

GÜÇ SİSTEMLERİ KONFERANSI IV



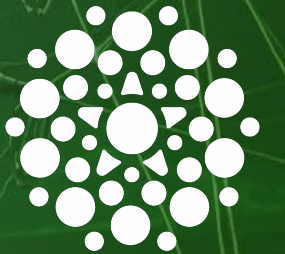
ENERJİ YÖNETİMİ VE ARBİTRAJ ODAKLI HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ

Dr. Feyzullah Gülpınar
Ar-Ge Uzmanı

Bildiri ID Numarası: 0147



**T.C. ENERJİ VE TABİİ
KAYNAKLAR BAKANLIĞI**



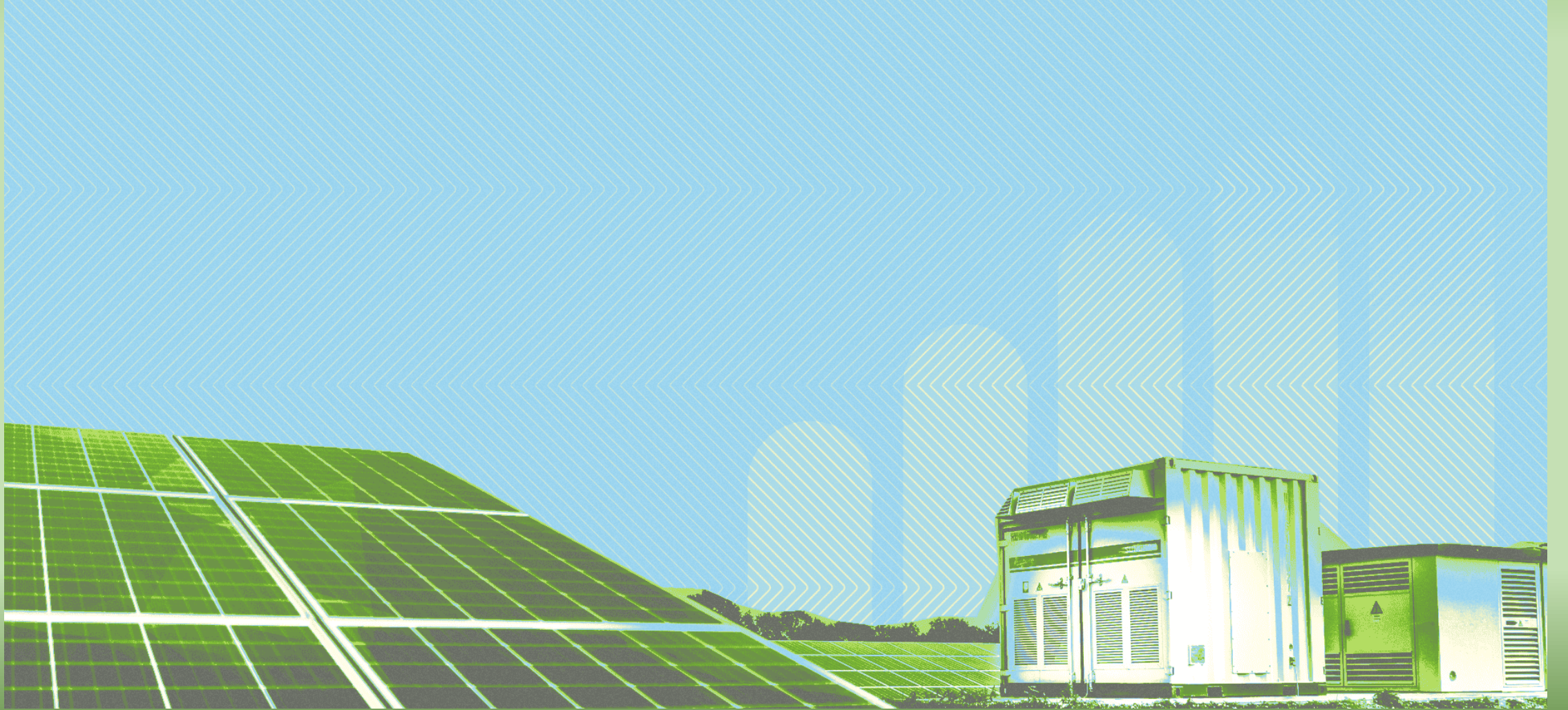
TENMAK
TÜRKİYE ENERJİ, NÜKLEER VE
MADEN ARAŞTIRMA KURUMU

ENERJİ YÖNETİMİ VE ARBİTRAJ ODAKLI HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ

