



Gökçeada İçin Çok Katmanlı (Batarya + Hidrojen) Enerji Depolama Tabanlı Hibrit Mikroşebeke Tasarımı ve Optimizasyonu

Design and Optimization of a Multi-Layer (Battery + Hydrogen) Energy Storage-Based Hybrid Microgrid for Gökçeada Island

Ökkeş CUMA_ ORCID: 0009-0009-9503-3756 ,
Rudener Tetik_ ORCID: 0009-0008-6969-4369 ,
Tufan ADA_ ORCID: 0009-0005-0666-8786

*Yalova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yalova/Merkez
Yalova University Engineering Faculty Electrical and Electronics Engineering, Yalova/Merkez*

Özet

Ada ve şebekeden bağımsız yerleşimlerde enerji arz güvenliğinin sağlanması, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken üretim karakteristiği ve fosil yakıtlara bağımlılığın çevresel etkileri nedeniyle günümüzde önemli bir araştırma konusu hâline gelmiştir. Güneş ve rüzgâr enerjisine dayalı hibrit enerji sistemleri bu tür bölgeler için sürdürülebilir bir çözüm sunmakla birlikte, sistem performansının büyük ölçüde enerji depolama altyapısına bağlı olduğu literatürde yaygın olarak vurgulanmaktadır. Özellikle yalnızca batarya tabanlı depolama sistemlerinin kısa süreli güç dengelemede etkili olmasına rağmen, uzun süreli ve mevsimsel enerji açıklarını karşılamada yetersiz kaldığı birçok çalışmada ortaya konmuştur.

Son yıllarda yapılan araştırmalar, enerji sistemlerinde esnekliğin artırılmasının ve farklı zaman ölçeklerine hitap eden depolama teknolojilerinin birlikte kullanılmasının, yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonuna ulaşmada kritik bir rol oynadığını göstermektedir. Bu bağlamda, batarya sistemleri kısa süreli enerji dengelemesi ve hızlı tepki gerektiren durumlar için uygun bir çözüm sunarken; hidrojen tabanlı enerji depolama sistemleri yüksek enerji yoğunlukları ve uzun süreli depolama kabiliyetleri sayesinde mevsimsel dengesizliklerin yönetilmesinde öne çıkmaktadır. Çok katmanlı enerji depolama yaklaşımları, bu iki depolama teknolojisinin avantajlarını bir araya getirerek hibrit mikroşebekelerin teknik ve ekonomik performansını iyileştirmeyi amaçlamaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'de yer alan gerçek bir ada lokasyonu olan Gökçeada için çok katmanlı enerji depolama tabanlı, tamamen yenilenebilir bir hibrit mikroşebeke sistemi tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Önerilen sistem; güneş fotovoltaik ve rüzgâr enerjisi üretim birimleri ile kısa süreli enerji yönetimi için lityum-iyon batarya ve uzun süreli

enerji depolaması için elektrolizör, hidrojen depolama tankı ve yakıt hücresinden oluşan hidrojen tabanlı bir depolama alt sistemini içermektedir. Bu mimari, batarya çevrim sayısının azaltılmasını ve enerji arz güvenliğinin artırılmasını hedeflemektedir. Sistem analizi ve optimizasyonu, saatlik enerji dengesi hesaplamalarına dayanan HOMER Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. HOMER tabanlı çalışmaların, şebekeden bağımsız ve ada enerji sistemlerinin teknik ve ekonomik açıdan değerlendirilmesinde etkin bir araç olduğu literatürde yaygın olarak kabul edilmektedir. Çalışma kapsamında, çok katmanlı enerji depolama mimarisi ile yalnızca batarya tabanlı depolama içeren geleneksel hibrit sistemler karşılaştırılmış; net bugünkü maliyet, birim enerji maliyeti, yenilenebilir enerji penetrasyon oranı, enerji arz güvenilirliği ve fazla enerji miktarı gibi performans göstergeleri analiz edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, batarya ve hidrojen depolama sistemlerinin koordineli kullanımının ada mikroşebekelerinde sistem esnekliğini artırdığını, batarya ömrünü uzattığını ve uzun vadede ekonomik ve çevresel performansı iyileştirdiğini göstermektedir. Bu çalışma, gerçek bir ada lokasyonu için çok katmanlı enerji depolama yaklaşımının uygulanabilirliğini ortaya koyarak, yenilenebilir enerji tabanlı ada mikroşebekelerinin tasarımına yönelik literatüre kapsamlı ve uygulama odaklı bir katkı sunmaktadır.

Anahtar kelimeler: Hibrit enerji sistemleri, çok katmanlı enerji depolama, batarya enerji depolama, hidrojen enerji depolama, ada mikroşebekeleri, HOMER Pro, Gökçeada

Abstract

Ensuring reliable energy supply in islanded and off-grid communities has become a significant research challenge due to the intermittent nature of renewable energy sources and the environmental impacts associated with fossil fuel dependency. Although hybrid energy systems based on solar and wind resources offer sustainable solutions for such regions, the literature widely reports that system performance is strongly dependent on the adopted energy storage architecture. In particular, battery-only energy storage systems, while effective for short-term power balancing, are often insufficient to address long-term and seasonal energy deficits in isolated microgrids.

Recent studies highlight that enhancing system flexibility through the coordinated use of multiple energy storage technologies is a key factor in achieving high renewable energy penetration. In this context, battery energy storage systems are well suited for fast response and short-term energy management, whereas hydrogen-based energy storage systems, due to their high energy density and long-duration storage capability, are increasingly considered a promising solution for managing prolonged and seasonal energy imbalances. Multi-layer energy storage approaches aim to combine the advantages of these technologies to improve the technical and economic performance of hybrid microgrids.

In this study, a fully renewable hybrid microgrid with a multi-layer energy storage architecture is designed and optimized for a real island location, Gökçeada, Türkiye. The proposed system integrates solar photovoltaic and wind energy generation units with a lithium-ion battery for short-term energy balancing and a hydrogen-based energy storage subsystem consisting of an electrolyzer, hydrogen storage tank, and fuel cell for long-term energy management. This configuration aims to reduce battery cycling stress while enhancing overall energy supply reliability.

The system is modeled and optimized using the HOMER Pro software based on hourly energy balance calculations, real meteorological data, and an island-specific load profile. A comparative assessment is conducted between the proposed multi-layer

energy storage system and conventional hybrid systems employing battery-only storage. Key performance indicators, including net present cost, cost of energy, renewable energy penetration, supply reliability, and excess energy generation, are evaluated. The results demonstrate that the coordinated operation of battery and hydrogen energy storage systems significantly improves system flexibility, extends battery lifetime, and enhances long-term economic and environmental performance in islanded microgrids. This study provides a comprehensive and application-oriented contribution to the literature by demonstrating the feasibility and benefits of multi-layer energy storage architectures for renewable energy-based island microgrids.

Keywords: Hybrid energy systems; Multi-layer energy storage; Battery energy storage; Hydrogen energy storage; Islanded microgrids; HOMER Pro; Gökçeada

1. Giriş

Küresel ölçekte artan enerji talebi, fosil yakıt rezervlerinin sınırlılığı ve sera gazı emisyonlarının iklim değişikliği üzerindeki etkileri, enerji üretim ve tüketim sistemlerinin köklü bir dönüşüm sürecine girmesine neden olmuştur. Bu dönüşümün merkezinde, güneş ve rüzgâr gibi yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı dağıtık üretim sistemleri yer almaktadır. Özellikle merkezi şebeke altyapısının yetersiz olduğu veya ekonomik açıdan sürdürülebilir olmadığı ada ve şebekeden bağımsız yerleşimlerde, yenilenebilir enerji tabanlı mikroşebekeler enerji arz güvenliğinin sağlanması açısından kritik bir rol üstlenmektedir [1, 2, 3, 5].

Ada mikroşebekeleri, sınırlı alan, lojistik kısıtlar ve çevresel hassasiyetler nedeniyle fosil yakıtlı jeneratörlere dayalı çözümler açısından önemli dezavantajlara sahiptir. Bu nedenle literatürde, ada ve izole yerleşimler için geliştirilen enerji sistemlerinin büyük çoğunluğu, güneş fotovoltaik ve rüzgâr enerjisinin birlikte kullanıldığı hibrit yapılar üzerine odaklanmaktadır [2, 5, 6]. Bu kaynakların birlikte kullanılması, üretim sürekliliğini artırmakta ve tek bir kaynağa bağımlılıktan kaynaklanan enerji arz risklerini azaltmaktadır. Ancak bu yapıların etkinliği, enerji depolama sistemlerinin seçimi ve konfigürasyonuna doğrudan bağlıdır [3, 11].

Yenilenebilir enerji kaynaklarının kesintili ve öngörülemeyen üretim karakteristiği, enerji arz-talep dengesinin sağlanmasını mikroşebeke tasarımının temel problemi hâline getirmiştir. Bu problem, özellikle yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonuna sahip sistemlerde daha belirgin hâle gelmektedir. Literatürde, yenilenebilir enerji tabanlı hibrit sistemlerin teknik olarak uygulanabilir olduğu geniş biçimde ortaya konmuş olmasına rağmen, sistem performansının çoğu zaman enerji depolama altyapısının sınırları tarafından belirlendiği rapor edilmektedir [1, 7, 8].

Batarya enerji depolama sistemleri, yüksek çevrim verimleri, hızlı tepki süreleri ve modüler yapıları nedeniyle hibrit mikroşebekelerde en yaygın kullanılan depolama teknolojisi olarak öne çıkmaktadır. Bataryalar, kısa süreli güç dengesizliklerinin giderilmesi, ani yük değişimlerinin karşılanması ve frekans-gerilim kararlılığının sağlanması açısından etkili bir çözüm sunmaktadır [3, 7]. Bununla birlikte, literatürde yalnızca batarya tabanlı depolama çözümlerinin uzun süreli ve mevsimsel enerji açıklarını karşılamada yetersiz kaldığı; bataryaların derin deşarj ve yüksek çevrim koşullarına maruz kalmasının sistem ömrünü ve ekonomik performansı olumsuz etkilediği çok sayıda çalışmada vurgulanmaktadır [5, 8, 11].

