

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

**ALÇAK GERİLİM HATLARINDA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN
KULLANIMININ PV SİSTEM ENTEGRESİNDEN KAYNAKLI GERİLİM
ARTIŞINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Sabri ÇİFTÇİ
(193111015)**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Muhammed Sait AYDIN

**Haziran-2021
SİİRT**

TEZ KABUL VE ONAYI

Sabri ÇİFTÇİ tarafından hazırlanan “Alçak Gerilim Hatlarında Enerji Depolama Sistemlerinin Kullanımının PV Sistem Entegresinden Kaynaklı Gerilim Artışına Etkilerinin Araştırılması” adlı tez çalışması 25/06/2021 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliği ile Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Doç. Dr. Melih KUNCAN
Siirt Üniversitesi

Danışman

Dr. Muhammed Sait AYDIN
Siirt Üniversitesi

Üye

Dr. Mehmet Rıda TÜR
Batman Üniversitesi

İmza

.....

.....

.....

Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Doç. Dr. Fevzi HANSU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEŞEKKÜR

Tez çalışması ve tüm eğitim dönemi süresince benden desteğini esirgemeyen değerli hocam Sayın Dr. Öğretim Üyesi Muhammed Sait AYDIN'a, Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi'nde görevli Sayın Doç. Dr. Melih KUNCAN hocama, fakültede eğitim veren diğer değerli hocalarıma ve yardımsever kişiliği ile öğrencilere destek olan Araştırma Görevlisi Necati DEMİR arkadaşşıma teşekkürlerimi sunarım.

Yüksek Lisans sırasında okulda geçirdiğimiz keyifli zamanlar için tüm arkadaşlara teşekkürlerimi sunarım.

Hayatım boyunca benden maddi ve manevi desteğini esirgemeyen babam ve anneme, kardeşlerime, Yüksek Lisans süresince sabır göstererek beni destekleyen değerli eşime ve çocuklarıma ayrıca teşekkürlerimi sunarım.

Sabri ÇİFTÇİ
SİİRT-2021

İÇİNDEKİLER

Sayfa

TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER	iv
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ.....	viii
ÖZET	x
ABSTRACT.....	xi
1 GİRİŞ	1
1.1 Akıllı Şebekeler.....	3
1.2 PV Sistemler.....	4
1.2.1 PV hücreler	6
1.2.2 İnverterler.....	7
1.2.3 Enerji depolama birimleri	7
1.2.4 Şarj kontrol cihazları.....	8
1.3 Enerji Depolama.....	8
1.3.1 Enerji depolama uygulamaları	10
1.3.2 Enerji depolama teknolojileri.....	11
1.3.3 Enerji depolama sistemlerinin benimsenmesindeki son gelişmeler.....	15
2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	18
2.1 Orta Gerilim Şebekesi Ölçeğinde Yapılan Çalışmalar.....	18
2.2 Alçak Gerilim Şebekesi Ölçeğinde Yapılan Çalışmalar	20
3 MATERYAL VE METOT	26
3.1 Uygulama Adımları.....	26
3.1.1 Yük (talep) modeli	27
3.1.2 PV sistem modeli	28
3.1.3 Enerji depolama sistem modeli	30
3.1.4 Simülasyon programı	33
3.2 Metodoloji	34
3.2.1 AGDŞ'de PV sistem gerilim etkisi	34
3.2.2 Güç akışı çözüm türleri	35
3.2.3 Güç akışı denklemleri	38
3.2.4 Gerilim ölçüm yöntemi	40
3.2.5 Pil enerji depolama kontrol yöntemleri.....	42
4 BULGULAR VE TARTIŞMA.....	45
4.1 Durum Çalışması 1	46

4.1.1	Senaryo 1: 13,5 kWh/1 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi.....	46
4.1.2	Senaryo 2: 13,5 kWh/2 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi.....	48
4.1.3	Senaryo 3: 13,5 kWh/3 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi.....	48
4.1.4	Senaryo 4: 13,5 kWh/5 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi.....	49
4.1.5	Senaryo 5: Farklı bir <i>Depolama Yük Şekli</i> ile 13,5 kWh/5 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi.....	50
4.1.6	Senaryo 6: 27 kWh/3 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi.....	51
4.1.7	Senaryo 7: 27 kWh/6 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi.....	52
4.1.8	Senaryo 8: Farklı bir <i>Depolama Yük Şekli</i> ile 27 kWh/6 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi	54
4.2	Durum Çalışması 2	55
4.2.1	Senaryo 9: 13,5 kWh/1,8 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi (<i>Merkezi kontrol/Mod 1</i>)	55
4.2.2	Senaryo 10: 13,5 kWh/3 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi (<i>Merkezi kontrol/Mod 1</i>)	57
4.2.3	Senaryo 11: 13,5 kWh/3 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi (<i>Merkezi kontrol/Mod 2</i>)	58
4.2.4	Senaryo 12: 27 kWh/3 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi (<i>Merkezi kontrol/Mod 2</i>)	60
5	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	62
5.1	Sonuçlar.....	62
5.2	Öneriler.....	65
5.3	Gelecekteki Çalışmalar	66
6	KAYNAKLAR	67
	ÖZGEÇMİŞ.....	72

TABLÖLAR LİSTESİ

Sayfa

Tablo 1.1. Akıllı şebekelerin karakteristik özellikleri.....	4
Tablo 1.2. Enerji depolama uygulamalarına ait öz açıklamalar.....	11
Tablo 1.3. Enerji depolama teknolojileri	12
Tablo 1.4. Teknik yönden farklı tip akülerin/pillerin karşılaştırılması	14
Tablo 3.1. PV sistem modelinde güç, sıcaklık ve verim arasındaki ilişki	29
Tablo 3.2. Tesla Powerwall 2'ye ait teknik özellikler	33
Tablo 3.3. Güç akışı çözüm türlerinin karşılaştırılması	36



ŞEKİLLER LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Ev tipi şebeke bağlantılı ve enerji depolamalı bir PV sistemin temel şeması.....	6
Şekil 1.2. PV hücre yapısına göre Türkiye’de yıllık bazda ortalama enerji üretimi (kWh-Yıl/m ²)	7
Şekil 1.3. Enerji depolamanın kullanıldığı bazı temel uygulamalar	10
Şekil 1.4. Süper iletken ve Süper kapasitörün birlikte kullanıldığı bir EDS.....	12
Şekil 1.5. Vanadyum Redoks akış bataryası (a) şarj, (b) deşarj.....	13
Şekil 1.6. Yıllara göre enerji depolamanın kurulumu ve gelişimi	15
Şekil 3.1. Çalışmada baz alınan radyal AGDŞ bağlantı şeması.....	26
Şekil 3.2. Mesken müşterilerine ait 1 günlük talep eğrisi.....	27
Şekil 3.3. PV sistemde sıcaklığa bağlı pu cinsinden güç çıkışı	29
Şekil 3.4. PV sistem ortalama çıkış gücünün gün içerisindeki değişimi	29
Şekil 3.5. PV ve talep eğrilerinin karşılaştırılması (PEDS şarj/deşarj grafiği)	30
Şekil 3.6. Tesla Powerwall 2 PEDS modeli ve tek hat bağlantı şeması	31
Şekil 3.7. Tesla Powerwall 2 ve diğer sistem bileşenleri.....	32
Şekil 3.8. Genel bir AG hattı tek hat şeması	35
Şekil 3.9. Temel güç akışı çözüm türleri şeması.....	35
Şekil 3.10. 2 fazlı birleşik empedans (Z) ve İlkel Y matrisi	37
Şekil 3.11. İlkel Y matris modeli	37
Şekil 3.12. Normal çözüm (yinelemeli güç akışı) işlem döngüsü	38
Şekil 3.13. Merkezi depolama kontrol modeli	43
Şekil 4.1. PV sistemin gerilim üzerine etkisi	45
Şekil 4.2. Senaryo 1 gerilim profilleri.....	47
Şekil 4.3. Senaryo 2 gerilim profilleri.....	48
Şekil 4.4. Senaryo 3 gerilim profilleri.....	49
Şekil 4.5. Senaryo 4 gerilim profilleri.....	50
Şekil 4.6. Senaryo 5 gerilim profilleri.....	51
Şekil 4.7. Senaryo 6 gerilim profilleri.....	52
Şekil 4.8. Senaryo 7 gerilim profilleri.....	53
Şekil 4.9. Senaryo 8 gerilim profilleri.....	54
Şekil 4.10. Senaryo 9 PEDS 5, günlük şarj durumu ve giriş/çıkış gücü	56
Şekil 4.11. Senaryo 9 gerilim profilleri.....	57
Şekil 4.12. Senaryo 10 PEDS 5, günlük şarj durumu ve giriş/çıkış gücü	58
Şekil 4.13. Senaryo 10 gerilim profilleri.....	58
Şekil 4.14. Senaryo 11 PEDS 5, günlük şarj durumu ve giriş/çıkış gücü	59
Şekil 4.15. Senaryo 11 gerilim profilleri.....	60
Şekil 4.16. Senaryo 12 PEDS 5, günlük şarj durumu ve giriş/çıkış gücü	61
Şekil 4.17. Senaryo 12 gerilim profilleri.....	61

KISALTMALAR VE SİMGELER LİSTESİ

<u>Kısaltma</u>	<u>Açıklama</u>
ABD	: Amerika Birleşik Devletleri
AC	: Alternatif Akım (Alternative Current)
AG	: Alçak Gerilim
AGDŞ	: Alçak Gerilim Dağıtım Şebekesi
ARIMA	: Otoresif Entegre Hareketli Ortalama (Autoregressive Integrated Moving Average)
BS	: İngiliz Standartları (British Standards)
DAO	: Dağıtım Ağı Operatörleri
DC	: Doğru Akım (Direct Current)
DoD	: Deşarj derinliği (Depth of Discharge)
DÜ	: Dağıtık Üretim
EDS	: Enerji Depolama Sistemleri
EPRI	: Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute)
GEPA	: Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası
GES	: Güneş Enerjisi Santralleri
IEA	: Uluslararası Enerji Ajansı (International Energy Agency)
Li-ion	: Lityum iyon
MPPT	: Maksimum Güç Noktası Takipçisi (Maximum Power Point Tracking)
NaS	: Sodyum Sülfür
NiCd	: Nikel Kadmiyum
NiMH	: Nikel Metal Hidrit
NSEB	: Net Sıfır Enerjili Bina
OG	: Orta Gerilim
OLTC	: Yük Altında Kademe Değiştirici (On-Load Tap Changer)
OpenDSS	: Açık Kaynak Dağıtım Sistemi Simülatörü (Open-source Distribution System Simulator)
PEDS	: Pil Enerji Depolama Sistemleri
PV	: Fotovoltaik (Photovoltaic)
PWM	: Darbe Genişlik Modülasyonu (Pulse-Width Modulation)
RES	: Rüzgâr Enerji Santrali
rms	: Etkin değer (root mean square)
SCADA	: Merkezi Denetim ve Veri Toplama (Supervisory Control and Data Acquisition)
SoC	: Şarj durumu (State of Charge)
UK	: Birleşik Krallık (United Kingdom)
WAN	: Geniş Alan Ağı (Wide Area Network)
YG	: Yüksek Gerilim

<u>Simge</u>	<u>Açıklama</u>
A	: Amper
°C	: Santigrat derece (degree celsius)
GW	: Gigawatt
GWh	: Gigawatt saat
I	: Akım
I_{enj}	: Enjeksiyon akımları
kV	: Kilovolt
kVA	: Kilovoltamper
kW	: Kilowatt
kWh	: Kilowatt saat (Kilowatt hour)
kWp	: Kilowatt zirve (Kilowatt peak)
MW	: Megawatt
MWh	: Megawatt saat
η_{inv}	: İnverter verimi
P	: Aktif güç
P_{PV}	: PV tarafından şebekeye enjekte edilen aktif güç
pu	: Birim değer (per unit)
Q	: Reaktif güç
U_n	: Nominal gerilim (faz-nötr arası)
V	: Volt
V_d	: Düşüm gerilimi
V_s	: Kaynak gerilimi
Wh	: Watt saat
Wh/kg	: Kütle bazında enerji yoğunluğu
Wh/l	: Hacim bazında enerji yoğunluğu
Y_{ilkel}	: İlkel admitans
Y_{sistem}	: Sistem admitansı
Z	: Empedans

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ALÇAK GERİLİM HATLARINDA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİNİN KULLANIMININ PV SİSTEM ENTEGRESİNDEN KAYNAKLI GERİLİM ARTIŞINA ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Sabri ÇİFTÇİ

**Siirt Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman : Dr. Muhammed Sait AYDIN

2021, 73+XI Sayfa

Yenilenebilir enerjinin bir türü olan güneş enerjisinden yararlanma eğilimi gün geçtikçe artmakta ve buna paralel olarak çatı üstü Fotovoltaik (PV) sistemlerin kurulumu da yaygınlaşmaktadır. Ürettiği enerjiyi satmak isteyen konut müşterilerinin sayısı arttıkça Alçak Gerilim (AG) hattı üzerinde ters yönde güç akışlarının (tüketici bağlantı noktalarından dağıtım transformatörüne doğru) meydana gelme olasılığı da artmaktadır. Bu ters güç akışlarının neden olduğu temel problemlerden biri AG hattı üzerinde gerçekleşen gerilim artışlarıdır. Yoğun güneş ışınlamına bağlı olarak gerçekleşen yüksek enerji üretimi ile düşük enerji talebinin çakıştığı zaman dilimlerinde AG hattına yüksek miktarda enerji enjekte edileceğinden tüketici bağlantı noktalarında gerilim artışları gerçekleşecektir. Diğer bir ifade ile AG hattı üzerinde meydana gelen gerilim artışlarının asıl nedeni ters yönde akan PV kaynaklı yüksek hat akımları ve hat direnci (R)'dir.

Dolayısıyla bu tez çalışmasında Pil Enerji Depolama Sistemleri (PEDS)'nin ağ üzerinde gerçekleşen bu gerilim artışlarına karşı nasıl yarar sağlayabileceği test edilmiştir. 12 farklı senaryo üretilerek (her bir senaryoda pil kapasitesi veya pil gücü değiştirilerek) ve iki farklı depolama kontrol yöntemi kullanılarak (yerel ve merkezi kontrol) yapılan test işleminde, PEDS'in ne derece etkili olabileceği gözlemlenmiştir. Test işlemi, gerçek verileri dikkate alan bir güç akışı analiz programı olan OpenDSS üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ayrıca PEDS için, gerçek hayatta kullanılan ve Lityum-İyon teknolojisine sahip Tesla Powerwall 2'nin özellikleri baz alınmıştır.

Sonuçlar, PEDS'in gerilim artışlarını önlemede başarılı olduğunu göstermektedir. Pil kapasitesinin (kWh) artırılmasıyla (1 adet Tesla Powerwall 2'nin kullanılmasına karşılık 2 adet kullanılması sonucu) gerilim artışlarının önemli ölçüde önlenildiği görülmüştür. Bununla beraber, depolama gücünün (kW) kısıtlanması, yüksek enerji üretim zaman dilimlerinde AG ağına daha fazla enerji enjekte edilmesine neden olmaktadır. Öte yandan, yüksek depolama gücü ise pilin erken şarj olmasına ve erkenden pasif duruma geçmesine neden olmaktadır. Dahası, bu tezde kullanılan yük ve PV modeli dikkate alındığında, kontrol yöntemi değiştirilerek (merkezi kontrol yaklaşımı kullanılarak) 1 adet Tesla Powerwall 2'nin kullanılmasıyla da gerilim artışlarının büyük oranda önlenildiği görülmüştür.

Diğer çalışmalardan farklı olarak bu çalışmada; gelecekte yaşanabilecek gerilim problemlerinin ve müşterilerin maruz kalabileceği bazı mağduriyetlerin (PV kısıtlaması gibi durumlar yatırımcıyı mağdur edebilir) şimdiden önlenmesi adına mevzuatta izin verilen çatı üstü lisanssız enerji üretimi için belirlenen üst sınır gücünün yeniden gözden geçirilmesi gerektiği, PV sistemle beraber konumlandırılacak PEDS'in güç değerinin PV sistem gücünü geçmemesi gerektiği, PEDS kapasitesiyle beraber PEDS şarj/deşarj gücünün de doğru seçilmesi gerektiği, çatı üstü PV sistemlerin ve sayaç arkası PEDS'lerin şebeke bağlantı koşullarının dikkate alınması gerektiği belirtilmektedir.

Anahtar Kelimeler: AG şebekeleri, Enerji depolama, Güneş enerjisi, PV sistemler, Tesla Powerwall

ABSTRACT

MS THESIS

INVESTIGATION OF THE IMPACTS OF THE ADOPTION OF ENERGY STORAGE SYSTEMS ON VOLTAGE RISE RESULTING FROM PV SYSTEMS INTEGRATIONS ON LOW VOLTAGE NETWORKS

Sabri ÇİFTÇİ

**The Graduate School of Natural and Applied Science of Siirt University
The Degree of Master of Science
In Electrical-Electronics Engineering**

Supervisor : Dr. Muhammed Sait AYDIN

2021, 73+XI Pages

Leveraging sunlight for electricity, which is a sort of renewable energy, has been increasing for the last decades, in turn, the adoption of rooftop Photovoltaic (PV) systems has been becoming widespread. Whilst the number of householders who want to sell the energy they produce rises, it is highly likely that reverse power flow (i.e., conventionally from end-users to the secondary transformers) on the LV network increases. One of the leading problems posed by reverse power flows is voltage rise. In other words, when increased energy generation due to high solar radiation coincides with low energy demand, voltage rise will occur on the network/householder level, as a significant volume of energy will be delivered back into the LV networks. In other words, the actual reason why voltage rise occurs on LV networks resulting from reverse power flow (i.e., from PV systems) and line resistors.

Therefore, in this thesis, as to how benefits from Battery Energy Storage Systems (BES) will be offered to lower voltage rise on the network is tested. The effectiveness of BES is tested through 12 different scenarios (by changing the battery capacity or battery power in each scenario) and two different storage control methods (local and central control) so as to observe how far BES could be in effect. The test is carried out by using OpenDSS, a power flow analysis program that regards real data. Furthermore, for BES, the features of Tesla Powerwall 2, which is used in real life and is of Lithium-Ion technology, are considered.

The results show that BES successfully prevents voltage rise. It is observed that voltage rise can be significantly prevented by increasing the battery capacity (kWh) (instead of using 2 Tesla Powerwall 2 versus using 1 unit).

However, the limitation of storage power (kW) results in more energy being delivered back into the LV network during high energy generation time periods.

On the other hand, high storage power brings about the battery to charge rapidly and become passive early. Moreover, considering the load and PV model used in this thesis, it is observed that voltage rise can be largely prevented by using 1 Tesla Powerwall 2 by altering the control method (i.e., using the central control approach).

Unlike other studies, this study highlights the need for reviewing the upper limit power determined for rooftop unlicensed energy production allowed in the legislation in order to prevent voltage problems that may occur in the future and some grievances that customers may be exposed to (such as PV restrictions may make the investor suffer). Furthermore, it suggests that the power value of the BES in place should not exceed the corresponding PV system capacity. This indicates that the BES capacity should be chosen appropriately together with the BES charge/discharge power. Consequently, the conditions of grid connection the rooftop PV systems and BES behind the meter should be considered.

Keywords: LV networks, Energy storage, Solar energy, PV systems, Tesla Powerwall

1 GİRİŞ

Geleneksel yöntemlerle fosil kaynaklardan elektrik enerjisinin üretimi devam etmekte ve diğer yandan bu kaynakların yoğun kullanımı sonucu artan karbon salınımının çevre üzerindeki olumsuz etkisi sürmektedir. Bununla beraber bu kaynakların yakın gelecekte tükenme riski taşıması enerji arz güvenliği ve sürdürülebilirlik açısından tehlike arz etmektedir. Bu durum geçmiş yıllarda ön görüldüğünden daha sürdürülebilir olan yenilenebilir enerji kaynakları üzerinde çalışmalar yoğunlaşmıştır (Ergin, 2020; Ömeroğlu, 2020).

Yenilenebilir enerji teknolojilerine yönelik yatırımlar, bu alanda gerçekleştirilen Ar-Ge çalışmaları, devletlerin enerji politikalarındaki değişiklikler, devlet teşvikleri ve artan talep sonucu düşüşe geçen maliyetler bu teknolojilerin kullanımını daha popüler hale getirmektedir. Dünyadaki bu gelişmeleri yakından takip eden Türkiye, enerji konusunda dışa bağımlılığı azaltma amacıyla yenilenebilir enerji alanına destek verici politikalar izlemektedir (Akdoğan, 2018; Erdoğan, 2020).

Türkiye’de 2019’da yenilenebilir enerjinin toplam üretim içindeki payının %43,88 ve toplam üretimin 133.379 GWh olduğu saptanmıştır. Yenilenebilir kaynaklar içerisinde yer alan güneş enerjisinden ise 2019 yılı içerisinde toplam 9.250 GWh enerji üretimi gerçekleşmiştir (TEİAŞ, 2021).

Güneş ışıınımı bakımından zengin olan Türkiye, 4,18 kWh/m²-gün güneş ışıınımı ortalaması ve 7,5 saat ortalama günlük güneşlenme süresi ile Avrupa ülkeleri arasında ön sıralarda yer almaktadır (Aksangör, 2019). Bu durumun bir avantaj olarak görülmesi sonucu güneş enerjisinden yararlanma eğilimi giderek artmaktadır. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü (EİGM)’nün yayınlamış olduğu 2019-2023 stratejik eylem planı kapsamında 2023 yılı güneş enerjisine dayalı elektrik enerjisi kurulu gücünün 10 GW olması hedeflenmektedir (EİGM, 2021).

Yerli fotovoltaik (PV) hücre üretiminin yaygınlaşması ile birlikte ülke içerisinde PV sistem tesislerinin artması da ön görülmektedir. PV sistemler Güneş Enerjisi Santralleri (GES) gibi büyük düzeyde boyutlandırılabilirdiği gibi bir evin enerji ihtiyacını karşılayabilecek şekilde küçük düzeyde de (örneğin çatı üstü PV sistemler) boyutlandırılabilir. Bu tür uygulamalar (özellikle çatı üstü PV sistem uygulamaları) yukarıda belirtilen bazı avantajlar (PV hücre maliyetlerindeki düşüş, güneş ışıınımı bakımından ülkenin zengin olması ve yenilenebilir enerji alanında yapılan teşvikler gibi) sebebiyle giderek yaygınlaşmaktadır. Özellikle 10 kWp değerine kadar olan çatı üstü PV sistem uygulamaları lisanssız enerji üretimi kapsamında değerlendirildiğinden bu durum

Alçak Gerilim (AG) dağıtım ağına bağlı küçük tüketicilere bir fırsat sunmaktadır. Bir Alçak Gerilim Dağıtım Şebekesi (AGDŞ)'ne bağlı bir PV sistem için yatırımın geri kazanım süresi olan amortisman süresinin ortalama 5 yıl dolaylarında olması yatırımcıyı bu alana teşvik etmektedir (Çiftçi ve ark. 2020). Bu türdeki PV tesisler (AGDŞ'ye bağlanan çatı üstü veya ev tipi PV sistemler) yüksek enerji üretimi ve düşük enerji tüketiminin çakıştığı zaman dilimlerinde şebekeye enerji enjekte edebilir. Bunun sonucunda bu tesisler şebekeye güç ve voltaj desteği sağlayabilir. Çatı üstü PV sisteme sahip ve ürettiği enerjiyi şebekeye satan bir konut müşterisi açısından bakıldığında konut müşterisi ayrıca üretici vasfını da kazanarak bir mali kazanç elde edebilir.

- Ancak bu uygulamaların yaygınlaşması ile birlikte yüksek PV enerji üretimi ve düşük enerji tüketiminin gerçekleştiği zaman dilimlerinde (özellikle öğle saatlerinde) şebekeye güç enjekte edileceğinden ters yönde (tüketim noktalarından trafo merkezine doğru) güç akışlarının gerçekleştiği literatürde sıkça belirtilmektedir (Karadeniz, 2019; Turna, 2019).

Bununla beraber AGDŞ'ye PV sistem penetrasyonu arttıkça AG hattı üzerinde ters güç akışları sebebiyle gerilim yükselmeleri gibi yeni sorunların meydana geldiği yine birçok çalışmada (Bucciarelli ve ark., 2016; Johnson ve ark., 2018/c) belirtilmiştir.

- PV sistem penetrasyonundan kaynaklı bu ters güç akışları ve gerilim yükselmesi sorunlarına çözüm olarak Enerji Depolama Sistemleri (EDS) kullanılabilir. Düşük talep ve yüksek PV enerji üretiminin kesiştiği zaman dilimlerinde depolanan enerji zaman kayması yoluyla yüksek talep zamanlarında tüketicinin kullanımına sunulur (Jenkins, 2012). Dolayısıyla bu çözüm AGDŞ üzerindeki yükün azaltılmasına yardımcı olabilir.

Dağıtım Ağı Operatörleri (DAO) açısından bu durum (tüketicinin PV sistemle beraber depolama sistemlerine sahip olması durumu) bir avantaj iken, PV sisteme ek olarak depolama elemanlarının kullanımı toplam maliyeti arttırdığından tüketici açısından bir dezavantaj oluşturur. Bu nedenle birçok tüketici (özellikle konut müşterileri) bu ek maliyetten kaçınmak için depolama elemanlarını tercih etmemektedir. Fakat Devlet teşvikleri ile beraber DAO'nun bu ek maliyeti kısmen karşılaması bir fayda sağlayabilir. DAO'nun müşteriye ait sayaç arkası Pil Enerji Depolama Sistemleri (PEDS)'ni devralması ve kontrol etmesi bir alternatif olarak görülebilir. Bu yol ile AGDŞ üzerindeki enerji tıkanıklıkları giderilebilir ve PV kaynaklı gerilim artışları azaltılabilir.

- Ancak Johnson ve ark. (2018/a) yaptıkları çalışmada bu tür bir yöntemin kullanımının geleneksel yeniden yapılandırma ile ekonomik olarak henüz rekabet edemeyeceğini belirtmişlerdir.

Mevcut durumda PEDS'in kullanımı dağıtım hattının yeniden yapılandırılmasına göre daha maliyetli görünse de elektrikli araçların giderek yaygınlaşması, batarya teknolojilerine yapılan yatırımlar ve batarya üretimindeki artış batarya birim maliyetlerinin düşüşünü hızlandırmaktadır.

- Farklı etkenler sonucu batarya maliyetlerinin düşmesi yakın bir gelecekte PEDS'in kullanımını daha cazip hale getirebileceği öngörülmektedir.

Gelecekte şebeke üzerindeki bu ters güç akışı sorununun çözümünde etkin rol oynayacak ve enerji yönetimine katkı sağlayacak olan Akıllı Şebekeler konusuna ve yukarıda adı geçen PV Sistemler ile Enerji Depolama Sistemleri'ne (Enerji depolama uygulamaları, Enerji depolama teknolojileri ve bu alandaki yeni trendler) aşağıda özetle değinilmiştir. Ayrıca aşağıda değinilecek olan bu genel bilgilerin ardından literatürde yer alan benzer çalışmalar “Literatür Araştırması”, çalışmanın metodolojisi “Materyal ve Metot” ve metodolojinin uygulanması ile elde edilen sonuçlar ise “Bulgular ve Tartışma” başlığı altında verilmiş, sonuçların genel olarak değerlendirilmesi ise “Sonuç ve Öneriler” başlığı altında yapılmıştır.

1.1 Akıllı Şebekeler

Geleneksel elektrik şebekelerinde güç akışı büyük enerji üretim merkezlerinden tüketim merkezlerine doğru tek yönlü olarak gerçekleşmektedir. Dijital dönüşümle beraber enerji talebinin de artması daha çok enerji üretim santralının kurulmasını gerektirmektedir. Oysaki pik yüklerin karşılanması hususunda sadece merkezi santrallerin kullanıldığı mevcut geleneksel şebeke modelinde şebekeyi yönetmek giderek daha da zor hale gelmektedir. Arz talep dengesini sağlamak amacıyla merkezi santral ölçeğinde sürekli rezerv bulunduran mevcut enerji şebekesi, enerji maliyetlerinin düşmesi ve çevre kirliliği önünde bir engel teşkil etmektedir. Bu sorun yenilenebilir kaynakların daha da hızlı gelişmesine katkı sağlamıştır.

Yenilenebilir kaynaklardan enerji üretiminin yaygınlaşmasıyla birlikte özellikle AG dağıtım şebekesinde yenilenebilir mikro tesislerin sayısının artması dağıtık üretim kavramını ortaya çıkarmıştır. Dağıtık Üretim (DÜ)'le beraber şebeke üzerinde ters yönlü güç akışı sorunlarının görülmesi daha kontrol edilebilir bir şebeke ihtiyacını doğurmuştur. Enerjiyi daha verimli kullanmak, günümüz gelişmiş ölçüm teknolojilerinden ve diğer yeni teknolojilerden daha iyi yararlanmak ve bu teknolojileri mevcut şebekelere uyarlayarak ortaya çıkan yeni problemlere karşı önlem almak amacıyla akıllı şebeke modeli üzerinde araştırmalar yoğunlaşmıştır. Akıllı şebekeye birçok farklı tanım

getirilmiş olsa da bazı tanımların ortak yanları ve akıllı şebekelerin karakteristik özelliklerinin ne olması gerektiği özetle Tablo 1.1’de verilmiştir (Jenkins ve ark., 2012; Çakmak, 2018).