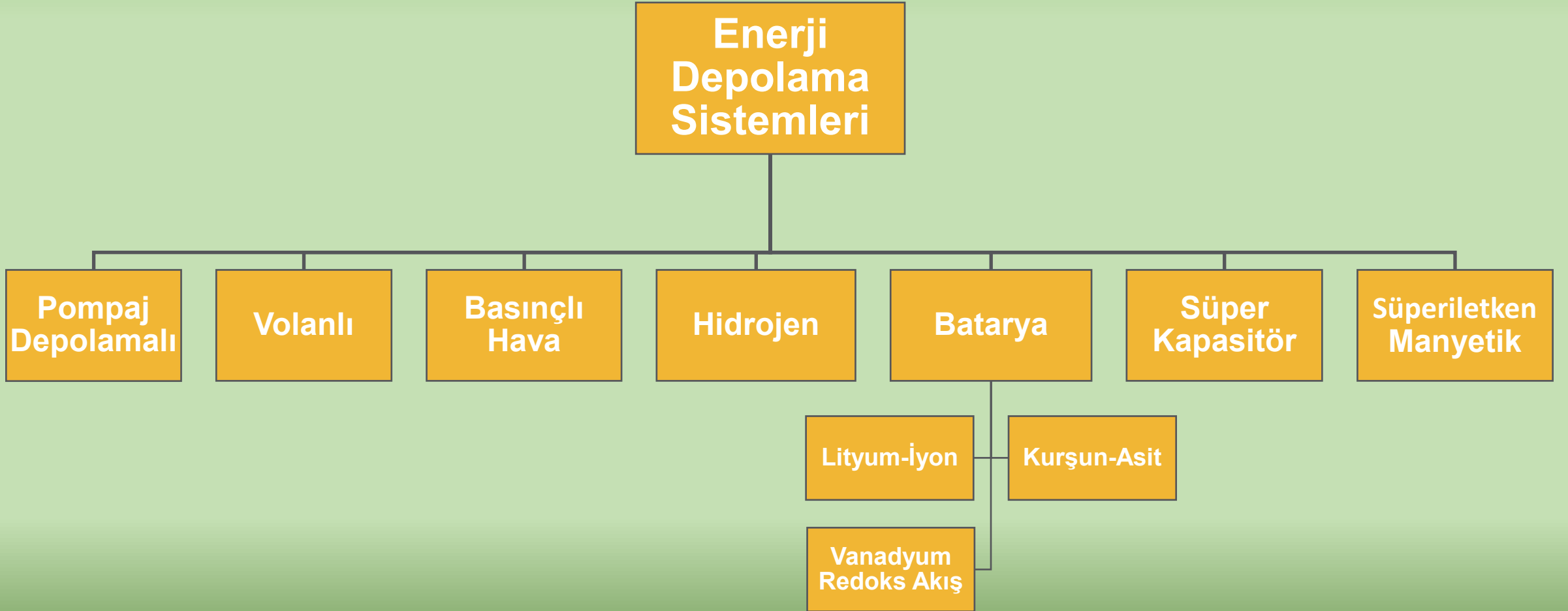
Sunum Akışı

- Giriş ve Literatür Özeti
- Sistem Yapısı ve Enerji Yönetimi
- Yönetim Stratejisi ve Optimizasyon Yaklaşımı
- Simülasyon Kurulumu ve Bulgular
- Sonuç ve Değerlendirme

