınlatma	2	20	2	80	0.32
TV	1	160	3	480	1.92
Çamaşır M.	1	840	1.5	1260	5.04
Klima	1	1400	1.2	1680	6.72
Kurutucu	1	1800	1	1800	7.2
Süpürge	1	600	0.5	300	1.2
Ütü	1	1100	0.15	165	0.66
Buzdolabı	1	150	24	3600	14.4
Su Isıtıcı	1	1600	0.5	800	3.2
Bulaşık M.	1	1200	1	1200	4.8
Küçük G. Cihazlar	2	30	3	180	0.72

3.1.7 Çalışılan NG Sistemleri İçin Optimal Sonuçlar

Bu çalışmada, farklı NG yapılandırmalarına odaklanılmış olup, amacımız elektrikli araçlar dahil olmak üzere toplam elektrik talebini karşılamak için yerinde üretilen yenilenebilir enerjinin kullanımını optimize etmek ve şebekeye olan bağımlılığı azaltmaktır. Ayrıca, fazla elektriğin şebekeye satılmasıyla elde edilecek gelir gibi ekonomik faydalar ve sistemlerin ekonomik ömürleri boyunca CO_2 emisyonlarının baz enerji sistemi ile karşılaştırılması yoluyla çevresel avantajlar da değerlendirilmiştir. Analizlerimiz, şebekeden satın alınan ve satılan elektrik miktarları, yenilenebilir enerji oranı, enflasyon oranı ve işletme maliyetleri gibi faktörleri göz önünde bulunduran HOMER Grid simülasyonlarına dayanmaktadır. Bu simülasyonlar, mevcut koşullar altında NG örnek olay incelemelerinin performansı hakkında kritik bilgiler sunmaktadır. Mevcut koşullar altındaki NG_1 örnek olay incelemelerine ait HOMER Grid simülasyon sonuçları Tablo 3.7'de sunulmuştur. Bu tablodaki tüm değerler, fotovoltaik, enerji depolama sistemi ve

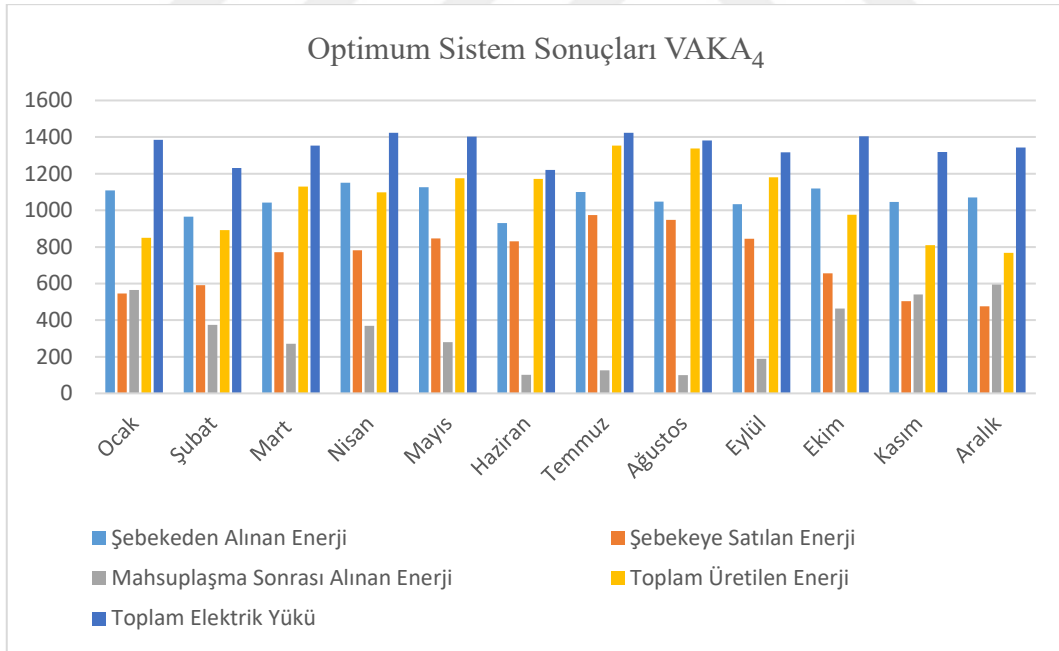
dönüştürücü kapasitelerini kilowatt cinsinden ifade etmektedir. Önerilen sistemin ekonomik değerlendirmesi, birim enerji maliyeti ve net bugünkü değer gibi iki önemli ekonomik göstereye dayanmaktadır. HOMER Grid, bu kriterlere göre en uygun yapılandırmaları belirleyerek yalnızca optimal olanları sunmaktadır. Sunulan bu tablo ve diğer bütün sonuçlar 14 Mayıs 2024 tarihinde resmi gazete’de yayımlanan yeni elektrik piyasasında lisanssız elektrik üretimi yönetmeliği [185] kapsamında değerlendirilerek elde edilmiştir. Diğer bir ifadeyle sunulan bu tez çalışması güncel durum itibarıyla değerlendirilmiş ve yönetmeliklerin ön gördüğü üzere aylık mahsuplaşma (net metering) kapsamında çalışmalar yapılmıştır. Bu bağlamda sunulan bütün NG çalışmalarında üretilen enerji miktarı ile tüketilen enerji miktarı karşılaştırılmış, mahsuplaşmış ve kalan enerji (eğer varsa) sisteme iletilmiştir.

Tablo 3.7 NG_1 için bütün vaka çalışmalarında optimal sonuçlar

Sistem	PV	WT	BESS	CONV	NPC	LCOE	CO_2 kg/yıl	Yen. O
Temel	-	-	-	-	₺ 1,510,000.00	1.85	10246	-
NG_1 -VAKA ₁	7	-	-	5.63	₺ 861,143.00	0.747	4578	39.0%
NG_1 -VAKA ₂	7	-	1	5.58	₺ 916,955.00	0.803	4599	39.4%
NG_1 -VAKA ₃	7	1	1	5.58	₺ 968,417.00	0.783	2542	49.5%
NG_1 -VAKA ₄	7	1	-	5.63	₺ 886,914.00	0.707	2510	49.0%

Tablo 3.7’deki tüm değerler kilowatt cinsinden PV, BESS, WT ve dönüştürücü için verilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmasında bütün vaka çalışmaları için toplam 589 farklı konfigürasyon optimize edilmiş ve en uygun yapılandırmalar tabloda ayrıntılı olarak sunulmuştur. Farklı sistem yapılandırmaları için NPC ve LCOE değerleri göz önüne alındığında, en uygun NG sistemi birim enerji maliyeti açısından VAKA₄ olurken net şimdiki değer açısından ise VAKA₁ olduğu belirlenmiştir. Tablo 3.7 ile önerilen NG sistemlerinin optimizasyon sonuçları sunulmakta ve bu sonuçları, şebekeye dayanan temel sistemle karşılaştırmaktadır. NG_1 -VAKA₁’de temel sisteme 7 kW gücünde bir PV sistem entegre edilmiştir ve yıllık maliyet ₺861,143’a, LCOE 0.747 ₺/kWh’e düşmüştür. Bu vaka, temel duruma kıyasla %39 oranında yenilenebilir enerji kullanımı sağlamış ve CO_2 emisyonu 4578 kg/yıla düşmüştür. NG_1 -VAKA₂’de PV sistemine ek olarak 1 kW kapasiteli BESS eklenmiş, maliyet ₺916,955’e ve LCOE 0.803 ₺/kWh’e yükselmiştir. CO_2

emisyonu hafif bir artış göstererek 4599 kg/yıl olarak gerçekleşmiştir ve yenilenebilir enerji katkısı %39.4 olmuştur. NG_1 -VAKA₃'de PV sistemine ek olarak 1 kW'lık bir rüzgar türbini ve 1 kW kapasiteli bir BESS eklenmiştir. Bu durumda yıllık maliyet 1968,417 olarak hesaplanmış, LCOE 0.783 ₺/kWh olmuştur. CO_2 emisyonları belirgin bir şekilde azalarak 2542 kg/yıla düşmüş, yenilenebilir enerji oranı %49.5'e yükselmiştir. NG_1 -VAKA₄'de ise PV sistemine 1 kW kapasiteli bir rüzgar türbini eklenmiş, fakat enerji depolama sistemi kullanılmamıştır. Bu senaryoda yıllık maliyet 1886,914, LCOE 0.707 ₺/kWh olarak belirlenmiş ve CO_2 emisyonları 2510 kg/yıl seviyesine düşmüştür. Yenilenebilir enerji katkısı ise %49 olarak hesaplanmıştır. Bu çalışmada optimal sonuç olarak NG_1 -VAKA₄ senaryosu seçilmiştir. Bu durumun temel nedeni, bu vakada yenilenebilir enerji katkısının %49 gibi yüksek bir orana ulaşması ve CO_2 emisyonlarının önemli ölçüde düşmesidir (2510 kg/yıl). Ayrıca, LCOE'nin düşük olması (0.707 ₺/kWh) ve maliyetin kabul edilebilir bir seviyede kalması, bu vakayı hem ekonomik hem de çevresel açıdan optimal bir çözüm haline getirmiştir. NG_1 optimal konfigürasyonu için 1 yıllık elektriksel veriler Şekil 3.11 ile verilmiştir.



Şekil 3.11 NG_1 optimal konfigürasyon sonuçları

Şekil 3.11 ile VAKA₄ için optimum sistem sonuçları aylık bazda analiz edilmiştir. Şebekeye satılan enerji, özellikle yaz aylarında (Mayıs-Ağustos) artış göstermektedir. Toplam enerji üretimi yaz aylarında (özellikle Temmuz ve Ağustos) en yüksek seviyelere çıkarken, kış aylarında (Ocak ve Şubat) daha düşük

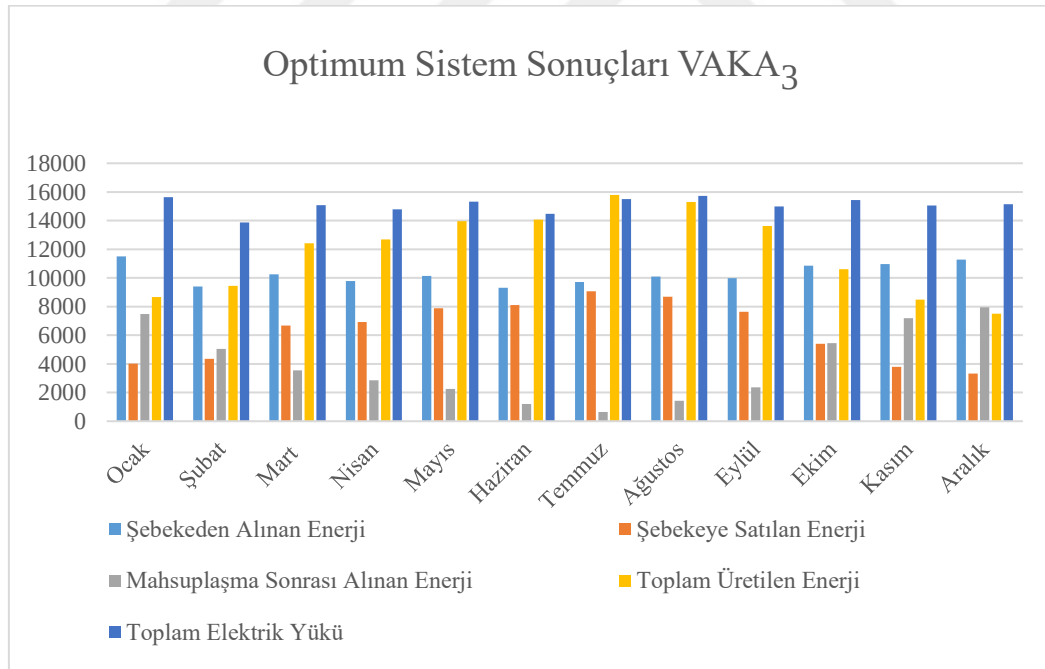
seviyelerde kalmaktadır. Toplam elektrik yükü ise yıl boyunca dalgalanmakta, en yüksek tüketim Temmuz, Ocak ve Eylül aylarında gerçekleşmektedir. Ocak ayında, şebekeden alınan enerji oldukça yüksekken, üretim talebi karşılamakta yetersiz kalmış ve şebekeye satış oldukça az olmuştur. Temmuz ve Ağustos aylarında ise üretilen enerji en yüksek seviyeye çıkmış, şebekeye enerji satışı ve toplam tüketim zirve yapmıştır. Genel olarak, VAKA₄ için yaz aylarında enerji üretiminin arttığı, kış ve sonbahar aylarında ise şebekeden daha fazla enerji alımı gerektiği gözlemlenmiştir. Bu durum, mevsimsel üretim-tüketim dengesizliğini ortaya koymaktadır.

Tablo 3.8 NG₂ için bütün vaka çalışmalarında optimal sonuçlar

Sistem	PV	WT	BESS	CONV	NPC	LCOE	CO ₂ kg/yıl	Yen. O
Temel	-	-	-	-	₺ 16,257,018.00	1.85	114407	-
NG ₂ -VAKA ₁	90	-	-	63.6	₺ 9,090,000.00	0.756	43172	45.5%
NG ₂ -VAKA ₂	90	-	16	63.6	₺ 9,850,000.00	0.834	43446	46.1%
NG ₂ -VAKA ₃	90	6	-	64.4	₺ 7,230,000.00	0.580	29898	52.0%
NG ₂ -VAKA ₄	90	6	16	64.1	₺ 8,890,000.00	0.726	30280	52.8%

Tablo 3.8’deki tüm değerler kilowatt cinsinden PV, BESS, WT ve dönüştürücü için verilmiştir. Yapılan optimizasyon çalışmasında bütün vaka çalışmaları için toplam 462 farklı konfigürasyon optimize edilmiş ve en uygun yapılandırmalar tabloda ayrıntılı olarak sunulmuştur. Farklı sistem yapılandırmaları için NPC ve LCOE değerleri göz önüne alındığında, en uygun NG sistemi birim enerji maliyeti ve net şimdiki değer açısından VAKA₃ olduğu belirlenmiştir. VAKA₃, maliyet ve performans açısından optimal seçenek olarak öne çıkmaktadır. Bu vaka, 90 kW güneş paneli, 6 kW rüzgar türbini, ve 64.4 kW dönüştürücü ile tasarlanmıştır ve ₺7,230,000 NPC ve ₺0.580 LCOE ile en düşük maliyetli çözümü sunmaktadır. Ayrıca, bu senaryo yıllık 29,898 kg CO₂ emisyonu ile en düşük karbon salınımına sahiptir ve yenilenebilir enerji oranı %52 ile yüksek seviyededir. Diğer senaryolara kıyasla VAKA₃, hem ekonomik hem de çevresel faydalar sunarak enerji sisteminin etkinliğini artıran en uygun seçenek olarak değerlendirilmektedir. Şekil 3.12 ile aylar bazında enerji alışverişini, mahsuplaşma sonrası alınan enerji miktarını, toplam üretilen enerji ve toplam elektrik yükünü göstermektedir. Ocak ayında, şebekeden 11.490 kWh enerji alınmış ve 4.008 kWh şebekeye satılmıştır.

Mahsuplaşma sonrası, bu ayda şebekeden alınan net enerji miktarı 7.482 kWh olmuştur. Benzer bir trend, yılın diğer aylarında da gözlenmektedir. Örneğin, Mart ayında şebekeye 6.682 kWh satılmış ve net enerji alımı 3.559 kWh olarak gerçekleşmiştir. Yaz aylarında, özellikle Haziran ve Temmuz'da üretilen enerji miktarı önemli ölçüde artmış, mahsuplaşma sonrası alınan enerji miktarı sırasıyla 1.204 kWh ve 639 kWh gibi düşük seviyelere gerilemiştir. Bu da yaz döneminde enerji ihtiyacının büyük ölçüde yerel üretim ile karşılandığını göstermektedir. Ağustos ayında benzer şekilde yüksek üretim görülmüş, ancak mahsuplaşma sonrası net enerji alımı 1.420 kWh olmuştur. Eylül'den itibaren üretim ve enerji yükü dengesi yavaş yavaş değişmeye başlamış, mahsuplaşma sonrası net enerji alımı tekrar yükselmiştir. Özellikle Ekim, Kasım ve Aralık aylarında enerji alımı artış göstermiştir; Aralık ayında net alınan enerji 7.957 kWh ile yılın en yüksek seviyelerinden biri olmuştur. Bu veriler, yıl boyunca mevsimsel değişimlerin enerji üretimi ve tüketimi üzerindeki etkisini göstermekte ve özellikle yaz aylarında yenilenebilir enerji kaynaklarının daha fazla kullanılabilir olduğunu, kış aylarında ise enerji talebinin büyük ölçüde şebekeden karşılandığını ortaya koymaktadır.

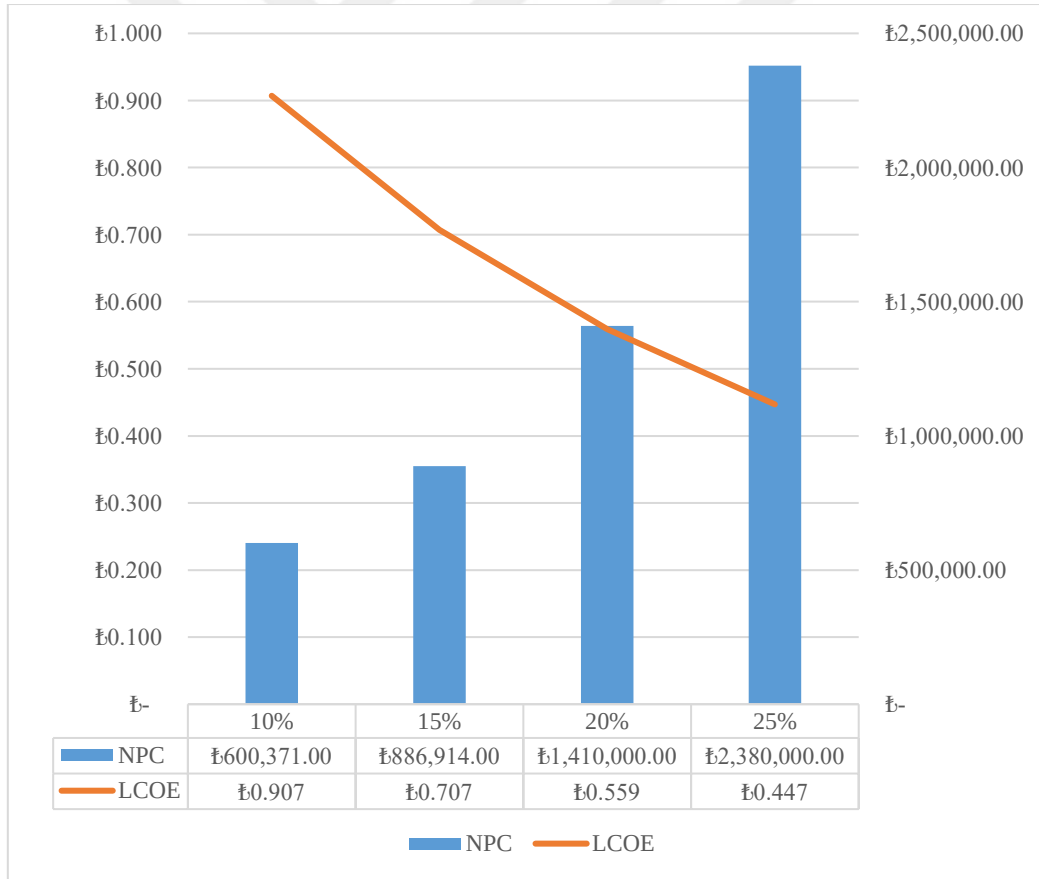


Şekil 3.12 NG₂ optimal konfigürasyon sonuçları

3.1.8 Optimal NG Sistemleri İçin Duyarlılık Analizleri

HOMER'da duyarlılık analizi, enerji sistemlerinin planlanması ve tasarımında önemli bir rol oynamaktadır. Bu analiz, tasarlanan simülasyonun sonuçlarının,

temel girdi parametrelerindeki veya varsayımlardaki değişimlerden nasıl etkilendiğini değerlendirmeyi içerir. Ekipman maliyetleri, yük profilleri veya yenilenebilir kaynakların mevcudiyeti gibi parametrelerin seçilmesi ve değiştirilmesiyle, duyarlılık analizindeki ekonomik parametreler, bir sistemin sağlamlığının ve güvenilirliğinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlar. HOMER, bir dizi simülasyon yoluyla bu parametreler değiştikçe sonuçları hesaplar ve kaydeder, bu da her bir değişkenin NPC ve LCOE gibi metrikler üzerindeki etkisini anlamaya yardımcı olur. Bu analiz, sistem tasarımı ve bileşen seçimi ile ilgili eğilimleri belirlemeye ve karar almaya katkı sağlar; nihayetinde enerji sistemlerinin performans ve ekonomik hedeflere ulaşması için optimizasyonuna rehberlik eder. Mevcut çalışmada, NG_1 ile ilgili VAKA₄ için, geleceğe yönelik projeksiyonlar yapılmış ve enflasyon oranları ve şebeke tarifelerinin değişimlerin etkisi değerlendirilmiştir.



Şekil 3.13 NG_1 optimal konfigürasyonu üzerinde enflasyon etkisi

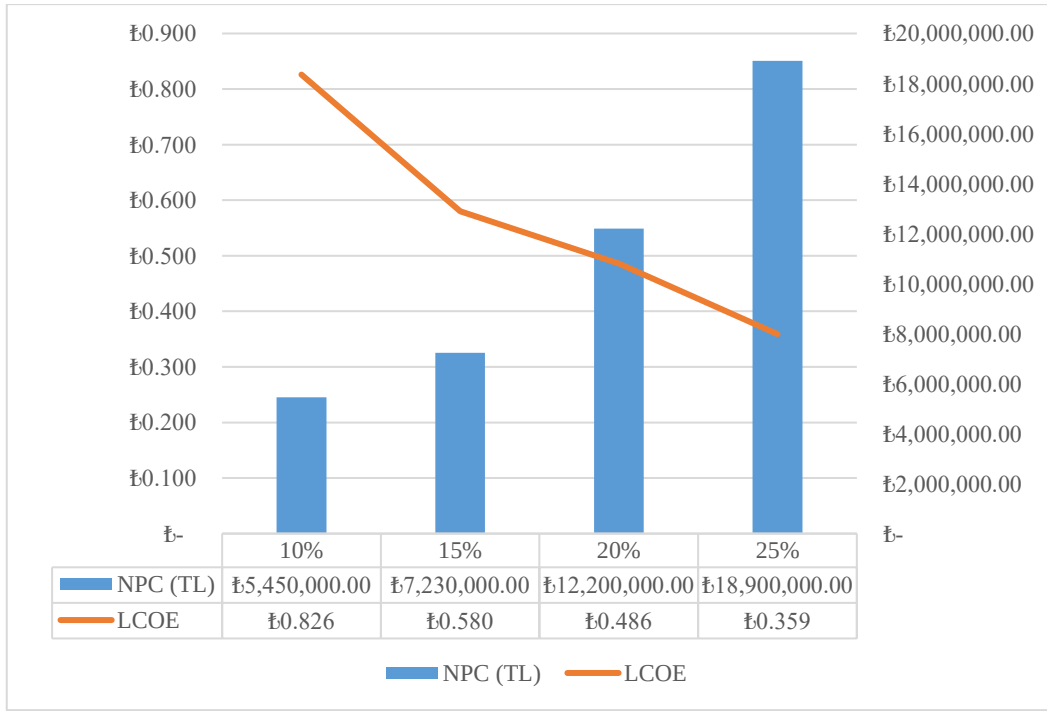
Optimal konfigürasyon için yapılan duyarlılık analizleri Tablo 3.9 ve Şekil 3.13 ile verilmiştir. Bu göstergeler enflasyon oranları ve tarife fiyatlarındaki değişimlerin enerji sisteminin ekonomik performansı üzerindeki etkilerini göstermektedir.

Enflasyon oranları arttıkça NPC artarken, LCOE azalmaktadır. Örneğin, enflasyon %10'dan %25'e yükseldiğinde, NPC ₺600,371'den ₺2,380,000'a çıkarken, LCOE ₺0.907'den ₺0.447'ye düşmüştür. Buna karşın, şebeke tarife fiyatlarındaki artışlar hem NPC hem de LCOE'yi artırmaktadır. Tarife fiyatında %35'lik bir artış, NPC'yi ₺1,020,000'a, LCOE'yi ise ₺0.811'e yükseltmiştir. Bu analizler, enerji sistemlerinin hem enflasyona hem de şebeke tarife fiyatlarına karşı duyarlı olduğunu ve maliyetlerin bu parametrelere bağlı olarak önemli ölçüde değiştiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 3.9 NG_1 optimal konfigürasyonu üzerinde tarife fiyat artışı etkisi

Artış Oranı	Tarife Fiyatı	NPC (TL)	LCOE (TL)
-	1.85	886914	0.707
15%	2.12	942908	0.752
25%	2.31	982030	0.782
35%	2.49	1020000	0.811

Şekil 3.14'de yer alan veriler, enflasyon oranının NPC ve LCOE üzerindeki etkilerini göstermektedir. Enflasyon oranı %10 olduğunda NPC değeri ₺5.450.000 iken, LCOE ₺0.826 olarak hesaplanmıştır. Enflasyon oranı arttıkça, NPC değerlerinde belirgin bir artış gözlenirken, LCOE oranları düşme eğilimi göstermektedir. Örneğin, enflasyon oranı %25'e çıktığında NPC ₺18.900.000'a yükselmiş, buna karşılık LCOE ₺0.359 seviyesine gerilemiştir. Bu durum, yüksek enflasyon oranlarının projelerin toplam maliyetini artırırken, enerji üretim maliyetlerinin uzun vadede düşmesine neden olabileceğini göstermektedir. Enflasyonun, projelerin ekonomik değerlendirilmesinde hem maliyet hem de enerji üretim verimliliği üzerinde önemli bir rol oynadığı bu analizde net olarak ortaya çıkmaktadır. Özellikle düşük LCOE değerleri, projelerin sürdürülebilirliğini ve ekonomik açıdan verimli olduğunu işaret etmektedir.