Tablo 1.1. Akıllı şebekelerin karakteristik özellikleri

Özellik	Açıklama
Dayanıklılık ve Güvenlik	Fiziksel veya siber saldırılara karşı dayanıklı ve korunaklı olmalıdır.
Gözlemlenebilirlik ve Kontrol edilebilirlik	Merkezi ve yerel düzeyde gözlenebilmeli (ölçülebilmeli) ve kontrol edilebilmeli, tüketici ve üretici arasında çift yönlü bir haberleşme sağlayabilmelidir.
Verimlilik	Arz talep dengesini sağlamalı ve iyi bir enerji yönetimi gerçekleştirerek verimliliği sağlamalıdır.
Kendi kendini iyileştirme	Gelişmiş ölçüm enstrümanları ile arızalar hızlı tespit edilmeli ve onarılabilmelidir.
Güç kalitesi ve Sürdürülebilirlik	Alternatif enerji kaynaklarını ve EDS’yi kullanarak enerji kesintilerini önlemelidir. Şebeke gerilimini ve frekansını standart aralıklarda tutabilmelidir.
Güvenirlilik	Minimum hata ile tutarlı ve kararlı bir yapıya sahip olmalıdır.
Esneklik	Yenilenebilir kaynakların, elektrikli araçların ve EDS’nin şebekeye entegre edilmesinde kolaylık sunmalıdır.
Mahremiyet	Üretici ve tüketiciye ait özel verileri gizli tutmalıdır.

Akıllı şebekenin bir diğer gelişimi ise müşterilerle iki yönlü iletişim kurmak ve şebekeyi üst düzeyde kontrol edebilmek amacıyla iletişimi yaygınlaştırmaktır. Akıllı şebekede, Merkezi Denetim ve Veri Toplama (SCADA) ile Geniş Alan Ağı (WAN) gibi iki iletişim altyapısının gelecekte birleşmesi beklenmektedir (Jenkins ve ark., 2012). Ayrıca akıllı şebeke modelinin gelişimine katkı sağlayan, geleneksel şebeke modelinde yönetilmesi zor olan ve bu tezde kullanılan bazı teknolojilere aşağıda (başlık 1.2 ve 1.3) değinilmiştir.

1.2 PV Sistemler

PV sistemler (solar sistemler) temel olarak PV dizilerinden ve güç koşullandırma elemanları olan eviricilerden (inverter) oluşur. Sistemde enerji depolama birimleri olan akülerin kullanımı durumunda sisteme ek olarak akü şarj cihazları kullanılır. PV sistemler bağlantı tipine göre şebeke bağlantısız veya şebeke bağlantılı olarak tasarlanabilir.

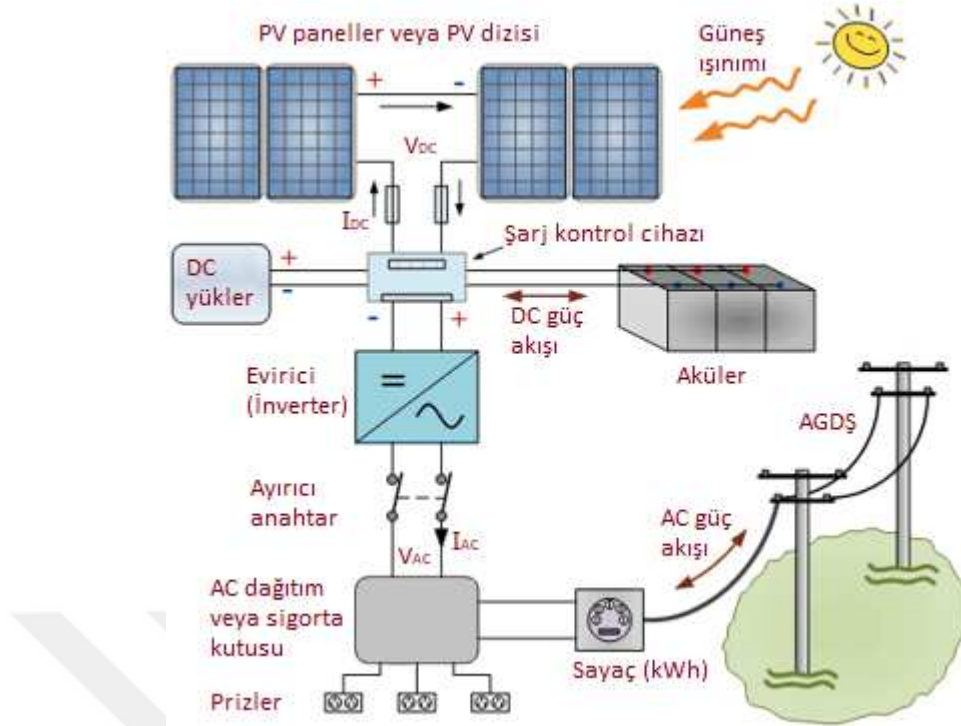
Şebeke bağlantısız modeller genellikle AGDŞ’nin olmadığı yerlerde temel enerji ihtiyacının karşılanması amacıyla tercih edilmektedir. Güneş yokluğunda enerjiye ihtiyaç

duyulması halinde enerji depolama birimlerinin kullanımı bu tür modellerde zorunlu hale gelmektedir.

Şebeke bağlantılı modellerde ise PV sistemler farklı boyutlarda ve farklı şebeke düzeylerine (Alçak, Orta veya Yüksek Gerilim) bağlanacak şekilde tasarlanabilir. Büyük boyutlarda tasarlanan PV sistemler Orta Gerilim (OG) ve Yüksek Gerilim (YG) şebekelerine güç ve enerji desteği sağlar. Bu tür santrallerle birlikte kullanılan depolama sistemlerinin amacı ise genellikle yenilenebilir enerjinin değişken çıktısını telafi etmek ve yüksek talep zamanlarında şebekeye rezerv desteği sağlamaktır.

Ülkemizde AGDŞ bağlantılı modellerde genellikle enerji depolama kullanılmaz. İhtiyaç fazlası enerji doğrudan AGDŞ'ye aktarılır (Bahar, 2019; İşler, 2020). Ancak, DÜ'nün yaygınlaşması ile birlikte şebeke üzerinde ters güç akışı ve gerilim dalgalanmaları gibi yeni problemlerin ortaya çıkması (Turna, 2019), enerji depolama sistemlerinin kullanımını bu tür sistemlerde de (AGDŞ bağlantılı çatı üstü veya ev tipi) zorunlu hale getirebilir (Başlık 1.3'te depolama sistemlerinin gerekliliği hakkında daha detaylı bilgi verilmiştir).

Şekil 1.1 (Amrr, 2016)'de enerji depolamaya sahip, ev veya çatı üstü tipi AG şebeke bağlantılı bir PV sistemin genel bağlantı şeması verilmiştir. Güneş ışınımını oluşturan fotonların PV dizi yüzeyine çarpması sonucu PV dizi çıkışında Doğru Akım (DC) elektrik enerjisi elde edilir. Bu enerji DC ile çalışan yükler tarafından doğrudan kullanılabilir ya da akülerde depolanabilir. Akülerin kontrollü şarjı için bir şarj kontrol cihazının kullanımı gereklidir. Ev içerisinde bulunan diğer Alternatif Akım (AC) yükleri için veya üretilen enerjinin şebekeye enjekte edilmesi için DC elektrik enerjisini AC elektrik enerjisine dönüştüren bir inverterin kullanımı ise zorunludur. Çift yönlü bir sayaç kullanılarak şebekeden çekilen ve şebekeye enjekte edilen enerjinin miktarı ölçülerek gerekli faturalandırma işlemleri yapılabilir (enerji depolamalı bir sistemin çalışmasına ait detaylı bir açıklamaya başlık 3.1.3'te yer verilmiştir).



Şekil 1.1. Ev tipi şebeke bağlantılı ve enerji depolamalı bir PV sistemin temel şeması

PV sistemlerin bileşenleri olan PV hücreler, inverterler, enerji depolama birimleri olan aküler/piller ve şarj kontrol cihazları aşağıda sırasıyla ayrıntılı şekilde incelenmiştir.

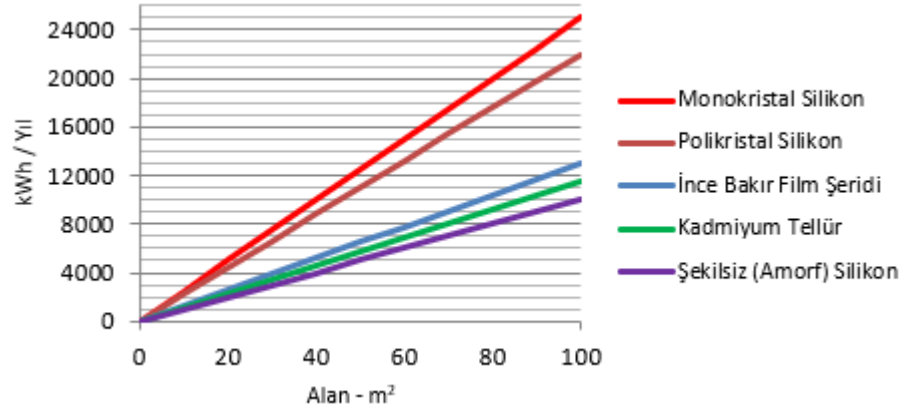
1.2.1 PV hücreler

PV sistemlerin temel elemanı, güneş enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren fotovoltaiik hücrelerdir. Bu hücreler yarıiletken maddelerden imal edilir. Uygulamada en çok kullanılan yarıiletken maddelerden biri silisyumdur. PV hücrelerin bir araya getirilmesiyle PV paneller elde edilirken, PV panellerin bir araya getirilmesiyle de PV dizileri elde edilir. Dizi çıkış akımı DC'dir. Yüksek çıkış geriliminin istendiği durumlarda PV panelleri birbirlerine seri bağlanırken, yüksek çıkış akımının istenmesi durumunda ise PV paneller birbirlerine paralel bağlanır (Çarkıt, 2017).

PV hücrelerin verimliliği kullandıkları malzemeye göre değişiklik göstermektedir. Uygulamada fiyat/performans açısından sıklıkla kullanılan hücre yapılarından biri polikristalin hücrelerdir (Aksangör, 2019).

Şekil 1.2 (GEPA, 2021)'de yapılarına göre PV hücrelerden Türkiye şartlarında kWh/m² bazında elde edilen yıllık toplam ortalama enerji üretimi gösterilmektedir. Monokristalin yapıli hücrelerin verimlerinin diğeri tip hücrelerden daha yüksek olduğu grafikten anlaşılmaktadır. Verimleri yaklaşık %20-23 arasında değışen ve her geçen gün

daha da geliştirilen monokristalin yapılı PV hücrelerin kullanımı da giderek yaygınlaşmaktadır.



Şekil 1.2. PV hücre yapısına göre Türkiye’de yıllık bazda ortalama enerji üretimi (kWh-Yıl/m²)

PV hücrelerin çıkışında elde edilen akım DC olduğundan, AC ile çalışan diğer elektrikli cihazlar için doğru akımın alternatif akıma dönüştürülmesi gerekir. Sistem içerisinde bu görevi üstlenen diğer bir eleman ise inverterdir.

1.2.2 İnverterler

İnverterler DC elektrik enerjisini AC elektrik enerjisine dönüştüren temel güç elektroniği elemanlarıdır. Şebeke bağlantılı PV sistemlerde inverter çıkış akımının sinüsoidal dalga yapısına çok yakın olması gerekmektedir. Aksi durumda PV sistemin şebekeye bağlantısı teknik açıdan uygun değildir. Ayrıca maksimum güç çıkışı için bu inverterlerin Maksimum Güç Noktası Takibi (MPPT) özellikte olması PV sistem verimi açısından önem arz etmektedir (Devlet, 2017).

Farklı boyut ve güçlerde 1 veya 3 fazlı olarak üretilen inverterlerin verimleri, girişlerine uygulanan güce bağlı olarak değişkenlik gösterir. Diğer bir ifade ile inverter, maksimum güçte maksimum verimle çalışır. Bu tez çalışmasında baz alınan inverterin verimine başlık 3.1.2’de değinilmiştir.

İnverter giriş gücünün daha kararlı olmasına katkı sağlayan ve PV sistemin değişken çıktısını telafi eden diğer bir sistem bileşeni ise enerji depolama birimleri olan aküler veya pillerdir.

1.2.3 Enerji depolama birimleri

Elektrik enerjisini kimyasal formda depolayan ve gerektiğinde tüketicinin kullanımına sunan aküler veya piller, elektrikli araçlar ve ev tipi solar sistemler

(depolama birimi içeren ev tipi solar sistemler) için enerji depolama alanında oldukça önemli bir rol üstlenir. Farklı kimyasal yapılara sahip piller içerisinde ön plana çıkan Lityum-İyon (Li-ion) piller elektrikli araçlarda kullanılmaları sebebiyle baskın olarak yaygınlaşmaya devam etmektedir. Li-ion pillerin Deşarj Derinliği (DoD)'nin ve enerji yoğunluğunun yüksek olması gibi üstün teknik özellikleri nedeniyle yapılmakta olan yatırımlar sonucu maliyetlerindeki düşüş beklentisi bu teknolojilerin ev tipi solar sistemlerde etkin kullanılmasına büyük katkı sağlayabilir (Çarkıt, 2017; IEA, 2021).

Solar bir sistemde kullanılacak akünün veya pilin güvenli bir şekilde şarj olması için şarj kontrol cihazlarına ihtiyaç vardır.

1.2.4 Şarj kontrol cihazları

PV dizi çıkışındaki açık devre gerilimi güneş radyasyonuna ve bulutlanma etkisine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Doğrudan PV dizi çıkışına bağlanacak aküler farklı gerilim düzeylerinde ve kontrolsüz olarak şarj olma ihtimaliyle karşı karşıya bırakılmış olunacaktır. Yüksek risk içeren bu durum iş güvenliğine ve mevzuata aykırı olduğundan tercih edilmez. Akülerin uygun gerilim düzeyinde ve kontrollü olarak şarj edilmesi hem akülerin ömrü hem de güvenlik açısından önem arz eder. Bu amaçla bu işlevi yerine getiren şarj kontrol cihazları kullanılır.

Darbe Genişlik Modülasyonu (PWM) veya MPPT özellikli olarak imal edilen bu cihazlardan MPPT özellikli olanlar daha verimli görüldüğünden daha sık tercih edilir (Çelik, 2019).

Yukarıda “Akıllı Şebekeler” ve PV Sistemler” konularına özetle değinildi. Genel enerji sistemleri içerisinde önemli bir yere sahip olan diğer bir konu ise “Enerji Depolama” konusudur.

1.3 Enerji Depolama

Depolama, günlük hayatta çok sık kullanılan bir kavramdır. Depolama, herhangi bir ürünün veya bir varlığın bir miktarının daha sonraki bir zamanda kullanılmak üzere ayrılması veya uygun bir yerde tutulması işlemidir. Ürünün veya varlığın kaynağı zamana bağlı olarak kesintiye uğradığından farklı zamanlardaki ihtiyacın karşılanması ancak depolama ile mümkündür. Örneğin yağmur sularının doğal olarak yer altında veya yapay olarak barajlarda depolanması gibi. Benzer şekilde temel ihtiyaç olan enerjinin de depolanması yaşam kalitesi ve sürdürülebilirlik açısından oldukça önem arz eder. Yağmur sularının depolanması ve daha sonrasında depolanan bu suyun kullanılması uzun

zaman periyotlarını (aylar gibi) içerirken enerjinin depolanması ve kullanılması nispeten daha kısa zaman periyotlarını (günlük, saatlik veya daha kısa bir zaman gibi) içerir. Birçok amaç için enerji depolanabilir. Bu amaçlardan biri, elektrik şebekelerinin daha kararlı bir yapıya bürünmesine destek sağlamak olabilir.

Enerji depolama, elektrik dağıtım şebekesinin (AG ve OG) daha esnek (daha güvenilir, daha verimli ve daha kolay kontrol edilebilir) bir yapıya bürünmesinde etkin rol oynar (Sezen, 2020). Bu kapsamda akıllı şebeke modeline destek sağlar.

- Geleneksel AG şebeke modellerinde arz talep dengesinin sağlanabilmesi açısından yük kaydırma işlemleri gerçekleştirilirken müşterinin konforundan ödün verilmektedir. Bu hususta enerji depolama yük kaydırmaya alternatif olarak kullanılabilir. Talebin düşük ve PV enerji üretiminin yüksek olduğu zaman dilimlerinde depolanan enerji, talebin yüksek olduğu anlarda kullanılarak arz talep dengesi sağlanabilir. Bu durumun sonucunda ev tipi PV sisteme sahip ve AGDŞ'ye bağlı bir konut müşterisinin öz tüketiminin¹ doğal olarak artması beklenmektedir. Ayrıca bu ek uygulamanın (depolamanın kullanımı) “Net Sıfır Enerjili Bina” politikasına daha iyi hizmet etmesi öngörülmektedir.

Net Sıfır Enerjili Bina (NSEB) kavramı genel olarak yıl boyunca tükettiği enerjiyi yenilenebilir enerji (çoğunlukla PV sistemler) kaynaklarından sağlayan binalar olarak tanımlanmaktadır. Bu amaca hizmet eden PV sistemler bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedir. Örneğin bir PV sistemin bir AG şebekesine penetrasyonu sonucu,

- Yüksek üretim ve düşük talep zamanlarında (şebekeye enerji enjekte etmesi sonucu) şebeke gerilimini yükseltici yönde etki yapmasıdır (Aydın and Ochoa, 2015). Bu durumun, özellikle PV sisteme sahip konut müşterilerinin bağlı bulunduğu AG ağında gerçekleşme olasılığı daha yüksektir. PV sisteme sahip ticari müşteriler gün içerisinde (güneş ışınımının yoğun olduğu anlarda veya gün ortasında) üretilen enerjiyi tüketirken, konut müşterileri genellikle daha az tüketir. Bu nedenle bağlı bulunan besleyici gerilimini normal sınır değerleri arasında tutmak için bu arz fazlası enerjinin depo edilerek yüksek talep zamanında kullanılması oldukça fayda sağlar. Bu durumda hem şebeke (AGDŞ) geriliminin yükselmesinin önüne geçilebilir hem de yüksek talep durumlarında şebekeye kısmen güç ve voltaj desteği sağlanabilir.

¹ Burada değinilen “öz tüketim” kavramı, yerel olarak yani ilgili düğüm noktasında üretilen enerjinin aynı noktada tüketilmesini ifade eder. Bunun dışında farklı bir anlam içermez.

Enerji depolama konusunun önemi nedeniyle daha detaylı olarak aşağıda enerji depolama uygulamalarına, enerji depolama teknolojilerine ve enerji depolama alanındaki son gelişmelere değinilmiştir.

1.3.1 Enerji depolama uygulamaları

Enerji şebekelerinde birçok amaca hizmet etmesi için kullanılan enerji depolama sistemlerinin bazı uygulamaları günümüzde mevcuttur. Örneğin merkezi enerji santrallerinin şebekeye rezerv sağlaması hem maliyetlidir hem de bu santraller talepteki ani değişimlere karşı ancak gecikmeli bir süreyle cevap verebilmektedir.

- Genellikle rezerv için diğer santrallere göre daha hızlı devreye alınması nedeniyle doğalgaz çevrim santralleri kullanılmasına rağmen bu santraller yine de enerji depolama sistemleri kadar talebe hızlı cevap verememektedir.

Aşağıda (başlık 1.3.3'te) doğalgaz çevrim santralleri ile ortak konumlandırılan bazı EDS projelerine yer verilmiştir. Bu gibi uygulamaların temel amacının şebekeye rezerv ve güç desteği sağlamak olduğu söylenebilir. Bununla birlikte iletim şebekesinde frekans kontrolü için ve AG şebekesinde kısa süreli enerji kesintilerinin telafisi, gerilim kontrolü ve daha birçok farklı amaç için EDS kullanılabilir. Gerek YG, OG gerekse de AG şebekelerinde merkezi veya ağ üzerinde dağıtılmış olarak kullanılan enerji depolama uygulamalarının temel ve ortak işlevleri Şekil 1.3'te verilmiştir (Jenkins ve ark., 2012). Şekil 1.3'te belirtilen uygulamalar Tablo 1.2'de özetle ifade edilmiştir.



Şekil 1.3. Enerji depolamanın kullanıldığı bazı temel uygulamalar

Tablo 1.2. Enerji depolama uygulamalarına ait öz açıklamalar

Uygulamanın amacı	Açıklama
Güç kalitesi	Enerji depolama, voltaj dalgalanmalarını azaltarak güç kalitesini iyileştirebilir.
Gerilim desteği	EDS, ani yük değişimlerinin neden olduğu gerilim düşümü durumlarında devreye girerek şebekeye voltaj desteği sağlayabilir.
Son kullanıcı enerji yönetimi	Müşterinin sahip olduğu PV sistemle beraber kullanılan EDS, zaman kayması yoluyla tüketicinin enerji yönetimine destek sağlayabilir.
Rezerv	Depolama birimleri, ani bağlantı veya üretim kesilmesi gibi durumlarda deşarj edilerek şebeke sistem kararlılığının sağlanmasına destek olabilir.
Dağıtım devrelerinin kapasitesi	Enerjiye yönelik talebin artması dağıtım hatlarının değiştirilmesini gerektirebilir. Dağıtılmış enerji depolama, hat üzerindeki güç tıkanıklıklarını giderebilir ve hattın yeniden yapılandırılmasını geciktirebilir.
Elektrik enerjisi zaman kayması	Yüksek üretim ve düşük tüketim zamanlarında EDS’de depolanan enerji talebin yüksek olduğu zamanlarda kullanılabilir.
Yük takibi	Depolama elemanları, enerji talebinin hedef üst seviyenin üzerine çıkması durumunda deşarj ve alt seviyenin altına inmesi durumunda ise şarj edilerek enerji yönetimine katkı sağlayabilir.
Yenilenebilir üretime hizmet sunumu	EDS, bulut geçişleri veya rüzgâr hızının (özellikle OG ve YG’de) değişmesi gibi sebeplerle yenilenebilir enerjinin değişken çıktısını telafi etmek için kullanılabilir.

Burada enerji depolama uygulamalarının enerji şebekelerinde ne tür amaçlara hizmet ettiği ifade edilmeye çalışıldı. Ancak bu uygulamalar, bilinen ve geliştirilen bazı teknolojiler üzerinden gerçekleştirilebilmektedir. Aşağıda bu teknolojilerin ne olduğu belirtilmiştir.

1.3.2 Enerji depolama teknolojileri

Enerji; mekanik, elektrik, elektrokimyasal, kimyasal, termal gibi farklı yöntemler kullanılarak depolanabilir. Tablo 1.3’te bu yöntemlere dayalı olarak geliştirilen teknolojilerin bir kısmı özetle verilmiştir (Jenkins ve ark., 2012; Sezen, 2020).

Tablo 1.3. Enerji depolama teknolojileri

Yöntem	Teknoloji
Mekanik	• Volanlar (Flywheels)
Elektrik	• Süper İletken Manyetik Enerji Depolama Sistemleri (Superconducting magnetic energy storage systems) • Süper Kapasitörler (Supercapacitors)
Elektrokimyasal	• Akış aküsü (Flow battery) • Yakıt hücresi ve hidrojen elektroliz cihazı (Fuel cell and hydrogen electrolyser) • Piller (Batteries)

Hareketli bir yapıya sahip olan volanlar enerjiyi kinetik olarak içlerinde tutar ve gerektiğinde bu enerjiyi elektrik enerjisinin üretimi için serbest bırakır. Çok az sayıda kurulumu sahip bu teknoloji, maliyetli ve mekanik bir yapıya sahip olması nedeniyle elektrik enerjisi depolama alanında pek tercih edilmemektedir.

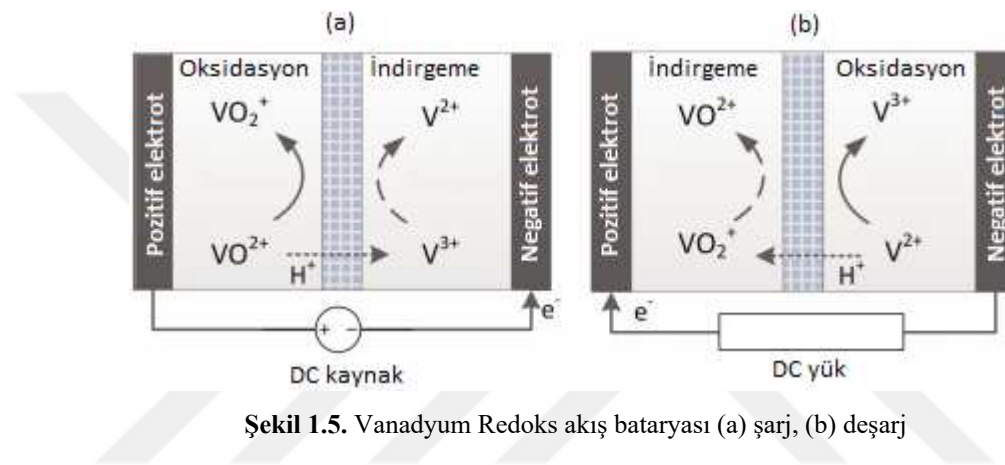
Süper iletkenlerde enerji manyetik alanda depolanır ve gerektiğinde bu enerji güç koşullandırma sistemi tarafından tekrar elektrik enerjisine dönüştürülür. Bu özelliklerini koruyabilmeleri için özel soğutma sistemleri içerisinde tutulurlar.

Süper kapasitörlerde ise enerji elektrostatik bir alanda depolanır. Bu iki uygulamanın (süper iletkenler ve süper kapasitörler) birlikte kullanıldığı bir tesis Şekil 1.4'te gösterilmektedir (Jenkins ve ark., 2012). Bu tür tesisler özellikle iletim şebekelerinde kompanzasyon görevi görmektedir. YG hatlarında gerilim kontrolü yüksek reaktans nedeniyle reaktif güç üzerinden (Volt/VAr) gerçekleştirildiğinden burada temel depolama elemanı olarak sisteme reaktif güç sağlayan süper iletkenler ve süper kapasitörler kullanılır.

**Şekil 1.4.** Süper iletken ve Süper kapasitörün birlikte kullanıldığı bir EDS

Elektrokimyasal formda ise enerji akış akülerinde, hidrojen yakıt hücrelerinde ve pillerde/akülerde depolanır.

Akış akülerinde iki elektrolit arasında bulunan bir membran üzerinden gerçekleşen iyon transferi ile pozitif ve negatif elektrotlar üzerinden güç elde edilir. Şekil 1.5 (Kim, 2019)'te bir vanadyum redoks akış bataryasının çalışma prensibi görülmektedir. Şekil 1.5 (a)'da pozitif ve negatif elektrotlar arasına bağlanan bir DC kaynak sonucu akü şarj olurken Şekil 1.5 (b)'de ise bağlanan yükün enerji tüketmesi sonucu akü deşarj olmaktadır. Akış akülerinde enerji kapasitesi kullanılan elektrolit sıvıların hacmine bağlıdır (Kim, 2019).



Şekil 1.5. Vanadyum Redoks akış bataryası (a) şarj, (b) deşarj

Yakıt hücrelerinde ana yakıt olarak hidrojen ve oksijen kullanılır. Tepkime sonucunda su ve elektrotlar arasında potansiyel fark oluşur. Elde edilen potansiyel fark güç koşullandırma elemanları üzerinden dönüştürülerek harici bir devrede kullanılır. Su ise elektroliz işleminde kullanılmak üzere depo edilir. Enerjinin depolanması gerektiği durumda elektroliz işlemi gerçekleştirilerek ihtiyaç duyulan hidrojen elde edilir ve daha sonra kullanılmak üzere tekrar depolanır.

Pratikte akış akülerinden ve hidrojen yakıt hücrelerinden daha çok tercih edilen diğer elektrokimyasal formda enerji depolayan elemanlar ise piller veya akülerdir. Büyük uygulamalar için Kurşun Asit ve Sodyum Sülfür (NaS) aküler ucuz olmaları sebebiyle tercih edilmektedir. Fakat bakım gerektirmeleri ve derin deşarj olmaları durumunda ömürlerinin kayda değer oranda düşmesi bir dezavantajdır. Daha küçük uygulamalar için Li-ion, Nikel Kadmiyum (NiCd) ve Nikel Metal Hidrit (NiMH) piller tercih edilmektedir (Jenkins ve ark., 2012; Sezen, 2020).