GİRİŞ



LİTERATÜR ÖZETİ



HİBRİT ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMLERİ

Süper Kapasitör Batarya	Volanlı - Batarya	Süperiletken Manyetik Batarya	Batarya - Batarya	Hidrojen - Batarya
☐	☐	☐	☐	☐
☐ Süper Kapasitör:	☐ Düşük çevresel etkiye sahiptir	☐ Şarj/Deşarj çevrimleri azalır	☐ Şebeke hizmetleri için esneklik sağlar	☐ Uzun vadeli ve büyük ölçekli depolama sağlar
☐ Yüksek frekanslı güç taleplerini karşılar	☐ Maliyet etkindir	☐ Batarya ömrü uzar	☐ Sistemin ömrü uzar	☐ Maliyet etkindir
☐ Bu sayede bataryanın:	☐ Şebeke frekans regülasyonu sağlar	☐ Sanal atalet kaynağı gibidir	☐ Boyut ve maliyet azalır	☐ Düşük çevresel etkiye sahiptir
☐ Ömrü uzar	☐ Gerilim kararlılığını iyileştirir			☐ Sürekli bir güç arzı sağlar
☐ Boyutu, ağırlığı ve termal gerilimi azalır				

HİBRİT BATARYA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ

- Yenilenebilir enerji sistemlerinde kısa ve orta vadeli dengesizliklerin yönetiminde batarya sistemleri şebeke esnekliği sağlar.
- Lityum iyon bataryalar (LİB); yaygın kullanımı, yüksek verimi ve düşük maliyetiyle öne çıkmaktadır.
- Enerji ve güç kapasitesi bağımsız ölçeklenebilen, derin deşarja dayanıklı ve uzun ömürlü vanadyum redoks akış bataryaları (VRAB) ise son yıllarda dikkat çekmektedir.
- Bu iki teknolojinin hibrit kullanımıyla; kısa süreli yüksek güçlü işlemler LİB'ye, saatler mertebesindeki enerji transferi VRAB'ye yönlendirilerek batarya yaşlanma maliyetleri düşürülür ve gelir sürekliliği artırılır.