Bu sınırlamalar, enerji depolama kavramının yalnızca kapasite artışı üzerinden değil, işlevsel farklılaşma üzerinden ele alınması gerektiğini ortaya koymuştur. Son yıllarda yapılan çalışmalar, farklı zaman ölçeklerinde ortaya çıkan enerji dengesizliklerinin tek bir depolama teknolojisi ile yönetilmesinin pratik olmadığını göstermektedir. Bu

bağlamda, kısa süreli ve uzun süreli enerji ihtiyaçlarını birlikte ele alan çok katmanlı enerji depolama yaklaşımları literatürde giderek artan bir ilgi görmektedir [10, 14]. Çok katmanlı enerji depolama mimarileri, batarya sistemlerini kısa süreli enerji yönetimi ve hızlı tepki gerektiren durumlar için konumlandırırken, hidrojen gibi kimyasal enerji taşıyıcılarını uzun süreli ve mevsimsel enerji depolama amacıyla kullanmayı esas almaktadır. Hidrojen tabanlı enerji depolama sistemleri; yüksek enerji yoğunlukları, uzun süreli depolama kabiliyetleri ve yenilenebilir enerji fazlalarının değerlendirilmesine olanak sağlaması nedeniyle özellikle ada ve izole mikroşebekeler için umut verici bir çözüm olarak değerlendirilmektedir [9, 10, 14]. Yapılan çalışmalarda, batarya ve hidrojen sistemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit depolama mimarilerinin, sistem esnekliğini artırdığı, batarya çevrim yükünü azalttığı ve uzun vadeli ekonomik performansı iyileştirdiği gösterilmiştir [11, 14]. Ada yerleşimleri özelinde gerçekleştirilen uygulama odaklı çalışmalarda, yük profilinin mevsimsel değişimi ve yerel meteorolojik koşulların sistem tasarımı üzerindeki etkisi açıkça ortaya konmuştur. Özellikle turizm faaliyetlerinin yoğun olduğu adalarda, yaz aylarında artan enerji talebi, uzun süreli depolama çözümlerinin kritik önemini daha da artırmaktadır [2, 5]. Bu nedenle, gerçek yerleşim alanlarına özgü yük ve iklim verilerine dayalı sistem tasarımlarının, teorik ve genelleştirilmiş modellere kıyasla daha yüksek pratik değer sunduğu kabul edilmektedir [1, 6]. Hibrit enerji sistemlerinin analizi ve optimizasyonunda kullanılan yöntemler de literatürde önemli bir yer tutmaktadır. Saatlik enerji dengesi hesaplamalarına dayanan ve teknik-ekonomik analizleri bütüncül bir çerçevede ele alan HOMER Pro yazılımı, şebekeden bağımsız ve ada mikroşebekelerinin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan araçlardan biridir [4, 6, 12, 13]. HOMER tabanlı çalışmalar, farklı üretim ve depolama konfigürasyonlarının karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine ve sistem tasarım kararlarının nicel verilere dayandırılmasına olanak sağlamaktadır [12, 13]. Bu çalışmanın temel amacı, literatürde yaygın olarak incelenen hibrit sistemlerin ötesine geçerek, Gökçeada gibi gerçek bir ada lokasyonu için çok katmanlı (batarya+hidrojen) enerji depolama mimarisinin HOMER Pro yazılımı ile detaylı teknik-ekonomik optimizasyonunu gerçekleştirmek ve bu yaklaşımın geleneksel batarya tabanlı sistemlere kıyasla sağladığı avantajları nicel olarak ortaya koymaktır. Bu bağlamda çalışma, yenilenebilir enerji tabanlı ada mikroşebekelerinin tasarımına yönelik literatüre uygulama odaklı ve bütüncül bir katkı sunmayı hedeflemektedir.

2. Sistem Tanıtımı

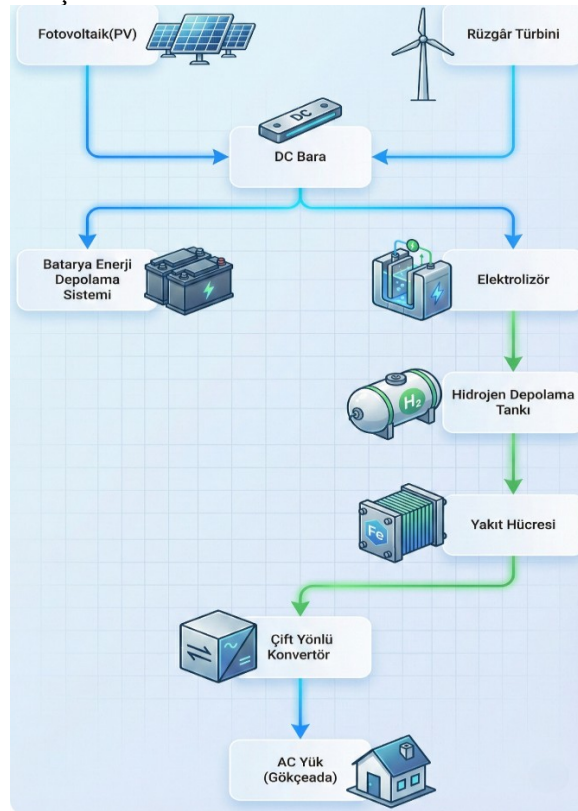
2.1. Çalışma Alanının Tanımı ve Enerji Bağlamı

Bu çalışmada ele alınan hibrit enerji sistemi, Türkiye'nin en büyük adası olan Gökçeada için tasarlanmıştır. Ada yerleşimleri; sınırlı şebeke altyapısı, iletim kayıpları, yakıt lojistiği zorlukları ve çevresel hassasiyetler nedeniyle enerji arz güvenliği açısından kırılgan yapılar olarak değerlendirilmektedir. Literatürde, ada ve izole yerleşimlerin enerji sistemleri için yenilenebilir enerji tabanlı mikroşebekelerin hem teknik hem de çevresel açıdan en uygun çözüm olduğu birçok çalışmada ortaya konmuştur [2, 5, 6]. Gökçeada özelinde, yıl boyunca değişkenlik gösteren elektrik talebi, özellikle yaz aylarında artan turizm faaliyetleri nedeniyle belirgin bir mevsimsel karakter sergilemektedir. Bu tür yük profilleri, yalnızca ortalama enerji üretim kapasitesine dayalı sistem tasarımlarının yetersiz kalmasına neden olmakta; uzun süreli enerji dengesizliklerini yönetebilecek depolama çözümlerini zorunlu hâle getirmektedir [1, 2, 11]. Bu bağlamda Gökçeada, çok katmanlı enerji depolama yaklaşımlarının uygulanabilirliğinin değerlendirilmesi için uygun bir örnek teşkil etmektedir.

2.2. Önerilen Hibrit Mikroşebeke Yapısı

Bu çalışmada önerilen sistem, tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı, şebekeden bağımsız çalışabilecek bir hibrit mikroşebeke yapısına sahiptir. Sistem; enerji üretim birimleri, çok katmanlı enerji depolama altyapısı, güç dönüştürücüleri ve tüketici yüklerinden oluşmaktadır. Hibrit mikroşebeke yaklaşımı, literatürde ada ve izole bölgeler için enerji arz sürekliliğini artıran temel yapı olarak kabul edilmektedir [1, 6, 13].

Enerji üretimi, güneş fotovoltaik (PV) paneller ve rüzgâr türbinleri aracılığıyla sağlanmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisinin birlikte kullanılması, üretim sürekliliğini artırmakta ve tek bir yenilenebilir kaynağa bağlı kalınmasından kaynaklanan riskleri azaltmaktadır. Bu yaklaşım hem ulusal hem de uluslararası literatürde ada mikroşebekeleri için yaygın olarak önerilmektedir [2, 5, 14]. Önerilen hibrit mikroşebeke sisteminin genel yapısı ve bileşenler arasındaki enerji akışı Şekil 1’de şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 1. Gökçeada için önerilen çok katmanlı enerji depolama tabanlı hibrit mikroşebeke sistemi.

2.3. Çok Katmanlı Enerji Depolama Konsepti

Bu çalışmanın temel özgülüğü, önerilen mikroşebeke yapısında benimsenen çok katmanlı enerji depolama mimarisinden kaynaklanmaktadır. Çok katmanlı enerji depolama yaklaşımı, yenilenebilir enerji kaynaklarının doğası gereği süreksiz ve değişken üretim karakteristiğine sahip olduğu ve bu değişkenliğin tek bir depolama teknolojisi ile etkin biçimde yönetilemeyeceği varsayımına dayanmaktadır. Literatürde, enerji arz ve talebi arasındaki dengesizliklerin farklı zaman ölçeklerinde ortaya çıktığı ve bu dengesizliklerin ancak farklı teknik özelliklere sahip depolama sistemlerinin birlikte kullanılmasıyla etkin şekilde yönetilebileceği açıkça vurgulanmaktadır [4,11,13].

Önerilen sistemde enerji depolama altyapısı iki ana katmandan oluşmaktadır:

(i) kısa süreli enerji dengelemesi ve ani güç taleplerinin karşılanması amacıyla batarya enerji depolama sistemi,

(ii) uzun süreli ve mevsimsel enerji dengesizliklerinin yönetilmesi amacıyla hidrojen tabanlı enerji depolama sistemi.

Bu yapı, yalnızca depolama kapasitesinin artırılmasını değil, aynı zamanda enerji depolama sistemlerinin işlevsel olarak ayrıştırılmasını esas almaktadır. Böylece her bir depolama teknolojisi, kendi teknik avantajlarına uygun zaman ölçeğinde işletilerek sistemin genel verimliliği ve esnekliği artırılmaktadır [8,14].

2.4. Kısa Süreli Enerji Depolama: Batarya Sistemi

Batarya enerji depolama sistemi, mikroşebeke içerisinde ani yük değişimlerinin karşılanması, saatlik üretim dalgalanmalarının dengelenmesi ve sistemin frekans ve gerilim kararlılığının sağlanması amacıyla kullanılmaktadır. Bataryalar, yüksek çevrim verimleri, hızlı tepki süreleri ve güç yoğunluklarının yüksek olması nedeniyle hibrit mikroşebeke uygulamalarında yaygın olarak tercih edilmektedir [3,7].

Literatürde yapılan çalışmalar, batarya tabanlı depolama sistemlerinin kısa süreli enerji dengeleme uygulamalarında oldukça etkili olduğunu; ancak uzun süreli enerji açıklarının ve mevsimsel üretim-tüketim dengesizliklerinin karşılanmasında sınırlı kaldığını göstermektedir [7,8]. Bataryaların uzun süreli ve derin deşarj koşullarında işletilmesi, çevrim ömrünü önemli ölçüde azaltmakta ve sistemin toplam yaşam döngüsü maliyetini artırmaktadır [8].

Bu nedenle, bu çalışmada batarya enerji depolama sistemi yalnızca kısa süreli enerji yönetimi ile sınırlandırılmış; bataryaların uzun süreli enerji depolama amacıyla kullanılması tercih edilmemiştir. Bu yaklaşım, batarya sisteminin ömrünün uzatılmasını ve mikroşebekenin toplam ekonomik performansının iyileştirilmesini hedeflemektedir [9].

2.5. Uzun Süreli Enerji Depolama: Hidrojen Tabanlı Sistem

Uzun süreli ve mevsimsel enerji dengesizliklerinin yönetilmesi amacıyla önerilen sistemde hidrojen tabanlı bir enerji depolama alt sistemi kullanılmıştır. Bu alt sistem; elektrolizör, hidrojen depolama tankı ve yakıt hücresinden oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elde edilen üretimin yük talebini aştığı durumlarda, fazla elektrik enerjisi elektrolizör aracılığıyla hidrojen üretiminde kullanılmakta; enerji açığı oluştuğunda ise depolanan hidrojen yakıt hücresi yardımıyla tekrar elektrik enerjisine dönüştürülmektedir [10,14].

Hidrojen tabanlı enerji depolama sistemleri, yüksek enerji yoğunlukları ve uzun süreli depolama kabiliyetleri sayesinde özellikle ada sistemleri ve şebekeden bağımsız mikroşebekeler için stratejik bir çözüm olarak değerlendirilmektedir [9,10]. Literatürde, hidrojen depolamanın mevsimsel enerji fazlalarının değerlendirilmesinde bataryalara kıyasla daha uygun olduğu ve sistemin arz güvenliğini önemli ölçüde artırdığı gösterilmiştir [11,14].

