



**Melisa Burcu Çelebi**

İskenderun Technical University, mberoglu@hotmail.com, Hatay-Türkiye

**Abdulla Sakallı**

İskenderun Technical University, abdulla.sakalli@iste.edu.tr,  
Hatay-Türkiye

DOI	<a href="http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2026.21.1.1A0503">http://dx.doi.org/10.12739/NWSA.2026.21.1.1A0503</a>	
ORCID ID	0000-0002-4228-3032	0000-0002-2488-7318
Corresponding Author	Melisa Burcu Çelebi	

**YÜKSEK GÜNEŞ ENERJİSİ PENETRASYONUNA SAHİP DAĞITIM ŞEBEKELERİNDE GERİLİM  
REGÜLASYONU İÇİN ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİNİN ZAMAN SERİSİ ANALİZİ İLE  
BOYUTLANDIRILMASI**

**ÖZ**

Elektrik üretiminde fotovoltaik sistemlerin hızla artması, özellikle düşük yük koşullarında dağıtım şebekelerinde gerilim yükselmesi problemlerine yol açmaktadır. Bu çalışmada, yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip bir dağıtım fiderinde oluşan gerilim ihlallerinin giderilmesi amacıyla zaman serisi tabanlı bir enerji depolama sistemi boyutlandırma yaklaşımı önerilmiştir. Gerçek bir dağıtım şebekesine ait saatlik üretim ve tüketim verileri kullanılarak güç akışı analizleri gerçekleştirilmiş, kritik gerilim ihlallerinin meydana geldiği zaman dilimleri belirlenmiştir. Bu kapsamda, depolama sisteminin kapasitesi günlük enerji ihtiyacının %95'lik değerine dayalı olarak hesaplanmıştır. Analiz sonuçları, depolama sistemi kullanılmadığında bazı senaryolarda bara geriliminin 1.111 p.u. seviyesine kadar yükseldiğini, önerilen depolama sistemi ile tüm düşümlerde gerilim değerlerinin izin verilen sınırlar içerisinde tutulabildiğini göstermektedir. Elde edilen bulgular, önerilen yaklaşımın yüksek fotovoltaik penetrasyonuna sahip dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu için etkili ve uygulanabilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Gerilim Regülasyonu, BESS Boyutlandırması, PV Entegrasyonu, Zaman Serisi Analizi, Gerilim Yükselmesi Kontrolü, Dağıtım Şebekeleri Planlaması

**TIME-SERIES BASED SIZING OF BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS FOR VOLTAGE  
REGULATION IN DISTRIBUTION NETWORKS WITH HIGH PV PENETRATION**

**ABSTRACT**

The rapid increase in photovoltaic (PV) generation has led to voltage rise problems in distribution networks, particularly under low-load conditions. In this study, a time-series-based sizing approach for a battery energy storage system (BESS) is proposed to mitigate voltage violations in a distribution feeder with high PV penetration. Power flow analyses were performed using hourly generation and consumption data obtained from a real distribution network, and critical time intervals with voltage violations were identified. In this context, the storage capacity was determined based on the 95th percentile of daily energy requirements. The results indicate that, in the absence of the storage system, bus voltages can rise up to 1.111 p.u. under certain scenarios, whereas with the proposed BESS, all node voltages are maintained within permissible limits. The findings demonstrate that the proposed approach provides an effective and practical solution for voltage regulation in distribution networks with high PV penetration.

**Keywords:** Voltage Regulation, BESS Sizing, PV Integration, Time-Series Analysis, Voltage Rise Control, Distribution Grid Planning

**How to Cite:**

Çelebi, M.B. ve Sakallı, A., (2025). Yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu için enerji depolama sisteminin zaman serisi analizi ile boyutlandırılması. Engineering Sciences, 21(1):1-14, DOI: 10.12739/NWSA.2026.21.2.1A0503.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Küresel enerji talebinin artması, fosil yakıt rezervlerinin sınırlı olması ve iklim değişikliğinin etkilerinin giderek daha belirgin hale gelmesi, elektrik enerji sistemlerinin düşük karbonlu üretim teknolojilerine doğru dönüşümünü zorunlu kılmaktadır. Bu dönüşüm sürecinde yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik şebekelerine entegrasyonu hız kazanmış, özellikle güneş enerjisi santralleri dağıtım seviyesinden sisteme bağlanan en yaygın üretim kaynaklarından biri haline gelmiştir. Dağıtık üretim yapısının yaygınlaşması, geleneksel olarak tek yönlü güç akışına göre tasarlanan dağıtım şebekelerinin işletme karakteristiğini önemli ölçüde değiştirmektedir [1, 2 ve 3].

Yüksek oranlı fotovoltaik üretimin dağıtım şebekelerine entegrasyonu, özellikle düşük yük koşullarında ters güç akışına neden olmakta ve uzun veya zayıf hat yapısına sahip dağıtım fiderlerinde gerilim değerlerinin izin verilen sınırların üzerine çıkmasına yol açabilmektedir [4 ve 5]. Bu durum hem güç kalitesinin bozulmasına hem de şebeke ekipmanlarının işletme sınırlarının zorlanmasına neden olmaktadır. Geleneksel gerilim regülasyon yöntemleri bu yeni işletme koşullarında çoğu zaman yetersiz kalmakta veya yüksek yatırım maliyetleri gerektirmektedir. Bu nedenle dağıtım şebekelerinde artan yenilenebilir enerji penetrasyonu ile esnek ve hızlı tepki verebilen yeni çözüm yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır.

Enerji depolama sistemleri, elektrik enerjisinin zaman bağımlı yapısını yönetebilme kabiliyetleri sayesinde yenilenebilir enerji kaynaklarının şebekeye entegrasyonunda önemli bir esneklik aracı olarak öne çıkmaktadır [6, 7, 8, 9 ve 10]. Depolama sistemleri fazla üretim anlarında enerjiyi depolayarak gerilim yükselmesini sınırlandırabilmekte, üretimin yetersiz olduğu durumlarda ise şebekeye enerji vererek gerilim profilinin iyileştirilmesine katkı sağlayabilmektedir. Bu yönüyle enerji depolama teknolojileri, dağıtım şebekelerinin yenilenebilir enerji barındırma kapasitesini artıran ve sürdürülebilir şebeke işletimini destekleyen önemli bir çözüm olarak değerlendirilmektedir.