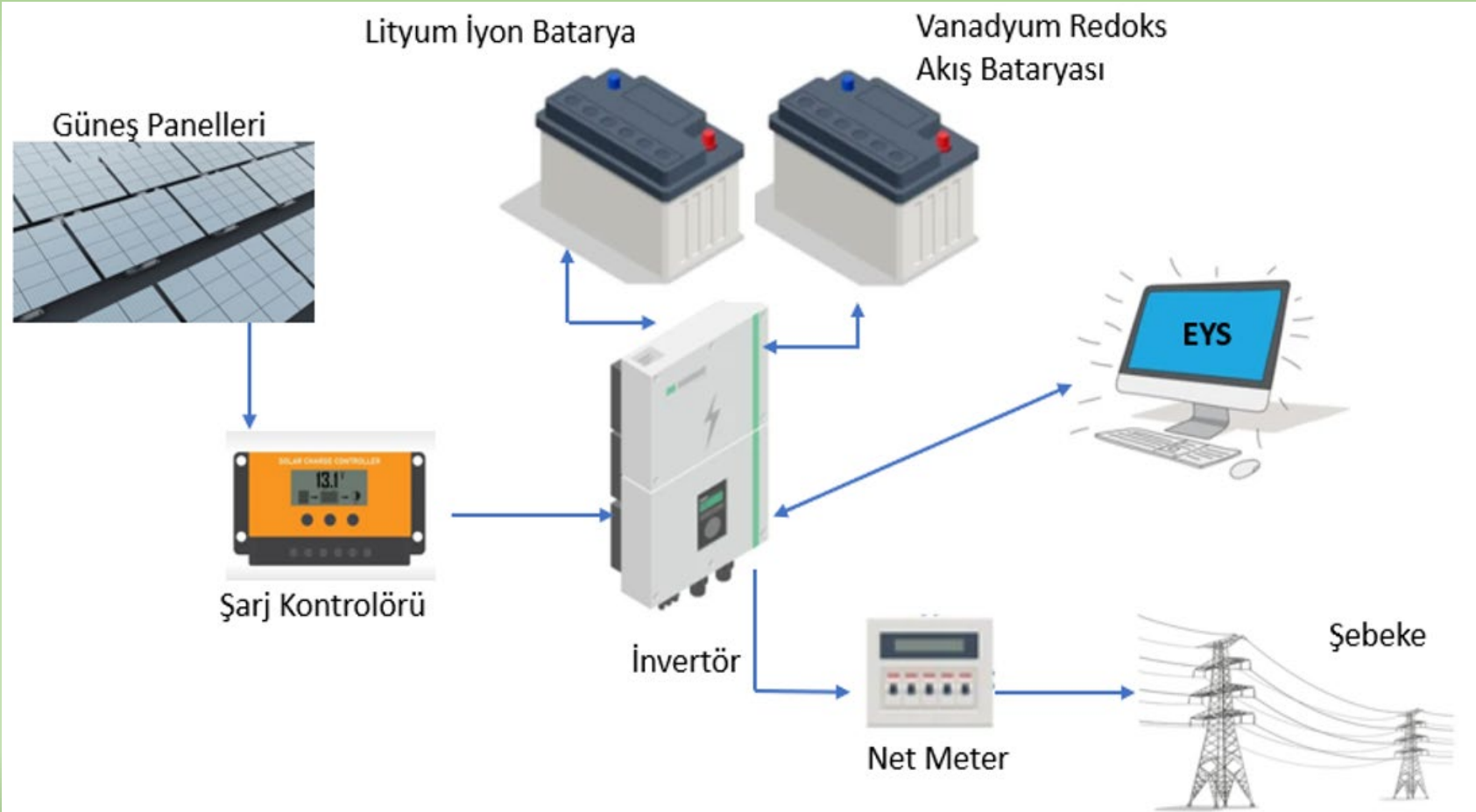
HİBRİT BATARYA ENERJİ DEPOLAMA SİSTEMİ

- Vanadyum redoks akış bataryaları, elektrolit, membran ve akış koşullarının geliştirilmesiyle; verimlilik ve işletme kararlılığı açısından kapsamlı şekilde incelenmektedir.
- Uzun ömür ve yenilenebilir entegrasyon avantajları sahada görünür hâle gelirken; ilk yatırım ve vanadyum arzı hâlen tartışmalı konulardır.
- Lityum-iyon bataryalar kısa vadeli enerji transferleri ve dalgalı yenilenebilir üretimi dengelemekte etkin olurken, VRAB uzun vadeli depolama için güçlü bir alternatif sunar.
- Hibrit sistemlerde LİB hızlı güç dalgalanmalarına, VRAB saatler ölçeğinde enerji kaydırmaya tahsis edilerek teknik esneklik ve ekonomik verimlilik artırılabilir.

SİSTEM YAPISI

- Sistem, 100 kW'lık bir güneş santrali ile paralel çalışan iki batarya alt sisteminden oluşmaktadır.
 - 25 kW / 75 kWh Vanadyum Redoks Akış Bataryası (VRAB)
 - 25 kW / 75 kWh Lityum-İyon Batarya (LİB)
- Her batarya kendi çift yönlü inverteriyle şebekeye doğrudan bağlanmaktadır.
- Tüm ölçümler ve kontrol, merkezi Enerji Yönetim Sistemi (EYS) tarafından yürütülmektedir.
 - Ölçüm, izleme ve koruma
 - Gün-öncesi planlama ve gün-içi kontrol
 - Raporlama
- EYS, bataryalar ve inverterlerle saha protokolleri (Modbus/TCP) üzerinden iletişim kurmaktadır.
- Hibrit görev paylaşımı:
 - LİB: kısa süreli yüksek güç dalgalanmalarını karşılar, dar SoC bandı ile çalışır.
 - VRAB: saatler ölçeğinde enerji kaydırır, derin deşarja toleranslıdır, enerji-güç ölçeklenmesini ayırıştırır.