Tablo 1.4 (Sezen, 2020)'te bu pil teknolojilerinin teknik özellikleri verilmiştir. Tablo incelendiğinde Li-ion pillerin diğer pillere veya akülere göre daha fazla enerji

yoğunluğuna sahip olduğu, daha kısa sürede şarj/deşarj olabildiği, yüksek çevrim oranı ve yüksek yük akımına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca bakım gerektirmemeleri de bir diğer avantaj olarak değerlendirilebilir. Maliyetlerinin kısmen daha yüksek olması dezavantaj olarak değerlendirilse de Li-ion pillerin bu üstün özellikleri daha ağır basmakta ve her geçen gün bu piller daha çok kullanım alanı bulmaktadır. Elektrikli araçlarda, solar sistemlerde ve ev tipi enerji depolama sistemlerinde öncelikle tercih edilmeleri, gelecekte daha ucuza üretilmelerini sağlayabilir.

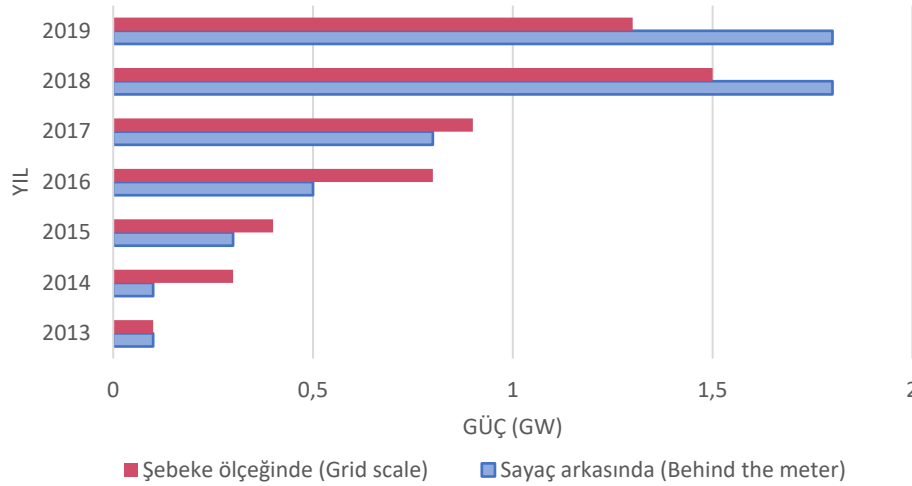
Tablo 1.4. Teknik yönden farklı tip akülerin/pillerin karşılaştırılması

Parametre	Kurşun-Asit	Nikel-Kadmiyum Hidrit	Nikel-Metal Hidrit	Lityum-İyon (sıvı)	Lityum-İyon (polimer jel)
Hücre Gerilimi (V)	2	1,2	1,2	3,6	3,6
Enerji/Ağırlık Yoğunluğu (Wh/kg)	35	50	80	125	170
Enerji/Hacim Yoğunluğu (Wh/l)	80	150	200	320	400
Şarj Süresi (Saat)	8h-16h	1h	2h-4h	1,5h-3h	1h
Yük Akımı	0,2 C	1 C	0,5 C	1 C	10 C
Bakım İhtiyacı	3-6 Ay	1-2 Ay	2-3 Ay	Gerekmiyor	Gerekmiyor
Çevrim Ömrü	500-800	1000	700-1000	5000	5000
Kendi Kendine Deşarj Değeri (%/Ay)	5	20	30	3	3
Üretim Maliyeti	En Düşük	Düşük	Orta	Yüksek	Orta

Bununla beraber Li-ion pil teknolojisinin, Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde büyük ölçekli pil depolaması bakımından 2018 yılı sonu verilerine göre kurulu gücün ve enerji kapasitesinin %90'ını oluşturduğu yerel kaynaklar tarafından (USEIA, 2020) belirtilmektedir. Ayrıca dünya genelinde Li-ion pil teknolojisinin kullanıldığı bazı projelere aşağıda yer verilmiştir.

1.3.3 Enerji depolama sistemlerinin benimsenmesindeki son gelişmeler

Uluslararası Enerji Ajansının (IEA) 2020 izleme raporuna göre dünya genelinde 2013-2019 yılları arasında enerji depolamanın gelişimi Şekil 1.6'da verilmiştir. Şebeke ölçeğinde ve sayaç arkası ölçeğinde enerji depolamanın 2018'de bir önceki yıla göre kurulumunun neredeyse iki katına çıkması dikkat çekmektedir. Ayrıca raporda 2019'daki gerilemenin ekonomik durgunluk gibi nedenlerden kaynaklandığı belirtilmiştir.



Şekil 1.6. Yıllara göre enerji depolamanın kurulumu ve gelişimi

Gerek enerji yönetimi için gerekse de enerjinin verimli kullanılması ve dolayısıyla buna bağlı olarak karbon salınımının azaltılması amacıyla olsun dünya genelinde bazı ülkeler enerji depolama kapasitesini artırıcı yönde adımlar atmaya devam etmektedir (Gorman ve ark., 2020; IEA, 2021).

- ABD, kamu kurumları için PV sistemlerle beraber ortak konumlandırılmış PEDS projelerini tercih etmeyi sürdürmektedir. 2020 yılı itibariyle 4,6 GW olan mevcut depolama kurulu gücüne (kamu hizmeti sağlayan), toplamı 14,7 GW güç değerine sahip acil uygulanma kapsamında olan projeleri eklemeyi planlamıştır. Ayrıca Virginia ve Nevada, uzun vadede 3,4 GW toplam kurulu güce ulaşmayı hedeflemişlerdir (Gorman ve ark., 2020; IEA, 2021).

- Hindistan, yenilenebilir enerji üretim tesislerinin kesintili ve kararsız olan üretimlerini EDS ile desteklemeyi amaçlamıştır. Bu amaçla 2019 yılında 1,2 GW güneş enerji santralinin kurulu gücünün yarısı oranında depolamayı zorunlu kılarak enerji depolama alanında yeni bir adım atmıştır (IEA, 2021).

- Singapur, 2025 yılı sonrası için 200 MW enerji depolama hedefi belirlemiştir (IEA, 2021).

- Japonya, öz tüketimi arttırmak amacıyla ev tipi PV sistem sahiplerine yaptığı desteği keserek (ihtiyaç fazlası enerjinin şebekeye satışı yönündeki teşvik primini 2019 yılından itibaren aşamalı olarak kaldırarak) yaklaşık 200 MW gücünde sayaç arkası PEDS kurulumunu sağlamıştır (IEA, 2021).

- Avrupa konseyi açıkladığı temiz enerji paketinde enerji depolamayı iletim, üretim ve yükten ayrı bir varlık olarak tanımlamıştır. Bu adımla depolamanın şarj ve deşarj sırasında çifte vergilendirilmesinin önünü kesmeyi hedeflemiştir (IEA, 2021).

- 2019 yılında 200 MW güç kapasitesi gerçekleştiren Avusturalya, sayaç arkası PEDS alanında önemli bir pazar olma yolunda ilerlemektedir (IEA, 2021).

Bununla beraber farklı şebeke ölçeklerinde (AG, YG) enerji depolama (özellikle pil) uygulamaları giderek yaygınlaşmaktadır (Gorman ve ark., 2020; Colthorpe, 2021).

- ABD California'daki AES Alamos doğalgaz kombine çevrim enerji santrali için kurulan 100 MW/400 MWh (sistem çıkış gücü/ pil depolama kapasitesi) Li-ion pil projesi 4 saatlik depolamanın ilk örnekleri arasında yer almaktadır. İletim sistemine bağlanan PEDS'in santral ile beraber çalışarak yüksek talep anlarında enerji iletim şebekesine güç desteği sağlaması hedeflenmektedir. Bununla beraber frekans regülasyonuna katkısı sebebiyle PEDS, enerji iletim şebekelerinin daha kararlı bir yapıya bürünmesine olanak sağlamaktadır. Ayrıca santrale eklenen PEDS'in şebeke modernizasyonunu desteklemesi ve yenilenebilir enerji entegrasyonunu kolaylaştırması gibi ek avantajlar sağlaması da beklenmektedir.

- Yine California'da kurulan Moss Landing enerji depolama tesisinin (300 MW/1200 MWh) ilk aşamasının elektrik şebekesine bağlantısı gerçekleştirilmiştir. Hemen yanında bulunan doğal gaz santrali ile 500 kV'luk iletim şebekesine bağlanan bu sistem, arz talep dengesinin sağlanması ve enerji yönetimi için kritik rol üstlenmektedir.

- Texas'ta 2021'de bitmesi planlanan 181 MW Lily PV enerji santrali ile ortak konumlandırılan ve inşaatına başlanılan 50 MW/75 MWh kapasiteli PEDS projesi diğer enerji depolama örnekleri arasında yer almaktadır. Depolamanın temel hedeflerinin, yenilenebilir enerjinin değişken çıktısını telafi etmek, iletim hattına güç desteği sağlamak ve havanın karardığı ilk saatlerde artan enerji talebini kısmen karşılamak olduğu söylenebilir.

- ABD, Hawaii/ Lawa adasına (AES Lawai projesi) güneş PV santrali ile birlikte konumlandırılan ve 2018 yılında faaliyete giren (20 MW/100 MWh) Li-ion pil enerji depolamasının yine yukarıda belirtilen amaçlara hizmet etmesi beklenmektedir.

- Avustralya’da bir rüzgâr çiftliğine bağlanan (100 MW/129 MWh) Li-ion pil enerji depolamasının Tesla tarafından 100 gün içerisinde inşa edilmesi, yeni pil depolama teknolojilerinin ne kadar kısa bir sürede kurulabileceğini göstermektedir. Özellikle yaz aylarında elektrik sıkıntısı çekilen Güney Avustralya’da, enerji üretiminin kesintiye uğraması durumunda bu depolama sisteminin tek başına 30.000 hanenin ortalama 1 saatlik enerji ihtiyacını giderebileceği belirtilmektedir. Fakat bu depolama sisteminin daha çok, iletim şebekesine bağlı yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken çıktısını telafi etmek amacıyla kullanılması amaçlanmaktadır.

- İngiltere’de ilk dağıtım şebekesi ölçekli pil projesi Holes Bay (7,5 MW/15 MWh) 2020 yılının ortalarında devreye alınmıştır. Küçük bir kasabada kurulumu gerçekleştirilen tesis ile bölgedeki PV veya diğer yenilenebilir enerji tesislerinin değişken çıktısının telafi edilmesi, ağ geriliminin düzenlenmesi ve şebekeye güç desteğinin sağlanması amaçlanmıştır.

- 2021’de tamamlanması planlanan Tesla’nın Megapack ölçekli (34 MW/68 MWh) Li-ion pil projesi, İngiltere’de bir enerji dağıtım şebekesine (UK Power Networks) bağlanacağı yerel araştırmacılar tarafından ifade edilmektedir. Yapay zekâ ile gerçek zamanlı kontrol edilmesi planlanan sistemin, yoğun olmayan dönemlerde depoladığı enerjiyi yüksek talep anlarında dağıtım ağında zirve yapan yükün etkisini azaltmak amacıyla kullanılacağı belirtilmiştir. Ayrıca bu depolama ile beraber yenilenebilir enerjinin ağı entegre edilmesinin de kolaylaşacağı düşünülmektedir.

Buraya kadar olan kısımda Akıllı Şebekeler’e, PV sistemlere ve Enerji Depolama’ya özetle değinildi. Tezin amacı nedeniyle PV sistemler ve enerji depolama konuları üzerinde daha çok duruldu. Önemi nedeniyle enerji depolamanın gerekliliği farklı ifadelerle yukarıda anlatılmaya çalışıldı. Özellikle AGDŞ’de PV sistem kaynaklı ters yönlü güç akışlarının ve gerilim artışlarının PEDS ile çözülebileceği vurgulandı. Pil enerji depolama teknolojileri içerisinde Li-ion pil teknolojisinin üstün özellikleri sebebiyle diğerlerinden neden ayrıldığı belirtildi. Bir sonraki başlıkta “Literatür Araştırması” üzerinde durulmuştur.

2 LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Bu başlık altında özellikle AGDŞ ölçeğinde yapılan enerji depolama çalışmaları incelenmeye çalışılmış ve araştırma esnasında karşılaşılan OG türündeki benzer uygulamalara da yer verilmiştir. Yapılan literatür araştırmasının bir kısmı aşağıda özetlenmiştir.

2.1 Orta Gerilim Şebekesi Ölçeğinde Yapılan Çalışmalar

Literatürde, farklı kontrol stratejileri kullanılarak depolamanın gerilim üzerine etkisinin incelendiği, güç dengesinin sağlanmaya çalışıldığı ve çözüm için çeşitli modellerin sunulduğu bazı çalışmalar mevcuttur. Örneğin, Wang ve ark. (2017) PEDS ile OG dağıtım şebekelerine aktif ve reaktif güç desteği sağlanmasının OG şebeke voltajı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. DAO açısından pik yük tıraşlama ve voltaj desteği için Matlab/Simulink'te tasarlanan bir sistem modeli uygulanmıştır. Farklı hat uzunlukları baz alınarak yapılan çalışmada, kısa hatlarda reaktif ve uzun hatlarda aktif güç desteğinin voltaj iyileştirmesi üzerinde etkili olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca çalışmada, ticari yüklerde, yüksek talep ve yüksek PV enerji üretiminin çakışması sonucu PV penetrasyonunun artmasıyla batarya ömrünün uzadığı görülmüştür.

Gao ve ark. (2018) kontrol ve iletişim işlevlerine sahip olduğu varsayılan bir akıllı transformatör ve aynı noktaya konumlandırılan PEDS'in ortak kullanımı ile hem OG hem de AG dağıtım hatlarında voltaj kontrolünü sağlayan bir kontrol yaklaşımı sunmaktadır. İki adet DC/AC dönüştürücü kullanılarak AG hattında aktif güç ve OG hattında reaktif güç kontrolü ile voltaj kontrolünün sağlanabileceği önerilmektedir. Çalışmanın sonucunda, önerilen yaklaşımın geleneksel sisteme göre voltaj seviyelerini OG ve AG dağıtım şebekesinde sırasıyla %9,3 ve %60,5'e kadar iyileştirdiği belirtilmektedir.

Parthasarathy ve ark. (2019) bir akıllı şebekeye entegre edilecek hibrit bir PV sistem ve PEDS'in modellenmesi ve simülasyonu üzerine çalışmışlardır. Bir akıllı şebekeden alınan gerçek zamanlı veriler (enerji tüketim ve üretim miktarları) kullanılarak Matlab/Simulink'te modelleme ve simülasyon yapılmıştır. Çalışmada, güç dengesinin sağlanması hususunda Li-ion pillerin rolü incelenmiştir. Çalışma sonucunda PEDS'in güç akışlarını kontrol etmede yardımcı olduğu ve pillerin doğru boyutlandırılmasının ekonomiklik ve işletim özellikleri bakımından kritik öneme sahip olduğu belirtilmektedir.

Turna (2019) Amerika'da bulunan IEEE 34 bara test sistemi üzerinde PV penetrasyonu sonucu oluşan ters yöne güç akışını, gerilim dalgalanmalarını ve aşırı yüklenme etkilerini incelemiştir. OpenDSS programı kullanılarak yapılan modellemede

3 farklı bara noktasına PV sistem eklenmiştir. Farklı PV penetrasyon seviyelerinde (%0, 25, 50, 75, 100) etkiler incelenmiş ve düşük talep ile yüksek PV enerji üretiminin çakıştığı zaman dilimlerinde ters yöne güç akışının problem oluşturabileceği gözlemlenmiştir. Çözüm için sistemde 2 adet regülatör ve 2 adet şönt kapasitör kullanılmıştır. Ancak yapılan bu çalışma, ABD ve Avrupa tarzı dağıtım ağlarının farklılığından² dolayı AGDŞ için yol gösterici olamaz. Bu nedenle EDS'nin AG ağlarında gerilim artışına etkisinin incelenebilmesi için yeni bir çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

Li ve ark. (2020) bir dağıtım ağında gerilim iyileştirmeyi ve pik yük kaydırmayı dikkate alan PEDS için optimal güç sevkiyatı üzerine bir çalışma yapmışlardır. OG dağıtım ağı ile iletim ağı arasındaki güç değişim maliyetini ve gerilim saptasından dolayı oluşan ceza maliyetini PEDS kullanarak en aza indirmeyi ayrıca amaçlamışlardır. Çalışmada yapılan güç akışı simülasyonları sonucu OG şebekesinde PEDS kullanılarak yenilenebilir enerjinin verimliliğinin artırıldığı, gerilimin önemli ölçüde düzenlendiği gösterilmektedir.

Ranamuka ve ark. (2020) OG dağıtım şebekesinde dağıtılmış yenilenebilir enerji kaynaklarını ve PEDS'i koordineli bir şekilde kontrol ederek OG hattı üzerinde gerçekleşen AC güç akışlarını kontrol etmeyi amaçlamışlardır. Simülasyon üzerinden istenilen sonuç elde edilmiş olsa da önerilen kontrol yaklaşımının uygulanabilir olması için, PEDS'in enerji yönetim birimlerine sahip olması, gelişmiş inverter kontrolünün mevcut olması ve akıllı şebeke alt yapısının olması gerektiği belirtilmiştir.

OG ölçeğinde yapılan bu çalışmaların ortak yanının PEDS kullanılarak gerilim kontrolü ve güç dengesinin sağlanması olduğu söylenebilir. Ancak OG şebekesinde gerilim yükselmesi AG şebekesine göre daha az gerçekleşen bir durumdur. Bir AG şebekesinde ağ üzerinde müşteriye doğru gidildikçe yük değişimi daha belirgin bir şekilde hissedildiğinden buradaki yüklerin ve mikro jeneratörlerin kontrolünün, güç dengesinin sağlanması ve gerilimin yasal sınırlar içerisinde tutulması üzerinde daha etkili olduğu literatürde belirtilmektedir. Diğer bir ifadeyle AGDŞ'de enerji tüketim noktasında arz talep dengesinin sağlanması OG şebekesindeki gerilim problemlerinin de doğal olarak çözümlenmesine katkı sağlayacaktır. Bu nedenle son zamanlarda daha çok AG ölçeğinde gerilim kontrol çalışmalarına ağırlık verildiği ve OG kademesindeki çalışmaların kısıtlı

² ABD'de her 2-3 konut için küçük bir OG/AG dönüştürücü transformatör kullanılır. Dolayısıyla müşterinin bulunduğu yakın bir mesafeye kadar enerji dağıtımı OG hattı üzerinden yapılır. AB tarzı dağıtım hatlarında ise onlarca veya yüzlerce müşteriyi besleyecek büyüklükte transformatör kullanıldığından AG hat uzunlukları daha fazladır.

olduğu literatürde görülmektedir. Bu yönelim sayaç arkası PEDS'in kurulumunu da giderek hızlandırmaktadır.

Ayrıca yukarıda yer alan bazı çalışmaların Matlab/Simulink'te yapıldığı görülmektedir. Matlab her ne kadar gelişmiş bir program olsa da gerçekçi bir güç akışı analizi konusunda biraz zayıf kalmaktadır. Daha gerçekçi sonuçlar veren ve şebekenin tüm haliyle modellenmesine imkân tanıyan gelişmiş güç akışı analiz programlarının kullanılması daha doğru bir seçim olacaktır. Sonuç olarak tüm bunlar göz önünde bulundurulduğunda AG ölçeğinde daha çok çalışmanın olması gerektiği kanısına varılmaktadır. Literatürde AG ölçeğinde daha çok çalışmanın yer alması da bu kanıyı desteklemektedir. Aşağıda AG ölçeğinde yapılan çalışmalara yer verilmiştir.

2.2 Alçak Gerilim Şebekesi Ölçeğinde Yapılan Çalışmalar

Bir AG dağıtım şebekesinde PEDS'in gerilim üzerine etkisinin incelenebilmesi için yapılması gereken ilk işlemlerden biri depolamanın nereye ve hangi kapasitede kurulacağıdır. Diğer bir işlem ise depolamanın ne tür bir kontrol yöntemi ile kontrol edileceğidir. Aşağıda AG ölçeğinde yapılan çalışmaların bir kısmı depolamanın konumu ve kapasitesi üzerine yoğunlaşmışken diğer bir kısmı daha verimli kontrol yöntemleri üzerinde durmuştur. Örneğin Sugihara ve ark. (2013) yüksek PV penetrasyonu sonucu artan gerilim ihlallerine karşı dağıtım ağı operatörünün müşteriye ait depolama sistemlerini kullanması yöntemiyle dağıtım hattında ekonomik ve verimli gerilim kontrolü üzerine çalışmışlardır. Özellikle ticari müşteriler için bir sübvansiyon (mali destek) uygulanarak müşteriye ait depolama sistemlerinin kullanılmasının daha verimli ve kontrol edilebilir bir enerji yönetimine katkı sağlayacağı ifade edilmektedir.

Von Appen ve ark. (2014) AG dağıtım sistemlerinde PV sistemlerle beraber kullanılan PV depolama sistemleri için yerel gerilim kontrol stratejileri üzerine bir çalışma yapmışlardır. Çalışmada, sadece öz tüketimin baz alındığı statik bir kontrol yönteminin gerilim kontrolü üzerinde yetersiz olacağı ifade edilmektedir. Buna karşın gerilim kontrolü için düğüm geriliminin sürekli ölçüldüğü, PV inverter ve depolama sisteminin birlikte kontrol edildiği, pilin tam dolması sonrasında gerektiğinde PV inverteri üzerinden beslemenin kısıtlanabileceği bir dinamik kontrol yaklaşımı sunulmaktadır.

Depolamanın konumu önemli görüldüğünden Lamberti ve ark. (2015) dengesiz AGDŞ'de dağıtılmış konut tipi ve ortak konumlu (aynı düğüme bağlı) PV ve PEDS'in gerilim profilleri üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Monte Carlo yöntemi kullanılarak

yapılan çalışmada PV jeneratörler ve PEDS tipik bir İtalyan AG hattı üzerinde son kullanıcı noktalarında rastgele konumlandırılmıştır. Analiz sonucunda depolama sistemlerinin gerilim artışlarını ve düşüşlerini düzenlediği görülmüştür. Ancak çalışmanın sonucunun benimsenebilmesi açısından farklı iklim şartlarında ve farklı yöntemler kullanılarak benzer bir sonuca ulaşılması gerekmektedir.

Konum kadar önemli olan bir diğer husus ise depolamanın kapasitesidir. Bu nedenle Bucciarelli ve ark. (2016) AGDŞ’de PV sistemlerin kullanımının yaygınlaşması sonucu oluşan gerilim sorunlarını çözmek amacıyla senaryo tabanlı PEDS boyutlandırması üzerine çalışma yapmışlardır. PV enerji üretimindeki belirsizlik, daha önce geliştirilen bir algorithmada karar verme problemini zorlaştırdığından çözüm olarak uygun senaryo azaltma tekniği düşünülmüştür. Olasılık mesafesi kriterlerine göre (based on probability distance criteria) senaryo azaltma tekniklerinin yapılan çalışmanın amacına hizmet edemeyeceği görülmüştür. Bu çalışmada sadece PV enerji üretimindeki belirsizlik dikkate alınmış ve boyutlandırma için diğer faktörlerin başka çalışmalarda ele alınacağı ifade edilmiştir.

Ariyaratna ve ark. (2017) çatı üstü PV sistemin değişken çıktısını telafi etmek ve ani güç değişiminin neden olduğu gerilim dalgalanmalarını önlemek amacıyla bir PEDS boyutlandırması üzerine bir çalışma yapmışlardır. Bir güç akışı simülasyon programı kullanılarak yapılan çalışmada batarya kapasitesi arttırıldıkça gerilimin normal sınır değerlerine daha da yaklaştırıldığı sonucuna ulaşılmıştır.

Giannitrapani ve ark. (2017) radyal bir AGDŞ’de gerilim kontrolü için PEDS’in optimum tahsisi (bataryaların sayısı, kapasitesi ve yerleri) için bir çalışma yapmışlardır. PEDS’in ağ üzerinde kurulacağı en etkili yerleri seçmek için voltaj duyarlılığı analizine dayalı bir sezgisel strateji (heuristic strategy) önerilmektedir. Değişken veya rastlantısal (stokastik) üretim ve talebe bağlı olarak optimum boyutlandırma en kötü durum senaryosu düşünülerek yapılmıştır. Çözüm algoritmaların birinde vakaların %45’inin optimal olduğu ve diğer bir çözüm algoritmasında ise vakaların %57’sinin optimal olduğu sonuçlar arasında yer almaktadır.

Crossland ve ark. (2018) depolamanın konumunu dikkate alarak mikro düzeyde yenilenebilir enerji tesisine sahip ve AG hatlarına bağlı konutlarda enerji depolamanın gerilim üzerine etkisini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada konum algoritmaları (location algorithms) kullanılarak ağdaki gerilim artış noktaları ve enerji depolamanın buna etkisi

tespit edilmeye çalışılmıştır. Sonuç olarak PEDS'in gerilim artışını kısmen önlediği görülmüş ve stratejik konumlara ³ PEDS'in kurulması gerektiği ifade edilmiştir.

Li ve ark. (2018) dağıtım hatlarına dağıtılmış PV sistemler için ayrık fourier dönüşüm yöntemine dayanan bir PEDS kapasitesi tahsis stratejisi (allocation strategy) sunmaktadır. Güvenilirliği sağlamak amacıyla senaryo modelleri, Cholesky ayrıştırma ve senaryo azaltma (Cholesky decomposition and scenario reduction) yoluyla oluşturulmuştur. Çalışmanın sonucunda daha az depolama kapasitesi ile güç akışı sorunlarının azaltılabildiği ve bu nedenle daha fazla PV penetrasyonunun gerçekleştirilebileceği belirtilmektedir.

Johnson ve ark. (2018/a) İngiltere'de test için belirlenen standart bir AG ağına entegre edilen PEDS'in optimum yerleştirilmesinin ve boyutlandırılmasının ekonomik analizini yapmışlardır. Çalışmada iki farklı senaryonun karşılaştırmalı ekonomik analizi ARIMA tabanlı üretim tahmin yöntemi ile yapılmıştır. Birinci senaryo, müşteriye ait PEDS'in gerilim ihlallerini düzenlemek için DAO tarafından satın alınmasını ve kontrolünü ifade eder. İkinci senaryo ise aynı amaç için geleneksel yeniden yapılandırma stratejisini ifade etmektedir. Sezgisel analize dayalı PEDS'in yerleştirilmesi ve gerçek zamanlı güç gönderimi hesabı için Karma Tamsayı Doğrusal Programlama (MILP-Mixed Integer Linear Programming) formülleri kullanılmıştır. Yapılan analizde PEDS'in satın alınmasının ve kontrolünün yeniden yapılandırmaya göre daha maliyetli olduğu görülmüştür. Fakat sonucun güvenilirliği açısından çok sayıda ve farklı ağ yapılarında çeşitli çalışmaların yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Johnson ve ark. (2018/b) yaptıkları ikinci çalışmada, İngiltere AG ağlarında voltaj ihlalinin PEDS tabanlı kontrolünün ne derece uygulanabilir olduğunu amaçlamışlardır. Ayrıca PEDS'in DAO açısından optimum devralmasının yeniden yapılandırmaya göre maliyeti tekrar ele alınmıştır. Depolanmış enerjinin gerçek zamanlı gönderim stratejisi önemli görüldüğünden üç farklı kontrol algoritması⁴ üzerinde durulmuştur. Monte Carlo yöntemi ile beraber çeşitli formüller de kullanılarak yapılan analizde düşük PV entegrasi durumunda PEDS kontrolünün yapılabildiği ve daha ekonomik olduğu görülmüştür. Ancak 186 yük ağında ihlallerin asla engellenemeyeceği, 75 yük ağında ise PEDS tabanlı kontrol çözümünün garanti edilemediği belirtilmiştir.

³ Çalışmada stratejik konum olarak depolama maliyetinin düşürülmesi ve kontrol edilebilirliğin sağlanması açısından depolama birimlerinin hat başına konulması gerektiği önerilmiştir.

⁴ Öz Tüketim (Self- Consumption), Besleme Sınırlayıcı (FIL– Feed-in-Limiting) ve Merkezi (Centralised) kontrol

Aynı ekibin yaptığı (Johnson ve ark., 2018/c) ve önceki çalışmaların devamı niteliğinde olan üçüncü bir çalışmada ise ihlal yönetimi için 29 AG hattında çoklu besleyici analizi yapılmıştır. Analiz için daha önceki formüller geliştirilerek tekrar kullanılmıştır. Her bir ağ üzerinde farklı düzeylerde PV penetrasyonu (%0, 20, 40, 60, 80, 100) ve müşteriye ait PEDS'in farklı oranlarda devralınarak (%25, 50, 75, 100) kullanılmasına ait durum analizi yapılmıştır. “Besleme Sınırlayıcı” ve “Merkezi” kontrol ile yapılan her iki PEDS kontrol türünde de PV penetrasyonunun artması sonucu kontrol edilebilirliğin azaldığı gözlemlenmiştir. Ancak PEDS'in kullanılabilirliği veya mevcudiyeti arttıkça daha iyi bir kontrol sağlandığı görülmüştür. Çalışmada “Besleme Sınırlayıcı” kontrol tipi önerilmiş ve yeniden yapılandırmanın uzun vadede ertelenmesi için PEDS'e güvenilemeyeceği belirtilmiştir.