Şekil 3.14 NG_2 optimal konfigürasyonu üzerinde enflasyon etkisi

Diğer taraftan, şebeke tarife fiyatlarındaki artışlar hem NPC hem de LCOE'yi artırmaktadır. Tarife fiyatında %35'lik bir artış, NPC'yi ₺9,400,000'a, LCOE'yi ise ₺0.753'e yükseltmiştir. NG_2 için yapılan bu analizler Tablo 3.10 ile verilmiştir.

Tablo 3.10 NG_2 optimal konfigürasyonu üzerinde tarife fiyat artışı etkisi

Artış Oranı	Tarife Fiyatı	NPC (TL)	LCOE (TL)
-	1.85	7230000	0.58
15%	2.12	8540000	0.685
25%	2.31	8980000	0.719
35%	2.49	9400000	0.753

Diğer taraftan Türkiye'nin farklı bölgelerinde evsel yükleri besleyen NG sistemleri için yapılan analizlerin optimal sonuçları Tablo 3.11 ile sunulmuştur. Her bir NG konfigürasyonu için gerçekleştirilen optimizasyon süreci, en verimli tasarımları belirlemenin yanı sıra, bu konfigürasyonların ekonomik açıdan uygulanabilirliğini ve performans açısından üstün özelliklerini ortaya koymaktadır. Optimizasyon sonuçları, farklı bölgesel koşullarda NG sistemlerinin maliyet etkinliğini ve sürdürülebilirliğini değerlendirme fırsatı sunmuştur. Bu bulgular, evsel yükleri

besleyen NG'ler için en uygun tasarım ve stratejilerin belirlenmesi adına önemli bir yol gösterici olabileceği değerlendirilmektedir.

Tablo 3.11 Türkiye'nin farklı bölgeleri için optimal NG konfigürasyonları

Sistem	PV	CONV	NPC	LCOE	CO ₂ kg/yıl	Yen. O
Temel	-	-	₺ 1,730,000.00	1.85	11765	-
NG ₃	10	7.81	₺ 728,308.00	0.573	3196	53.6%
NG ₄	10	8.02	₺ 466,844.00	0.338	1399	59.7%
NG ₅	10	7.92	₺ 567,618.00	0.426	2094	57.7%
NG ₆	10	8.12	₺ 587,864.00	0.444	2210	57.4%

Farklı sistem kurulumları için NPC ve LCOE değerlerinin değerlendirilmesiyle, her bir lokasyon için en uygun NG sistemi belirlenmiş olup, en düşük LCOE değerleri İzmir, Mersin, Iğdır ve Sinop'ta gözlemlenmiştir. Tablo 3.11 ile önerilen NG'ler için yapılan optimizasyon sonuçlarını kapsamlı bir şekilde sunmakta ve bu sonuçları, yük talebini karşılamak için şebekeye bağımlı olan temel sistemle karşılaştırmalı bir analiz yaparak göstermektedir. Çalışma, uygulanan sistemlerin LCOE değerlerinin, temel sisteme göre %70'den daha düşük olacağını ortaya koymuştur. Ayrıca, sistemlerin 25 yıllık ekonomik ömrü göz önüne alındığında, bu oranın zamanla daha da artması beklenmektedir. Ekonomik açıdan avantajlı olmasının yanı sıra, her bir NG konfigürasyonu için elde edilen optimal sonuçlar, karbon emisyonları açısından da temel sisteme göre avantaj sağlamaktadır. Bu da, bu NG sistemlerinin yalnızca ekonomik açıdan değil, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından da üstünlüğünü pekiştirmektedir.

GWO – ABC ve PSO ALGORİTMALARIYLA BİR NANOŞEBEKENİNİN BESS KAPASİTE OPTİMİZASYONU

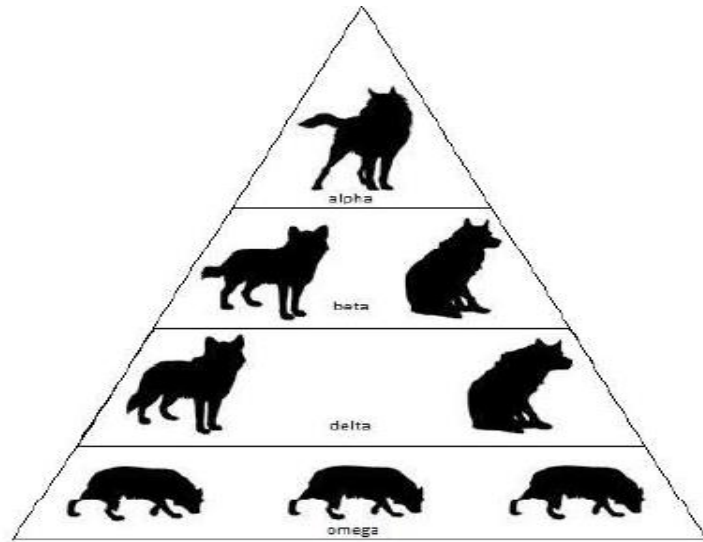
Nanoşebekeler; enerji üretim, depolama ve tüketim sistemlerinin yerel bir düzeyde kullanılarak optimize edilmesine olanak tanıyan yenilikçi enerji dağıtım altyapılarıdır. Özellikle yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile enerji üretiminde sürekliliği sağlamak, üretim-tüketim dengesini kurmak ve şebeke bağımlılığını minimize etmek için enerji depolama sistemleri kritik bir bileşen haline gelmiştir. Bu bağlamda, batarya enerji depolama sistemlerinin doğru boyutlandırılması, hem enerji maliyetlerini optimize etmek hem de şebekeye olan enerji bağımlılığını azaltmak açısından hayati öneme sahiptir. Bu bölümde, bir nanoşebeke için batarya kapasitesinin optimize edilmesinde kullanılan üç farklı sezgisel tabanlı optimizasyon algoritması, Gri Kurt Optimizasyonu (GWO), Yapay Arı Kolonisi (ABC) ve Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ele alınmıştır.

Algoritmalar, nanoşebekenin enerji üretimi ile tüketimi arasındaki dengesizlikleri yöneterek şebekeden alınan enerji miktarını en aza indirme ve bataryanın şarj-deşarj işlemlerini en verimli şekilde gerçekleştirme hedefiyle kullanılmıştır. Nanoşebekede aylık mahsuplaşma (net metering) mekanizması dikkate alınarak, her ay şebekeye verilen ve şebekeden alınan enerjinin dengelenmesi ve böylece enerji maliyetlerinin optimize edilmesi hedeflenmiştir. GWO algoritması, bozkurtların avlanma stratejilerinden esinlenen bir yöntem olarak nanoşebekedeki enerji dengesizliklerini hızlı ve etkili bir şekilde çözebilme kabiliyeti sunarken; ABC algoritması, koloni içerisindeki arıların toplumsal davranışlarını modelleyerek batarya kapasitesinin dinamiklerini optimize etmiştir. PSO algoritması ise parçacık sürülerinin işbirliğiyle en uygun çözümü bulmaya odaklanmış ve batarya kapasitesini enerji tüketimi verileriyle en iyi şekilde uyumlu

hale getirmeye çalışmıştır. Her bir algoritma ile enerji depolama kapasitesini optimal seviyede tutmak, şebekeye bağımlılığı azaltmak ve maliyetleri minimize etmek açısından çalışma yapılmıştır. Bu çalışmada, her bir optimizasyon algoritmasının performansı, enerji depolama verimliliği ve şebekeden çekilen enerji miktarı üzerindeki etkisi kıyaslanarak, nanoşebeke sistemlerinin daha sürdürülebilir ve ekonomik hale getirilmesi hedeflenmiştir.

4.1 Gri Kurt Optimizasyon Algoritması

Çalışmanın bu bölümünde, gri kurtlardan (*Canis lupus*) esinlenilen bir meta-sezgisel algoritma olan GWO önerilmektedir. GWO algoritması, doğadaki gri kurtların liderlik hiyerarşisini ve avlanma mekanizmasını taklit etmektedir. Liderlik hiyerarşisini simüle etmek için alfa, beta, delta ve omega gibi dört farklı gri kurt türü kullanılmaktadır. Ayrıca, avlanmanın üç ana adımı olan avın aranması, avın çevrelenmesi ve avın saldırıya uğraması da matematiksel modellenerek optimizasyon sürecinde yararlanılmıştır [186]. Gri kurt (*Canis lupus*), köpekçiller (*Canidae*) familyasına ait bir türdür ve ekosistemlerde tepe avcısı (apex predator) olarak konumlanmaktadır. Bu, onların besin zincirinin en üstünde yer aldığı anlamına gelmektedir. Gri kurtlar, genellikle sürü halinde yaşamayı tercih eder ve sürü büyüklükleri ortalama olarak 5 ila 12 bireyden oluşur. İlginç bir özellik olarak, bu tür, son derece katı bir sosyal hiyerarşi yapısına sahiptir; bu hiyerarşi, Şekil 4.1'de de gösterildiği gibi, sürü içindeki bireylerin net bir şekilde tanımlanmış rollerine dayanmaktadır [186-187].



Şekil 4.1 Gri kurtların hiyerarşik düzeni

Sürünün liderleri, alfa olarak adlandırılan bir erkek ve bir dişidir. Alfa, genellikle avlanma, uyuma yeri ve uyanma zamanı gibi önemli kararların alınmasından sorumludur. Alfa'nın aldığı kararlar, sürüye dikte edilir. Toplanmalarda sürünün tamamı, kuyruklarını indirerek alfayı kabul eder. Alfa kurt, aynı zamanda dominant kurt olarak da adlandırılır, çünkü onun emirlerine sürü tarafından uyulması gerekir. İlginç bir şekilde, alfa her zaman sürünün en güçlü üyesi olmayabilir, ancak sürüyü yönetme konusunda en iyi olan üyedir. Bu durum, bir sürünün organizasyonu ve disiplini gücünden daha önemli olduğunu göstermektedir. Gri kurtların hiyerarşisindeki ikinci seviye, betadır. Betalar, alfa kurtlara karar alma süreçlerinde ya da diğer sürü aktivitelerinde yardımcı olan daha alt düzeydeki kurtlardır. Beta kurt, hem erkek hem de dişi olabilir ve alfa kurtlardan birinin yaşlanması ya da ölmesi durumunda en olası alfa adayıdır. Beta kurt, alfaya saygı duymak zorundadır ancak daha alt seviyedeki kurtlara komuta edebilir. Beta, sürü için bir danışman rolü oynar ve aynı zamanda sürüye disiplin sağlar. Alfa tarafından verilen emirleri sürüde güçlendirir ve alfa'nın geri bildirim almasını sağlar. Hiyerarşideki en alt düzeyde yer alan kurt, omega olarak adlandırılır. Her ne kadar omega, sürüde önemsiz bir birey gibi görünse de, omega kaybedildiğinde sürüde iç çatışmalar ve problemler yaşandığı gözlemlenmiştir. Bazı durumlarda omega kurt, sürüdeki yavruların bakımını da üstlenir [186]. Referans [188]'e göre gri kurtlar avlanırken ilk olarak avın izini sürüp kovalar ve yaklaşırlar. Sonrasında avı durana kadar takip ederek, etrafını sarar ve taciz ederler. Son olarak saldırırlar. Gri kurtlar aşağıda verilen Denklem (4.1) - Denklem (4.4)'ye göre avlarını kuşatırlar.

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (4.1)$$

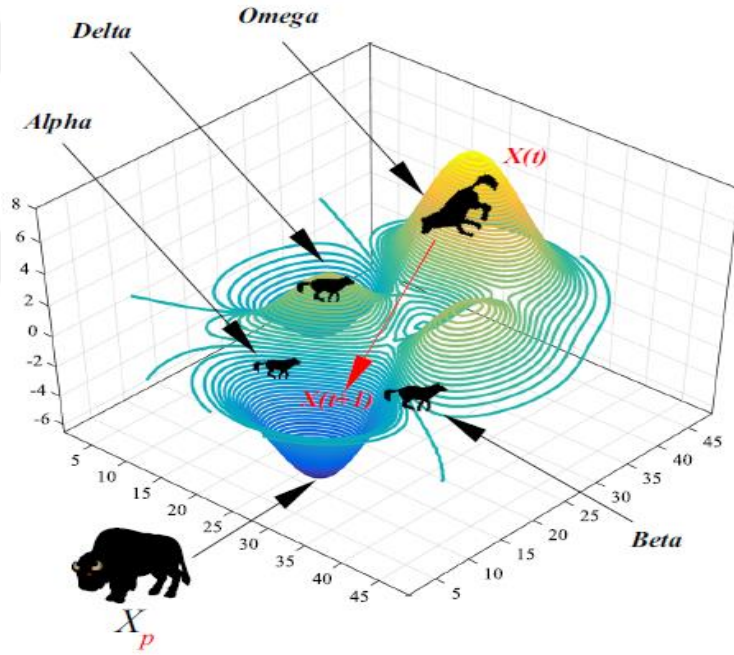
$$\vec{X}(t + 1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (4.2)$$

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (4.3)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (4.4)$$

Burada t şimdiki iterasyonu, $\vec{A}$ ve $\vec{C}$ katsayı vektörlerini, $\vec{X}_p$ avın pozisyon vektörünü, $\vec{X}$ ise gri kurtun pozisyon vektörünü temsil etmektedir. $\vec{a}$ 'nın bileşenleri iterasyonlar sırasında lineer olarak 2'den 0'a düşürülür. $\vec{r}_2$ ve $\vec{r}_1$ [0,1] arasındaki rastgele bir vektördür. $\vec{r}_2$ ve $\vec{r}_1$ rastgele vektörleri, kurtların arama uzayındaki noktalardan herhangi bir yere ulaşmasına izin verir. Böylece, gri kurt, herhangi bir

rastgele konumdaki avın etrafındaki boşluk içindeki konumunu Denklem (4.1) ve Denklem (4.2)'ye göre düzenleyebilir. Böylece gri kurtların, şimdiye kadar elde edilen en iyi çözüm etrafında hareket etmesi sağlanacaktır [189-190]. Yukarıda sunulan denklemlerle, bir kurt avın etrafındaki herhangi bir noktaya yeniden konumlanabilir. Sosyal hiyerarşi avlanma ve sürünün hayatta kalmasında önemli bir rol oynamaktadır. Sosyal hiyerarşiyi simüle etmek amacıyla, en iyi üç çözümün alfa, beta ve delta olarak kabul edildiği varsayılmaktadır. Doğada her kategoride birden fazla kurt bulunabilse de, GWO algoritmasında basitlik adına her sınıfa yalnızca bir çözüm atanmıştır [190]. Alfa, beta, delta ve omega kavramları Şekil 4.2'de gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, alfa minimuma yani ava en yakın çözümdür; onu sırasıyla beta ve delta takip etmektedir. Geriye kalan çözümler ise omega kurtları olarak kabul edilir.



Şekil 4.2 Alfa, beta ve delta kurtların ava göre konumu

GWO'da alfa, beta ve delta her zaman o ana kadar elde edilen en iyi üç çözüm olarak kabul edilir. Algoritma içerisinde kurtların pozisyonları, Denklem (4.5) – (4.7) da verildiği gibi vektörel olarak güncellenmektedir.

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}| \quad (4.5)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}| \quad (4.6)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}| \quad (4.7)$$

Benzer şekilde alfa beta ve omega kurtların her iterasyonda değişen değerleri Denklem (4.8) - (4.11) ile verilmiştir.

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \vec{D}_\alpha \quad (4.8)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \vec{D}_\beta \quad (4.9)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \vec{D}_\delta \quad (4.10)$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad (4.11)$$

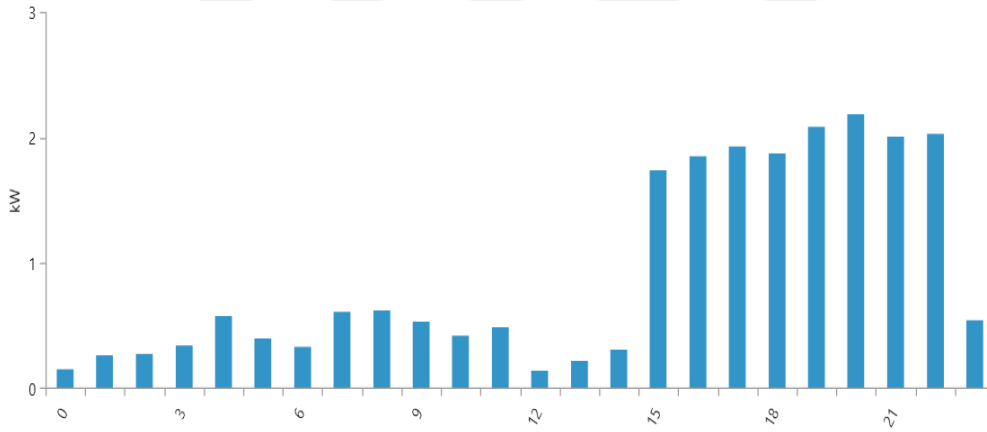
Şekil 4.3 ile python programlama dilinde bu tez çalışması için yazılan GWO algoritmasının sözde kodu verilmiştir.

```
Başlangıç: Gri Kurt popülasyonunu X_i (i = 1, 2, ..., n) olarak başlat
a, A, ve C ataması yap
Alpha_pos = 0 (En iyi kurtun pozisyonunu başlat)
Alpha_score = sonsuz (En iyi skor başlangıçta sonsuz)
En iyi sonuçları saklamak için liste başlat
t = 0
Max_iterations = belirlenen maksimum iterasyon sayısı
while (t < Max_iterations) do:
    her kurt için:
        Skoru hesapla (objective_function kullanarak)
        Eğer skor alpha_scoredan düşükse:
            Alpha_score = mevcut skor
            Alpha_pos = mevcut kurtun pozisyonu
    En iyi skoru kaydet (best_scores dizisine)
    En iyi BESS kapasitesini kaydet (best_bess_capacities dizisine)
    her kurt için:
        r1 ve r2 değerlerini rastgele [0, 1] arasında üret
        a = 2 * (1 - t / Max_iterations)
        A = 2 * a * r1 - a
        C = 2 * r2
        D_alpha = |C * Alpha_pos - X_i|
        yeni_pozisyon = Alpha_pos - A * D_alpha
        yeni_pozisyonu sınırlarla kontrol et (min ve max kapasite sınırları)
    t = t + 1
En iyi çözüm olan Alpha_posu döndür.
```

Şekil 4.3 GWO algoritması sözde kodu

GWO'nun çok geniş bir elektrik güç sistemlerinin optimizasyonunda geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Referans [191]'de elektrik araç şarj cihazlarının yönetimi, Referans [192]'de ise rüzgar hızı tahmini GWO ile yapılmıştır. Makhadmeh ve ark. [193] enerji planlama problemini bir optimizasyon problemi olarak ele alınmış ve enerji tüketim maliyetlerini en aza indirmek, talebi yönetmek ve kullanıcı konforunu artırmak için GWO kullanmış ve optimal planlamalar bulunmaya çalışılmıştır. Hu ve ark [194] GWO'yu enerji sistemlerinin en uygun yapılandırılmalarını belirlemek için kullanmışlardır. GWO, enerji depolama

kapasitesi tahsisi ve yük yönetimi modelleri oluşturmak amacıyla yerel arama yöntemleriyle birleştirilmiş ve böylece hem maliyetleri düşürmede hem de sistem güvenilirliğini artırmada etkili bir çözüm sağlanmıştır. Referans [195]'de GWO %100 yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı izole mikroşebekelerde enerji maliyetini en aza indirmek ve aşırı enerji üretimini sınırlamak amacıyla kullanılmıştır. Yaptığımız bu çalışmada GWO ile küçük güçlü elektrik üretim ve dağıtım sistemi olan bir NG için öncelikle gerçek konum ve meteorolojik verilerden faydalanılarak HOMER programı ile sistem modellenmiş ve yenilenebilir enerji çıktısı elde edilmiştir. Bu çıktının üretim ve yük değerleri excel programı aracılığıyla python programlama dilinde yazılan koda “input” olarak girilmiştir. HOMER’de simüle edilen sistemin fotovoltaiik gücü 7 kW’dır. Yük profili ise Şekil 4.4 ile verilmiştir. Bu yük profili ve üretim çıktısı bu bölümde yapılan diğer optimizasyon çalışmalarında da kullanılmıştır. Böylece aynı üretim ve tüketim değerlerine sahip girişlere sahip olan kodlar ile yapılan çalışmalarda doğadan esinlenen üç farklı optimizasyon algoritmasının karşılaştırmaları yapılabilmektedir.



Şekil 4.4 GWO – ABC – PSO ile sistemleri için yük profili

Yapılan kodlamada optimizasyon 1 yıl yani 8760 saat için çalıştırılmıştır. Böylelikle program çıktısının optimal gerçeğe yakınsaması sağlanmıştır. Yük talebi incelendiğinde günlük 23 kW elektrik enerjisi gereksini olduğu anlaşılmaktadır. Giriş verilerinden sonra kural bazlı modelleme ile enerji yönetimi yapılmış şebekeden enerji alış verişi şebekeden alınan enerjinin minimize edileceği şekilde yönetilmiş ve bunun sonucunda GWO ile BESS kapasitesi tayin edilmiştir. Sistemin matematiksel ifadeleri Denklem (4.12) – Denklem (4.20) ile verilmiştir.

$$E_t^{excess} = P_t^{generation} - P_t^{demand}, \forall t \quad E_t^{excess} > 0, \forall t \quad (4.12)$$

$$E_t^{deficit} = |P_t^{demand} - P_t^{generation}|, \forall t \quad E_t^{deficit} < 0, \forall t \quad (4.13)$$

$$B_t^{min} \leq B_t^{cap} \leq B_t^{max}, \forall t \quad (4.14)$$

$$E_t^{export} = \sum_{t=1}^T E_t^{excess} - \sum_{t=1}^T \Delta B_t^{charge} \quad (4.15)$$

$$E_t^{import} = \sum_{t=1}^T E_t^{deficit} - \sum_{t=1}^T \Delta B_t^{discharge} \quad (4.16)$$

$$OF = \min \sum_{t=1}^T E_t^{import} \quad (4.17)$$

$$B_t = B_{t-1} + \Delta B_t^{charge} - \Delta B_t^{discharge} \quad (4.18)$$

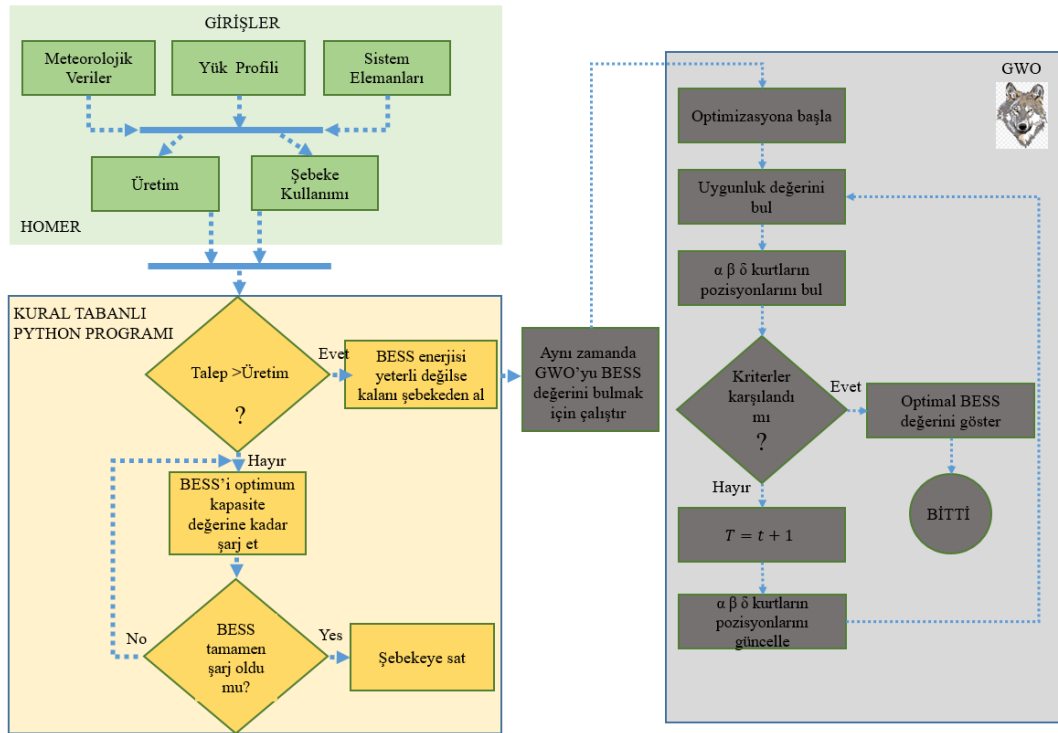
$$\Delta B_t^{discharge} \cdot \Delta B_t^{charge} = 0 \quad (4.19)$$

$$E_t^{import} \cdot E_t^{export} = 0 \quad (4.20)$$

E_t^{excess} ifadesi üretilen enerjinin talebi aşan kısmını, $P_t^{generation}$ ve P_t^{demand} nanoşebekede üretilen ve talep edilen gücü, E_t^{import} ve E_t^{export} şebekeden alınan ve şebekeye satılan enerji miktarını, $B_t^{discharge}$ ve B_t^{charge} batarya deşarj ve şarj değerlerini, $E_t^{deficit}$ talebi karşılanamayan enerji miktarını ve B_t ise her hangi bir t anında bataryada bulunan enerji miktarını ifade etmektedir. Denklem (4.17) ile amaç fonsiyonunda belirtildiği gibi üç aşamalı olan optimizasyon sürecinin ikinci adımı şebekeden alınan enerji miktarını minimize etmektir. Algoritma bataryayı Denklem (4.14) ile verilen kısıtlar çerçevesinde optimize etmektedir. Bu üst ve alt sınır programa parametrik olarak dahil edilmiştir. Denklem (4.19) ile bataryanın aynı anda şarj ve deşarjı engellenmiştir. Denklem (4.20) ile benzer şekilde şebekeye aynı anda elektrik verme ve aynı anda şebekeden enerji almanın önüne geçilmiştir. Denklem (4.21) ile aylık mahsuplaşma ifadesi verilmiştir.