Batarya ve hidrojen tabanlı depolama sistemlerinin birlikte kullanıldığı çok katmanlı mimarilerin, batarya çevrim yükünü azalttığı, batarya ömrünü uzattığı ve mikroşebeke esnekliğini artırdığı literatürde açıkça ortaya konulmuştur [8,14].

2.6. Güç Dönüştürücüler ve Mikro şebeke Topolojisi

Önerilen mikroşebeke yapısında, doğru akım (DC) ve alternatif akım (AC) bileşenleri arasındaki enerji akışını sağlamak amacıyla çift yönlü güç dönüştürücülerini kullanılmıştır. Güneş fotovoltaik (PV) panelleri ve batarya enerji depolama sistemi DC

bara üzerinden sisteme bağlanırken; rüzgâr türbinleri, yakıt hücresi ve tüketici yükleri AC bara üzerinden mikroşebekeye entegre edilmiştir.

Bu yapı, literatürde yaygın olarak kullanılan hibrit AC/DC mikroşebeke topolojileri ile uyumlu olup, özellikle HOMER tabanlı analizlerde sıklıkla tercih edilen bir sistem mimarisidir [1,12,13]. Çift yönlü güç dönüştürücüleri sayesinde enerji, AC ve DC baralar arasında ihtiyaca bağlı olarak esnek biçimde yönlendirilebilmekte; bu durum sistemin hem teknik performansını hem de işletme esnekliğini artırmaktadır [4].

Bu topoloji, farklı işletme senaryoları altında sistemin teknik, ekonomik ve çevresel performansının karşılaştırmalı olarak analiz edilmesine olanak sağlamaktadır [12,13].

2.7. Yük Yapısı ve Sistem Sınırları

Bu çalışmada kullanılan elektrik yük profili, Gökçeada'daki konut ağırlıklı yerleşim yapısını temsil edecek şekilde tanımlanmıştır. Ada mikroşebekelerinde yük profilinin doğru modellenmesinin, sistem boyutlandırması, depolama kapasitesi ve toplam maliyet üzerinde belirleyici bir etkiye sahip olduğu literatürde açıkça vurgulanmaktadır [2,5,6]. Özellikle mevsimsel yük değişimlerinin dikkate alınmaması, uzun süreli enerji açıklarının yanlış değerlendirilmesine ve depolama sistemlerinin yetersiz boyutlandırılmasına yol açabilmektedir [6,11]. Bu nedenle bu çalışmada, yaz aylarında artan turizm faaliyetlerini temsil edecek şekilde mevsimsel yük katsayıları tanımlanmış ve analizlere dahil edilmiştir.

Sistem, ana şebekeden bağımsız çalışan bir mikroşebeke olarak ele alınmış; tüm simülasyonlarda saatlik zaman adımları kullanılarak enerji dengesi sağlandığı varsayılmıştır. Sistem bileşenlerine ait teknik ve ekonomik parametreler, literatürde yaygın olarak kullanılan değerler ve HOMER yazılımında önerilen veri tabanı esas alınarak belirlenmiştir [1,12,13].

Bu çalışmada kullanılan elektrik yüküne ait temel karakteristikler Tablo 1'de sunulmuş; mevsimsel yük değişimi Tablo 2'de, gün içi saatlik yük dağılımı ise Tablo 3'te verilmiştir. Özellikle akşam saatlerinde gözlenen talep artışı, enerji depolama sistemlerinin mikroşebeke işletmesindeki kritik rolünü açıkça ortaya koymaktadır.

| Parametre | Değer |
|-----------------------------------|------------------------------|
| Ortalama günlük elektrik tüketimi | 2.000 kWh/gün |
| Yıllık toplam elektrik tüketimi | 730 MWh/yıl |
| Ortalama yük | 83,3 kW |
| Pik yük | 300 kW |
| Pik yük oluşma zamanı | 19:00--23:00 |
| Rastgele yük değişkenliği | %5 |
| Yük tipi | Konut + küçük ölçekli ticari |
| Endüstriyel yük | Yok |

Tablo 1. Gökçeada için kabul edilen elektrik yük karakteristikleri.

This manuscript represents a preprint version. A revised and peer-reviewed version may be submitted to and published in a scientific journal at a later stage.

| Ay | Yük katsayısı |
|-----------|----------------------|
| Ocak | 0,80 |
| Şubat | 0,80 |
| Mart | 0,90 |
| Nisan | 1,00 |
| Mayıs | 1,10 |
| Haziran | 1,30 |
| Temmuz | 1,50 |
| Ağustos | 1,50 |
| Eylül | 1,20 |
| Ekim | 1,00 |
| Kasım | 0,90 |
| Aralık | 0,85 |

Tablo 2. Aylık yük değişim katsayıları (mevsimsel profil).

| Zaman aralığı | Yük oranı |
|----------------------|------------------|
| 00:00--06:00 | 0,50 |
| 06:00--09:00 | 0,80 |
| 09:00--17:00 | 0,90 |
| 17:00--19:00 | 1,10 |
| 19:00--23:00 | 1,40 |
| 23:00--24:00 | 0,80 |

Tablo 3. Gün içi saatlik yük dağılımı.

3. Analiz ve Yöntem

3.1. Çalışma Yöntemi ve Genel Modelleme Yaklaşımı

Bu çalışmada, Gökçeada için önerilen çok katmanlı enerji depolama tabanlı hibrit mikroşebeke sisteminin teknik ve ekonomik performansı, sayısal simülasyon ve optimizasyon temelli bir modelleme yaklaşımı kullanılarak değerlendirilmiştir. Ada ve şebekeden bağımsız enerji sistemlerinin analizinde, saatlik zaman adımına dayalı enerji dengesi hesaplarının kullanılması, yenilenebilir enerji kaynaklarının değişken üretim karakteristiğinin doğru biçimde temsil edilmesi açısından literatürde yaygın olarak kabul edilmektedir [1,4,6,12].

Analiz süreci üç temel aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, Gökçeada'nın konut ağırlıklı yerleşim yapısını temsil edecek şekilde tanımlanan gerçekçi elektrik yük profilleri ile bölgeye özgü güneşlenme ve rüzgâr verileri kullanılarak sistemin sayısal modeli oluşturulmuştur. Literatürde, ada mikroşebekelerinde yük ve meteorolojik verilerin doğru tanımlanmasının sistem boyutlandırması ve depolama gereksinimleri üzerinde belirleyici olduğu açıkça vurgulanmaktadır [2,5].

İkinci aşamada, kısa süreli enerji dengelemesi için batarya enerji depolama sistemi ile uzun süreli ve mevsimsel enerji yönetimi için hidrojen tabanlı enerji depolama sisteminin birlikte tanımlandığı çok katmanlı enerji depolama mimarisi oluşturulmuştur. Bu yaklaşım, farklı zaman ölçeklerinde ortaya çıkan enerji arz-talep dengesizliklerinin, her bir depolama teknolojisinin teknik özelliklerine uygun biçimde yönetilmesini hedeflemektedir. Batarya ve hidrojen tabanlı depolama sistemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit mimarilerin, mikroşebeke esnekliğini artırdığı literatürde belirtilmektedir [7,9,10,14].

Son aşamada ise farklı yenilenebilir enerji üretim ve depolama konfigürasyonları, teknik ve ekonomik kriterler açısından karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir. Bu kapsamda, sistemlerin enerji dengesi, yenilenebilir enerji katkı oranı ve toplam sistem maliyetleri analiz edilmiştir. Uygulanan bu yaklaşım, hem konut ölçeğinde hem de ada ölçeğinde gerçekleştirilen hibrit enerji sistemi çalışmalarında yaygın olarak kullanılan metodolojik çerçeve ile uyumludur [1,6,13].

3.2. Yük Profili ve Talep Modellemesi

Bu çalışmada kullanılan elektrik yük profili, Gökçeada'nın ada yerleşim karakteristiği ve mevsimsel turizm etkileri dikkate alınarak oluşturulmuştur. Ada mikroşebekelerinde elektrik talebinin gün içi ve mevsimsel değişkenliği, yenilenebilir enerji sistemlerinin boyutlandırılması ve enerji depolama gereksinimlerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Literatürde, özellikle turizm faaliyetlerinin yoğun olduğu ada bölgelerinde yaz aylarında belirgin talep artışlarının gözlemlendiği ve bu durumun uzun süreli enerji depolama çözümlerini zorunlu kıldığı belirtilmektedir.

Bu kapsamda, çalışmada konut ağırlıklı bir tüketim yapısı esas alınmış; sanayi tipi büyük ölçekli yüklerin bulunmadığı, buna karşın yaz aylarında artan konut ve ticari faaliyetlerin elektrik talebi üzerindeki etkisi modele dâhil edilmiştir. Ortalama günlük elektrik tüketimi yaklaşık 2.000 kWh olarak kabul edilmiş ve yıllık toplam elektrik tüketimi yaklaşık 730 MWh olarak hesaplanmıştır. Sistem için belirlenen pik yük değeri 300 kW olup, bu değerin özellikle yaz aylarında akşam saatlerinde oluştuğu varsayılmıştır.

Yük talebinin mevsimsel değişimini yansıtmak amacıyla, HOMER Pro yazılımında aylık yük çarpanları tanımlanmıştır. Yaz aylarında (Haziran-Ağustos) elektrik talebinde yaklaşık %30-50 oranında artış öngörülmürken, kış aylarında talebin yıllık ortalamasının altında seyrettiği kabul edilmiştir. Bu yaklaşım, ada mikroşebekeleri üzerine

gerçekleştirilen önceki çalışmalarda kullanılan yük modelleme yöntemleri ile uyumludur.

Gün içi yük dağılımı ise saatlik zaman adımlarıyla tanımlanmış ve akşam saatlerinde (19:00-23:00) belirgin bir pik yük davranışı modellenmiştir. Bu saatlik talep yapısı, kısa süreli enerji dengelemesi için batarya sistemlerinin ve uzun süreli enerji yönetimi için hidrojen tabanlı depolama sistemlerinin birlikte kullanılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, yük profilinde %5 oranında rastgele değişkenlik tanımlanarak, gerçek işletme koşullarında karşılaşılabilecek talep belirsizliklerinin modele yansıtılması sağlanmıştır.

Tanımlanan yük profili, saatlik enerji dengesi esasına dayalı HOMER Pro simülasyon ortamında kullanılarak, önerilen çok katmanlı enerji depolama tabanlı hibrit mikroşebeke sisteminin teknik ve ekonomik performansının gerçekçi bir şekilde değerlendirilmesine olanak sağlamıştır.

3.3. Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının Modellemesi

Sistemin enerji üretimi, güneş fotovoltaik ve rüzgâr enerjisi kaynaklarına dayandırılmıştır. Güneş ve rüzgârın birlikte kullanıldığı hibrit üretim yapıları, üretim sürekliliğini artırarak enerji arz güvenliğini güçlendirmektedir [1,16,18]. Literatürde, ada mikroşebekeleri için bu iki kaynağın zamansal üretim karakteristiklerinin birbirini tamamlayıcı nitelikte olduğu rapor edilmiştir [6,7,17].