Jain ve ark. (2018) Yük Altında Kademe Değiştirici (OLTC, On-Load Tap Changer) ve PEDS'i birlikte kullanarak AGDŞ'de koordineli gerilim kontrolü üzerine çalışmışlardır. Matlab/Simulink üzerinden bir IEEE 13 düğümlü dağıtım sisteminde gerçekleştirilen analiz sonucunda, PV penetrasyonu nedeniyle gündüz yükselen ve akşam saatlerinde yük nedeniyle düşen gerilimin normal sınır değerlerine çekildiği belirtilmektedir. Ayrıca sadece OLTC veya PEDS içeren sistemlere göre bu iki teknolojinin birlikte kullanımıyla OLTC ve PEDS üzerindeki baskının en aza indirildiği gösterilmeye çalışılmıştır.

Zarrilli ve ark. (2018) AGDŞ'de PEDS kullanarak, gerileyen ufuk yaklaşımı ile gerilim kontrolü sağlamayı amaçlamışlardır. Gerileyen ufuk yaklaşımı (receding horizon approach), olası voltaj sorunlarını tahmin eden ve bu sorunlara önceden karşı koymayı planlayan bir enerji depolama kontrol politikası izlemektedir. Besleyici hat başındaki güç akışlarının ölçümü ile beraber meteorolojik veriler 15 dakikalık zaman adımları ile takip edilerek voltaj yükselmeleri veya düşümleri (ortalama 2 saat öncesinden tahmin edilerek) önlenmeye çalışılmıştır. Ölçüm zaman adımının 5 dakikaya düşürülmesi örneklemeyi arttıracğından kontrol zaman ufkunun daha da gerileceğı, yani daha ileri saatlerin tahmin edilmesini kolaylaştıracğı belirtilmektedir.

Zeraati ve ark. (2018) gerilim artışlarının ve düşüşlerinin önlenmesi amacıyla kullanılan PEDS'in dağıtık kontrolü üzerine çalışmışlardır. Çalışmada, her bir depolama öğesi üzerinde bulunan yerel gerilim yükselmesi/düşümü tabanlı kontrolörlerle beraber bu kontrolörlerin birbiriyle koordineli haberleşmesini sağlayan dağıtık kontrol yöntemi ele alınmış ve uygulanmıştır. Bu tür bir kontrol yöntemi sonucunda, bataryaların ömrünün uzatılabileceğı ve gerilimin düzenlenebileceğı ifade edilmektedir.

Almasalma ve Deconinck (2020) PV ve PEDS ile eşzamanlı frekans ve gerilim kontrolü sağlamak için bir kontrol metodolojisi sunmuşlardır. Yapılan çalışma sonucunda söz konusu hizmetler için depolama rezerv kapasitesi profillerinin sözleşme dönemi boyunca sabitlenemeyeceği ifade edilmiştir.

Liu ve ark. (2020) AG dağıtım hatlarında PV sistemlerin neden olduğu gerilim artışlarının önlenmesi için yapılan PV kısıtlama⁵ işlemlerinin adaletli bir şekilde yapılması için üç farklı optimum güç akışına dayalı (optimum üretim, optimum enjekte/ihraç ve optimum finans) PV kısıtlama planı önermişlerdir. Bunun dışında kalan kontrol yaklaşımlarının (inverter tabanlı volt-watt) sadece transformatöre yakın olan haneleri ödüllendireceğini ve radyal hattın sonunda yer alan hanelerin (hat sonundaki gerilim etkisinin daha yüksek olması nedeniyle) ise cezalandırılacağını ortaya koymaktadır. Bu çalışma, depolama sistemlerinin AG dağıtım hatlarında ne denli kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir.

Alnaser ve ark. (2020) şebeke kısıtlamaları altında PV depolama sistemlerini koordineli bir şekilde kullanan bir enerji yönetim sistem modeli sunmuşlardır. Sunulan model ile dağıtım hattına rezerv desteği sağlamayı ve müşterilerin enerji yeterliliklerini artırmayı (ihtiyaç halinde komşu depolama sisteminin kısmen kullanılması gibi) amaçlamışlardır. Çalışma sonucunda baz alınan modelin dağıtım hattına daha fazla rezerv sağlayabildiği belirtilmektedir.

AG ve OG şebekesi üzerinde enerji depolamanın farklı etkilerini test etmek amacıyla yapılan yukarıdaki çalışmaların toplamı dikkate alındığında, bazı çalışmalarda depolamanın konumunun dikkate alındığı ve diğer bir kısmında ise depolamanın sadece boyutlandırılması üzerinde durulduğu görülmektedir. PV sistemle ortak konumlandırılan PEDS'in etkisinin analiz edilebilmesi için yapılan diğer bazı çalışmalarda ise sonucun benimsenebilmesi ve güvenilirliği açısından çok sayıda ve farklı ağ yapılarında çeşitli çalışmaların yapılması gerektiği belirtilmiştir.

Bir başka çalışmada (Von Appen ve ark. (2014)) depolamanın tam şarj olması durumunda hat ihlallerinin engellenmesi için PV üretiminin kısıtlanması gerektiği belirtilmiştir. Fakat bu yöntem mevcut kaynakların verimsiz kullanılmasına neden olacaktır ki bu sorunun çözümü için maksimum PV sistem gücünü karşılayabilecek bir depolama modelinin seçimi kritik önem taşır.

⁵ AG hattına enerji enjektresinin kısıtlanması veya yoğun enerji üretim zamanlarında şebeke ile PV bağlantısının kesilmesi işlemi.

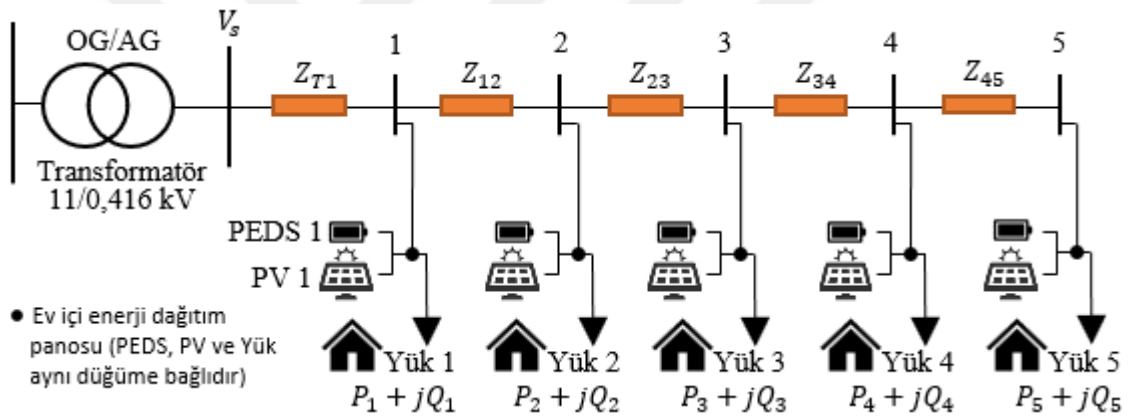
Bununla beraber yukarıda yer alan çalışmaların bir kısmı depolama kapasitesinin gerilim üzerine etkisini incelerken depolama elemanının gücünü dikkate almamıştır. Oysaki depolama gücünün düşük olması yüksek PV üretim zamanlarında şebekeye yüksek miktarda enerji enjektesine sebep olacaktır. Benzer şekilde depolama gücünün yüksek olması durumunda ise depolama elemanı çok kısa sürede şarj olacağından geri kalan sürede depolama elemanının hiçbir etkisi olmayacaktır.

Dolayısıyla bu çalışma, PEDS'in PV kaynaklı gerilim artışı üzerine etkisini incelerken depolamanın kapasitesini ve diğer çalışmalardan farklı olarak depolamanın gücünü de dikkate almaktadır.

Farklı kontrol stratejilerinin uygulandığı yukarıdaki bazı çalışmalar göz önünde bulundurulduğunda bu çalışma için iki farklı depolama kontrol yöntemi dikkate alınmış ve uygulanmıştır. Sonuçların gerçeğe yakın ve güvenilir olabilmesi açısından bir tüketicinin ortalama günlük yük talep eğrisi dikkate alınarak PV sistem modeli belirlenmiştir. Harmonik analizi de yapabilen gelişmiş bir güç akışı analizi programında depolamanın AGDŞ'de PV kaynaklı gerilim artışı üzerine etkisi incelenmiştir. Sayaç arkası pil enerji depolama teknolojilerinin yaygınlaşması sebebiyle merkezi depolama yerine bu çalışmada dağıtık depolama (PV sistemle aynı noktaya bağlı depolama) tercih edilmiştir. Aşağıda çalışmanın metodolojisine detaylıca değinilmiştir.

3 MATERYAL VE METOT

Bu tez çalışmasında Şekil 3.1’de görülen basit bir radyal⁶ AG dağıtım ağına bağlı bulunan, PV ve PEDS’e sahip 5 evin şebeke gerilimi (AGDŞ) üzerindeki etkisi incelenmektedir. Bu kapsamda daha çok, PV sistemden kaynaklı gerilim artışlarının PEDS ile ne derece önlenebileceği ve gerilimin normal sınır değerlerine nasıl çekilebileceği üzerinde durulmaktadır. Şekil 3.1’de görülen “ Z_{T1} , Z_{12} , Z_{23} , Z_{34} , Z_{45} ” ifadeleri iki nokta arasındaki hat empedanslarını; “ $P_n + jQ_n$ ”, sırasıyla n . konutun talep ettiği aktif ve reaktif güçleri; “PEDS n ” ve “PV n ” ise n . konuta ait Pil Enerji Depolama Sistemi ile Fotovoltaik sistemi ifade eder. Ayrıca şekilde görülen PEDS, PV ve yükün aynı düğüme bağlı olduğu bilinmelidir. Yük, PV ve PEDS modelleri (gerçek veriler dikkate alınarak) OpenDSS adı verilen bir güç akışı analiz programına tanımlanmış ve program çıktı verileri “Bulgular ve Tartışma” başlığı altında değerlendirilmiştir.



Şekil 3.1. Çalışmada baz alınan radyal AGDŞ bağlantı şeması

Yukarıda verilen şema baz alınarak aşağıda tez çalışmasına yönelik uygulama adımlarına ve çalışma yöntemine değinilmiştir.

3.1 Uygulama Adımları

Bu başlık altında çalışmada kullanılan ve Şekil 3.1’de görülen Yük, PV ve PEDS modelleri hakkında bilgi verilmiştir.

⁶ AG dağıtım şebekeleri örgülü (mesh) olarak tasarlanır ancak bakım ve onarım işlemlerinin kolaylığı bakımından radyal olarak uygulanır. Bu nedenle bu tez çalışmasında radyal ağ türü ele alınmıştır.

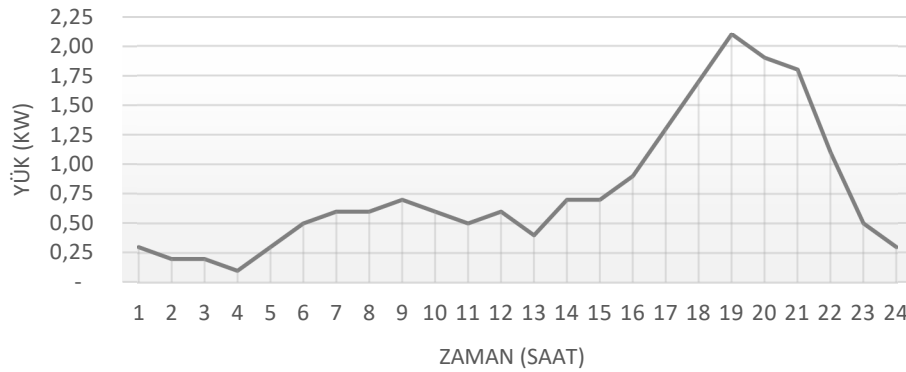
3.1.1 Yük (talep) modeli

Bir besleme hattında güç akışı analizinin yapılabilmesi için öncelikle bilinmesi gereken modellerin başında mşteriyeye ait yük modeli gelir. Bir mesken müşterisinin AG şebekesinden talep ettiği güç (kW), müşterinin yaşam biçimine bağlı olarak günün farklı saatlerinde değişkenlik gösterir. Gelişmiş lm teknolojileri yardımıyla günümüzde bir mşteriyeye ait günlük yük eğrisi rahatlıkla oluşturulabilmektedir. Akıllı sayaçlar üzerinden her 1 dakika içerisinde tüketilen enerjinin ölçümü yapılabilmekte ve haberleşme ağı üzerinden ölçülen veriler alınabilmektedir. Bu lmler sonucu müşterinin her dakika için AG şebekesinden talep ettiği ortalama gler (ortalama güç/dakika) hesaplanabilir. Gün içerisinde talep edilen bu ortalama güç/dakika değerlerinden en büyüğü maksimum güç talebini oluşturur.

Herhangi bir saat aralığındaki ortalama güç talebi ise o saat aralığında bulunan tüm ortalama güç/dakika değerlerinin aritmetik ortalamasıyla bulunur. Saatlik ortalama güç değerlerinin bir g analizinde kullanılması durumunda, müşterinin belirtilen saatler arasında sabit güç tükettiği varsayılır.

Yük modeli, Loughborough niversitesi'nde Yenilenebilir Enerji Sistemleri Teknolojisi Merkezi (CREST-Centre for Renewable Energy Systems Technology) tarafından geliştirilen bir araç kullanarak oluşturulmuştur (Richardson ve Thomson). Elde edilen tüketim verileri dakika başına olduğundan saatlik ortalama değerler hesaplanarak ve tüketicinin saatlik bazda sabit güç tükettiği varsayılarak güç akışı analizi yapılmıştır.

Tez çalışmasında tüm mesken müşterileri için kullanılan 1 günlük talep eğrisi şekil 3.2'de görülmektedir.



şekil 3.2. Mesken müşterilerine ait 1 günlük talep eğrisi

Yük modelinin ardından analiz sonuçlarını doğrudan etkileyen ve üstünde durulması gereken modellerden bir diğeri de PV sistem modelidir.

3.1.2 PV sistem modeli

Bir PV sistemde kurulu güç (kWp) standart test koşullarında (25 °C sıcaklık ve 1000 W/m² toplam güneş ışınlımı) sistemin verebileceği maksimum gücü ifade eder. Dolayısıyla sistem çıkış gücünü etkileyen önemli faktörlerden birisi de güneş ışınlımıdır. Coğrafi konuma ve PV panel yönelim açılarına bağlı olarak sistem çıkış gücü değişkenlik gösterir.

Bu tez çalışmasında, PV sistem DC kurulu gücü 5 kWp olarak ve PV sistemin konumlandırılacağı coğrafi konum olarak da Mardin'in Midyat⁷ ilçesi seçilmiştir. Seçilen konuma ait temmuz ayı ortalama güneş ışınlım değerleri baz alınarak sistem modeli oluşturulmuştur.

Çalışmada kullanılan PV sistem modeli için PV hücrelerin bulunduğu ortam sıcaklığı ve PV DC çıkış gücü (Watt) (sırasıyla T-P) ilişkisi ile solar inverter için güç-verim (sırasıyla P- η_{inv}) ilişkisi Tablo 3.1'de verilmiştir.

Tablo 3.1'de T-P eğrisi için:

X dizisi sıcaklığı ifade ederken Y dizisi sıcaklığa bağlı PV dizi verimini dolayısıyla PV dizi çıkışındaki gücün verimini pu (birim değer/per unit) cinsinden ifade eder. Standart test koşullarında (25 °C sıcaklık ve 1000 W/m² toplam güneş ışınlımı) elde edilen PV panel verimi X dizisindeki 25 °C sıcaklık değerine karşılık Y dizisinde pu cinsinden 1 değerine karşılık gelir.

Bu tez çalışmasında PV hücrelerin bulunduğu ortam sıcaklığı, güneşin doğumunu takiben minimum 25 °C'den başlayacak ve öğle saatlerinde maksimum 60 °C sıcaklığa ulaşacak şekilde seçilmiştir. Şekil 3.3'te PV sistem güç çıkışının sıcaklığa bağlı grafiği verilmiştir.

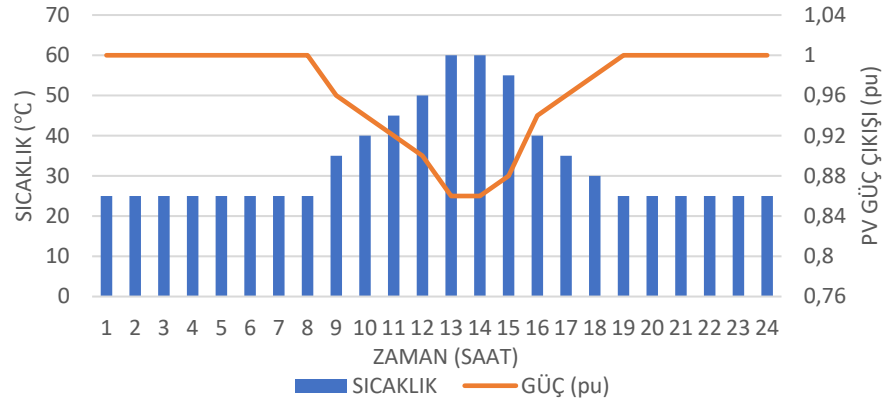
Tablo 3.1'de P- η_{inv} eğrisi için ise:

X dizisinde yer alan “1” değeri, inverter girişine uygulanan gücün, inverter nominal gücüne eşit olduğu anlamına gelir ve bu “1” değerine karşılık inverter veriminin %97 (0.97 pu) olduğu görülmektedir. İnverter giriş gücü azaldıkça inverter veriminin düştüğü yine tablodan anlaşılmaktadır.

⁷ Güneş potansiyelinin yüksek olması sonucu ilçenin bazı bölgelerinde AGDŞ üzerinde PV kaynaklı gerilim artışlarının gelecekte yaşanabileceği düşüncesiyle tez çalışması için bu konuma ait güneşlenme verileri kullanılmıştır.

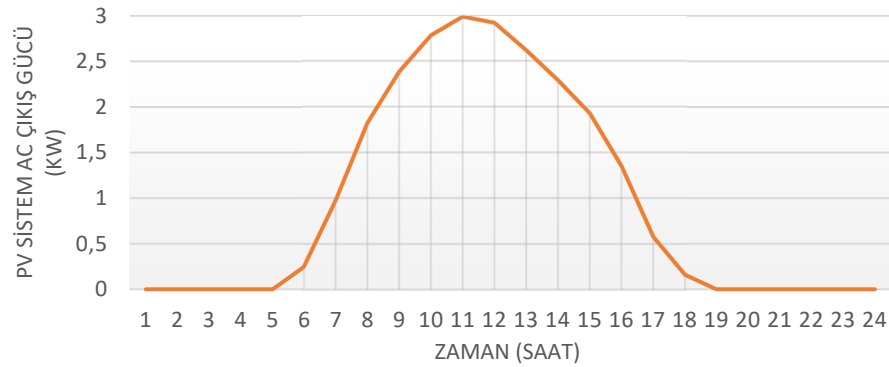
Tablo 3.1. PV sistem modelinde güç, sıcaklık ve verim arasındaki ilişki

	X dizisi	Y dizisi
PV dizisi sıcaklık- güç ilişkisi (T-P)	[0, 25, 75, 100]	[1.2, 1, 0.8, 0.6]
İnverter güç- verim ilişkisi (P- η_{inv})	[0.1, 0.2, 0.4, 1]	[0.86, 0.9, 0.93, 0.97]



Şekil 3.3. PV sistemde sıcaklığa bağlı pu cinsinden güç çıkışı

Ayrıca bu verim ve sıcaklık değerleri ile ısıtım değerleri sonucunda PV sistem çıkışında gerçekleşen saatlik bazda günlük ortalama AC güç çıkışı Şekil 3.4'te görülmektedir.

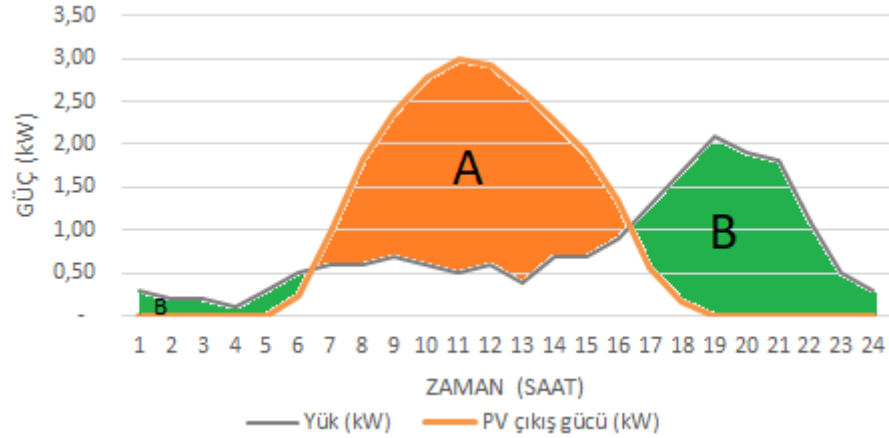


Şekil 3.4. PV sistem ortalama çıkış gücünün gün içerisindeki değişimi

Şekil 3.5'te ise günlük bazda ortalama PV sistem güç çıkış eğrisi ve yük eğrisinin birlikte yer aldığı bir grafik görülmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere yüksek PV enerji üretiminin ve yüksek enerji talebinin farklı zaman dilimlerinde gerçekleştiği görülmektedir. A ile gösterilen turuncu renkli alan PV sistem tarafından üretilen ve 06.30 ile 16.30 saatleri arasında tüketilmeyen enerjinin miktarını belirtmektedir. Bu ihtiyaç fazlası enerjinin şebeke gerilimini yükseltme yönünde etki yapması depolama

sistemlerini gerekli kılmaktadır. A alanındaki enerji miktarının PEDS’te depo edilerek B alanında (yeşil renkli alan) kullanılması iki tür fayda sağlar:

- Gündüz saatlerinde AGDŞ’de gerçekleşebilecek gerilim artışları önlenebilir,
- Yükün pik yaptığı akşam saatlerinde şebekeye güç ve voltaj desteği sağlanabilir ya da burada öz tüketim gerçekleştirilerek AGDŞ üzerindeki baskı azaltılabilir.



Şekil 3.5. PV ve talep eğrilerinin karşılaştırılması (PEDS şarj/deşarj grafiği)

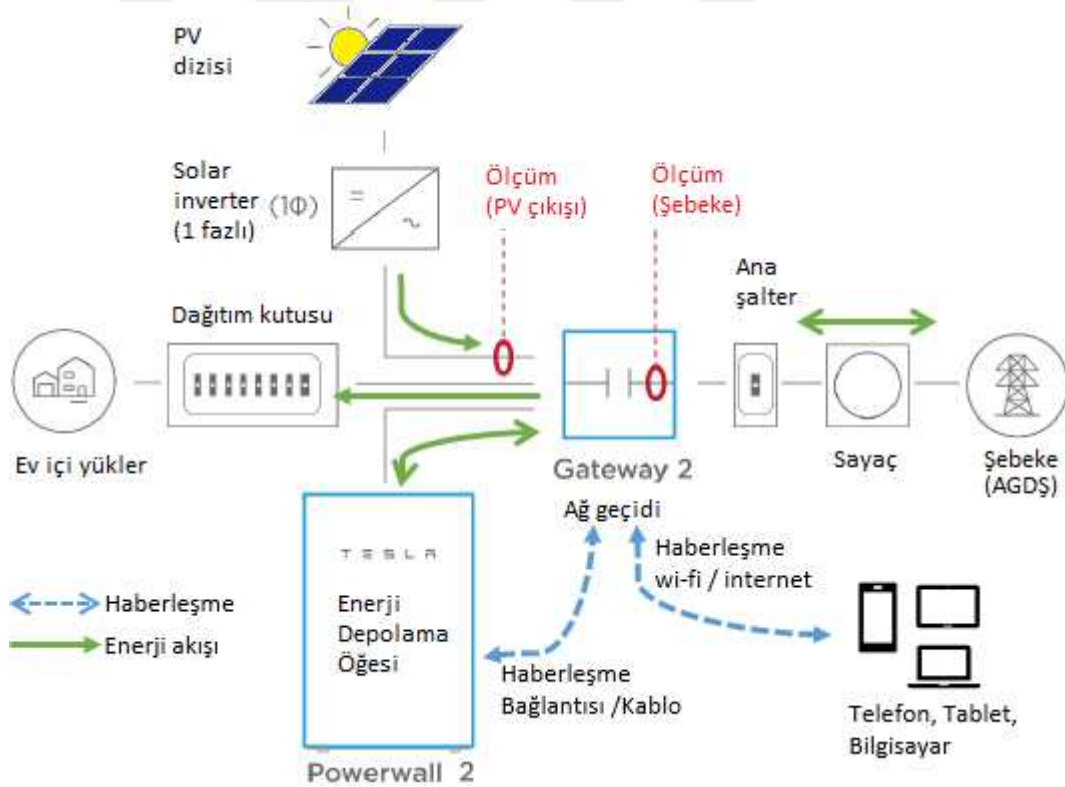
PV sistem ve PEDS modellemesi yapılırken en ideal durumda A ve B alanlarının birbirine eşit olması istenir. Hatta PEDS’te şarj vedeşarj işlemi sırasında gerçekleşen enerji kayıpları da düşünüldüğünde A’nın B’den bir miktar (toplam depolama enerji kayıpları kadar) büyük olması fayda sağlar. Ancak tüketiciye bağlı değişken enerji talebi ve bulutlanma etkisi gibi nedenler sonucu gerçekleşen değişken PV çıktısı nedeniyle bu eşitlik zaman zaman bozulabilir. PV sistem ve PEDS boyutlandırması işleminde bu kriterlerin göz önünde bulundurulması sistem maliyeti ve enerji verimliliği açısından oldukça önem arz eder. Ayrıca ideal bir enerji yönetimi, enerjinin verimli kullanımına katkı sağlar. Bir sonraki başlık altında bu amaca hizmet eden bir depolama sistem modeli verilmiştir.

3.1.3 Enerji depolama sistem modeli

Bir önceki başlıkta da ifade edildiği gibi enerjinin verimli kullanılması ve toplam sistem maliyetinin kısmen daha düşük tutulabilmesi iyi bir depolama boyutlandırması ve depolama yönetimine bağlıdır. Gündüz saatlerinde PV sistem tarafından üretilen enerjinin doğrudan kullanılması veya bu enerjinin PEDS’te depo edilerek daha sonra kullanılması ya da ev içi enerji tüketiminin olmaması durumunda depo edilen enerjinin akşam saatlerinde şebekeye enjekte edilmesi iyi bir kontrol yaklaşımı ile mümkündür. Bu tür bir amaca hizmet eden PEDS modeli Şekil 3.6 (Tesla, 2021/a)’da verilmiştir. Verilen

modelde pil enerji depolaması olarak AC güç çıkışı verebilen Tesla Powerwall 2 kullanılmıştır. Powerwall 2'nin verimli kullanımı ve sistem kontrolü için yine Tesla'ya ait bir kontrol elemanı olan Gateway 2 (ağ geçidi) kullanılmıştır. Gateway 2 olarak isimlendirilen ağ geçidi veya kontrol panosu, PV sistem, yük, şebeke ve Powerwall 2 arasında iyi bir koordinasyon sağlayarak enerji verimliliğine ve enerji yönetimine katkı sağlar. Gateway 2 bir haberleşme kablosu yardımıyla Powerwall 2 ile irtibat sağlayarak pilin doluluk oranını ve güç çıkışını kontrol edebilmektedir. Ayrıca Tesla uygulaması yardımıyla müşteri, herhangi bir iletişim cihazı üzerinden (telefon, tablet veya bilgisayar) Gateway 2 ile haberleşerek günlük enerji tüketimini, PV enerji üretimini ve pil şarj durumunu öğrenebilmektedir.

Ayrıca müşteri ile DAO arasında yapılabilecek ek bir sözleşme ile Powerwall 2 AGDŞ'de yük dengelemesi için de kullanılabilir. Bu sözleşme ancak uygun bir yönetmeliğin bulunması halinde yapılabilir.



Şekil 3.6. Tesla Powerwall 2 PEDS modeli ve tek hat bağlantı şeması

Şekil 3.6 dikkate alınarak Gateway 2'nin çalışma algoritması basit olarak şu şekilde ifade edilebilir:

- İlk olarak, PV sistem çıkışına yerleştirilen bir ölçüm cihazı üzerinden PV sistemin güç üretilip üretilmediği bilgisi alınır. PV enerji üretimi mevcut ise yükün ihtiyaç duyduğu

enerji doğrudan buradan karşılanır. Yük devrede değilse veya PV gücü yük gücünden büyük ise Powerwall 2 yük olarak devreye alınarak kullanılmayan enerji burada depo edilir. Bu yaklaşım sonucu gündüz saatlerinde şebekeye (AGDŞ) enerji enjekte edilmeyeceğinden gerilim artışları önlenmiş olunur.

