BATARYA TEKNOLOJİLERİNİN TEKNİK, EKONOMİK VE ÇEVRESEL PERFORMANSLARININ HİBRİT GÜÇ SİSTEMLERİNDE KARŞILAŞTIRILMASI

Arş. Gör. Musa Terkeş
Yıldız Teknik Üniversitesi, musa.terkes@yildiz.edu.tr – Orcid: 0000-0002-4411-411X
Öğr. Gör. Dr. Alpaslan Demirci
Yıldız Teknik Üniversitesi, ademirci@yildiz.edu.tr – Orcid: 0000-0002-1038-7224

ÖZET

Karbon nötre giden yolda yenilenebilir enerji kaynaklı teknolojilerin kurulum kapasitesi her geçen gün artmaktadır. Bununla birlikte, bu kaynakların kesintili enerji üretim profilleri nedeniyle sürdürülebilir ve güvenilir enerji tedarikini sağlamak için bataryalı enerji depolama sistemlerinin (BEDS) entegrasyonu kritiktir. Bu çalışmada, paylaşımlı ortak BEDS'i kullanan dağıtım ağındaki üreten tüketiciler için batarya teknolojileri dikkate alınarak minimum maliyetli optimum hibrit güç sistemleri (HGS)'ler önerilirken fizibilite çıktıları teknik, ekonomik ve çevresel olarak çok yıllı duyarlılık analizlerinde karşılaştırılır. Sonuçlar, kapasite kurulumları, maliyet ve yenilenebilir potansiyel açısından NaS batarya teknolojilerini desteklemektedir. Diğer taraftan, LAB teknolojisinin kesintili enerji, karbon emisyonları, batarya otonomisi, aşınma maliyeti, ömür boyu enerji çıkışı ve kayıplar açısından üstünlüğünü doğrulamaktadır. BEDS teknoloji seçimindeki fizibilite farklılıklarının birçok açıdan değerlendirilmesi, paydaşlar için güvenilir ve ekonomik çözümler üretimine katkı sağlayacaktır.

Anahtar Kelimeler: Batarya teknolojisi, optimizasyon, enerji depolama sistemleri, hibrit güç sistemleri, fotovoltaik panel.

1. GİRİŞ

Yenilenebilir enerji kaynaklarındaki süreksizlik kadar özellikle yük belirsizliğinde makul güvenilirlik enerji maliyetlerinin minimize edilmesi için önemlidir. Bu nedenle esneklik hizmetlerini uzun vadede planlayabilen bataryalı enerji depolama sistemleri (BEDS) ön plana çıkmaktadır. Gelişen teknolojisi ile günümüzde birçok farklı BEDS uygulamalarına rastlanır ve performansları birçok koşula göre değişkenlik gösterir. Örneğin, nikel kadmiyum (Ni-Cd) batarya teknolojisi 0,32 güvenilirlik endekslerine ulaşabilirken en düşük yatırım ve işletme maliyetini sırasıyla ZEBRA ve çinko bromür (Zn-Br) vaat edebilir (Bakhshi Yamchi et al., 2019). Hibrit fotovoltaik panel (FV) ve rüzgâr türbini (RT) sistemlerinde batarya bozulmaları da hesaba katıldığında, karlılık oranlarını kurşun asit (LAB), sodyum kükürt (NaS) ve vanadyum redoks bromit akışı (VRFB)'in aksine lityum-iyon batarya (LIB) daha da