Literatürde dağıtım şebekelerinde yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonunun gerilim profili üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır [11 ve 12]. Bununla birlikte, bu çalışmaların önemli bir bölümü teorik test sistemleri veya sınırlı senaryo analizleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Gerçek dağıtım şebekelerine ait uzun dönemli üretim ve tüketim verilerinin kullanıldığı, zaman serisi tabanlı analizlerin gerçekleştirildiği ve enerji depolama sistemlerinin optimum kapasitesinin belirlenmesine yönelik uygulamalı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip gerçek bir dağıtım fideri incelenmiş ve söz konusu sistemde meydana gelen gerilim ihlallerinin enerji depolama sistemi kullanılarak giderilmesi amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında yıllık üretim ve tüketim verileri kullanılarak zaman serisi tabanlı güç akışı analizleri gerçekleştirilmiş ve farklı işletme senaryoları altında şebekenin gerilim davranışı değerlendirilmiştir. Gerilim sınırlarının aşıldığı kritik zaman dilimleri belirlenmiş ve bu ihlalleri ortadan kaldıracabilecek minimum enerji depolama kapasitesi hesaplanmıştır.

Bu çalışmanın literatüre başlıca katkıları aşağıda özetlenmiştir:

- Gerçek bir dağıtım fiderine ait üretim ve tüketim verileri kullanılarak zaman serisi tabanlı analiz gerçekleştirilmesi
- Enerji depolama sisteminin gerilim regülasyonu amacıyla optimum kapasitesinin belirlenmesi
- Depolama sisteminin dağıtım şebekesinin yenilenebilir enerji barındırma kapasitesi üzerindeki etkisinin değerlendirilmesi

Bu yönüyle çalışma, gerçek dağıtım şebekesi verileri kullanılarak gerçekleştirilen zaman serisi tabanlı analizler aracılığıyla enerji depolama sistemlerinin gerilim regülasyonu amacıyla optimum kapasitesinin belirlenmesine yönelik uygulanabilir bir yöntem sunmaktadır. Önerilen yaklaşım, yüksek fotovolttaik penetrasyonuna sahip dağıtım sistemlerinde gerilim ihlallerinin azaltılması ve şebekenin yenilenebilir enerji barındırma kapasitesinin artırılması açısından önemli bir planlama aracı olarak değerlendirilebilir.

## 2. ÇALIŞMANIN ÖNEMİ (RESEARCH SIGNIFICANCE)

Yenilenebilir enerji kaynaklarının elektrik üretimindeki payının hızla artması, özellikle güneş enerjisi santrallerinin dağıtım seviyesinden sisteme bağlanmasıyla birlikte dağıtım şebekelerinin işletme karakteristiğini önemli ölçüde değiştirmiştir. Yüksek fotovolttaik penetrasyonu, özellikle düşük yük koşullarında dağıtım fiderlerinde gerilim yükselmesi problemlerine neden olmakta ve bu durum hem güç kalitesi hem de şebeke ekipmanlarının güvenli işletmesi açısından önemli teknik riskler oluşturmaktadır. Dağıtım şebekelerinin geleneksel olarak tek yönlü güç akışına göre tasarlanmış olması, yüksek dağıtım üretim koşullarında ortaya çıkan bu gerilim problemlerinin klasik gerilim regülasyon yöntemleri ile her zaman etkin şekilde çözülememesine yol açmaktadır.

Literatürde yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonunun dağıtım şebekeleri üzerindeki etkilerini inceleyen çok sayıda çalışma bulunmaktadır [2 ve 3]. Bununla birlikte, bu çalışmaların önemli bir kısmının teorik test sistemleri veya sınırlı senaryo analizleri üzerinden gerçekleştirildiği görülmektedir. Gerçek dağıtım şebekelerine ait uzun dönemli üretim ve tüketim verilerinin kullanıldığı, zaman serisi tabanlı analizlerin gerçekleştirildiği ve enerji depolama sistemlerinin optimum kapasitesinin belirlendiği uygulamalı çalışmaların sayısı sınırlıdır [13]. Bu durum, yenilenebilir enerji entegrasyonunun hızla arttığı modern dağıtım sistemleri için daha gerçekçi ve uygulanabilir analiz yaklaşımlarına ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Bu çalışmanın temel amacı, yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip bir dağıtım şebekesinde meydana gelen gerilim ihlallerinin enerji depolama sistemi kullanılarak giderilmesi ve bu amaçla gerekli depolama kapasitesinin belirlenmesidir. Bu kapsamda gerçek bir dağıtım fiderine ait yıllık üretim ve tüketim verileri kullanılarak zaman serisi tabanlı güç akışı analizleri gerçekleştirilmiştir. Şebeke modeli güç sistemi analiz yazılımı kullanılarak oluşturulmuş ve farklı üretim-tüketim senaryoları altında sistemin gerilim davranışı değerlendirilmiştir. Gerilim sınırlarının aşıldığı kritik zaman dilimleri belirlenmiş ve bu ihlalleri ortadan kaldıracak minimum enerji depolama kapasitesinin belirlenmesi amacıyla optimizasyon tabanlı bir yaklaşım uygulanmıştır. Çalışmanın temel hipotezi, uygun kapasite ve konumda seçilen bir enerji depolama sisteminin dağıtım şebekelerinde meydana gelen gerilim ihlallerini etkin şekilde azaltabileceği ve şebekenin yenilenebilir enerji barındırma kapasitesini artırabileceğidir. Elde edilen analiz sonuçları, enerji depolama sisteminin dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu açısından etkili bir çözüm sunduğunu ve yenilenebilir enerji entegrasyonunun daha esnek ve sürdürülebilir şekilde gerçekleştirilmesine katkı sağlayabileceğini göstermektedir.

Bu çalışma, gerçek şebeke verilerine dayalı zaman serisi analizlerini içermesi ve enerji depolama sisteminin gerilim regülasyonu amacıyla optimum kapasitesinin belirlenmesini ele alması bakımından literatüre uygulamaya yönelik önemli bir katkı sunmaktadır. Ayrıca elde edilen bulguların dağıtım şebekesi planlama süreçlerinde karar destek aracı olarak kullanılabilmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının

şebekeye güvenli şekilde entegrasyonuna katkı sağlayabileceği değerlendirilmektedir.

#### **Önemli Noktalar (Highlights)**

- Gerçek bir dağıtım fiderine ait üretim ve tüketim verileri kullanılarak yüksek güneş enerjisi penetrasyonunun gerilim etkileri analiz edilmiştir.
- Enerji depolama sisteminin gerilim regülasyonu amacıyla gerekli güç ve enerji kapasitesi zaman serisi tabanlı analizlerle belirlenmiştir.
- Önerilen yaklaşım, dağıtım şebekelerinde yenilenebilir enerji barındırma kapasitesinin artırılmasına yönelik uygulanabilir bir planlama yöntemi sunmaktadır.

Bu yönüyle çalışma, yüksek fotovoltaiik penetrasyonuna sahip dağıtım şebekelerinde enerji depolama sistemlerinin gerilim regülasyonu amacıyla kullanımına yönelik gerçek veri temelli uygulanabilir bir yaklaşım sunmaktadır.