- İkinci olarak, depo edilen enerji akşam saatlerinde Gateway 2 üzerinden yüke aktarılır. Bu şekildeki bir uygulama sonucunda şebekeden enerji çekilmeyeceğinden gerilim düşümleri önlenmiş olunur. Yük devrede değilse veya müşteri evde değilse depolanan bu enerjinin şebekeye enjekte edilmesi mümkündür. Bunun sonucunda şebekeye güç desteği sağlanabilir ve müşteri bu enerji satışından bir mali kazanç elde edebilir.

- Üçüncü olarak, PV enerji üretiminin yetersiz olması durumunda Gateway 2 üzerinden doğrudan şebekeden enerji çekilebilir.

Şekil 3.6'yı daha da anlamlı kılan ve Powerwall 2, Gateway 2 ve diğer sistem bileşenlerinin kurulumunu gösteren bir görsel Şekil 3.7 (Tesla, 2021/a)'de görülmektedir.



Şekil 3.7. Tesla Powerwall 2 ve diğer sistem bileşenleri

Şekil 3.7'de görülen ve tüm sistem içerisinde kritik bir rol üstlenen Tesla Powerwall 2'nin elektriksel ve mekanik özellikleri Tablo 3.2 (Tesla, 2021/b)'de verilmiştir. Powerwall, farklı ülkeler için farklı elektriksel özelliklere sahip olarak üretildiğinden, Tablo 3.2'de verilen özellikler İngiltere ve Avrupa standartları çerçevesinde üretilen modele aittir. G98 ve G99 kodları, İngiltere ve Avrupa'da mikro

jeneratörlerin AGDŞ'ye hangi koşullar ve standartlar altında bağlanabileceğini açıklamaktadır. G98 standartları baz alındığında bir PV sistem veya depolama sistemi AGDŞ'ye maksimum anlık 16 A akım veya 3,68 kW güç enjekte edebilir ya da şebekeden bu akımı veya gücü çekebilir. G99 standardında ise bu değerler 25A ve 5 kW olarak verilmektedir. Bu çalışmada G99 kriterleri baz alınarak simülasyonlar yapılmıştır. Çalışmada kullanılan simülasyon programı hakkında bir sonraki başlıkta detaylı bilgi verilmiştir.

Tablo 3.2. Tesla Powerwall 2'ye ait teknik özellikler

Kullanılabilir enerji kapasitesi	13,5 kWh
AC gerilimi (nominal)	230 V
Maksimum sürekli akım	16 A (Birleşik Krallık-G98) 25 A (Birleşik Krallık-G99 ve Avrupa Birliği)
Frekans (nominal)	50 Hz
Aktif güç, maksimum sürekli (Şarj etme ve boşaltma)	3,68 kW (İngiltere-G98) veya 5 kW (İngiltere-G99)
Görünen güç, maksimum sürekli (Şarj etme ve boşaltma)	3,68 kVA (İngiltere-G98) veya 5 kVA (İngiltere-G99)
Güç faktörü çıkış aralığı	+/- 1.0 aralığında ayarlanabilir
Maksimum çıkış hata akımı	32 A
Şarj-deşarj verimliliği	%90
Çalışma Sıcaklığı	-20 °C ile 50 °C
Optimum Sıcaklık	0 °C ile 30 °C
Uzunluk ölçüleri-mm (Yükseklik*Genişlik*Derinlik)	1150*753*147 mm
Ağırlık-kg	114 kg
Montaj tipi	Zemin veya duvara montaj

3.1.4 Simülasyon programı

Bir simülasyon programının bir AG dağıtım ağında güç akışlarını dinamik ve gerçekçi bir şekilde gerçekleştirebilmesi için aşağıda verilen bazı temel özellikleri taşıması gerekmektedir:

- Zaman serisi simülasyonlarını gerçekleştirebilmeli,
- Dengesiz güç akışı analizi yapabilmeli,
- Ağ üzerinde herhangi bir noktaya konumlandırılan PV sistem veya enerji depolama analizleri yapabilmelidir.

Yukarıda verilen özelliklere sahip olması ve bu çalışmanın amacına hizmet edebilmesi nedeniyle bu çalışmada Açık Kaynak Dağıtım Sistemi Simülatörü olan OpenDSS (Open-source Distribution System Simulator) kullanılmıştır. OpenDSS, Elektrik Gücü Araştırma Enstitüsü (EPRI- Electric Power Research Institute) tarafından geliştirilen bir güç akışı analiz programıdır. Program mimarisi genel amaçlı güç sistemi harmonik analiz araçlarına dayanmaktadır. Bu nedenle diğer güç akışı analiz programlarından farklı bir şekilde çalışır. Harmonik analizi içeren dağıtık üretim için çeşitli dağıtım planlamalarını gerçekleştirebilmektedir. Ayrıca örgülü (meshed) ve halka (ring) dağıtım sistemlerini radyal sistemler kadar kolay çözebilmektedir (Dugan ve Montenegro, 2020).

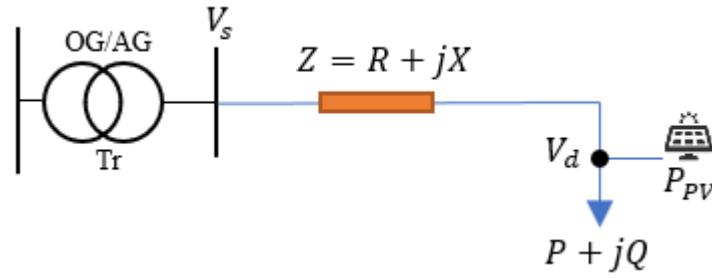
Çalışmada esas alınan yük, PV, depolama sistem modelleri ve test işleminin gerçekleştirildiği simülasyon programı hakkında verilen bu bilgilerin ardından ağ üzerinde gerçekleşen ters güç akışlarının çözümünde hangi tür çözüm yönteminin ve depolama kontrol yönteminin kullanıldığı aşağıda metodoloji kısmında belirtilmiştir.

3.2 Metodoloji

Bu başlık altında AGDŞ üzerinde gerçekleşen PV kaynaklı ters güç akışları sorunlarına (PV kaynaklı gerilim artışına), güç akışlarının çözüm türlerine, güç akışı denklemlerine, gerilim ölçüm yöntemine ve enerji depolama kontrol yöntemlerine değinilmiştir.

3.2.1 AGDŞ’de PV sistem gerilim etkisi

Bilindiği gibi AG şebekelerinde güç transferi gerçekleştirilirken YG şebekelerine kıyasla AG şebekelerinde yüksek akım ve iletken direnci (R) sebebiyle gerilim düşümleri daha fazla meydana gelmektedir. Genel bir radyal AG hattını tanımlayan Şekil 3.8’de hat uzunluğu arttıkça hat sonunda (son kullanıcı bağlantı noktasında) meydana gelen gerilim düşümü miktarı da artmaktadır. Benzer şekilde PV sistem kaynaklı ters güç akışları esnasında gerilim artışları meydana gelmekte ve bu artışlar hattın sonunda yer alan son kullanıcı bağlantı noktasında daha fazla hissedilmektedir. Şekil 3.8’de V_s , kaynak gerilimini; V_d , düğüm gerilimini; P ve Q sırasıyla, tüketilen aktif ve reaktif gücü ifade ederken P_{PV} , PV sistem tarafından şebekeye enjekte edilen aktif gücü (kW) ifade eder.



Şekil 3.8. Genel bir AG hattı tek hat şeması

AG şebekelerindeki yüksek R/X oranı (yüksek rezistans (R) ve düşük reaktans (X)) nedeniyle aktif güç kontrolünün gerilim kontrolü üzerinde daha etkili olduğu bilinmektedir (Gao ve ark., 2018; Wang ve ark., 2017).

Denklem (3.1), son kullanıcı bağlantı noktasındaki düğüm geriliminin hangi parametrelere bağlı olduğunu ifade eder. Talep edilen aktif gücün PV sistem tarafından üretilen güçten büyük olması ($P > P_{PV}$) durumunda gerilim düşümü ($V_d < V_s$); küçük olması durumunda ($P < P_{PV}$) ise gerilim artışı ($V_d > V_s$) gerçekleşecektir.

$$V_d \cong V_s - \frac{(P - P_{PV}) \cdot R + (Q) \cdot X}{V_s} \quad (3.1)$$

AGDŞ üzerinde gerçekleşen bu tür güç akışlarının çözümünde ise bilinen bazı çözüm türleri kullanılır.

3.2.2 Güç akışı çözüm türleri

Güç akışı sorunları genellikle simülasyon programlarıyla çözülen yaygın sorunlardan biridir. Temelde iki tür güç akışı çözümü kullanılmaktadır. Şekil 3.9'da yaygın olarak kullanılan güç akışı çözüm türleri gösterilmektedir.



Şekil 3.9. Temel güç akışı çözüm türleri şeması

Yinelemeli güç akışı çözümünde, yükler ve dağıtılmış jeneratörler-PV sistem gibi üreteçlerin AG hattına farklı noktalardaki penetrasyonu-gibi doğrusal olmayan (nonlinear) ögeler enjeksiyon kaynağı olarak ele alınır.

Doğrudan çözümde ise bu ögeler *Sistem Admitans* (Y_{sistem}) matrisine girdi verileri olarak dahil edilir ve yinelemeden doğrudan çözülür.

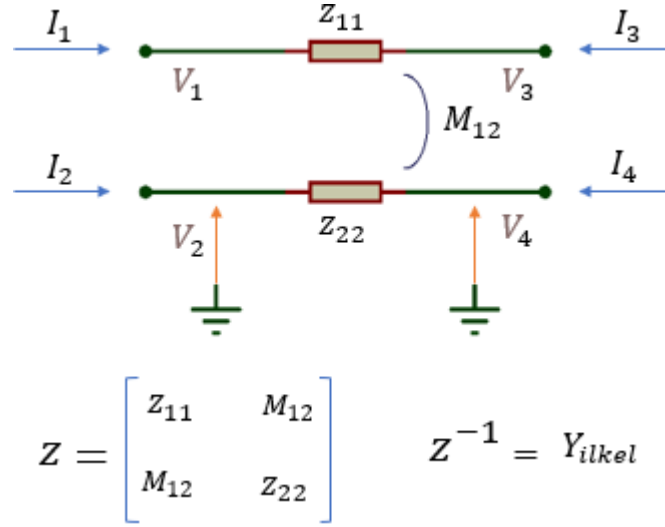
- Simülasyon programında varsayılan ve bu çalışmada kullanılacak olan güç akışı çözüm türü “Normal” mevcut enjeksiyon modudur.

“Normal” çözümün diğer çözümlere göre bazı üstünlükleri mevcuttur. Bu avantajlar Tablo 3.3’te gösterilmektedir.

Tablo 3.3. Güç akışı çözüm türlerinin karşılaştırılması

“Normal” mevcut enjeksiyon modu	Newton mod
• Normal mod daha hızlıdır. • Basit bir “sabit nokta” (fixed-point) yinelemeli yöntemdir. • “Dağıtık Üretim” (Distributed Generation) kaynaklarının kullanımının yaygınlaştığı dağıtım sistemleri için çok iyi çalışır. • Düşük zamanlı kontrol için tercih edilir.	• Çözülmesi zor olan devreler için biraz daha iyi çözüm sunar. • Daha fazla aritmetik işlem gerektirdiğinden daha yavaş çalışır. • Geleneksel ayrıştırılmış Newton-Raphson güç akışı yönteminden farklı bir çözüm algoritmasına sahiptir.

Simülasyon programı varsayılan “Normal” modunda *Sistem Admitans* modelini oluşturmak için tipik düğüm gerilimleri yöntemi olan *İlkel Admitans* (*Primitive Admitans*) veya *İlkel Y* matris yaklaşımını kullanır. Modelde akım taşıyan devre elemanları *İlkel Y* (Y_{ilkel}) matrisiyle temsil edilir. Şekil 3.10 ve Şekil 3.11 basit iki fazlı bir devre için birleşik empedans (Z) ve Y_{ilkel} matrisinin oluşumunu göstermektedir. Bu örnek devre için Z , birleştirilmiş empedansları tanımlar (bu empedansların özelliğini taşır) ve 2x2'lik bir matris ile gösterilir. Şekil 3.10’da görülen gerilimler ve akımlar toprak referansına göre düğümsel formda Şekil 3.11’de görüldüğü gibi bir denklem sistemi ile yazılmıştır (Dugan ve McDermott, 2011).



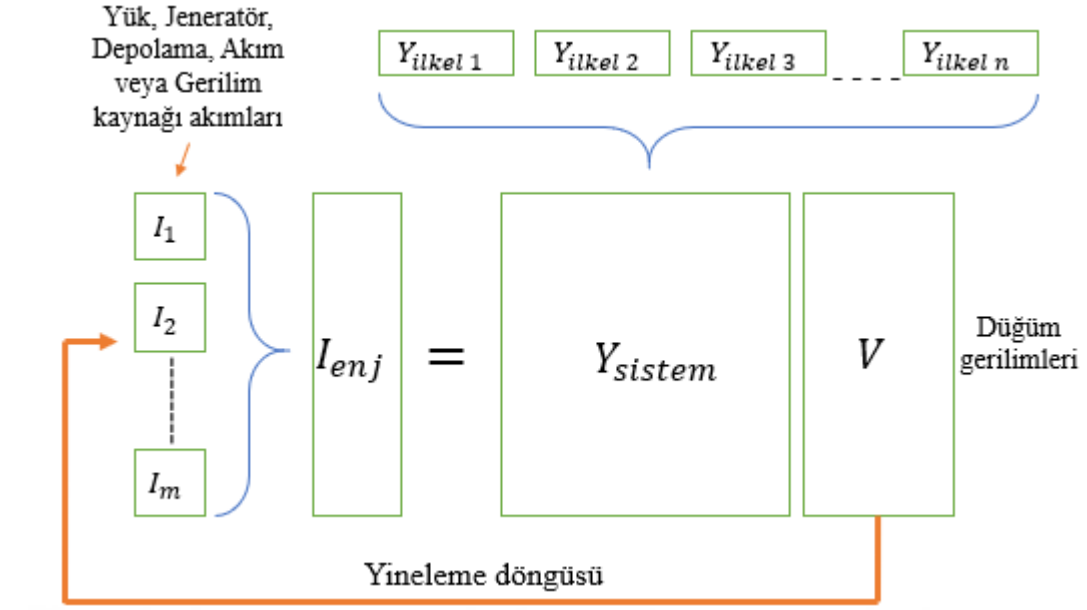
Şekil 3.10. 2 fazlı birleşik empedans (Z) ve İlkel Y matrisi

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z^{-1} & -z^{-1} \\ -z^{-1} & z^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Şekil 3.11. İlkel Y matris modeli

Şekil 3.12’de ise “Normal” çözüm algoritması görülmektedir. Tüm devre elemanları için (yükler, jeneratörler, transformatörler, hatlar vs.) oluşturulan Y_{ilkel} değerleri Y_{sistem} matrisine eklenir. Bununla beraber güç dönüşüm elemanlarının (yük, jeneratör, depolama, akım veya gerilim kaynakları) oluşturduğu akımlar ise *Enjeksiyon Akımları* (I_{enj})’nı ifade eder ve matris modelinde ilgili sütuna dahil edilir (Dugan ve McDermott, 2011).

Şekil 3.12’de düğüm gerilimlerinin istenen minimum ve maksimum sınır değerleri bandı arasına çekilmesi için bu düğüm gerilimleri ölçülür ve bu son ölçüm değerleri bir sonraki yineleme için ilk değer olarak alınır. Yani ardışık zamanlı güç akışı çözümleri gerçekleştirilirken başlangıç noktası olarak önceki çözüm noktası kullanılır. Yinelemeli güç akışı çözümünde, çözüm için makul bir tahmin ile başlanır ve sonuç için iyi bir yakınsama elde edilene kadar yineleme devam eder. Genellikle 5 ile 20 arası yinelemeden sonra istenen sonuç elde edilir. Ancak ağ üzerindeki düğüm sayısı ve DÜ kaynaklarının sayısı arttıkça yineleme sayısının da artması beklenir.



Şekil 3.12. Normal çözüm (yinelemeli güç akışı) işlem döngüsü

Bununla beraber yinelemeli güç akışı çözümünde kullanılan denklemler “Güç akışı denklemleri” başlığı altında ve bahsedilen gerilim ölçümünün hangi yöntemle gerçekleştirildiği ise “Gerilim ölçüm yöntemi” başlığı altında incelenmiştir.

3.2.3 Güç akışı denklemleri

Yinelemeli güç akışı çözümünde kullanılacak denklemin belirlenmesinde ilk adım hat üzerinde sabit bir nokta (fixed-point) belirlemektir. Belirlenen bu sabit nokta, gerilim seviyesinin düzenlenmek istenildiği herhangi bir düğüm noktası olabilir. Kirchoff’un mevcut akım yasası, baz alınan bu sabit noktaya giren akımların toplamının noktadan çıkan akımların toplamına eşit olmasını gerektirir. Ana besleme kaynağından, diğer düğümlerden ve DÜ kaynaklarından çıkan akımlar bu sabit noktaya giren akımların kaynağını belirtir. Bu sabit noktaya bağlı yükler tarafından talep edilen güçlerin toplamı ise bu noktadan çıkan akımları oluşturur. Bu eşitliğin bozulması durumunda belirtilen noktada ve dolaylı olarak diğer noktalarda gerilim dalgalanmaları meydana gelir.

Konunun anlaşılması açısından bu sabit nokta burada “ k ” harfiyle ifade edilirse k noktasında toprak referansına göre, faz gerilimi V_k ; faz akımı I_k olacaktır. Bu iki parametreden yola çıkarak (1 fazlı sistem için) k noktasındaki karmaşık güç (S_k), Denklem (3.2)’de ifade edildiği gibi hesaplanabilir. Burada yer alan I_k^* ifadesi, I_k ifadesinin eşleniği olduğunu hatırlatmakta fayda vardır.

$$S_k = V_k I_k^* \quad (3.2)$$

Sabit noktadaki akımın (I_k) hesaplanmasında, “ j ” ile ifade edebileceğimiz diğer herhangi bir düğümün k üzerindeki etkisi de doğru bir çözüm için dikkate alınmalıdır. Herhangi bir j düğümündeki gerilim V_j ve Y_{sistem} matrisinin her bir ögesi Y_{kj} ile ifade edilirse karmaşık akım olan I_k Denklem (3.3)’te olduğu gibi toplam formülüyle ifade edilebilir.

$$I_k = \sum_{j=1}^N Y_{kj} V_j \quad (3.3)$$

Denklem (3.3)’ün Denklem (3.2)’de yazılması sonucu elde edilecek yeni güç denklemini Denklem (3.4)’te belirtildiği şekilde olacaktır.

$$S_k = V_k \left(\sum_{j=1}^N Y_{kj} V_j \right)^* = V_k \sum_{j=1}^N Y_{kj}^* V_j^* \quad (3.4)$$

V_k ’in büyüklük ve açısı sahip bir fazör olduğunu belirtmek gerekir ki bu durumda $V_k = |V_k| \angle \theta_k$ eşitliğinin Denklem (3.4)’te yazılması uygun olur. Ayrıca karmaşık bir yapıya sahip Y_{kj} , gerçek ve sanal kısımlar olan G_{kj} (iletkenlik) ve B_{kj} (süseptans)’den oluşur ve $Y_{kj} = G_{kj} + jB_{kj}$ şekliyle yazılabilir. Bu her iki eşitliğin kullanılmasıyla Denklem (3.5) elde edilir.

$$\begin{aligned} S_k &= V_k \sum_{j=1}^N Y_{kj}^* V_j^* = |V_k| \angle \theta_k \sum_{j=1}^N (G_{kj} + jB_{kj})^* (|V_j| \angle \theta_j)^* \\ &= |V_k| \angle \theta_k \sum_{j=1}^N (G_{kj} - jB_{kj}) (|V_j| \angle -\theta_j) \\ &= \sum_{j=1}^N (|V_k| |V_j| \angle (\theta_k - \theta_j)) (G_{kj} - jB_{kj}) \end{aligned} \quad (3.5)$$

Euler açılımı dikkate alınarak ($V = |V| \angle \theta = |V| \{\cos \theta + j \sin \theta\}$) Denklem (3.5) yeniden düzenlenirse Denklem (3.6) elde edilir.

$$S_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (\cos(\theta_k - \theta_j) + j \sin(\theta_k - \theta_j)) (G_{kj} - jB_{kj}) \quad (3.6)$$

Kompleks güç olan $S_k (P_k + jQ_k)$, gerçek ve sanal kısımları olan aktif ve reaktif güç bileşenlerine ayrılırsa son durumda Denklem (3.7) ve Denklem (3.8) elde edilir.

$$P_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (G_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j) + B_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j)) \quad (3.7)$$

$$Q_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (G_{kj} \sin(\theta_k - \theta_j) - B_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j)) \quad (3.8)$$

AG şebekelerinde yüksek R/X oranı nedeniyle aktif güç kontrolünün gerilim kontrolü üzerinde etkili olduğu daha önce belirtilmişti (bakınız 3.2.1). Bu durumda reaktans (X)'in gerilim üzerine etkisi ihmal edilirse elde edilecek yeni aktif güç denklemi Denklem (3.9)'da belirtildiği gibi olacaktır.

$$P_k = \sum_{j=1}^N |V_k| |V_j| (G_{kj} \cos(\theta_k - \theta_j)) \quad (3.9)$$

Son durumda elde edilen Denklem (3.9), sadece bir noktada (k) veya düğümde gerçekleşen aktif güç akışını ifade etmektedir. Diğer düğümler için de aynı denklem kullanılarak AGDŞ üzerinde gerçekleşen güç akışları hesaplanabilir.

Düğüm k 'ye bağlı (ayrıca dolaylı etki sebebiyle diğer düğümlere bağlı) PV sistem gibi DÜ kaynaklarının AG ağına enjekte edeceği güçler kontrol edilerek k düğümündeki V_k geriliminin yükselmesi veya düşümü önlenabilir. Bu işlemin gerçekleştirilebilmesi için V_k geriliminin düzenli aralıklarla ölçülmesi ve istenilen sınır değerleri arasında olup olmadığının kontrol edilmesi gerekir. Burada değinilen gerilim ölçümünün ne tür bir yöntemle yapılacağı bir sonraki alt başlıkta incelenmiştir.

3.2.4 Gerilim ölçüm yöntemi

AG ağı üzerinde herhangi bir düğüm noktasındaki gerilimin istenen sınır değerleri arasında olup olmadığının tespiti için düzenli aralıklarla düğüm gerilimi ölçülür. Bu ölçüm sonucunda gerilimde herhangi bir sapmanın tespit edilmesi ağ gerilimini

düzenleyici yönde dağıtım ağına bir müdahaleyi gerekli kılar. Burada bahsedilen sınır değerleri bazı standartlar ölçüsünde belirlenmiştir.

BS EN50160 (İngiltere) standardına göre, normal çalışma koşulları altında dakika başına ölçülen besleme etkin gerilim değerlerinin 10 dakikalık ortalamalarının hiçbirisi, nominal besleme etkin gerilim değerinin (U_n -faz nötr arası nominal etkin gerilim değeri) $\pm\%10$ 'unu/ $\pm\%15$ 'ini geçmemelidir. Ayrıca haftalık periyotta bu 10 dakikalık ortalamaların $\%95$ 'inin de U_n 'in $\pm\%10$ 'unu geçmemesi gerekmektedir (İSE, 2010).

Uluslararası standartlarda üretilen elektrikli cihazların sağlıklı bir şekilde çalışabilmesi için DAO'nun AG ağı gerilimini belirtilen sınırlar içerisinde tutması yasal bir yükümlülüktür.

Bununla beraber gerilimin yasal sınırlar içerisinde tutulabilmesi için, gerilim ihlallerine neden olabilecek DÜ kaynaklarının ağ ile bağlantısının kesilmesi gerekir ki bu da mevcut üretim kaynaklarının verimsiz kullanılmasına neden olabilecek bir durumdur. Ayrıca genel amaç enerji kalitesi ve müşteri konforu olduğundan müşteriye ait yüklerin devreden çıkartılması veya kontrol edilmesi mümkün görülmediğinden, gerilim dalgalanmalarının düzenlenmesi için enjeksiyon kaynaklarının kontrolü daha mümkün görülmektedir.

Gerilim değerlerinin yasal sınırlar içerisinde tutulabilmesi açısından depolama sistemi burada oldukça önemli bir rol üstlenir:

- İlk olarak, ölçüm sonucu elde edilen 10 dakikalık ortalama rms (etkin) değerlerinden herhangi biri U_n 'in üzerine çıkarsa (bu çalışmada üst eşik değeri U_n 'in $\pm\%10$ 'u seçilmiştir) depolama yük olarak devreye alınır ve ihtiyaç fazlası enerji depolama birimlerinde depo (şarj) edilir. Böylece gerilim artışı önlenmiş olunur.
- İkinci olarak, ölçüm sonucu elde edilen 10 dakikalık ortalama rms değerlerinden herhangi biri U_n 'in altına düşerse (bu çalışmada alt eşik değeri U_n 'in $-\%6$ 'sı seçilmiştir) önceden depolanmış enerji sevk veya deşarj edilir. Böylelikle AG dağıtım ağına güç ve voltaj desteği sağlanır.

Bu iki eylem sonucunda PV sistemlere ek olarak kullanılan PEDS yardımıyla PV sistemin değişken güç çıktısı kontrol edilebilir ve PV kaynaklı gerilim yükselmeleri önlenabilir. Gerilim yükselmelerinin önlenmesi için kullanılacak PEDS'in ne şekilde kontrol edileceği ise bir sonraki başlık altında incelenmiştir.

Ayrıca bu tez çalışmasında 10 dakikalık ortalama etkin gerilim değerleri yerine elde edilen veriler nedeniyle saatlik ortalama veriler dikkate alınarak güç akışı analizi gerçekleştirilmiştir.

3.2.5 Pil enerji depolama kontrol yöntemleri

Bu çalışmada simülasyon programının yapısında mevcut olan iki tür depolama kontrol yöntemi ele alınmış ve uygulanmıştır: *Kendi Kendine Gönderim* (Self-Dispatch) ve *Merkezi* (Centralized) kontrol.

3.2.5.1 Kendi Kendine Gönderim kontrol yöntemi

Kendi Kendine Gönderim kontrol yönteminde her depolama ögesi, kendisinden talep edilen güç miktarı oranında deşarj olur. Yani depolama çıkışına bağlı bulunan yükün gücüne göre bu oran değişir. Yük gücü arttıkça depolama ögesi (akü/pil/batarya) daha hızlı deşarj olur. Şarj veya deşarj güç oranı, depolama ögesinin maksimum giriş/çıkış gücü ile sınırlıdır (Tesla Powerwall 2 için maksimum sürekli giriş/çıkış gücü 5 kW, G99 ve Avrupa).

Benzer işlem şarj durumu için de geçerlidir. PV sistemin ürettiği güç miktarı oranında depolama ögesi şarj olur ve PV sistemin ürettiği güç miktarı arttıkça da batarya daha hızlı şarj olacaktır.

Pratikte her bir depolama ögesi bir mikro kontrolör (Tesla modelinde bu görevi Gateway üstlenir) tarafından komşu evde bulunan bataryalardan bağımsız olarak yönetilir. Bu mikro kontrolör PEDS'in bağlı bulunduğu düğüm gerilimini ölçer ve bunu düzenlemeye yönelik girişimde bulunur. Mikro kontrolör, bataryaların tamamen dolması durumunda şarj işlemini sonlandırır. Aynı şekilde bataryaların hangi seviyeye kadar deşarj edileceği de yine bu mikro kontrolör tarafından belirlenir.

İlk olarak test edilen bu kontrol yöntemine ait çalışma sonuçları “Bulgular ve Tartışma” başlığı altında yer alan “Durum Çalışması 1” alt başlığında değerlendirilmiştir.

Bu kontrol yöntemine ait uygulama işlem basamakları şu şekilde yapılmıştır:

- Her bir depolama ögesinin takip edeceği ve depolama ögelerinin günün hangi zamanında ve hangi güç oranında şarj veya deşarj olacağını belirten bir *Depolama Yük Şekli* (Load Shape) manuel olarak oluşturulur,
- *Depolama Yük Şekli* oluşturulurken depolama ögelerinin ne zaman ve hangi güç oranında şarj veya deşarj olacağı yine manuel olarak hesaplanır (günlük yük eğrisi ve PV üretimi dikkate alınarak),

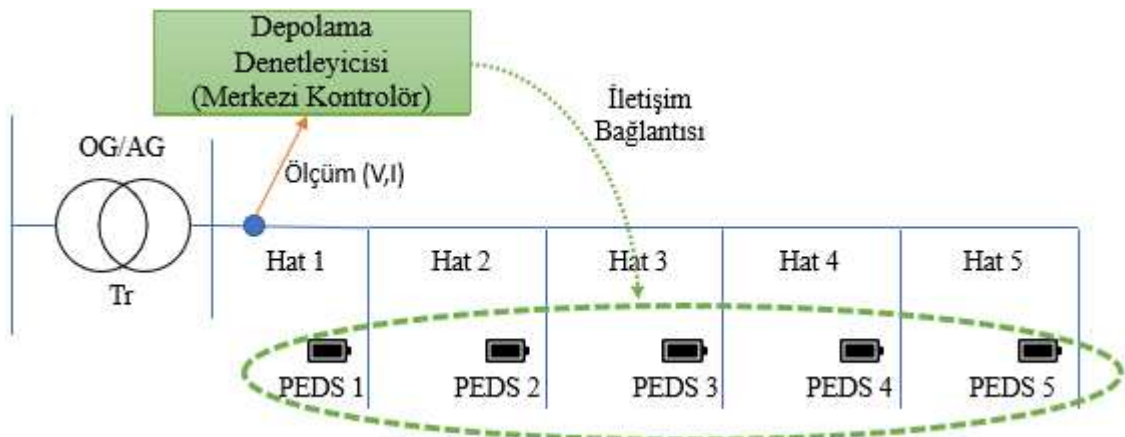
- Farklı senaryolar düşünülerek (bu yöntem için 8 farklı senaryo) oluşturulan her bir *Depolama Yük Şekli* simülasyon programına tanımlanır ve her bir *Kendi Kendine Gönderim* depolama kontrol senaryosu için test işlemi gerçekleştirilir,
- Son olarak her bir senaryo için elde edilen veriler değerlendirilir.