yükseltebilmektedir (Yang et al., 2018). Özellikle %1'den yüksek iskonto oranlarında, hibrit mikro şebekelerde dizel jeneratör hala en önemli enerji alternatifi iken %1-4'te belirli aralıklarda LIB üstünlüğünü korur. Ayrıca LAB'lara kıyasla gerekli batarya kapasitesini %40'a kadar azaltır ve dolayısıyla birim enerji fiyatlarında %5'e kadar tasarruf sağlar (Kebede et al., 2021). Ancak iskonto oranının %4'ün üzerine çıkarılması LIB'e olan ilgiyi azaltarak LAB'a geçişi sağlar (Ciez & Whitacre, 2016). Öte yandan, FV öz tüketimi, yük öteleme, pik talep tıraşı ve enerji üretim profilinin düzleştirilmesinden hareketle uygulama kombinasyonlarını bir araya getirerek konut bataryalarının desteğiyle 2030'dan önce karlılığa ulaşılabilir. Özellikle elektrik tüketimi ve ışınımın daha düşük, elektrik fiyatlarının daha yüksek olduğu Cenevre'de NCA'lar %7'den daha fazla ekonomik performansı yükseltebilir (Pena-Bello et al., 2019). Meteorolojik ve yük talebinin yanı sıra, toptan elektrik fiyatlarında zaman serisindeki belirsizliklerin hesaba katılması, sürdürülebilir enerji sermayesi yatırımına ve varlık tahsisi sorununa uygun maliyetli çözümler sunabilir. Bu doğrultuda, NaS bataryalar en karlı seçeneği vaat edebilir (Mohseni & Brent, 2022). Meteorolojik koşullara ilaveten piyasa fiyat belirsizliğinde deterministik problemlerin stokastik optimizasyonla çözülmesi, belirsizlik ortamının etkilerini hafifletebilir. Bu tip durumlarda özellikle %60-100 deşarj derinliği (DOD) aralığında NaS bataryalar mali tasarrufu %11,2'ye kadar yükseltebilir. Aksine yüksek yatırım maliyeti, kısa kullanım ömürleri nedeniyle Ni-Cd bataryalar mikroşebekeler için uygun bulunmazken diğer batarya teknolojilerine göre daha maliyetli olsa da LIB'ler yüksek verimliliği ve uzun kullanım ömrü nedeniyle %100 DOD'de %18,75'e kadar mali tasarruf sağlayacaktır (Mostafa et al., 2020). Saniyeden dakikaya, dakikadan saate, saatler arası operasyon olmak üzere destek hizmetlerinin enerji-güç oranları da dikkate alınırsa, kısa süreli hizmetler için LIB ve LAB'lar, uzun süreli hizmetler için NaS ve VRFB'ler önerilir (Leadbetter & Swan, 2012). Aksine şebekeden bağımsız kırsal elektrifikasyonlardaki %1 LPSP oranlarında ve farklı talep tarafı yönetim stratejilerinde nikel demir (Ni-Fe) bataryalar, LAB ve LIB'e kıyasla hibrit sisteme vereceği destekle yaşam döngüsü maliyetini %65'e kadar azaltabilir (P. P. Kumar et al., 2021) (P. P. Kumar et al., 2023). Adalarda ise basit geri ödeme süresi avantajıyla ve çevreci yaklaşımı ile çinko brom akışı bataryalar, yüksek yatırım getirisi ve yenilenebilir penetrasyon vaat eder (P. Kumar et al., 2021). Şebekeden mahrum bu tip kurulumlarda uygun bir enerji ve batarya yönetim stratejisinin de belirlenmesi gerekir. Özellikle batarya yönetim sistemlerinde batarya çalışma noktalarının ve eskime mekanizmalarının dikkate alınması işletme maliyetlerini azaltabilir. Üstüne redox-flow batarya teknoloji faydayı üst seviyeye çıkarabilir (Merei et al., 2013). Aktif dağıtım şebekesi tarafına bakıldığında ise BEDS'lerin en uygun bir şekilde planlanması ve dağıtılması kritiktir. Bu tip şebekelerde çevresel ve ekonomik kaygıları azaltabilen Zn-Br bataryalar en uygun seçenek olsa da kapasite düşüşleri değerlendirildiğinde NaS bataryalar önemli bir alternatiftir (Daghi et al., 2016). LIB'ler veya VRFB'lerle oluşturulacak topluluk enerji depolama uygulamalarının enerji arbitrajına ilaveten pik talep tıraşı uygulamalarında değerlendirilmesi operasyonel maliyetleri minimize edebilir. Özellikle LIB'ler çevresel kaygıları da azaltabilmektedir (Terlouw et al., 2019). Nihayetinde, sıfır karbona uygun bir şekilde geçişte, yenilenebilir enerji kaynaklarının dağıtımı ve kapasite planlaması kadar mekânsal-zamansal etkilerinin ihmal edilmemesi gerekir. Özellikle 2040 yılında VRFB'ler yüksek DOD_{max} ve uzun deşarj süresi ile net sıfır taahhütlerine uyar ve operasyonel