SİSTEM YAPISI



Şekil 1. Sistemin Tek Hat Şeması

ENERJİ YÖNETİMİ VE PİYASA ETKİLEŞİMİ

- Enerji yönetimi iki katmanlıdır:
 1. Kurallara dayalı kontrol: güvenlik parametreleri izlenir, frekans ve gerilim saptamalarında aktif/reaktif güç desteği sağlanır; batarya SoC hedef aralıklarında tutulur.
 2. Tahmine dayalı optimizasyon: güneş üretimi ve piyasa fiyatları göz önünde bulundurularak 24 saatlik şarj-deşarj planları oluşturulur ve gerçek zamanlı güncellenir.
- Piyasa etkileşimi EPIAŞ modeli üzerinden yönetilir:
 - Gün-öncesi: saatlik fiyat tahminleri ile batarya planlaması
 - Gün-içi: anlık üretim ve fiyat değişimlerine göre plan revizesi
- Matematiksel model, arbitraj gelirini maksimize ederken:
 - Batarya yaşlanması ve verim kayıplarını,
 - VRAB pompa/yardımcı yük tüketimini,
 - Şebeke güç limitlerini ve piyasa teklif zamanlamalarını dikkate alır
- Sistem, teknik güvenlik ve ekonomik performansı optimize eder, sahaya kurulmadan önce senaryo değerlendirmesi yapılabilir.

YÖNETİM STRATEJİSİ

- EYS; FV üretimi, piyasa fiyatları ve batarya verilerini toplayarak kural-tabanlı ve optimizasyon-tabanlı stratejiler uygular.
- Görev paylaşımı:
 - LİB: Yüksek güç yoğunluğu ve hızlı tepkiyle kısa süreli fiyat/power dalgalanmalarını karşılar.
 - VRAB: Uzun süreli, dengeli enerji aktarımını üstlenir; yüksek çevrim ömrüyle enerji kaydırma sağlar.
- Güvenlik limitleri:
 - Gerilim $\pm\%10$, frekans $\pm 0,2$ Hz
 - SoC sınırları: LİB %20–80, VRAB %10–90
- Kural-tabanlı strateji:
 - Piyasa fiyatları alt/üst çeyrek eşiklerine göre şarj veya deşarj tetiklenir.
 - LİB için C-oranı ve dar SoC aralığı korunur; VRAB için debi, RTE ve pompa tüketimi dikkate alınır.

OPTİMİZASYON YAKLAŞIMI

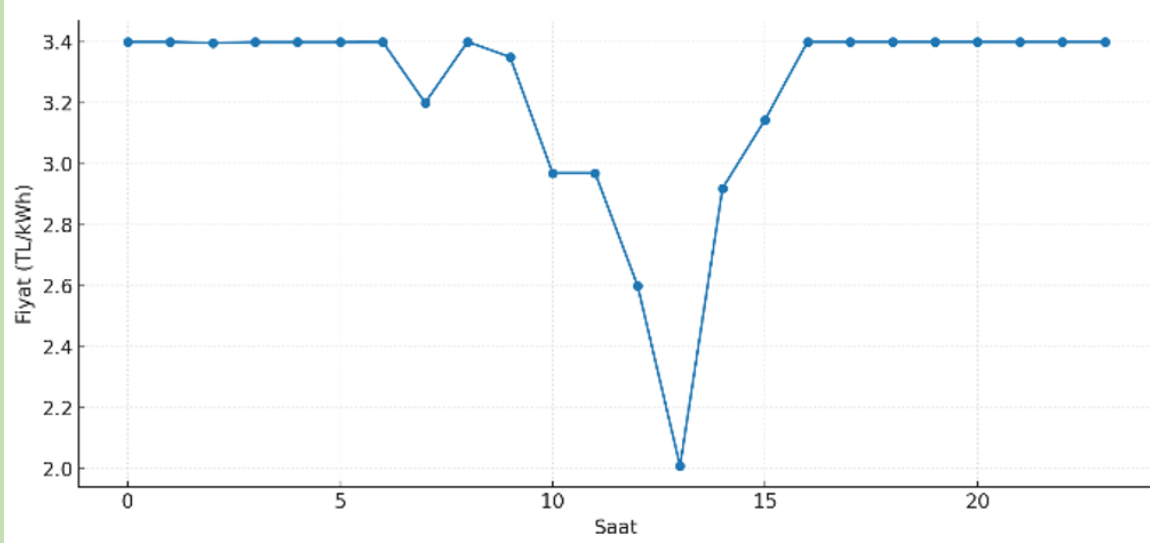
- Optimizasyon katmanı;
 - MILP (karışık tamsayıli doğrusal programlama)
 - MPC (Model Öngörülü Kontrol) yaklaşımları ile çalışır.
- Amaç: Arbitraj gelirini maksimize ederken,
 - LİB yaşlanma maliyetlerini,
 - VRAB verim kayıplarını ve yardımcı yük tüketimini minimize etmektir.
- Planlama: Günlük saatlik bazda yapılmakta; üretim ve fiyat sapmalarına göre kısa vadede güncellenmektedir.
- Simülasyon:
 - Python ortamında 24 saatlik ($\Delta t = 1$ saat) çözünürlükte,
 - 100 kW FV, 25 kW/75 kWh LİB ve VRAB modeliyle yürütülmüştür.