HOMER Pro yazılımında, güneş enerjisi üretimi küresel yatay ışınım verileri üzerinden modellenmiş; rüzgâr enerjisi üretimi ise saatlik rüzgâr hızı verilerine dayandırılmıştır. Gerçek meteorolojik verilerin kullanılması, sistem performansının aşırı iyimser veya kötümser tahmin edilmesini önleyen kritik bir unsurdur [4,14,20].

3.3.1. Fotovoltaik (PV) Enerji Sistemi

Bu çalışmada, Gökçeada için tasarlanan hibrit mikroşebeke sisteminde güneş enerjisi, temel yenilenebilir enerji kaynaklarından biri olarak değerlendirilmiştir. Ada bölgelerinde güneş enerjisi sistemleri, bakım gereksinimlerinin düşük olması ve modüler yapıları sayesinde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ayrıca, yaz aylarında güneşlenme süresinin artması, turizm kaynaklı elektrik talep artışı ile zamansal açıdan örtüşerek sistem performansını olumlu yönde etkilemektedir.

PV sisteminin modellenmesinde, saatlik küresel yatay ışınım (GHI) verileri kullanılmış ve gerçek meteorolojik koşulların sisteme yansıtılması hedeflenmiştir. HOMER Pro yazılımında yer alan meteorolojik veri tabanları kullanılarak Gökçeada lokasyonuna ait güneş enerjisi potansiyeli modele dâhil edilmiştir. Bu yaklaşım, literatürde yenilenebilir enerji sistemlerinin gerçekçi performans değerlendirmesi için önerilen yöntemlerle uyumludur.

PV sisteminin kurulu gücü, sistemin enerji ihtiyacını karşılayabilecek şekilde belirli bir aralıkta değiştirilerek optimize edilmiştir. Bu kapsamda, PV kapasitesi farklı senaryolar altında artırılarak, sistemin ekonomik ve teknik performansı üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir. Böylece, PV üretiminin enerji depolama sistemleri ile etkileşimi de analiz edilebilmiştir.

Fotovoltaik sistemlere ait teknik ve ekonomik parametreler Tablo 4'te sunulmuştur.

| Parametre | Değer |
|----------------------------|-----------------------------|
| PV tipi | Monokristal silikon |
| Kurulu güç aralığı | 0 -- 600 kW |
| Kapasite artış adımı | 10 kW |
| Ortalama günlük güneşlenme | 4,7 kWh/m ² -gün |
| PV derating faktörü | %90 |
| Sistem ömrü | 25 yıl |
| İlk yatırım maliyeti | 900 \$/kW |
| Yenileme maliyeti | 800 \$/kW |
| İşletme ve bakım maliyeti | 10 \$/kW-yıl |
| Takip sistemi | Yok (sabit sistem) |

Tablo 4. Fotovoltaik (PV) sistem teknik ve ekonomik parametreleri.

3.3.2. Rüzgâr Enerji Sistemi

Bu çalışmada, fotovoltaik sistemlere ek olarak rüzgâr enerjisi, Gökçeada için önerilen hibrit mikroşebeke yapısının ikinci temel yenilenebilir enerji kaynağı olarak değerlendirilmiştir. Ada bölgelerinde rüzgâr enerji sistemleri, özellikle gece saatlerinde ve kış aylarında güneş enerjisinin yetersiz kaldığı dönemlerde enerji üretimine katkı sağlayarak üretim sürekliliğini artırmaktadır. Güneş ve rüzgâr enerjisinin birlikte kullanılması, üretim profillerinin zamansal olarak birbirini tamamlaması nedeniyle hibrit enerji sistemlerinde yaygın olarak tercih edilmektedir.

Rüzgâr enerji sisteminin modellenmesinde, saatlik rüzgâr hızı verileri kullanılmış ve bu veriler, türbin güç eğrileri ile ilişkilendirilerek elektrik üretimi hesaplanmıştır. HOMER Pro yazılımında yer alan rüzgâr kaynak veri tabanı kullanılarak, Gökçeada lokasyonuna ait rüzgâr potansiyeli modele dâhil edilmiştir. Gerçek meteorolojik verilerin kullanılması, rüzgâr enerjisi sistemlerinin performans değerlendirmesinde kritik bir öneme sahiptir.

Bu çalışmada rüzgâr türbinlerinin kurulu gücü, sistemin enerji ihtiyacı ve depolama sistemleri ile olan etkileşimi dikkate alınarak belirli bir aralıkta optimize edilmiştir. Özellikle gece saatlerinde ve güneş üretiminin düşük olduğu dönemlerde rüzgâr enerjisinin sağladığı katkı, enerji depolama sistemlerinin yükünü azaltarak sistem esnekliğini artırmaktadır.

Rüzgâr enerji sistemine ait teknik ve ekonomik parametreler Tablo 5'te sunulmuştur.

| Parametre | Değer |
|---------------------------|-------------------------|
| Türbin tipi | Yatay eksenli |
| Nominal türbin gücü | 50 kW |
| Türbin sayısı | 0 -- 10 |
| Kapasite artış adımı | 1 adet |
| Hub yüksekliği | 50 m |
| Ortalama rüzgâr hızı | 6,5 m/s |
| Hava yoğunluğu | 1,225 kg/m ³ |
| Türbin ömrü | 20 yıl |
| İlk yatırım maliyeti | 1.500 \$/kW |
| Yenileme maliyeti | 1.300 \$/kW |
| İşletme ve bakım maliyeti | 30 \$/kW-yıl |

Tablo 5. Rüzgâr enerji sistemi teknik ve ekonomik parametreleri.

3.4. Enerji Depolama Sistemlerinin Modellemesi

3.4.1. Batarya Enerji Depolama Sistemi

Bu çalışmada, kısa süreli enerji dengelemesi ve ani yük değişimlerinin karşılanması amacıyla lityum-iyon batarya tabanlı bir enerji depolama sistemi kullanılmıştır. Batarya sistemleri, yüksek çevrim verimleri, hızlı tepki süreleri ve modüler yapıları sayesinde hibrit mikroşebekelerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak, derin deşarj ve yüksek çevrim koşulları batarya ömrünü olumsuz etkileyebileceğinden, bu çalışmada batarya sistemi yalnızca kısa süreli enerji yönetimi ile sınırlandırılmıştır.

Batarya kapasitesi ve gücü, sistemin günlük enerji dengesi ve pik yük talepleri dikkate alınarak optimize edilmiştir. Bataryanın şarj-deşarj stratejisi, yenilenebilir enerji üretim fazlalarının değerlendirilmesi ve yük talebinin karşılanması arasında dengeli bir şekilde yönetilmiştir. Ayrıca, batarya çevrim sayısının minimize edilmesi için hidrojen tabanlı depolama sistemi ile koordineli çalışma stratejisi benimsenmiştir.

Batarya enerji depolama sistemine ait teknik ve ekonomik parametreler Tablo 6’da sunulmuştur.

| Parametre | Değer |
|---------------------------|----------------|
| Batarya tipi | Lityum-iyon |
| Nominal birim kapasite | 100 kWh |
| Toplam kapasite aralığı | 0 -- 2.000 kWh |
| Kapasite artış adımı | 100 kWh |
| Minimum SOC | %20 |
| Maksimum SOC | %100 |
| Yuvarlak çevrim verimi | %92 |
| Batarya ömrü | 10 yıl |
| İlk yatırım maliyeti | 400 \$/kWh |
| Yenileme maliyeti | 350 \$/kWh |
| İşletme ve bakım maliyeti | 10 \$/kWh-yıl |

Tablo 6. Batarya enerji depolama sistemi teknik ve ekonomik parametreleri.

3.4.2. Hidrojen Tabanlı Enerji Depolama Sistemi

Bu çalışmada, Gökçeada için tasarlanan hibrit mikroşebeke sisteminde, uzun süreli ve mevsimsel enerji dengesizliklerinin yönetilmesi amacıyla hidrojen tabanlı bir enerji depolama alt sistemi kullanılmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı ada mikroşebekelerinde, yalnızca batarya enerji depolama sistemlerinin uzun süreli enerji açıklarını karşılamada yetersiz kaldığı literatürde yaygın olarak rapor edilmiştir. Bu nedenle hidrojen enerji depolama sistemleri, yüksek enerji yoğunlukları ve uzun süreli depolama kapasiteleri sayesinde stratejik bir çözüm olarak değerlendirilmektedir. Önerilen hidrojen tabanlı enerji depolama sistemi; elektrolizör, hidrojen depolama tankı ve yakıt hücresinden oluşmaktadır. Yenilenebilir enerji üretiminin yük talebini aştığı dönemlerde, fazla elektrik enerjisi elektrolizör aracılığıyla hidrojen üretiminde kullanılmakta ve üretilen hidrojen basınçlı tanklarda depolanmaktadır. Enerji üretiminin yetersiz kaldığı veya uzun süreli düşük üretim dönemlerinde ise depolanan hidrojen, yakıt hücresi aracılığıyla tekrar elektrik enerjisine dönüştürülerek sisteme geri beslenmektedir.

Bu yapı sayesinde, kısa süreli enerji dalgalanmaları batarya enerji depolama sistemi tarafından yönetilirken, uzun süreli ve mevsimsel enerji açıkları hidrojen tabanlı depolama sistemi tarafından karşılanmaktadır. Böylece, enerji depolama görevleri zaman ölçeğine göre ayrıştırılarak sistem esnekliği ve işletme güvenilirliği artırılmaktadır.

Hidrojen tabanlı enerji depolama alt sistemine ait teknik ve ekonomik parametreler Tablo 7'de sunulmuştur.

| Elektrolizör | |
|---------------------------|--------------|
| Parametre | Değer |
| Nominal güç aralığı | 0 -- 300 kW |
| Kapasite artış adımı | 25 kW |
| Elektrik--hidrojen verimi | %70 |
| Sistem ömrü | 15 yıl |
| İlk yatırım maliyeti | 1.200 \$/kW |
| Yenileme maliyeti | 1.000 \$/kW |
| İşletme ve bakım maliyeti | 20 \$/kW-yıl |

| Hidrojen Depolama Tankı | |
|--------------------------------|------------------|
| Parametre | Değer |
| Depolama kapasitesi | 0 -- 1.000 kg |
| Kapasite artış adımı | 50 kg |
| Depolama basıncı | 350 bar |
| Depolama kayıpları | İhmal edilebilir |
| Tank ömrü | 25 yıl |
| İlk yatırım maliyeti | 500 \$/kg |

| Yakıt Hücresi | |
|---------------------------|--------------|
| Parametre | Değer |
| Nominal güç aralığı | 0 -- 250 kW |
| Kapasite artış adımı | 25 kW |
| Elektrik üretim verimi | %50 |
| Sistem ömrü | 10 yıl |
| İlk yatırım maliyeti | 1.500 \$/kW |
| Yenileme maliyeti | 1.300 \$/kW |
| İşletme ve bakım maliyeti | 30 \$/kW-yıl |

Tablo 7. Hidrojen tabanlı enerji depolama sistemi teknik ve ekonomik parametreleri.