performansı yükseltebilir. Buna karşılık Ni-Cd bataryalar yüksek enerji kaybı, düşük çevrim ömrü ve yüksek yatırım maliyetleri sebebiyle geri planda kalacak gibi duruyor. LAB'lar ise LIB'lere nazaran %2,9 ek karbon salınımına neden olurken LIB'ler, LAB'lar ve NaS bataryalar gelecekte yüksek seçim önceliğine sahiptir (Huang et al., 2023). Bu çalışmada, farklı teknolojilere sahip paylaşımlı ortak BEDS'lerin performansları batarya bozulma karakteristikleri dikkate alınarak çok yıllı duyarlılık analizleri ile teknik, ekonomik ve çevresel olarak karşılaştırılmış ve optimal hibrit güç sistem (HGS) boyutlandırmaları gerçekleştirilmiştir.

2. MATERYAL VE METODOLOJİ

2.1. HGS Tasarımı ve Modellenmesi

Yenilenebilir enerji teknolojilerine olan rağbet sonrasında karbon nötr politikalarında kesintisiz temiz enerji tedariki için BEDS'lerin yeri kıymetlidir. Türkiye şartlarında şebekeden alınan elektrik ekonomisi ucuz iken BEDS'lerin yüksek yatırım maliyetine rağmen kullanılması, küresel sıcaklıklar için önemlidir. Yüksek yatırım maliyetleri ve kurulum alan kısıtları düşünüldüğünde RT'ler bu çalışmada tercih edilmezken talep fazlası FV enerji üretimi öncelikle BEDS'lerde değerlendirilir. Kalan artık enerji ise şebekeye satılır ancak çalışmanın amacı batarya teknolojilerinin karşılaştırması olduğundan şebekeye elektrik satış fiyatları 0.01 $/kWh'ye indirilmiştir. FV enerji üretimi yokluğunda ve BEDS'in tamamen deşarjı söz konusu olduğunda şebekeden elektrik alınırken güvenilirlik ve sürdürülebilirlik amacıyla şebeke karışımının birim elektrik alımı için neden olacağı 426,1 g/kWh karbon salınımının önüne geçilemez. Çalışmada dikkate alınan elektriksel talep ise ortak dağıtım hattı barasına bağlı bulunan 30 adet üreten tüketiciden ileri gelir ve paylaşımlı ortak BEDS'i kullanırlar. Batarya teknolojilerinde ise literatürde sıklıkla test edilen LFP, NaS ve NCM bataryalarının yanı sıra VRFB ve LAB'lar değerlendirilmiştir. Optimum boyutlandırma, teknik, ekonomik ve çevresel HGS fizibilite çıktıları "Çoklu Enerji Kaynaklarının Hibrit Optimizasyonu (HOMER Pro)'da gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon kontrolörü olarak Yük Takibi stratejisi tercih edilirken sistemin kontrol edilebilir güç kaynakları (jeneratörler, şebeke ve depolama bankası) işletim rezervi kısıtlamalarına uyarak her bir zaman adımında en düşük toplam maliyetle birincil yüke hizmet eder.

HGS modelinde dikkate alınan FV enerji üretim profili birçok faktörden etkilense de bu çalışmada, üç farklı matematiksel formülasyondan yararlanılır. FV dizisi çıkış gücü Denklem (1)'de görülmektedir.

$$P_{PV}(t) = Y_{PV} f_{PV} \left(\frac{G_T(t)}{G_{T,STC}} \right) . \left[1 + \alpha_P \left(T_C(t) - T_{C,STC} \right) \right] \quad (1)$$

Özellikle de solar yatay ışınım, açıklık indeksi ve ortam sıcaklığı gibi veriler Ulusal Havacılık ve Uzay İdaresi (NASA) veri tabanından çekilir. Nitekim İstanbul ili için ortalama solar yatay ışınım 3,94 kWh/m^2/gün, açıklık indeksi 0,481 ve ortalama sıcaklık 14,46°C'dir.