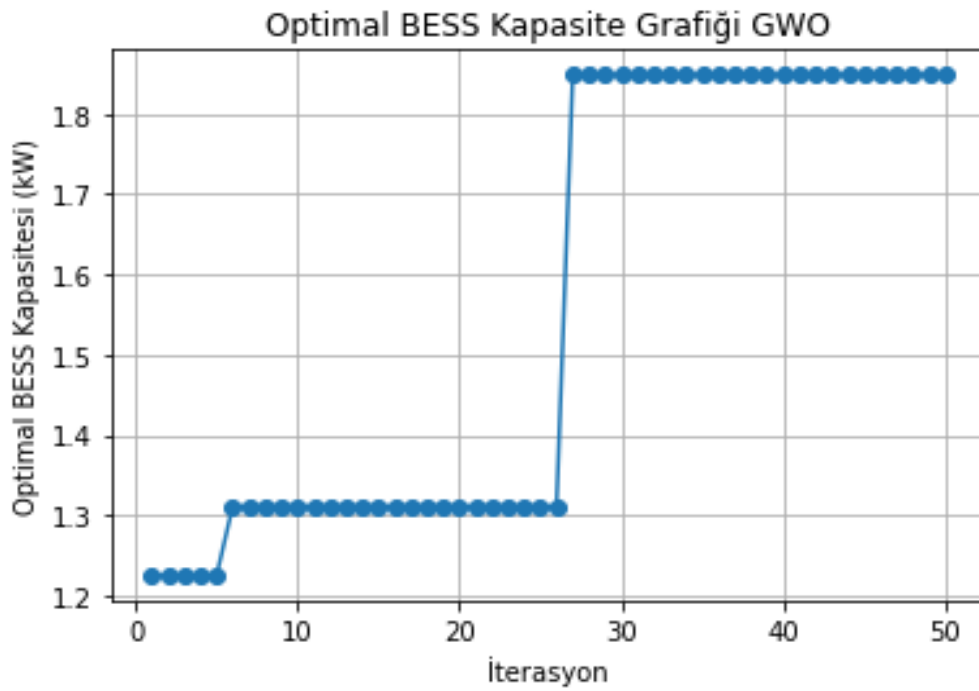
$$E_t^{monthly} = \sum_{t \in m}^{12} E_t^{import} - \sum_{t \in m}^{12} E_t^{export} \quad (4.21)$$

Daha önce üçüncü bölümde açıklandığı üzere lisanssız elektrik üretiminde aylık üretilen enerji miktarından tüketilen miktar düşülerek faturalandırma yapılmaktadır. Yapılan bu çalışmanın akış diagramı Şekil 4.5 ile verilmiştir.



Şekil 4.5 GWO optimizasyon sisteminin akış diagramı

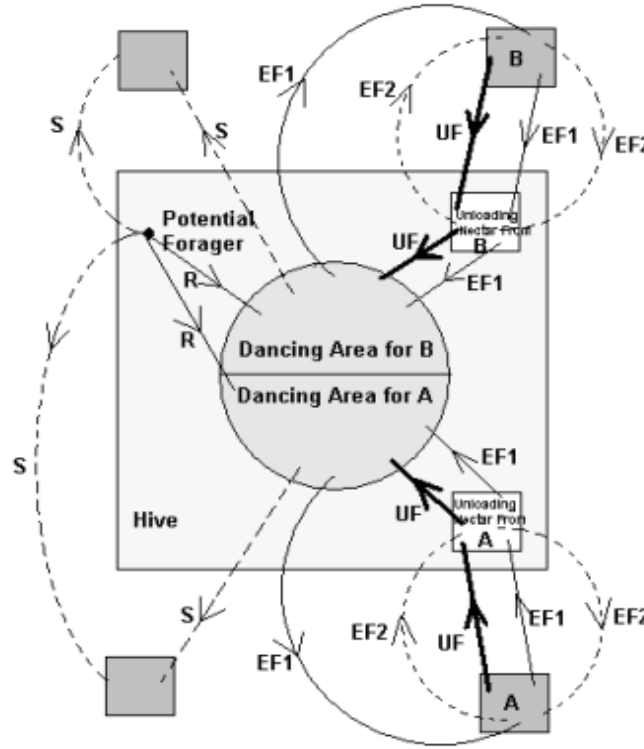
Optimizasyon sonucunda oluşan optimal BESS kapasite grafiği Şekil 4.6 ile verilmektedir. Buna göre GWO ile optimum BESS kapasitesi 1,85 kW olarak bulunmuştur.



Şekil 4.6 GWO optimizasyon sonucu

4.2 Yapay Arı Kolonisi Optimizasyon Algoritması

Yapay Arı Kolonisi algoritması 2005 yılında D. Karaboğa tarafından ortaya atılan ve çeşitli sayısal problemleri çözmek amacıyla kullanılan doğadan ilham alan bir meta-sezgisel algoritmadır [196]. ABC algoritmasının yapısında üç ana arı grubu bulunur: çalışan arılar, gözlemci arılar ve keşif arıları. Çalışan arılar, daha önce keşfettikleri besin kaynaklarına geri dönerek bu kaynaklar hakkında güncel bilgi sağlar. Gözlemci arılar ise, çalışan arılar tarafından aktarılan bilgilere dayanarak mevcut besin kaynaklarını değerlendirir ve karar alır. Keşif arıları ise artık kullanılamaz hale gelen kaynakları terk ederek yeni kaynaklar arar [197]. Şekil 4.7 ile ABC algoritmasındaki arıların davranışları verilmiştir [196]. Bu davranışların matematiksel modellenmesiyle bu yöntem ortaya çıkmıştır.



Şekil 4.7 ABC algoritmasında arıların besin toplama davranışının tasviri [196]

Arayıcı arıların temel davranış özelliklerini daha iyi anlamak için Şekil 4.7 incelendiğinde; A ve B besin kaynaklarıdır. En başta, potansiyel bir keşif arısı işsiz bir arayıcı olarak başlar. Bu arının yuva etrafındaki nektar kaynakları hakkında hiçbir bilgisi yoktur. Böyle bir arının iki olası seçeneği vardır: i) Arı bir keşif arısı olabilir ve içsel bir motivasyon veya olası bir dış ipucu nedeniyle (Şekil 4.7’de S ile gösterilmiştir) yuva etrafında besin aramaya başlar. ii) Arı, diğer arıların

sallanma danslarını izleyerek besin kaynağı aramaya başlar (Şekil 4.7’de R ile gösterilmiştir). Nektar kaynağını bulduktan sonra, arı bulunduğu yeri hafızasında tutma yeteneğini kullanır ve hemen bu kaynağı kullanmaya başlar. Bu noktada, arı artık “çalışan arayıcı” olur. Arayıcı arı, kaynaktan nektar alır ve yuvaya geri döner, nektarı besin deposuna boşaltır. Bu işlemden sonra arının üç olasılığı vardır: i) Besin kaynağını terk ettikten sonra "kararsız bir takipçi" olabilir (Şekil 4.7’de UF ile gösterilmiştir). ii) Bir süre dans eder, yuva arkadaşlarını kaynağa yönlendirdikten sonra aynı besin kaynağına geri döner (Şekil 4.7’de EF1 ile gösterilmiştir). iii) Diğer arıları kaynağa yönlendirmeden besin kaynağında çalışmaya devam eder (Şekil 4.7’de EF2 ile gösterilmiştir). Burada dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta, tüm arıların aynı anda besin aramaya başlamadığıdır [196]. ABC algoritmasının matematiksel ifadeleri Denklem (4.22) – Denklem (4.24) ile verilmiştir [198].

$$new_i^j = a + b \times food_i^j \quad (4.22)$$

$$a = C_1 \times food_i^j + (1 - C_1) \times gbest^j \quad (4.23)$$

$$b = |food_i^j - gbest^j| \quad (4.24)$$

Burada $food_i^j$ i popülasyonu tarafından toplanan j . konumdaki nektarı temsil eder. $gbest$ o anda arama yapan arıların bulunduğu en iyi nektar konumudur C_1 ise 0 – 1 arasında rastgele bir sayıdır. Bundan sonra arı kolonisi, nektarı takipçi arılar tarafından sağlanan bilgilere dayanarak paylaşacaktır. Bu durum Denklem (4.25) ile verilmiştir.

$$new_i^j = C_1 \times (ref_{1,i} - ref_{2,i}) \quad (4.25)$$

Burada $ref_{1,i}$ ve $ref_{2,i}$ daha önce alınan nektardan referans olarak alınan parçaları temsil eder. Eğer bir yiyecek kaynağı yerel bir optimuma düşerse, bırakılacaktır. İzci arılar daha sonra Denklem (4.22)'ye göre yeni bir yiyecek kaynağı bulacaklardır. Bu yeni kaynağın konumu Denklem (4.26) ile hesaplanır.

$$new_i^j = rand(lb, ub) \quad (4.26)$$

Burada, lb ve ub karar değişkenlerinin alt ve üst sınırlarını temsil etmektedir. Kolonideki arılar uygunluk değerlerini güncelleyecek ve en uygun yiyecek

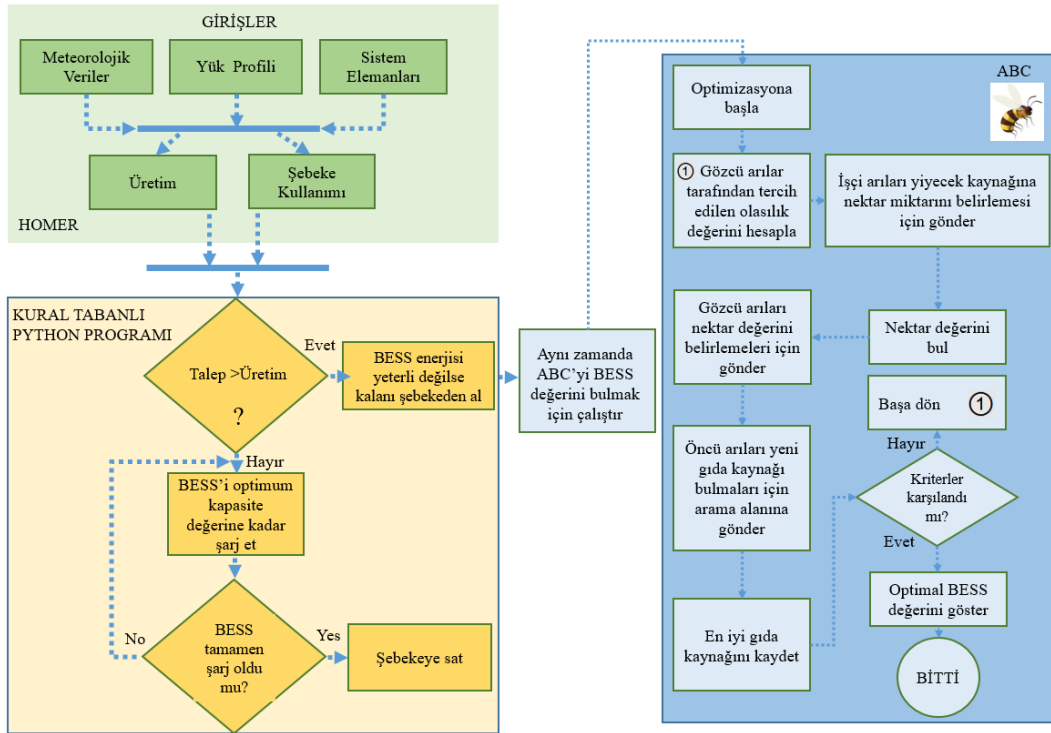
kaynağını belirleyeceklerdir [198-199]. Şekil 4.8 ile python programlama dilinde bu tez çalışması için yazılan ABC algoritmasının sözde kodu verilmiştir.

```
Başlangıç: Arı popülasyonunu başlat  $X_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) olarak başlat
Her arı için deneme sayısını sıfırla.
En iyi skor ve pozisyonu başlangıçta sonsuz ve boş olarak ata.
Limit değerini belirle (izci arıların yeni pozisyon arayacağı deneme sayısı)
Döngüye Başla (iterasyon sayısı kadar):
  Çalışan Arılar için:
    Her arı için:
      Amaç Foksiyonunu kullanarak mevcut pozisyonun skorunu hesapla.
      Eğer skor en iyiden düşükse:
        En iyi skoru güncelle.
        En iyi pozisyonu güncelle.
        Deneme sayısını sıfırla.
      Eğer iyileşme yoksa:
        Deneme sayısını artır.
  Gözlemci Arılar için:
    Her arı için:
      Gözlemci arı olma ihtimali ile:
        Rastgele bir partner arı seç.
        Seçilen arının pozisyonuna bağlı olarak yeni bir pozisyon üret.
        Objective function kullanarak yeni pozisyonun skorunu hesapla.
        Eğer yeni pozisyon daha iyiye:
          Pozisyonu güncelle.
  İzci Arılar için:
    Eğer bir arının deneme sayısı limiti aşmışsa:
      Rastgele yeni bir pozisyon üret.
      Deneme sayısını sıfırla.
    En iyi skor ve BESS kapasitesini kaydet.
Döngü Sonu (Max iterasyon sayısına ulaşıldığında):
  En iyi skor ve en iyi pozisyonu döndür.
```

Şekil 4.8 ABC algoritması sözde kodu

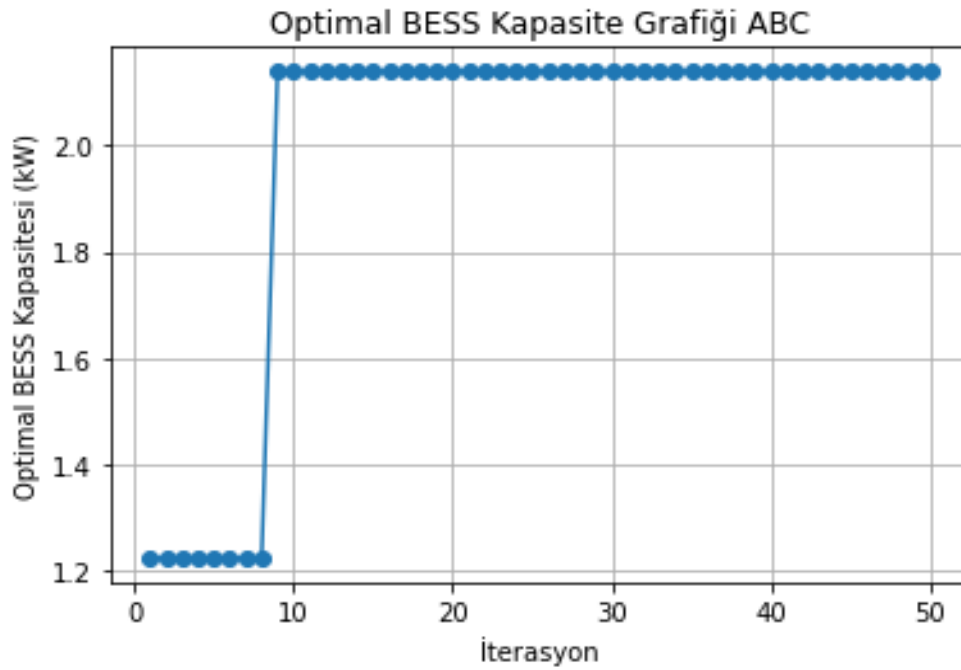
ABC'nin çok geniş bir elektrik güç sistemlerinin optimizasyonunda geniş bir kullanım alanı bulunmaktadır. Referans [200]'de ABC elektrikli araçların ve hibrit yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu ile ekonomik yük dağıtımı ve karbon emisyonlarının azaltılması amacıyla kullanılmıştır. Referans [201]'de hibrit yenilenebilir enerji sistemlerinin optimizasyonu için ABC algoritmasını kullanan bir optimizasyon aracı geliştirilmiştir. Bu araç, HOMER optimizasyon programı ile karşılaştırılmış ve benzer sonuçlar elde etmesine rağmen çok daha hızlı çalıştığı belirtilmiştir. Ayrıca, literatürde sık kullanılmayan bir güvenilirlik ölçütü olan kapasite açığı parametresi bu çalışmada ilk kez kullanılmıştır. Uzu ve ark. [202] Türkiye'nin yıllık hidroelektrik enerji üretimini tahmin etmek için yapay arı kolonisi algoritmasıyla yapay sinir ağı modelini uygulamıştır. Çalışma sonuçlarında optimizasyon sonuçlarına göre enerji politikalarında güncellemeler yapılması tavsiye edilmiştir. Referans [203]'de Sistemin bileşenlerinin optimal boyutlandırılması için yapay arı kolonisi algoritması uygulanmıştır. Bir orta afrika ülkesi olan Kamerun için yapılan çalışmada ABC algoritması, fotovoltaik/rüzgar/yakıt hücresi ve fotovoltaik/rüzgar/batarya hibrit sistemlerinin optimal tasarımı için

uygulanmıştır. ABC algoritması ile, net şimdiki değer minimize edilirken sistem güvenilirliğini de artırmak hedeflemiştir. Hibrit enerji sistemlerinin optimizasyonunu sağlamak amacıyla diğer meta-sezgisel algoritmalarla karşılaştırılmış ve sonuçlar, maliyet ve güvenilirlik açısından değerlendirilmiştir [204]. Yaptığımız bu çalışmada ABC algoritması ile bir NG için öncelikle gerçek konum ve meteorolojik verilerden faydalanılarak HOMER programı ile sistem modellenmiş ve yenilenebilir enerji çıktısı elde edilmiştir. Bu çıktının üretim ve yük değerleri excel programı aracılığıyla python programlama dilinde yazılan koda “input” olarak girilmiştir. HOMER’de simüle edilen sistemin fotovoltaiik gücü 7 kW’dır. Yük profili ise aynı GWO algoritması çalışmasında olduğu gibi Şekil 4.4 ile verilmiştir. Giriş verileri kullanılarak oluşturulan kural tabanlı modelleme ile enerji yönetimi yapılmış, enerji alışverişi şebekeden alınan enerjinin en aza indirileceği şekilde optimize edilmiştir. Bu süreçte, şebekeden enerji alımı ve verilmesi, sistemin verimliliğini artıracak şekilde yönetilmiştir. Enerji yönetimi stratejisi, şebeke bağımlılığını en aza indirirken, sistemin ihtiyaç duyduğu batarya enerji depolama sistemi kapasitesi ABC algoritması ile belirlenmiştir. Sistemin matematiksel modellemesi ise Denklem (4.12) ile Denklem (4.20) arasında detaylandırılmıştır. Yapılan bu çalışmanın akış diagramı Şekil 4.9 ile verilmiştir. Bu akış diyagramıyla, enerji yönetimi ve BESS kapasitesi optimizasyonunu iki temel aşamada ele alınmıştır. İlk aşama, kural tabanlı enerji yönetimi olup, meteorolojik veriler, yük profili ve sistem bileşenlerine dayalı olarak enerji talebi ve üretimi arasındaki fark belirlenmiştir. Talep üretimi aşıyorsa, öncelikle BESS devreye girer; BESS kapasitesi yetersizse şebekeden enerji alınır. Üretim fazlası olduğunda ise, BESS şarj edilir ve batarya dolduğunda fazla enerji şebekeye aktarılır. İkinci aşama ise ABC algoritması ile BESS kapasitesinin optimizasyonudur. ABC, arıların nektar bulma davranışını taklit ederek optimal çözümü arar. Gözlemci ve izci arılarla yapılan bu süreç, en iyi enerji depolama kapasitesini bulmaya yönelik bir dizi hesaplama ve arama işlemi içermektedir. Sonuç olarak, şebekeden alınan enerjinin minimize olmuş haliyle BESS kapasitesinin optimal tayini yapılır.



Şekil 4.9 ABC optimizasyon sisteminin akış diagramı

Optimizasyon sonucunda oluşan optimal BESS kapasite grafiği Şekil 4.10 ile verilmektedir. Buna göre ABC algoritması ile optimum BESS kapasitesi 2,14 kW olarak bulunmuştur.



Şekil 4.10 ABC optimizasyon sonucu

4.3 Parçacık Sürü Optimizasyon Algoritması

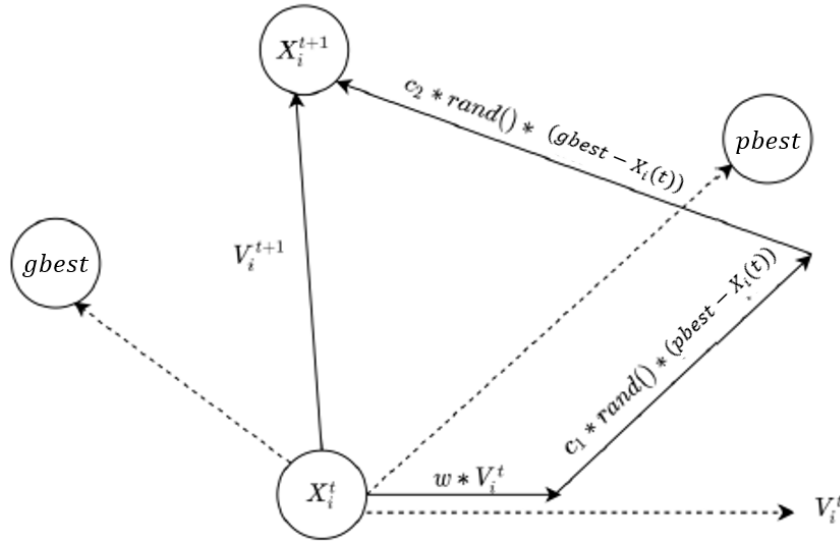
Parçacık Sürü Optimizasyonu doğrusal olmayan fonksiyonların optimizasyonu için basit ancak etkili bir algoritma olarak geliştirilmiştir ve sosyal davranışların optimizasyon prensiplerine uygulanmasından ilham almıştır. İlk olarak bir sosyal psikolog ve bir elektrik mühendisi tarafından ortaya atılan bu algoritma, yapay yaşam ve evrimsel hesaplama temelli bir yaklaşımdır ve genetik algoritmalar ile evrimsel programlama arasında bir konuma sahiptir. PSO, çok boyutlu bir uzayda çözümleri simüle eder ve parçacıkların hem bireysel deneyimlerine (*pbest*) hem de toplu en iyi çözüme (*gbest*) göre hızlanmalarını sağlar. Diğer evrimsel algoritmalarından farklı olarak, PSO stokastik süreçlerle bilinen ve bilinmeyen çözüm alanları arasında dengeli bir arama yapar. Algoritmanın bu basit ve sağlam yapısı, özellikle nöral ağ eğitimi ve fonksiyon optimizasyonu gibi çeşitli uygulamalarda geniş bir kullanım alanı bulmuştur. PSO, sosyal davranışların doğadan esinlenilerek mühendislik problemlerine uygulanmasıyla, doğal süreçleri taklit eden etkili ve sade bir yöntem sunmaktadır [205].

n parçacıktan oluşan bir $X = \{x_1, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ popülasyonu ve ağırlıksız, hacimsiz parçacıkların D boyutlu bir arama alanında hareket ettiğini varsayalım. t 'nci iterasyonda, $x_i(t) = [x_{i1}(t), x_{i2}(t), \dots, x_{iD}(t)]$ i 'nci parçacığın konumunu, $V_i(t) = [v_{i1}(t), v_{i2}(t), \dots, v_{iD}(t)]$ i 'nci parçacığın hızını ifade eder. t 'ye kadar geçen süre boyunca, $pbest(t) = [pbest_{i1}(t), pbest_{i2}(t), \dots, pbest_{iD}(t)]$, parçacık i 'nin o zamana kadar ziyaret ettiği en iyi kişisel konumu gösterir. $gbest$ ise tüm parçacıklar tarafından şimdiye kadar keşfedilen en iyi konumu ifade eder. Her bir oluşumda, i 'nci parçacığın evrim süreci Denklem (4.27) ve Denklem (4.28) ile formüle edilir [206].

$$V_{i+1} = \omega V_i(t) + C_1 \times rand_1 \times (pbest - X_i(t)) + C_2 \times rand_2 \times (gbest - X_i(t)) \quad (4.27)$$

$$X_{i+1} = V_{i+1} + X_i(t) \quad (4.28)$$

Burada $i = 1, 2, \dots, D$ olmak üzere, ω atalet ağırlığını temsil eder. C_1 ve C_2 PSO algoritmasının sabitleridir ve $[0, 2]$ aralığında değer alır. $rand_1$ ve $rand_2$ ise $[0, 1]$ aralığındaki rastgele sayıları ifade eder. Parçacıkların hareketiyle optimizasyon metodolojisinin gösterimi Şekil 4.11 ile verilmiştir.