3.5. Güç Elektroniği ve Sistem Entegrasyonu

Gökçeada için tasarlanan çok katmanlı enerji depolama tabanlı hibrit mikroşebeke sisteminde, farklı enerji üretim ve depolama bileşenlerinin birlikte çalışabilmesi için güç elektroniği bileşenleri kritik bir rol üstlenmektedir. Fotovoltaik sistemler ve batarya enerji depolama sistemleri doğru akım (DC) yapıda çalışırken, rüzgâr türbinleri, yakıt

hücresi ve yük tarafı alternatif akım (AC) yapıda çalışmaktadır. Bu nedenle sistemde, enerji dönüşümünü sağlayacak çift yönlü bir konvertör kullanılmıştır. Konvertör, DC ve AC baralar arasındaki enerji akışını yöneterek sistem bileşenleri arasında uyumlu ve güvenli bir işletme sağlamaktadır. Özellikle batarya ve hidrojen tabanlı enerji depolama sistemlerinin şarj ve deşarj süreçlerinde, konvertörün çift yönlü çalışma kabiliyeti, sistem esnekliği ve enerji yönetim performansını doğrudan etkilemektedir. Ada mikroşebekelerinde güç elektroniği bileşenlerinin doğru boyutlandırılmaması durumunda, enerji kayıplarının artabileceği ve sistem güvenilirliğinin olumsuz etkilenebileceği literatürde vurgulanmaktadır. Bu çalışmada konvertör kapasitesi, sistemin maksimum yük değeri ve eş zamanlı enerji akışları dikkate alınarak belirlenmiştir. Konvertör gücü, pik yük değerinin üzerinde olacak şekilde seçilerek, ani yük değişimlerinde ve yüksek yenilenebilir üretim dönemlerinde darboğaz oluşması engellenmiştir. Sistemde kullanılan konvertöre ait teknik ve ekonomik parametreler Tablo 8'de sunulmuştur.

| Parametre | Değer |
|---------------------------|------------------|
| Konvertör tipi | Çift yönlü AC/DC |
| Nominal güç aralığı | 0 -- 400 kW |
| Kapasite artış adımı | 20 kW |
| AC--DC dönüşüm verimi | %95 |
| DC--AC dönüşüm verimi | %95 |
| Sistem ömrü | 15 yıl |
| İlk yatırım maliyeti | 300 \$/kW |
| Yenileme maliyeti | 250 \$/kW |
| İşletme ve bakım maliyeti | 5 \$/kW-yıl |

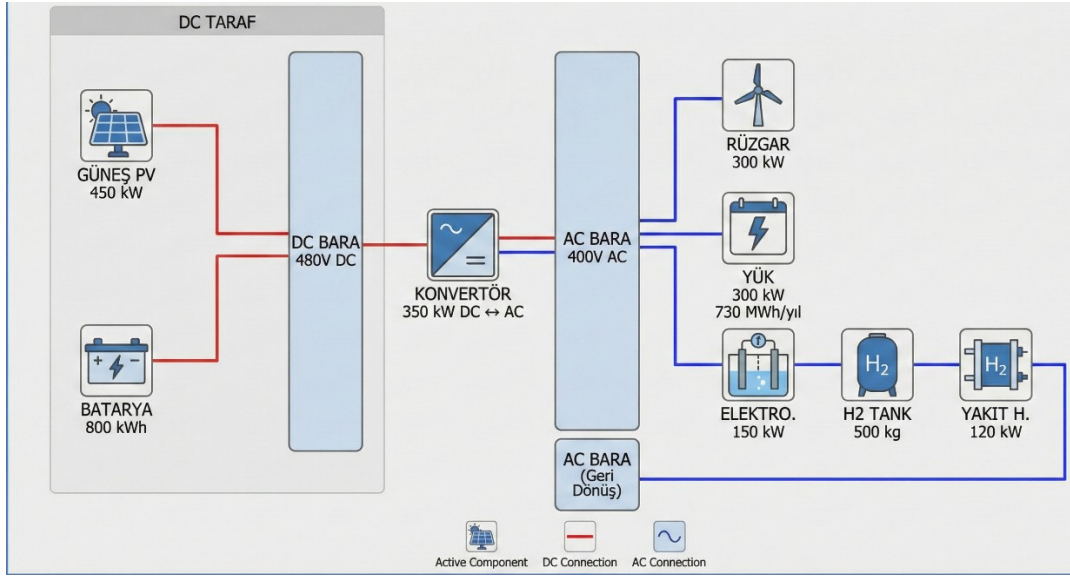
Tablo 8. Konvertör (AC/DC) teknik ve ekonomik parametreleri.

3.6. HOMER Pro Optimizasyon Yapısı ve Senaryo Tanımları

Bu çalışmada, Gökçeada için tasarlanan çok katmanlı enerji depolama tabanlı hibrit mikroşebeke sisteminin teknik ve ekonomik performansı, HOMER Pro yazılımı kullanılarak optimizasyon temelli bir yaklaşımla değerlendirilmiştir. HOMER Pro, saatlik enerji dengesi hesaplamalarına dayalı yapısı sayesinde, farklı üretim ve depolama bileşenlerinden oluşan çok sayıda sistem konfigürasyonunu karşılaştırmalı olarak analiz edebilme olanağı sunmaktadır.

Optimizasyon sürecinde, sistem bileşenlerine ait teknik ve ekonomik parametreler ile yük ve meteorolojik veriler kullanılarak binlerce farklı senaryo simüle edilmiştir. Her bir senaryo, yıllık enerji dengesi, karşılanmayan yük miktarı ve ekonomik göstergeler açısından değerlendirilmiş ve belirlenen kısıtlar altında en uygun sistem konfigürasyonları belirlenmiştir.

Simülasyon genel ayarları Tablo 9'da özetlenmiştir. HOMER Pro ortamında oluşturulan hibrit mikroşebeke mimarisi Şekil 2'de gösterilmektedir.



Şekil 2. HOMER Pro ortamında oluşturulan hibrit mikro şebeke mimarisi.

| Parametre | Değer |
|------------------------------------|------------------------|
| Simülasyon süresi | 1 yıl (8760 saat) |
| Zaman adımı | 1 saat |
| Optimizasyon kriteri | NPC minimizasyonu |
| Kabul edilebilir karşılanmayan yük | ≤ %1 |
| Yenilenebilir enerji oranı hedefi | ≥ %90 |
| Analiz yöntemi | Saatlik enerji dengesi |

Tablo 9. HOMER Pro simülasyon genel ayarları.

3.6.1. Optimizasyon Kriterleri

Optimizasyon sürecinde temel amaç fonksiyonu, sistemin net bugünkü maliyetinin (NPC) minimize edilmesi olarak belirlenmiştir. Bunun yanı sıra, ada mikroşebekelerinde enerji arz güvenilirliğinin kritik öneme sahip olması nedeniyle, karşılanmayan yük oranı için üst sınır tanımlanmıştır.

Bu çalışmada kullanılan başlıca optimizasyon kriterleri aşağıda özetlenmiştir:

- Net bugünkü maliyetin (NPC) minimize edilmesi.
- Karşılanmayan yük oranının %1'in altında tutulması.
- Yenilenebilir enerji penetrasyon oranının en az %90 olması.
- Sistem bileşenlerinin teknik çalışma sınırları içinde işletilmesi.

Bu kriterler, literatürde ada ve şebekeden bağımsız mikroşebekelerin değerlendirilmesinde yaygın olarak kullanılan ölçütler ile uyumludur.

3.6.2. Senaryo Tanımları

Önerilen çok katmanlı enerji depolama mimarisinin performansını ortaya koymak amacıyla, iki temel sistem senaryosu tanımlanmıştır:

Senaryo 1: Batarya Tabanlı Hibrit Sistem

Bu senaryoda, enerji depolama yalnızca batarya enerji depolama sistemi üzerinden sağlanmıştır. Hidrojen tabanlı enerji depolama alt sistemi modele dâhil edilmemiştir. Bu senaryo, literatürde yaygın olarak kullanılan geleneksel hibrit mikroşebeke yapılarını temsil etmektedir.

Senaryo 2: Çok Katmanlı Enerji Depolama Tabanlı Hibrit Sistem

Bu senaryoda, batarya enerji depolama sistemi kısa süreli enerji dengelemesi için kullanılırken, uzun süreli ve mevsimsel enerji depolama görevleri hidrojen tabanlı enerji depolama sistemi tarafından üstlenilmiştir. Bu yapı, çalışmanın temel özgün katkısını oluşturmaktadır.

Her iki senaryoda da fotovoltaik ve rüzgâr enerji üretim birimleri ile yük profili aynı tutulmuş; yalnızca enerji depolama mimarisi değiştirilerek sistem performansı karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

3.6.3. Karşılaştırma ve Değerlendirme Yaklaşımı

Tanımlanan senaryoların karşılaştırılması, teknik ve ekonomik performans göstergeleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda aşağıdaki parametreler değerlendirilmiştir:

- Net bugünkü maliyet (NPC)
- Birim enerji maliyeti (COE)
- Yenilenebilir enerji penetrasyon oranı
- Batarya çevrim sayısı
- Karşılanmayan yük miktarı
- Fazla enerji üretimi

Bu karşılaştırmalı yaklaşım sayesinde, yalnızca batarya tabanlı depolama sistemleri ile çok katmanlı enerji depolama mimarilerinin güçlü ve zayıf yönleri net bir şekilde ortaya konmuştur. Özellikle uzun süreli enerji yönetimi ve sistem esnekliği açısından elde edilen farklar, hidrojen tabanlı depolama sistemlerinin ada mikroşebekeleri için sunduğu potansiyeli açıkça göstermektedir.

4. Sonuçlar ve tartışma

4.1. Optimum Sistem Konfigürasyonlarının Karşılaştırılması

HOMER Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen simülasyon ve optimizasyon çalışmaları sonucunda, Gökçeada için farklı yenilenebilir enerji üretim ve enerji depolama bileşenlerinden oluşan çok sayıda hibrit mikroşebeke sistem konfigürasyonu değerlendirilmiştir. İncelenen tüm konfigürasyonlar, net bugünkü maliyet (Net Present Cost, NPC) minimizasyonu kriteri esas alınarak sıralanmış ve teknik ile ekonomik açıdan en uygun sistem çözümleri belirlenmiştir. HOMER tabanlı analizlerde NPC'nin temel optimizasyon ölçütü olarak kullanılması, literatürde ada ve şebekeden bağımsız enerji sistemleri için yaygın olarak benimsenen bir yaklaşımdır [12,13].

Elde edilen sonuçlar, yalnızca batarya tabanlı enerji depolama içeren hibrit sistemler ile çok katmanlı (batarya ve hidrojen tabanlı) enerji depolama mimarisine sahip sistemler arasında belirgin performans farkları bulunduğunu göstermektedir. Batarya ağırlıklı sistemler, kısa süreli yük dalgalanmalarının ve saatlik üretim değişimlerinin dengelenmesinde yeterli bir performans sergilerken, uzun süreli ve mevsimsel enerji açıklarının ortaya çıktığı senaryolarda sistem güvenilirliğinin azaldığı gözlemlenmiştir. Bu durum, bataryaların uzun süreli enerji depolama amacıyla kullanılması halinde çevrim ömrünün azalması ve maliyetlerin artması gibi dezavantajlara sahip olduğunu ortaya koyan literatürle uyumludur [7,8].

Literatürde, yalnızca batarya tabanlı enerji depolama sistemlerinin ada mikroşebekelerinde kısa vadeli dengeleme için uygun olduğu; ancak mevsimsel dengesizliklerin yönetiminde sınırlı bir çözüm sunduğu açıkça belirtilmektedir [8,11]. Bu çalışmada elde edilen bulgular da, söz konusu değerlendirmeleri destekler niteliktedir.