BEDS'ler ise HOMER kütüphanesinde sunulan bozulma altyapısına bağlı olarak teknolojisine bakılmaksızın dört farklı alt yaşlanma kategorisinde değerlendirilir. Fonksiyonel alt model yaklaşımında batarya iç direncinden hareket edilirken devrede olası akan akımlar dolayısıyla

kayıplar dikkate alınır ve çıkış gücü Denklem (2) ile hesaplanır. Denklemde akımın üstel karesi söz konusu olduğu için artan akımla beraber çıkış gücü azalır. Çıkış gücünün devreden geçen akıma bağlı türevinin sıfıra eşitlenmesiyle, maksimum çıkış gücüne karşılık gelecek maksimum akım Denklem (3) ile belirlenir.

$$P_{out} = V_0 I - R_0 I^2 \tag{2}$$

$$I_{Pout,max} = \frac{V_0}{2R_0} \tag{3}$$

AC ve DC ortak bağlantı noktalarında enerji dönüşümünü sağlamak için inverter ve doğrultucu özelliğinde çalışabilen konvertörler dikkate alınır. İnverter çıkış gücü Denklem (4)'de, doğrultucu çıkış gücü Denklem (5)'de ve konvertör verimliliği Denklem (6)'da belirlenir.

$$P_{inv}(t) = \eta_{inv}\, P_{DC}(t) \tag{4}$$

$$P_{rec}(t) = \eta_{rec}\, P_{AC}(t) \tag{5}$$

$$\eta_{DC/AC} = \frac{P_{PV}}{P_{Converter}} \tag{6}$$

Nihayetinde çalışmada dikkate alınan HGS optimizasyon girdileri ise Çizelge 2'de görülmektedir.

2.2. Senaryolar

Bu çalışmada, LFP, VRFB, NCM, NaS ve LAB teknolojilerinin paylaşımlı ortak BEDS uygulamalarında fizibilite çıktıları, teknik, ekonomik ve çevresel olarak çok yıllı duyarlılık analizlerinde derinlemesine karşılaştırılır. Yıllara göre kümülatif artan elektriksel talep, şebeke tarifesi ve FV bozulması dikkate alınarak minimum maliyetli önerilecek optimum HGS konfigürasyonlarındaki BEDS teknolojisi avantajları incelenir. Çalışmada yürütülen senaryolar ise Çizelge 1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1. Senaryolar

BEDS teknolojileri					**Karbon vergisi ($/ton)**	**Fizibilite**		
LFP	NaS	VRFB	LAB	NCM		Teknik	Ekonomik	Çevresel
✓	✓	✓	✓	✓	20	✓	✓	✓

2.3. Amaç Fonksiyonu ve Karar Kriterleri

Bu çalışmanın öncelikli amacı farklı batarya teknolojilerinin BEDS'te değerlendirilmesi ve HGS fizibilite çıktılarının karşılaştırmalı olarak analizidir. İlgili hedefi karşılamak için öncelikle HGS'nin optimum boyutlandırılması gerekir. Bu doğrultuda, net mevcut maliyetin (NPC) minimizasyonu ilk hedef olarak belirlenirken eşzamanlı olarak enerji üretim maliyetinde (COE) düşük değerler istenir. Ayrıca sürdürülebilir karbonsuz şehirlere geçiş sürecinde yenilenebilir kullanım potansiyelinin yükseltilmesi ve karbon salınımının azaltılması diğer hedeflerdir.