### **3. ANALİTİK ÇALIŞMA (ANALYTICAL STUDY)**

Bu çalışmada yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip bir dağıtım fiderinde meydana gelen gerilim değişimlerinin analizi ve enerji depolama sistemi kullanılarak gerilim regülasyonunun sağlanması amaçlanmıştır. Bu kapsamda gerçek bir dağıtım şebekesine ait üretim ve tüketim verileri kullanılarak zaman serisi tabanlı analizler gerçekleştirilmiştir. Analiz sürecinde dağıtım şebekesi modeli oluşturulmuş, farklı üretim ve tüketim senaryoları altında sistemin gerilim davranışı incelenmiş ve gerilim ihlallerinin giderilmesi için gerekli enerji depolama kapasitesi belirlenmiştir.

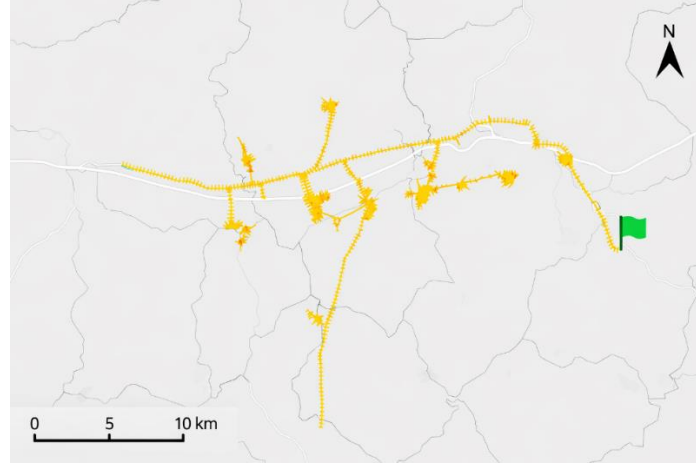
#### **3.1. İncelenen Dağıtım Şebekesi (Distribution Network Model)**

Çalışma kapsamında yüksek oranda güneş enerjisi üretim tesisinin bağlı olduğu gerçek bir dağıtım fideri incelenmiştir. İncelenen fiderin hat parametreleri, iletken özellikleri, trafo merkezleri ve yük dağılımları dikkate alınarak detaylı bir şebeke modeli oluşturulmuştur. Şebekeye ait elektriksel parametreler ilgili dağıtım şirketinden temin edilen veriler kullanılarak modele dâhil edilmiştir. Fider boyunca bulunan yük noktalarının aktif ve reaktif güç değerleri ile güneş enerjisi santraline ait kurulu güç bilgileri sistem modeline tanımlanmıştır. İncelenen dağıtım fiderine ait temel şebeke parametreleri Tablo 1'de sunulmuştur.

Tablo 1. İncelenen dağıtım fiderine ait temel şebeke parametreleri  
(Table 1. Key network parameters of the analyzed distribution feeder)

Parametre	Değer	Birim
Aktif Güç	3.9	MW
Trafo Gücü	54	MVA
Fider Uzunluğu	142.6	Km

İncelenen şebeke, uzun hat yapısına sahip olup yük dağılımının fider boyunca homojen olmaması nedeniyle düşük tüketim ve yüksek üretim koşullarında gerilim yükselmesi probleminin ortaya çıktığı gözlemlenmiştir. Bu özellikleri ile seçilen fider, yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip dağıtım şebekelerinde karşılaşılan gerilim problemlerinin incelenmesi açısından uygun bir çalışma alanı sunmaktadır [12 ve 14]. İncelenen dağıtım fiderinin coğrafi yerleşimi ve güneş enerjisi santralinin bağlantı noktası Şekil 1'de gösterilmiştir. Dağıtım şirketi verilerinin gizliliği nedeniyle şebeke topolojisi basitleştirilmiş şekilde sunulmuştur.



Şekil 1. İncelenen dağıtım fiderinin coğrafi yerleşimi ve PV bağlantı noktası

(Figure 1. Geographic layout of the studied distribution feeder and the PV connection point)

### 3.2. Veri Seti ve Zaman Serisi Analizi (Data Set and Time-Series Analysis)

Çalışmada yük akışı analizlerinde kullanılmak üzere güneş enerjisi santraline ait üretim verileri ile dağıtım fiderindeki yük noktalarına ait tüketim verileri saatlik çözünürlükte temin edilmiştir. Zaman serisi analizlerinde her bir zaman adımı için net güç değeri üretim ve tüketim farkı olarak hesaplanmıştır.

$$P_{net}(t) = PPV(t) - P_{load}(t) \quad (1)$$

Burada  $P_{PV}(t)$  güneş enerjisi üretimini,  $P_{load}(t)$  ise ilgili zaman adımıdaki yük tüketimini temsil etmektedir.

Yıllık zaman serisi verilerinin kullanılması sayesinde şebekenin yıl boyunca karşılaşılabileceği farklı üretim ve tüketim koşulları altında gerilim davranışı incelenebilmiştir. Bu yaklaşım, gerilim sınırlarının aşıldığı kritik zaman dilimlerinin belirlenmesine olanak sağlamıştır. Zaman serisi analizleri sonucunda özellikle düşük yük ve yüksek üretim koşullarında fider boyunca gerilim yükselmesinin meydana geldiği tespit edilmiştir. Bu durum enerji depolama sisteminin gerilim regülasyonu amacıyla kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymuştur.

### 3.3. Güç Akışı Analizi ve Şebeke Modeli (Power Flow Analysis)

Dağıtım şebekesinin analizi için DIGSILENT PowerFactory yazılımı kullanılarak ayrıntılı bir güç sistemi modeli oluşturulmuştur. Dağıtım şebekesindeki bara gerilimleri ve hat güç akışları, aktif ve reaktif güç dengesi denklemlerinin çözülmesi ile elde edilmektedir [15]. Bu nedenle yük akışı analizleri Newton-Raphson tabanlı iteratif çözüm yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde her bir bara için aktif ve reaktif güç dengesi aşağıdaki denklemler ile ifade edilmektedir.

$$P_i = V_i \sum_{j=1}^{n} V_j \left( G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij} \right) \quad (3)$$

$$Q_i = V_i \sum_{j=1}^{n} V_j \left( G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij} \right) \quad (4)$$

Burada  $P_i$  ve  $Q_i$  sırasıyla  $i$  barasındaki aktif ve reaktif güç enjeksiyonlarını,  $V_i$  ve  $V_j$  bara gerilim büyüklüklerini,  $G_{ij}$  ve  $B_{ij}$  iletkenlik ve süseptans matris elemanlarını,  $\theta_{ij}$  ise baralar arasındaki faz açısı farkını ifade etmektedir. Newton-Raphson yöntemi bu doğrusal olmayan güç akışı denklemlerini Jacobian matrisi yardımıyla lineerleştirerek iteratif olarak çözmekte ve sistem gerilim büyüklükleri ile faz açılarını hesaplamaktadır.