3.2.5.2 Merkezi kontrol yöntemi

Şekil 3.13'te görülen “Depolama Denetleyicisi”, hattın ilk terminaline konumlandırılan bir çoklu ölçüm cihazı üzerinden gerekli parametreleri (güç, akım, gerilim) düzenli olarak almaktadır. Hat üzerinde belirtilen ölçüm noktasında ters güç akışlarının oluşması (belirtilen sınır değerin üzerine çıkması) veya ölçüm noktasındaki gerilim değerlerinin yükselmesi (üst sınır 1,1 pu) durumunda “Depolama Denetleyicisi” tarafından depolama öğeleri şarj konumuna alınır. Benzer şekilde yükün artması sebebiyle gerilim düşümü (alt sınır 0,94 pu) olması durumunda ise depolama öğeleri deşarj konumuna ayarlanır. Her işlem döngüsünde düzenlenen parametreler yeniden okunur ve istenen gerilim seviyesi elde edilene kadar (pil kapasitesi ile sınırlı) bu işlem tekrar eder.

Ölçülen güç değerleri sonucunda ortalama değer hesaplanır ve “Depolama Denetleyicisi” bu ortalama güç değerini her faz için sınır değeri ile karşılaştırarak gerekli işlemi gerçekleştirir.

İstenmesi durumunda ortalama değer yerine herhangi bir faza ait maksimum güç değeri baz alınarak da şarj/deşarj işlemi yapılabilir. Bu durumda “Depolama Denetleyicisi” sürekli olarak en yüklü fazyı bulmaya çalışır ve o faza bağlı bulunan PEDS’i istenen amaç için yönetir (Burada, PEDS 1 ilk konut ve PEDS 5 son konuta ait Pil Enerji Depolama Sistemi’ni ifade eder).



Şekil 3.13. Merkezi depolama kontrol modeli

Ancak şunu da belirtmek gerekir ki gerçek bir ağda bir besleyici çıkışında yüzlerce düğüm olabileceği göz önünde bulundurulursa iyi bir *Merkezi* kontrol için çok iyi bir iletişim ve bilişim alt yapısının olması gerekir.

Bu çalışmada kullanılan simülasyon programı daha gerçekçi sonuçların elde edilmesi açısından haberleşme için verilerin alınmasında veya iletilmesinde 1 dakikalık gecikmeyi baz almaktadır. Kullanılan program dolayısıyla 1 dakikalık gecikme dikkate alınmıştır.

Son olarak çalışmaya ait testlerin yapılması ve test bulgularının elde edilmesi için şu adımlar sırasıyla izlenir:

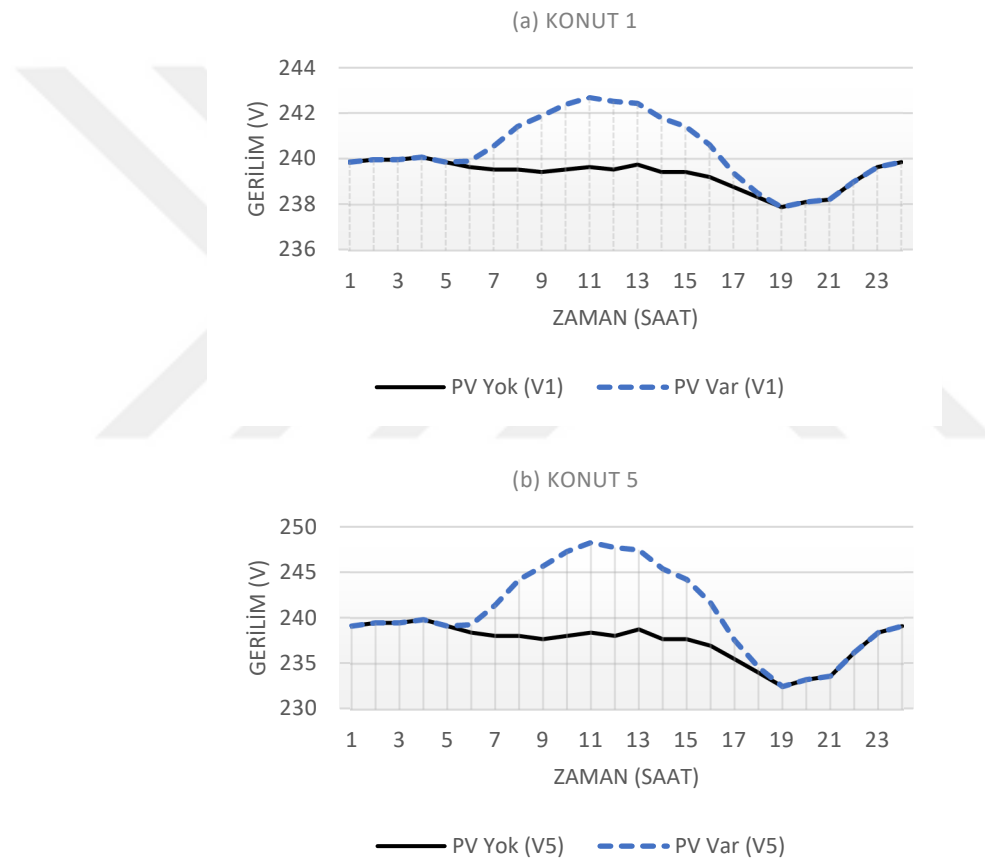
- Öncelikle, sadece Yük ve PV modeli ilgili programa kodlanır ve depolama etkisi olmadan çıktı verileri alınır ve değerlendirilir,
- Ardından depolama modeli programa eklenir, simülasyon yeniden çalıştırılır ve elde edilen yeni çıktılar öncekiler ile karşılaştırılır, depolamanın gerilim artışı üzerine etkisi incelenir,
- Son olarak depolamanın boyutu artırılır ve son durumda oluşan etki yeniden incelenir.

Burada yer alan son iki madde her iki kontrol yöntemi için ayrı ayrı uygulanmış ve elde edilen veriler “Bulgular ve Tartışma” başlığı altında değerlendirilmiştir.

4 BULGULAR VE TARTIŞMA

Bir önceki başlıkta detaylı olarak belirtilen metodun uygulanması ile elde edilen veriler aşağıda değerlendirilmiştir.

Şekil 4.1’de enerji depolama kullanılmadan önce, yük ve PV sistemin şebeke (AGDŞ) gerilimi üzerindeki etkisi görülmektedir. Besleyici hattın son noktasına bağlanan evin (konut 5) gerilim profiline bakıldığında hem gerilim düşümünün hem de gerilim artışının ilk eve göre (hat başına bağlanan ilk ev-konut 1) daha fazla olduğu görülmektedir. Gündüz saatlerinde gerçekleşen gerilim artışları, PV sistemin AGDŞ’ye güç enjekte etmesinden kaynaklanmaktadır.



Şekil 4.1. PV sistemin gerilim üzerine etkisi

AGDŞ’de gerçekleşen bu gerilim artışlarına karşı depolama sistemlerinin nasıl tepki vereceği, aşağıda Durum çalışması 1’de ve Durum çalışması 2’de, toplam 12 farklı senaryoda test edilmiştir. Durum çalışması 1, yerel mikro kontrolör üzerinden gerçekleştirilen *Kendi Kendine Gönderim* kontrol yönteminin sonuçlarını ve Durum çalışması 2, *Merkezi* kontrol yönteminin sonuçlarını içermektedir.

4.1 Durum Çalışması 1

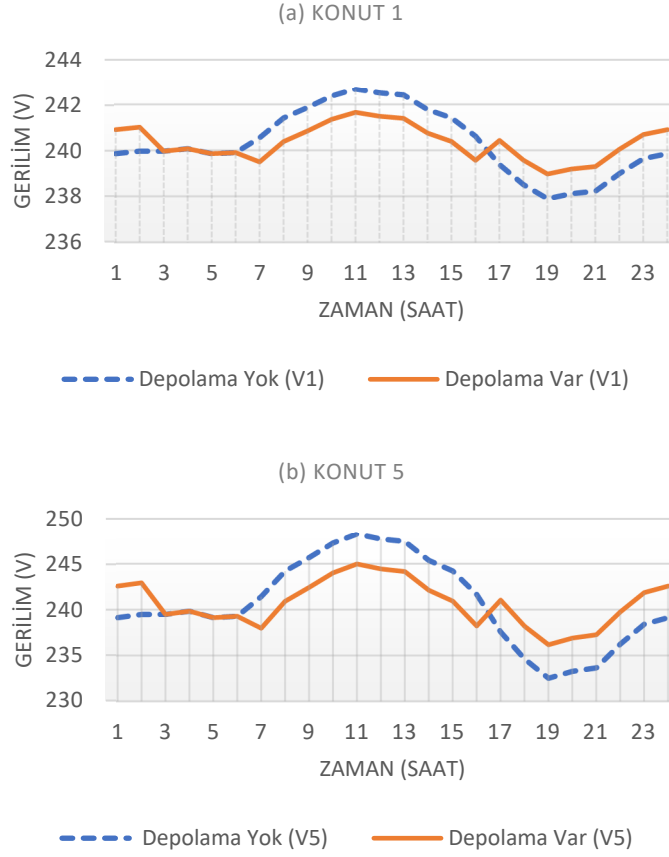
Burada, *Kendi Kendine Gönderim* depolama kontrol yöntemi için birbirinden farklı 8 senaryo için test işlemi gerçekleştirilmiştir. Her bir senaryoda depolama öğeleri için manuel olarak bir *Depolama Yük Şekli* oluşturulmuş ve uygulanmıştır.

- Ayrıca, her bir senaryoda pil kapasitesi (kWh) veya pil giriş/çıkış gücü (kW) değiştirilerek, pil enerji depolamasının PV sistemden kaynaklı gerilim artışı üzerine etkisi incelenmiştir.

4.1.1 Senaryo 1: 13,5 kWh/1 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi

Pil enerji depolamasının şebeke gerilimini nasıl düzenlediğini görebilmek için Senaryo 1’de ilk olarak 1 adet 13,5 kWh enerji kapasitesine sahip Tesla Powerwall 2 kullanılmış ve pil giriş/çıkış gücü maksimum 1 kW ile sınırlandırılmıştır (depolama sistemi 1 saatte maksimum 1 kWh enerji şarj/deşarj edebilecektir).

Aşağıda verilen Şekil 4.2 incelendiğinde, düşük depolama gücü nedeniyle güneş ışınımının yoğun olduğu 09.00-15.00 saatleri arasında üretilen enerjinin yeteri kadar depolanamadığı, bu saatlerde tüketilen ve depolanan enerjiden geriye kalan kısmının AG şebekesine enjekte edildiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle 09.00-15.00 saatleri arasında gerilim düzeyinin kısmen yüksek seyrettiği, şekilde görülmektedir (üretilen güç > tüketilen + depolanan güç).



Şekil 4.2. Senaryo 1 gerilim profilleri

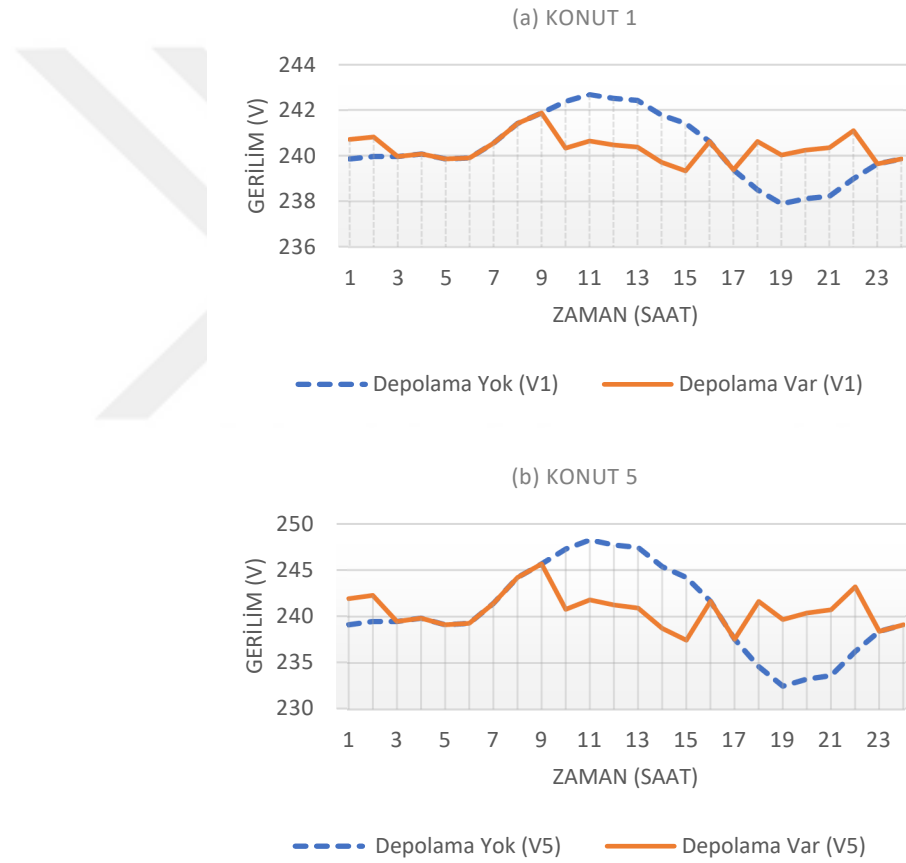
Benzer durum tüketimin yoğun olduğu 17.00-22.00 saatleri arasında da görülmektedir. İhtiyaç duyulan enerji pil tarafından yeterince karşılanmadığından (düşük depolama gücü nedeniyle) geri kalan enerji ihtiyacı şebekeden karşılanmıştır. Yani, pil çıkış gücü talep (yük) gücünden daha düşük olduğundan pil tarafından AG şebekesine yeterince güç desteği sağlanamamıştır. Bu nedenle 17.00-22.00 saatleri arasında gerilim seviyesinin kısmen düşük seyrettiği, dolayısıyla pil tarafından gerilimin yeterince düzenlenemediği görülmektedir (talep gücü > pil gücü).

Saat 22.00'den sonra, talep edilen güç azaldığından deşarj olmaya devam eden pil (bir sonraki gün tekrar enerji depolayabilmesi için pilin gün doğumuna kadar deşarj olması gerekir) nedeniyle gerilim seviyesi kısmen yükselmiştir. Enerjisinin %30'unu saat 24.00'ten sonrasına saklayan pil, saat 03.00'e kadar geri kalan enerjisinin bir kısmını tüketerek %20 rezerv durumuna gerilemiştir. Rezerv miktarı acil durumlarda kullanılması için ayrılan enerji miktarıdır.

Bu senaryoda, gerilim yeterince düzenlenemediğinden pil nominal gücünün artırılması gerektiği anlaşılmaktadır.

4.1.2 Senaryo 2: 13,5 kWh/2 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi

Senaryo 2’de depolama kapasitesi 13,5 kWh ve nominal pil giriş/çıkış gücü maksimum 2 kW olacak şekilde ayarlanmıştır. Şekil 4.3’te, yoğun üretim (09.00-16.00) ve yoğun tüketim (17.00-23.00) saatlerine ayarlanan depolama sisteminin bu saatler arasında tepe seviyelerini tıraş ettiği (peak shave) görülmektedir. Depolama ögesi belirtilen saatlere tahsis edildiğinden, depolama ögesinin boştaki çalıştığı 23.00-24.00 ve 03.00-09.00 saatleri arasında herhangi bir eylem (şarj/deşarj) gerçekleşmemiştir. Bu senaryoda, gerilimin 240 V (transformatör çıkışı nominal faz-nötr etkin gerilim değeri) seviyesine gün boyunca yeterince yakınsanamadığı görülmektedir.

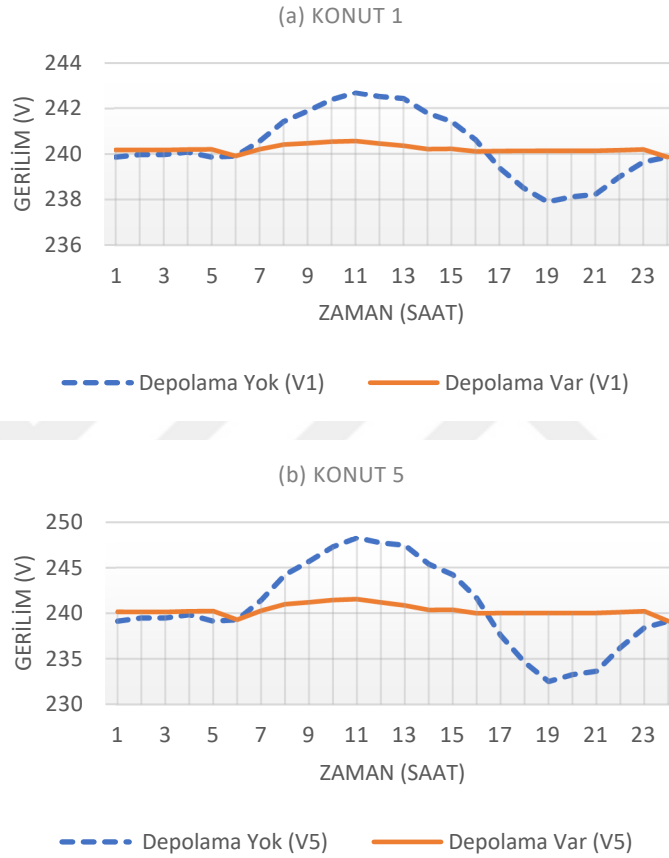


Şekil 4.3. Senaryo 2 gerilim profilleri

4.1.3 Senaryo 3: 13,5 kWh/3 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi

Senaryo 3’te depolama kapasitesi tekrar 13,5 kWh olarak ayarlanmış ve nominal pil giriş/çıkış gücü maksimum 3 kW’a çıkarılmıştır. Burada, yerel depolama kontrol ögesi bir *Depolama Yük Şekli*’ni takip edecek şekilde (günün farklı zamanlarında değişken güç oranlarında (0-3 kW arasında) şarj/deşarj olacak şekilde) ayarlanmıştır. Yani, gün

ışınımına bağlı olarak PV sistem çıkış gücü arttıkça depolama ögesinin nominal giriş gücü de artmaktadır. Burada amaç, PV sistemin ürettiği enerji miktarı kadar enerji depolamaktır. Benzer şekilde, tüketim miktarı arttıkça da depolama ögesinin çıkış gücü, talebi karşılamak amacıyla artmaktadır. Bu senaryoda, depolama ögesinin giriş/çıkış gücü maksimum üretim ve tüketimi karşılayabilecek güçte olduğundan, Şekil 4.4'te görüldüğü gibi önceki senaryolara göre daha kararlı bir gerilim seviyesi elde edilmiştir.

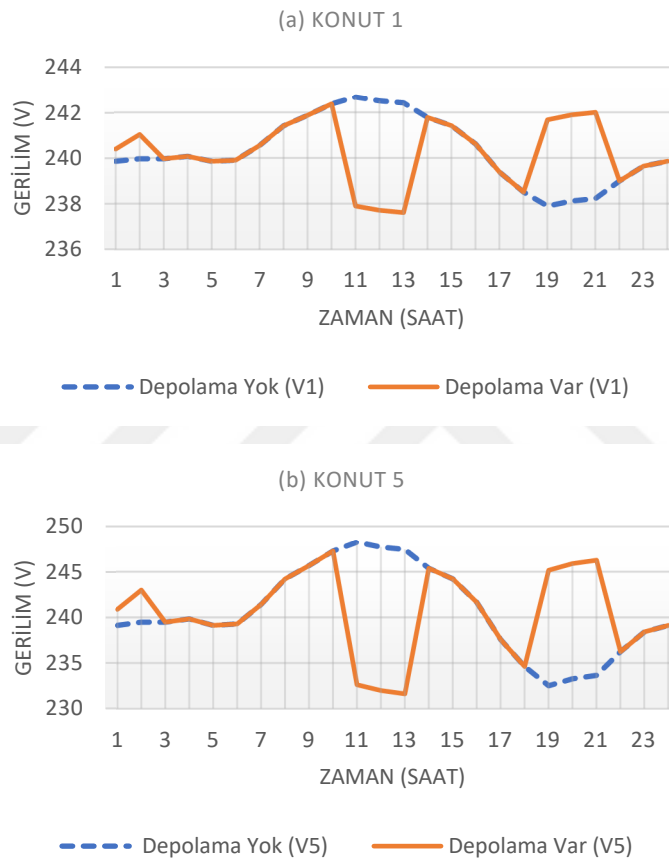


Şekil 4.4. Senaryo 3 gerilim profilleri

4.1.4 Senaryo 4: 13,5 kWh/5 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi

Senaryo 4'te depolama kapasitesi 13,5 kWh olarak seçilmeye devam edilmiş ve nominal pil giriş/çıkış gücü, Tesla Powerwall 2'nin sürekli sağlayabileceği maksimum giriş/çıkış gücü olan sabit 5 kW değerine ayarlanmıştır. Depolama elemanının giriş/çıkış gücü yüksek olduğundan Şekil 4.5'te görüldüğü gibi kısa sürede (ortalama 2,5 saatte) şarj ve deşarj işlemi gerçekleşmiştir. Gündüz saatlerindeki gerilim artışı, ancak kısıtlı bir zamanda önlenebildiğinden ve akşam saatlerinde gerilim seviyesinin yükselmesinden dolayı bu senaryonun çalışmanın amacına yeterli derecede hizmet edemediği görülmüştür.

Bununla beraber PV sistemin 11.00-13.00 saatleri arasında saat başına yaklaşık 3 kWh enerji üretmesi (bakınız Şekil 3.4) nedeniyle, 5 kW sabit güç değerine ayarlanan pilin ayrıca şebekeden enerji talebinde bulunacağı durumu da unutulmamalıdır. 11.00-13.00 saatleri arasında gerilimin kararlı seviyenin çok altına düşmesi bu durumun göstergesidir. Buradaki temel amaçlardan biri, tüketimden arta kalan enerjinin depolanması ve daha sonra kullanılması iken pilin şebekeden enerji talebinde bulunması istenmeyen bir durumdur.

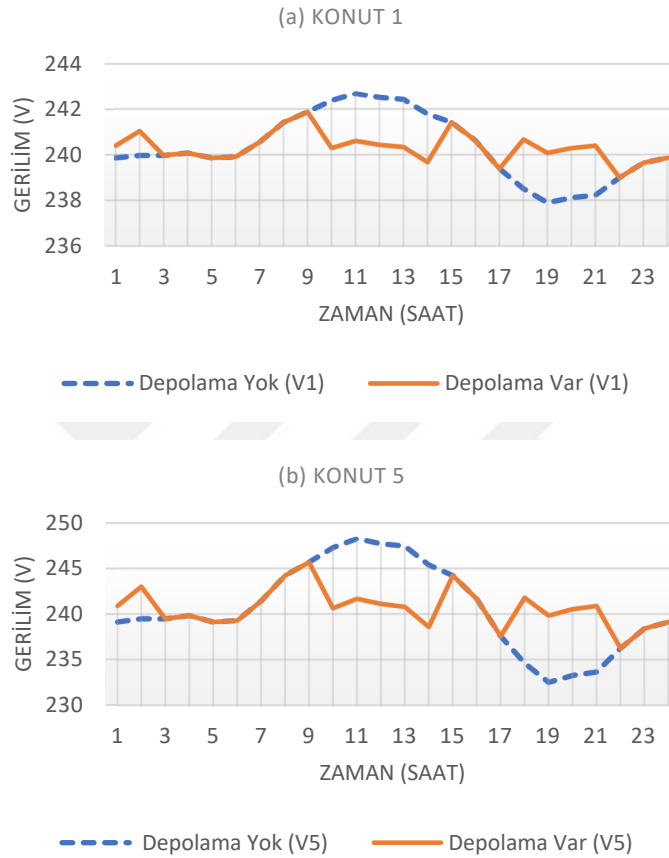


Şekil 4.5. Senaryo 4 gerilim profilleri

4.1.5 Senaryo 5: Farklı bir *Depolama Yük Şekli* ile 13,5 kWh/5 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi

Senaryo 4'te baz alınan kapasite ve güç değerleri, senaryo 5'te farklı bir *Depolama Yük Şekli* ile yeniden test edilmiştir. Burada, depolama ögesinin takip edeceği yeni bir *Depolama Yük Şekli* ile değişken güç oranlarında (0-5 kW arasında) ve daha geniş bir zaman diliminde depolama elemanının şarj/deşarj olması sağlanmıştır. Ortaya çıkan sonuç Şekil 4.6'da görülmektedir. Şekil görünümü Senaryo 2'ye benzemekle beraber, Senaryo 2'ye göre şarj/deşarj işlemi bu senaryoda daha dar bir zaman diliminde

gerçekleştirilmiştir (şarj 09.00-15.00 ve deşarj 17.00-22.00, 01.00-03.00 saatleri arası). Burada pil gücü Senaryo 2'ye göre daha yüksek olduğundan gündüz üretilen enerjinin tamamına yakını depo edilebilmekte ve akşam saatlerinde maksimum talep gücü karşılanabilmektedir. Yüksek pil gücü nedeniyle bataryanın tam dolması ve rezerv durumuna kadar deşarj olması Senaryo 2'ye göre daha kısa sürede gerçekleşmiştir.



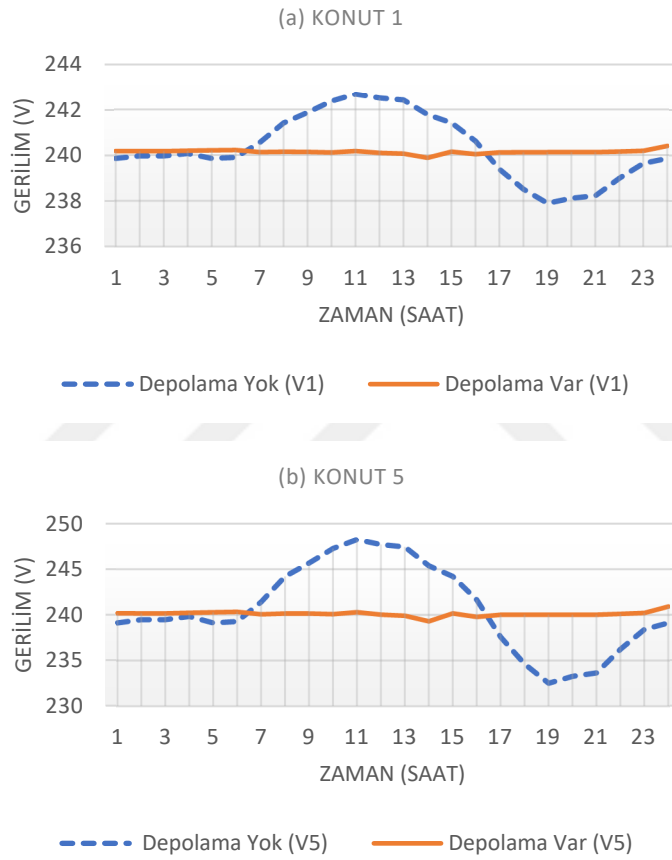
Şekil 4.6. Senaryo 5 gerilim profilleri

4.1.6 Senaryo 6: 27 kWh/3 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi

Bu senaryo modelinde depolama kapasitesi iki katına (27 kWh) çıkarılmıştır. Pratikte böyle bir depolama ünitesi bulunmadığından⁸ 2 adet Tesla Powerwall 2 paralel bağlanarak bu kapasite değeri elde edilebilir. Bu modelde pil giriş/çıkış nominal gücü, maksimum 3 kW değerine ve Senaryo 3'te olduğu gibi bir *Depolama Yük Şekli*'ni takip edecek şekilde ayarlanmıştır. Yüksek kapasite değeri nedeniyle bu modelin Senaryo 3'e göre daha düzgün bir sonuç verdiği Şekil 4.7'de görülmektedir. Gün doğumundan gün batımına kadar PV sistem tarafından üretilen enerjinin tüketilmeyen kısmının tamamına

⁸ Avrupa için üretilen Tesla Powerwall 2 modeli maksimum 13,5 kWh/5 kW kapasite ve güç değerine sahiptir. Bu nedenle 27 kWh kapasite değerinin elde edilmesi için 2 adet Tesla Powerwall 2 kullanılmalıdır.

yakını, yüksek pil kapasitesi nedeniyle pilde depolanmıştır. Gündüz saatlerinde şebekeye enerji enjekte edilmediğinden şebeke geriliminin normal seyrettiği görülmektedir. Akşam saatlerinde ise ihtiyaç duyulan enerji depolama sisteminden karşılandığından şebeke geriliminin yine istenen seviyede olduğu, şekilde görülmektedir. Ancak bu modelde iki adet depolama elemanına ihtiyaç duyulduğundan, modelin pratikte kullanımı toplam sistem maliyetini arttıracaktır. Benzer depolama stratejisi sergilemesi ve daha düşük maliyetli olması nedeniyle senaryo 3'ün pratikte kullanımı bu modele göre daha uygun görülmektedir.