Çizelge 2. Optimizasyon girdileri

HGS	Parametre Tanımlamaları		
FV	Üretici	Generic	
	Panel tipi	Düz	
	Nominal kapasite	1	kW
	Ömür	25	yıl
	Değer kayıp faktörü	80	%
	Verimlilik	20	%
	Yatırım maliyeti	1500	$/kW
	Değiştirme maliyeti	1250	$/kW
	İşletme ve bakım maliyeti	10	$/kW/yıl
Konvertör	Üretici	Generic	
	Nominal kapasite	1	kW
	Ömür	15	yıl
	İnverter verimliliği	95	%
	Doğrultucu verimliliği	95	%
	Göreceli kapasite (doğrultucu)	100	%
	Yatırım maliyeti	300	$/kW
	Değiştirme maliyeti	300	$/kW
	İşletme ve bakım maliyeti	0	$/kW/yıl
LFP	Yatırım maliyeti	1400	$/kWh
	Değiştirme maliyeti	1400	$/kWh
	İşletme ve bakım maliyeti	7	$/kWh/yıl
NaS	Yatırım maliyeti	576,55	$/kWh
	Değiştirme maliyeti	576,55	$/kWh
	İşletme ve bakım maliyeti	7.6	$/kWh/yıl
VRFB	Yatırım maliyeti	70	$/kWh
	Değiştirme maliyeti	70	$/kWh
	İşletme ve bakım maliyeti	0,5	$/kWh/yıl
NCM	Yatırım maliyeti	100	$/kWh
	Değiştirme maliyeti	100	$/kWh
	İşletme ve bakım maliyeti	5	$/kWh/yıl
LAB	Yatırım maliyeti	115,92	$/kWh
	Değiştirme maliyeti	115,92	$/kWh
	İşletme ve bakım maliyeti	9,35	$/kWh/yıl
Yük	Pik talep	61,76	kW
	Ortalama enerji tüketimi	300	kWh/gün
	Yük faktörü	20	%
	Günlük talep değişkenliği	10	%
	Saatlik talep değişkenliği	20	%
Şebeke	Gündüz tarifesi (06.00-17.00)	0,0822	$/kWh
	Akşam tarifesi (17.00-22.00)	0,1199	$/kWh
	Gece tarifesi (22.00-06.00)	0,052	$/kWh
	Elektrik satış fiyatı	0,01	$/kWh
Diğer	Enflasyon oranı	14	%
	Faiz oranı	23,3	%
	Şebeke karışımındaki emisyon faktörü	426,1	g/kWh
	Proje ufku	20	yıl
	Kümülatif FV bozulma oranı	0,5	%/yıl
	Kümülatif şebeke elektrik tarifesi artışı	3,5	%/yıl
	Kümülatif elektrik talebi artışı	2,5	%/yıl
	Karbon vergisi	20	$/ton

Her yılın sonundaki mali nakit akışların gelirlerden çıkarılması ve aradaki farkın günümüz tabanına indirgenmesi ve toplanmasıyla NPC hesaplanabilmektedir. Hesaplama prosedürünü gerçekleştirebilmek için reeel iskonto oranı ve proje ömrüne bağlı olarak sermaye geri kazanım faktörünün Denklem (7)'deki gibi belirlenmesi gerekir. Daha sonrasında, NPC Denklem (8)'teki gibi hesaplanabilir. NPC'nin belirlenmesiyle, yıllık elektrik üretim maliyetinin hizmet verilen elektrik yüküne oranı olarak atfedilen COE, Denklem (9)'de hesaplanabilmektedir.

$$NPC = \frac{Total\ annual\ cost\ of\ HPS}{\frac{CRF}{\frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1}}} \tag{7}$$

$$CRF(i,N) = \frac{i(1+i)^n}{i(1+i) - 1} \tag{8}$$

$$COE = \frac{CRF\left(i, R_{proj}\right)NPC}{E_{Served}} \tag{9}$$

Elektrik talebindeki yenilenebilir enerji kaynaklarının payını niteleyen yenilenebilir fraksiyon (RF), Denklem (10)'da hesaplanırken şebeke karışımındaki emisyon faktörünün dikkate alınmasıyla salınacak kümülatif karbon salınımı Denklem (11)'de belirlenir.