Program ortamında hatlar, trafolar, yükler ve güneş enerjisi üretim tesisleri gerçek şebeke parametreleri kullanılarak modellenmiştir. Oluşturulan model üzerinde zaman serisi tabanlı yük akışı analizleri gerçekleştirilmiş ve farklı üretim-tüketim senaryoları altında şebekenin gerilim profili incelenmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda üretimin yüksek ve yük seviyesinin düşük olduğu işletme koşullarında özellikle fider sonlarında gerilim değerlerinin izin verilen sınırların üzerine çıktığı belirlenmiştir. Bu durum, yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu amacıyla esnek ve hızlı tepki verebilen kontrol yöntemlerine ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

### **3.4. Enerji Depolama Sisteminin Modellemesi (Energy Storage System Modeling)**

Gerilim ihlallerinin giderilmesi amacıyla dağıtım şebekesine bir enerji depolama sistemi entegre edilmiştir. Depolama sistemi aktif güç kontrolü ile çalışan bir kaynak olarak modellenmiş ve gerilim değerinin üst sınırı aştığı durumlarda şarj modunda çalışarak şebekeden güç çekmesi, gerilim düşümünün meydana geldiği durumlarda ise deşarj modunda çalışarak şebekeye güç vermesi esasına göre işletilmiştir. Farklı güç ve enerji kapasitesi değerleri için gerçekleştirilen analizler sonucunda depolama sisteminin gerilim regülasyonu üzerindeki etkisi değerlendirilmiştir. Depolama sisteminin kapasite boyutlandırmasına yönelik hesaplama algoritması, üretim ve tüketim zaman serisi verilerinin işlenmesi amacıyla Python tabanlı bir analiz ortamında uygulanmıştır. Bu analizler, dağıtım şebekesinde gerilim ihlallerinin ortadan kaldırılması için gerekli minimum depolama kapasitesinin belirlenmesine olanak sağlamıştır.

## **4. BULGULAR VE TARTIŞMALAR (FINDINGS AND DISCUSSIONS)**

Bu bölümde yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip dağıtım fideri üzerinde gerçekleştirilen analizlerden elde edilen bulgular sunulmuş ve sonuçlar dağıtım şebekesi işletmesi açısından değerlendirilmiştir. Analiz sürecinde güneş enerjisi üretim karakteristiği incelenmiş, farklı üretim-tüketim senaryoları altında sistemin gerilim davranışı değerlendirilmiş ve enerji depolama sisteminin gerilim regülasyonu üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur.

### **4.1. Güneş Enerjisi Üretim Profiline Analizi (PV Generation Profile Analysis)**

İncelenen güneş enerjisi santraline ait saatlik üretim verileri kullanılarak santralin yıllık üretim karakteristiği analiz edilmiştir. Saatlik üretim verilerinin incelenmesi sonucunda üretimin gün ortası saatlerinde yoğunlaştığı ve gece saatlerinde sıfır seviyesine düştüğü belirlenmiştir. Aylık üretim dağılımı değerlendirildiğinde yaz aylarında üretim değerlerinin belirgin şekilde arttığı, kış aylarında ise güneşlenme süresine bağlı olarak üretim seviyelerinin daha düşük olduğu görülmüştür. Günlük ortalama üretim eğrisi incelendiğinde üretimin özellikle öğle saatlerinde maksimum seviyeye ulaştığı belirlenmiştir. Bu durum güneş enerjisi üretiminin gün içerisinde belirli zaman aralıklarında yoğunlaşmasına neden olmakta ve düşük yük koşulları ile çakıştığı durumlarda dağıtım şebekesi açısından kritik işletme koşullarının oluşmasına yol açabilmektedir. Bu üretim karakteristiği, yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu probleminin temel nedenlerinden biri olarak değerlendirilmektedir.

#### 4.2. Üretim-Tüketim Senaryolarına Göre Gerilim Profili Analizi (Voltage Profile Analysis Under Different Operating Conditions)

Dağıtım şebekesinde güneş enerjisi üretiminin gerilim profili üzerindeki etkisini incelemek amacıyla farklı üretim ve tüketim oranlarını temsil eden senaryolar oluşturulmuştur.

Tablo 2. Analiz edilen üretim-tüketim senaryoları  
(Table 2. Generation-consumption scenarios considered in the analysis)

Senaryo	Üretim (%)	Tüketim (%)	Üretim Seviyesi	Tüketim Seviyesi	Maks. Gerilim (p.u.)	Kayıplar (MW)	Gerilim Davranışı
Ü0-T100	0	100	Düşük	Yüksek	1	1.4	Gerilim düşümü
Ü50-T50	50	50	Orta	Orta	1.033	0.2	Sınır gerilim değişimi
Ü100-T50	100	50	Yüksek	Orta	1.082	1.1	Yer yer gerilim yükselmesi
Ü100-T0	100	0	Maksimum	Minimum	1.111	1.6	Belirgin gerilim yükselmesi

Dağıtım sistemlerinde güç akış yönündeki değişim, özellikle radyal yapıdaki şebekelerde hat kayıplarının da değişmesine neden olabilmektedir [16]. Analizlerde kullanılan üretim-tüketim senaryoları ve bu senaryolara ait yük akışı sonuçları Tablo 2'de sunulmuştur. Tablo 2 incelendiğinde, üretimin maksimum ve tüketimin minimum olduğu senaryoda fider geriliminin 1.111 p.u. değerine kadar yükseldiği görülmektedir. Bu durum yüksek fotovoltaiik penetrasyonuna sahip dağıtım şebekelerinde gerilim yükselmesi probleminin ortaya çıkabileceğini göstermektedir.

Analiz sonuçları, üretimin bulunmadığı ve yük seviyesinin yüksek olduğu işletme koşullarında dağıtım sisteminin klasik gerilim düşümü karakteristiği sergilediğini göstermektedir. Trafo merkezi çıkışında nominal seviyede başlayan gerilim değeri, hat empedansı boyunca taşınan akımın etkisiyle fider sonlarına doğru kademeli olarak azalmaktadır. Özellikle uzun fider yapısına sahip dağıtım şebekelerinde bu gerilim düşümü daha belirgin hale gelmektedir.