$$P_{HEDS}(t) = P_{LIB}(t) + P_{VRAB}(t)$$
$$E_{t+1} = E_t + \eta_c P_{şarj} \Delta t - \frac{1}{\eta_d} P_{deşarj} \Delta t$$
$$Net\ Gelir = \sum_{t=1}^T (P_{sat,t} \lambda_{sat,t} - P_{al,t} \lambda_{al,t})$$

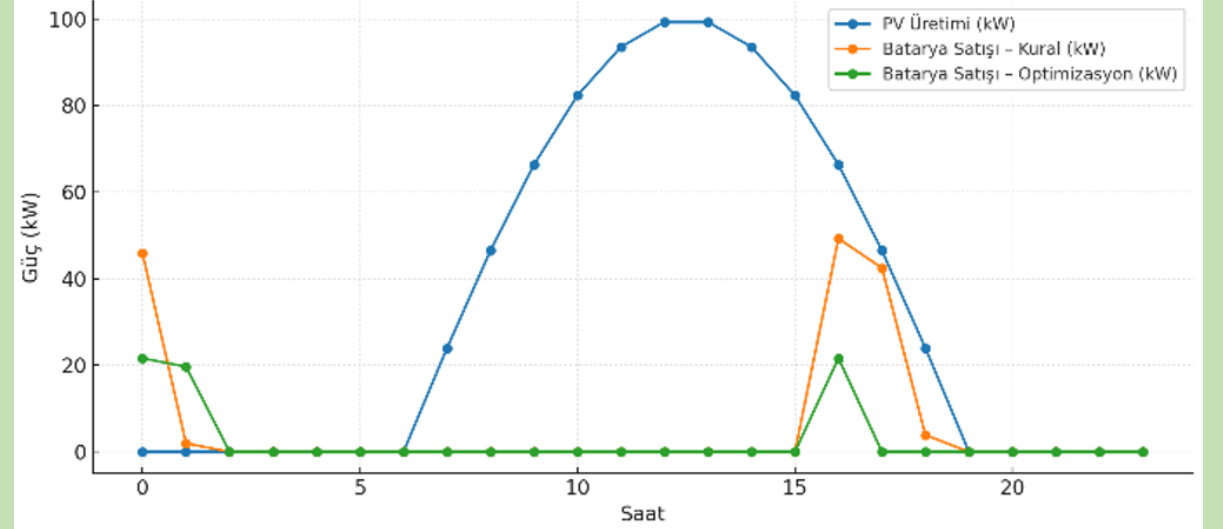
SİMÜLASYON KURULUMU VE YÖNTEM

- Hibrit enerji depolama sisteminin (LİB + VRAB) EPIAŞ gün-öncesi piyasası koşullarında bir günlük (24 saat) performansı analiz edilmiştir.
- 100 kW FV santrali ile 25 kW / 75 kWh kapasiteli LİB ve VRAB bataryalardan oluşan bir sistem simüle edilmiştir.
- Kural-tabanlı ve optimizasyon destekli enerji yönetimi stratejileri Python ortamında modellenmiştir.
- Modelleme:
 - FV üretimi, batarya kapasitesi, verim ve SoC sınırları; matematiksel ifadelerle tanımlandı.
 - EPIAŞ saatlik fiyat verileri modele entegre edildi.
 - Her saat başında bataryaların şarj/deşarj yönü ve güç seviyesi belirlendi.
- FV üretimi, batarya SoC profilleri, güç çıkışları ve arbitraj gelirleri görselleştirildi.