$$RF = \left(1 - \frac{E_{non-ren.}}{E_{load}}\right)100 \tag{10}$$

$$TCO_2 = \sum_{t=1}^{N} (CO_2)_t \left(EF_{grid}\right)_t \tag{11}$$

Yüke direkt aktarılan FV enerjisinin toplam FV enerji üretimindeki payı öz tüketim oranı (SCR) olarak bilinir ve Denklem (12) ile hesaplanır. Aksine yüke direkt aktarılan FV enerjisinin toplam elektrik talebindeki payı öz tedarik oranı (SSR) olarak bilinir ve Denklem (13) yardımıyla bulunur. HGS'nin uygun boyutlandırılabilmesi için fazla elektrik üretim yüzdesinin yüksek olması istenmez. Bu doğrultuda, toplam fazla elektriğin toplam elektrik üretimindeki payı, yani kesintili enerji (CE), Denklem (14) ile hesaplanır.

$$SCR = \frac{\sum E_{PV}^{cons}}{\sum E_{PV}^{gen}} \tag{12}$$

$$SSR = \frac{\sum E_{PV}^{cons}}{\sum E_{load}} \tag{13}$$

$$CE = \frac{E_{excess}}{E_{prod}} \tag{14}$$

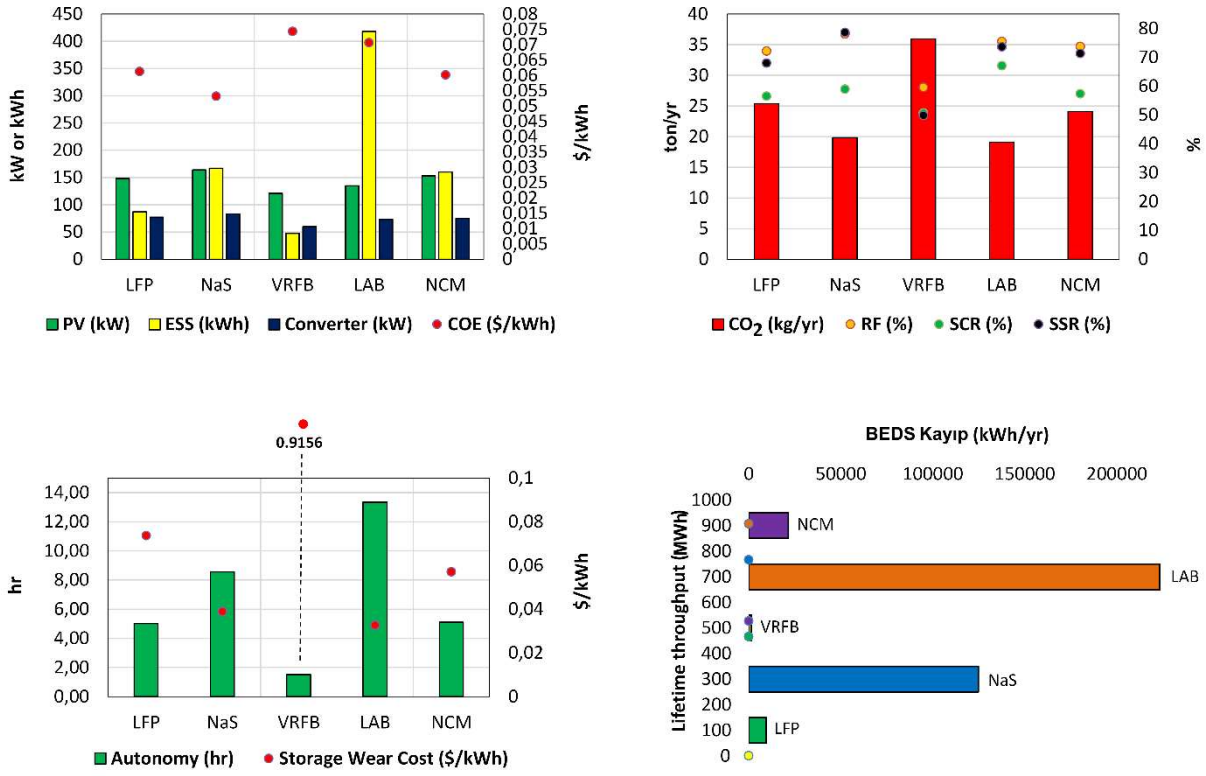
Enerji döngüsü maliyetini karakterize eden depolama aşınma maliyeti, Denklem (15)'de yıllık olarak ayrıca hesaplanır. Buna karşılık, depolama bankası boyutunun elektrik yüküne oranı olan enerji depolaması otonomluğu Denklem (16)'da belirlenir.