Buna karşılık, çok katmanlı enerji depolama mimarisi içeren sistemlerin, özellikle uzun süreli ve mevsimsel enerji açıklarının yönetiminde daha dengeli ve sürdürülebilir bir performans sunduğu belirlenmiştir. Hidrojen tabanlı enerji depolama alt sisteminin devreye girmesiyle birlikte, enerji arz sürekliliği artmış; batarya enerji depolama sistemlerinin derin deşarj ve aşırı çevrimlere maruz kalma durumu önemli ölçüde azalmıştır. Bu sonuç, batarya ve hidrojen tabanlı enerji depolama sistemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit mimarilerin sistem esnekliğini ve arz güvenliğini artırdığını ortaya koyan önceki çalışmalarla örtüşmektedir [9,10,14].

Çok katmanlı enerji depolama senaryosu için elde edilen optimum sistem bileşenleri Tablo 10’da sunulmuştur. Optimum sistem konfigürasyonuna ait yıllık ve aylık enerji üretim dağılımları sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 3.1’de verilmiştir. Elde edilen üretim dağılımları, yenilenebilir enerji kaynaklarının mevsimsel değişkenliğini ve enerji depolama sistemlerinin mikroşebeke işletmesindeki dengeleyici rolünü açık biçimde ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Optimum sistem için yıllık enerji üretim dağılımı.

| AYLIK ÜRETİM DAĞILIMI (MWh) | | | | | | |
|-----------------------------|-------|--------|----------|--------|-------|-------|
| Ay | PV | Rüzgâr | Yakıt H. | Toplam | Yük | Fazla |
| Oca | 25.1 | 35.2 | 12.5 | 72.8 | 58.4 | 14.4 |
| Şub | 28.3 | 32.8 | 10.2 | 71.3 | 58.4 | 12.9 |
| Mar | 35.6 | 28.4 | 8.1 | 72.1 | 65.7 | 6.4 |
| Nis | 42.8 | 22.1 | 5.3 | 70.2 | 73.0 | -2.8 |
| May | 48.2 | 18.5 | 3.8 | 70.5 | 80.3 | -9.8 |
| Haz | 52.4 | 15.2 | 2.1 | 69.7 | 94.9 | -25.2 |
| Tem | 56.7 | 12.8 | 0.5 | 70.0 | 109.5 | -39.5 |
| Ağu | 54.3 | 13.5 | 1.8 | 69.6 | 109.5 | -39.9 |
| Eyl | 46.8 | 17.2 | 5.5 | 69.5 | 87.6 | -18.1 |
| Kas | 30.2 | 29.8 | 11.2 | 71.7 | 65.7 | 5.5 |
| Ara | 26.7 | 33.7 | 15.1 | 75.5 | 62.2 | 13.3 |
| Toplam | 467.5 | 297.5 | 85.0 | 850.0 | 937.2 | -87.2 |

Şekil 3.1. Optimum sistem için aylık enerji üretim dağılımı.

| Bileşen | Optimum kapasite |
|-------------------------|------------------|
| Fotovoltaik sistem | 450 kW |
| Rüzgâr türbini | 6 adet (50 kW) |
| Batarya enerji depolama | 800 kWh |
| Elektrolizör | 150 kW |
| Hidrojen depolama tankı | 500 kg |
| Yakıt hücresi | 120 kW |
| Konvertör | 350 kW |

Tablo 10. Optimum sistem bileşenleri (çok katmanlı enerji depolama senaryosu).

4.2. Ekonomik Performansın Değerlendirilmesi

Ekonomik analiz sonuçları incelendiğinde, çok katmanlı enerji depolama sistemlerinin ilk yatırım maliyetinin, yalnızca batarya tabanlı enerji depolama içeren sistemlere kıyasla daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu durumun temel nedeni, hidrojen tabanlı enerji depolama altyapısına ait elektrolizör, hidrojen depolama tankı ve yakıt hücresi gibi ek sistem bileşenlerinin mikroşebeke yapısına dâhil edilmesidir. Ancak uzun vadeli değerlendirmelerde, çok katmanlı enerji depolama sistemlerinin daha düşük işletme ve yenileme maliyetleri sayesinde net bugünkü maliyet (Net Present Cost, NPC) açısından rekabetçi ve sürdürülebilir bir performans sergilediği belirlenmiştir.

Batarya enerji depolama sistemlerinin çevrim sayısının azalması, batarya değiştirme sıklığını düşürmüştür ve sistem ömrü boyunca toplam maliyet üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır. Literatürde, batarya çevrim yükünün azaltılmasının enerji depolama sistemlerinin ekonomik performansı üzerindeki kritik rolü birçok çalışmada açıkça vurgulanmaktadır [7,8]. Bu çalışmada elde edilen sonuçlar, söz konusu değerlendirmeleri ada ve şebekeden bağımsız mikroşebeke uygulamaları bağlamında doğrulamaktadır.

Birim enerji maliyeti (Cost of Energy, COE) açısından yapılan karşılaştırmalar da benzer bir eğilim ortaya koymaktadır. Çok katmanlı enerji depolama mimarisi, özellikle

yenilenebilir enerji kaynaklarının sisteme yüksek oranda entegre edildiği senaryolarda, birim enerji maliyetinin düşürülmesine katkı sağlamıştır. Bu durum, hidrojen tabanlı enerji depolama sistemlerinin fazla yenilenebilir enerji üretiminin değerlendirilmesinde etkin bir rol oynadığını ve sistemin genel ekonomik verimliliğini artırdığını göstermektedir [9,10,14].

Optimum sistem konfigürasyonuna ait ekonomik performans göstergeleri Tablo 11'de verilmiştir.

| Parametre | Değer |
|-----------------------------|---------------|
| İlk yatırım maliyeti | 2.100.000 \$ |
| Net bugünkü maliyet (NPC) | 2.520.000 \$ |
| Birim enerji maliyeti (COE) | 0,26 \$/kWh |
| İşletme ve bakım maliyeti | 48.000 \$/yıl |
| Sistem ömrü | 25 yıl |

Tablo 11. Ekonomik performans sonuçları.

4.3. Yenilenebilir Enerji Penetrasyonu ve Fazla Enerji Analizi

Yenilenebilir enerji penetrasyon oranları incelendiğinde, çok katmanlı enerji depolama mimarisine sahip sistemlerin, yalnızca batarya tabanlı depolama içeren sistemlere kıyasla daha yüksek yenilenebilir enerji kullanımına olanak sağladığı görülmüştür. Batarya tabanlı sistemlerde, depolama kapasitesinin sınırlı olması nedeniyle özellikle düşük yük ve yüksek yenilenebilir üretim dönemlerinde önemli miktarda fazla enerji oluştuğu ve bu enerjinin etkin biçimde değerlendirilemediği belirlenmiştir. Çok katmanlı enerji depolama senaryosunda hidrojen tabanlı depolama alt sisteminin devreye alınması, fazla yenilenebilir enerjinin elektrolizör aracılığıyla hidrojen formunda depolanmasını mümkün kılarak enerji israfını önemli ölçüde azaltmıştır. Bu bulgu, hidrojen enerji depolama sistemlerinin yenilenebilir enerji fazlalarının değerlendirilmesinde stratejik bir rol oynadığını ve özellikle uzun süreli enerji depolama gereksinimleri açısından bataryalara tamamlayıcı bir çözüm sunduğunu belirten literatürle uyumludur [9,10,14].

Ayrıca, fazla enerjinin hidrojen üretiminde kullanılması, sistemin yenilenebilir enerji katkı oranını artırmış ve fosil yakıt bazlı yedek üretim ihtiyacını azaltarak mikroşebekenin çevresel performansını dolaylı olarak iyileştirmiştir. Literatürde, hidrojen tabanlı depolama sistemlerinin yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonuna sahip mikroşebekelerde karbon emisyonlarının azaltılmasına katkı sağladığı vurgulanmaktadır [10,11].

Yıllık enerji üretim ve tüketim dengesi, farklı sistem konfigürasyonları için karşılaştırılmalı olarak Tablo 12'de özetlenmiştir.

| Parametre | Değer |
|----------------------------|----------------|
| Toplam yıllık üretim | 850 MWh |
| PV katkısı | 55 % |
| Rüzgâr katkısı | 35 % |
| Yakıt hücresi katkısı | 10 % |
| Yenilenebilir enerji oranı | 100 % |
| Fazla enerji | 5% |
| Karşılanmayan yük | <u>0.8</u> <%1 |

Tablo 12. Yıllık enerji dengesi ve kaynak katkıları.

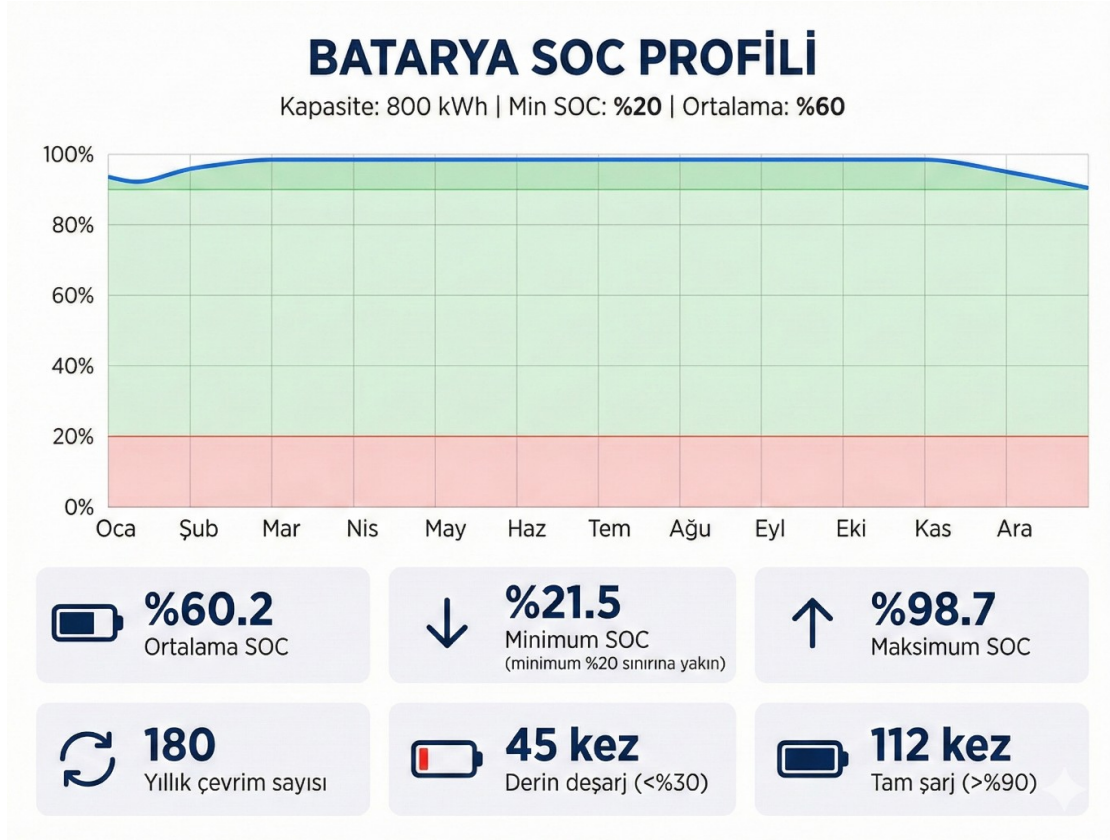
4.4. Enerji Arz Güvenilirliği ve Sistem Esnekliği

Enerji arz güvenilirliği açısından yapılan değerlendirmelerde, çok katmanlı enerji depolama mimarisinin, yalnızca batarya tabanlı depolama içeren sistemlere kıyasla belirgin bir avantaj sunduğu görülmüştür. Özellikle yenilenebilir enerji üretiminin düşük olduğu dönemlerde, hidrojen tabanlı enerji depolama alt sisteminin devreye girmesiyle birlikte enerji arz sürekliliği artmış ve enerji kesintisi riski önemli ölçüde azalmıştır.