Buna karşılık üretimin yüksek ve yük seviyesinin düşük olduğu senaryolarda sistem davranışının önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir [11 ve 12]. Bu durumda güneş enerjisi üretiminin yerel tüketimin üzerine çıkması nedeniyle ters güç akışı meydana gelmekte ve özellikle fider sonlarında gerilim yükselmesi oluşmaktadır. Yapılan analizlerde bazı düşümlerde gerilim değerlerinin izin verilen işletme sınırlarının üzerine çıktığı belirlenmiştir. Bu sonuç, yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip dağıtım sistemlerinde gerilim kontrolünün önemli bir işletme problemi haline geldiğini göstermektedir.

#### 4.3. Enerji Depolama Sisteminin Gerilim Regülasyonuna Etkisi (Impact of Energy Storage System on Voltage Regulation)

Gerilim ihlallerinin giderilmesi amacıyla dağıtım şebekesine enerji depolama sistemi entegre edilmiştir. Depolama sistemi fazla üretimin bulunduğu zaman dilimlerinde şebekeden aktif güç çekerek gerilim yükselmesini sınırlandıracak şekilde modellenmiştir.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda enerji depolama sisteminin devreye alınmasıyla fider boyunca gerilim profilinin önemli ölçüde iyileştiği gözlemlenmiştir. Depolama sisteminin devrede olmadığı durumda bazı düşümlerde gerilim değerlerinin izin verilen üst sınırı üzerine çıktığı görülürken, depolama sisteminin devreye alınması ile tüm düşümlerde gerilim değerlerinin izin verilen sınırlar içerisinde kaldığı belirlenmiştir. Bu sonuç, enerji depolama sistemlerinin dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu açısından etkili bir çözüm sunduğunu göstermektedir [4, 13, 17, 18 ve 19]. Fazla üretim anlarında sistemden

güç çekilmesi, fider boyunca oluşan gerilim yükselmesini sınırlandırmakta ve şebeke gerilim profilinin daha dengeli bir yapıya kavuşmasını sağlamaktadır.

#### 4.4. Depolama Kapasitesinin Belirlenmesi ve Sistem Performansının Değerlendirilmesi (Storage Capacity Determination and System Performance)

Enerji depolama sisteminin optimum kapasitesinin belirlenmesi amacıyla zaman serisi tabanlı analizler gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda üretim ve tüketim verileri kullanılarak net güç değişimleri hesaplanmış ve gerilim ihlallerinin meydana geldiği kritik zaman dilimleri belirlenmiştir. Kritik zaman dilimlerinde şebekeden çekilmesi gereken güç miktarı hesaplanarak depolama sisteminin enerji kapasitesi belirlenmiştir. Günlük enerji ihtiyaçlarının istatistiksel dağılımı analiz edilerek depolama kapasitesi belirlenmiştir. Bu amaçla günlük enerji değerlerinin %95 yüzdelerlik değeri depolama sisteminin enerji kapasitesi olarak seçilmiştir. %95 yüzdelerlik değerinin seçilmesi, aşırı uç durumların depolama kapasitesini gereksiz şekilde büyütmesini engellemek ve sistem için pratik bir kapasite değeri belirlemek amacıyla tercih edilmiştir.

$$E_{BESS} = \text{Percentile}_{95}(E_{\text{daily}}) \quad (2)$$

Burada  $E_{\text{daily}}$  günlük depolama enerji ihtiyacını,  $\text{Percentile}_{95}$  ise günlük enerji dağılımının %95 yüzdelerlik değerini ifade etmektedir.

Elde edilen sonuçlar, uygun kapasitede seçilen bir enerji depolama sisteminin dağıtım şebekesinde meydana gelen gerilim ihlallerini etkin şekilde azaltabildiğini göstermektedir. Bu sonuçlar, enerji depolama sistemlerinin yüksek fotovoltaiik penetrasyonuna sahip dağıtım şebekelerinde gerilim yükselmesi problemlerini azaltmada etkili olduğunu gösteren önceki çalışmalarla da uyumludur [4, 5, 10 ve 18]. Genel olarak değerlendirildiğinde, elde edilen bulgular, enerji depolama sistemlerinin yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu açısından önemli bir esneklik sağladığını ve şebeke işletmesinin daha güvenli şekilde gerçekleştirilebilmesine katkı sunduğunu göstermektedir [13 ve 17].

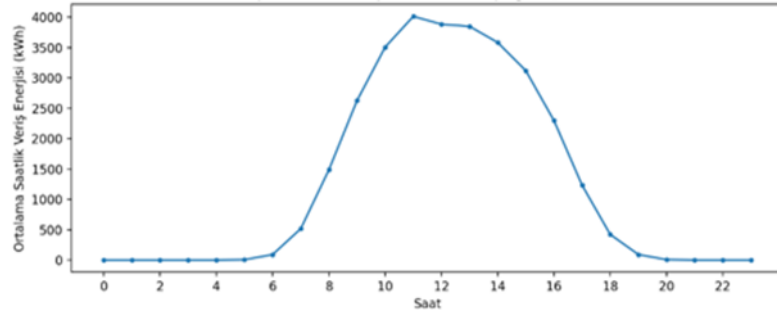
Elde edilen sonuçlar, enerji depolama sistemlerinin yüksek fotovoltaiik penetrasyonuna sahip dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu için etkili ve uygulanabilir bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır [5 ve 10].

#### 5. SONUÇ VE ÖNERİLER (CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS)

Bu çalışmada yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip bir dağıtım fiderinde meydana gelen gerilim değişimleri analiz edilmiş ve gerilim ihlallerinin enerji depolama sistemi kullanılarak giderilmesine yönelik zaman serisi tabanlı bir yaklaşım geliştirilmiştir. Gerçek bir dağıtım şebekesine ait üretim ve tüketim verileri kullanılarak gerçekleştirilen güç akışı analizleri sonucunda, özellikle düşük yük ve yüksek üretim koşullarında fider boyunca gerilim yükselmesi problemlerinin ortaya çıktığı belirlenmiştir. Gerçekleştirilen analizler, uygun kapasitede konumlandırılan bir enerji depolama sisteminin fazla üretim anlarında şebekeden aktif güç çekerek gerilim yükselmesini sınırlandırabildiğini ve dağıtım şebekesindeki tüm düşümlerde gerilim değerlerini izin verilen işletme sınırları içerisinde tutabildiğini göstermiştir.