SONUÇLAR



Şekil 2. EPIAŞ Gün Öncesi Piyasa Fiyatları



Şekil 3. FV Üretimi ve Şebeke Etkileşimi

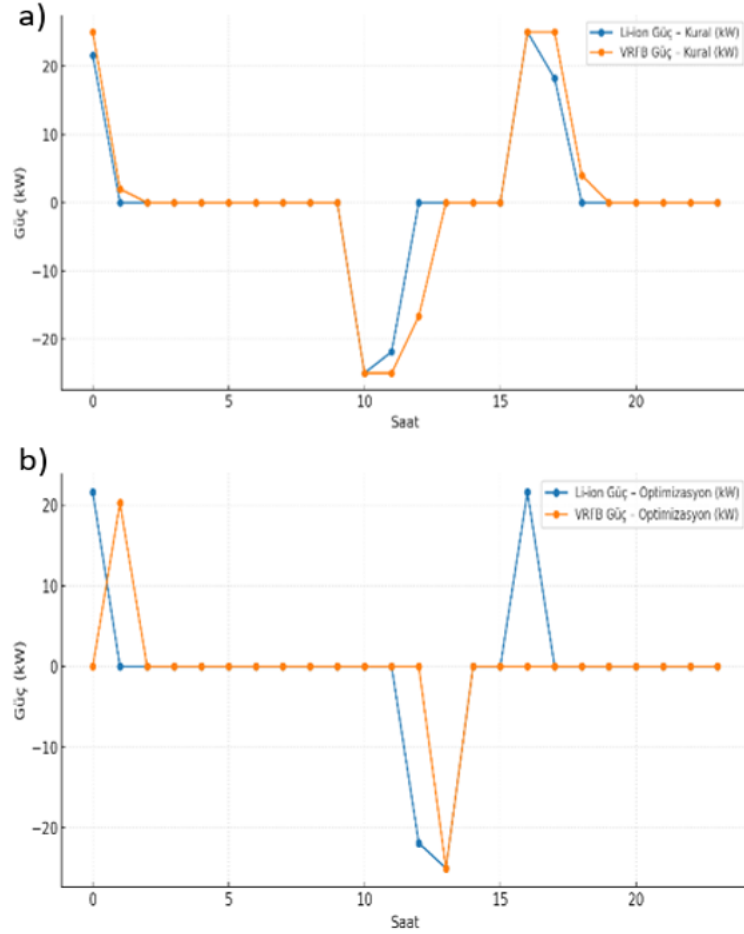
GÜÇ PROFİLLERİ VE ENERJİ KAYDIRMA

- Kural-tabanlı stratejide:
 - Alt/üst çeyrek eşiklerine göre tetiklenmekte (Fırsatlar kaçabiliyor)
 - VRAB pompa yükü yüksek ve güç profili daha dağınık olmakta
 - SoC'ler sık sık sınır bantlarına dayanmakta
- Optimizasyon tabanlı stratejide:
 - Şarj düşük fiyat saatlerine (0–6, 15–20), deşarj yüksek fiyat saatlerine (10–15) yönlendiriliyor.
 - LİB kısa süreli tepe noktalarını, VRAB uzun süreli enerji kaydirmayı yönetiyor.
 - SoC'ler daha dengeli, çevrim sayısı ve yaşlanma riski azalıyor.