Şekil 4.11 PSO algoritması içinde parçacıkların hareketi [206]

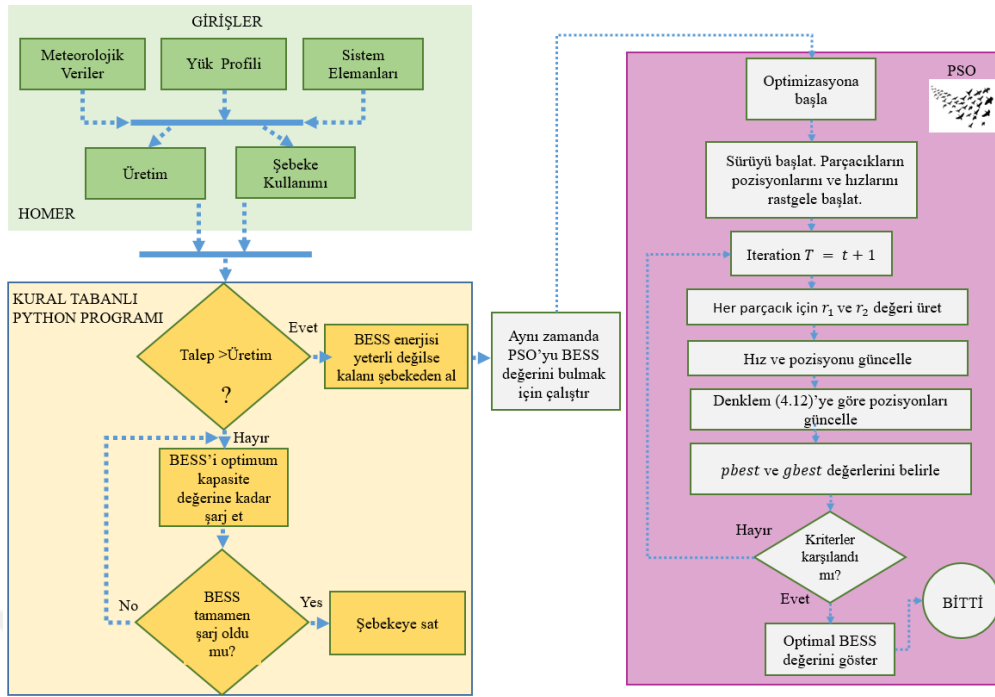
Şekil 4.12 ile python programlama dilinde bu tez çalışması için yazılan ABC algoritmasının sözde kodu verilmiştir.

```
Başlat:
- Parçacıkların başlangıç konumlarını rastgele seç
- Parçacıkların başlangıç hızlarını rastgele seç
- Her parçacık için kişisel en iyi konumları ve skorları başlat
- Global en iyi konumu ve skoru başlat
PSO OPTİMİZASYON SÜRECİ:
Döngü (iterasyon sayısı kadar tekrarla):
Her bir parçacık için:
- Rastgele r1 ve r2 değerlerini [0, 1] arasında üret
- Hızı güncelle:
    velocity[i] = (inertia_weight * velocity[i] +
                  c1 * r1 * (personal_best_position[i] - current_position[i]) +
                  c2 * r2 * (global_best_position - current_position[i]))
- Konumu güncelle:
    current_position[i] = current_position[i] + velocity[i]
- Konumu kısıtlar içinde kalacak şekilde ayarla (min/max kapasite):
    current_position[i] = max(min_capacity, min(max_capacity, current_position[i]))
- Yeni pozisyonu değerlendir (amaç fonksiyonunu kullanarak skoru hesapla)
- Eğer yeni skor, kişisel en iyi skordan iyiye:
    - Kişisel en iyi konumu ve skoru güncelle
- Eğer yeni skor, global en iyi skordan iyiye:
    - Global en iyi konumu ve skoru güncelle
- En iyi skoru listeye kaydet
- En iyi BESS kapasitesini kaydet
Son:
- En iyi çözümleri döndür
```

Şekil 4.12 PSO algoritması sözde kodu

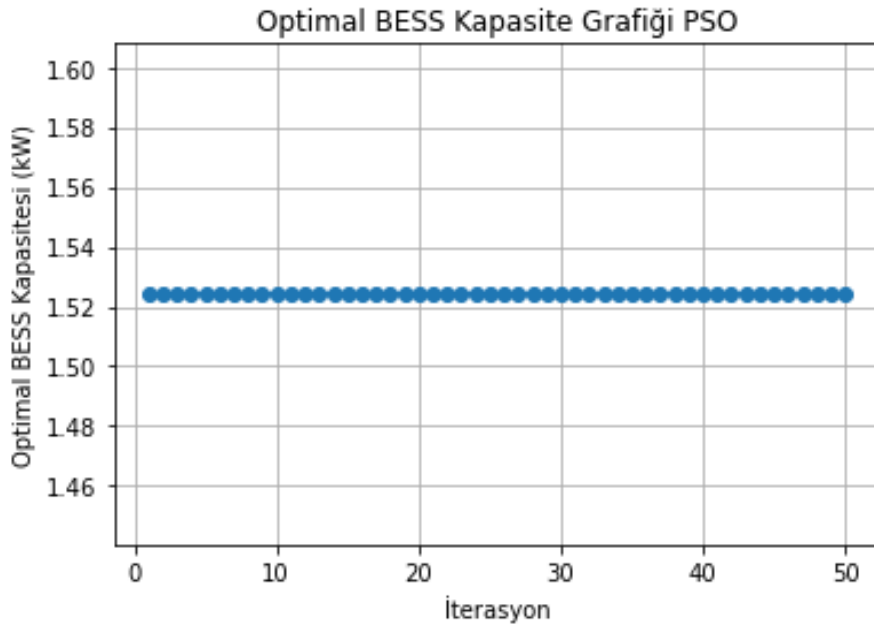
PSO algoritması, doğadaki grup davranışlarını modelleyerek popülasyon temelli bir yaklaşımla geliştirilmiş olup, mühendislikten ekonomiye, yapay zekâdan enerji sistemlerine kadar geniş bir uygulama alanı sunmaktadır. PSO, özellikle doğrusal olmayan, karmaşık ve yüksek boyutlu problemlerin çözümünde başarılı sonuçlar elde ettiği bilinmektedir [207]. Enerji sistemlerinde PSO'nun kullanımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının entegrasyonu [208-209], enerji depolama sistemlerinin optimal

boyutlandırılması [210], şebekeden bağımsız enerji yönetimi [211] ve yük dengeleme [212-213] gibi kritik alanlarda yoğunlaşmıştır. PSO'nun hızlı yakınsama kabiliyeti, belirsizlik içeren ortamlarda bile gerçek zamanlı karar verme süreçlerine uygun hale gelmesine olanak tanır. Bunun yanı sıra, adaptif doğası gereği çok amaçlı optimizasyon problemlerinde yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağladığı için endüstriyel ve akademik araştırmalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Enerji üretiminde maliyet-fayda dengesi, çevresel etkilerin minimizasyonu ve verimlilik artışı gibi hedefler doğrultusunda, PSO'nun esnek ve güçlü yapısı, optimal çözümler sunarak enerji sektöründeki yenilikçi uygulamalara önemli katkılarda bulunmuştur [214-215]. Yaptığımız bu çalışmada PSO algoritması ile bir NG için öncelikle gerçek konum ve meteorolojik verilerden faydalanılarak HOMER programı aracılığıyla sistem modellenmiş ve yenilenebilir enerji çıktısı elde edilmiştir. Bu çıktının üretim ve yük değerleri, excel programı aracılığıyla python programlama dilinde yazılan koda “input” olarak girilmiştir. HOMER’de simüle edilen sistemin fotovoltaiik gücü 7 kW’dır. Yapılan üç çalışmada da aynı yük ve üretim verileri kullanılmıştır. Giriş verileri kullanılarak oluşturulan kural tabanlı modelleme ile enerji yönetimi yapılmış ve enerji alışverişi, şebekeden alınan enerjinin en aza indirileceği şekilde optimize edilmiştir. Enerji yönetimi stratejisi, şebeke bağımlılığını en aza indirirken, sistemin ihtiyaç duyduğu BESS kapasitesi PSO algoritması ile optimize edilmiştir. Sistemin matematiksel modeli Denklem (4.12) ile Denklem (4.20) arasında detaylandırılmıştır. Yapılan bu çalışmanın akış diyagramı Şekil 4.12 ile verilmiştir. Bu akış diyagramında, enerji yönetimi ve batarya enerji depolama sistemi kapasitesinin optimizasyonu iki temel aşamada ele alınmıştır. İlk aşama, kural tabanlı enerji yönetimi olup meteorolojik veriler, yük profili ve sistem bileşenlerine dayalı olarak enerji talebi ve üretimi ortaya konulmuştur. Talep üretimi aşıyorsa, öncelikle BESS devreye girer; BESS kapasitesi yetersizse şebekeden enerji alınır. Üretim fazlası olduğunda ise, BESS şarj edilir ve batarya dolduğunda fazla enerji şebekeye aktarılır. İkinci aşama ise PSO algoritması ile BESS kapasitesinin optimizasyonudur. PSO, parçacıkların en iyi çözümü arama sürecini taklit ederek, en uygun enerji depolama kapasitesini bulmaya yönelik bir dizi hesaplama ve arama işlemi gerçekleştirir. Sonuç olarak, şebekeden alınan enerjinin minimize edildiği ve BESS kapasitesinin optimal şekilde belirlendiği bir çözüm elde edilmiştir.



Şekil 4.13 PSO optimizasyon sisteminin akış diagramı

Optimizasyon sonucunda oluşan optimal BESS kapasite grafiği Şekil 4.14 ile verilmektedir. Buna göre PSO algoritması ile optimum BESS kapasitesi 1,52 kW olarak bulunmuştur.



Şekil 4.14 PSO optimizasyon sonucu

Üç farklı optimizasyon algoritması ile verilen optimal kapasite grafikleri incelendiğinde, her üç algoritmanın da optimal kapasiteye ulaşma süreçlerinde

belirgin farklılıklar olduğu gözlemlenmektedir. GWO algoritması, başlangıçta daha düşük kapasite değerleriyle ilerlemiş, ancak yaklaşık 25. iterasyonda 1.85 kW seviyesinde stabil hale gelmiştir. Bu, GWO algoritmasının başta geniş bir arama yaparak optimal çözüme hızlı bir şekilde yakınsadığını göstermektedir. ABC algoritması ise 10. iterasyonda 1.25 kW'dan 2,14 kW seviyesine çıkarmış ve bu seviyede sabit kalmıştır. ABC'nin daha erken iterasyonlarda hızlı bir yakınsama sağladığı görülmektedir. Buna karşın PSO algoritması, daha kararlı ve istikrarlı bir süreç sergilemiş, yaklaşık 1.52 kW seviyesinde sabit bir kapasite değerini korumuştur. Bu sonuç, PSO'nun daha küçük adımlarla, ancak daha dengeli bir şekilde optimal çözüme ulaştığını göstermektedir.

Sonuç olarak, GWO ve ABC algoritmaları, geniş bir arama yaparak daha hızlı ve yüksek kapasitelerde çözümler üretirken, PSO algoritması daha dengeli ve istikrarlı bir şekilde optimal çözüme yakınsamaktadır. Bu durum, BESS kapasite optimizasyonu gibi karmaşık problemlerde her algoritmanın farklı arama stratejilerinin etkili olabileceğini, ancak PSO'nun sunulan diğer algoritmalara göre daha üstün bir performans ortaya koyduğu görülmüştür.

NANOŞEBEKELER ARASI (p2p) OPTİMAL ENERJİ TRANSFERİNİN MODELLENMESİ

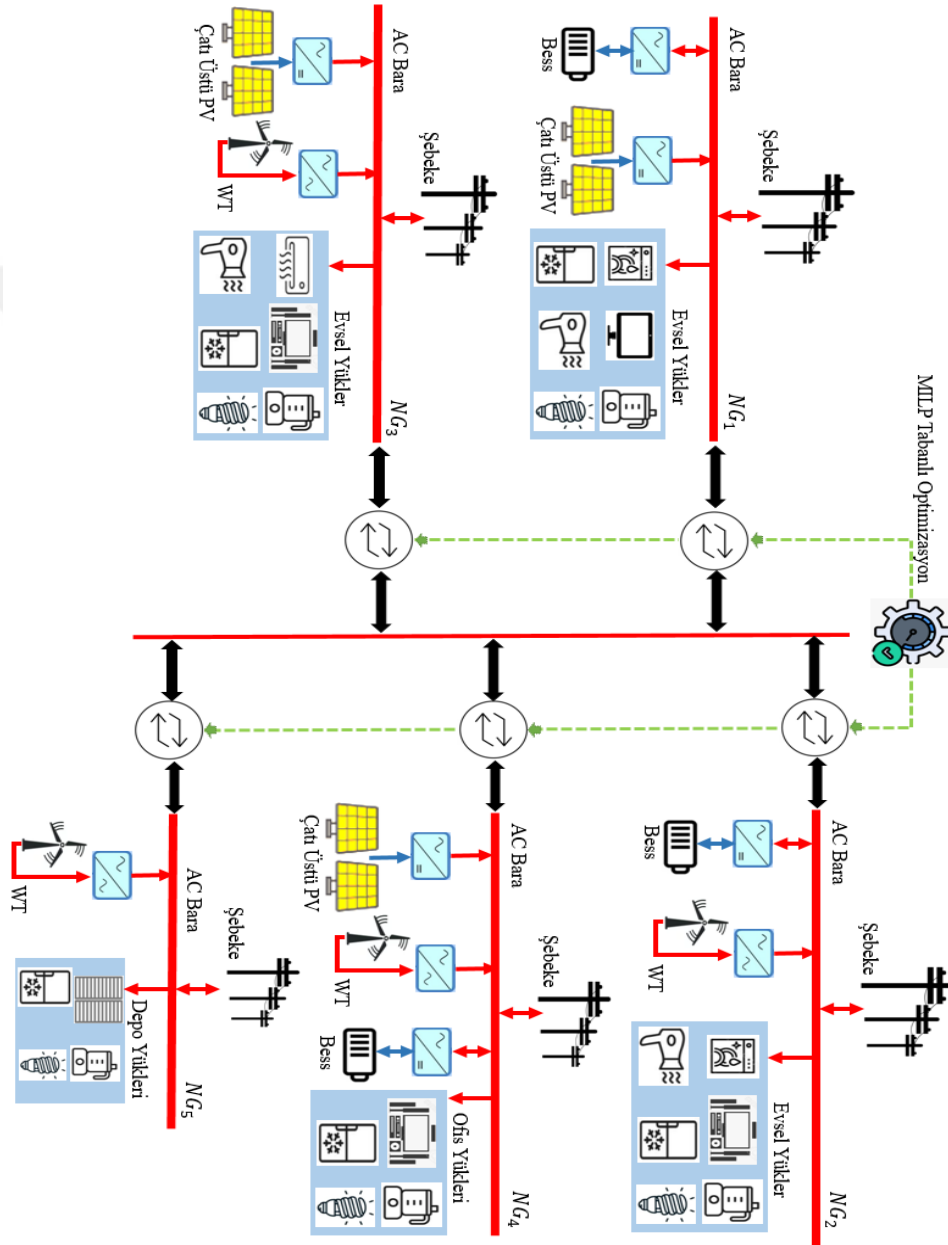
Bu çalışmada, beş farklı nanoşebeke ($NG_1, NG_2, NG_3, NG_4, NG_5$) arasındaki enerji yönetimini optimize etmek amacıyla, Karmaşık Tamsayılı Doğrusal Programlama (MILP) yöntemine dayanan bir model geliştirilmiştir. Nanoşebekeler arasındaki enerji akışı, şebekeden enerji alımını minimize etmek ve fazla enerjiyi optimize bir şekilde yönetmek için python programlama dilinde gurobi çözücü kullanılarak çözülmüştür. Her bir nanoşebeke, farklı yenilenebilir enerji kaynakları ve batarya enerji depolama sistemlerine sahiptir. NG_1 'de fotovoltaik enerji üretimi ve 5 kWh kapasiteli batarya, NG_2 'de rüzgar türbini ve 2 kWh batarya bulunurken, NG_3 rüzgar ve güneş enerjili hibrit bir NG, NG_4 rüzgar, güneş ve batarya enerji depolama sistemi bulunan bir NG, NG_5 ise salt rüzgar enerjisi ile çalışan bir NG olarak çalışmaktadır. NG_4 ayrıca 3 kWh'lik bir batarya depolama sistemi içermektedir. Çalışmanın ana hedefi, bu nanoşebekeler arasındaki enerji üretim ve tüketim dengesini kurarak bu NG kümesinin şebekeden aldığı toplam enerji miktarını minimize etmektir. Bunu yaparken nanoşebekeler arası enerji transferi ile her bir NG'nin şebekeden aldığı enerjiyi NG'ler arası uçtan uca enerji transferi ile düşürmek ana amaç olmuştur.

Bu kapsamda geliştirilen MILP modeli, her bir NG yapısında enerji üretim-tüketim dengesi ve batarya yönetimini kapsayan bir metodolojiye dayanmaktadır. Model, her bir nanoşebekenin saatlik enerji üretimi ve talebini dikkate alarak bataryaların şarj ve deşarj süreçleri ile NG'ler arasındaki enerji transferini optimize ederek şebekeden alınan enerji miktarını minimize etmektedir. Özellikle, nanoşebekelerin enerji açığı ve fazlası durumlarına göre, bir nanoşebekeden diğerine enerji transferi mümkün kılınmıştır. Nanoşebekeler arası enerji transferleri belirlenen kapasite

limitleri içinde gerçekleştirilirken, şebekeden enerji alımı (import) ve fazladan enerjinin şebekeye verilmesi (export) süreçleri de optimize edilmiştir. Bu süreçte kullanılan MILP yöntemi, doğrusal programlama yaklaşımıyla enerji üretim ve tüketim dengesizliklerini minimize ederken, tamsayı değişkenleri aracılığıyla bataryaların eşzamanlı şarj ve deşarj olması ve şebekeye aynı anda enerji verip alınması önlemiştir. Ayrıca, enerji transferi sırasında nanoşebekeler arasındaki yönlendirme ve enerji fazlası olan şebekenin öncelikli olarak diğer şebekelere enerji sağlama kapasitesi göz önünde bulundurulmuştur.

Modelin metodolojisi, belirli kısıtlar çerçevesinde çalışmaktadır. Bataryaların şarj ve deşarj süreçleri aynı anda gerçekleştirilemezken, her bir nanoşebeke için saatlik enerji dengesi korunmuştur. Her bir nanoşebekenin enerji açığı ve fazlası belirlenmiş, açığı olan şebekelere enerji fazlası olan şebekelerden enerji transferi yapılmıştır. Enerji dengesi denklemleri, batarya depolama durumları, şebekeden alınan enerji miktarları ve şebekeye verilen enerji miktarları üzerinde etkili olmuştur. Özellikle, büyük M (big M) yöntemi kullanılarak enerji açığı ve fazlası durumları tanımlanmış ve bu duruma göre nanoşebekeler arası enerji transferleri gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon sonucunda, her bir nanoşebekenin enerji açığı veya fazlası durumları dikkate alınarak, şebekeden alınan enerji miktarı minimize edilmiştir. Enerji üretimi ve talebi saatlik olarak modellenmiş, bataryaların doluluk seviyeleri optimize edilmiş ve enerji transferleri dinamik bir şekilde yönetilmiştir. Sonuçlar excel formatında kaydedilmiş, elde edilen veriler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Sonuç olarak, yapılan çalışma, yenilenebilir enerji kaynakları ve batarya depolama sistemlerinin optimal yönetimiyle, nanoşebekelerin şebekeden bağımsız enerji yönetimi sağlayabileceğini ve bu sistemlerin enerji maliyetlerini düşürerek daha sürdürülebilir bir enerji yönetimi sunabileceğini göstermiştir. Tez çalışmasının bu kısmında sunulan çalışmada her nanoşebeke, farklı yük profilleri ile tanımlanmıştır. NG_1, NG_2 ve NG_3 konut yüklerine hizmet ederken, NG_4 ofis yüklerine, NG_5 ise depo yüklerine enerji sağlamaktadır. Bu sistem, nanoşebekelerin hem kendi içlerinde şebekeden aldıkları enerjiyi minimize ederken hem de birbirleriyle enerji alışverişi yapmalarını sağlayarak, daha sürdürülebilir ve verimli bir enerji yönetimi oluşturmayı hedeflemektedir. Kurulan bu model, yerel yenilenebilir enerji kaynaklarının tam kapasitede kullanılmasını sağlarken, enerji depolama sistemleri ve yük dengeleme stratejileri ile şebeke bağımlılığını

azaltmaya yönelik optimize edilmiştir. Optimizasyon süreci, enerji transferlerini, depolamayı ve yük yönetimini entegre ederek, enerji ithalatını en aza indirmeyi amaçlayan bir yaklaşımla yönetilmektedir. Bu sayede nanoşebekeler, hem kendi enerji ihtiyaçlarını karşılarken hem de fazla enerjiyi diğer nanoşebekelere aktararak, daha sürdürülebilir bir enerji yönetim sistemi oluştururlar. Modeli kurulan sistem Şekil 5.1 ile verilmektedir.



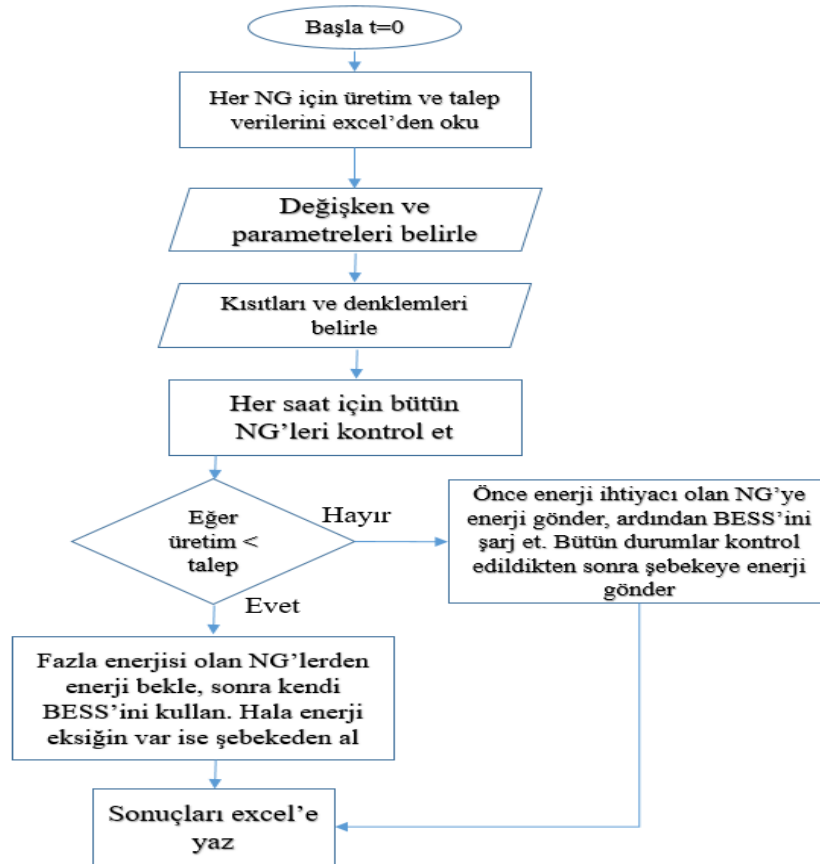
Şekil 5.1 Önerilen p2p modelinin genel şeması

Geliştirilen enerji yönetim modeli, her bir zaman diliminin ve optimizasyon çevriminde $t \in T$ olacak şekilde bir optimizasyon yapısını temel alır. Bu yapıda, t zaman dilimi her bir saatlik adımı ifade ederken, her adımda belirlenen enerji

talebi çerçevesinde şebekeden alınacak enerji miktarı optimize edilir. Modelin her optimizasyon çevriminde, nanoşebekeler arası enerji transferi, BESS şarj ve deşarj işlemleri kontrol edilir ve enerji dengesi sağlanır. Model, her zaman diliminde her nanoşebeke için yerel üretim, batarya durumu, şebeke bağlantısı, enerji talebi ve enerji ihtiyacını dengeleyerek, toplam enerji talebinin şebekeden alınacak kısmını minimize etmeye çalışır. Eğer herhangi bir NG için enerji talebi karşılanamazsa, diğer NG'lerden enerji transferi yapılır. Modelin karar değişkenleri optimize edilerek sonuçlar excel dosyasına kaydedilir.

5.1 Optimizasyon Modelinin Matematiksel Altyapısı

Nanoşebekeler arasında yapılacak enerji alışverişi ile şebekeden alınacak enerjinin minimize edilmesi için geliştirilen optimizasyon modelinin matematiksel altyapısı bu alt başlıkta detaylıca anlatılacaktır. Herbir NG yapısında üretim ve talep dengesine göre operasyonel kısıtlar dikkate alınarak oluşturulan model, MILP tabanlıdır. İlgili modele ait adlar dizgisi Tablo 5.1'deki gibidir. Ayrıca sunulan modelin akış diyagramı Şekil 5.2 ile verilmiştir.