$$C_{bw} = \frac{C_{rep,batt}}{N_{bat} Q_{lifetime} \sqrt{\eta_{rt}}} \tag{15}$$

$$Autonomy = \frac{N_{bat} V_{nom} Q_{nom} (1 - \frac{q_{min}}{100})(24\ h/d)}{L_{prim,ave}(1000\ Wh/kWh)} \quad (16)$$

3. OPTİMİZASYON SONUÇLARI

Paylaşımlı ortak dağıtım ağındaki toplu üreten tüketici uygulamalarında BEDS teknolojilerinin HGS fizibilitesine etkisi **Error! Reference source not found.**Görsel 4'de değerlendirilmiştir. Minimum maliyetli optimum kapasiteler dikkate alındığında, NaS batarya teknolojileri için FV kapasitesi %35,54'e kadar ve konvertör kapasitesi %38,33'e kadar yüksek olsa da BEDS kapasitesi LAB teknolojisinde yüksek kuruluma sahiptir. Yüksek FV ve konvertör kapasitesi sebebiyle sermaye harcamaları %35,54'e kadar artsa da, NaS batarya teknolojileri için önerilecek HGS maliyetleri (NPC ve COE) %28,4'e kadar daha düşüktür. Şebekeye elektrik satış gelirindeki yükseklik, sermaye harcamasını belli bir miktar telafi ederken RF'deki %18,5'e kadar yüksek oranlar faydayı üst düzeye taşır. Nitekim VRFB kadar olmasa da düşük SCR ve %29,14'e kadar yüksek SSR, NaS batarya teknolojisi üstünlüğünü doğrular ve tercih sebebi haline getirir. Ancak yüksek RF ve SSR ve düşük SCR'nin neden olacağı artık enerji, LAB'larda %4,15'e kadar daha düşüktür. Ayrıca BEDS'in sağlayacağı ömür boyu enerji çıkışının %94,6'ya kadar fazla olması, batarya otonomluğunun 11,84 saate kadar yüksek olması ve depolamadaki aşınma maliyetinin %55,66'ya kadar düşük olması sonucunda, yenilenebilir potansiyelindeki avantajına rağmen NaS batarya teknolojilerine göre %46,89'a kadar daha az karbon salınır. Ancak en düşük BEDS kayıplarının LFP ve VRFB teknolojilerine ait olduğu söylenebilir.



Görsel 4. BEDS teknolojilerinin HGS fizibilitesi üzerindeki etkisinin karşılaştırılması

4. SONUÇ VE ÇIKARIM

Bu çalışmada, ortak batarya enerji depolama teknolojileri kullanan HGS'ler için optimum sistem boyutlandırması çok yıllı hassasiyet analizleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, kapasite kurulumları %38,33'e kadar yüksek olsa da NaS bataryaların COE'yi %28,4'e kadar düşürebileceğini ve RF'yi %18,5'e kadar arttırabileceğini gösterir. Her ne kadar maliyeti %35,54'e kadar yükseltse de SSR'deki %29,14'e kadar yüksek fayda tercih eğilimini güçlendirir. Ancak artık enerjinin %4,15'e kadar ve batarya aşınma maliyetinin %55,66'ya kadar düşüklüğü, BEDS'in ömür boyu enerji çıkışının %94,6'ya kadar ve otonomluğunun 11,84 saate kadar yüksekliği LAB teknolojisini ön plana çıkarır. Karbon nötrden hareket edilecekse LAB'lar ayrıca karbon salınımını %46,9'a kadar azaltabilir. BEDS teknolojilerinin küçük işletme operasyonlarında bile üreten tüketici fayda-zarar ilişkisi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu düşünüldüğünde, bu çalışmanın çıktıları birçok paydaş için faydalı olacaktır. Gelecekte bu çalışma çıktıları, günlük ve saatlik talep değişkenliği ve karbon vergisi dikkate alınarak genişletilebilir.