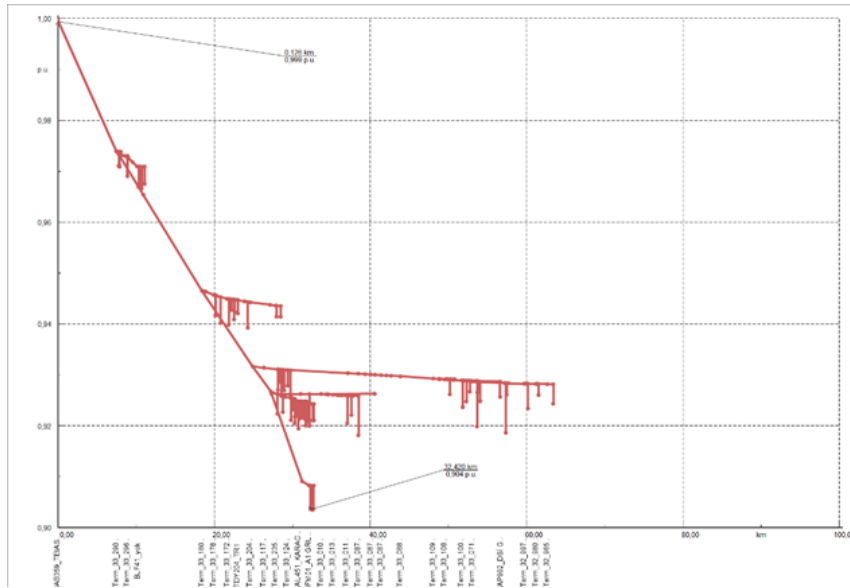
Güneş enerjisi santraline ait üretim karakteristiği incelendiğinde üretimin gün ortası saatlerinde maksimum seviyeye ulaştığı ve gece saatlerinde sıfır seviyesine düştüğü görülmüştür. Saatlik üretim verilerinden elde edilen üretim eğrisi Şekil 2'de sunulmuştur. Bu üretim karakteristiği özellikle düşük yük koşulları ile çakıştığında dağıtım

şebekesinde gerilim yükselmesi problemlerinin ortaya çıkmasına neden olmaktadır.

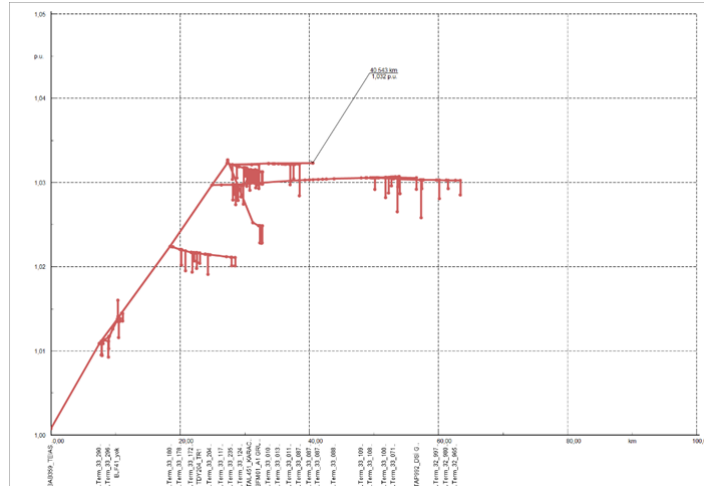


Şekil 2. Saatlik ortalama üretim eğrisi  
(Figure 2. Average hourly generation profile)

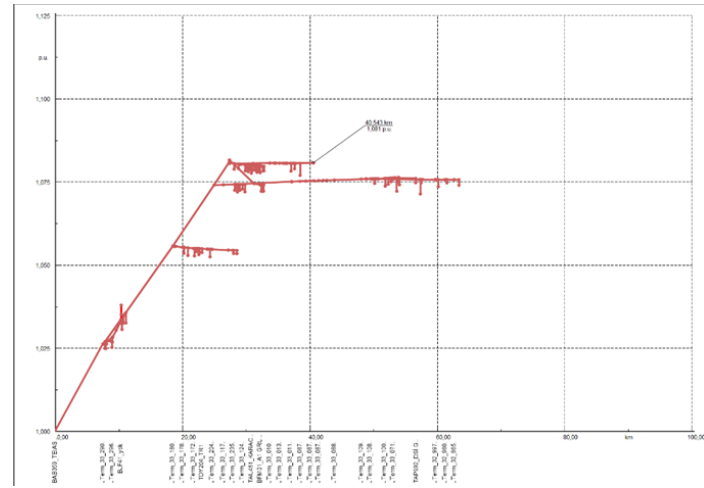
Farklı üretim ve tüketim oranlarını temsil eden işletme senaryoları için gerçekleştirilen yük akışı analizleri sonucunda üretimin düşük ve yük seviyesinin yüksek olduğu durumlarda klasik gerilim düşümü karakteristiğinin ortaya çıktığı görülmüştür. Buna karşılık, üretimin yüksek ve yük seviyesinin düşük olduğu senaryolarda ters güç akışı meydana gelmiş ve özellikle fider sonlarında gerilim değerlerinin yükseldiği belirlenmiştir. Şekil 3 ve Şekil 4'te üretimin düşük olduğu işletme koşullarında fider boyunca gerilim değerlerinin hat empedansı boyunca kademeli olarak azaldığı görülmektedir. Buna karşılık Şekil 5 ve Şekil 6'da üretimin yüksek olduğu senaryolarda özellikle fider sonlarında gerilim değerlerinin yükseldiği ve bazı düğümlerde izin verilen gerilim sınırlarına yaklaşıldığı gözlemlenmiştir.



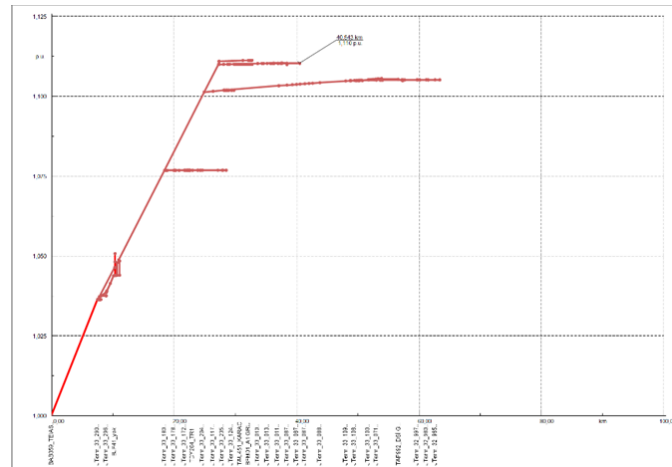
Şekil 3. Ü%0 - T%100 gerilim salınımı  
(Figure 3. Voltage variation under the 0% generation - 100% load scenario)



Şekil 4. Ü%50 - T%50 gerilim salınımı  
(Figure 4. Voltage variation under the 50% generation - 50% load scenario)