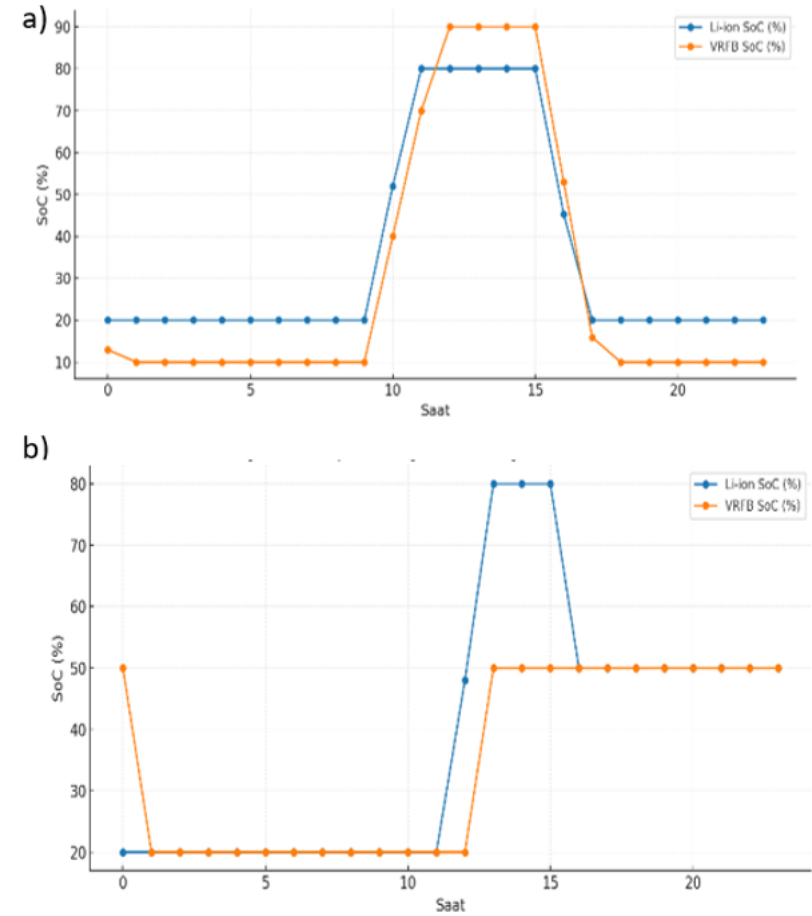
Tablo 1. Net arbitraj geliri ve performans kriterleri

Kriter	Kural tabanlı	Optimizasyon tabanlı
Net arbitraj geliri (TL)	150,6	54,8
LİB SoC (%)	20-90	20-80
VRAB SoC (%)	10-90	20-50
Toplam Deşarj (kWh)	150	95
VRAB yardımcı tüketim (%)	3,5	2,1
SoC ihlali	Yok	Yok

SONUÇLAR



Şekil 4. Batarya Çıkış Güçleri: a) Kural Tabanlı ve b) Optimizasyon Tabanlı



Şekil 5. Batarya Doluluk Durumu: a) Kural Tabanlı ve b) Optimizasyon Tabanlı

SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

- 100 kW gücündeki güneş santrali sistemine entegre 25 kW/75 kWh LİB ve 25 kW/75 kWh VRAB içeren hibrit yapının, EPIAŞ gün-öncesi fiyatları altında optimum işletimi incelenmiştir.
- Kural-tabanlı ve optimizasyon-tabanlı iki katmanlı Enerji Yönetim Sistemi (EYS) geliştirilmiştir.
- Net arbitraj geliri:
 - Kural-tabanlı: 150,6 TL/gün (fiyat eşiklerinde agresif tetikleme sonucu yüksek ama oynak bir gelir)
 - Optimizasyon-tabanlı: 54,8 TL/gün (verim, SoC-nötrlüğü ve tüketim dikkate alınarak daha dengeli ve ömür dostu profil)
- Hibrit enerji depolama sistemi; güç-enerji görev ayrımıyla batarya ömrünü korumakta ve gelir sürekliliğini artırmaktadır.
- Fiyat volatilitesi arttıkça optimizasyon yaklaşımı öne çıkmakta; ancak, yatay piyasalarda kural-tabanlı mantık avantaj sağlamaktadır.