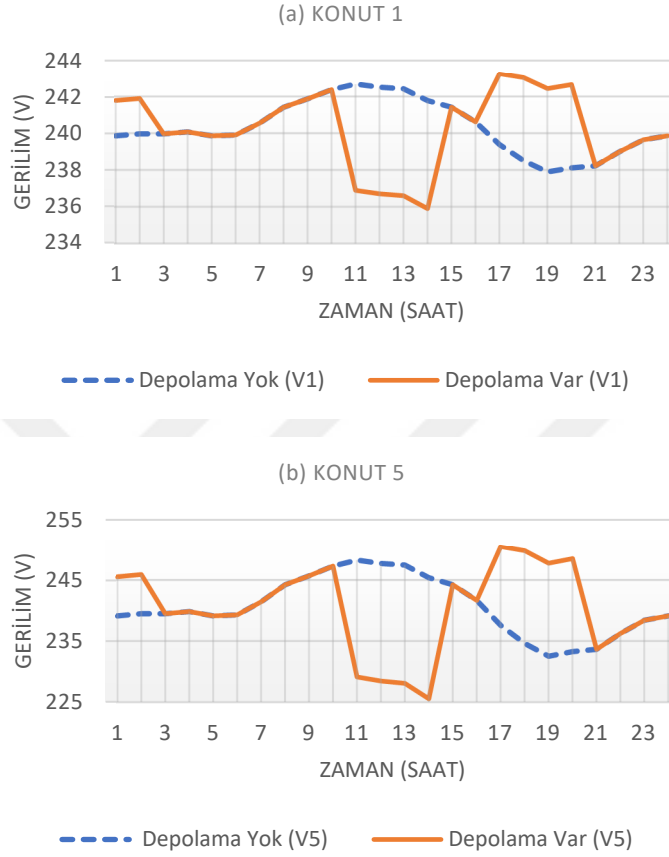
Şekil 4.7. Senaryo 6 gerilim profilleri

4.1.7 Senaryo 7: 27 kWh/6 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi

27 kWh/6 kW kapasite ve güç değeri için yapılan simülasyon sonucunda oluşan gerilim profilleri Şekil 4.8'de görülmektedir. Yüksek giriş/çıkış gücü ve kapasite değeri nedeniyle ortalama 4 saatlik süre zarfında şarj ve deşarj işlemleri gerçekleştirilmiştir.

PV sistemin ürettiği maksimum güçten daha yüksek bir depolama gücünün seçilmesi durumunda, depolama ögesi tam doluluk oranına ulaşmak için ayrıca şebekeden enerji talebinde bulunacaktır. 11.00-14.00 saatleri arasında gerilim seviyesinin konut 1

için 236 V'a ve konut 5 için 225 V'a kadar düşmesinin nedeni, depolama ögesinin şebeke için ayrıca bir yük konumuna geçmesinden kaynaklandığı söylenebilir. 17.00-21.00 saatleri arasında ise talep edilen güçten daha fazla bir gücün şebekeye enjekte edilmesi sonucu gerilim seviyesinin özellikle konut 5'te bir hayli yükseldiği görülmektedir.



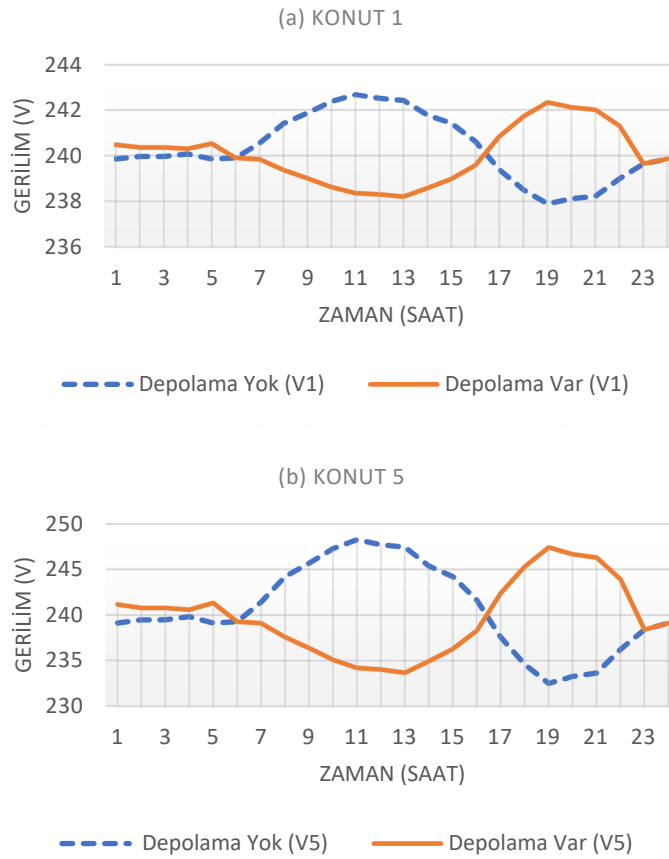
Şekil 4.8. Senaryo 7 gerilim profilleri

Ortaya çıkan sonuç, bu depolama modelinin, bu çalışmada baz alınan yük ve PV sistemle beraber pratikte kullanılamayacağını (gerilim seviyeleri, yüksek pil gücü ve toplam sistem maliyetini artırması nedeniyle) göstermektedir.

- Özellikle 6 kW gibi yüksek oranda güç transferinin uzun süre gerçekleştirilmesi elektrik tesisatında ısınmalara sebep olacaktır. Birleşik Krallık-G99 ve Avrupa Birliği standartlarında bir konut müşterisinin şebekeden talep edeceği veya şebekeye enjekte edebileceği güç, maksimum 5 kW ile sınırlandırılmıştır. G98 standartlarında ise bu güç değeri 3,68 kW ile sınırlandırılmıştır. Sonuç olarak bu senaryo, G98 veya G99 şebeke bağlantı koşullarının dikkate alınması gerektiğini göstermektedir.

4.1.8 Senaryo 8: Farklı bir Depolama Yük Şekli ile 27 kWh/6 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi

Son olarak bu senaryoda, 27 kWh/6 kW kapasite ve güç değerleri tekrar baz alınmış ve Senaryo 7'den farklı olarak, depolama giriş/çıkış gücünü kısmen sınırlayacak yeni bir *Depolama Yük Şekli* modellenmiştir. Ayrıca güç kısıtlaması ile beraber depolama ögesinin daha geniş bir sürede işlem gerçekleştirmesine olanak sağlanmıştır. Test sonucunda elde edilen gerilim profilleri Şekil 4.9'da görülmektedir. Bir önceki senaryoya göre burada daha kabul edilebilir bir sonuç elde edilse de Senaryo 7'de belirtilen sebepler nedeniyle bu modelin de pratik kullanımı uygun değildir.



Şekil 4.9. Senaryo 8 gerilim profilleri

Yukarıda, *Kendi Kendine Gönderim* depolama kontrol yöntemi ile test edilen tüm bu senaryolar sonucunda, pil enerji depolamasının (hem depolama kapasitesinin hem de depolama gücünün ayrı ayrı) AGDŞ'de PV kaynaklı gerilim artışlarını önlemede etkili olduğu görülmüştür. Her ne kadar bu kontrol yaklaşımı ile beklenen sonuçlar genel düzeyde elde edilmiş olsa da sonuçların optimum seviyede olmadığı, dolayısıyla bu kontrol yaklaşımının gerilim kontrolünde kısmen zayıf kaldığı görülmektedir. Bunun

nedeni, yerel mikro kontrolörün çözüm için sadece bağlı bulunan düğüm gerilimini baz almasıdır. Oysaki daha etkili bir güç akışı çözümü için diğer düğümlerde gerçekleşen güç akışlarının da dikkate alınması gerektiği, daha önce başlık 3.2.3'te belirtilmişti. Yine de daha etkili sonuçların elde edilip edilemeyeceği aşağıda, tüm hat üzerinde gerçekleşen güç akışlarını dikkate alan farklı bir kontrol yaklaşımı (*Merkezi*) ile yeniden test edilmiştir.

4.2 Durum Çalışması 2

Bir önceki bölümde (başlık 3.2.5'te) belirtilen *Merkezi* kontrol yaklaşımının test edilmesi sonucu elde edilen veriler bu başlık altında incelenmiştir. Burada, *Merkezi* kontrol için iki farklı depolama stratejisi kullanılmıştır.

İlki, deşarj için *Tepe Tıraş* (Peak Shave) ve şarj için *Zaman* (Time) modlarının kullanıldığı stratejidir. Yani, belirlenen zaman aralıklarında bataryalar şarj edilir ve talep yükün belirlenen hedef bir güç bandının üstüne çıkması ile bataryaların deşarj edilmesi sağlanır. Bu strateji *Mod 1* olarak isimlendirilmiş ve aşağıda senaryo 9 ve 10'da uygulanmıştır.

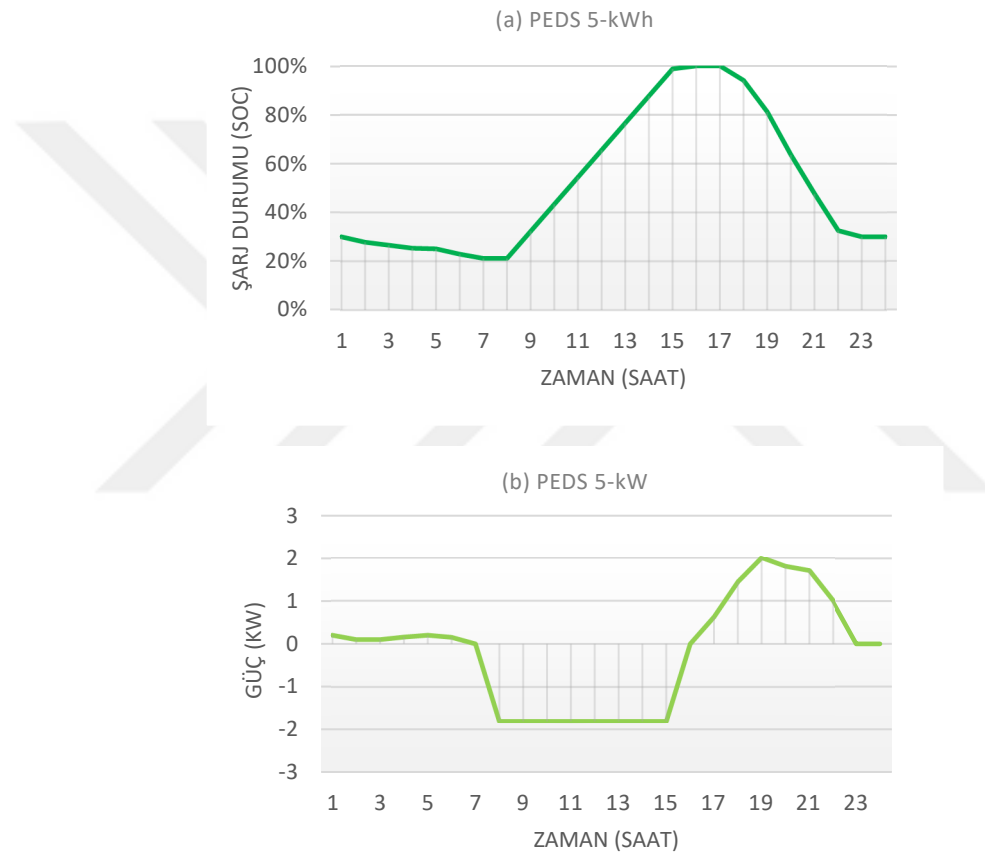
İkinci stratejide ise deşarj için yine *Tepe Tıraş* modu kullanılmış ancak şarj için *Zaman* modu yerine *Düşük Tepe Tıraş* (Peak Shave Low) modu kullanılmıştır. *Düşük Tepe Tıraş* modu, bataryaların şarj edilmesi için bir alt limit güç değerinin seçilmesini gerektirir. Yani, hat üzerinde gerçekleşen ters yönlü güç akışının, belirlenen bir güç bandının üstüne çıkması sonucu, bataryaların merkezi kontrolör tarafından şarj konumuna alınması sağlanır. Kontrolör bu işlemi hattın ilk terminaline konumlandırılan bir çoklu ölçüm cihazı yardımıyla gerçekleştirir. Bu ikinci strateji *Mod 2* olarak isimlendirilmiş ve aşağıda senaryo 11 ve 12'de test edilmiştir.

4.2.1 Senaryo 9: 13,5 kWh/1,8 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi (*Merkezi kontrol/Mod 1*)

Bu senaryoda şarj işlemi için *Zaman* modu kullanıldığından şarj işlemi gün ışınının yoğun olduğu saatlere ayarlanmıştır. *Zaman* modunda bataryalar şarj edilirken belirtilen depolama güç değeri sabit olarak baz alınır ve depolama birimleri tamamen dolana kadar şarj işlemi bu sabit güç üzerinden devam eder.

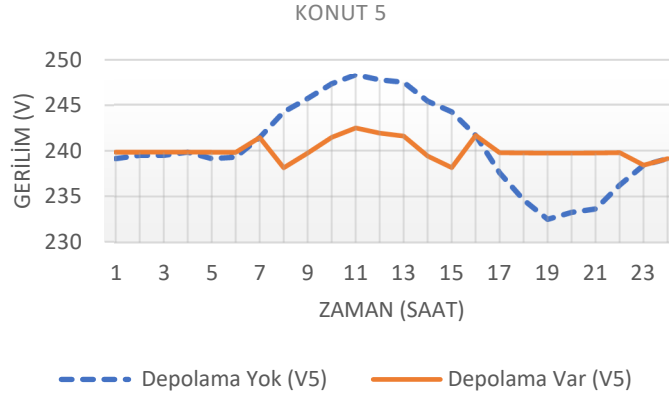
Aşağıda verilen Şekil 4.10 (a), son tüketiciye ait pilin gün içerisindeki şarj durumunu ve Şekil 4.10 (b) ise pilin hangi güç oranlarında şarj/deşarj edildiğini göstermektedir. Şekil 4.10 (a)'da PEDS 5'in %30 doluluk oranıyla gece saat 00.00'dan

sonra deşarj işlemine devam ettiği, sabah 07.00'ye kadar kalan enerjisinin bir kısmını tüketerek %20 rezerv durumuna geldiği, saat 08.00'de şarj işlemine başladığı ve 16.00'ya kadar batarya Şarj Durumu (SoC-State of Charge)'nun %100 seviyesine (13,5 kWh) ulaştığı görülmektedir. Saat 17.00'den sonra deşarj işlemine tekrar geçildiği ve gün sonunda pil doluluk seviyesinin tekrar %30 seviyesine geri döndüğü görülmektedir. Gündüz sabit bir güç değeri ile (1,8 kW) depolanan enerjinin akşam saatlerinde yüke göre değişken güç oranlarında harcandığı ise Şekil 4.10 (b)'de görülmektedir. Ayrıca negatif bölgeler şarj ve pozitif bölgeler ise deşarj anlamına gelmektedir.



Şekil 4.10. Senaryo 9 PEDS 5, günlük şarj durumu ve giriş/çıkış gücü

Pildeki bu günlük değişimin gerilim üzerine etkisini görmek için Şekil 4.11'e bakılmalıdır. Şarj gücünün kısmen düşük seçilmesi 7,5 saatlik şarj süresi boyunca depolama sisteminin aktif bir şekilde çalışmasına olanak sağlamıştır. Ancak bu düşük şarj gücü, 10.00-13.00 saatleri arasında gerilimin yeteri kadar düşürülememesine neden olmuştur. Buradan, PV güç çıkışını dikkate almayan *Zaman* modunun sabit bir güç değeri üzerinden işlem gerçekleştirmesinin verimsiz bir strateji olduğu sonucuna varılmaktadır. Buradan hareketle, *Tepe Tıraş* modunun daha etkili çalıştığı söylenebilir. Akşam saatleri

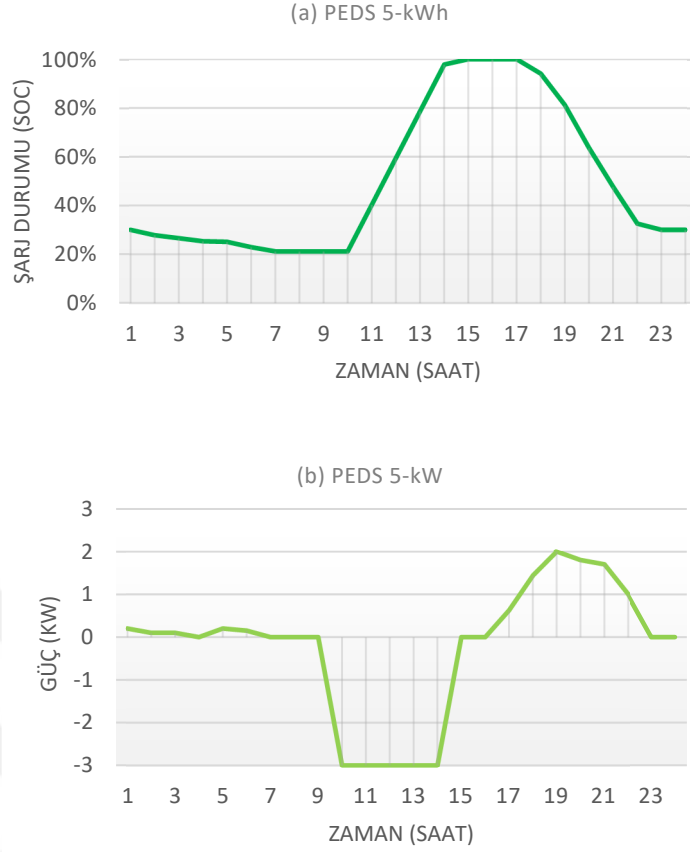


Şekil 4.11. Senaryo 9 gerilim profilleri

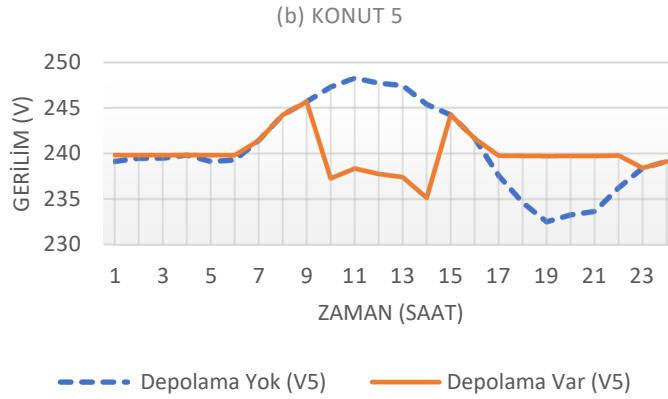
içerisinde deşarj için depolama çıkış gücü yükü takip ettiğinden daha kararlı bir gerilim seviyesi elde edilmiştir.

4.2.2 Senaryo 10: 13,5 kWh/3 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi (*Merkezi kontrol/Mod 1*)

Bir önceki senaryoya göre burada, depolama gücü artırılarak yine depolama sisteminin ne tür bir tepki vereceği öğrenilmeye çalışılmıştır. Şekil 4.12’de şarj gücünün yükseltilmesi nedeniyle şarj süresinin ortalama 4 saate düştüğü görülmektedir. Şekil 4.13’te, yoğun enerji üretim saatlerinde gerilim artışları önlenmiş olursa da daha etkili ve ekonomik bir çözüm için stratejinin değiştirilmesi gerektiği daha net anlaşılmaktadır. Bu nedenle bir sonraki senaryoda depolama stratejisi değiştirilerek burada belirtilen pil değerleri tekrar test edilmiştir.



Şekil 4.12. Senaryo 10 PEDS 5, günlük şarj durumu ve giriş/çıkış gücü

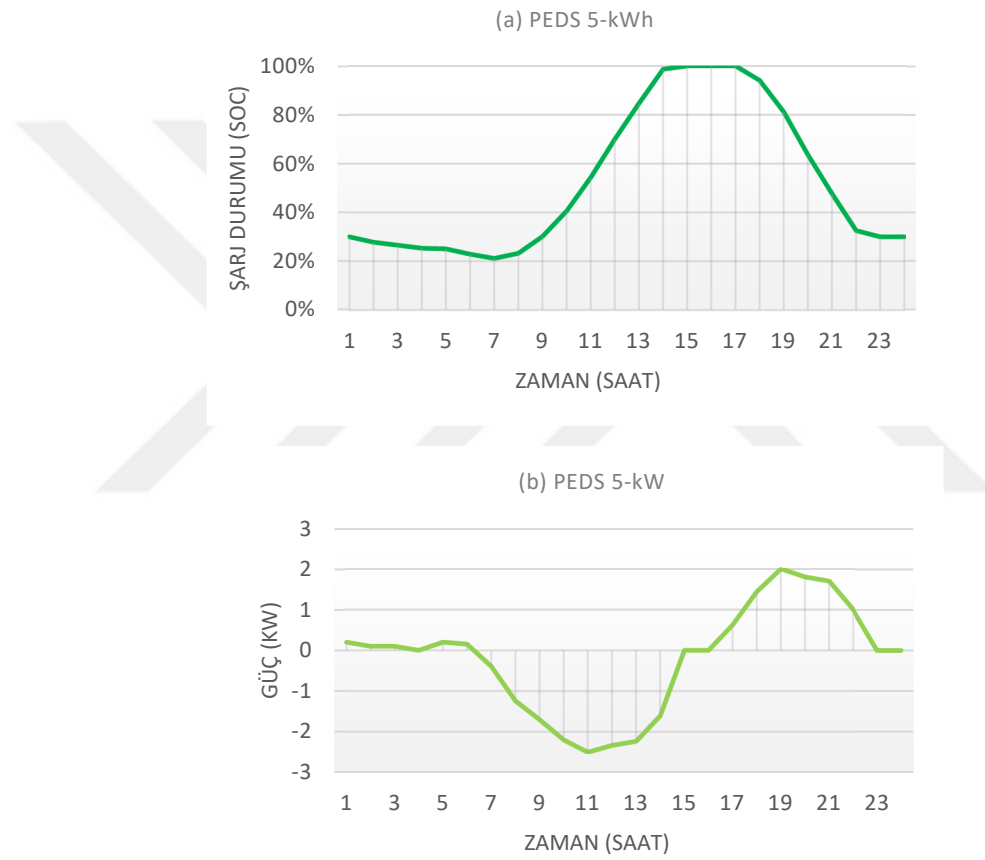


Şekil 4.13. Senaryo 10 gerilim profilleri

4.2.3 Senaryo 11: 13,5 kWh/3 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi (*Merkezi kontrol/Mod 2*)

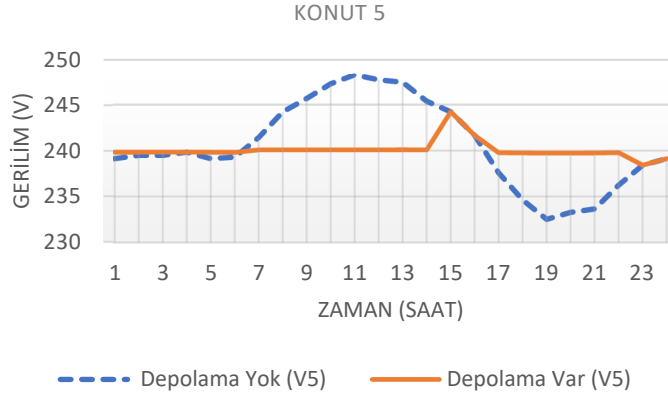
Bu senaryo modelinde, Senaryo 9 ve 10'a göre farklı bir depolama stratejisi olan *Mod 2* test edilmiştir. Bu senaryoda negatif hedef gücün (üretilen) 0,1 kW ve pozitif hedef gücün (tüketilen) 0,5 kW üzerinde seyretmesi durumunda pilin şarj ve deşarj edilmesi sağlanmıştır. Şekil 4.14 (b)'de PEDS 5 depolama ögesinin farklı saatlerde farklı güç

oranlarında, negatif bölgelerde şarj ve pozitif bölgelerde deşarj olduğu görülmektedir. Her ne kadar pil gücü 3kW olarak seçilmiş olsa da üretim ve tüketim arasındaki güç farkı gözetilerek depolama ögesinin saat 07.00'de 0,4 kW ve saat 11.00'de 2,5 kW gibi farklı güç değerleri ile merkezi kontrolör tarafından şarj edildiği görülmektedir. Buna dayanarak bu stratejinin, depolama sisteminin daha etkin ve daha verimli çalışmasına olanak sağladığı söylenebilir. Ancak strateji etkili olsa da kapasitenin bir miktar yetersiz olması, saat 14.00'te şarj işleminin erken sonlanmasına neden olmuştur (Şekil 4.14 (a)'da görülmektedir).



Şekil 4.14. Senaryo 11 PEDS 5, günlük şarj durumu ve giriş/çıkış gücü

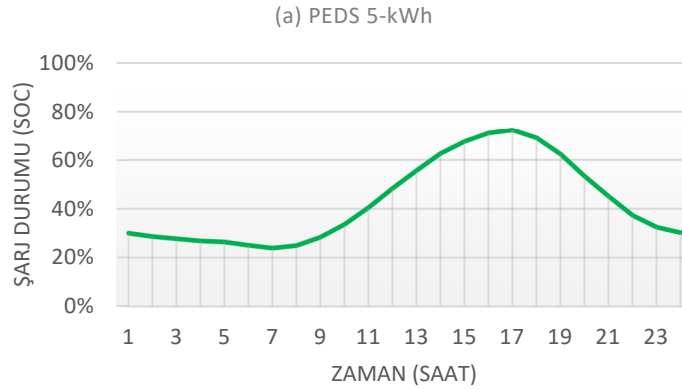
Saat 14.00'ten itibaren batarya kapasitesinin dolması nedeniyle şarj işlemi kesildiğinden bu saatten sonra üretilen enerji şebekeye enjekte edilmiştir. Bu nedenle 14.00-16.00 saatleri arasında gerilim seviyesinin kısmen yüksek seyrettiği Şekil 4.15'te görülmektedir.

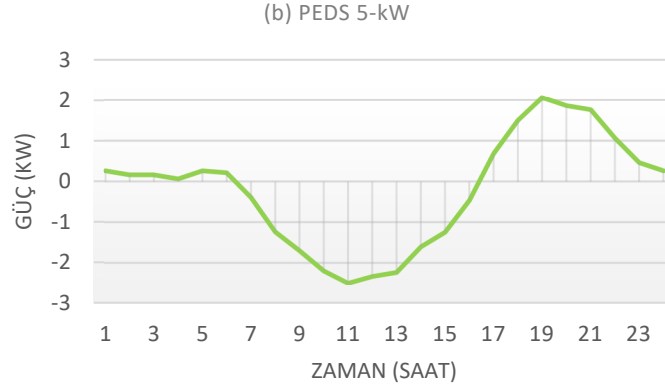


Şekil 4.15. Senaryo 11 gerilim profilleri

4.2.4 Senaryo 12: 27 kWh/3 kW pil kapasitesi ve güç değeri testi (Merkezi kontrol/Mod 2)

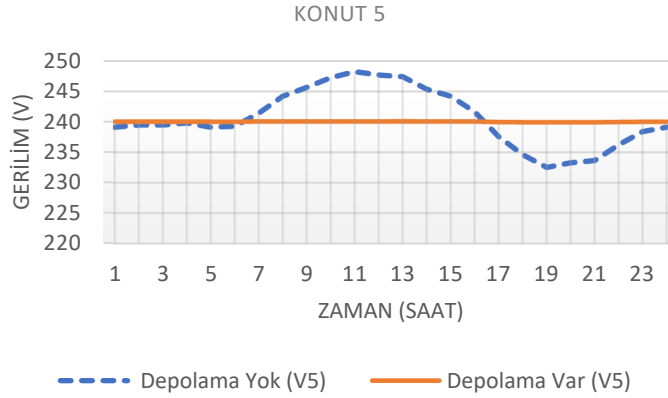
Bu senaryo modeli için depolama kapasitesi senaryo 11'e göre iki katına çıkarılmıştır. Ayrıca kapasite yükseltildiğinden daha fazla miktarda enerjinin şarj ve deşarj edilmesi için, negatif hedef güç (üretilen) 0,04 kW ve pozitif hedef güç (tüketilen) 0,1 kW sınır bandına çekilmiştir. Bu işlemin sonucunda, Şekil 4.16 (a)'da batarya şarj durumunun maksimum %72,3 (19,5 kWh) seviyesine çıktığı ve pilin neredeyse tüketimden arta kalan enerjinin tamamını depoladığı görülmektedir.