KAYNAKÇA

Bakhshi Yamchi, H., Shahsavari, H., Taghizadegan Kalantari, N., Safari, A., & Farrokhifar, M. (2019). A cost-efficient application of different battery energy storage technologies in microgrids considering load uncertainty. *Journal of Energy Storage*, *22*(January), 17–26. https://doi.org/10.1016/j.est.2019.01.023

Ciez, R. E., & Whitacre, J. F. (2016). Comparative techno-economic analysis of hybrid micro-grid systems utilizing different battery types. *Energy Conversion and Management*, *112*, 435–444. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.01.014

Daghi, M., Sedghi, M., Ahmadian, A., & Aliakbar-Golkar, M. (2016). Factor analysis based optimal storage planning in active distribution network considering different battery technologies. *Applied Energy*, *183*, 456–469. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.190

Huang, W. C., Zhang, Q., & You, F. (2023). Impacts of battery energy storage technologies and renewable integration on the energy transition in the New York State. *Advances in Applied Energy*, *9*(February), 100126. https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100126

Kebede, A. A., Coosemans, T., Messagie, M., Jemal, T., Behabtu, H. A., Van Mierlo, J., & Berecibar, M. (2021). Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application. *Journal of Energy Storage*, *40*(June), 102748. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102748

Kumar, P. P., Rahman, A., Nuvvula, R. S. S., Colak, I., Muyeen, S. M., Shezan, S. A., Shafiullah, G. M., Ishraque, M. F., Hossain, M. A., Alsaif, F., & Elavarasan, R. M. (2023). Using Energy Conservation-Based Demand-Side Management to Optimize an Off-Grid Integrated Renewable Energy System Using Different Battery Technologies. *Sustainability*, *15*(13), 10137. https://doi.org/10.3390/su151310137

Kumar, P. P., Suresh, V., Jasinski, M., & Leonowicz, Z. (2021). Off-grid rural electrification in india using renewable energy resources and different battery technologies with a dynamic differential annealed optimization. *Energies*, *14*(18). https://doi.org/10.3390/en14185866

Kumar, P., Pal, N., & Sharma, H. (2021). Techno-economic analysis of solar photo-voltaic/diesel generator hybrid system using different energy storage technologies for isolated islands of India. *Journal of Energy Storage*, *41*(July 2021), 102965. https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102965

Leadbetter, J., & Swan, L. G. (2012). Selection of battery technology to support grid-integrated renewable electricity. *Journal of Power Sources*, *216*, 376–386. https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.05.081

Merei, G., Berger, C., & Sauer, D. U. (2013). Optimization of an off-grid hybrid PV-Wind-Diesel system with different battery technologies using genetic algorithm. *Solar Energy*, *97*, 460–473. https://doi.org/10.1016/j.solener.2013.08.016

Mohseni, S., & Brent, A. C. (2022). Quantifying the effects of forecast uncertainty on the role of different battery technologies in grid-connected solar photovoltaic/wind/micro-hydro micro-grids: An optimal planning study. *Journal of Energy Storage*, *51*(May), 104412. https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104412

Mostafa, M. H., Aleem, S. H. E. A., Ali, S. G., Abdelaziz, A. Y., Ribeiro, P. F., & Ali, Z. M. (2020). Robust energy management and economic analysis of microgrids considering different battery characteristics. *IEEE Access*, *8*, 54751–54775. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2981697

Pena-Bello, A., Barbour, E., Gonzalez, M. C., Patel, M. K., & Parra, D. (2019). Optimized PV-coupled battery systems for combining applications: Impact of battery technology and geography. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *112*(June), 978–990. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.003

Terlouw, T., AlSkaif, T., Bauer, C., & van Sark, W. (2019). Multi-objective optimization of energy arbitrage in community energy storage systems using different battery technologies. *Applied Energy*, *239*(October 2018), 356–372. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.227

Yang, Y., Menictas, C., Bremner, S., & Kay, M. (2018). A Comparison Study of Dispatching Various Battery Technologies in a Hybrid PV and Wind Power Plant. *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, *2018-Augus*, 1–5. https://doi.org/10.1109/PESGM.2018.8585803