Şekil 5.2 Önerilen modelinin akış diyagramı

Tablo 5.1 Modellenen optimizasyon problemi için adlar dizgesi

Kümeler	i, t, I
Parametreler	$B_{ng1}^{CAP}, B_{ng2}^{CAP}, B_{ng4}^{CAP}, P_{ng1,t}^{GEN}, P_{ng2,t}^{GEN}, P_{ng3,t}^{GEN}, P_{ng4,t}^{GEN}, P_{ng5,t}^{GEN}, D_{ng1,t}^{DEM},$ $D_{ng2,t}^{DEM}, D_{ng3,t}^{DEM}, D_{ng4,t}^{DEM}, D_{ng5,t}^{DEM}, M, \Delta_t$
Değişkenler	$P_{BESS,ng1,t}^{charge}, P_{BESS,ng1,t}^{discharge}, SOC_{ng1,t}^{BESS}, P_{GRID,ng1,t}^{import}, P_{GRID,ng1,t}^{export}$ $P_{BESS,ng2,t}^{charge}, P_{BESS,ng2,t}^{discharge}, SOC_{ng2,t}^{BESS}, P_{GRID,ng2,t}^{import}, P_{GRID,ng2,t}^{export}$ $P_{BESS,ng4,t}^{charge}, P_{BESS,ng4,t}^{discharge}, SOC_{ng4,t}^{BESS}, P_{GRID,ng4,t}^{import}, P_{GRID,ng4,t}^{export}$ $P_{GRID,ng5,t}^{import}, P_{GRID,ng5,t}^{export}, P_t^{ng1 \rightarrow ng2}, P_t^{ng1 \rightarrow ng3}, P_t^{ng1 \rightarrow ng4}$ $P_t^{ng1 \rightarrow ng5}, P_t^{ng2 \rightarrow ng1}, P_t^{ng2 \rightarrow ng3}, P_t^{ng2 \rightarrow ng4}, P_t^{ng2 \rightarrow ng5}$ $P_t^{ng3 \rightarrow ng1}, \delta_{i,t}^{discharge}, D_{i,t}^{deficit}, S_{i,t}^{surplush}, \delta_{i,t}^{charge}$ $I_{i,t}^{indicator}, P_t^{ng3 \rightarrow ng2}, P_t^{ng3 \rightarrow ng4}, P_t^{ng3 \rightarrow ng5}, P_t^{ng4 \rightarrow ng3}$ $P_t^{ng5 \rightarrow ng2}, P_t^{ng5 \rightarrow ng3}, P_t^{ng5 \rightarrow ng4}, P_t^{ng4 \rightarrow ng5}, P_t^{ng5 \rightarrow ng1}$ $P_t^{ng4 \rightarrow ng1}, P_t^{ng4 \rightarrow ng2}, SOC_{i,t}$

Nanoşebekelerin enerji yönetiminde şebekeden alınan toplam enerji miktarını minimize etmek için kullanılan matematiksel modelde, her bir nanoşebekenin şebekeden aldığı enerji belirli bir zaman dilimi boyunca optimize edilmektedir. Bu çalışmada, NG'ler kümesi I ile tanımlanmıştır. $i \in I$ ifadesinde i , i -nci NG'yi ifade ederken, I kümesi ise çalışmamızdaki tüm NG'lerin genel kümesini temsil eder. Modelimizin amacı, her NG için ve her zaman dilimindeki şebekeden alınan enerji miktarını minimize etmektir. Nihayetinde bu amaç ile NG kümesinin toplam enerji maliyetlerini en aza indirmek hedeflenmektedir. Sistemin amaç fonksiyonu Denklem (5.1) ile verilmiştir.

$$Min : \sum_{t \in T} P_{GRID,i,t}^{import} \cdot \Delta_t \quad (5.1)$$

Denklem (5.1) ile verilen amaç fonksiyonunda Şekil 5.1 ile verilen bütün NG yapılarında ayrı ayrı şebekeden alınan enerjinin minimize edilmesi gerekliliği vurgulanmalıdır. Bu durumda amaç fonksiyonu Denklem (5.2) ile verildiği gibi olacaktır.

$$Min : \sum_{t \in T} (P_{GRID,ng1,t}^{import} + P_{GRID,ng2,t}^{import} + P_{GRID,ng3,t}^{import} + P_{GRID,ng4,t}^{import} + P_{GRID,ng5,t}^{import}) \cdot \Delta_t \quad (5.2)$$

Oluşturulan algoritmaya göre öncelikle enerji açığı olan NG şebekeden enerji almak yerine diğer NG'lerden enerji almıştır. Enerji fazlası olan NG gerekli ise BESS'ini şarj etmiş ve sonrasında şebekeye veya diğer NG'lere enerji iletmıştır. Diğer taraftan herhangi bir NG'de enerji ihtiyacı var ise ve o saatte kendi depolama sistemi dolu olsa bile diğer NG'lerde fazla enerji var ise kendi depolamasından enerji kullanmak yerine diğer enerji durumu uygun olan NG veya NG'lerden enerji almıştır. Oluşturulan algoritma nihayetinde bu NG kümesi için hem bireysel hem de toplu olarak şebekeden alınan enerjiyi minimize edecek şekilde optimal kararlar verecek şekilde oluşturulmuştur. Şekil 5.1 ile sunulan bütün NG'ler için enerji dengesi kısıtları sırasıyla NG_1 'den başlamak üzere Denklem (5.3) – Denklem (5.7) ile verilmiştir.

$$\begin{aligned}
P_{GRID,ng1,t}^{import} + P_{BESS,ng1,t}^{discharge} + P_{ng1,t}^{GEN} + P_t^{ng2 \rightarrow ng1} + P_t^{ng3 \rightarrow ng1} + P_t^{ng4 \rightarrow ng1} \\
+ P_t^{ng5 \rightarrow ng1} \\
= D_{ng1,t}^{DEM} + P_{BESS,ng1,t}^{charge} + P_{GRID,ng1,t}^{export} + P_t^{ng1 \rightarrow ng2} \\
+ P_t^{ng1 \rightarrow ng3} + P_t^{ng1 \rightarrow ng4} + P_t^{ng1 \rightarrow ng5}, \forall t
\end{aligned} \quad (5.3)$$

$$\begin{aligned}
P_{GRID,ng2,t}^{import} + P_{BESS,ng2,t}^{discharge} + P_{ng2,t}^{GEN} + P_t^{ng1 \rightarrow ng2} + P_t^{ng3 \rightarrow ng2} + P_t^{ng4 \rightarrow ng2} \\
+ P_t^{ng5 \rightarrow ng2} \\
= D_{ng2,t}^{DEM} + P_{BESS,ng2,t}^{charge} + P_{GRID,ng2,t}^{export} + P_t^{ng2 \rightarrow ng1} \\
+ P_t^{ng2 \rightarrow ng3} + P_t^{ng2 \rightarrow ng4} + P_t^{ng2 \rightarrow ng5}, \forall t
\end{aligned} \quad (5.4)$$

$$\begin{aligned}
P_{GRID,ng3,t}^{import} + P_{ng3,t}^{GEN} + P_t^{ng1 \rightarrow ng3} + P_t^{ng2 \rightarrow ng3} + P_t^{ng4 \rightarrow ng3} + P_t^{ng5 \rightarrow ng3} \\
= D_{ng3,t}^{DEM} + P_{GRID,ng3,t}^{export} + P_t^{ng3 \rightarrow ng1} + P_t^{ng3 \rightarrow ng2} \\
+ P_t^{ng3 \rightarrow ng4} + P_t^{ng3 \rightarrow ng5}, \forall t
\end{aligned} \quad (5.5)$$

$$\begin{aligned}
P_{GRID,ng4,t}^{import} + P_{BESS,ng4,t}^{discharge} + P_{ng4,t}^{GEN} + P_t^{ng1 \rightarrow ng4} + P_t^{ng2 \rightarrow ng4} + P_t^{ng3 \rightarrow ng4} \\
+ P_t^{ng5 \rightarrow ng4} \\
= D_{ng4,t}^{DEM} + P_{BESS,ng4,t}^{charge} + P_{GRID,ng4,t}^{export} + P_t^{ng4 \rightarrow ng1} \\
+ P_t^{ng4 \rightarrow ng2} + P_t^{ng4 \rightarrow ng3} + P_t^{ng4 \rightarrow ng5}, \forall t
\end{aligned} \quad (5.6)$$

$$\begin{aligned}
P_{GRID,ng5,t}^{import} + P_{ng5,t}^{GEN} + P_t^{ng1 \rightarrow ng5} + P_t^{ng2 \rightarrow ng5} + P_t^{ng3 \rightarrow ng5} + P_t^{ng4 \rightarrow ng5} \\
= D_{ng5,t}^{DEM} + P_{GRID,ng5,t}^{export} + P_t^{ng5 \rightarrow ng1} + P_t^{ng5 \rightarrow ng2} \\
+ P_t^{ng5 \rightarrow ng3} + P_t^{ng5 \rightarrow ng4}, \forall t
\end{aligned} \quad (5.7)$$

Bu beş enerji dengesi denklemi, her bir NG için enerji arz ve talebinin saatlik olarak dengelenmesini sağlamak amacıyla geliştirilmiştir. Her bir NG için formüle edilen denklemler, sistemin kendi enerjisini üretme, depolama, tüketme ve diğer nanoşebekelerle enerji paylaşımı gereksinimlerini dikkate alır. Denklemlerde,

şebekeden alınan enerji, batarya deşarjı, yerel enerji üretimi ve diğer NG'lerden alınan enerji, nanoşebeke içi talep, batarya şarjı, şebekeye gönderilen enerji ve diğer NG'lere yapılan enerji transferleri ile dengelenir. Bu denklemler aracılığıyla, her bir NG'nin enerji ihtiyacının öncelikle kendi kaynaklarından karşılanması ve ardından diğer NG'lerden gelen enerji ile desteklenmesi hedeflenmiştir. Şebekeye enerji verme ve alma ise yalnızca yerel üretim, depolama ve nanoşebekeler arası enerji transferlerinin yetersiz olduğu durumlarda devreye girer, böylece toplam şebeke bağımlılığı minimize edilmiş olur. Herhangi bir NG'de herhangi bir saatte bulunan enerjinin eksik olup olmadığı NG_1 'den başlamak üzere Denklem (5.8) – Denklem (5.12) ile verilmektedir.

$$D_{ng1,t}^{deficit} \geq D_{ng1,t}^{DEM} - P_{ng1,t}^{GEN} - P_{BESS,ng1,t}^{discharge}, \forall t \quad D_{ng1,t}^{deficit} \geq 0, \forall t \quad (5.8)$$

$$D_{ng2,t}^{deficit} \geq D_{ng2,t}^{DEM} - P_{ng2,t}^{GEN} - P_{BESS,ng2,t}^{discharge}, \forall t \quad D_{ng2,t}^{deficit} \geq 0, \forall t \quad (5.9)$$

$$D_{ng3,t}^{deficit} \geq D_{ng3,t}^{DEM} - P_{ng3,t}^{GEN}, \forall t \quad D_{ng3,t}^{deficit} \geq 0, \forall t \quad (5.10)$$

$$D_{ng4,t}^{deficit} \geq D_{ng4,t}^{DEM} - P_{ng4,t}^{GEN} - P_{BESS,ng4,t}^{discharge}, \forall t \quad D_{ng4,t}^{deficit} \geq 0, \forall t \quad (5.11)$$

$$D_{ng5,t}^{deficit} \geq D_{ng5,t}^{DEM} - P_{ng5,t}^{GEN}, \forall t \quad D_{ng5,t}^{deficit} \geq 0, \forall t \quad (5.12)$$

Benzer şekilde herhangi bir NG'de herhangi bir saatte bulunan enerjinin eksik olup olmadığı NG_1 'den başlamak üzere Denklem (5.13) – Denklem (5.17) ile verilmektedir.

$$S_{ng1,t}^{surplush} \geq P_{ng1,t}^{GEN} - D_{ng1,t}^{DEM} - P_{BESS,ng1,t}^{charge}, \forall t \quad S_{ng1,t}^{surplush} \geq 0, \forall t \quad (5.13)$$

$$S_{ng2,t}^{surplush} \geq P_{ng2,t}^{GEN} - D_{ng2,t}^{DEM} - P_{BESS,ng2,t}^{charge}, \forall t \quad S_{ng2,t}^{surplush} \geq 0, \forall t \quad (5.14)$$

$$S_{ng3,t}^{surplush} \geq P_{ng3,t}^{GEN} - D_{ng3,t}^{DEM}, \forall t \quad S_{ng3,t}^{surplush} \geq 0, \forall t \quad (5.15)$$

$$S_{ng4,t}^{surplush} \geq P_{ng4,t}^{GEN} - D_{ng4,t}^{DEM} - P_{BESS,ng4,t}^{charge}, \forall t \quad S_{ng4,t}^{surplush} \geq 0, \forall t \quad (5.16)$$

$$S_{ng5,t}^{surplush} \geq P_{ng5,t}^{GEN} - D_{ng5,t}^{DEM}, \forall t \quad S_{ng5,t}^{surplush} \geq 0, \forall t \quad (5.17)$$

Denklem (5.8) – Denklem (5.17) ile tanımlanan enerji açığı $D_{i,t}^{deficit}$ ve enerji fazlası $S_{i,t}^{surplush}$ denklemleri, NG için saatlik bazda enerji arz-talep dengesini sağlamak üzere optimizasyon sürecinde kullanılan temel kısıtlamaları temsil eder. Her bir nanoşebeke için ayrı ayrı formüle edilen bu denklemler, yerel enerji üretimi, talep, batarya şarj ve deşarj durumları göz önünde bulundurularak enerji açığı veya

fazlası oluşup oluşmadığını belirler. Optimizasyon sürecinde bu denklemler, her bir saat diliminde her NG'nin enerji açığı veya fazlasını değerlendirmek için kullanılır ve bu durum NG'ler arasındaki enerji transferi ve şebeke etkileşimlerini düzenler. Enerji açığı denklemleri Denklem (5.8) – (5.12) NG'lerin üretim ve batarya deşarjı ile talebini karşılayamadığı durumları tanımlarken; enerji fazlası denklemleri Denklem (5.13) – (5.17) üretimin talebi aştığı ve bataryanın şarj edilebileceği ya da fazla enerjinin şebekeye veya diğer NG'lere yönlendirilebileceği durumları kapsar. Optimizasyon, bu denklemler aracılığıyla her bir NG için saatlik enerji dengesini sağlarken, enerji açığı olan NG'lerin öncelikli olarak diğer NG'ler aracılığıyla desteklenmesi ve enerji fazlası olanların bu enerjiyi diğer nanoşebekelere veya şebekeye yönlendirmesi sağlanır. Büyük M (Big M) metodu kullanılarak herhangi bir NG'de enerji açığı ve fazlası durumları modellenmiştir. Bu yöntemle enerji açığı olan NG'nin diğer NG'lere enerji transferi yapması engellenmiştir. Yazılan programda ikili değişkenler ($I_{i,t}^{indicator}$) aracılığıyla enerji açığı olup olmadığını belirlenmiştir. İlgili kısıtlar Denklem (5.18) – (5.22) ile verilmiştir. Bu kısıtlarla bir NG'de enerji açığı varsa (yani $I_{i,t}^{deficit} = 1$ ise) $D_{i,t}^{deficit} \leq M$ koşulu sağlanır. Bu durumda enerji açığı değerinin pozitif M değerini aşmayacak şekilde ayarlanabilmesini sağlar. Bu durumda NG'nin enerji transferi yapması engellenir. Enerji açığı yoksa (yani $I_{i,t}^{deficit} = 0$ ise) $D_{ng1,t}^{deficit} \leq 0$ koşulu sağlanır ve ilgili NG'nin enerji açığı olmadığı anlaşılmış olur. Bu durumda ilgili saatte o NG'nin enerji transferi yapabilmesi mümkün hale gelir.

$$D_{ng1,t}^{deficit} \leq M \cdot I_{ng1,t}^{deficit}, \forall t \quad (5.18)$$

$$D_{ng2,t}^{deficit} \leq M \cdot I_{ng2,t}^{deficit}, \forall t \quad (5.19)$$

$$D_{ng3,t}^{deficit} \leq M \cdot I_{ng3,t}^{deficit}, \forall t \quad (5.20)$$

$$D_{ng4,t}^{deficit} \leq M \cdot I_{ng4,t}^{deficit}, \forall t \quad (5.21)$$

$$D_{ng5,t}^{deficit} \leq M \cdot I_{ng5,t}^{deficit}, \forall t \quad (5.22)$$

Benzer şekilde Big M Metodu kullanılarak enerji açığı olmayan nanoşebekelerin enerji transferine izin verilirken, enerji açığı olan nanoşebekelerin transfer yapmasını engelleyen kısıtlar NG_1 'den başlamak üzere Denklem (5.23) – Denklem (5.27) ile verilmektedir.

$$P_t^{ng1 \rightarrow ng2} + P_t^{ng1 \rightarrow ng3} + P_t^{ng1 \rightarrow ng4} + P_t^{ng1 \rightarrow ng5} \leq M \cdot (1 - I_{ng1,t}^{deficit}), \forall t \quad (5.23)$$

$$P_t^{ng2 \rightarrow ng1} + P_t^{ng2 \rightarrow ng3} + P_t^{ng2 \rightarrow ng4} + P_t^{ng2 \rightarrow ng5} \leq M \cdot (1 - I_{ng2,t}^{deficit}), \forall t \quad (5.24)$$

$$P_t^{ng3 \rightarrow ng1} + P_t^{ng3 \rightarrow ng2} + P_t^{ng3 \rightarrow ng4} + P_t^{ng3 \rightarrow ng5} \leq M \cdot (1 - I_{ng3,t}^{deficit}), \forall t \quad (5.25)$$

$$P_t^{ng4 \rightarrow ng1} + P_t^{ng4 \rightarrow ng2} + P_t^{ng4 \rightarrow ng3} + P_t^{ng4 \rightarrow ng5} \leq M \cdot (1 - I_{ng4,t}^{deficit}), \forall t \quad (5.26)$$

$$P_t^{ng5 \rightarrow ng1} + P_t^{ng5 \rightarrow ng2} + P_t^{ng5 \rightarrow ng3} + P_t^{ng5 \rightarrow ng4} \leq M \cdot (1 - I_{ng5,t}^{deficit}), \forall t \quad (5.27)$$

Eğer bir NG’de enerji açığı yoksa $I_{i,t}^{deficit}$ binary değişkeni 0 olur ve bu durumda $M \cdot (1 - I_{i,t}^{deficit}) = M$ değerini alır. Bu durumda ilgili NG enerji ihtiyacı olan NG’ye enerji transfer edebilir. Eğer bir NG’de enerji açığı yoksa $I_{i,t}^{deficit}$ binary değişkeni 0 olur ve bu durumda $M \cdot (1 - I_{i,t}^{deficit}) = M$ değerini alır. Bu durumda ilgili NG enerji ihtiyacı olan NG’ye enerji transfer edebilir. Benzer şekilde bir NG’de enerji açığı varsa $I_{i,t}^{deficit}$ binary değişkeni 1 olur ve bu durumda $M \cdot (1 - I_{i,t}^{deficit}) = 0$ değerini alır. Bu durumda enerji açığı olan bir NG’nin enerji transferi yapmasının önüne geçilmiş olur. Geliştirilen algorithma NG’ler arası enerji transferi yapılırken sadece ihtiyaç olan miktar kadar enerji transferi yapılması gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu durumu sağlamak için geliştirilen kısıtlar NG_1 ’den başlamak üzere Denklem (5.28) – Denklem (5.32) ile verilmektedir.

$$P_t^{ng2 \rightarrow ng1} + P_t^{ng3 \rightarrow ng1} + P_t^{ng4 \rightarrow ng1} + P_t^{ng5 \rightarrow ng1} \leq D_{ng1,t}^{deficit}, \forall t \quad (5.28)$$

$$P_t^{ng1 \rightarrow ng2} + P_t^{ng3 \rightarrow ng2} + P_t^{ng4 \rightarrow ng2} + P_t^{ng5 \rightarrow ng2} \leq D_{ng2,t}^{deficit}, \forall t \quad (5.29)$$

$$P_t^{ng1 \rightarrow ng3} + P_t^{ng2 \rightarrow ng3} + P_t^{ng4 \rightarrow ng3} + P_t^{ng5 \rightarrow ng3} \leq D_{ng3,t}^{deficit}, \forall t \quad (5.30)$$

$$P_t^{ng1 \rightarrow ng4} + P_t^{ng2 \rightarrow ng4} + P_t^{ng3 \rightarrow ng4} + P_t^{ng5 \rightarrow ng4} \leq D_{ng4,t}^{deficit}, \forall t \quad (5.31)$$

$$P_t^{ng1 \rightarrow ng5} + P_t^{ng2 \rightarrow ng5} + P_t^{ng3 \rightarrow ng5} + P_t^{ng4 \rightarrow ng5} \leq D_{ng5,t}^{deficit}, \forall t \quad (5.32)$$

Denklem (5.28) – Denklem (5.32) ile her bir nanoşebeke için yalnızca enerji açığı kadar enerji alımına izin verilmiş olmaktadır. Yani bir NG’de enerji açığı varsa, diğer NG’lerden ihtiyacı kadar enerji transferi yapılabilir, ancak açığını aşan bir transfer alması engellenir. Bu kısıtlamalar, enerji fazlası olan bir NG’den yalnızca gereken miktar kadarı transfer edilmesi sağlanarak enerji yönetiminde verimlilik artmış ve gereksiz I^2R kayıplarının önüne geçilmiş olur. Her bir nanoşebekenin yalnızca sahip olduğu enerji fazlası miktarı kadar enerji transfer edebilmesini sağlamak doğru bir matematiksel modelleme için gereklidir. Bu durumu sağlayan kısıtlar Denklem (5.33) – Denklem (5.37) ile verilmiştir.

$$P_t^{ng1 \rightarrow ng2} + P_t^{ng1 \rightarrow ng3} + P_t^{ng1 \rightarrow ng4} + P_t^{ng1 \rightarrow ng5} \leq S_{ng1,t}^{surplush}, \forall t \quad (5.33)$$

$$P_t^{ng2 \rightarrow ng1} + P_t^{ng2 \rightarrow ng3} + P_t^{ng2 \rightarrow ng4} + P_t^{ng2 \rightarrow ng5} \leq S_{ng2,t}^{surplush}, \forall t \quad (5.34)$$

$$P_t^{ng3 \rightarrow ng1} + P_t^{ng3 \rightarrow ng2} + P_t^{ng3 \rightarrow ng4} + P_t^{ng3 \rightarrow ng5} \leq S_{ng3,t}^{surplush}, \forall t \quad (5.35)$$

$$P_t^{ng4 \rightarrow ng1} + P_t^{ng4 \rightarrow ng2} + P_t^{ng4 \rightarrow ng3} + P_t^{ng4 \rightarrow ng5} \leq S_{ng4,t}^{surplush}, \forall t \quad (5.36)$$

$$P_t^{ng5 \rightarrow ng1} + P_t^{ng5 \rightarrow ng2} + P_t^{ng5 \rightarrow ng3} + P_t^{ng5 \rightarrow ng4} \leq S_{ng5,t}^{surplush}, \forall t \quad (5.37)$$

Verilen kısıtlarla her bir NG’nin yalnızca enerji fazlası bulunduğu ve fazlalık miktarını aşmamak koşuluyla diğer NG’lere enerji transfer etmesine izin verilmiş olur. Böylece, enerji fazlası olan nanoşebekelerden, yalnızca sahip oldukları fazla enerji kadar transfer yapılması sağlanır. Şekil 5.1 ile verilen p2p modeli incelendiğinde BESS kullanan nanoşebekelerin NG_1, NG_2 ve NG_4 olduğu görülecektir. Modelleme gereksinimleri nedeniyle bu her bir NG yapısında BESS’lerin şarj olurken deşarj, deşarj olurken de şarj olmaması gerekmektedir. Bu durumu sağlayan kısıtlar Denklem (5.38) – Denklem (5.39) ile verilmiştir.

$$P_{BESS,i,t}^{charge} \leq \delta_{i,t}^{charge} \cdot B_{i,t}^{CAP}, \forall t \quad (5.38)$$

$$P_{BESS,i,t}^{discharge} \leq \delta_{i,t}^{discharge} \cdot B_{i,t}^{CAP}, \forall t \quad (5.39)$$

$$\delta_{i,t}^{charge} + \delta_{i,t}^{discharge} \leq 1, \forall t \quad (5.40)$$

BESS kullanan bir NG’de $\delta_{i,t}^{charge} = 1$ olduğunda bataryayı şarj edecek güç değerini belirleyen değişken olan $P_{BESS,i,t}^{charge}$ ’nin ilgili NG’nin BESS kapasitesini aşmaması sağlanır. $\delta_{i,t}^{charge} = 0$ olduğunda BESS şarj edilmez. Diğer taraftan

$\delta_{i,t}^{discharge} = 1$ olduğunda deşarj edilen güç değeri değişkeni olan $P_{BESS,i,t}^{discharge}$,nin batarya kapasitesini aşması engellenmiş olur. İlgili nanoşebekelerin şarj/deşarj göstergeleri olan $\delta_{i,t}^{charge}$ ve $\delta_{i,t}^{discharge}$ değişkenleri ikili değişkenlerdir. Denklem (5.40) ile şarj ve deşarj işleminin aynı anda yapılması engellenmiş olur. Başlangıçta (yani $t = 0$) BESS kullanan bir NG'nin herhangi bir andaki enerji durumu kW olarak Denklem (5.41) ile verilmiştir.

$$SOC_{i,t} = [P_{BESS,i,t}^{charge} - P_{BESS,i,t}^{discharge}] \cdot \Delta_t, \forall t \quad (5.41)$$

Başlangıç durumundan sonra (yani $t > 0$) BESS kullanan bir NG'de herhangi bir andaki BESS enerji durumu ilgili saatten bir önceki saatte olan $(t - 1)$ değerine göre kW olarak Denklem (5.42) ile belirlenmektedir.

$$SOC_{i,t} = SOC_{i,t-1} \cdot [P_{BESS,i,t}^{charge} - P_{BESS,i,t}^{discharge}] \cdot \Delta_t \quad (5.42)$$

Bu ifadelerle, her bir zaman adımında bir önceki SOC değeri dikkate alınarak şarj ve deşarj işlemlerine göre SOC değeri güncellenir. Bu sayede bataryaların şarj durumu sürekli olarak güncellenmiş olur ve zamanla artan ve/veya azalan bir SOC değeri elde edilmiş olur.

$$B_{ng1}^{min} \leq B_{ng1}^{CAP} \leq B_{ng1}^{max} \quad (5.43)$$

$$B_{ng2}^{min} \leq B_{ng2}^{CAP} \leq B_{ng2}^{max} \quad (5.44)$$

$$B_{ng4}^{min} \leq B_{ng4}^{CAP} \leq B_{ng4}^{max} \quad (5.45)$$

Denklem (5.43) – Denklem (5.45) ile BESS kullanan NG'lerde batarya kısıtları verilmiştir.

5.2 Test ve Sonuçlar

Bu model kapsamında, çoklu bir küme olarak modellenen nanoşebekelerin enerji yönetimi üzerine gerçek zamanlı bir optimizasyon algoritması geliştirilmiştir. Şekil 5.1 ile verilen bütün NG yapılarının enerji dengesi, enerji açığı ve fazlası, BESS bulunan NG'lerde şarj-deşarj durumları ve birbirleri arasındaki enerji transferi modellenmiştir. Bu MILP tabanlı model python kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Zaman adımı saatlik (1 saat) olarak belirlenmiş ve analiz 1 yıl, 8760 saatlik bir zaman dilimi için yapılmıştır. Model, i7, 2.80GHz CPU ve 8 Gb RAM özelliklerine

sahip bir iş istasyonunda çalıştırılmış olup, sonuçlar Gurobi çözücünün 11.0.2 versiyonunda MILP çözümleme yetenekleri ile elde edilmiştir. Modelde bu 1 yıllık süre için 429,240 sürekli ve 96,360 binary değişken olmak üzere toplam 525,600 değişken optimize edilmiştir.

5.2.1 Giriş Verileri

Oluşturulan modelin gerçek verilere yakınsama gerekliliği nedeniyle bütün nanoşebekelerin modellenme aşamasında YEK'lerin enerji üretimi için gerekli meteorolojik veriler HOMER Grid programı aracılığıyla global enerji kaynaklarının tahmini veri tabanı (Prediction of Worldwide Energy Resources-POWER) kullanılmıştır. Bu, ABD Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesinin (NASA) çeşitli enerji kaynaklarıyla ilgili küresel verileri sağladığı bir projedir. Özellikle güneş enerjisi, rüzgar enerjisi ve diğer meteorolojik veriler hakkında geniş kapsamlı veri setleri sunarak enerji modellemeleri ve analizlerinde kullanıcılara destek sağlar. Bu tür veriler, enerji yönetimi, yenilenebilir enerji sistemleri tasarımı ve iklim çalışmaları gibi alanlarda kritik bir kaynak olarak değerlendirilmektedir [216-217]. Aşağıda verilen Tablo 5.2'de modelin ilk bölümü olan HOMER Grid parametreleri verilmiştir. Tabloda verilen değerler 1 yıllık ve kW cinsinden değerleri ifade etmektedir. Ayrıca yapılan bu optimizasyon çalışmasının sözde (pseudo) kodları EK kısmında verilmiştir.