Şekil 4.16. Senaryo 12 PEDS 5, günlük şarj durumu ve giriş/çıkış gücü

Sonuç olarak, depolama kapasitesinin yeterli olması sebebiyle Şekil 4.17’de görüldüğü gibi gerilim seviyesi istenen seviyeye çekilmiştir. Depolama kullanılarak gündüz saatlerinde gerilim yükselmelerinin önleniği ve akşam saatlerinde şebekeye gerilim desteğinin sağlandığı ya da akşam saatlerinde öz tüketim gerçekleştirilerek gerilim düşümünün önleniği, yine şekilden anlaşılmaktadır.



Şekil 4.17. Senaryo 12 gerilim profilleri

Bir önceki durum çalışmasında, depolama kapasitesinin ve gücünün değiştirilmesi ile farklı sonuçların elde edilebileceği görülmüştü. İkinci durum çalışmasında ise aynı kapasite ve güç değerleri kullanılarak, farklı bir kontrol yaklaşımı ile sonuçların ne denli değişebileceği öğrenilmeye çalışıldı. Araştırmaya değer ölçüde sonuçların daha iyi olduğu görüldü. Ayrıca, *Merkezi* kontrol yöntemi bünyesinde yer alan farklı depolama stratejilerinin (*Mod 1* ve *Mod 2*) test edilmesiyle farklı sonuçların da ayrıca elde edilebileceği senaryo 9,10 ve 11,12 de görüldü.

Her iki durum çalışmasına ait sonuçlar karşılaştırılarak aşağıda tekrar değerlendirilmiştir.

5 SONUÇ VE ÖNERİLER

Bulgular üzerinde net bir çıkarımda bulunabilmek için Durum 1 ve Durum 2 çalışma sonuçlarının hassasiyetle karşılaştırılması gerekir. Bir önceki başlıkta yer alan her iki durum çalışmasına ait sonuçlar aşağıda değerlendirilmiştir.

5.1 Sonuçlar

Çatı üstü PV sistemlere yönelik artan talep sonucu AGDŞ'lerde PV penetrasyonu arttıkça AGDŞ üzerinde ters yönde (tüketici bağlantı noktasından transformatöre doğru) güç akışlarının ve buna bağlı olarak tüketici bağlantı noktalarında gerilim artışlarının gerçekleşebileceği yukarıda detaylıca açıklandı. Özetle tekrar değinilecek olursa AGDŞ'de gerçekleşen gerilim artışlarının asıl nedeni ters yönde akan yüksek akımlar ve yüksek R/X oranıdır. Burada konunun daha net anlaşılması açısından bir benzetme yapılırsa AGDŞ'lerde güç transferi gerçekleştirilirken, YG şebekelerine kıyasla AG şebekelerinde yüksek akım ve yüksek iletken direnci (R) sebebiyle gerilim düşümlerinin daha fazla meydana geldiği, hat uzunluğu arttıkça, artan hat direnci nedeniyle hat sonunda (son kullanıcı bağlantı noktasında) gerilim düşümü miktarının da arttığı bilinmektedir. Benzer şekilde PV sistem kaynaklı ters güç akışları esnasında gerilim artışları meydana gelmekte ve bu artışlar hattın sonunda yer alan son kullanıcı bağlantı noktasında daha fazla hissedilmektedir.

Dolayısıyla bu tez çalışmasında bir AG hattında PEDS'in, PV kaynaklı gerilim artışı üzerine ne tür bir etkisinin olacağını öğrenmek amacıyla yukarıda yer alan senaryolar test edildi. Sonuçlar, pil kapasitesi kadar pil gücünün de kritik bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Pil kapasitesinin arttırılması sonucu gerilim artışlarının daha kolay önlendiği görüldü. Ancak buna bağlı olarak toplam sistem maliyetinin artacağı da unutulmamalıdır. Bununla beraber sonuçlar, sadece kapasitenin göz önünde bulundurulmasıyla gerilim kontrolünün sağlanmasının yetersiz ve hatta bazı durumlarda verimsiz olacağını (senaryo 7 ve 8) da göstermektedir. Kabul edilebilir bir sonuç için depolama gücünün de kapasite kadar dikkate alınması gerektiği görülmüştür.

Bununla beraber, çalışmada baz alınan PV ve yük modeli dikkate alındığında 1 adet Tesla Powerwall 2'nin kullanımının büyük oranda, PV kaynaklı gerilim artışlarının önlenmesinde yeterli olabileceği görülmüştür. Çalışmada elde edilen ek sonuçlar ise öz tüketimin arttığını ve pil enerji depolamasının akşam saatlerinde yerel enerji ihtiyacını önemli ölçüde karşıladığını, dolaylı olarak şebekeye güç ve voltaj desteğinde bulunduğunu göstermektedir.

Ayrıca, optimal çözümler için depolama kontrol yöntemlerinin de büyük bir hassasiyetle seçilmesinin gerekli olduğu sonuçlardan anlaşılmaktadır. Bu çalışmada test edilen *Merkezi* kontrol yaklaşımının *Kendi Kendine Gönderim* yaklaşımına göre daha etkili çalıştığı ve daha gerçekçi sonuçlar verdiği görülmüştür. *Kendi Kendine Gönderim* yaklaşımı bir tahmine dayalı olarak test edildiğinden (yani en iyi ihtimalle PEDS'in ne zaman şarj/deşarj olacağı manuel olarak belirlendiğinden) bu yaklaşımla elde edilen sonuçlar gerçek hayatta karşılaşılabilecek uygulama sonuçlarından kısmen farklılık gösterebilir. Fakat *Merkezi* kontrol yaklaşımı hat başında yer alan çoklu ölçüm cihazı yardımıyla ölçüm verilerini baz aldığından daha gerçekçi sonuçlar verebilmektedir. Ancak gerçek hayatta *Merkezi* kontrol yaklaşımının uygulanabilmesi için iyi bir iletişim ve bilişim alt yapısının olması gerektiği de unutulmamalıdır.

Türkiye'nin sahip olduğu yüksek güneş potansiyeli nedeniyle ülkede yaygınlaşan PV sistem kurulumlarının sayısının ve bu sistemlerin AG şebekesine penetrasyonunun artması, yakın gelecekte bazı bölgelerde AGDŞ üzerinde PV kaynaklı gerilim artışları gibi sorunların meydana gelmesine neden olabilir. Ayrıca mevcut mevzuatta maksimum 10 kWp olan çatı üstü lisanssız PV enerji üretimi sebebiyle 10 kWp gibi yüksek bir kurulum gücünün gelecekte önemli oranda gerilim problemlerine neden olabileceği beklenmektedir. Bununla beraber PV sistemle aynı düğüme bağlanacak PEDS'in de 5kW (G99⁹ standardında yer alan) güç değerini geçmemesi gerektiği yukarıda yer alan simülasyon sonuçlarından anlaşılmaktadır.

Dolayısıyla bu tez çalışması diğer çalışmalardan farklı olarak;

- Gelecekte yaşanabilecek gerilim problemlerinin ve müşterilerin maruz kalabileceği bazı mağduriyetlerin (PV kısıtlaması gibi durumlar yatırımcıyı mağdur edebilir) şimdiden önlenmesi adına mevzuatta izin verilen çatı üstü lisanssız enerji üretimi için belirlenen üst sınır gücünün yeniden gözden geçirilmesi gerektiğini,
- PV sistemle beraber konumlandırılacak PEDS'in güç değerinin PV sistem gücünü geçmemesi gerektiğini,
- PEDS kapasitesiyle beraber PEDS gücünün de doğru seçilmesi gerektiğini,
- Çatı üstü PV sistemlerin ve sayaç arkası PEDS'lerin şebeke bağlantı koşullarının dikkate alınması gerektiğini ortaya koymaktadır.

⁹ G98 ve G99 kodları, İngiltere ve Avrupa'da mikro jeneratörlerin AGDŞ'ye hangi koşullar ve standartlar altında bağlanabileceğini açıklamaktadır. G98 standartları baz alındığında bir PV sistem veya depolama sistemi AGDŞ'ye maksimum anlık 16 A akım veya 3,68 kW güç enjekte edebilir ya da şebekeden bu akımı veya gücü çekebilir. G99 standardında ise bu değerler 25A ve 5 kW olarak verilmektedir.

Bununla beraber çalışmanın literatüre yaptığı diğer bazı katkılar ise: PEDS'in yukarıda yer alan simülasyon sonuçlarına dayanarak;

- AG şebekesine güç ve voltaj desteğinde bulunabildiği,
- Net Sıfır Enerjili Bina politikasının gerçekleşmesine yardımcı olduğu,
- Enerji depolama sistemlerinin benimsenmesine destek sağladığı, söylenebilir.

Burada belirtilmesi gereken bir husus ise bu çalışmada kullanılan PV sistem modeli ve yük modeli hakkındadır. PV sistemin tercih edildiği konum olarak Mardin'in Midyat ilçesi seçilmiştir. Güneş potansiyelinin yüksek olması sonucu ilçenin bazı bölgelerinde AGDŞ üzerinde PV kaynaklı gerilim artışlarının gelecekte yaşanabileceği düşüncesiyle tez çalışması için bu konuma ait güneşlenme verileri kullanılmıştır. Ancak yük modeli ortalama bir tüketicinin yük profilini yansıtır ve bu yük modelinde soğutma cihazlarının/klimaların etkisi dahil edilmemiştir. Diğer bir ifade ile seçilen konumda yaz ayları çok sıcak geçtiği için PV enerji üretiminin pik yaptığı gün ortası gibi zaman dilimlerinde çalıştırılacak klimaların gerilim üzerine ne tür bir etki oluşturacağı, detaylı olarak ele alınması gereken bir diğer çalışma konusu olduğundan gelecek çalışmalara bırakılmıştır.

Benzer bir çalışmada çatı üstü PV sistem yerine bir evin temel enerji ihtiyacını karşılayabilecek mikro düzeyde bir Rüzgâr Enerji Santrali (RES) kullanılsaydı oluşabilecek gerilim artışlarının önlenmesinde burada kullanılan *Kendi Kendine Gönderim* yaklaşımının çalışmayacağı, *Merkezi* kontrol yaklaşımının ise çalışacağı söylenebilir. Ancak rüzgârın ne zaman eseceği net bir şekilde bilinemeyeceğinden *Merkezi* kontrol yaklaşımında test edilen ve zamanı dikkate alan *Zaman* modunun yani *Mod 1*'in çalışmayacağı buna karşın zamanı dikkate almayan ve tamamen ölçüme dayalı olan *Mod 2*'nin çalışacağı ifade edilebilir.

Gerek RES'lerin gerekse de PV sistemlerin neden olacağı AGDŞ üzerinde gerçekleşecek ters güç akışlarına ve gerilim artışlarına karşı kullanılacak PEDS'lerin gerçek hayatta ne tür sonuçlar vereceği ancak "Gerçek Saha Uygulaması" veya "Gerçek Zamanlı Kontrol" ile öğrenilebilir.

"Gerçek Saha Uygulaması" en doğru sonucu verecektir. Ancak uygulanması hem uzun zaman alacaktır hem de büyük bir maliyet gerektirecektir. Bu yöntemin tercih edilmesi durumunda;

- Test için RES'lerin veya çatı tipi PV sistemlerin yoğun kullanıldığı uygun bir bölgeyi seçmek,

- Ardından konut sahipleri ile ek bir sözleşme yaparak farklı kapasite ve güçlerde depolama sistemlerini sayaç arkasına kurmak,
- Daha sonra tüm bu depolama sistemlerini kontrol edecek olan kontrol sistemlerinin etkin bir şekilde çalışabilmesi için iyi bir iletişim ve bilişim alt yapısını kurmak veya bu alt yapı mevcut ise kiralamak,
- Ağ üzerinde uygun yerlere ölçüm cihazlarını konumlandırmak gerekir.

Tüm bu işlemler göz önüne alınırsa merak edilen sonuçların elde edilmesi için bu yöntemin büyük bir maliyet ve zaman gerektireceği anlaşılmaktadır. Çok uzun zaman alacak ve büyük bir maliyet gerektirecek olan “Gerçek Saha Uygulaması” yerine neredeyse hiçbir maliyet gerektirmeyen ve nispeten çok daha kısa zaman alacak olan bir diğer yöntem ise “Gerçek Zamanlı Kontrol” yöntemidir.

“Gerçek Zamanlı Kontrol” yönteminde veriler 1, 5 veya tercihe göre 10 dakikalık zaman adımları ile alınarak işlenir ve haberleşmede meydana gelen gecikme süresi de dikkate alınarak PEDS’in ne tür sonuçlar vereceği bu şekilde bir yöntemle öğrenilmeye çalışılır. Bu yöntem ekonomiktir ve daha kısa zaman alır. Buradan elde edilecek sonuçlar “Gerçek Saha Uygulamasının” vereceği sonuçlar kadar gerçekçi olmayabilir ancak; olası sorunları büyük oranda önceden tahmin etmeyi kolaylaştırabilir.

5.2 Öneriler

PV sistemden kaynaklı gerilim artışlarının önlenmesi ve gerilimin istenen seviyede tutulabilmesi için bir depolama elemanının özellikleri şu şekilde sıralanabilir:

- Depolama elemanının gücü (kW) PV sistemin üreteceği maksimum gücü karşılayabilmelidir,
- Depolama elemanının gücü maksimum yükü karşılayabilmelidir,
- Depolama elemanı, PV sisteminin gün boyunca üreteceği toplam enerjiyi depolayabilecek ve akşam saatlerinde müşterinin enerji ihtiyacını karşılayabilecek enerji kapasitesine sahip olmalıdır.

Ayrıca, optimal çözümler için depolama kontrol yönteminin ve depolama stratejisinin hassasiyetle seçilmesi gerektiği de sonuçlardan anlaşılmaktadır. Enerji sistemlerindeki teknolojik alt yapının gelecekte değişmesiyle PEDS'lere daha çok ihtiyaç duyulacağı beklenmektedir.

5.3 Gelecekteki Çalışmalar

“Gerçek Zamanlı Kontrol” yönteminin test edilmesi, detaylı bir maliyet analizinin yapılarak sayaç arkası PEDS’lerin ya da merkezi depolama sistemlerinin kullanımının hangi durumlarda daha ekonomik olacağı, yaz aylarında PV enerji üretiminin yüksek olduğu gün ortası gibi zaman dilimlerinde yüksek sıcaklık sebebiyle çalıştırılacak klimaların etkisinin de dahil edileceği, PV sistem ve RES’lerin birlikte kullanıldığı hibrit sistemlerin etkisinin de inceleneceği gibi konular gelecek çalışmaların konusu olabilir.



6 KAYNAKLAR

- Akdoğan, D.A., 2018. Yenilenebilir Enerjide Kamu Politikaları ve Türkiye, Doktora Tezi, *Marmara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İstanbul, 66-81.
- Aksangör, N.N., 2019. Ankara Şartlarında Bir Fotovoltaik Sistemin PVsyst Programı Yardımı ile Performans Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 15.
- Almasalma, H. and Deconinck, G., 2020. Simultaneous provision of voltage and frequency control by PV-battery systems, in *IEEE Access*, 8, 152820-152836, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3018086.
- Alnaser, S.W., Althaher, S.Z., Long, C., Zhou, Y., 2020. Residential community with PV and batteries: Reserve provision under grid constraints. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 119. 105856. 10.1016/j.ijepes.2020.105856.
- Amrr, S.M., 2016. Design analysis of reliable renewable energy based backup power supply for residential applications. *Department of Electrical Engineering, Z.H. College of Engineering & Technology, Aligarh Muslim University, Aligarh, India*, 19.
- Ariyaratna, P., Muttaqi, K., Sutanto, D., 2017. The sizing of battery energy storage for the mitigation of slow and fast fluctuations in rooftop solar PV output, *IEEE Innovative Smart Grid Technologies- Asia (ISGT-Asia)*, Auckland, New Zealand, 1-6, doi: 10.1109/ISGT-Asia.2017.8378324.
- Aydın, M. S. and Ochoa, L. N., 2015. Investigating the benefits of meshing real UK LV networks, *23rd International Conference on Electricity Distribution*, Lyon, 1296.
- Bahar, E.M., 2019. Şebeke Bağlantılı veya Bağlantısız Çalışabilen PV Sistemin Tasarımı ve Tekno-Ekonomik Analizi. Yüksek Lisans Tezi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 12-18.
- Bucciarelli, M., Giannitrapani, A., Paoletti, S., Vicino, A., Zarrilli, D., 2016. Energy storage sizing for voltage control in LV networks under uncertainty on PV generation, *IEEE 2nd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry Leveraging a better tomorrow (RTSI)*, 1-6, 10.1109/RTSI.2016.7740580.
- Colthorpe, A., 2021. İnternet sitesi, <https://www.energy-storage.news/news/in-2020-the-us-went-beyond-a-gigawatt-of-advanced-energy-storage-installati>, <https://www.energy-storage.news/news/construction-begins-on-fotowatios-second-uk-project-using-tesla-megapack-ba>, [Ziyaret Tarihi: 11 Mart 2021].
- Crossland, A.F., Jones, D., Wade, N.S., Walker, S. L., 2018. Comparison of the location and rating of energy storage for renewables integration in residential low voltage networks with overvoltage constraints, *Energies*, 11, 41, doi:10.3390/en11082041.

- Çakmak, R., 2018. Akıllı Şebekelerde Fotovoltaik Güç Üretim Sistemine Sahip Konutlar İçin Akıllı Talep Yönetim Sistemi, Doktora Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, 16-24.
- Çarkıt, T., 2017. Yenilenebilir Enerji Kaynakları Depolama Sistemlerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kayseri, 26-28.
- Çelik, M., 2019. Yükselten Çevirici Topolojisine Sahip Lityum İyon Piller İçin MPPT Solar Şarj Kontrol Cihazı, Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, 28-33.
- Çiftçi, S., Solak, M., Kuncan, M., 2020. Powered by the sun: designing and analyzing technical and economic aspects of a school sustained by photovoltaics, *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engineering*, Vol. 1, Issue 1, p. 21-32.
- Devlet, Ö., 2017. Şebekeye Bağlı Tek Fazlı İnverterlerde Filtre Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4-5.
- Dugan R.C. and Montenegro D. 2020. Reference guide the open distribution system simulator (OpenDSS, Program Revision: 9.0.0), *Electric Power Research Institute, Inc.*, Washington, DC, ABD.
- Dugan R.C. and McDermott T.E. 2011. An open source platform for collaborating on smart grid research, *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, Detroit, MI, USA, 1-7, doi: 10.1109/PES.2011.6039829.
- EİGM, 2021. Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, resmi internet sitesi, eylem planları, Ankara, <https://enerji.gov.tr/enerji-isleri-genel-mudurlugu-eylem-planlari-ve-strateji-belgeleri> [Ziyaret Tarihi: 16 Ocak 2021].
- Erdoğan, N., 2020. Türkiye’de Yenilenebilir Enerjiye Yönelik Teşvikler ile Yenilenebilir Enerji Üretimi Arasındaki Etkileşim ve Finansal Yansımaları, Yüksek Lisans Tezi, *Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, Sivas, 3-8.
- Ergin, M.N., 2020. Enerji Arz Güvenliği Kapsamında Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Önemi ve Sürdürülebilir Enerji Politikaları, Yüksek Lisans Tezi, *Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Eskişehir, 40.
- Gao, X., Sossan, F., Christakou, K., Paolone, M., Liserre, M., 2018. Concurrent voltage control and dispatch of active distribution networks by means of smart transformer and storage, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (8), 6657-6666, doi: 10.1109/TIE.2017.2772181.
- GEPA, 2021. Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası, resmi internet sitesi, Ankara, <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>, [Ziyaret Tarihi: 10 Şubat 2021].
- Giannitrapani, A., Paoletti, S. ve Vicino, A., Zarrilli, D., 2017. Optimal allocation of energy storage systems for voltage control in LV distribution networks, in *IEEE Transactions on Smart Grid*, 8 (6), 2859-2870, doi: 10.1109/TSG.2016.2602480.
- Gorman, W., Mills, A., Bolinger, M., Wiser, R., Singhal, N.G., Ela, E., O’Shaughnessy, E., 2020. Motivations and options for deploying hybrid generator-plus-battery

- projects within the bulk power system, *The Electricity Journal*, 33 (5), 106739, ISSN 1040-6190, <https://doi.org/10.1016/j.tej.2020.106739>.
- IEA, 2021. Uluslararası Enerji Ajansı, internet sitesi, <https://www.iea.org/reports/energy-storage>, [Ziyaret Tarihi: 11 Şubat 2021].
- İSE, 2010. İngiliz Standartları Enstitüsü, Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems, no. December, 2010.
- İşler, Y.S., 2020. Şebeke Bağlantılı, Depolamalı Fotovoltaik Güneş Enerjisi Sistemleri İçin Performans Analizi ve Verim Artırılması, Doktora Tezi, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kahramanmaraş, 62-64.
- Jain, A., Tewari, T., Das, A., Anand, S., Mohapatra, A., 2018. Coordinated voltage control in LV distribution systems using OLTC and BESS, *20th National Power Systems Conference (NPSC)*, Tiruchirappalli, India, 1-6, doi: 10.1109/NPSC.2018.8771772.
- Jenkins, N., Ekanayake, J., Liyanage, K., Wu, J., Yokoyama, A., 2012. Smart grid technology and applications, *John Wiley & Sons, Ltd, Chichester*, United Kingdom, 259-276.
- Johnson, R.C., Mayfield, M., Beck, S.B.M., 2018/a. Optimal placement, sizing, and dispatch of multiple BES systems on UK low voltage residential networks, *Journal of Energy Storage*, 17, 272–286, <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.03.005>.
- Johnson, R.C., Mayfield, M., Beck, S.B.M., 2018/b. Utilization of stochastically located customer owned battery energy storage systems for violation management on UK LV residential feeders with varying renewables penetrations, *Journal of Energy Storage*, 19, 52–66.
- Johnson, R.C., Mayfield, M., Beck, S.B.M., 2018/c. Battery energy storage for management of LV network operational violations: a multi-feeder analysis, *3rd Annual Conference in Energy Storage and Its Applications*, 3rd CDT-ESA-AC, 11–12, Sheffield, UK.
- Karadeniz, A., 2019. Harmonik Bozulmaya Sahip Dağıtım Sistemlerinde Fotovoltaik Dağıtık Üretim Birimi Barındırma Kapasitesinin İyileştirilmesi, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 13.
- Kim, S., 2019. Vanadium Redox Flow Batteries: Electrochemical Engineering, *IntechOpen Limited*, doi: <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.85166>.
- Lamberti, F., Calderaro, V., Galdi, V., Piccolo, A., Graditi, G., 2015. Impact analysis of distributed pv and energy storage systems in unbalanced lv networks, *IEEE Eindhoven PowerTech*, Eindhoven, Hollanda, 1-6, doi: 10.1109 / PTC.2015.7232717.
- Li, B., Li, X., Bai, X., Li, Z., 2018. Storage capacity allocation strategy for distribution network with distributed photovoltaic generators. *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, 6, 1234–1243, <https://doi.org/10.1007/s40565-018-0429-x>.

- Li, X., Ma, R., Gan, W., Yan, S., 2020. Optimal dispatch for battery energy storage station in distribution network considering voltage distribution improvement and peak load shifting, in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, doi: 10.35833/MPCE.2020.000183.
- Liu, M. Z., Procopiou, A. T., Petrou, K., Ochoa, L. F., 2020. On the fairness of PV curtailment schemes in residential distribution networks, in *IEEE Transactions on Smart Grid*, 11 (5), 4502-4512, doi: 10.1109/TSG.2020.2983771.
- Ömeroğlu, M., 2020. Yenilenebilir Enerjinin Sürdürülebilirlik Üzerindeki Rolü, Yüksek Lisans Tezi, *Bahçeşehir Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü*, İstanbul, 29-34.
- Parthasarathy, C., Hafezi, H., Laaksonen, H., Kauhaniemi, K., 2019. Modelling and simulation of hybrid PV & BES systems as flexible resources in smartgrids – sundom smart grid case, *IEEE Milan PowerTech*, Milan, Italy, 1-6, doi: 10.1109/PTC.2019.8810579.
- Ranamuka, D., Muttaqi, K. M., Sutanto, D., 2020. Flexible AC power flow control in distribution systems by coordinated control of distributed solar-PV and battery energy storage units, in *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 11 (4), 2054-2062, doi: 10.1109/TSTE.2019.2935479.
- Richardson, I. and Thomson, M., 2012. Integrated simulation of photovoltaic micro-generation and domestic electricity demand: a one-minute resolution open-source model, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 227 (1), 73-81. doi:10.1177/0957650912454989.
- Sezen, G. F., 2020. Talep Tarafı Yönetimi Kullanılarak Konutlar İçin Merkezi Batarya veya Elektrikli Araç Bataryası ile Desteklenen PV Güç Sisteminin Boyutlandırılması, Enerji Yönetimi ve Ekonomik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Manisa, 20-27.
- Sugihara, H., Yokoyama, K., Saeki, O., Tsuji, K., Funaki, T., 2013. Economic and efficient voltage management using customer-owned energy storage systems in a distribution network with high penetration of photovoltaic systems, in *IEEE Transactions on Power Systems*, 28 (1), 102-111, doi: 10.1109/TPWRS.2012.2196529.
- TEİAŞ, 2021. Resmi internet sitesi, Türkiye elektrik üretim iletim istatistikleri, Ankara <https://www.teias.gov.tr/tr-TR/turkiye-elektrik-uretim-iletim-istatistikleri>, [Ziyaret Tarihi: 16 Ocak 2021].
- Tesla, 2021/a. İnternet sitesi, sistem tasarımı ve Powerwall 2 kurulum şeması, <https://www.tesla.com/support/energy/powerwall/learn/system-design>, [Ziyaret Tarihi: 11 Mayıs 2021].
- Tesla, 2021/b. İnternet sitesi, Tesla Powerwall 2 kullanım kılavuzu/teknik özellikleri, https://www.tesla.com/sites/default/files/pdfs/powerwall/Powerwall_2_AC_GW_2_UK-EN_Installation_Manual_0.pdf, [Ziyaret Tarihi: 11 Mayıs 2021].
- Turna, U., 2019. Bir Dağıtım Sisteminde Dağıtık Enerji Kaynaklarının Etkisinin Analizi, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara.

- USEIA, 2020. United States Energy Information Administration, Battery Storage in the United States: An Update on Market Trends, *U.S. Department of Energy*, Washington, DC 20585, ABD, internet sitesi, <https://www.eia.gov/analysis/studies/electricity/batterystorage/>, [Ziyaret Tarihi: 9 Mayıs 2021].
- Von Appen, J., Stetz, T., Braun, M., Schmiegel, A., 2014. Local voltage control strategies for PV storage systems in distribution grids, in *IEEE Transactions on Smart Grid*, 5 (2), 1002-1009, doi: 10.1109/TSG.2013.2291116.
- Wang, J., Hashemi, S., You, S., Trøholt, C., 2017. Active and reactive power support of MV distribution systems using battery energy storage, *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, Toronto, ON, Canada, 382-387, doi: 10.1109/ICIT.2017.7913261.
- Zarrilli, D., Giannitrapani, A., Paoletti, S., Vicino, A., 2018. Energy storage operation for voltage control in distribution networks: a receding horizon approach, in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 26 (2), 599-609, doi: 10.1109/TCST.2017.2692719.
- Zeraati, M., Hamedani Golshan, M. E., Guerrero, J. M., 2018. Distributed control of battery energy storage systems for voltage regulation in distribution networks with high PV penetration, in *IEEE Transactions on Smart Grid*, 9 (4), 3582-3593, doi: 10.1109/TSG.2016.2636217.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Sabri ÇİFTÇİ
Doğum Yeri ve Tarihi : -
Telefon : -
E-posta : -

EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Batman Endüstri Meslek Lisesi, Merkez Batman	2003
Üniversite	: Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi, Kadıköy, İstanbul Batman Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Merkez, Batman	2010, 2018
Yüksek Lisans	: Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Siirt	

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2008-2009	Boğaziçi Elektrik Dağıtım A.Ş.	Elektrik Teknisyeni
2009-2011	İstanbul Emniyet Müdürlüğü	Elektrik Teknisyeni
2011-Devam ediyor	Milli Eğitim Bakanlığı	Elektrik Teknolojileri Öğretmeni

UZMANLIK ALANI

Mesleki Eğitim, Elektrik Pano Sistemleri, Enerji Depolama, PV sistemler

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

1. Çiftçi, S., Solak, M., Kuncan, M., 2020. Powered by the sun: designing and analyzing technical and economic aspects of a school sustained by photovoltaics, *Journal of Mechatronics and Artificial Intelligence in Engineering*, 1 (1), 21-32, <https://doi.org/10.21595/JMAI.2020.21499>.