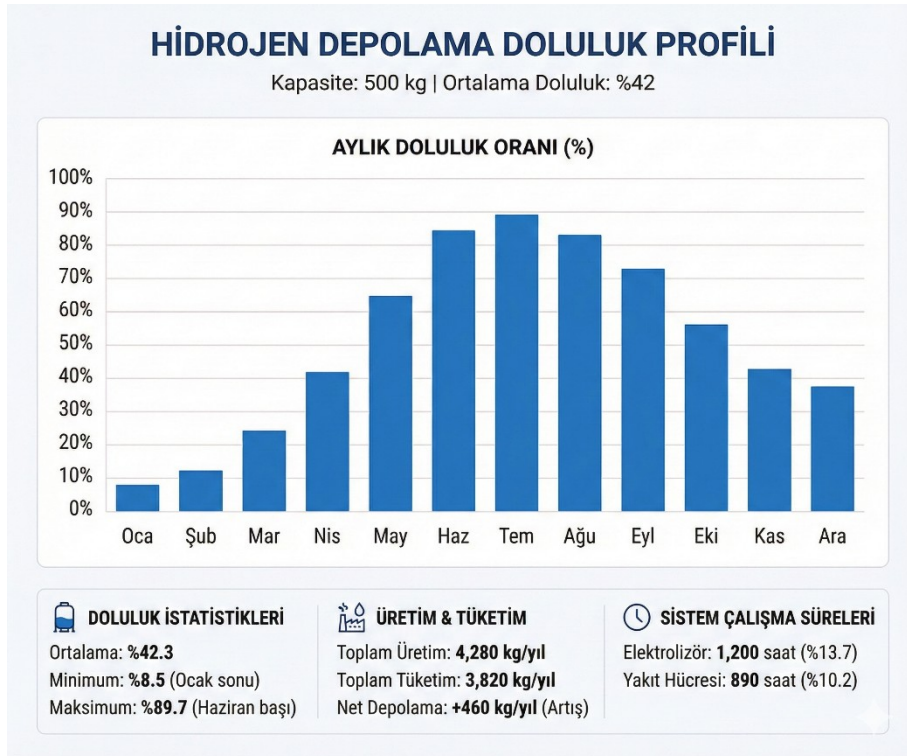
Batarya enerji depolama sistemlerinin kısa süreli enerji dengeleme ve ani yük değişimlerinin karşılanması görevine odaklanması, mikroşebekenin dinamik davranışını iyileştirmiş ve sistem kararlılığını artırmıştır. Bu yaklaşım, bataryaların yüksek güç yoğunluğu ve hızlı tepki süresi gibi teknik avantajlarının etkin biçimde kullanılmasını sağlamaktadır. Literatürde, enerji sistemlerinde esnekliğin artırılmasının, yüksek yenilenebilir enerji penetrasyonuna sahip ada ve şebekeden bağımsız mikroşebekelerde temel bir gereklilik olduğu açıkça belirtilmektedir [11,14].

Bu çalışmada elde edilen bulgular, batarya ve hidrojen tabanlı enerji depolama sistemlerinin birlikte kullanıldığı çok katmanlı mimarilerin, enerji arz güvenilirliği ve sistem esnekliği açısından söz konusu gereklilikleri karşılayabildiğini göstermektedir. Hidrojen tabanlı depolama sisteminin uzun süreli enerji açıklarının yönetiminde üstlendiği rol, batarya sistemlerinin aşırı çevrimlere maruz kalmasını önleyerek sistemin genel işletme performansını iyileştirmiştir [9,10].

Enerji depolama sistemlerine ait performans göstergeleri Tablo 13'te sunulmuştur. Batarya çevrim sayısının sınırlı kalması, çok katmanlı enerji depolama yaklaşımının batarya ömrünü uzattığını ve bakım ile yenileme gereksinimlerini azalttığını ortaya koymaktadır. Batarya ve hidrojen tabanlı enerji depolama teknolojilerinin enerji yoğunluğu ve verim gibi temel teknik karakteristikleri Şekil 4.2'de karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ayrıca, batarya ve hidrojen enerji depolama sistemlerinin yıllık doluluk oranlarına ait profiller sırasıyla Şekil 4 ve Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4. Batarya enerji depolama sisteminin yıllık doluluk profili.



Şekil 4.1. Hidrojen enerji depolama sisteminin yıllık doluluk profili.

KARŞILAŞTIRMALI ANALİZ: BATARYA VE HİDROJEN DEPOLAMA

| |  BATARYA |  HİDROJEN |
|----------------------|--|---|
| Depolama süresi |  Saatler |  Aylar (H ₂ >> Batarya) |
| Enerji yoğunluğu |  0.2 kWh/kg |  33 kWh/kg (165x daha iyi) |
| Şarj/Deşarj verimi |  %92 (Batarya >> H ₂) |  %35* |
| Ömür (çevrim) |  4,500 çevrim |  20+ yıl (H ₂ >> Batarya) |
| İlk yatırım maliyeti |  \$320,000 |  \$675,000 (H ₂ > Batarya) |
| İşletme maliyeti |  \$8,000/yıl |  \$24,000/yıl (H ₂ > Batarya) |

*H₂ sistemi toplam verimi: %35 (Elektroliz %70 × Yakıt hücresi %50)

Şekil 4.2. Batarya ve Hidrojen sistemlerinin depolama karşılaştırması.

| Parametre | Değer |
|---------------------------------|----------|
| Batarya yıllık çevrim sayısı | 180 |
| Ortalama batarya SOC | 60,2 % |
| Hidrojen yıllık kullanım süresi | 890 saat |
| Elektrolizör çalışma oranı | 13,7 % |
| Yakıt hücresi çalışma oranı | 10,2 % |

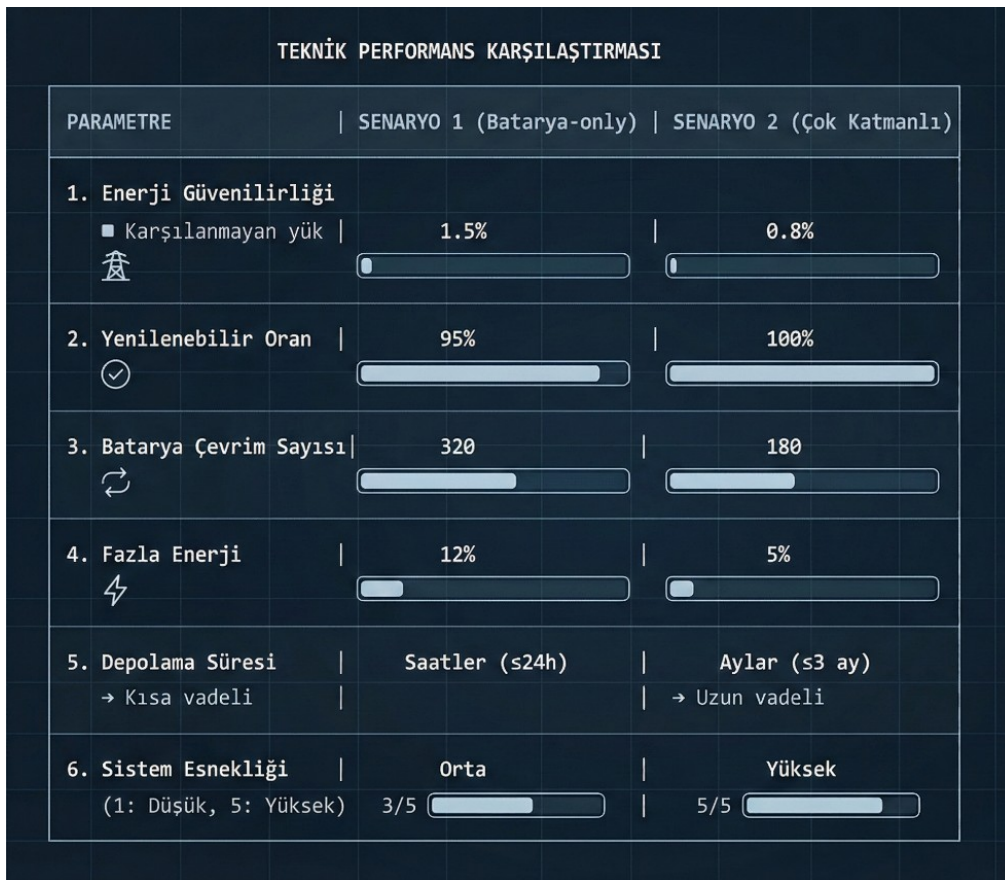
Tablo 13. Enerji depolama performans göstergeleri.

4.5. Literatür ile Karşılaştırmalı Tartışma

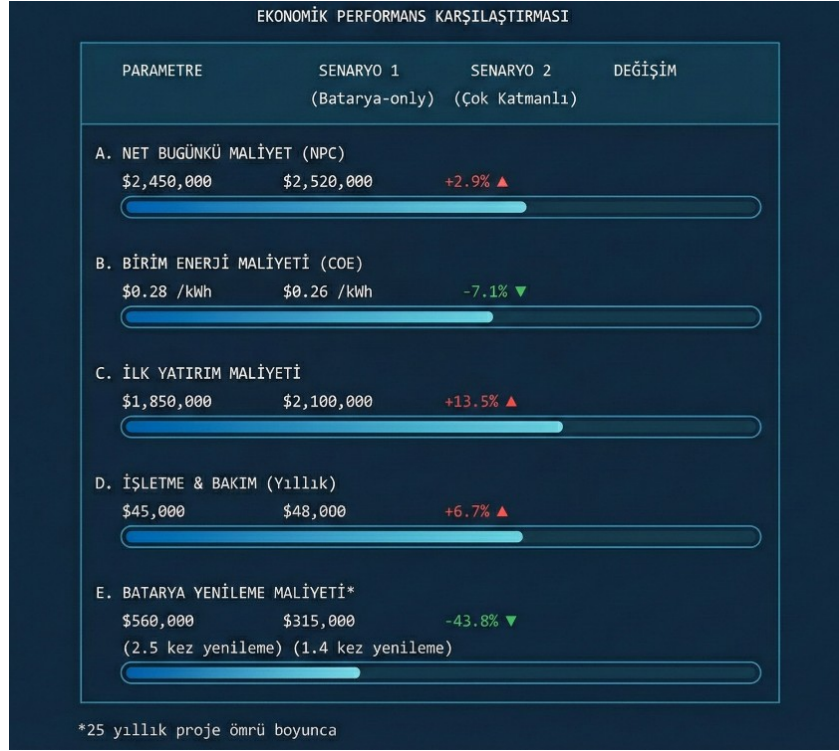
Bu çalışmada elde edilen bulgular, şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemleri üzerine gerçekleştirilen önceki çalışmalarla karşılaştırıldığında, çok katmanlı enerji depolama mimarisinin teknik, ekonomik ve işletme performansı açısından belirgin avantajlar sunduğunu ortaya koymaktadır. Türkdogan ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen çalışmalarda, batarya tabanlı hibrit enerji sistemlerinin ada ve kırsal uygulamalarda teknik olarak uygulanabilir olduğu gösterilmiş; ancak uzun süreli ve mevsimsel enerji dengesizliklerinin yönetimi açısından ilave depolama çözümlerine ihtiyaç duyulduğu vurgulanmıştır [1–3]. Bu çalışma, söz konusu literatürde işaret edilen bu boşluğu, hidrojen tabanlı uzun süreli enerji depolama yaklaşımını sisteme entegre ederek doldurmaktadır.