Tablo 5.2 Modellenen NG kümesinin parametrik verileri

NG_1	Homer (kW)		NG_2	Homer (kW)	
$P_{ng1,t}^{GEN}$	8567		$P_{ng2,t}^{GEN}$	12793	
$D_{ng1,t}^{DEM}$	7665		$D_{ng2,t}^{DEM}$	2190	
$P_{GRID,ng1,t}^{import}$	3370		$P_{GRID,ng2,t}^{import}$	298	
$P_{GRID,ng1,t}^{export}$	3721		$P_{GRID,ng2,t}^{export}$	10793	
NG_3	Homer (kW)	NG_4	Homer (kW)	NG_5	Homer (kW)
$P_{ng3,t}^{GEN}$	7890	$P_{ng4,t}^{GEN}$	14018	$P_{ng5,t}^{GEN}$	10785
$D_{ng3,t}^{DEM}$	1752	$D_{ng4,t}^{DEM}$	9564	$D_{ng5,t}^{DEM}$	6851
$P_{GRID,ng3,t}^{import}$	324	$P_{GRID,ng4,t}^{import}$	1149	$P_{GRID,ng5,t}^{import}$	2292
$P_{GRID,ng3,t}^{export}$	5997	$P_{GRID,ng4,t}^{export}$	4756	$P_{GRID,ng5,t}^{export}$	6226

Tablo 5.2 incelendiğinde bu NG kümesinin toplamda şebekeden 7433 kWh enerji alacağı görülmektedir. Diğer taraftan bu NG kümesinin şebekeye ileteceği (satacağı) enerji ise toplam 31493 kWh olacaktır. Yapılan modellemede hem bireysel hem de küme olarak şebekeden alınacak enerji miktarının minimizasyonu hedeflenmiştir. Python programlama dilinde yazılan program kodları EK kısmında verilmiştir. Sunulan modelde nanoşebekeler arası kayıplar göz ardı edilmiştir. Bu durumun nedeni aşağıda açıklanmaktadır.

$$\begin{array}{cc}
 & \begin{array}{c} NG_1 \quad NG_2 \quad NG_3 \quad NG_4 \quad NG_5 \end{array} \\
 \begin{array}{c} NG_1 \\ NG_2 \\ NG_3 \\ NG_4 \\ NG_5 \end{array} & \begin{array}{ccccc} x & 23 & 27 & 18 & 14 \\ 23 & x & 9 & 16 & 8 \\ 27 & 9 & x & 11 & 30 \\ 18 & 16 & 11 & x & 10 \\ 14 & 8 & 30 & 10 & x \end{array}
 \end{array} \quad (5.46)$$

$$\begin{array}{cc}
 & \begin{array}{c} NG_1 \quad NG_2 \quad NG_3 \quad NG_4 \quad NG_5 \end{array} \\
 \begin{array}{c} NG_1 \\ NG_2 \\ NG_3 \\ NG_4 \\ NG_5 \end{array} & \begin{array}{ccccc} x & 0,070 & 0,083 & 0,055 & 0,043 \\ 0,070 & x & 0,027 & 0,049 & 0,024 \\ 0,083 & 0,027 & x & 0,033 & 0,092 \\ 0,055 & 0,049 & 0,033 & x & 0,030 \\ 0,043 & 0,024 & 0,092 & 0,030 & x \end{array}
 \end{array} \quad (5.47)$$

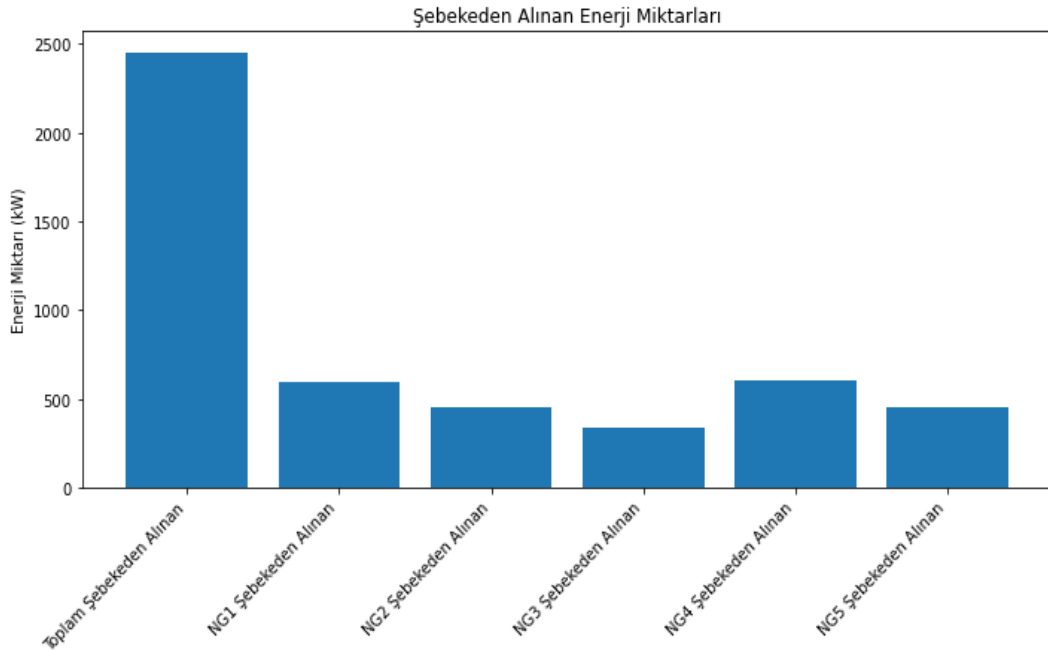
Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliğine göre [218] yapı bağlantı hatlarında en düşük kablo kesiti 6 mm² olması gereklidir. Buna göre modellenen NG kümesinde birbirleri arasında enerji transferi 3x6 mm² kablo ile yapılması gerekliliği ön görülmüştür. Buna göre kablonun direncinin ise 3,08 Ω/km olduğu bilinmektedir [219]. Buna göre Denklem (5.46) ile verilen ve nanoşebekeler arasında bulunan mesafeyi temsil eden matrisde ilgili değerler yerine konulduğunda Denklem (5.47) ile verilen nanoşebekeler arasında bulunan kolon kablolarının dirençleri elde edilmiştir. Sonuçları ilerleyen kısımlarda irdelenecek olan nanoşebekeler arası enerji transferi metriklerine göre sunulan modelde en büyük enerji transferinin 24/10/2024 tarih ve 18:00 saatinde NG_2 ’den NG_4 ’e 6,23 kW olacağı belirlenmiştir. Monofaz olan bu sistemde 6,23 kW değerine karşılık gelen akım değerinin 35,4 amper olacağı ve bu gücü ileten 3x6 mm² kablo üzerinde oluşacak enerji kaybının ise Denklem (5.48) ile hesaplanacağı üzere yaklaşık 61 Watt olacağı tespit edilmiştir.

$$P_k = I^2 \cdot R = 35,4^2 \cdot 0,049 = 61 \text{ W} \quad (5.48)$$

Oluşturulan modelde en büyük enerji transferi durumunda dahi bu transfer nedeniyle oluşacak toplam enerji kaybının %0,99 olacağı Denklem (5.48) ile tespit edilmiştir. Bu nedenle oluşturulan modelde hat kayıplarının dikkate alınmaması değerlendirilmiştir. Diğer taraftan oluşturulan NG yapıları kendi talepleri olan miktardan daha fazla enerji üretebilme becerisine sahip olduğundan NG'ler arasındaki enerji transferinin de bir maliyet oluşturmayacağı vurgulanmalıdır.

5.2.2 Sonuçlar

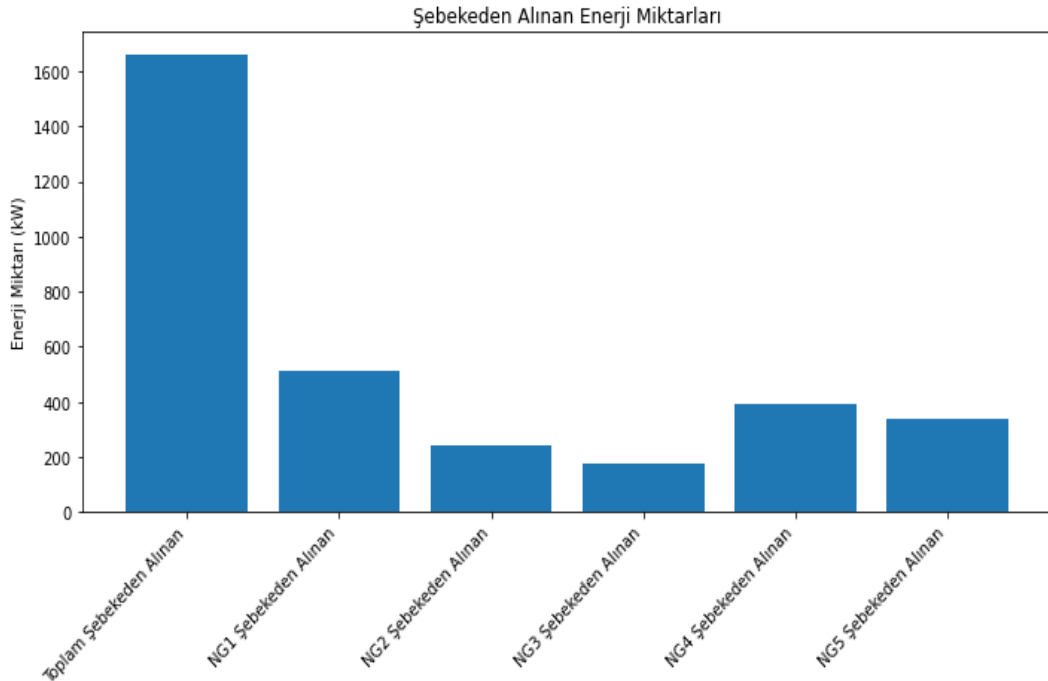
Bu çalışmada geliştirilen enerji yönetimi metodolojisi, beş farklı nanoşebeke arasındaki enerji transferlerini ve şebeke bağlantılarını dikkate alarak şebekeden enerji talebini en aza indirmeyi amaçlamaktadır. Program, Gurobi çözücü kullanarak her bir nanoşebeke için üretim, talep, şarj/deşarj işlemleri ve enerji transferlerine dayalı olarak en uygun enerji yönetim biçimini belirlemektedir. Hesaplamalar sonucunda, en büyük enerji transferleri, şebekeden alınan toplam enerji miktarı ve nanoşebekeler arası enerji transferi sonuçları elde edilmiştir. Bu sonuçlar, nanoşebekelerin özellikle birbirleriyle etkileşimiyle genel verimliliği artırma, şebeke bağımlılığını azaltma potansiyeline dair önemli veriler sunmakta ve enerji yönetim sistemlerinin optimize edilmiş bir kontrol altyapısı ile nasıl geliştirilebileceğine dair somut çıkarımlar sağlamaktadır.



Şekil 5.3 Önerilen modelin sonuçları

Oluşturulan optimizasyon algoritmasıyla Şekil 5.3 ile verildiği gibi şebekeden toplam 2448 kW enerji alınmıştır. Bu durumda optimizasyon yapılmadan önceki durum olan 7433 kW enerjiye oranla yaklaşık %67 oranında daha düşük bir enerji alımına işaret etmektedir. Bu sonuç, optimal enerji yönetim modelinin verimliliğini ortaya koymakta ve nanoşebekelerin şebeke bağımlılığını önemli ölçüde azaltarak enerji maliyetlerini düşürdüğünü göstermektedir. Bu orandaki bir azalma, yenilenebilir enerji sistemleri ile birlikte etkin bir güç yönetimi uygulanarak yerel enerji kaynaklarının daha verimli kullanılabileceğini kanıtlamaktadır.

Modelin esnekliğini ve nanoşebekelerde kullanılan BESS sistemlerinin enerji sistemlerindeki esnekliği artırıcı faydalarını göstermek adına NG_2 ve NG_4 bulunan BESS sistemlerinin kapasitelerini 2 kW – 3 kW değerlerinden 5 kW değerine yükselttiğimizde optimal sistem cevabı Şekil 5.4’de verildiği şekilde olmaktadır.



Şekil 5.4 Esnek modelin sonuçları

Modelde BESS kapasiteleri toplamda 5 kW artırıldığında şebekeden alınan toplam enerji miktarı 2448 kW değerinden 1660 kW değerine düşmüştür. Bu bulgu, oluşturulan model sayesinde NG’lerdeki BESS kapasitelerinin optimum kullanımının ve ekonomik kısıt yok ise uygun YEK penetrasyonu bulunan sistemlerde artırılmasının, şebeke bağımlılığını azaltarak yerel enerji üretimi ve tüketimi arasındaki dengeyi sağlamlaştırdığını ortaya koymaktadır. Yeterli kapasiteye sahip BESS sistemleri, NG’lerde enerji arz ve talep dengesizliklerini

giderme sürecinde kritik bir rol oynar ve böylece enerji talebi, dış kaynaklara başvurulmaksızın yerel enerji üretiminden daha yüksek oranda karşılanabilir hale gelir. Bu durum, enerji maliyetlerinin düşürülmesine katkı sağlarken enerji sisteminin sürdürülebilirliğini de güçlendirir; ayrıca yenilenebilir enerji kaynaklarının daha yüksek oranlarda entegrasyonunu teşvik eder. Nanoşebekelerde BESS sistemlerinin esneklik kapasitesine katkısı, enerji güvenliğinin artırılmasını destekleyeceği söylenebilmektedir.



6 SONUÇ

Nanoşebekeler, geleneksel merkezi enerji şebekesine alternatif olarak gelişen, esnek ve dağıtık enerji sistemlerinin bir bileşenidir. Yenilenebilir enerji kaynaklarıyla çalışan ve yerel enerji depolama sistemleriyle desteklenen bu küçük ölçekli enerji ağları enerji verimliliğini artırmak, maliyetleri düşürmek ve karbon emisyonlarını azaltmak amacıyla giderek önem kazanmaktadır. Nanoşebekeler, yoğunlukla tek bir bina, tesis ya da küçük yerleşim yerinin enerji ihtiyaçlarını karşılamak üzere tasarlanır ve AC veya DC enerji türlerine uyumlu olarak çalışabilir. Fosil yakıtlara dayalı büyük enerji santrallerinin aksine, enerji üretim ve tüketimini yerel düzeyde kullanıp optimize eden nanoşebekeler, yerel kullanım sayesinde enerji iletiminde yaşanan kayıpları minimuma indirme potansiyeline sahiptirler. Yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken doğasını dengelemek için enerji depolama sistemleriyle birleştirilebilen bu sistemler, talep fazlası ya da üretim açığı gibi durumlarda şebeke bağımlılığını azaltarak enerji sürekliliğini sağlar. Özellikle kırsal ve elektrik altyapısı yetersiz olan bölgelerde ekonomik bir çözüm sunan nanoşebekeler, enerji erişimi olmayan veya sınırlı erişime sahip alanlarda sürdürülebilir bir enerji altyapısı inşa etmeye olanak tanır. İleri düzeyde enerji yönetim sistemleri ve iki yönlü enerji akış kontrol mekanizmalarıyla donatılan nanoşebekeler, “prosumer” olarak adlandırılan üreten tüketiciler için, ihtiyaç fazlası enerjinin yerel şebekeye veya diğer nanoşebekelere transfer edilmesine imkan tanıyan bir yapı sunar. Bu yönüyle nanoşebekeler, enerji maliyetlerini düşürmenin yanı sıra enerji güvenliğini artıran ve çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlayan inovatif enerji çözümleri olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada, nanoşebeke sistemlerinin dağıtık enerji yönetiminde oynadığı rol kapsamlı bir şekilde analiz edilmiş, enerji yönetim stratejilerinin optimize edilmesi ve bu sistemlerin enerji verimliliği üzerine etkileri incelenmiştir. İlk bölümde,

geleneksel enerji şebekelerinin karşılaştığı verimlilik, sürdürülebilirlik ve altyapısal sorunlara alternatif olarak nanoşebeke kavramının ortaya çıkışı ele alınmış; dağıtık enerji sistemleri ve yenilenebilir enerji kaynakları ile nanoşebekelerin bu zorluklara nasıl çözüm sunabileceği vurgulanmıştır. Özellikle nanoşebekelerin enerji üretim ve tüketim noktalarına yakın olması, merkezi enerji şebekelerine kıyasla kayıpların azaltılmasına ve enerji maliyetlerinin düşürülmesine imkan tanımaktadır. İkinci bölümde, nanoşebekelerin elektrik üretimi ve dağıtımı süreçlerinde izlenen teknolojik altyapı ve kontrol mekanizmaları ve bu sistemlerin ortaya atılmasındaki motivasyonel etkilerin üzerinde durulmuştur.

Üçüncü bölümde, Türkiye'nin farklı bölgelerinde nanoşebeke sistemlerinin uygulanabilirliği üzerine kapsamlı bir tekno-ekonomik analiz yapılmış ve bölgesel farklılıkların enerji üretim ve tüketim süreçlerine etkisi detaylı şekilde incelenmiştir. Türkiye'nin coğrafi yapısı ve iklim çeşitliliği, enerji üretim potansiyeli açısından belirgin farklılıklar yaratmaktadır. Özellikle güneşlenme süresi ve rüzgar potansiyelinin yüksek olduğu Akdeniz ve Ege bölgeleri gibi alanlarda nanoşebeke sistemlerinin daha avantajlı olduğu ortaya konulmuştur. Bu bağlamda, yüksek güneş ışınımına sahip bölgelerde fotovoltaik sistemlerin verimliliği ön plana çıkarken, rüzgar hızı ve sürekliliği yüksek olan bölgelerde rüzgar türbinlerinin enerji üretimindeki etkinliği belirginleşmiştir. Vaka çalışmaları ile her bir bölgenin iklimsel ve coğrafi değişkenlerinin enerji üretim kapasitesi ve depolama gereksinimlerini nasıl etkilediği derinlemesine analiz edilmiştir. Türkiye'nin enerji ihtiyacının, yerel yenilenebilir enerji kaynakları ile karşılanabilirliği değerlendirildiğinde, nanoşebekelerin esnek yapıları sayesinde kırsal ve altyapı yatırımı yüksek olan bölgelerde dahi uygulanabilir olduğu anlaşılmıştır. Bu durum, enerji maliyetlerini düşürerek ve yerel kaynakları verimli bir şekilde kullanarak ülke genelinde sürdürülebilir enerji çözümlerine ulaşmada önemli bir rol oynayabileceğini göstermektedir.

Dördüncü bölümde, enerji depolama sistemlerinin nanoşebeke yönetimindeki stratejik önemi ele alınmış ve nanoşebekeler için optimal enerji depolama kapasitesinin belirlenmesi amacıyla üç farklı sezgisel algoritma—Grey Wolf Optimizer (GWO), Artificial Bee Colony (ABC) ve Particle Swarm Optimization (PSO)—kullanılmıştır. Bu algoritmalar, nanoşebeke enerji depolama sistemlerinin boyutlandırılmasında hem maliyet hem de performans açısından uygun çözümler

sunması bakımından değerlidir. Her bir algoritma, belirli enerji üretim ve tüketim senaryolarında, depolama sistemlerinin kapasitesini optimum düzeye getirme hedefiyle uygulanmış ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. GWO algoritması, enerjiyi talep ve arz dengesine uygun şekilde yönetmek için enerji depolama sistemlerinin kapasitesini etkin bir şekilde optimize etse de, özellikle büyük veri setlerinde sonuçlara ulaşma süresinin uzun olabileceği gözlemlenmiştir. Diğer yandan, ABC algoritması, depolama boyutlandırma problemini çözmek için koloni zekasından yararlanarak daha hızlı bir çözüm sunmakla birlikte, bazı durumlarda lokal minimumlarda sıkışma eğilimi göstermiştir. Bu algoritma, hızlı sonuç almak gereken senaryolarda öne çıksa da, en düşük maliyetli çözümü her zaman sağlayamamıştır. PSO algoritması ise, her bir parçacığın en iyi konum bilgisiyle topluluğun en iyi konum bilgisine yönelerek çözüme ulaşmasında avantaj sunmuştur. Çalışma sonuçlarına göre, PSO algoritmasının diğer iki algoritmaya kıyasla daha dengeli, stabil ve maliyet etkin sonuçlar ürettiği tespit edilmiştir. PSO, enerji depolama sistemlerinin boyutlandırılması sürecinde hem şebeke bağımlılığını azaltarak enerji arz güvenliğini sağlama noktasında hem de enerji maliyetlerini minimize etme açısından en uygun sonuçları sağlamıştır.

Beşinci bölüm, nanoşebekelerin kendi aralarındaki enerji alışverişini yönetmeye odaklanan, enerji bağımsızlığını amaçlayan p2p enerji transfer modelini içermektedir. Bu bölümde geliştirilen matematiksel model, enerji arz ve talebinin dengelenmesi için nanoşebekelerin karşılıklı olarak enerji paylaşımında bulunmasını sağlamak üzere tasarlanmıştır. Her bir nanoşebekenin kendi enerji üretim kapasitesi, talebi ve enerji depolama durumu göz önüne alınarak, p2p enerji transferleri sayesinde ihtiyaç fazlası enerji, talep fazlası yaşayan nanoşebekelere yönlendirilmiştir. Bu sayede, nanoşebekelerin şebekeye bağımlılığı azaltılmış, enerji ihtiyacı olan nanoşebekelere yerel kaynaklardan destek sağlanarak enerji arz güvenliği artırılmıştır. Geliştirilen modelde, enerji fazlası olan nanoşebekelerden enerji açığı olan nanoşebekelere yönlendirmeler yapılmıştır. Modelde, her bir nanoşebekenin enerji fazlası veya enerji açığı durumu saatlik olarak hesaplanarak, mevcut enerji durumuna göre en verimli ve düşük maliyetli transfer kombinasyonları belirlenmiştir. Bu modelin uygulanması sırasında kullanılan Gurobi optimizasyon yazılımı, enerji transfer senaryolarını farklı kısıtlar altında değerlendirerek nanoşebekeler arası enerji alışverişini optimize etmiştir. Çalışma

sonuçları, nanoşebekeler arasındaki enerji transferlerinin düzenlenmesi sayesinde, şebeke bağımlılığının azaltıldığını göstermiştir. Bu bölümde ayrıca, farklı enerji üretim koşulları altında nanoşebekeler arasında en uygun enerji transferi olarak, p2p enerji transfer stratejilerinin uygulanması ile nanoşebekeler arasında enerji fazlası olan sistemlerin enerji ihtiyacı olan sistemlere enerji aktarabilmesi sayesinde, toplamda şebekeden çekilen enerji miktarı düşürülmüştür. Bu modelleme çalışması, p2p enerji transferinin etkin bir şekilde uygulanmasıyla, nanoşebekelerin daha verimli ve ekonomik bir şekilde enerji yönetimi yapabilmesini sağlamış ve yerel enerji üretiminin maksimum düzeyde değerlendirilmesine olanak tanımıştır.

Son olarak, bu çalışma Türkiye gibi enerji maliyetlerinin enflasyonist sebepler nedeniyle kademeli bir şekilde yükselme eğiliminde olduğu ve yenilenebilir enerji kaynaklarının bölgesel olarak farklılık gösterdiği bir ülkede, p2p enerji transfer stratejilerinin nanoşebeke sistemlerinde başarılı bir şekilde uygulanabileceğini ve bu sayede sürdürülebilir bir enerji yönetimi sağlanabileceğini ortaya koymuştur. Bu sonuçlar, gelecekteki enerji altyapı projeleri ve politikalarında dağıtık enerji yönetimi ve yerel enerji paylaşımını temel alan stratejilerin geliştirilmesinde yol gösterici olabilir.

Öneriler:

Bu çalışmada, nanoşebekelerde enerji depolama ve yönetimi için GWO, ABC ve PSO gibi sezgisel algoritmalar kullanılmış olsa da, daha geniş bir algoritma havuzunun incelenmesi, nanoşebeke performansını iyileştirme noktasında değerli katkılar sunabilir. Örneğin, Genetik Algoritma (GA), Karınca Kolonisi Optimizasyonu (ACO) ve Simulated Annealing (SA) gibi diğer sezgisel yöntemlerin yanı sıra, Derin Öğrenme veya Güçlendirme Öğrenmesi gibi ileri yapay zeka teknikleri de değerlendirilmelidir. Bu yöntemlerin nanoşebekelerde p2p enerji transfer süreçlerini daha dinamik ve etkili bir şekilde optimize edip edemeyeceği, gelecekteki çalışmalar için anlamlı bir araştırma alanı olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca, farklı algoritmaların hız ve çözüm kalitesi açısından karşılaştırılması, enerji yönetim stratejilerinin daha verimli hale getirilmesine olanak sağlayabilir.

Nanoşebekelerin şebekeden bağımsız veya daha az bağımlı çalışabilmesi için enerji depolama kapasitesinin artırılması önemli bir strateji olarak görülmektedir. Depolama kapasitelerinin artırılması, sistemlerin enerji arz-talep dengesizliklerini yönetme kabiliyetini yükseltecek ve enerji maliyetlerini düşürme potansiyelini artıracaktır. Bu doğrultuda, batarya maliyetlerinin düşüş trendi de dikkate alınarak, özellikle güneş ve rüzgar enerjisi potansiyeli yüksek olan kırsal bölgelerde büyük kapasiteli batarya sistemlerinin kurulması, nanoşebekelerin esnekliğini artırabilir. Ayrıca, ileriye yönelik çalışmalarda, farklı depolama teknolojileri (örneğin, lityum-iyon bataryalar yerine daha uzun ömürlü ve düşük maliyetli flow bataryalar) arasında bir karşılaştırma yapılması, her bir nanoşebeke tipi için en uygun depolama çözümlerini belirlemeye katkı sunabilir.