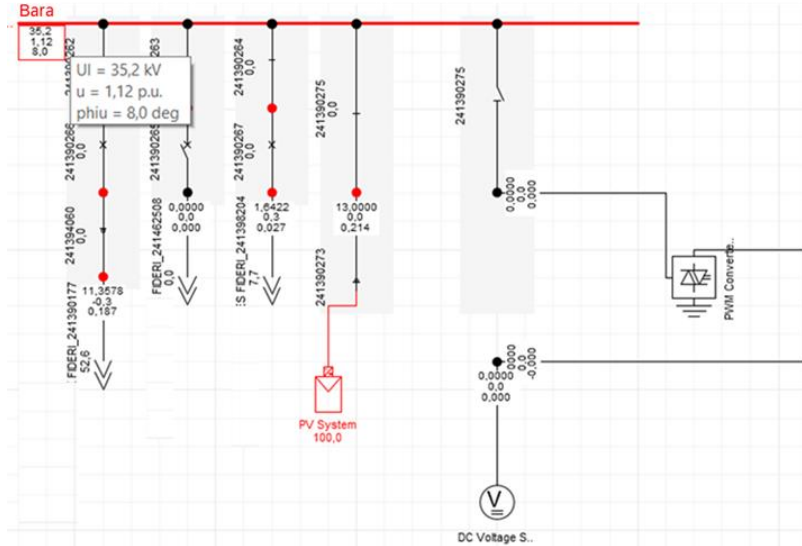


Şekil 5. Ü%100 - T%50 gerilim salınımı  
(Figure 5. Voltage variation under the 100% generation - 50% load scenario)



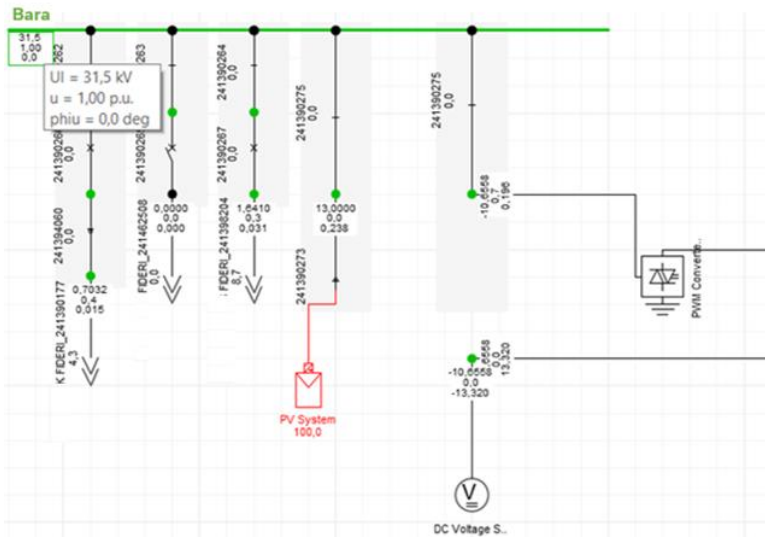
Şekil 6. Ü%100 - T%0 gerilim salınımı  
(Figure 6. Voltage variation under the 100% generation - 0% load scenario)

Enerji depolama sisteminin devrede olmadığı durumda gerçekleştirilen analizlerde bazı düğümlerde gerilim değerlerinin izin verilen üst sınırın üzerine çıktığı belirlenmiştir. Bu duruma ait gerilim dağılımı Şekil 7’de sunulmuştur. Gerilim ihlallerinin giderilmesi amacıyla dağıtım şebekesine enerji depolama sistemi entegre edilmiş ve farklı kapasite değerleri için analizler gerçekleştirilmiştir.



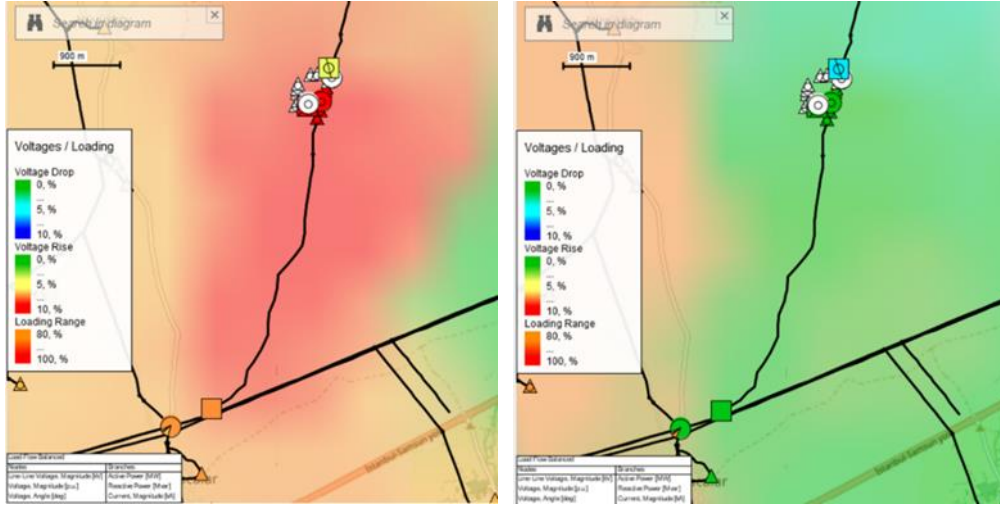
Şekil 7. Bara gerilim profili - depolama sistemi devrede değilken  
(Figure 7. Bus voltage profile without the energy storage system in operation)

Enerji depolama sisteminin devreye alınmasıyla fider boyunca gerilim profilinin önemli ölçüde iyileştiği gözlemlenmiştir. Depolama sisteminin aktif güç kontrolü sayesinde fazla üretim anlarında sistemden güç çekilmesi, gerilim yükselmesini sınırlandırmış ve tüm düğümlerde gerilim değerlerinin izin verilen işletme sınırları içerisinde kaldığı görülmüştür. Enerji depolama sisteminin devrede olduğu durumda elde edilen gerilim dağılımı Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Bara gerilim profili - depolama sistemi devredeyken  
(Figure 8. Bus voltage profile with the energy storage system in operation)

Gerilim dağılımının zaman ve düğüm bazında daha açık şekilde değerlendirilebilmesi amacıyla oluşturulan gerilim yoğunluk haritası Şekil 9'da sunulmuştur. Bu görsel, enerji depolama sisteminin devreye alınması ile gerilim ihlallerinin ortadan kalktığını ve sistem gerilim profilinin daha dengeli bir yapıya kavuştuğunu Şekil 10'da açık şekilde göstermektedir.



Şekil 9-10. Enerji depolama sistemi devredeyken ve devrede değilken gerilim ısı haritaları

(Figures 9-10. Voltage heatmaps with and without energy storage)

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen zaman serisi analizleri sayesinde gerilim ihlallerinin meydana geldiği kritik zaman dilimleri belirlenmiş ve bu ihlalleri ortadan kaldırabilecek minimum depolama kapasitesi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar, uygun kapasitede seçilen bir enerji depolama sisteminin yüksek güneş enerjisi penetrasyonuna sahip dağıtım şebekelerinde gerilim regülasyonu açısından etkili bir çözüm sunduğunu ortaya koymaktadır.