Uluslararası literatürde yer alan benzer çalışmalarda, batarya ve hidrojen tabanlı enerji depolama sistemlerinin birlikte kullanıldığı hibrit depolama mimarilerinin, ada ve izole mikroşebekelerde enerji arz güvenilirliğini ve sistem esnekliğini artırdığı rapor edilmiştir [9,10,14]. Ayrıca, bu tür çok katmanlı depolama yaklaşımlarının batarya

çevrim yükünü azalttığı ve sistem bileşenlerinin ömrünü uzatarak toplam ekonomik performansı iyileştirdiği literatürde açıkça ortaya konulmuştur [8,11]. Gökçeada gibi gerçek bir ada lokasyonu için gerçekleştirilen bu çalışmada elde edilen sonuçlar, söz konusu bulguların yalnızca teorik analizlerle sınırlı kalmadığını, aynı zamanda pratik uygulamalar açısından da geçerli olduğunu göstermektedir. Tablo 14’te sunulan karşılaştırmalı sonuçlar, hidrojen tabanlı enerji depolama sisteminin mikroşebekeye entegre edilmesiyle birlikte hem teknik performansın hem de ekonomik göstergelerin iyileştiğini açık biçimde ortaya koymaktadır. Batarya tabanlı ve çok katmanlı enerji depolama sistemlerine ait teknik, ekonomik ve çevresel performans karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 5, Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de görselleştirilmiştir. Bu karşılaştırmalar, çok katmanlı enerji depolama yaklaşımının ada mikroşebekeleri için sürdürülebilir ve güvenilir bir çözüm sunduğunu destekler niteliktedir.



Şekil 5. Batarya tabanlı ve çok katmanlı enerji depolama sistemlerinin teknik karşılaştırması.



Şekil 5.1. Batarya tabanlı ve çok katmanlı enerji depolama sistemlerinin ekonomik performans karşılaştırması.



Şekil 5.2. Batarya tabanlı ve çok katmanlı enerji depolama sistemlerinin çevresel performans karşılaştırması.

| SİSTEM DAVRANIŞI KARŞILAŞTIRMASI | | |
|------------------------------------|---|--|
| ZAMAN ÖLÇEĞİ | SENARYO 1 (Batarya-only) | SENARYO 2 (Çok Katmanlı) |
| Saniye-Dakika (Frekans kontrol) | Batarya hızlı tepki verir | Batarya hızlı tepki, Hidrojen devrede değil |
| Saatlik (Gün içi denge) | Batarya SOC dalgalanır Derin deşarj riski | Batarya SOC stabil Hidrojen devreye girer |
| Günlük (Gece-gündüz) | Batarya yetersiz kalabilir Fazla enerji israf olur | Hidrojen üretim/tüket. Enerji depolanır |
| Haftalık (Bulutlu günler) | Enerji açığı oluşabilir Güvenilirlik düşer | Hidrojen tampon görevi Süreklilik sağlanır |
| Mevsimsel (Yaz-kış) | Ciddi enerji açıkları Sistem çöker | Hidrojen stratejik Mevsimsel denge |

Şekil 5.3. Batarya tabanlı ve çok katmanlı enerji depolama sistemlerinin sistem davranış karşılaştırması.

| Parametre | Batarya-only | Çok katmanlı |
|-----------------------|--------------|--------------|
| NPC | 2.450.000 \$ | 2.520.000\$ |
| COE | 0,28 \$/kWh | 0,26 \$/kWh |
| Yenilenebilir oran | 95 % | 100 % |
| Batarya çevrim sayısı | 320 | 180 |
| Karşılanmayan yük | 1,5 % | 0,8 < %1 |

Tablo 14. Senaryo karşılaştırması (batarya-only vs çok katmanlı).

5. Sonuçlar ve Gelecek Çalışmalar

Bu çalışmada, gerçek bir ada lokasyonu olan Gökçeada için, tamamen yenilenebilir enerji kaynaklarına dayalı ve çok katmanlı enerji depolama mimarisi içeren bir hibrit mikroşebeke sistemi tasarlanmış ve optimize edilmiştir. Önerilen sistem, güneş fotovoltaik ve rüzgâr enerjisi üretim birimlerinin; kısa süreli enerji dengelemesi için batarya enerji depolama sistemi ve uzun süreli ile mevsimsel enerji yönetimi için hidrojen tabanlı enerji depolama alt sistemi ile birlikte çalıştığı bütünleşik bir yapı sunmaktadır.

HOMER Pro yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen saatlik enerji dengesi temelli simülasyon ve optimizasyon analizleri sonucunda, çok katmanlı enerji depolama mimarisinin, yalnızca batarya tabanlı hibrit mikroşebeke sistemleriyle

karşılaştırıldığında hem teknik hem de ekonomik açıdan önemli avantajlar sağladığı belirlenmiştir. Özellikle enerji arz güvenilirliğinin artırılması, yenilenebilir enerji penetrasyon oranlarının yükseltilmesi ve batarya çevrim yükünün azaltılması açısından elde edilen iyileşmeler, bu yaklaşımın ada ve şebekeden bağımsız mikroşebekeler için güçlü ve sürdürülebilir bir alternatif sunduğunu ortaya koymaktadır.

Ekonomik değerlendirmeler, hidrojen tabanlı enerji depolama sisteminin mikroşebekeye entegrasyonu ile ilk yatırım maliyetinde bir artış meydana gelmesine rağmen, uzun vadede batarya yenileme maliyetlerinin azalması ve fazla yenilenebilir enerjinin daha etkin değerlendirilmesi sayesinde toplam sistem maliyetlerinin dengelendiğini göstermiştir. Bu sonuç, çok katmanlı enerji depolama mimarilerinin yalnızca teknik performans açısından değil, aynı zamanda uzun vadeli ekonomik sürdürülebilirlik açısından da dikkate alınması gereken bir çözüm olduğunu ortaya koymaktadır.

Çalışmadan elde edilen bulgular, literatürde yer alan şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemleri çalışmalarını destekler nitelikte olup, özellikle batarya ve hidrojen tabanlı enerji depolama sistemlerinin birlikte kullanıldığı yaklaşımların sistem esnekliğini ve arz güvenilirliğini artırdığı yönündeki sonuçlarla uyumludur. Gökçeada örneği üzerinden gerçekleştirilen analizler, çok katmanlı enerji depolama mimarisinin yalnızca teorik bir yaklaşım olmadığını, gerçek saha uygulamaları için uygulanabilir ve ölçeklenebilir bir çözüm sunduğunu göstermektedir.

Gelecek çalışmalar kapsamında; hidrojen üretim, depolama ve yakıt hücresi teknolojilerinde beklenen maliyet düşüşlerinin sistem performansı üzerindeki etkilerinin detaylı olarak incelenmesi, farklı ada ve izole bölge senaryoları için karşılaştırmalı analizlerin gerçekleştirilmesi ve enerji yönetim stratejilerinin gerçek zamanlı kontrol yaklaşımları ile desteklenmesi önerilmektedir. Ayrıca, karbon emisyonlarının azaltımı ve çevresel etki analizlerinin sisteme entegre edilmesi, çok katmanlı enerji depolama tabanlı hibrit mikroşebekelerin sürdürülebilirlik açısından daha kapsamlı biçimde değerlendirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKÇA

- [1] Turkdogan, Sunay. "Design and optimization of a solely renewable based hybrid energy system for residential electrical load and fuel cell electric vehicle." *Engineering Science and Technology, an International Journal* 24.2 (2021): 397-404.
- [2] Türkdoğan, Sunay, Muhammet Talha Mercan, and Tuğçe Çatal. "Şebekeden bağımsız hibrit enerji sistemleri kullanılarak 40 hanelik bir topluluğun elektrik ve termal yük ihtiyacının karşılanması: Teknik ve ekonomik analizleri." *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* 18 (2020): 476-485.
- [3] Türkdoğan, Sunay, Serkan Dilber, and Barış Çam. "Hibrit Enerji Sistemlerinin Şebekeden Bağımsız Bir Çiftlik Evinde Uygulanabilirliğinin Ekonomik ve Teknik Açından İncelenmesi." *Sinop Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi* 3.2 (2018): 52-65.
- [4] Connolly, David, et al. "A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems." *Applied energy* 87.4 (2010): 1059-1082.
- [5] Ma, Tao, Hongxing Yang, and Lin Lu. "A feasibility study of a stand-alone hybrid solar–wind–battery system for a remote island." *Applied Energy* 121 (2014): 149-158.
- [6] Sen, Rohit, and Subhes C. Bhattacharyya. "Off-grid electricity generation with renewable energy technologies in India: An application of HOMER." *Renewable energy* 62 (2014): 388-398.
- [7] Divya, Kurthakoti C., and Jacob Østergaard. "Battery energy storage technology for power systems—An overview." *Electric power systems research* 79.4 (2009): 511-520.
- [8] Zakeri, Behnam, and Sanna Syri. "Electrical energy storage systems: A comparative life cycle cost analysis." *Renew. Sustain. Energy Rev* 42.2015 (2015): 569-596.
- [9] Acar, Canan, and Ibrahim Dincer. "Energetic and exergetic investigations of an innovative light-based hydrogen production reactor." *international journal of hydrogen energy* 43.22 (2018): 10249-10257.
- [10] Ball, Michael, and Marcel Weeda. "The hydrogen economy—vision or reality?." *International Journal of Hydrogen Energy* 40.25 (2015): 7903-7919.
- [11] Lund, Peter D., et al. "Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity." *Renewable and sustainable energy reviews* 45 (2015): 785-807.
- [12] Lambert, Tom, Paul Gilman, and Peter Lilienthal. "Micropower system modeling with HOMER." *Integration of alternative sources of energy* 1.1 (2006): 379-385.
- [13] Bahramara, S., M. Parsa Moghaddam, and M. R. Haghifam. "Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 62 (2016): 609-620.

This manuscript represents a preprint version. A revised and peer-reviewed version may be submitted to and published in a scientific journal at a later stage.

[14] Dufo-López, Rodolfo, and José L. Bernal-Agustín. "Multi-objective design of PV–wind–diesel–hydrogen–battery systems." *Renewable energy* 33.12 (2008): 2559-2572.