- Türkiye gibi iklim ve coğrafi koşulları oldukça değişken olan ülkelerde, nanoşebeke performansının mevsimsel ve bölgesel değişkenlere göre farklılık gösterdiği tespit edilmiştir. Örneğin, Akdeniz Bölgesi'nin güneş enerjisi potansiyeli, Doğu Karadeniz Bölgesi'ne göre çok daha yüksek olduğu için, bu bölgedeki nanoşebekelerin fotovoltaik sistem ağırlıklı olarak yapılandırılması daha verimli olacaktır. Buna karşın, Karadeniz Bölgesi'nde enerji üretiminin sürekliliğini sağlamak için daha büyük kapasiteli depolama sistemleri veya rüzgar enerjisi desteği gerekebilir. Bu farklılıkların değerlendirilmesi, gelecekteki çalışmaların daha kapsamlı modelleme yapmasını sağlayacak ve ülke genelinde optimum enerji yönetim stratejileri geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Bölgesel çözümlerle uyumlu hale getirilecek nanoşebekeler, yerel enerji kaynaklarının daha etkili kullanılmasına ve enerji verimliliğinin artırılmasına olanak sağlayabilir.
- Nanoşebeke sistemlerinin maliyet ve çevresel etkilerinin detaylı bir şekilde incelenmesi, bu teknolojilerin daha geniş kitlelerce benimsenmesini teşvik edebilir. Özellikle karbon emisyonlarını azaltma ve enerji maliyetlerini düşürme potansiyeli olan nanoşebekelerin çevresel etkilerini analiz eden çalışmalar, bu sistemlerin sürdürülebilir enerji hedefleri doğrultusunda yaygınlaştırılmasına katkı sağlayacaktır. Çevresel analizler kapsamında, nanoşebekelerin kullanımıyla elde edilen karbon tasarruflarının yanı sıra, enerji üretimi ve depolaması sırasında kullanılan malzemelerin çevresel

etkileri de göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, ekonomik analizlerde yatırım geri dönüş sürelerinin yanı sıra, enerji fiyatlarının uzun vadeli değişim senaryolarına göre değerlendirilmesi, nanoşebekelerin ekonomik sürdürülebilirliğini ölçmek için önemli bir araç sunabilir. Bu tür analizler, nanoşebekelerin ekonomik uygulanabilirliğini ve uzun vadede finansal faydalarını göstermeye yardımcı olacaktır.

- Nanoşebekeler arası p2p enerji transferleri, enerji ihtiyacı olan bir nanoşebekeye enerji fazlası olan bir nanoşebekeden yapılan transferlerin optimize edilmesi açısından önemlidir. Bu amaçla, gerçek zamanlı izleme ve yönetim platformlarının geliştirilmesi önerilmektedir. Geliştirilecek bir platform, her nanoşebekenin enerji üretim, tüketim ve depolama durumunu anlık olarak analiz ederek en uygun transfer kararlarını alabilir ve hızlı bir şekilde uygulayabilir. Bu platformlar, şebekeye olan bağımlılığı azaltırken, transfer edilen enerji miktarını optimize ederek maliyet etkinliğini artıracaktır. Ayrıca, platformlar aracılığıyla elde edilecek verilerin analizi, nanoşebeke performansını uzun vadeli izlemeye ve sistemin zayıf noktalarının belirlenmesine de olanak tanır.
- Nanoşebekeler arasında p2p enerji transferi yapılırken güvenli, izlenebilir ve verimli bir alışveriş ortamı oluşturmak, enerji yönetiminde kritik bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, blockchain teknolojisi kullanılarak nanoşebekeler arası enerji ticaretinin (transferinin) güvenli bir şekilde kaydedilmesi, her nanoşebekenin enerji alışverişini merkezi bir otoriteye ihtiyaç duymaksızın gerçekleştirebilmesi için bir altyapı sağlanabilir. Blockchain teknolojisi, enerji transfer kayıtlarının değiştirilmesini veya manipüle edilmesini engelleyerek her transferin şeffaf ve güvenilir bir şekilde izlenmesine imkan tanır. Bu tür bir yaklaşım, enerji maliyetlerini daha da düşürmek ve enerji yönetimini daha bağımsız bir yapıya kavuşturmak için önemli bir adım olarak değerlendirilmektedir.

- [1] Y. Zhang, et al., "Minimization of AC-DC grid transmission loss and DC voltage deviation using adaptive droop control and improved AC-DC power flow algorithm," *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 36, no. 1, pp. 744–756, 2020.
- [2] K. Lenin, "Real power loss reduction by german shepherd dog, explore–save and line up search optimization algorithms," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 13, no. 4, 2022, Art. no. 101688.
- [3] A. Q. H. Badar, B. S. Umre, and A. S. Junghare, "Reactive power control using dynamic particle swarm optimization for real power loss minimization," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 41, no. 1, pp. 133–136, 2012.
- [4] B. Shi, L.-X. Yan, and W. Wu, "Multi-objective optimization for combined heat and power economic dispatch with power transmission loss and emission reduction," *Energy*, vol. 56, pp. 135–143, 2013.
- [5] S. A. Reddy and M. S. Kumari, "A review of switching overvoltage modeling in UHV AC transmission lines," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 236, 2024, Art. no. 110902.
- [6] E. Karaca and F. M. Nuroğlu, "Analysis of hybrid AC/DC transmission system: A Turkey case study," *IET Gener. Transm. Distrib.*, 2024.
- [7] J. Bryan, R. Duke, and S. Round, "Decentralized generator scheduling in a nanogrid using DC bus signaling," in **Proc. IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meeting**, Denver, CO, USA, 2004, pp. 1–6.
- [8] J. Bryan, R. Duke, and S. Round, "Distributed generation–nanogrid transmission and control options," in **Proc. Int. Power Eng. Conf. (IPEC)**, vol. 1, Singapore, 2003, pp. 341–346.
- [9] E. C. Kern, E. M. Gulachenski, and G. A. Kern, "Cloud effects on distributed photovoltaic generation: Slow transients at the Gardner, Massachusetts photovoltaic experiment," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 4, no. 2, pp. 184–190, 1989.
- [10] X. Zhang, G. G. Karady, and S. T. Ariaratnam, "Optimal allocation of CHP-based distributed generation on urban energy distribution networks," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 246–253, 2013.
- [11] O. M. Toledo, D. O. Filho, and A. S. A. C. Diniz, "Distributed photovoltaic generation and energy storage systems: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 14, no. 1, pp. 506–511, 2010.

- [12] A. H. Fathima and K. Palanisamy, "Energy storage systems for energy management of renewables in distributed generation systems," in **Energy Management of Distributed Generation Systems**, vol. 157, 2016, pp. 1–24.
- [13] M. Y. Suberu, M. W. Mustafa, and N. Bashir, "Energy storage systems for renewable energy power sector integration and mitigation of intermittency," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 35, pp. 499–514, 2014.
- [14] Web of Science, "Summary of articles related to AC/DC nanogrid," [Online]. Available: <https://www.webofscience.com/wos/woscc/summary/a12dd506-d34f-4b34-b4f0-be3bde5e689c-010ccdb9a8/relevance/1>.
- [15] H. Fan, W. Yu, and S. Xia, "Review of control strategies for DC nano-grid," *Front. Energy Res.*, vol. 9, 2021, Art. no. 644926.
- [16] M. Shahidehpour, et al., "A hybrid AC/DC nanogrid: The Keating hall installation at the Illinois institute of technology," *IEEE Electrification Mag.*, vol. 5, no. 2, pp. 36–46, 2017.
- [17] A. Werth, N. Kitamura, and K. Tanaka, "Conceptual study for open energy systems: Distributed energy network using interconnected DC nanogrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1621–1630, 2015.
- [18] F. A. Assis, et al., "Assessment of regulatory and market challenges in the economic feasibility of a nanogrid: A Brazilian case," *Energies*, vol. 17, no. 2, p. 341, 2024.
- [19] J. Yim, et al., "Energy management systems for forecasted demand error compensation using hybrid energy storage system in nanogrid," *Renew. Energy*, vol. 221, 2024, Art. no. 119744.
- [20] S. Moradi, V. Vahidinasab, and G. Zizzo, "Optimal nanogrid planning at building level," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 153, 2023, Art. no. 109409.
- [21] S. Jamal, N. M. L. Tan, and J. Pasupuleti, "A review of energy management and power management systems for microgrid and nanogrid applications," *Sustainability*, vol. 13, no. 18, p. 10331, 2021.
- [22] D. Burmester, et al., "A review of nanogrid topologies and technologies," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 67, pp. 760–775, 2017.
- [23] S. Mishra and O. Ray, "Advances in nanogrid technology and its integration into rural electrification in India," in **Proc. Int. Power Electron. Conf. (IPEC-Hiroshima ECCE Asia)**, Hiroshima, Japan, 2014, pp. 1–6.
- [24] R. Singh, et al., "Emerging role of photovoltaics for sustainably powering underdeveloped, emerging, and developed economies," in **Proc. 2nd Int. Conf. Green Energy Technol.**, Trivandrum, India, 2014, pp. 1–5.
- [25] M. R. Khan and E. D. Brown, "DC nanogrids: A low-cost PV-based solution for livelihood enhancement for rural Bangladesh," in **Proc. 3rd Int. Conf. Dev. Renew. Energy Technol. (ICDRET)**, Dhaka, Bangladesh, 2014, pp. 1–6.

- [26] V. Sudev and S. Parvathy, "Switched boost inverter-based DC nanogrid with battery and bi-directional converter," in **Proc. Int. Conf. Circuits, Power Comput. Technol. (ICCPCT)**, Nagercoil, India, 2014, pp. 1–7.
- [27] IEA, "Net Zero by 2050," IEA, Paris, 2021. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>. [Erişim: Eylöl. 18, 2024].
- [28] R. P. S. Chandrasena, et al., "Operation and control of a hybrid AC-DC nanogrid for future community houses," in **Proc. Australas. Univ. Power Eng. Conf. (AUPEC)**, Perth, Australia, 2014, pp. 1–6.
- [29] F. Gonzalez-Espin, et al., "Operating modes of a commercial and industrial building microgrid with electrical generation and storage," in **Proc. 5th Int. Symp. Power Electron. Distrib. Gener. Syst. (PEDG)**, Galway, Ireland, 2014, pp. 1–7.
- [30] O. Ray and S. Mishra, "Boost-derived hybrid converter with simultaneous DC and AC outputs," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 50, no. 2, pp. 1082–1093, 2013.
- [31] P. Kanakasabapathy and R. Sarath, "Switched Capacitor/Switched-Inductor Cuk Hybrid Converter for nanogrid Applications," in **Proc. Int. Conf. Computation Power, Energy, Inf. Commun.**, Chennai, India, 2015, pp. 1–5.
- [32] R. Sarath and P. Kanakasabapathy, "Hybrid converter based on Ćuk topology to supply both AC and DC loads," in **Proc. Int. Conf. Technol. Advancements Power Energy (TAP Energy)**, Kollam, India, 2015, pp. 1–6.
- [33] S. Dogga, et al., "Boost Derived Hybrid Converter implementation using fuzzy controller," in **Proc. Int. Conf. Technol. Advancements Power Energy (TAP Energy)**, Kollam, India, 2015, pp. 1–7.
- [34] S. Poshtkouhi, et al., "A dual-active-bridge based bi-directional micro-inverter with integrated short-term Li-ion ultra-capacitor storage and active power smoothing for modular PV systems," in **Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC)**, Fort Worth, TX, USA, 2014, pp. 1–7.
- [35] F. Chen, et al., "Control loop design of a two-stage bidirectional AC/DC converter for renewable energy systems," in **Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC)**, Fort Worth, TX, USA, 2014, pp. 1–8.
- [36] N. Surulivel, D. Debnath, and C. Chakraborty, "A novel single coupled-inductor boost TPC with two inductively interfaced ports suitable for renewable energy integration," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 70, no. 5, pp. 4705–4715, 2022.
- [37] R. P. S. Chandrasena, et al., "Dynamic operation and control of a hybrid nanogrid system for future community houses," *IET Gener., Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 11, pp. 1168–1178, 2015.
- [38] S. I. Ganesan, et al., "Control scheme for a bidirectional converter in a self-sustaining low-voltage DC nanogrid," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 10, pp. 6317–6326, 2015.

- [39] C. Sun, F. Sun, and S. J. Moura, "Data enabled predictive energy management of a PV-battery smart home nanogrid," in **Proc. Am. Control Conf. (ACC)**, Chicago, IL, USA, 2015, pp. 1–6.
- [40] A. Werth, N. Kitamura, and K. Tanaka, "Conceptual study for open energy systems: distributed energy network using interconnected DC nanogrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1621–1630, 2015.
- [41] E. A. Setiawan and N. Adita, "Hybrid nanogrids development to improve residential reliability and resiliency supply: Testing and implementation," *Energy Rep.*, vol. 8, pp. 284–290, 2022.
- [42] A. H. Fathima and K. Palanisamy, "Optimization in microgrids with hybrid energy systems—A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 45, pp. 431–446, 2015.
- [43] B. Nordman and K. Christensen, "DC Local Power Distribution with microgrids and nanogrids," in **Proc. IEEE Int. Conf. DC Microgrids (ICDCM)**, Atlanta, GA, USA, 2015, pp. 1–6.
- [44] M. Nasir, et al., "A decentralized control architecture applied to DC nanogrid clusters for rural electrification in developing regions," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 2, pp. 1773–1785, 2018.
- [45] B. Sørensen, "A history of renewable energy technology," *Energy Policy*, vol. 19, no. 1, pp. 8–12, 1991.
- [46] D. Akinyele, "Techno-economic design and performance analysis of nanogrid systems for households in energy-poor villages," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 34, pp. 335–357, 2017.
- [47] M. Ban, et al., "Optimal sizing of PV and battery-based energy storage in an off-grid nanogrid supplying batteries to a battery swapping station," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 7, no. 2, pp. 309–320, 2019.
- [48] M. Saad, et al., "Behavioral Modeling Paradigm for DC Nanogrid Based Distributed Energy Systems," *Energies*, vol. 14, no. 23, p. 7904, 2021.
- [49] F. Luo, et al., "Hierarchical energy management system for home microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5536–5546, 2018.
- [50] B. Gooch, et al., "Multi-criteria techno-economic optimization of hybrid grid of nanogrids," in **Proc. IEEE Power Energy Conf. Illinois (PECI)**, Urbana, IL, USA, 2018, pp. 1–7.
- [51] P. Ortiz, et al., "Greenhouse gas emission reduction system in photovoltaic nanogrid with battery and thermal storage reservoirs," *J. Cleaner Prod.*, vol. 310, p. 127347, 2021.
- [52] S. Habibi, et al., "Efficiency assessment of a residential DC nanogrid with low and high distribution voltages using realistic data," in **Proc. IEEE Green Technol. Conf. (GreenTech)**, Denver, CO, USA, 2021, pp. 1–6.
- [53] REN21, **Renewables 2021 Global Status Report**, Paris, France, 2021.
- [54] I. Sulaeman, et al., "Comparison of AC and DC nanogrid for office buildings with EV charging, PV and battery storage," *Energies*, vol. 14, no. 18, p. 5800, 2021.

- [55] M. R. Sandgani and S. Sirouspour, "Energy management in a network of grid-connected microgrids/nanogrids using compromise programming," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 3, pp. 2180–2191, 2016.
- [56] G. Barone, et al., "A renewable energy community of DC nanogrids for providing balancing services," *Energies*, vol. 14, no. 21, p. 7261, 2021.
- [57] L. Novoa and J. Brouwer, "Dynamics of an integrated solar photovoltaic and battery storage nanogrid for electric vehicle charging," *J. Power Sources*, vol. 399, pp. 166–178, 2018.
- [58] P. Arévalo, M. Tostado-Véliz, and F. Jurado, "A novel methodology for comprehensive planning of battery storage systems," *J. Energy Storage*, vol. 37, p. 102456, 2021.
- [59] R. Kumar and R. K. Behera, "A low-cost distributed solar DC nanogrid: Design and deployment with remote monitoring unit," in **Proc. Nat. Power Syst. Conf. (NPSC)**, Bhubaneswar, India, 2018, pp. 1–6.
- [60] D. Neal, et al., "Demand side energy management and customer behavioral response in a rural islanded microgrid," in **Proc. IEEE PES/IAS PowerAfrica Conf.**, Nairobi, Kenya, 2020, pp. 1–5.
- [61] B. Nordman and K. Christensen, "Local power distribution with nanogrids," in **Proc. Int. Green Comput. Conf.**, Arlington, VA, USA, 2013, pp. 1–6.
- [62] M. Nasir, et al., "Solar PV-based scalable DC microgrid for rural electrification in developing regions," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 9, no. 1, pp. 390–399, 2017.
- [63] J. Bae, S. Lee, and H. Kim, "Comparative study on the economic feasibility of nanogrid and microgrid electrification: The case of Jeju Island, South Korea," *Energy Environ.*, vol. 32, no. 1, pp. 168–188, 2021.
- [64] K. Ubilla, et al., "Smart microgrids as a solution for rural electrification: Ensuring long-term sustainability through cadastre and business models," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 1310–1318, 2014.
- [65] IRENA, **Renewable power generation costs in 2022**, Int. Renew. Energy Agency, Abu Dhabi, UAE, 2022.
- [66] D. L. Gerber, et al., "A simulation-based efficiency comparison of AC and DC power distribution networks in commercial buildings," *Appl. Energy*, vol. 210, pp. 1167–1187, 2018.
- [67] Z. Liu and M. Li, "Research on energy efficiency of DC distribution system," *AASRI Procedia*, vol. 7, pp. 68–74, 2014.
- [68] A. Rasheed, et al., "AC vs. DC home: an efficiency comparison," in **Proc. Int. Symp. Recent Adv. Electr. Eng. (RAEE)**, Islamabad, Pakistan, 2019, vol. 4, pp. 1–6.
- [69] A. Goikoetxea, et al., "DC versus AC in residential buildings: Efficiency comparison," in **Proc. IEEE EUROCON**, Zagreb, Croatia, 2013, pp. 1–5.
- [70] I. Skouros and A. Karlis, "Design methodology of a DC nanogrid incorporating the V2G technology," in **Proc. IEEE IECON - Annu. Conf. Ind. Electron. Soc.**, Lisbon, Portugal, 2019, vol. 1, pp. 1–7.

- [71] M. Sechilariu, B. Wang, and F. Locment, "Building integrated photovoltaic system with energy storage and smart grid communication," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 60, no. 4, pp. 1607–1618, Apr. 2012.
- [72] S. Yoomak and A. Ngaopitakkul, "Investigation and feasibility evaluation of using nanogrid technology integrated into road lighting system," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 56739–56754, 2020.
- [73] S. Yoomak and A. Ngaopitakkul, "Development of sustainable nanogrid road lighting systems," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 22, no. 11, pp. 6682–6699, Nov. 2020.
- [74] N. Wang, et al., "Peer-to-peer energy trading among microgrids with multidimensional willingness," *Energies*, vol. 11, no. 12, p. 3312, 2018.
- [75] S. Lee, et al., "Cooperative decentralized peer-to-peer electricity trading of nanogrid clusters based on predictions of load demand and PV power generation using a gated recurrent unit model," *IET Renew. Power Gener.*, vol. 15, no. 15, pp. 3505–3523, 2021.
- [76] M. Nasir, et al., "Dual-loop control strategy applied to the cluster of multiple nanogrids for rural electrification applications," *IET Smart Grid*, vol. 2, no. 3, pp. 327–335, 2019.
- [77] J. Kumar, A. Agarwal, and V. Agarwal, "A review on overall control of DC microgrids," *J. Energy Storage*, vol. 21, pp. 113–138, 2019.
- [78] N. Kumari, S. S. Kumar, and V. Laxmi, "Design of an efficient bipolar converter with fast MPPT algorithm for DC nanogrid application," *Int. J. Circuit Theory Appl.*, vol. 49, no. 9, pp. 2812–2839, 2021.
- [79] I. Askarian, M. Pahlevani, and A. M. Knight, "Three-port bidirectional DC/DC converter for DC nanogrids," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 36, no. 7, pp. 8000–8011, Jul. 2020.
- [80] M. S. Bhaskar, et al., "High gain transformer-less double-duty-triple-mode DC/DC converter for DC microgrid," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 36353–36370, 2019.
- [81] M. S. Bhaskar, S. Padmanaban, and F. Blaabjerg, "A multistage DC-DC step-up self-balanced and magnetic component-free converter for photovoltaic applications: Hardware implementation," *Energies*, vol. 10, no. 5, p. 719, 2017.
- [82] R. Moradpour, H. Ardi, and A. Tavakoli, "Design and implementation of a new SEPIC-based high step-up DC/DC converter for renewable energy applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 2, pp. 1290–1297, Feb. 2017.
- [83] S. W. Lee and H. L. Do, "Quadratic boost DC–DC converter with high voltage gain and reduced voltage stresses," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 3, pp. 2397–2404, Mar. 2018.
- [84] M. Lakshmi and S. Hemamalini, "Nonisolated high gain DC–DC converter for DC microgrids," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 65, no. 2, pp. 1205–1212, Feb. 2017.

- [85] T. Arunkumari, et al., "Implementation of high-gain nonisolated DC-DC converter for PV-fed applications," *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 30, no. 1, p. e12165, 2020.
- [86] W. Wu, et al., "A dual-buck–boost AC/DC converter for DC nanogrid with three terminal outputs," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 1, pp. 295–299, Jan. 2016.
- [87] B. Mangu, et al., "Grid-connected PV-wind-battery-based multi-input transformer-coupled bidirectional DC-DC converter for household applications," *IEEE J. Emerg. Sel. Topics Power Electron.*, vol. 4, no. 3, pp. 1086–1095, Sep. 2016.
- [88] C. Roncero-Clemente, et al., "Power-flow-based secondary control for autonomous droop-controlled AC nanogrids with peer-to-peer energy trading," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 22339–22350, 2021.
- [89] A. Berzoy, et al., "Non-linear droop control of parallel split-phase inverters for residential nanogrids," in **Proc. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo. (APEC)**, Anaheim, CA, USA, 2019, pp. 1–5.
- [90] S. Chaturvedi and D. M. Fulwani, "Second order ripple reduction in switched boost inverter for standalone nanogrid applications," in **Proc. IEEE Int. Future Energy Electron. Conf. (IFEEEC)**, Singapore, 2019, pp. 1–5.
- [91] J. L. P. Tomé, V. F. Pires, and J. M. Pina, "Development of an off-grid micro-inverter for a scalable photovoltaic kit," in **Proc. IEEE Int. Symp. Ind. Electron. (ISIE)**, Kyoto, Japan, 2021, pp. 1–6.
- [92] R. Logesh, "Resources, configurations, and soft computing techniques for power management and control of PV/wind hybrid system," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 69, pp. 129–143, 2017.
- [93] M. B. Shafik, G. I. Rashed, and H. Chen, "Optimizing energy savings and operation of active distribution networks utilizing hybrid energy resources and soft open points: Case study in Sohag, Egypt," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 28704–28717, 2020.
- [94] IRENA, **Renewable Capacity Statistics 2022**, Int. Renew. Energy Agency, Abu Dhabi, UAE, 2022.
- [95] IRENA, **World Energy Transitions Outlook 2022**, Int. Renew. Energy Agency, Abu Dhabi, UAE, 2022.
- [96] M. W. Akram, et al., "Global prospects, advance technologies and policies of energy-saving and sustainable building systems: A review," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1316, 2022.
- [97] B. Young, N. Ertugrul, and H. G. Chew, "Overview of optimal energy management for nanogrids (end-users with renewables and storage)," in **Proc. Australas. Univ. Power Eng. Conf. (AUPEC)**, Brisbane, Australia, 2016, pp. 1–6.
- [98] C. Roncero-Clemente, E. Roanes-Lozano, and F. Barrero-González, "A multi-criteria computer package-based energy management system for a grid-connected AC nanogrid," *Math.*, vol. 9, no. 5, p. 487, 2021.