Bu çalışma ayrıca enerji depolama sistemlerinin dağıtım şebekelerinin yenilenebilir enerji barındırma kapasitesinin artırılmasına katkı sağlayabileceğini göstermektedir. Bu yönüyle çalışma, enerji depolama teknolojilerinin dağıtım şebekelerinde gerilim kontrolü ve sistem esnekliğinin artırılması amacıyla kullanılmasına yönelik uygulamaya dayalı bir değerlendirme sunmaktadır.

Gelecek çalışmalarda enerji depolama sistemlerinin optimum yerleşim noktalarının belirlenmesi, farklı kontrol stratejilerinin değerlendirilmesi ve ekonomik analizlerin gerçekleştirilmesi ile daha kapsamlı planlama yaklaşımlarının geliştirilmesi mümkün olacaktır. Ayrıca farklı dağıtım şebekesi yapılarında gerçekleştirilecek analizler, enerji depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji entegrasyonu üzerindeki etkilerinin daha kapsamlı şekilde değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Bu çalışma, gerçek dağıtım şebekesi verileri kullanılarak gerçekleştirilen zaman serisi analizleri ile enerji depolama sistemlerinin gerilim regülasyonu amacıyla uygulanabilirliğini ortaya koyarak literatürdeki teorik çalışmaların pratik bir uygulamasını sunmaktadır [20].

### SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

Sembol	Açıklama	Birim
$P_{pv}(t)$	t zamanındaki fotovoltaik üretim gücü	MW
$P_{load}(t)$	t zamanındaki yük tüketim gücü	MW
$P_{net}(t)$	Net güç değeri	MW
$E_{daily}$	Günlük depolama enerji ihtiyacı	MWh
$E_{BESS}$	Enerji depolama sisteminin enerji kapasitesi	MWh
Percentile <sub>95</sub>	Günlük enerji dağılımının %95 yüzdeline değeri	-
V	Bara gerilim değeri	p.u.
$V_{max}$	Maksimum bara gerilimi	p.u.
$P_{loss}$	Hat güç kaybı	MW
t	Zaman adımı	saat

### ACKNOWLEDGMENT

Çalıştığım dağıtım şirketinin uyum kuruluna görüş sorup ETİK UYGUNLUK TAAHÜTNAMESİ'NDE Çıkar Çatışması ve aşağıdaki taahhüname belirtilen durumlar için "çalışma kapsamında kullanacağım tüm verilerin anonim veriler olacağını, çalışmamda Elektrik dağıtım şirketine ait şebeke verilerini kullanmayacağımı; kullanacağım verilerin lokasyon ve belirleyici envanter bilgileri paylaşılmaksızın kullanılacağını ve hiçbir şekilde kişisel veri, ticari sır niteliğinde ticari veri, stratejik ya da kritik veri içermeyeceğini" taahhüdünü vermiş bulunmaktayım.

### ÇIKAR ÇATIŞMASI (CONFLICT OF INTEREST)

Yazarlar çıkar çatışması bildirmemişlerdir.

### FİNANSAL AÇIKLAMA (FINANCIAL DISCLOSURE)

Bu araştırmada finansal destek alınmamıştır.

### ETİK STANDARTLAR BEYANI (DECLARATION OF ETHICAL STANDARDS)

Makalenin yazarları bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve/veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan eder.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] Lopes, J.A.P., Hatziargyriou, N., Mutale, J., Djapic, P., and Jenkins, N., (2007). Integrating distributed generation into electric power systems: A review of drivers, challenges and opportunities. *Electric Power Systems Research*, 77(9):1189-1203.
- [2] Ackermann, T., Andersson, G., and Söder, L., (2001). Distributed generation: a definition. *Electric Power Systems Research*, 57(3):195-204.
- [3] Carrasco, J.M., Franquelo, L.G., Bialasiewicz, J.T., et al., (2006). Power electronic systems for the grid integration of renewable energy sources. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53(4):1002-1016.
- [4] Tonkoski, R., Lopes, L., and El-Fouly, T., (2012). Coordinated active power curtailment of grid connected PV inverters for overvoltage prevention. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2(2):139-147.
- [5] Turitsyn, K., Sulc, P., Backhaus, S., and Chertkov, M., (2011). Local control of reactive power by distributed photovoltaic generators. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(3):592-598.

- [6] Chen, H., Cong, T., Yang, W., Tan, C., Li, Y., and Ding, Y., (2009). Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 19(3):291-312.
- [7] Divya, K.C. and Østergaard, J., (2009). Battery energy storage technology for power systems—An overview. *Electric Power Systems Research*, 79(4):511-520.
- [8] Dunn, B., Kamath, H., and Tarascon, J., (2011). Electrical energy storage for the grid: A battery of choices. *Science*, 334(6058):928-935.
- [9] Ibrahim, H., Ilinca, A., and Perron, J., (2008). Energy storage systems—Characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12(5):1221-1250.
- [10] Luo, X., Wang, J., Dooner, M., and Clarke, J., (2015). Overview of current development in electrical energy storage technologies. *Applied Energy*, 137:511-536.
- [11] Göl, M. ve Duymaz, S., (2018). Photovoltaic generation impacts on distribution system voltage profile. *International Journal of Renewable Energy Research*, 8(2):1123-1131.
- [12] Fırıf, F.A., (2021). Dağıtım sistemlerinde fotovoltaiik üretimin şebeke gerilim profiline etkilerinin analizi (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [13] Nazaripouya, H., Wang, Y., Chu, P., Pota, H., and Gadh, R., (2016). Unbalanced optimal power flow for distribution systems with energy storage. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(5):2384-2395.
- [14] Aygün, A., (2023). Dağıtım şebekelerinde yüksek güneş enerjisi penetrasyonunun gerilim profili üzerindeki etkilerinin incelenmesi (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi). Elazığ: Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [15] Glover, J.D., Sarma, M.S., and Overbye, T.J., (2012). *Power system analysis and design*. 5. Baskı. Stamford: Cengage Learning.
- [16] Savier, E.S. and Das, D., (2012). An exact method for loss allocation in radial distribution systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 36(1):86-91.
- [17] Bahçeci, S. and Daldaban, F., (2017). Distribution network voltage regulation using PV and battery energy storage systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 90:1-9.
- [18] Jayasekara, N., et al., (2014). Optimal placement of battery energy storage systems in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 29(2):1-9.
- [19] Shojaei, A., et al., (2016). Voltage regulation in distribution systems with energy storage systems. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 7(4):1-9.
- [20] Wang, C. and Nehrir, M.H., (2008). Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 23(3):957-967.