- [99] E. Rodriguez-Diaz, et al., "Voltage-level selection of future two-level LVdc distribution grids: A compromise between grid compatibility, safety, and efficiency," *IEEE Electrification Mag.*, vol. 4, no. 2, pp. 20–28, Jun. 2016.
- [100] M. C. Di Piazza, "Energy management systems for optimal operation of electrical micro/nanogrids," *Energies*, vol. 14, no. 24, p. 8469, 2021.
- [101] V. Venizelou, et al., "Methodology for deploying cost-optimum price-based demand side management for residential prosumers," *Renewable Energy*, vol. 153, pp. 228-240, 2020.
- [102] Y. Yerasimou, et al., "Design of a smart nanogrid for increasing energy efficiency of buildings," *Energies*, vol. 14, no. 12, p. 3683, 2021.
- [103] The World Bank Press Release, "Report: Universal access to sustainable energy will remain elusive without addressing inequalities," Washington, USA, 2021.
- [104] European Commission, "Nearly zero-energy buildings," [Online]. Erişim Adresi: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-efficiency/energy-efficient-buildings/nearly-zero-energy-buildings_en. [Erişim Tarihi: Ocak. 4, 2025].
- [105] B. Nordman, K. Christensen, and A. Meier, "Think globally, distribute power locally: The promise of nanogrids," *Computer*, vol. 45, no. 9, pp. 89-91, 2012.
- [106] S. M. Shariff, et al., "Utilization of human to nanogrid to support the energy storage system," *Energy Storage*, vol. 4, no. 1, p. e282, 2022.
- [107] A. Ammous, et al., "Energy efficiency of low voltage direct current supplies including photovoltaic sources for future homes," *Process Integration and Optimization for Sustainability*, vol. 6, no. 4, pp. 977-988, 2022.
- [108] A. Alsaedi, et al., "Low voltage direct current supplies concept for residential applications," *Energy Exploration & Exploitation*, vol. 40, no. 1, pp. 1-12, 2022.
- [109] L. Yan, et al., "Architecture, control, and implementation of networked microgrids for future distribution systems," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 10, no. 2, pp. 286-299, 2022.
- [110] M. Sheikholeslami, et al., "Challenges of modeling and simulation of clustered Bronzeville community microgrid (BCM) and IIT campus microgrid (ICM) using RTDS," in *Proc. 2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, pp. 1-5, 2020.
- [111] T. A. Olukan, et al., "Development of a solar nano-grid for meeting the electricity supply shortage in developing countries (Nigeria as a case study)," *Renewable Energy*, vol. 181, pp. 640-652, 2022.
- [112] A. R. Kalair, N. Abas, Q. U. Hasan, M. Seyedmahmoudian, and N. Khan, "Demand side management in hybrid rooftop photovoltaic integrated smart nano grid," *Journal of Cleaner Production*, vol. 258, p. 120747, 2020.
- [113] A. T. Dahiru, C. W. Tan, A. L. Bukar, and K. Y. Lau, "Energy cost reduction in residential nanogrid under constraints of renewable energy, customer

- demand fitness and binary battery operations," *Journal of Energy Storage*, vol. 39, p. 102520, 2021.
- [114] M. Biabani, M. A. Golkar, A. Johar, and M. Johar, "Propose a home demand-side-management algorithm for smart nano-grid," in *Proc. 4th Annual Int. Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conf.*, pp. 487-494, Feb. 2013.
 - [115] A. C. Tsolakis, et al., "Design and real-life deployment of a smart nanogrid: A Greek case study," in *Proc. 2020 IEEE Int. Conf. Power and Energy (PECon)*, pp. 321-326, Dec. 2020.
 - [116] B. Tudu, K. K. Mandal, and N. Chakraborty, "Optimal design and development of PV-wind-battery based nano-grid system: A field-on-laboratory demonstration," *Frontiers in Energy*, vol. 13, no. 2, pp. 269-283, 2019.
 - [117] X. Lü, et al., "Renewable energy resources and multi-energy hybrid systems for urban buildings in Nordic climate," *Energy and Buildings*, vol. 282, p. 112789, 2023.
 - [118] J. D. Colgan and M. Hinthorn, "International energy politics in an age of climate change," *Annual Review of Political Science*, vol. 26, no. 1, pp. 79-96, 2023.
 - [119] The Energy Institute, *Statistical Review of World Energy*, Energy Institute: London, UK, 2023. [Online]. Erişim Adresi: <https://www.energyinst.org/statistical-review>. [Erişim Tarihi: Kasım. 4, 2024].
 - [120] Republic of Turkey, "Türkiye Ulusal Enerji Planı 2022," [Online]. Erişim Adresi: https://enerji.gov.tr/Media/Dizin/EIGM/tr/Raporlar/TUEP/T%C3%BCrkiye_National_Energy_Plan.pdf. [Erişim Tarihi: Kasım. 11, 2023].
 - [121] Turkish Statistical Institute (TUIK), "Motorlu Kara Taşıtları Nisan 2024," [Online]. Erişim Adresi: <https://data.tuik.gov.tr/Bulten/Index?p=Motorlu-Kara-Tasitlari-Nisan-2024-53456>. [Erişim Tarihi: Haziran. 4, 2024].
 - [122] O. Turan, A. Durusu, and R. Yumurtaci, "Driving urban energy sustainability: A techno-economic perspective on nanogrid solutions," *Energies*, vol. 16, no. 24, p. 8084, 2023.
 - [123] Energy Markets Management (EPIAS), "Spot electricity market reports," [Online]. Erişim Adresi: <https://www.epias.com.tr/spot-elektrik-piyasasi/elektrik-piyasasi-bultenler/>. [Erişim Tarihi: Ekim. 24, 2024].
 - [124] M.-T. Huang and P.-M. Zhai, "Achieving Paris Agreement temperature goals requires carbon neutrality by middle century with far-reaching transitions in the whole society," *Advances in Climate Change Research*, vol. 12, no. 2, pp. 281-286, 2021.
 - [125] U. Calikoglu and M. A. Koksall, "A pathway to achieve the net zero emissions target for the public electricity and heat production sector: A case study for Türkiye," *Energy Policy*, vol. 179, p. 113653, 2023.
 - [126] G. Tunc, "Türkiye'deki bina sayıları," *Atılım Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü*, 2021.

- [127] S. P. Bihari, et al., "A comprehensive review of microgrid control mechanism and impact assessment for hybrid renewable energy integration," IEEE Access, vol. 9, pp. 88942-88958, 2021.
- [128] O. Ayan and B. E. Turkay, "Techno-economic comparative analysis of grid-connected and islanded hybrid renewable energy systems in 7 climate regions, Turkey," IEEE Access, vol. 11, pp. 48797-48825, 2023.
- [129] S. Saib and A. Gherbi, "Simulation and control of hybrid renewable energy system connected to the grid," in Proc. 2015 5th Int. Youth Conf. Energy (IYCE), 2015.
- [130] P. Gajewski and K. Pieńkowski, "Control of the hybrid renewable energy system with wind turbine, photovoltaic panels and battery energy storage," Energies, vol. 14, no. 6, p. 1595, 2021.
- [131] M. A. Abdullah, A. P. Agalgaonkar, and K. M. Muttaqi, "Assessment of energy supply and continuity of service in distribution network with renewable distributed generation," Applied Energy, vol. 113, pp. 1015-1026, 2014.
- [132] Resmi Gazete, "5 Temmuz 2022, Yayın Sayısı 31887."
- [133] U. Kılıç and B. Kekezoğlu, "A review of solar photovoltaic incentives and policy: Selected countries and Turkey," Ain Shams Engineering Journal, vol. 13, no. 5, p. 101669, 2022.
- [134] Republic of Turkey, Türkiye's Official Gazette, March 12, 2022, Issue Number 31776.
- [135] M. Y. Kılıç and S. Adalı, "Bir apartmanın yenilenebilir enerji sistem maliyetinin HOMER Pro kullanılarak belirlenmesi," Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 11, no. 1, pp. 13-20, 2022.
- [136] G. Yılmaz, et al., "Şebeke bağlantılı hibrit yenilenebilir enerji sisteminin Homer ile ekonomik ve çevresel analizi: İzmir Endüstriyel Bölgesi örneği," Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, vol. 13, no. 3, pp. 1090-1106, 2023.
- [137] Z. Öztürk, S. Tosun, and A. Öztürk, "Örnek bir hibrit yenilenebilir enerji sisteminin HOMER ile modellenmesi, ekonomik ve teknik yönden analizleri," Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 2, no. 2, pp. 286-297, 2019.
- [138] A. F. Güven and E. Poyraz, "Feasibility study and techno-economic analysis of stand-alone hybrid energy system for Muğla Province Köyceğiz," Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, vol. 11, no. 1, pp. 70-85, 2021.
- [139] M. Y. Kılıç, S. Adalı, and M. Aydın, "Elektrik ihtiyacının sağlanmasında hibrit yenilenebilir enerji sistem tasarımı: Bursa tekstil fabrikası örneği," Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, vol. 27, no. 3, pp. 897-910, 2022.
- [140] M. Eken and İ. Çelik, "An investigation of optimal power system designs for a net zero energy house: A case study of Kahramanmaraş," Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, vol. 11, no. 4, pp. 971-982, 2022.

- [141] A. Tabak, "Konya ilinde bir fabrikanın enerji talebinin karşılanması için hibrit enerji üretim sisteminin analiz ve tasarımı," *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, vol. 13, no. 1, pp. 220-230, 2021.
- [142] H. Mamur, M. C. Yakar, and A. Zerafet, "Bir kamu binası için hibrit enerji sistemi fizibilitesi," *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, vol. 11, no. 1, pp. 51-58, 2019.
- [143] A. E. Akan and A. P. Akan, "Meeting of energy demand for irrigation of off-grid agricultural land by solar-wind energy system with battery storage," *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, no. 28, pp. 806-810, 2021.
- [144] H. K. Channi, "Optimal designing of PV-diesel generator-based system using HOMER software," *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [145] C. A. Nallolla and V. Perumal, "Optimal design of a hybrid off-grid renewable energy system using techno-economic and sensitivity analysis for a rural remote location," *Sustainability*, vol. 14, no. 22, p. 15393, 2022.
- [146] C. Li, "Technical and economic potential evaluation of an off-grid hybrid wind-fuel cell-battery energy system in Xining, China," *International Journal of Green Energy*, vol. 18, no. 3, pp. 258-270, 2021.
- [147] Q. Hassan, et al., "Optimizing a microgrid photovoltaic-fuel cell energy system at the highest renewable fraction," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 47, no. 28, pp. 13710-13731, 2022.
- [148] C. Miao, et al., "Technoeconomic analysis on a hybrid power system for the UK household using renewable energy: A case study," *Energies*, vol. 13, no. 3231, 2020.
- [149] N. C. Alluraiah and P. Vijayapriya, "Optimization, design and feasibility analysis of a grid-integrated hybrid AC/DC microgrid system for rural electrification," *IEEE Access*, 2023.
- [150] A. Zegueur, T. Sebbagh, and A. Metatla, "A techno-economic study of a hybrid PV–wind–diesel standalone power system for a rural telecommunication station in northeast Algeria," *Engineering Proceedings*, vol. 56, no. 1, p. 25, 2023.
- [151] A. K. Bansal, V. S. Sangtani, and M. N. Bhukya, "Optimal configuration and sensitivity analysis of hybrid nanogrid for futuristic residential application using honey badger algorithm," *Energy Conversion and Management*, vol. 315, p. 118784, 2024.
- [152] S. Hasan, et al., "Study of battery energy storage operation in droop-controlled residential DC nanogrid," in *Proc. 2024 IEEE 18th Int. Conf. Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, 2024.
- [153] M. U. Emezirinwune, et al., "Synergizing hybrid renewable energy systems and sustainable agriculture for rural development in Nigeria," *e-Prime-Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 7, p. 100492, 2024.
- [154] H. O. Guelleh, et al., "Grid connected hybrid renewable energy systems for urban households in Djibouti: An economic evaluation," *South African Journal of Chemical Engineering*, vol. 43, pp. 215-231, 2023.

- [155] S. Bahramara, M. P. Moghaddam, and M. R. Haghifam, "Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 609-620, 2016.
- [156] N. Shirzadi, F. Nasiri, and U. Eicker, "Optimal configuration and sizing of an integrated renewable energy system for isolated and grid-connected microgrids: The case of an urban university campus," *Energies*, vol. 13, no. 14, p. 3527, 2020.
- [157] M. K. Deshmukh and A. B. Singh, "Modeling of energy performance of stand-alone SPV system using HOMER pro," *Energy Procedia*, vol. 156, pp. 90-94, 2019.
- [158] V. V. V. S. N. Murty and A. Kumar, "Optimal energy management and techno-economic analysis in microgrid with hybrid renewable energy sources," *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 5, pp. 929-940, 2020.
- [159] B. A. Akgul, M. S. Ozyazici, and M. F. Hasoglu, "Estimation of optimal tilt angles and solar radiation collected by fixed and tracking solar panels for the Mediterranean region, Turkey," *Indian Journal of Physics*, vol. 98, no. 4, pp. 1187-1200, 2024.
- [160] "GEPA Calculator," [Online]. Erişim Adresi: <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/pages/34.aspx>. [Erişim Tarihi: Eylül. 24, 2024].
- [161] A. Khosravani, et al., "Challenges of reaching high renewable fractions in hybrid renewable energy systems," *Energy Reports*, vol. 9, pp. 1000-1017, 2023.
- [162] A. El Hammoumi, et al., "Solar PV energy: From material to use, and the most commonly used techniques to maximize the power output of PV systems: A focus on solar trackers and floating solar panels," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 11992-12010, 2022.
- [163] S. Turkdogan, "Design and optimization of a solely renewable based hybrid energy system for residential electrical load and fuel cell electric vehicle," *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, no. 2, pp. 397-404, 2021.
- [164] IEA, Renewable Energy Market Update - June 2023, IEA, Paris, 2023. [Online]. Erişim Adresi: <https://www.iea.org/reports/renewable-energy-market-update-june-2023>. [Erişim Tarihi: Şubat. 24, 2024].
- [165] H. U. R. Habib, et al., "Design optimization and model predictive control of a standalone hybrid renewable energy system: A case study on a small residential load in Pakistan," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 117369-117390, 2019.
- [166] R. Singh and R. C. Bansal, "Optimization of an autonomous hybrid renewable energy system using reformed electric system cascade analysis," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 1, pp. 399-409, 2018.

- [167] M. S. Hossain, et al., "Towards energy efficient load balancing for sustainable green wireless networks under optimal power supply," IEEE Access, vol. 8, pp. 200635-200654, 2020.
- [168] "Elektrik Faturalarına Esas Tarife Tabloları," [Online]. Erişim Adresi: <https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-1327/elektrik-faturalarina-esas-tarife-tablolari>. [Erişim Tarihi: Aralık. 1, 2024].
- [169] A. Bhatt and W. Ongsakul, "Optimal techno-economic feasibility study of net-zero carbon emission microgrid integrating second-life battery energy storage system," Energy Conversion and Management, vol. 266, p. 115825, 2022.
- [170] S. A. A. Kazmi, S. Mushtaq, and M. Anwar, "An integrated assessment framework of renewable-based microgrid deployment for remote isolated area electrification across different climatic zones and future grid extensions," Sustainable Cities and Society, vol. 101, p. 105069, 2024.
- [171] A. K. S. Maisanam, A. Biswas, and K. K. Sharma, "Integrated socio-environmental and techno-economic factors for designing and sizing of a sustainable hybrid renewable energy system," Energy Conversion and Management, vol. 247, p. 114709, 2021.
- [172] R. J. Barthelmie, G. C. Larsen, and S. C. Pryor, "Modeling annual electricity production and levelized cost of energy from the US East Coast offshore wind energy lease areas," Energies, vol. 16, p. 4550, 2023.
- [173] A. J. Sultan, et al., "Comparative techno-economic assessment and minimization of the levelized cost of electricity for increasing capacity wind power plants by row and angle layout optimization," Journal of Cleaner Production, vol. 430, p. 139578, 2023.
- [174] A. Demirci and Z. Öztürk, "Farklı iklim özelliklerine sahip fotovoltaik panel ve enerji depolama entegreli elektrikli araç şarj istasyonlarının teknik, ekonomik ve çevresel optimizasyonu," Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, vol. 11, no. 4, pp. 1913-1929, 2023.
- [175] "Consumer Prices - Inflation Data," [Online]. Erişim Adresi: <https://www.tcmb.gov.tr/wps/wcm/connect/EN/TCMB+EN/Main+Menu/Statistics/Inflation+Data/Consumer+Prices>. [Erişim Tarihi: Ekim. 1, 2024].
- [176] "HOMER Manual Grid - Optimization Settings," [Online]. Erişim Adresi: https://support.ul-renewables.com/homer-manual-grid/optimization_settings.html. [Erişim Tarihi: Eylül. 14, 2024].
- [177] S. Abdelhady, "Techno-economic study and the optimal hybrid renewable energy system design for a hotel building with net zero energy and net zero carbon emissions," Energy Conversion and Management, vol. 289, p. 117195, 2023.
- [178] E. Proedrou, "A comprehensive review of residential electricity load profile models," IEEE Access, vol. 9, pp. 12114-12133, 2021.
- [179] C. Li, D. Zhou, and Y. Zheng, "Techno-economic comparative study of grid-connected PV power systems in five climate zones, China," Energy, vol. 165, pp. 1352-1369, 2018.

- [180] J. Vishnupriyan and P. S. Manoharan, "Prospects of hybrid photovoltaic–diesel standalone system for six different climate locations in Indian state of Tamil Nadu," *Journal of Cleaner Production*, vol. 185, pp. 309-321, 2018.
- [181] H. J. Choi, et al., "Economic feasibility of a PV system for grid-connected semiconductor facilities in South Korea," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, vol. 14, pp. 2033-2041, 2013.
- [182] A. Al-Karaghoulî and L. L. Kazmerski, "Optimization and life-cycle cost of health clinic PV system for a rural area in southern Iraq using HOMER software," *Solar Energy*, vol. 84, no. 4, pp. 710-714, 2010.
- [183] "Resmî Gazete," [Online]. Erişim Adresi: <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2024/05/20240514-4.htm>. [Erişim Tarihi: Ağustos. 2, 2024].
- [184] S. Mirjalili, S. M. Mirjalili, and A. Lewis, "Grey wolf optimizer," *Advances in Engineering Software*, vol. 69, pp. 46-61, 2014.
- [185] L. Doğan and U. Yüzgeç, "Robot path planning using gray wolf optimizer," in *Proc. Int. Conf. Advanced Technologies, Computer Engineering and Science (ICATCES'18)*, 2018.
- [186] C. Muro, et al., "Wolf-pack (*Canis lupus*) hunting strategies emerge from simple rules in computational simulations," *Behavioural Processes*, vol. 88, no. 3, pp. 192-197, 2011.
- [187] M. Karakaş, "Sınıflandırma problemlerinde özellik seçimi için karşıtlık tabanlı gri kurt optimizasyon algoritması," M.S. thesis, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2020.
- [188] H. Faris, et al., "Grey wolf optimizer: A review of recent variants and applications," *Neural Computing and Applications*, vol. 30, pp. 413-435, 2018.
- [189] S. Sharma and I. Ali, "Efficient energy management and cost optimization using multi-objective grey wolf optimization for EV charging/discharging in microgrid," *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy*, vol. 10, 2024.
- [190] Z. Al-Ibraheemi and S. Al-Janabi, "Sustainable energy: Advancing wind power forecasting with grey wolf optimization and GRU models," *Results in Engineering*, vol. 102930, 2024.
- [191] S. N. Makhadmeh, et al., "A multi-objective grey wolf optimizer for energy planning problem in smart home using renewable energy systems," *Sustainable Operations and Computers*, vol. 5, pp. 88-101, 2024.
- [192] J. Hu, et al., "Optimizing integrated energy systems using a hybrid approach blending grey wolf optimization with local search heuristics," *Journal of Energy Storage*, vol. 87, p. 111384, 2024.
- [193] S. Yadav, P. Kumar, and A. Kumar, "Grey wolf optimization based optimal isolated microgrid with battery and pumped hydro as double storage to limit excess energy," *Journal of Energy Storage*, vol. 74, p. 109440, 2023.

- [194] J. Hu, et al., "Optimizing integrated energy systems using a hybrid approach blending grey wolf optimization with local search heuristics," *Journal of Energy Storage*, vol. 87, p. 111384, 2024.
- [195] S. Yadav, P. Kumar, and A. Kumar, "Grey wolf optimization based optimal isolated microgrid with battery and pumped hydro as double storage to limit excess energy," *Journal of Energy Storage*, vol. 74, p. 109440, 2023.
- [196] D. Karaboga, "An idea based on honey bee swarm for numerical optimization". Vol. 200, Technical Report-TR06, Erciyes University, Engineering Faculty, Computer Engineering Department, 2005.
- [197] D. Karaboga and B. Basturk, "A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm," *Journal of Global Optimization*, vol. 39, pp. 459-471, 2007.
- [198] Q. Cao, et al., "Optimal location and sizing of multi-resource distributed generator based on multi-objective artificial bee colony algorithm," *Energy Engineering*, vol. 121, no. 2, 2024.
- [199] D. Oliva, E. Cuevas, and G. Pajares, "Parameter identification of solar cells using artificial bee colony optimization," *Energy*, vol. 72, pp. 93-102, 2014.
- [200] H. U. R. Habib, et al., "Energy cost optimization of hybrid renewables based V2G microgrid considering multi-objective function by using artificial bee colony optimization," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 62076-62093, 2020.
- [201] C. Altin, "Artificial bee colony algorithm based very fast renewable energy system optimization tool design," in **Proc. 27th Int. Conf. Electronics**, IEEE, 2023.
- [202] E. Uzlu, et al., "Estimates of hydroelectric generation using neural networks with the artificial bee colony algorithm for Turkey," *Energy*, vol. 69, pp. 638-647, 2014.
- [203] S. Singh, M. Singh, and S. C. Kaushik, "Feasibility study of an islanded microgrid in rural area consisting of PV, wind, biomass and battery energy storage system," *Energy Conversion and Management*, vol. 128, pp. 178-190, 2016.
- [204] C. A. W. Ngouleu, et al., "Techno-economic analysis and optimal sizing of a battery-based and hydrogen-based standalone photovoltaic/wind hybrid system for rural electrification in Cameroon based on meta-heuristic techniques," *Energy Conversion and Management*, vol. 280, p. 116794, 2023.
- [205] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle swarm optimization," in **Proc. ICNN'95 - Int. Conf. Neural Networks**, vol. 4, IEEE, 1995.
- [206] Y. Song, et al., "A multi-strategy adaptive particle swarm optimization algorithm for solving optimization problem," *Electronics*, vol. 12, no. 3, p. 491, 2023.
- [207] X. Kang, et al., "Multi-dimensional particle swarm optimization for robust blind image watermarking using intertwining logistic map and hybrid domain," *Soft Computing*, vol. 24, pp. 10561-10584, 2020.

- [208] A. Lorestani and M. M. Ardehali, "Optimal integration of renewable energy sources for autonomous tri-generation combined cooling, heating and power system based on evolutionary particle swarm optimization algorithm," *Energy*, vol. 145, pp. 839–855, 2018.
- [209] K. Moloi, J. A. Jordaan, and Y. Hamam, "A PSO based technique for optimal integration of DG into the power distribution system," in **Advances in Neural Networks – ISNN 2020**, 17th Int. Symp. Neural Networks, Cairo, Egypt, Dec. 2020, pp. 17–26.
- [210] T. Kerdphol, et al., "Optimization of a battery energy storage system using particle swarm optimization for stand-alone microgrids," *Int. J. Electrical Power & Energy Systems*, vol. 81, pp. 32-39, 2016.
- [211] C. D. Iweh and E. R. Akupan, "Control and optimization of a hybrid solar PV–Hydro power system for off-grid applications using particle swarm optimization (PSO) and differential evolution (DE)," *Energy Reports*, vol. 10, pp. 4253-4270, 2023.
- [212] M. A. Mohamed, A. M. Eltamaly, and A. I. Alolah, "PSO-based smart grid application for sizing and optimization of hybrid renewable energy systems," *PLoS One*, vol. 11, no. 8, e0159702, 2016.
- [213] Z. Miao, et al., "A discrete PSO-based static load balancing algorithm for distributed simulations in a cloud environment," *Future Generation Computer Systems*, vol. 115, pp. 497-516, 2021.
- [214] Y. B. Yakut, "A new control algorithm for increasing efficiency of PEM fuel cells–Based boost converter using PI controller with PSO method," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 75, pp. 1-11, 2024.
- [215] M. Yousefi, et al., "Strategic planning for minimizing CO2 emissions using LP model based on forecasted energy demand by PSO Algorithm and ANN," *Int. J. Energy and Environment*, vol. 4, 2013.
- [216] J. AlFaraj, E. Popovici, and P. Leahy, "Solar irradiance database comparison for PV system design: A case study," *Sustainability*, vol. 16, no. 15, p. 6436, 2024.
- [217] P. Kurukuri, et al., "Optimal planning and designing of microgrid systems with hybrid renewable energy technologies for sustainable environment in cities," *Environmental Science and Pollution Research*, 2024.
- [218] T. C. Resmi Gazete, "Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği," Ankara, Türkiye, no. 96, 1984.
- [219] "Alçak Gerilim Kabloları," [Online]. Erişim Adresi: <https://www.vatan.com.tr/urunler/alcak-gerilim-kablolari/0.6-1-kv-xlpe-izoleli-cok-damarli-bakir-iletkenli-kablolar.html#print-wrap>. [Erişim Tarihi: Aralık. 2, 2024].

EK KODLAMALAR

''''''

Created on Mon Sep 2 23:56:07 2024

@author: o.turan MILP PSEUDO CODE

''''''

1. GEREKLİ kütüphaneleri yükle (pandas, gurobipy) ve parametreleri tanımla:

- NG1, NG2, NG4 için BESS kapasite değerleri
- Zaman adımı (delta_T = 1 saat)

2. EXCEL dosyasından enerji verilerini yükle:

- NG1: Güneş PV verileri
- NG2: Rüzgar türbini verileri
- NG3, NG4, NG5: Kombine üretim ve talep verileri

3. VERİLERİ temizle ve yapılandır:

- İlgili sütunları seç ve yeniden adlandır
- Tüm veri setlerinde standart formatı sağla

4. OPTİMİZASYON fonksiyonunu tanımla `optimize\_energy\_management`:

- GİRİŞ: NG1, NG2, NG3, NG4, NG5 enerji verileri ve BESS kapasiteleri
- ÇIKIŞ: Optimizasyon sonrası her NG için enerji verileri

5. Gurobi optimizasyon modelini oluştur:

- Model parametrelerini ayarla

6. KARAR değişkenlerini tanımla:

- NG1, NG2, NG4 için BESS şarj, deşarj ve SOC durumu
- Tüm NG'ler için şebeke import/export miktarları
- NG'ler arasındaki enerji transferleri

- Şarj/deşarj için ikili değişkenler
7. BAŞLANGIÇ kısıtlarını ekle:
- Tüm BESS'ler için başlangıç SOC değerini 0 olarak belirle
8. HER saat 'i' için:
- TÜM NG'lerin talep ve üretim verilerini oku
 - KISITLARI ekle:
 - BESS için eşzamanlı şarj vedeşarjı engelle
 - BESS için SOC denge denklemlerini ekle
 - Her NG için enerji denge denklemlerini oluştur
 - Her NG'nin enerji fazlasını ve eksikliğini hesapla
 - Enerji transferlerini fazla/eksik enerjiye göre sınırla
 - Fazla/eksik enerji durumları için Big-M yöntemini kullan
9. AMAÇ fonksiyonunu tanımla:
- Tüm NG'ler için toplam şebekeden alınan enerjiyi minimize et
10. OPTİMİZASYONU çalıştır:
- EĞER model çözilemezse:
 - Uygunsuzluk raporu oluştur
 - Çalışmayı sonlandır
 - EĞER optimal çözüm bulunursa:
 - Tüm NG'ler için sonuçları çıkart (örneğin, talep, üretim, BESS işlemleri, enerji transferleri)
11. SONUÇLARI Excel'e kaydet:
12. OPTİMİZASYON sonuçlarını ekrana yazdır:
- Toplam şebeke importu, enerji transferleri ve en büyük transfer detaylarını göster
13. PROGRAMI sonlandır.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

- [1] O. Turan, A. Durusu, ve R. Yumurtaci, "Sezgisel algoritmalarla bir nanoşebenin enerji depolama sisteminin boyutlandırılması," in Proc. 5th Bilsel Int. Truva Sci. Res. Innov. Congr., Çanakkale, Turkey, Nov. 2024.

Makaleler

- [1] O. Turan, A. Durusu, and R. Yumurtaci, "Driving urban energy sustainability: A techno-economic perspective on nanogrid solutions," *Energies*, vol. 16, no. 24, p. 8084, 2023.